

交通部中央氣象署

委託研究計畫(期末)成果報告

臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (3/3)
The Quantitative Study on the Storm Surge Forecasting
and Inundation model in Taiwan (3/3)

計畫類別：☐氣象 ☒海象 ☐地震

計畫編號：MOTC-CWB-112-O-03

執行期間：112 年 03 月 21 日至 112 年 12 月 29 日

計畫主持人：吳祚任

執行機構：中華民國地球物理學會

中華民國 112 年 12 月 27 日

政府研究計畫（期末）報告摘要資料表

計畫中文名稱	臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究(3/3)		
計畫編號	MOTC-CWB-112-O-03		
主管機關	交通部中央氣象署		
執行機構	中華民國地球物理學會		
年度	112	執行期間	112.03.21 至 112.12.29
本期經費 (單位：千元)	2,520 千元		
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100%	100%	0 %
經費支用	預定 (千元)	實際 (千元)	支用率 (%)
	2,250 千元	2,250 千元	100%
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	吳祚任		林君蔚
			范子軒
			林品潔
			曾歆倚
			莊美惠
			羅古納
報告頁數	326 頁	使用語言	中文
中英文 關鍵詞	COMCOT 風暴潮溢淹預報模式、COMCOT 暴潮系集預報系統、港內外潮汐分析、調和分析、精進模式；COMCOT Storm Surge and Associated Inundation Forecasting System, COMCOT Storm Surge ensemble prediction system, Tidal analysis, Harmonic analysis, Model Improvement		
研究目的	本計畫將針對現有之暴潮預報系統加以精進，包括暴潮預報系統理想風場模式更新、三維模式之港灣海堤遮蔽效應模擬分析、以及暴潮預報系統作業化測試及預報效能提升評估。在理想風場模式更新部分，將分析過往侵台颱風案例，剖析其風速場與氣壓場在受到中央山脈干擾時之風場特性，以調校適合用於臺灣之理想風場，並藉以減少系集個數與提升準確度。下半年度針對港灣遮蔽效應研究，將求解三維 Navier-Stokes 方程式，並搭配 VOF 流體體積法，以模擬並分析潮汐進入港灣後所可能發生之相位遲滯 (Phase Lag) 與波高變化。研究結果，將可提供暴潮預報系統校準之用。在暴潮預報系統作業化測試及預報效能提升評估部分，並評估提升預報效		

	能之方法。
研究成果	1. 本研究將最佳路徑參數生成之理想風場分布與再分析風場互相比較。當颱風中心距離台灣 100 公里以上，E11 描述颱風結構可以得到最小之方均根誤差；颱風距離台灣 100 公里內時，近中心最大風速大於 33 公尺/秒，則以本署理想風場模式表現較好；近中心最大風速小於 33 公尺/秒時，W06 可以得到較低之風速誤差。 2. 於檢視暴潮模式預報誤差時，本研究將預報情境依據警報類型及預報期間颱風強度進行分類以檢視各理想風場模式在不同情境下之預報表現。在颱風警報分類與颱風強度分類下，各模式於預報測站中之表現的確不盡相同，但若以模式預報整體表現而論，通常以氣象署現有作業用理想風場模式表現為目前所有理想風場模式中最適合執行暴潮預報者，即使考量預報過程中其他之可能誤差來源，依舊可以與其他模式相比得到最接近觀測資料之預報水位。 3. 為求精簡暴潮預報作業所需時間，調整預報系統現有之串聯執行預報流程為並聯執行。由前一節版本模式介紹可知，為提升預報系統效能，python 版本預報系統在產品輸出效能上極具優勢。因此後續調整預報模式架構及相關測試皆以 Python 版本為主，主要測試機器則為 Matlab 版本預報系統所在機器，其中颱風警報單暴潮預報系統位於 234 機器，而 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統位於 157 機器。 4. 為凸顯港灣海堤遮蔽效應之影響，因此在進行潮汐水位之模擬分析時，模式需採用細緻化之地形、設定之數值網格解析度需加密以建構完整港口細節(包含海堤、港池、碼頭等)，並搭配 TPX0 潮汐模式以獲取邊界潮位條件，以取得特定港口區域隨時間變化之潮汐水位模擬結果。最終，將結果與觀測資料進一步比對校驗，以瞭解港灣遮蔽效應於殘差值之影響。
建議事項	無
具體落實應用情形	1. 本研究透過重新執行過去 10 年的預報作業，檢視暴潮預報系統在選用不同理想風場模式時可能得到的水位預報結果，利用方均根誤差、偏差量及相關係數等統計參數，檢視各理想風場模式模擬水位與觀測資料間之差異。 2. 研究過程中亦發現某些理想風場模式在部分情況下亦有可能有較佳表現，因此本工作項目中選擇將研究中所用之理想風場模式皆加入現有暴潮預報系統，以供未來彈性選擇理想風場模式之可能性。

	3. 在效能提升方面，現有多工處理之預報系統版本於核心程式模擬所花時間較 234 機器 Matlab 版本減少 26 至 27 分鐘，效能提升 42.8%；後處理所需時間減少 22 至 23 分鐘，效能提升 74.6%，預報總時長為 44 至 45 分鐘，較先前版本減少 48 至 49 分鐘，效能提升超過 50%。 4. 在本項目之三維模擬案例中，其結果之潮位相比於觀測資料或調和分析資料，於潮汐到時而言差異極小，潮差之區別則約為 0.5 公尺。本項目之二維模擬案例總計比對校驗六個港口內潮位站之潮位，發現各個潮位站之整合地形二維模擬結果與觀測資料之潮位間皆有一定之時間差。各潮位站反應之潮時差顯示在純潮汐情境下，港灣遮蔽效應確實反映於各個區域、不分範圍大小之港口。
計畫變更說明	無
落後原因	無
變更或落後之檢討與因應對策	無

交通部中央氣象局
委託研究計畫執行聲明書

立同意書人即本研究計畫主持人吳祚任受交通部中央氣象局委託執行研究計畫「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究(3/3)」(計畫編號MOTC-CWB-112-0-03，採購案號1122065C)，計畫成果報告係基於執行團隊本身學術專業知能自行撰寫，計畫主持人及參與人員對於計畫內容及研究成果，並未侵害他人之智慧財產權或其他合法權利，如有違反時，願自行負擔一切法律責任。

此致

交通部中央氣象局

計畫主持人：吳祚任 (簽章)

中 華 民 國 112 年 7 月 6 日

目錄

圖目錄	IV
表目錄	XII
第 1 章、緒論	1
1-1 計畫摘要	1
1-2 計畫背景與目的	2
1-3 文獻回顧	4
1-3-1 理想風場模式	4
1-3-2 台灣潮汐觀測與預報	8
1-3-3 颱風暴潮系集預報技術	10
第 2 章、計畫重點工作項目及規劃	15
2-1 計畫重點工作項目	15
2-2 預計獲得成果	17
2-3 交付項目及驗收標準	18
第 3 章、暴潮系集預報系統發展與研究	21
3-1 颱風暴潮預報模式	21
3-1-1 線性淺水波方程式	23
3-1-2 非線性淺水波方程式	24
3-2 颱風大氣模式	26
3-2-1 HOLLAND MODEL 理想風場模式	26

3-2-2 CWB MODEL 理想風場模式	27
3-2-3 風剪力和風阻力係數	28
3-3 地形與網格設置	29
3-4 暴潮模式指定預報潮位站	33
3-5 TPXO 天文潮模式結合	35
3-6 暴潮系集預報成員產出方法	36
3-6-1 誤差機率分布法	36
3-6-2 風場結構系集成員	44
3-7 三維 SPLASH3D 模式	47
 第 4 章、理想風場模式暴潮預報結果比較與分析	 55
 4-1 颱風案例資料收集	 55
4-2 理想風場模式之暴潮系集預報系統模擬	63
4-3 模式模擬結果之統計與分析	65
4-3-1 依颱風強度分類之統計分析	73
4-3-2 依颱風警報種類分類之統計分析	93
4-4 暴潮預報系統理想風場模式更新及作業化測試	141
4-4-1 海上警報案例展示	143
4-4-2 陸上警報案例展示	159
 第 5 章、暴潮預報系統預報效能提昇評估	 171
 5-1 簡介	 171
5-2 暴潮預報系統各版本效能比較	174
5-3 預報系統結構調整與前後版本效能比較報告	181

第 6 章、 港灣遮蔽效應之數值分析	195
6-1 地形建置	196
6-2 三維 SPLASH3D 模式分析	200
6-2-1 前言與模擬方法	200
6-2-2 台中港案例模式模擬結果	202
6-3 二維風暴潮預報模式分析	210
6-3-1 前言與模擬方法	210
6-3-2 無暴潮作用下之潮汐校驗案例：2022 年 1 月	219
6-3-3 暴潮作用下之潮汐校驗案例：2023 年海葵颱風	237
結論	255
參考文獻	259
附錄 A、名詞對照說明表	267
附錄 B、預報模式之時差特徵修正校驗結果	269
附錄 C、會議紀錄	289
附錄 D、績效報告書	309

圖目錄

圖 3—1 COMCOT 風暴潮溢淹模式第一層巢狀網格計算域。	30
圖 3—2 COMCOT 風暴潮溢淹模式第二層巢狀網格計算域。	30
圖 3—3 COMCOT 風暴潮溢淹模式第二層巢狀網格計算域之離島區域。	31
圖 3—4 34 處指定預報潮位站分布。	33
圖 3—5 全球潮汐模式 TPXO 模式示意圖 (TPXO 官網)。	35
圖 3—6 機率密度分布函數產生系集預報路徑成員之示意圖。	39
圖 3—7 颱風預報路徑誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。 	40
圖 3—8 颱風預報氣壓值誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。	40
圖 3—9 颱風預報七級風半徑誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。 ..	40
圖 3—10 颱風預報近中心最大風速誤差分布及各項機率密度函數擬合情形。 ..	40
圖 3—11 誤差機率分布曲線及颱風警報單所產出之系集成員路徑分布情形。 ..	43
圖 3—12 流體體積法之體積分率示意圖.....	49
圖 3—13 自由液面重建示意圖.....	49
圖 3—14 湧潮與結構物之交互作用。	51
圖 3—15 三維模式模擬雙園大橋沖刷坑型態。	52
圖 3—16 COMCOT 二維數值模擬核三場海域之最大波高圖。	53
圖 3—17 核三廠海嘯淹溢過程。	53
圖 4—1 2013 至 2022 年間之颱風與颱風警報數量分布.....	56
圖 4—2 2013 至 2022 年間之颱風警報預報颱風平均強度分類長條圖.....	58
圖 4—3 各理想風場模式搭配 CWB 最佳路徑參數與 ERA5 再分析風場之方均根 誤差分布 (公尺/秒)。	60
圖 4—4 在各颱風強度下理想風場與 ERA5 整體風場之方均根誤差分布。	62
圖 4—5 暴潮系集預報流程圖。	64
圖 4—6 暴潮系集預報之各系集成員預報水位校驗示意圖.....	70
圖 4—7 所有警報中各站於各理想風場模式所得暴潮偏差之統計參數.....	71
圖 4—8 所有警報中各站於各理想風場模式所得暴潮總水位之統計參數.....	72

圖 4—9 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮偏差之方均根誤差值	84
圖 4—10 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮偏差之偏差量值	85
圖 4—11 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮偏差之相關係數	86
圖 4—12 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮總水位之方均根誤差值	87
圖 4—13 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮總水位之偏差量值	88
圖 4—14 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮總水位之相關係數	89
圖 4—15 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之方均根誤差值	106
圖 4—16 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之方均根誤差值	107
圖 4—17 颱風 TY 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之方均根誤差值	108
圖 4—18 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之方均根誤差值	109
圖 4—19 所有颱風強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之方均根誤差值	110
圖 4—20 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之偏差量值	111
圖 4—21 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之偏差量值	112
圖 4—22 颱風 TY 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之偏差量值	113
圖 4—23 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之偏差量值	114
圖 4—24 所有颱風強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之偏差量值	115
圖 4—25 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之相關係數	116
圖 4—26 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之相關係數	117
圖 4—27 颱風 TY 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之相關係數	118
圖 4—28 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之相關係數	119

圖 4—29 所有颱風強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之相關係數...	120
圖 4—30 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之方均根誤差值.....	121
圖 4—31 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之方均根誤差值.....	122
圖 4—32 颱風 TY 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之方均根誤差值.....	123
圖 4—33 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之方均根誤差值.....	124
圖 4—34 所有颱風強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之方均根誤差值.....	125
圖 4—35 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之偏差量值.....	126
圖 4—36 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之偏差量值.....	127
圖 4—37 颱風 TY 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之偏差量值	128
圖 4—38 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之偏差量值.....	129
圖 4—39 所有颱風強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之偏差量值.....	130
圖 4—40 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之相關係數.....	131
圖 4—41 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之相關係數.....	132
圖 4—42 颱風 TY 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之相關係數.....	133
圖 4—43 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之相關係數.....	134
圖 4—44 所有颱風強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之相關係數.....	135
圖 4—45 颱風暴潮決定性預報系統作業流程圖.....	142
圖 4—46 颱風瑪娃 (MAWAR) 生命期間路徑圖 (資料來源：颱風資料庫).....	148
圖 4—47 颱風暴潮決定性預報系統之水位預報結果 (上圖為暴潮總水位與潮	

汐水位，下圖為暴潮偏差水位)	148
圖 4—48 颱風暴潮決定性預報系統之水位預報結果 (上圖為暴潮總水位與潮 汐水位，下圖為暴潮偏差水位)	149
圖 4—49 颱風暴潮決定性預報系統之水位預報結果 (上圖為暴潮總水位與潮 汐水位，下圖為暴潮偏差水位)	150
圖 4—50 颱風暴潮決定性預報系統之水位預報結果 (上圖為暴潮總水位與潮 汐水位，下圖為暴潮偏差水位)	151
圖 4—51 各理想風場模式暴潮偏差水位預報圖.....	152
圖 4—52 各理想風場模式暴潮偏差水位預報圖.....	153
圖 4—53 各理想風場模式暴潮總水位預報圖.....	154
圖 4—54 各理想風場模式暴潮總水位預報圖.....	155
圖 4—55 各理想風場模式於本次示範案例中各測站之預報暴潮偏差所得之統計 參數.....	156
圖 4—56 各理想風場模式於本次示範案例中各測站之預報暴潮總水位所得之統 計參數.....	157
圖 4—57 颱風梅姬 (MEGI) 生命期間路徑圖 (資料來源：颱風資料庫) .	163
圖 4—58 各理想風場模式暴潮偏差水位預報圖.....	164
圖 4—59 各理想風場模式暴潮偏差水位預報圖.....	165
圖 4—60 各理想風場模式暴潮總水位預報圖.....	166
圖 4—61 各理想風場模式暴潮總水位預報圖.....	167
圖 4—62 各理想風場模式於本次示範案例中各測站之預報暴潮偏差所得之統計 參數.....	168
圖 4—63 各理想風場模式於本次示範案例中各測站之預報暴潮偏差所得之統計 參數.....	169
圖 5—1 (a) TWRF V1 版本中三層巢狀網格的計算域。	173
圖 5—2 颱風警報單暴潮預報系統記錄檔截圖 (叢集電腦、Python 版本) .	178
圖 5—3 颱風警報單暴潮預報系統記錄檔截圖 (234 機器、Matlab 版本) ..	178
圖 5—4 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統記錄檔截圖 (157 機器、 Matlab 版本)	179
圖 5—5 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統記錄檔截圖 (叢集電腦、 Python 版本)	179
圖 5—6 颱風警報單暴潮預報系統作業流程圖.....	185

圖 5—7 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統作業流程圖	186
圖 5—8 颱風警報單暴潮預報系統主程式修改前截圖 (234 機器、Python 版本)	187
圖 5—9 颱風警報單暴潮預報系統主程式修改後截圖 (234 機器、Python 版本)	188
圖 5—10 紀錄檔內並聯執行核心程式步驟標記示意圖 (234 機器、Python 版 本)	189
圖 5—11 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統主程式修改前截圖 (157 機 器、Python 版本)	190
圖 5—12 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統主程式修改後截圖 (157 機 器、Python 版本)	191
圖 5—13 紀錄檔內並聯執行核心程式步驟標記示意圖 (157 機器、Python 版 本)	192
圖 6—1 Global Mapper 23.1 版之使用者介面展示圖	198
圖 6—2 整合地形示意圖	198
圖 6—3 ETOPO 地形示意圖	199
圖 6—4 GEBCO 地形示意圖	199
圖 6—5 Splash3D 之控制檔操作介面	201
圖 6—6 壓力邊界法示意圖， ρ 為海水密度項， g 為重力項，	201
圖 6—7 三維台中港潮位模擬示意圖 (第 0 小時至第 15 小時)	204
圖 6—8 三維台中港潮位壓力梯度示意圖 (第 0 小時至第 15 小時)	205
圖 6—9 台中港橫切剖面之壓力梯度示意圖	206
圖 6—10 台中港縱切剖面之壓力梯度示意圖	207
圖 6—11 台中港橫切剖面之速度分量示意圖	208
圖 6—12 台中港橫切剖面之速度分量示意圖	209
圖 6—13 台中港潮位站於預報模式解析度之地形示意圖 (紅點為預報模式中 潮位站之位置與水深)	212
圖 6—14 將軍潮位站於預報模式解析度之地形示意圖 (紅點為預報模式中潮 位站之位置與水深)	212
圖 6—15 龍洞潮位站於預報模式解析度之地形示意圖 (紅點為預報模式中潮 位站之位置與水深)	213
圖 6—16 花蓮潮位站於預報模式解析度之地形示意圖 (紅點為預報模式中潮	

位站之位置與水深)	213
圖 6—17 成功潮位站於預報模式解析度之地形示意圖 (紅點為預報模式中潮位站之位置與水深)	214
圖 6—18 蘭嶼潮位站於預報模式解析度之地形示意圖 (紅點為預報模式中潮位站之位置與水深)	214
圖 6—19 台中港潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖 (紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)	215
圖 6—20 將軍潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖 (紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)	215
圖 6—21 龍洞潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖 (紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)	216
圖 6—22 花蓮潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖 (紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)	216
圖 6—23 成功潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖 (紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)	217
圖 6—24 蘭嶼潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖 (紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)	217
圖 6—25 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之台中港周遭二維潮位變化圖 (第 0 至第 15 小時, 間隔為 3 小時)	225
圖 6—26 整合地形／原始時間之台中港潮位站時序校驗圖	226
圖 6—27 整合地形／時間校正之台中港潮位站時序校驗圖	226
圖 6—28 現行預報模式之台中港潮位站時序校驗圖	226
圖 6—29 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之將軍漁港周遭二維潮位變化圖 (第 0 至第 15 小時, 間隔為 3 小時)	227
圖 6—30 整合地形／原始時間之將軍潮位站時序校驗圖	228
圖 6—31 整合地形／時間校正之將軍潮位站時序校驗圖	228
圖 6—32 現行預報模式之將軍潮位站時序校驗圖	228
圖 6—33 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之龍洞南口潛艇港周遭二維潮位變化圖 (第 0 至第 15 小時, 間隔為 3 小時)	229
圖 6—34 整合地形／原始時間之龍洞潮位站時序校驗圖	230
圖 6—35 整合地形／時間校正之龍洞潮位站時序校驗圖	230
圖 6—36 現行預報模式之龍洞潮位站時序校驗圖	230

圖 6—37 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之花蓮港周遭二維潮位變化圖（第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時）	231
圖 6—38 整合地形／原始時間之花蓮潮位站時序校驗圖	232
圖 6—39 整合地形／時間校正之花蓮潮位站時序校驗圖	232
圖 6—40 現行預報模式之花蓮潮位站時序校驗圖	232
圖 6—41 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之新港漁港周遭二維潮位變化圖（第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時）	233
圖 6—42 整合地形／原始時間之成功潮位站時序校驗圖	234
圖 6—43 整合地形／時間校正之成功潮位站時序校驗圖	234
圖 6—44 現行預報模式之成功潮位站時序校驗圖	234
圖 6—45 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之蘭嶼開封漁港周遭二維潮位變化圖（第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時）	235
圖 6—46 整合地形／原始時間之蘭嶼潮位站時序校驗圖	236
圖 6—47 整合地形／時間校正之蘭嶼潮位站時序校驗圖	236
圖 6—48 現行預報模式之蘭嶼潮位站時序校驗圖	236
圖 6—49 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之台中港周遭二維潮位變化圖（第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時）	242
圖 6—50 整合地形／原始時間之台中港潮位站時序校驗圖	243
圖 6—51 整合地形／時間校正之台中港潮位站時序校驗圖	243
圖 6—52 現行預報模式之台中港潮位站時序校驗圖	243
圖 6—53 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之將軍漁港周遭二維潮位變化圖（第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時）	244
圖 6—54 整合地形／原始時間之將軍潮位站時序校驗圖	245
圖 6—55 整合地形／時間校正之將軍潮位站時序校驗圖	245
圖 6—56 現行預報模式之將軍潮位站時序校驗圖	245
圖 6—57 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之龍洞南口潛艇港港周遭二維潮位變化圖（第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時）	246
圖 6—58 整合地形／原始時間之龍洞潮位站時序校驗圖	247
圖 6—59 整合地形／時間校正之龍洞潮位站時序校驗圖	247
圖 6—60 現行預報模式之龍洞潮位站時序校驗圖	247

圖 6—61 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之花蓮港周遭二維潮位變化圖（第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時）	248
圖 6—62 整合地形／原始時間之花蓮潮位站時序校驗圖	249
圖 6—63 整合地形／時間校正之花蓮潮位站時序校驗圖	249
圖 6—64 現行預報模式之花蓮潮位站時序校驗圖	249
圖 6—65 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之新港漁港周遭二維潮位變化圖（第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時）	250
圖 6—66 整合地形／原始時間之成功潮位站時序校驗圖	251
圖 6—67 整合地形／時間校正之成功潮位站時序校驗圖	251
圖 6—68 現行預報模式之成功潮位站時序校驗圖	251
圖 6—69 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之蘭嶼開封漁港周遭二維潮位變化圖（第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時）	252
圖 6—70 整合地形／原始時間之蘭嶼潮位站時序校驗圖	253
圖 6—71 整合地形／時間校正之蘭嶼潮位站時序校驗圖	253
圖 6—72 現行預報模式之蘭嶼潮位站時序校驗圖	253

表目錄

表 3—1 現中央氣象署採用之 COMCOT 暴潮溢淹預報模式 計算域網格範圍與解析度。.....	32
表 3—2 34 處指定預報潮位站資訊。.....	34
表 3—3 重建各項機率密度函數分布曲線所需之參數.....	41
表 3—4 切割 T 位置尺度分布曲線下面積所得之誤差成員分布情形	42
表 3—5 理想風場公式統整.....	46
表 3—6 各颱風強度下各理想風場與 ERA5 再分析風場之方均根誤差 (m/s)。選用資料區間為 2016-2020 年，計算誤差半徑為 250 公里。	46
表 4—1 2013 至 2022 年間颱風海上/陸上警報數量分布表	56
表 4—2 颱風強度分類表.....	57
表 4—3 颱風警報預報颱風平均強度分類表.....	58
表 4—4 理想風場方程式列表.....	59
表 4—5 對應圖 4—6 模式結果之校驗參數.....	70
表 4—6 颱風強度分類下理想風場模式之表現與對應測站數 (方均根誤差) ..	92
表 4—7 颱風強度分類下理想風場模式之表現與對應測站數 (偏差量值)	92
表 4—8 颱風強度分類下理想風場模式之表現與對應測站數 (相關係數)	92
表 4—9 海警下各理想風場模式之表現與對應測站數 (方均根誤差)	139
表 4—10 海警下各理想風場模式之表現與對應測站數 (偏差量值)	139
表 4—11 海警下各理想風場模式之表現與對應測站數 (相關係數)	139
表 4—12 陸警下各理想風場模式之表現與對應測站數 (方均根誤差)	140
表 4—13 陸警下各理想風場模式之表現與對應測站數 (偏差量值)	140
表 4—14 陸警下各理想風場模式之表現與對應測站數 (相關係數)	140
表 4—15 各理想風場模式之表現與對應測站數 (方均根誤差)	158
表 4—16 各理想風場模式之表現與對應測站數 (偏差量值)	158
表 4—17 各理想風場模式之表現與對應測站數 (相關係數)	158
表 4—18 各理想風場模式之表現與對應測站數 (方均根誤差)	170

表 4—19 各理想風場模式之表現與對應測站數（偏差量值）	170
表 4—20 各理想風場模式之表現與對應測站數（相關係數）	170
表 5—1 颱風警報單暴潮預報系統平均執行效能比較（單位：分鐘）	180
表 5—2 二維氣象場暴潮預報系統平均執行效能比較（單位：分鐘）	180
表 5—3 颱風警報單暴潮預報系統 結構調整前後所需執行時間（單位：分鐘）	193
表 5—4 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統 結構調整前後所需執行時間 （單位：分鐘）	193
表 6—1 預報模式潮位站之中文站名、英文站名、站碼、經緯度資訊.....	218
表 6—2 高解析度模式潮位站之中文站名、英文站名、站碼、經緯度資訊....	218

第1章、緒論

1-1 計畫中英文摘要

本計畫將針對現有之暴潮預報系統加以精進，包括暴潮預報系統理想風場模式更新、三維模式之港灣海堤遮蔽效應模擬分析、以及暴潮預報系統作業化測試及預報效能提升評估。在理想風場模式更新部分，將分析過往侵台颱風案例，剖析其風速場與氣壓場在受到中央山脈干擾時之風場特性，以調校適合用於臺灣之理想風場，並藉以減少系集個數與提升準確度。下半年度針對港灣遮蔽效應研究，將求解三維 Navier-Stokes 方程式，並搭配 VOF 流體體積法，以模擬並分析潮汐進入港灣後所可能發生之相位遲滯（Phase Lag）與波高變化。研究結果，將可提供暴潮預報系統校準之用。在暴潮預報系統作業化測試及預報效能提升評估部分，將持續維護現有之作業模式，並評估提升預報效能之方法。

The goal of this project is to improve the existing storm surge forecasting system, including the update of the ideal wind field model of the storm surge forecasting system, the simulation analysis of the sheltering effect of the harbor seawall in the three-dimensional model, the operational test of the storm tide forecasting system, and the evaluation of forecasting performance improvement. To update the ideal wind field model, this project will analyze the historical typhoon events, and analyze the weather field characteristics of the wind speed and pressure fields when they are disturbed by the Central Mountain, so as to adjust the ideal wind field suitable for Taiwan, reduce the number of ensemble cases, and improve accuracy as well. As for the harbor shielding effect, the three-dimensional Navier-Stokes equation will be solved, and the volume of fluid (VOF) method will be used to simulate and analyze the phase lag and wave height changes that may occur after the tide enters the harbor. The research results

will be applied to the calibration of the storm surge forecasting system. In the operational test of the storm surge forecasting system and the evaluation of forecast performance improvement, the existing operation mode will be continuously maintained, and methods to improve forecast performance will be evaluated.

1-2 計畫背景與目的

氣候變遷所導致之全球暖化暨海平面上升之情境下，潛在強烈颱風生成機率將會提高，深受風暴潮威脅所苦之世界各國，更加重視風暴潮科學之相關研究，針對颱風暴潮預報技術之發展，更是不遺餘力。

近年來，西太平洋地區造成的災難性風暴潮事件不斷，2013 年強烈颱風海燕（Typhoon Haiyan）以接近巔峰狀態登陸菲律賓，而其猛烈風力及引起的大規模風暴潮則在菲律賓中部造成毀滅性破壞。2016 年強烈颱風莫蘭蒂（Typhoon Meranti）在墾丁南灣掀起疊加強烈風暴潮和天文大潮的 5 公尺高巨浪，一輛救護車經過時險遭巨浪捲走。2017 年中度颱風天鴿（Typhoon Hato）不但為中國港澳地區帶來極具破壞性的風力，導致澳門境內測得破紀錄的持續風速，而且其風暴潮疊加天文大潮更引致珠江口地區多處嚴重淹水，珠海和澳門的災情尤其嚴峻，成為該兩地超過半個世紀最慘重的風災。2018 年颱風燕子為自 1993 年颱風 13 號以來，時隔 25 年再度為西日本帶來嚴重災情的颱風，造成關西國際機場自 1994 年 9 月 4 日啟用以來最嚴重的災情。同年強烈颱風山竹除了在菲律賓造成嚴重災情外，山竹亦在中國廣東沿岸造成巨大損失，於香港造成該地記錄最嚴重的風暴潮。2021 年，強烈颱風舒力基生成，是北半球有氣象紀錄以來，4 月份最強的熱帶氣旋。其接近中心最高持續風速及中心氣壓均打破了 2015 年颱風梅莎的紀錄，與 2013 年颱風海燕並列為 21 世紀西北太平洋海平面氣壓第三低的風暴。強風和暴雨影響了菲律賓東部，風暴潮淹沒了離颱風最近的部分海岸線，共造成 8 人死亡，另有 10 人失蹤。

臺灣位於西北太平洋和南中國海交界，此處為颱風生成頻率高且行經路徑密度稠密之區域，臺灣政府應當更為重視潛在強烈颱風及其所造成之暴潮威脅，特別是與沿海地區居民生命安全和財產息息相關之暴潮溢淹範圍。因此建立一套功能完整、計算快速且精準之風暴潮預報系統，實刻不容緩；建置之風暴潮預報系統，除了必須快速且準確地預報未來臺灣地區暴潮水位外，亦需提供潛在暴潮溢淹範圍（Potential Suge Inundation Area）和沿海地區之潛在暴潮（Maximum Storm Surge）等資訊予民眾或相關權責單位。

一套發展成熟之風暴潮預報系統，需要良好的氣象場進行驅動，氣象署現有已開發之颱風暴潮溢淹預報系統，可分別利用大氣預報模式產品或颱風警報預報參數，針對台灣沿岸地區水位執行作業化預報。有鑑於近來氣候變化越趨極端，署內作業化中的大氣預報模式日新月異，與之相對具有較低計算成本且效率較高的理想風場模式亦應隨著氣候變遷，利用現有先進觀測技術所得之觀測數據精進理想風場模式，以利未來精準之暴潮模擬和暴潮位預報。

於暴潮預報模式校驗中，與觀測資料驗證模式準確性是必不可少的步驟。由於現有資料潮位站大都設置在港內半封閉型水域之內，部分國內研究發現，若以港內的潮位預測值代替外海的預測潮位，時常有潮時預測失準之情形，且數值模式亦會受地形與人為結構物等影響而有不規律之模擬誤差，因此本研究預計更新模式內數值地形資料，利用高解析度之地形資料與數值網格，了解港灣內潮位計受港口地形效應影響之程度，從而瞭解應如何在有限的模式預報時效中使模式結果與觀測資料更進一步減少差距。

即使如此，由於颱風為中尺度天氣現象，本身具有高度之不確定性，例如颱風強度和颱風路徑於預報中是否符合颱風未來動向和強度趨勢，均為大氣預報模式所困擾之處，於此條件下導入單一氣象場或單一颱風預報之強度和路徑，暴潮預報亦直接受颱風強度和颱風路徑等因子所產生之不確定因素所影響，預報結果可能會與實際觀測現象有顯著差異。因此，國際間除採用決定性預報（Deterministic Forecasting）外，亦漸漸採納機率性預報（Probabilistic Forecasting），

以涵蓋不同特性之系集成員（Ensemble Members）方式，進行暴潮系集預報系統技術（Storm Surge Ensemble Forecasting System）之發展，藉此暴潮預報中涵蓋颱風多種變動因素影響。中央氣象署除追隨國際趨勢外，本研究亦將針對台灣特有之颱風結構，特別是颱風受中央山脈影響後之發展進行分析。以現有暴潮預報模式為基礎，發展相關暴潮系集預報技術。現有暴潮系集預報系統分別利用署內大氣系集預報模式及颱風警報單過往資料，採納多種颱風路徑變動條件下之系集成員以執行預報，後續預計持續發展暴潮系集預報系統，透過路徑分布、颱風強度、與理想風場類型等資訊，為沿海區域之民眾提供更加詳細之暴潮機率預報資訊，以期達到減災和防災之目的，降低生命財產之損失。

1-3 文獻回顧

1-3-1 理想風場模式

與熱帶氣旋相關的數值模擬已為一種被廣泛接受的估算風速的方法，常被用於結構設計和颶風風險評估。其中，理想風場模式已在全球範圍內廣泛用於保險風險承保、海岸規劃和風暴潮預報等領域，提供高風險的財務管理，沿岸土地發展和緊急決策所需之相關資訊。但是，各界對於潛在的“最佳”參數風場決定方法仍然沒有達成共識，在眾多已發布模型中，也沒有關於如何選擇最佳參數風場的建議或指導。

現今數值大氣模式已被廣泛的運用於針對風暴潮預測和沿海危險評估研究（Lin et al., 2003, Hsiao et al., 2012, Powers et al., 2017, Lakshmi et al., 2017），但僅透過部分輸入參數（颱風中心位置、中心低氣壓、最大風速、颱風半徑等）便可得到的理想風場模式，具備簡潔、效率、彈性及相對較低需求的計算成本（Mattocks et al., 2008, Lin et al., 2016, Orton et al., 2016, Krien et al., 2017, Shao et al., 2018），對於利用統計方法調查風暴潮危害，或是在製造大量假想合成的熱帶氣旋時頗具優勢（Niedoroda et al., 2010, Haigh et al., 2014, Krien et al., 2015、

2017)，使其在各項研究及保險界中被廣泛使用。

Fujita(1952)最早開始使用參數化模式計算颶風風場，他假設颶風氣壓 $P(r)$ 隨半徑方向的距離 r 衰減，如下式：

$$\frac{P_a - P(r)}{P_a - P_c} = \left[1 + \left(\frac{r}{R_{mw}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{式1—1})$$

式中 P_c 為近海平面高度處的中心氣壓， P_a 為近海平面高度處的外圍氣壓， R_{mw} 為最大風速半徑。

Schloemer (1954) 研究美國佛羅里達海上之颶風中心氣壓隨半徑方向之變化，發現上式的熱帶氣旋氣壓分布由中心向外衰減太快，並建議將衰減趨勢以指示表示較符合實際氣壓分布情形：

$$\frac{P(r) - P_c}{P_a - P_c} = \exp \left(- \left(\frac{R_{mw}}{r} \right) \right) \quad (\text{式1—2})$$

Holland (1980) 改良 Schloemer (1954) 的研究成果，使用尺度參數 B (Scaling parameters) 來描述颶風氣壓場的衰減：

$$\frac{P(r) - P_c}{P_a - P_c} = \exp \left(- \left(\frac{R_{mw}}{r} \right)^B \right) \quad (\text{式1—3})$$

在不考慮地表摩擦阻力的狀況下，在距離中心 r 處的風速 $V(r)$ 與氣壓梯度 $\frac{dP}{dr}$ 的關係為：

$$\frac{V^2}{r} + fV = \frac{1}{\rho_a} \frac{dP}{dr} \quad (\text{式1—4})$$

式中 ρ_a 為空氣密度， f 為科里奧利頻率 (Coriolis frequency)：

$$f = 2\Omega \sin \theta \quad (\text{式1—5})$$

式中 $\Omega = 7.292 \times 10^{-5}$ (rad/s) 為地球自轉速度， θ 為熱帶氣旋中心所在緯度。
上式求解可得：

$$V(r) = -\frac{rf}{2} \pm \left[-\frac{r}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{r^2 f^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{式1—6})$$

將颶風氣壓場 1—3 式帶入 1—6 式可得距離颶風中心 r 公尺處的風速 $V(r)$ ：

$$V(r) = \left[B \frac{P_a - P_c}{\rho_a} \left(\frac{R_{mw}}{r} \right)^B \exp \left(- \left(\frac{R_{mw}}{r} \right)^B + \frac{r^2 f^2}{4} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{rf}{2} \quad (\text{式1—7})$$

此模式中的尺度參數 B 值，最大風速半徑 R_{mw} 會影響颶風風速的準確性，但Holland並未說明如何決定尺度參數 B 和最大風速半徑 R_{mw} 。下表列舉提出建議尺度參數 B 之參考文獻：

提出者	建議 B 值計算方式
Hubbert and Wolf, 1991	$B = 1.5 + \frac{980 - P_c}{100\rho_a}$
Harper and Holland, 1999	$B = 2.0 - \left(\frac{P_c - 900}{160} \right)$
Willoughby et al, 2004	$B = 0.886 + 0.0177V_m - 0.0049\theta$
Powell et al, 2005	$B = 1.38 - 0.00309R_m + 0.00184\Delta P$
Vickery et al, 2009	$B = 1.732 - 2.237\sqrt{A}$ $A = \frac{R_m f}{\sqrt{2R_a T_s \ln \left(1 + \frac{\Delta P}{P_c} \right)}}$
Lin and Chavas, 2012	$B = \rho_a \left(\frac{V_m^2 + f R_m V_m}{P_a - P_c} \right)$

其中， P_c 為颶風中心氣壓， ρ_a 為空氣密度， V_m 為近中心最大風速， θ 為颶風位置所在緯度， ΔP 為中心氣壓差， f 為科里奧利頻率， T_s 為海面溫度。

Jelesnianski 等人（1992）為美國國家海洋暨大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）建立風暴潮預報模式 SLOSH（Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes），模式中描述其風場模式為：

$$V(r) = 2V_m \frac{R_m r}{R_m^2 + r^2} \quad (\text{式1—8})$$

Willoughby 等人（2006）為改善 Holland（1980）提出之模式高估颶風眼牆至颶風中心的風速，及颶風眼牆外風速遞減過快的問題，建議分區描述風速剖面分布情形：

$$\begin{cases} V(r) = V_i = V_m \left(\frac{r}{R_m} \right)^n, & 0 \leq r \leq R_1 \\ V(r) = V_i(1 - w) + V_0 w, & R_1 \leq r < R_2 \\ V(r) = V_m \exp\left(-\frac{r-R_m}{x_1}\right), & R_2 \leq r \end{cases} \quad (\text{式1—9})$$

式中 V_m 為近中心最大風速， V_i 為颱風眼牆內的風速， R_m 為最大風速所在半徑， n 為颱風眼指數， V_0 為颱風眼牆外的風速， R_1 與 R_2 為最大風速半徑的過渡區， w 為加權係數，用於計算過渡區域內風場分布情形。 x_1 為外圍環流的衰減長度。各項參數計算方式統整於下：

$$\begin{cases} n = 0.431 + 0.136V_m - 0.006\theta \\ w(\xi) = 126\xi^5 - 420\xi^6 + 540\xi^7 - 315\xi^8 + 70\xi^9 \\ x_1 = 270.5 - 4.78V_m + 6.176\theta \\ R_m = 46.4 \exp(-0.0155V_m + 0.0169\theta) \\ w\left(\frac{R_m-R_1}{R_2-R_1}\right) = \frac{\frac{\partial V_i}{\partial r}}{\frac{\partial V_i}{\partial r} - \frac{\partial V_0}{\partial r}} = \frac{nx_1}{nx_1 + R_m} \\ \xi = \frac{r-R_1}{R_2-R_1} \end{cases} \quad (\text{式1—10})$$

式中 $Z_e - Z_c$ 為颱風外圍與颱風中心的等壓面高度差。 ξ 為無因次化距離。

Emanuel 與 Rotunno (2011) 提出以穩態、軸對稱之理想風場模式，利用邊界層上方的能量、熵和角動量守恆，假設熱帶氣旋在邊界層上方處於流體靜力平衡以及梯度風平衡，且邊界層上方處的飽和熵不會沿著恆定絕對角動量的表面變化，可統整出理想風速剖面如下：

$$V(r) = 2r \frac{(R_m V_m + 0.5 f R_m^2)}{R_m^2 + r^2} - \frac{fr}{2} \quad (\text{式1—11})$$

除了模式參數方面本身的考量，大部分研究中選用的理想風場模式只是作為軸對稱風場和均勻向量的總和而得出，以模擬由於風暴的平移運動而引起的不對稱性。關於如何準確估計風場剖面及風向角變化等因素的最佳方法仍存在爭議，而且取決於選用的方法，推算出來的理想風場會出現很大的分歧 (Lin 與 Chavas, 2012)。此外，熱帶氣旋的不對稱性亦可能由其他許多因素造成，例如相鄰的熱帶氣旋與之交互作用、邊界層摩擦效應或地形所造成的影響等，這些因素難以用參數的形式簡單概括 (Olfateh et al., 2017)，研究中預計參考國外各項理想風場模

式，搭配風速觀測資料推估適合台灣現地之風場參數，並利用所得之新理想風場模式進行颱風暴潮模擬，以期得到更加精確之暴潮模擬結果。

1-3-2 台灣潮汐觀測與預報

潮汐水位的預測是確定沿海和海洋地區活動或建設進度的重要問題之一，如果不通過常規方法進行長時間的潮汐測量（短則一月多則數年），就無法獲得準確的潮汐預測。潮位觀測資料除來自氣象署潮位站外，亦有來自內政部、水利署、運輸研究所港灣技術研究中心、工業技術研究院及臺灣電力公司等單位的資料。

台灣許多學者利用觀測資料，利用資料繪圖、統計分析、能譜分析，相關性分析及調和分析等研究方法，分析單一地區或港口的潮汐現象，如周宗仁和施士力(1981)、蔡瓊林和黃煌輝(1982)、吳建民和馮德榮(1990)、林炤圭等人(2005)、張憲國等人(2013)等等。

針對台灣環島沿岸潮汐的相關研究，陳、黃(1990)則收集台灣環島及澎湖32個測站的潮汐資料，利用頻譜分析及調和分析後，討論潮汐運動在台灣海域的特性。劉(1999)系統地整理台灣環島沿岸實測之潮汐資料。李等人(2005)利用POM潮流數值模式對台灣沿海進行潮汐資料推算，以模擬潮位站的潮汐資料，進行以主成分分析及群集分析，發現西部海岸的潮汐特性較東部海岸較不具空間均勻性。

針對台灣海峽地區及台灣西南海域，Hwung等人(1986)以調和分析針對臺灣西海岸潮位站之實測潮汐資料，應用頻譜分析求各測站的主要分潮，提出臺灣西海岸，北自淡水、南至臺西，其潮型皆屬半日潮型，且M2分潮為最重要分潮的論點。王玉懷(1998, 1999)依據實測潮汐資料之調和分析結果，並依據凱爾文波(Kelvin wave)之理論，說明臺灣海峽潮波運動方向是由北而南傳遞行進。張等人(2001)於台南縣中心漁港、高雄縣興達漁港及屏東縣枋寮漁港設置臨時潮位測站實施十個月的觀測，認為以潮時來看，潮波自台灣南部進入台灣海峽，由南往北傳遞。

Lin 等人 (2001) 通過匯總全島範圍的潮汐數據，指出台灣西海岸有半日潮異常放大的情形，並利用線性淺水波方程對其發生機制進行了理論和數值研究，從理論上可以識別出被大陸棚捕獲的波浪和潮汐共振。該研究中提出，半日潮的異常放大的現象可以透過陷波理論 (trapped waves, Mei, 1983) 和共振盪潮的共振理論 (Dean 和 Dalrymple, 1984) 解釋，而且地形 (包括幾何形狀和水深) 在影響潮汐方面有著非常重要的作用。Jan 等人 (2004) 和詹 (2006) 則利用數值模擬方法進一步提出台灣海峽南部突然加深的地形阻礙潮汐向南的傳播，隨後的反射在海峽東側產生了部分駐波，說明臺灣海峽的潮差特性的原因。Wu et al (2018) 為台灣海峽中的 M2 分潮提供了分析研究，海峽被理想化為具有均勻深度的矩形盆地，在北部和南部開口處觀察到的潮汐被用作開放邊界條件，並且在控制方程式中保留了科里奧利力和底部摩擦力，數學模型上得到的結果與現有觀測到的潮汐傳播現象相似。

針對潮汐數值預報的部分，先有劉肖孔 (1983) 建立中國海域三度空間模式，李賢文 (1989) 開發了台灣鄰近海域潮汐預報數值模式，而蘇青和、江中權 (1992) 則針對台灣各港口潮汐相關性與預報模式研究。Yen et al (1996) 提出了使用短時間 (幾天) 的潮汐觀測值，在已知角頻率的前提下使用高雄港幾天的潮汐記錄，通過卡爾曼濾波技術進行調和分析及後續短期水位的預測。Jan et al. (2001) 針對台灣海峽區域開發了高解析度 (網格 3 X 3 公里) 的三維數值模式，並為計算出的台灣海峽 M2 潮汐提供了等潮時圖、等潮位向圖和深度平均潮汐橢圓。Zhu et al (2009) 是利用二維有限差分模型計算台灣海峽及其附近地區的日潮和半日潮，並依據模式結果提供了 8 種分潮的等潮時圖及等潮位向圖。Hu et al (2010) 則發展了涵蓋東亞海域，解析度為 $1/12^\circ$ 的二維潮汐模式，並建立一個正壓潮汐海平面和十五個潮汐成分的潮流的諧波常數數據庫。

用全球或流域尺度的潮汐模型很難準確模擬沿海地區的潮汐，造成模式與觀測數據之間有落差的原因是由於模式網格解析度不足，導致模式地形資料有截位誤差。近年林等人 (2019, 2020) 分析小琉球與龍洞兩處港內外潮汐觀測資料之

差異，發現港、內外各分潮之振幅一致，但有部分分潮潮時不同，可見港內潮位無法完全代表港外潮位，且港內外潮位之相位差導致兩者潮位差值呈週期性震盪，以龍洞觀測資料為例，港內外資料記錄位置僅相隔 0.4 公里。由於上述的比較與疑慮，我們認為有必要使用更高解析度的區域潮汐模型，以更精確地模擬台灣沿海的潮汐。因此本研究預計更新現有暴潮預報模式內數值地形資料，利用高解析度之地形資料與數值網格，了解港內潮位計受港口地形效應影響之程度，從而瞭解應如何在有限的模式預報時效中使模式結果與觀測資料進一步減少差距。

1-3-3 颱風暴潮系集預報技術

受颱風、颶風或氣旋所帶來風暴潮潛在災害之國家，針對暴潮系集預報技術之發展已行之有年，日本、英國、美國、義大利、加拿大和中國大陸等國家，相關氣象單位和學者已投入暴潮系集預報技術研究，部分國家亦完成區域性暴潮系集作業化預報；於臺灣地區，國家實驗研究院所屬之颱風洪水研究中心亦致力於颱風暴潮系集預報技術之相關研究；針對上述國家和研究單位，進行暴潮系集預報技術發展之文獻回顧，以了解各國家現今之暴潮預報發展或作業化預報現況。

對於暴潮系集預報技術，日本氣象廳（Japan Meteorological Agency, JMA）委託學者進行相關研究與暴潮系集預報技術之發展；Saito 等人（2010）於日本氣象廳採用暴潮系集預報技術，進行日本指定潮位站之暴潮預報，由日本氣象廳非靜力大氣模式 JMA Nonhydrostatic Model（NHM）所發展之中尺度系集預報系統（Mesoscale Ensemble Prediction System, EPS）提供各系集成員之海表面風場和氣壓場，基於普林斯頓海洋模式（Princeton Ocean Model, POM）下進行暴潮系集預報，普林斯頓海洋模式於系集預報所採用 3.5 公里解析度以及垂直方向 sigma 座標 12 層，系集預報過程中包含 21 個不同系集成員，並以 2008 年納吉斯氣旋（Cyclone Nargis）作為研究案例。

英國為了避免決定性預報（Deterministic Forecasting）所造成之暴潮預報誤差，Flowerdew 等人（2013）採納了全球和區域系集預報系統（Met Office Global

and Regional Ensemble Prediction System, MOGREPS) 提供之 23 個系集成員作為不同氣象場條件輸入，研究中以 CS3X 暴潮模式作為基礎，發展英國專屬暴潮系集預報系統，暴潮系集模式所採用正交網格座標系統，但解析度於緯度和經度方向均有所不同，模式解析度於緯度方向設定為 1/9 度（約 13 公里），經度方向則設定為 1/6 度（約 20 公里）。

美國國家海洋暨大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）基於發展已久的 SLOSH 暴潮模式（Sea Lakes and Overland Surges from Hurricanes, SLOSH）下，發展美國近岸暴潮系集預報系統，並以 2012 年發生之珊迪颶風（Hurricane Sandy）為案例，分析珊迪颶風於預報中造成之系集最大水位（Ensemble Maximum Envelope of Water），於珊迪颶風研究個案過程中，採用了 64 個不同的系集成員，驅動 SLOSH 風暴潮模式進行近岸暴潮水位之推算（Forbes et al., 2014）。

義大利亦透過暴潮系集預報之方式，分析 2010 年期間的不同的 10 組暴潮事件，以非線性淺水波方程之 HYPSE（Hydrostatic Padua Sea Elevation）暴潮模式為基礎，發展暴潮系集預報技術，並導入歐洲天氣系集預報系統 ECMWF EPS（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Ensemble Prediction System）所產出之 50 個系集成員資料，HYPSE 暴潮系集預報系統之解析，分佈自 3.3 公里至 7 公里不等（Mel 與 Lionello, 2014）。

位處於北美州的加拿大，亦漸採用系集方式的暴潮預報技術與決定性暴潮預報並行；由 Bernier 與 Thompson（2015）所發表之結果，在加拿大位於大西洋沿海地區，採用區域決定性預報（Regional Deterministic Surge Prediction System, RDSPS）和區域系集暴潮預報（Regional Ensemble Surge Prediction System, RESPS）兩者並行，RDSPS 和 RESPS 均採用非線性深度積分數值模式作為暴潮預報之基礎，區域決定性預報和系集預報系統兩者解析度不同，區域決定性預報 RDSPS 解析度為 2 弧分（4 公里），而區域系集暴潮預報 RESPS 解析度則為 5 弧分（10 公里）。

中國大陸亦有學者採納暴潮系集預報技術，進行暴潮機率預報，以中國大陸沿岸為研究區域，於暴潮系集預報系統中採納 15 個不同的系集成員，並以 2013 年發生之菲特颱風 (Typhoon Fitow) 為研究案例進行討論 (Ding et al., 2016)，除分析 15 個系集成員各別於中國沿岸地區所造成之暴潮水位外，亦計算 2013 年菲特颱風所產生之風暴潮超過 0.6 公尺之發生機率圖 (Occurrence Possibility Map of Storm Surge Exceeding 0.6 m)。

國家實驗研究院所屬之臺灣颱風洪水研究中心亦致力於颱風暴潮系集預報技術之研究，林等人(2016)利用普林斯頓海洋模式(Princeton Ocean Model, POM)作為暴潮系集預報之基礎，配合 WRF (Weather Research and Forecasting) 大氣模式之輸出結果，於暴潮系集預報中，共採納 12 個不同的系集成員，普林斯頓海洋模式 POM 之解析度於預報中設定為 15 公里，並以 2009 年莫拉克颱風 (Morakot)、2010 年凡那比颱風 (Fanapi)、2012 年蘇拉颱風 (Saola)、2013 年蘇力颱風 (Soulik)、2014 年颱風麥德姆 (Matmo) 與鳳凰颱風 (Fungwong) 作為研究案例。

然暴潮系集預報除採用不同之大氣模式條件之系集成員，亦可探討路徑分歧之暴潮偏差不確定性，美國國家大氣研究中心 (NCAR) 為研究橫向颱風路徑誤差，使用機率密度分佈函數 (Probability Density Function, PDF) 探討颱風登陸點和移動方向對於暴潮預報之影響。美國國家颶風研究中心 (NHC) 亦統計 2004 至 2006 年北大西洋颶風官方預報 OFCL (Official NHC Forecast) 與真實颶風之橫向路徑誤差及徑向路徑誤差進行分析研究 (Taylor 與 Glahn, 2008)。

由文獻回顧可知，國內外針對暴潮系集預報系統之發展已行之有年，各領域專家和學者們投身於此研究；但綜觀各國或國內所建置之暴潮系集預報系統，部分模式解析度低於 2 公里，無法完整掌握風暴潮所近岸地區之溢淹行為和較為複雜且非線性之潮汐和暴潮交互作用，對於臺灣複雜水深地形和陸地高程變化無法較好地掌握，若直接採用系集成員之氣象場答案進行計算，恐無法有準確之暴潮預報結果，也無法計算由風暴潮所造成之潛在溢淹範圍。因此針對臺灣地區，建

議暴潮系集預報模式應採用較高解析度之計算網格，並發展具有潛在風暴潮溢淹之預報產品，基於氣象署現有暴潮預報系統下進行發展，縮短模式建置時間，並避免因採用其他模式所導致之操作問題，延誤預報員於颱風期間進行預報之寶貴時間；待暴潮系集預報發展成熟，並且完成作業化測試上線作業後，以暴潮預報資訊協助中央氣象署或其他災防單位訂定未來風暴潮之減災或災防措施，保護沿海地區居民之生命和財產安全。

第2章、計畫重點工作項目及規劃

2-1 計畫重點工作項目

本計畫重點預期完成之工作項目及具體成果主要分為 3 大項，皆屬提升模式精準度之相關研究，分列如下且預計分年進行：

暴潮溢淹預報模式精準度提升研究

透過測站風速及氣壓場等觀測值，調校適合臺灣之理想風場參數。進而提升風暴潮預報模式之準確度。並將預報系統之作業平臺轉移至中央氣象署之叢集電腦，進行測試與提出效率報告。

港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析

以高解析度地形與數值網格，展現港灣之海堤遮蔽效應，以了解安裝於港灣內之潮位計受海堤遮蔽效應之影響。將以 TPXO 潮汐預報模式結果作為風暴潮數值模式之邊界進行近岸高解析度潮汐模擬，並與港灣海堤內潮位站實測資料進行比對，以分析港灣海堤之遮蔽效應。

暴潮系集預報模式精準度提升研究

配合中央氣象署資料多元之來源格式及相關資安管理，將校驗系統資料庫架接來源，自 MySQL 資料庫調整為應用程式介面（Application Programming Interface，API），本計畫擬發展第二代暴潮系集預報系統，透過路徑分布、颱風強度、與理想風場類型，分析適合臺灣之第二代系集預報模式。

各項重點工作項目於第 1 年度至第 3 年度預定進行之步驟，經本團隊整理後，於下述項目條列：

第 1 年

1. 將理想風場暴潮預報模式建置於中央氣象署叢集電腦上並上線運作。
2. 以港堤外之潮汐水位資料或 TPXO 潮汐預報資料，進行港內觀測資料與港

外之潮汐比對，以分析港灣之遮蔽效應。

3. 收集測站風速及氣壓場等觀測資料，整理出適用臺灣之理想風場參數。
4. 發展第二代暴潮系集預報系統，分析過往颱風預報強度誤差分佈情形，包含颱風中心氣壓、近中心最大風速、颱風半徑等，並利用歷史案例進行颱風強度系集成員案例分析。

第 2 年

1. 將颱風暴潮 TWRF 預報模式建置於中央氣象署叢集電腦上並上線運作。
2. 完成第二代暴潮系集程式，以現有系集預報為基礎，提供路徑、強度與理想風場之作業選項。
3. 提供兩個以上的歷史颱風案例模擬，並分析本案新增之颱風強度及理想風場模式選項時對系集預報產品之影響。
4. 配合中央氣象署新增資料庫架接來源（API），維持預報系統穩定運作。
5. 透過現有最佳地形解析度資料，搭配網格收斂分析，量化分析高解析度地形與高解析度網格對暴潮預報模式結果的改良程度，以作為後續計算資源提升後模式精進的參考。

第 3 年

1. 收集過往 10 年侵台颱風資料，並透過第二代暴潮系集預報系統進行系集計算，量化分析適合臺灣之理想風場模式。更新暴潮預報系統中作業用理想風場模式選項為本次研究中擁有最佳表現者。
2. 三維模式之港灣海堤遮蔽效應模擬分析，透過三維水動力模式研究港灣遮蔽效應，進行中尺度模式模擬與模式校驗。
3. 暴潮預報系統作業化測試及預報效能提升評估，針對更新理想風場模式後之暴潮預報系統進行作業化測試、維護預報系統及評估更進一步提升預報效能之可行性。

2-2 預計獲得成果

統整工作項目後預期可完成之整體效益如列：

1. 提供暴潮溢淹預報模式解析度提升時效報告，增進計算效能。
2. 配合中央氣象署新增資料庫架接來源（API），維持預報系統穩定運作。
3. 透過歷年侵台颱風之觀測資料，搭配不同理想風場模式進行模擬，找出最適合臺灣之理想風場模式。
4. 以三維水動力模式搭配潮位計資料或潮位預報資料，與風暴潮預報模式數值潮位計進行比對，提供港灣遮蔽效應量化分析結果。
5. 測試本署超級電腦軟體環境與模式效能，期待藉由叢集電腦性能及排程，能使預報系統之計算加速，並提出系統轉移機器之計算效能差異。
6. 持續精進暴潮預報模式、暴潮系集預報模式、暴潮校驗模式及波浪校驗模式，提供民眾穩定之風暴潮資訊，做為政府災防政策之依據。

本計畫之重點工作項目於學術理論系統之貢獻分述如下：

1. 本研究所發展與精進之風暴潮溢淹預報模式，透過歷史案例模擬分析並調整適合台灣之理想風場參數，可以提升暴潮預報模式模擬之精準度，並有機會在針對性之作業化測試後提升其預報時效。
2. 本研究藉由三維水動力模式探討潮位計受海堤遮蔽效應之影響，比較模式現有潮汐預報成果、署內調和分析預報與觀測資料之差異。該研究成果可提供後續模式使用高解析度地形資料與數值網格，模擬暴潮於港灣內潮位站水位變化之參考依據。
3. 本研究提出之風暴潮系集預報系統現有版本，可涵蓋颱風預報強度和路徑等不確定因素下之暴潮預報，提供決定性預報結果以外的機率預報答案。在第二代系集預報模式分析近侵台颱風案例下，除了原本不同路徑分布，並考慮颱風強度、與理想風場類型，更可提供為精準地替臺灣區域進行暴潮預報，於學術上更可模擬與分析暴潮受不同因素影響之分布結果。

2-3 交付項目及驗收標準

	交付項目	初稿日期	完成日期	驗收標準
	依合約規定，至政府研究資訊(GRB)系統完成相關填報工作。		決標次日起 3 工作天內	依合約規定之工作時程上網登入政府研究資訊系統(GRB)，登錄本計畫相關資料。
期中	配合本署不定期之查訪	112/06/30 (含)前	112/07/28 (含)前	本署將不定期對本計畫進行工作進度查訪，廠商至少應於 112 年 3 月、5 月各進行 1 次工作進度報告(簡報或會議型式)。
	颱風案例資料收集			收集近 10 年有登陸臺灣或造成影響的颱風之各項理想風場模式所需之必要參數，包含路徑、中心氣壓、最大風速、最大風速所在半徑等。
	理想風場模式之暴潮系集預報系統模擬			利用委託研究計劃成果所得之候選理想風場模式，進行近 10 年有登陸臺灣或造成影響的颱風案例之系集預報模擬。
	模式模擬結果之統計與分析			收集和整理模擬結果與觀測資料進行比對，使用統計方法或其他適當的分析工具進行評估及驗證。
	暴潮預報系統理想風場模式更新			將上半年研究所得具備最佳較驗結果之理想風場模式選項加入暴潮預報系統
	期中報告初稿、修正版			繳交期中報告，內容應含上述工項。

	交付項目	初稿日期	完成日期	驗收標準
	配合本署不定期之查訪			本署將不定期對本計畫進行工作進度查訪，廠商至少應於 112 年 8 月、10 月各進行 1 次工作進度報告(簡報或會議型式)。
期末	暴潮預報系統作業化測試	112/12/1 (含)前	112/12/29 (含)前	針對更新理想風場模式後之暴潮預報系統進行作業化測試
	港灣效應三維分析前置作業			利用三維水動力學模式研究港灣效應，前置作業包含海底地形數據收集與匯入、潮汐邊界條件設置、數值潮位計建置等。
	港灣效應三維數值分析			利用三維水動力學模式研究港灣效應，包含中尺度模式模擬與模式校驗等。
	港灣效應二維高解析度數值分析			利用提升解析度之地形資料搭配二維風暴潮預報模式，完成台灣地區數個港口分析。
	暴潮預報系統預報效能提昇評估			維護預報系統並提出本年度之維護作業報告，並依據現有資源，評估更進一步提升預報效能之可行性並提出改進方式。
	廠商於期末報告需附上績效報告 1 份。			期末績效報告 1 份（依照科技部格式）。
	期末報告初稿、修正版			繳交期末報告，內容應含全年工項。
	因應本署的資安政策與各項檢測，並依照本署作業需求，協助本案作業伺服器系統之資安弱點修復、源碼檢測、滲透測試，並於期程內提供委託研究計畫研究成果處理及應用情形。			

第3章、暴潮系集預報系統發展與研究

3-1 颱風暴潮預報模式

本研究所發展之暴潮系集預報模式，基於中央氣象署現有採用之 COMCOT 暴潮模式為基礎，而 COMCOT 暴潮模式之前身為國際知名之海嘯模式 COMCOT (Cornell Mutli-grid Coupled Tsunami Model)，透過颱風氣象力（氣壓梯度力及風剪力）之加入，使模式具備以非線性之淺水波方程式計算並分析風暴潮生成、傳播以及近岸溯上之完整歷程。

COMCOT 暴潮模式之特點如下：

1. 可同時求解卡氏座標（Cartesian Coordinate）與球座標（Spherical Coordinate）系統下之淺水波傳遞過程。
2. 結合線性與非線性之淺水波方程式。海嘯波為標準之淺水波，因此適合以淺水波方程式描述。其中，深海地區適用線性淺水波方程式，而當海嘯波傳遞至近海或上岸後則適用非線性淺水波方程式。
3. 具備移動邊界法（Moving Boundary Scheme），可處理海嘯波上溯時之乾濕邊界之問題，並以非線性淺水波方程式同時計算溢淹範圍（Inundation Range）。
4. 具有動態連結之巢狀網格系統，可同時計算不同尺度下之海嘯波傳遞。
5. 隨著計算機之蓬勃發展，數值模式之執行效能也相對應地獲得提升，但許多從 1990 年代即開始發展之數值模式，因其原始程式碼之限制，使得計算機之效能無法獲得發揮。特別是對於一般單一執行緒（Single Thread）之數值程式，多核心之處理器並沒有辦法提升它的處理效能。

OpenMp（Open Multi-Processing）提供多執行緒之編程，能使用單台機器不同核心之不同執行緒（multi thread）達到加速之效果，將迴圈中所需之計算量分配於不同執行緒中，將可完全發揮計算機之效能，而且程式修改後可於單台計算

機中獨立運作，避免多台機器彼此交換資料之時間消耗，同時適用於預報模式之開發。

本研究所使用之 COMCOT 暴潮模式與中央研究院網格與科學計算中心（Grid and Scientific Computing Center, Academia Sinica）合作後，修改 COMCOT 模式使其具備單機高速平行之計算效能，其速度為原始版本速度之 10 倍以上，因此被中央氣象署採用，為目前官方暴潮預報模式之一。

風暴潮（Storm Surge）與海嘯波（Tsunami Wave）相同，波長遠大於海水深度，因此在深海區域中可視為淺水波（Shallow Water Wave）。至於判斷是否為淺水波，則由頻散係數（Dispersion Coefficient）所決定，其定義為水深除以波長，若其值小於 1/20，則視為淺水波，其值若大於 1/2，則視為深水波（Deep Water Wave），其值介於兩者中間者，則視為中間波（Intermediate Depth Wave）。頻散係數如下所列：

$$\mu = \frac{h}{L} \quad (\text{式 3—1})$$

其中， μ 為頻散係數， h 為海水深度， L 為波長。

當風暴潮之振幅遠小於海水深度時，可以微小振幅波理論（Small Amplitude Wave Theory）進行假設，忽略非線性之對流項（Convective Term）部分，此線性理論僅於海水深度深且風暴潮振幅小時成立。當風暴潮傳遞至近岸後，非線性強度（Nonlinearity）增加，且其值超過 0.1 時，線性淺水波方程將不再適合，必須改以非線性淺水波方程式描述風暴潮傳遞及近岸溯上過程。非線性強度如下所列：

$$\varepsilon = \frac{A}{h} \quad (\text{式 3—2})$$

其中， ε 為非線性強度， h 為海水深度， A 為振幅。

3-1-1 線性淺水波方程式

當風暴潮振幅相對於海水深度很小時，可以微小振幅波理論（Small Amplitude Wave Theory）進行假設，忽略非線性之對流項部分；海水深度較深時，底部摩擦（Bottom Friction）也可以忽略不計。COMCOT 風暴潮模式與原始 COMCOT 海嘯模式不同之處，在於統御方程式中加入了颱風氣象力之影響，可由氣壓梯度項（Pressure Gradient Term）和風剪力項（Wind Shear Stress Term）等來描述風暴潮之傳遞行為。

因此，卡氏座標之線性淺水波中連續方程式（Continuity Equation）及動量方程式（Momentum Equation）分別如下述所列：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (\text{式 3—3})$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} - fQ = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\tau_s^x}{\rho_w} \quad (\text{式 3—4})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + fP = -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\tau_s^y}{\rho_w} \quad (\text{式 3—5})$$

其中， t 為時間， P, Q 分別為 x, y 方向之體積通量（ $P = \int_{-h}^{\eta} \bar{u}(x, y, z, t) dz$ ， $Q = \int_{-h}^{\eta} \bar{v}(x, y, z, t) dz$ ， $\bar{u}, \bar{v}$ 為時間平均流速）， f 為科氏力係數（ $f = 2\omega \sin \varphi$ ， $\omega = 7.2921\text{e} - 5$ 為地球自轉角頻率， φ 為緯度）， η 為自由液面高程， h 為靜水深， H 為總水深（ $H = h + \eta$ ）， τ_s^x, τ_s^y 分別為 x, y 方向之風剪力， g 為重力加速度（ 9.81ms^{-2} ）， ρ_w 為海水密度， P_a 為大氣壓力。

球座標系統下，必須額外考慮地球之科氏力與不同緯度之距離變化影響，因此，球座標之線性淺水波中連續方程式（Continuity Equation）及動量方程式（Momentum Equation）分別如下述所列：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi \cdot Q) \right\} = 0 \quad (\text{式 3—6})$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ = -\frac{H}{\rho_w R \cos \varphi} \frac{\partial P_a}{\partial \psi} + \frac{\tau_s^\psi}{\rho_w} \quad (\text{式 3—7})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP = -\frac{H}{\rho_w R} \frac{\partial P_a}{\partial \varphi} + \frac{\tau_s^\varphi}{\rho_w} \quad (\text{式 3—8})$$

其中， φ, ψ ：球座標系統下之空間座標； P, Q 分別為 x, y 方向之體積通量（ $P = \int_{-h}^{\eta} \bar{u}(\varphi, \psi, z, t) dz$ ， $Q = \int_{-h}^{\eta} \bar{v}(\varphi, \psi, z, t) dz$ ， $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 為時間平均流速）； H ：總水深； η ：自由液面高程； h ：靜水深； g ：重力加速度； R ：地球半徑； f 為科氏力係數（ $f = 2\omega \sin \varphi$ ， $\omega = 7.2921\text{e} - 5$ 為地球自轉角頻率， φ 為緯度）， $\tau_s^\psi, \tau_s^\varphi$ 分別為 φ, ψ 方向之風剪力， g 為重力加速度（ 9.81ms^{-2} ）， ρ_w 為海水密度， P_a 為大氣壓力。

3-1-2 非線性淺水波方程式

當風暴潮傳遞至近岸，水深變淺且波長變短時，風暴潮高度增加，非線性強度增強，此時，非線性對流項以及底床摩擦對風暴潮影響增大，必須列入考慮，非線性淺水波方程式較適用。

卡氏座標系統下之非線性淺水波方程式，受限於區域性範圍，因此忽略科氏力之影響，其連續方程式(Continuity Equation)及動量方程式(Momentum Equation)分別如下述所列：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (\text{式3—9})$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) - fQ = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\tau_s^x}{\rho_w} - \frac{\tau_b^x}{\rho_w} \quad (\text{式3—10})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + fP = -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\tau_s^y}{\rho_w} - \frac{\tau_b^y}{\rho_w} \quad (\text{式3—11})$$

其中， t 為時間， P, Q 分別為 x, y 方向之體積通量（ $P = \int_{-h}^{\eta} \bar{u}(x, y, z, t) dz$ ， $Q = \int_{-h}^{\eta} \bar{v}(x, y, z, t) dz$ ， $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 為時間平均流速）， f 為科氏力係數（ $f = 2\omega \sin \varphi$ ， $\omega = 7.2921\text{e} - 5$ 為地球自轉角頻率， φ 為緯度）， η 為自由液面高程， h 為靜水深， H 為總水深（ $H = h + \eta$ ）， τ_s^x, τ_s^y 分別為 x, y 方向之風剪力， τ_b^x, τ_b^y 分別為 x, y 方向之底床摩擦剪應力， g 為重力加速度（ 9.81ms^{-2} ）， ρ_w 為海水密度， P_a 為大氣壓力。

球座標之非線性淺水波中連續方程式(Continuity Equation)及動量方程式(Momentum Equation)，必須額外考慮地球之科氏力與不同緯度之距離變化影響，分別如下述所列：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi \cdot Q) \right\} = 0 \quad (\text{式 3—12})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{PQ}{H} \right) - fQ \\ &= -\frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - \frac{H}{\rho_w R \cos \varphi} \frac{\partial P_a}{\partial \psi} + \frac{\tau_s^\psi}{\rho_w} - \frac{\tau_b^\psi}{\rho_w} \end{aligned} \quad (\text{式 3—13})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + fP \\ &= -\frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} - \frac{H}{\rho_w R} \frac{\partial P_a}{\partial \psi} + \frac{\tau_s^\varphi}{\rho_w} - \frac{\tau_b^\varphi}{\rho_w} \end{aligned} \quad (\text{式 3—14})$$

其中， φ, ψ ：球座標系統下之空間座標； P, Q 分別為 x, y 方向之體積通量（ $P = \int_{-h}^{\eta} \bar{u}(\varphi, \psi, z, t) dz$ ， $Q = \int_{-h}^{\eta} \bar{v}(\varphi, \psi, z, t) dz$ ， $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 為時間平均流速）； H ：總水深； η ：自由液面高程； h ：靜水深； g ：重力加速度； R ：地球半徑； f 為科氏力係數（ $f = 2\omega \sin \varphi$ ， $\omega = 7.2921\text{e} - 5$ 為地球自轉角頻率， φ 為緯度）， $\tau_s^\psi, \tau_s^\varphi$ 分別為 φ, ψ 方向之風剪力， $\tau_b^\psi, \tau_b^\varphi$ 分別為 φ, ψ 方向之底床摩擦剪應力， g 為重力加速度（ 9.81ms^{-2} ）， ρ_w 為海水密度， P_a 為大氣壓力。

模式中之底床摩擦剪應力透過曼寧公式(Manning's Formula)進行假設(Goto 等, 1997; Liu 等, 1998)，可表示為：

$$\tau_b^x = \rho_w C_f P (P^2 + Q^2)^{1/2} = \rho_w \frac{gn^2}{H^{7/3}} P (P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (\text{式 3—15})$$

$$\tau_b^y = \rho_w C_f Q (P^2 + Q^2)^{1/2} = \rho_w \frac{gn^2}{H^{7/3}} Q (P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (\text{式 3—16})$$

其中 C_f 為底床阻力係數， n 是為曼寧粗糙係數(Manning's Roughness Coefficient)，為一經驗常數，由流體所通過之不同底床所決定。

3-2 颱風大氣模式

3-2-1 Holland Model 理想風場模式

根據 Holland (1980) 所提出的理想風場之氣壓模式為：

$$P_a = P_c + (P_n - P_c) \exp \left[- \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^B \right] \quad (\text{式 3—17})$$

式中， P_c 為颱風中心之大氣氣壓、 R_{max} 為最大風速所在半徑、 B 為峰值參數 (peakness parameter) 和 P_n 為環境大氣氣壓 (ambient pressure)。

$$V_w = \sqrt{\frac{B(P_n - P_c)}{\rho_a} \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^B \exp \left[- \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^B \right] + \frac{r^2 f^2}{2} - \frac{rf}{2}} \quad (\text{式 3—18})$$

式中， V_w 為風速、 P_c 為風暴中心之大氣氣壓、 R_{max} 為最大暴風半徑、 B 為峰值參數 (peakness parameter)、 f 為科氏力、 ρ_a 為空氣密度、 r 為距暴風中心半徑和 P_n 為環境大氣氣壓 (ambient pressure)。

Harper 與 Holland (1999) 建議峰值參數 B 值的經驗關係如下：

$$B = 2 - \frac{P_c - 900}{160} \quad (\text{式 3—19})$$

氣象署所提供資訊為七級風半徑和近中心最大風速，需經轉換成為最大暴風半徑 (Radius of Maximum Wind)，公式如下：

$$R_{max} = R_7 \left(\frac{V_7}{V_{max}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{式 3—20})$$

其中， R_{max} 為最大暴風半徑、 V_{max} 為近中心最大風速、 R_7 為七級風半徑、 V_7 為七級風風速。

3-2-2 CWB Model 理想風場模式

臺灣本島地勢起伏差異大，其颱風結構往往易受高山地形影響，風場和氣壓場隨之改變。已知國際間廣泛運用之 Holland 理想風場模型適用於臺灣區域，而仍有部分參數需要更進一步調整以符合區域特徵。氣象署參考前人研究，冀望找出適用於臺灣近海區域之參數化公式，建立氣象署理想風場模式 (CWB Model，於本計畫中簡稱 CWB)。氣象署參考 Holland 理想風場模型之颱風中心氣壓公式如下：

$$P_a = P_c + (P_n - P_c) \exp \left[- \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^B \right] \quad (\text{式 3—21})$$

其中， P_c 為颱風中心之大氣氣壓、 R_{max} 為最大暴風半徑、 B 為峰值參數 (peakness parameter) 和 P_n 為環境大氣氣壓 (ambient pressure)。利用過往案例研究，分別提出峰值參數 B 值及最大暴風半徑 R_{max} 可依下列經驗式求得：

$$B = \frac{1}{P_n - P_c} \left(\frac{V_{max}}{5.375} \right)^2 \quad (\text{式 3—22})$$
$$R_{max} = \begin{cases} 42.6 - 0.86 \cdot (P_c - 990), & P_c \geq 990 \\ 51.0 - 0.84 \cdot (P_c - 980), & 980 \leq P_c < 990 \\ 58.4 - 0.74 \cdot (P_c - 970), & 970 \leq P_c < 980 \\ 63.0 - 0.46 \cdot (P_c - 960), & 960 \leq P_c < 970 \\ 70.0 - 0.234 \cdot (P_c - 930), & 930 \leq P_c < 960 \\ 80.0 - 0.167 \cdot (P_c - 870), & 870 \leq P_c < 930 \\ 80.0, & P_c < 870 \end{cases} \quad (\text{式 3—23})$$

其中，最大暴風半徑 R_{max} 單位為公里， P_c 單位為毫巴。

熱帶氣旋風場分布，氣象署參考 Jelesnianski 等人 (1992) 所定義之理想風場公式如下：

$$V_w = 2 \cdot V_{max} \cdot \frac{R_{max} \cdot r}{R_{max}^2 + r^2} \quad (\text{式 3—24})$$

其中 V_{max} 為最近中心最大風速、 R_{max} 為最大暴風半徑、 r 為距暴風中心半徑。

3-2-3 風剪力和風阻力係數

目前由模式所計算的風剪力所產生的暴潮偏差分量的大小與風剪力的計算，可採用 Smith 與 Banke (1975) 所建議之公式，為：

$$\tau_s = \rho_a C_d |U_{10}| U_{10} \quad (\text{式 3—25})$$

其中， U_{10} 為平面上 10 公尺處風速、 ρ_a 為空氣密度、 C_d 為剪力係數 (Drag Coefficient)。 C_d 的值將隨不同 $|U_{10}|$ 值而改變 (Large 與 Pond, 1981, Powell, 2003)，如下：

$$10^3 C_d = \begin{cases} 2.16 & |U_{10}| > 26 \text{ms}^{-1} \\ 0.49 + 0.065|U_{10}|, & 10 \text{ms}^{-1} \leq |U_{10}| < 26 \text{ms}^{-1} \\ 1.14, & 3 \text{ms}^{-1} \leq |U_{10}| < 10 \text{ms}^{-1} \\ 0.62 + 1.56|U_{10}|, & 1 \text{ms}^{-1} \leq |U_{10}| < 3 \text{ms}^{-1} \\ 2.18, & |U_{10}| < 1 \text{ms}^{-1} \end{cases} \quad (\text{式 3—26})$$

理想風場之風場向量為對稱風場型式，公式如下：

$$\begin{cases} U_{10}^x = U_{10} \cdot \cos(\theta + 90^\circ) \\ U_{10}^y = U_{10} \cdot \sin(\theta + 90^\circ) \end{cases} \quad (\text{式 3—27})$$

其中， U_{10}^x 和 U_{10}^y 為網格點 x 方向和 y 方向分量， θ 為網格點與颱風中心之交角。颱風緩慢移動條件下，會造成風場之不對稱性，可透過颱風移動速度對風場向量進行修改。最大暴風半徑內，風場向量修正如下：

$$\begin{cases} U_{10}^x = U_{10}^x + U_{storm}^x \frac{r}{r+R_{max}} \\ U_{10}^y = U_{10}^y + U_{storm}^y \frac{r}{r+R_{max}} \end{cases} \quad (\text{式 3—28})$$

最大暴風半徑外，風場向量修正如下：

$$\begin{cases} U_{10}^x = U_{10}^x + U_{storm}^x \frac{R_{max}}{r+R_{max}} \\ U_{10}^y = U_{10}^y + U_{storm}^y \frac{R_{max}}{r+R_{max}} \end{cases} \quad (\text{式 3—29})$$

3-3 地形與網格設置

本研究為完整涵蓋颱風之生命週期，即颱風微弱之熱帶性低氣壓之「發生期」，威力漸增之「發展期」，颱風中心氣壓最低，風速最強之「極盛期」，乃至颱風威力漸弱之「衰弱期」都涵蓋在內，因此選用大範圍之計算域；當風暴潮傳遞至沿海地區時，與潮汐產生非線性之交互作用以及地形深淺所造成之折射效應，應當使用較小範圍之計算域進行模擬，並以此計算域導入潮汐效應；風暴潮受氣象力影響，使得海水位較原本潮汐水位更高，適逢高潮或漲潮時，海水將越過海岸線溢淹上岸，導致海水倒灌。

本研究目前以中央氣象署現採用之 COMCOT 暴潮預報模式為基礎，發展暴潮系集預報模式，其預報作業所採用之網格為巢狀網格，可見於圖 3—1 至圖 3—3；

圖 3—1 為現 COMCOT 風暴潮預報模式 LAYER 01 之計算範圍，範圍為介於東經 110 度到東經 134 度及北緯 10 度到北緯 35 度；在此模擬區域中，台灣東部地帶為太平洋海域，水深較深，平均深度約為 5000 公尺，西部介於中國大陸與台灣之間的台灣海峽為近岸地區，水深較淺，平均水深約在 80 公尺左右。地形資料取自 ETOPO 1 外插之結果，網格解析度約為 8 公里；圖 3—2 至圖 3—3 為現 COMCOT 暴潮模式 LAYER 02 之計算範圍，該範圍區分為 5 個不同之區域，編號由 A 區至 E 區，並且依據不同海岸線和島嶼地形調整個別之解析度，台灣本島區為 A 區，解析度均為 1 弧分，約為 2 公里；非台灣本島之澎湖、金門、馬祖和東沙編號為 B 區、C 區、D 區和 E 區，解析度為 0.5 弧分，約為 1 公里，上述地形分別使用 ETOPO 1 和 GEBCO 地形。

表 3—1 列出目前 COMCOT 暴潮系集模式採預報用途時之相對應網格編號計算域範圍和解析度。

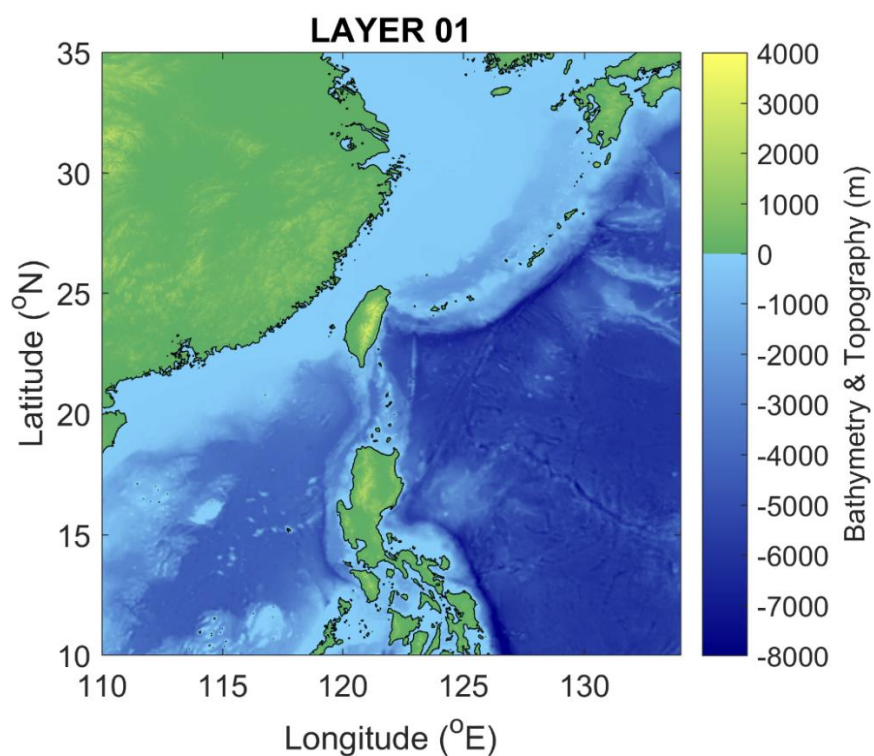


圖 3—1 中央氣象署採用之 COMCOT 風暴潮溢淹模式第一層巢狀網格計算域，範圍東經 110 度至 134 度，北緯 10 度至 35 度，解析度為 4 弧分（8 公里），資料來源為 ETOPO 1。

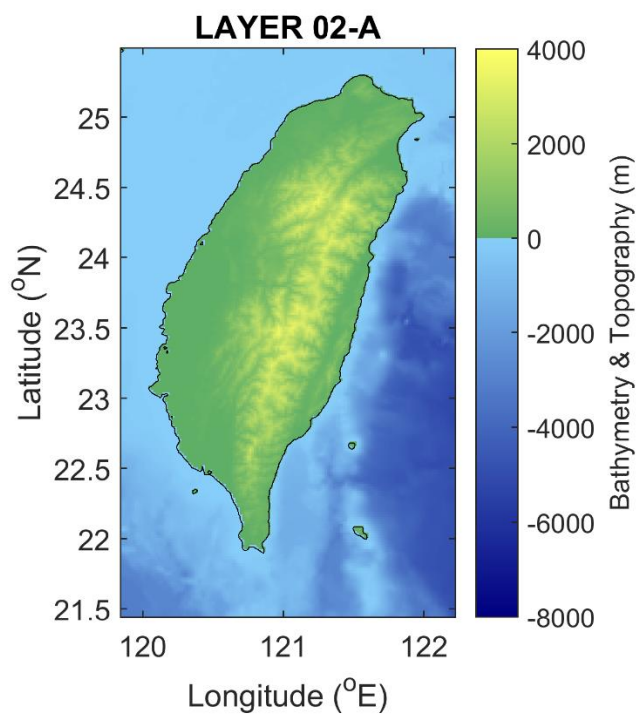


圖 3—2 中央氣象署採用之 COMCOT 風暴潮溢淹模式第二層巢狀網格計算域之台灣本島區域，編號為 02-A。

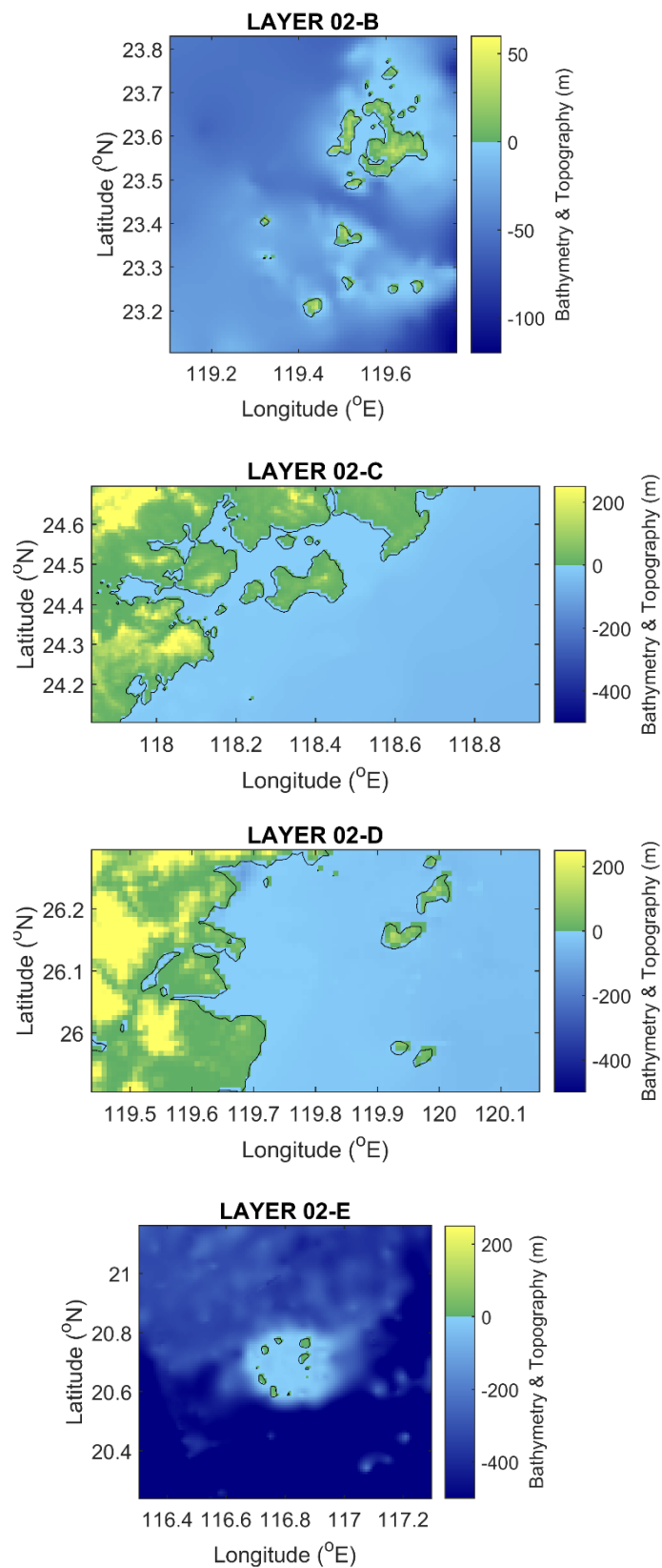


圖 3—3 中央氣象署採用之 COMCOT 風暴潮溢淹模式第二層巢狀網格計算域之離島區域，包含澎湖、金門、馬祖和東沙區域，編號分別為 02-B 至 02-E。

表 3—1 現中央氣象署採用之 COMCOT 暴潮溢淹預報模式
計算域網格範圍與解析度

計算網格 編號	經度方向範圍 (°E)	緯度方向範圍 (°N)	解析度
01	110.00 – 134.00	10.00 – 35.00	4 弧分 (約 8 公里)
02-A	119.80 - 122.25	21.40 - 25.50	1 弧分 (約 2 公里)
02-B	119.09 - 119.80	23.05 - 23.89	0.5 弧分 (約 1 公里)
02-C	117.80 - 118.99	24.09 - 24.70	0.5 弧分 (約 1 公里)
02-D	119.39 - 120.19	25.84 - 26.35	0.5 弧分 (約 1 公里)
02-E	116.29 – 117.31	20.19 – 21.23	0.5 弧分 (約 1 公里)

3-4 暴潮模式指定預報潮位站

為研究台灣近岸海域之風暴潮歷時記錄，根據氣象署海象氣候組所提供之實際潮位站資訊，於本研究所開發之暴潮系集預報模式中分別設置 34 處數值潮位計（Numerical Tide Gauge），可輸出風暴潮模式中各時間步所模擬之風暴潮、氣壓值和風速值等歷時資料。

圖 3—4 表示數值潮位計之設置圖，顏色表示地形高程，紅色三角形表示數值潮位計之位置。表 3—2 為氣象署所提供 34 處潮位站中之編號、潮位站名稱、代碼、英文名稱以及經緯度座標等資訊。

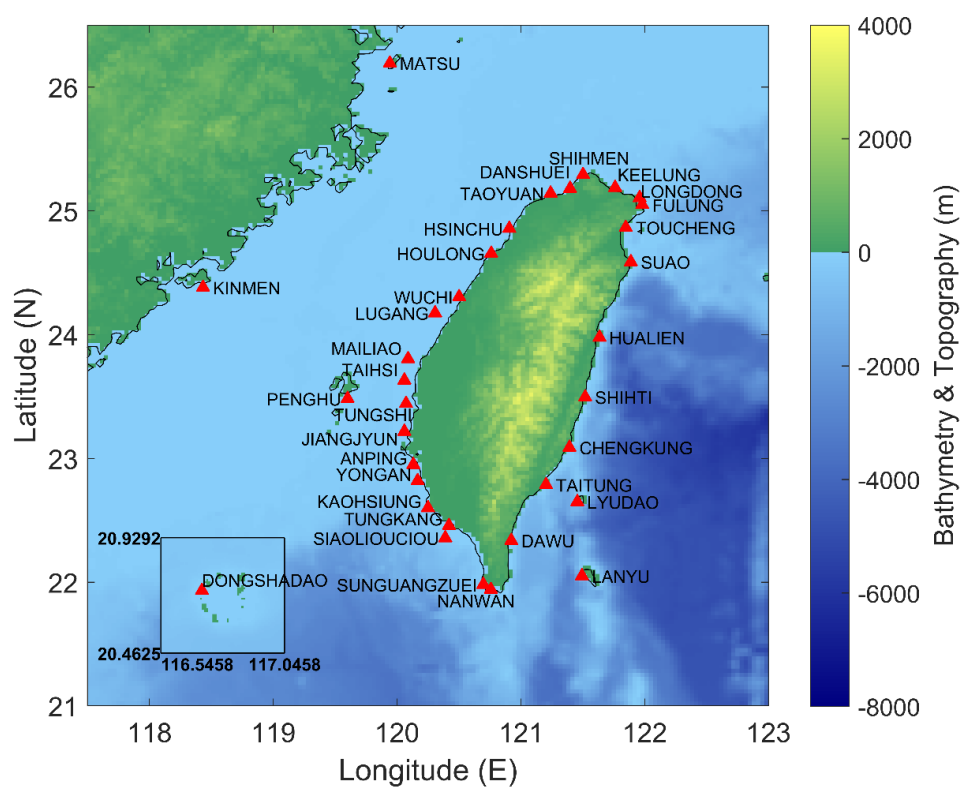


圖 3—4 34 處指定預報潮位站分布。

表 3—2 34 處指定預報潮位站資訊。

編號	對應潮位測站	潮位站代碼	英文名稱	經度	緯度
1	龍洞	1226	LONGDONG	121.95	25.12
2	基隆	1516	KEELUNG	121.75	25.16
3	福隆	1826	FULONG	121..95	25.02
4	頭城	1236	TOUCHENG	121.86	24.90
5	蘇澳	1246	SUAO	121.86	24.59
6	花蓮	1256	HUALIEN	121.61	23.96
7	石梯	1566	SHITI	121.50	23.49
8	成功	1276	CHENGKUNG	121.37	23.08
9	台東	1586	TAITUNG	121.19	22.79
10	大武	1596	DAWU	120.89	22.33
11	綠島	1676	LUDAO	121.46	22.66
12	蘭嶼	1396	LANYU	121.49	22.06
13	石門	1206	SHIHMEN	121.51	25.28
14	淡水	1102	DANSHUEI	121.42	25.18
15	桃園	1116	TAOYUAN	121.23	25.12
16	新竹	112	HSINCHU	120.91	24.85
17	後龍	113	HOULONG	120.77	24.65
18	梧棲	1436	WUCHI	120.53	24.29
19	鹿港	1146	LUGANG	120.42	24.08
20	麥寮	1456	MAILIAO	120.16	23.79
21	台西	1156	TAISI	120.14	23.62
22	東石	1162	TUNGSHI	120.14	23.44
23	將軍	1176	JIANGJUN	120.08	23.21
24	安平	1471	ANPING	120.18	22.98
25	永安	1786	YONGAN	120.20	22.82
26	高雄	1486	KAOSIUNG	120.29	22.61
27	東港	1186	TUNGKANG	120.44	22.46
28	東沙島	198	DONGSHADAO	116.69	20.70
29	蟬廣嘴	1496	SUNGUANGZUEI	120.71	21.99
30	南灣	1196	NANWAN	120.75	21.95
31	小琉球	1386	SIAOLIIOUCHIOU	120.38	22.35
32	澎湖	1356	PENGHU	119.58	23.56
33	金門	1956	KINMEN	118.43	24.41
34	馬祖	1926	MATSU	119.94	26.16

3-5 TPXO 天文潮模式結合

TPXO 天文潮模式由俄勒岡州立大學（Oregon State University, OSU）所研發建置，是以拉普拉斯潮汐方程式（Laplace's tidal equations）搭配水位測高數據（altimetry data）及最小平方法（least squares method）所得之全球海洋潮汐模式。對於平均厚度為 D 的流體薄片，垂直方向的潮汐水位 ζ ，水平速度分量 u 、 v （分別位於緯度 φ 與經度 λ 方向），拉普拉斯潮汐方程式可以表示如下：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{a \cos(\varphi)} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (uD) + \frac{\partial}{\partial \varphi} (uD \cos(\varphi)) \right] = 0 \quad (\text{式 3—30})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - v(2\Omega \sin(\varphi)) + \frac{1}{a \cos(\varphi)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (g\zeta + U) = 0 \quad (\text{式 3—31})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u(2\Omega \sin(\varphi)) + \frac{1}{a \cos(\varphi)} \frac{\partial}{\partial \varphi} (g\zeta + U) = 0 \quad (\text{式 3—32})$$

其中， Ω 為行星旋轉的角頻率、 g 為行星在平均海表面作用的重力加速度、 a 為行星半徑、 U 為外部重力位能。模式中考慮八個主要分潮位（M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1）、兩個長週期分潮位（Mf, Mm）和 3 個非線性分潮位（M4, MS4, MN4），以 0.25 弧分之解析度進行運算（Dushaw et al., 1997）；本研究所採用之 COMCOT 暴潮模式之潮汐邊界條件，均由 TPXO 天文潮模式所提供，目前採用版本為 8.0 版。

圖 3—5 為來自 TPXO 官網之全球潮汐模式 TPXO 模式示意圖，其顯示半日周期之 M2 分潮的相關結果，顏色由藍至紅顯示潮汐水位 0~1.5 公尺。

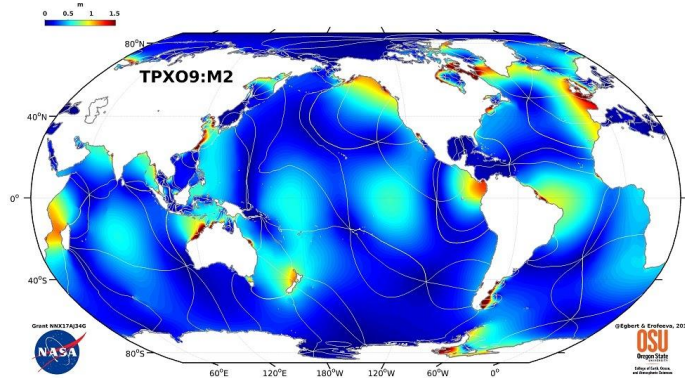


圖 3—5 全球潮汐模式 TPXO 模式示意圖（TPXO 官網）。

3-6 暴潮系集預報成員產出方法

3-6-1 誤差機率分布法

氣象署現有作業化之 COMCOT 暴潮預報模式中，可以選用參數化氣象場或 TWRP 氣象場作為颱風輸入條件。若選擇採用理想風場，便需要颱風路徑、颱風中心氣壓、七級風半徑、最大風速之時間序列以計算颱風氣象環境隨時間變化情形，且以上資訊皆可透過氣象署所發布之颱風警報單取得。

美國 NOAA 的暴潮機率預報系統 (Probabilistic Hurricane Storm Surge Model, P-surge) 即是採用類似的方式。為了創建一個假想的暴潮系集成員組合，P-surge 需要美國國家颶風中心 (National Hurricane Center, NHC) 預報各項相關參數的誤差分佈以及建議路徑。Taylor 等人 (2008) 提出垂直於颱風運動之路徑誤差 (cross-track error)、沿著颱風運動之路徑誤差 (along-track error) 及強度誤差，並假設這些誤差為常態分佈，以計算三項參數組合而成的颱風路徑系集成員。透過分析過去幾年颱風預報的平均誤差，將 NHC 建議路徑作為參考，利用誤差分佈函數將單一建議路徑分散為涵蓋重點區域、颱風登陸點皆不相同的多條路徑，並產生相關系集預報產品。

台灣曾統計颱風預報路徑誤差者，有鄭等人 (2016) 提出 TWRP 颱風數值預報系統的之 24/48/72 小時颱風路徑預報誤差分佈，依據颱風真實路徑計算所得。根據鄭等人 (2016)，TWRP 在 2013 年、2014 年、2015 年之 24/48/72 小時颱風路徑預報誤差分別為 91/152/210、91/147/223、84/133/197 公里，已具有不錯之預測技術。2016 年，TWRP 之水平解析度更將由 45/15/5 公里提高為 15/3 公里，該研究針對 2015 年 10 個颱風共 166 個案進行測試，24/48/72 小時颱風路徑預報誤差為 60/106/170 公里。鄭等人 (2016) 針對 TWRP 颱風路徑之預報誤差不同於 Taylor 等人 (2008)，對於垂直於颱風運動之路徑誤差 (cross-track error) 及沿著颱風運動之路徑誤差 (along-track error) 並無分量敘述。曾涉及路徑誤差

分量統計的研究，有李（1988）、葉等人（1998）對於台灣附近地區颱風路徑之預報分析提出之預報誤差以及標準差數據，且葉等人（1998）亦提出統計方法之應用，但兩者對於路徑預報誤差以及標準差的研究紀錄分別止於 1987 年及 1995 年，若能取得近年颱風預報路徑資料，則可透過類似前人之前就方法計算並取得垂直於颱風運動之路徑誤差(cross-track error)及沿著颱風運動之路徑誤差(along-track error)，以及路徑標準差以求得路徑誤差機率分布。於颱風強度預報方面，Huang 等人（2021）曾經針對 JTWC 及 JMA 之颱風強度比較及統計預報校驗進行相關分析，而針對台灣颱風強度預報誤差之相關研究，鮮少針對過往預報誤差進行統計分析。

圖 3—7 至圖 3—10 展示使用自 2017 年起至 2021 年止之颱風警報單紀錄與颱風資料庫最佳路徑資料推算所得之颱風參數誤差分布。圖中由左至右依據為預報第 12、24、36、48 小時之誤差分布情形。圖中灰色條狀圖顯示所得誤差樣本分布，橫軸為誤差值，圖 3—7 中單位為公里，圖 3—8 中單位為百帕，圖 3—9 單位為公里，圖 3—10 中單位為公尺/秒；縱軸依機率密度函數繪製分布。

在取得樣本分布之後，我們可以透過不同的機率密度函數(Probability density function)擬合樣本分布情形，取得颱風參數誤差的機率分布。本研究中選用常態分佈(Normal Distribution，又名高斯分布，Gaussian Distribution)、羅吉斯分布(Logistic Distribution)及 t 位置尺度分布(t Location-Scale Distribution)三種機率密度分布函數，並比較三者中何者較為符合現有颱風預報參數誤差樣本分布情形，決定何者作為後續產生暴潮系集預報成員的依據。

其中，常態分佈(Normal Distribution)被相當廣泛的運用，常態分布有兩個參數，分別為位置參數(location) μ 、尺度參數(scale) σ 。其機率密度函數可以表示如下式：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{式 3—33})$$

羅吉斯分布 (Logistic Distribution) 具有比常態分佈更長的尾部和更高的峰度 (kurtosis)，具有兩個參數，分別為位置參數 (location) μ 及尺度參數 (scale) σ ，其機率密度函數可以表示如下式：

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{e^{\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}}{\sigma\left(1+e^{\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}\right)^2}, \begin{cases} -\infty < x < \infty \\ -\infty < \mu < \infty \\ \sigma \geq 0 \end{cases} \quad (\text{式 3—34})$$

T 位置尺度分布 (T Location-Scale Distribution) 通常適用於比常態分佈更容易出現異常值的資料分佈情形，亦適用於根據小樣本來估計呈常態分布且變異數 (Variance) 未知的母體均值。T 位置尺度分布有三個參數，分別為位置參數 (location) μ 、尺度參數 (scale) σ 及形狀參數 (shape) ν 。當 ν 接近無窮大時，t 位置尺度分布接近常態分佈，而較小的 ν 值產生較重的尾部。T 位置尺度分布之機率密度函數可以表示如下式：

$$f(x|\mu, \sigma, \nu) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sigma\sqrt{\nu\pi}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left[\frac{\nu + \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}{\nu} \right]^{-\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}$$

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt, \begin{cases} -\infty < \mu < \infty \\ \sigma > 0 \\ \nu > 0 \end{cases} \quad (\text{式 3—35})$$

三種機率密度分布函數擬合颱風預報參數誤差樣本後所得之圖形分布如圖 3—7 至圖 3—10 所示。其中，紅色曲線為常態分佈、桃紅色表示羅吉斯分布 (Logistic Distribution)、藍色線為 T 位置尺度分布 (t Location-Scale Distribution)。從圖中可以看出，於所有樣本分布情形中，常態分佈機率密度函數擬合峰值時皆有比羅吉斯分布及 T 位置尺度分布低，且曲線鐘形分布較另二者寬的情形。羅吉斯分布與 T 位置尺度分布於大部分樣本分類中，擬合圖形相近，且 T 位置尺度分布峰值皆大於或等於羅吉斯分布曲線峰值，繪製圖 3—7 至圖 3—10 中各項機率密度函數分布曲線所需之參數詳列於表 3—3。

為求暴潮系集預報作業系統中選取系集成員的方式統一，預報過程中皆採取 T 位置尺度分布之機率密度分布函數作為產生系集預報路徑成員之依據。透過均

分機率密度分布函數曲線下面積為數等分，可以得到橫軸上相對應點作為誤差分布之參考成員，示意圖如圖 3—6。為保持誤差成員於機率密布分布曲線峰值處有代表值，研究中於切割曲線下面積時皆平分為偶數份，以機率密度曲線下面積切割為 N 等分時，可於曲線下得到 $N+1$ 個端點，以代表所產生之系集成員所對應之誤差組成。

在利用過往預報誤差之機率分布取得系集成員路徑偏移的參考之後，便可以於後續實際預報作業中，依據將颱風警報單（即決定性預報）及事先取得之預報誤差之機率分布曲線，搭配不同的誤差成員組合產生系集成員。

圖 3—11 以預報起始時間為 2016 年 07 月 07 日 02 時之颱風系集預報路徑成員分布作為示意範例。黑色星號表示颱風警報單內紀錄之原始預報位置，色線表示透過誤差機率分布曲線及颱風警報單所產出之系集路徑成員。圖片排列由上而下為考量垂直路徑成員組數 1、3、5、9 組，由左至右為考量平行路徑成員組數 1、3、5、9 組，共計 16 種組合。從圖中可以看到，平行路徑成員與垂直路徑成員各考慮 3 組時可以組成 9 個系集成員，基本涵蓋了本次成員組合分析的最大空間範圍，新增的系集成員數則皆以此為邊界進行空間上的加密，考量的系集成員數越多，靠近決定性預報路徑的區域有更密集的系集路徑成員分布。

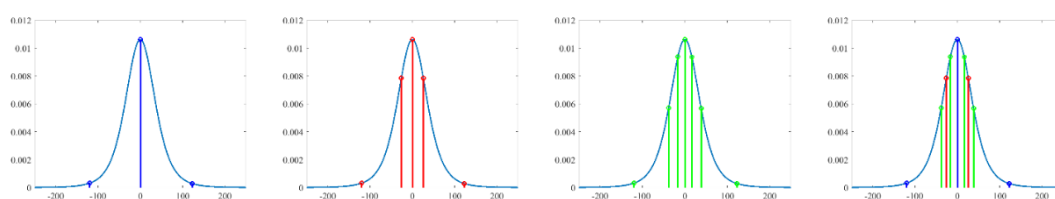


圖 3—6 機率密度分布函數產生系集預報路徑成員之示意圖。

圖左一左三為依序將曲線下面積均分為二、四、六等分，最右圖為自圖左一左三中產生之無重複之系集成員分布。

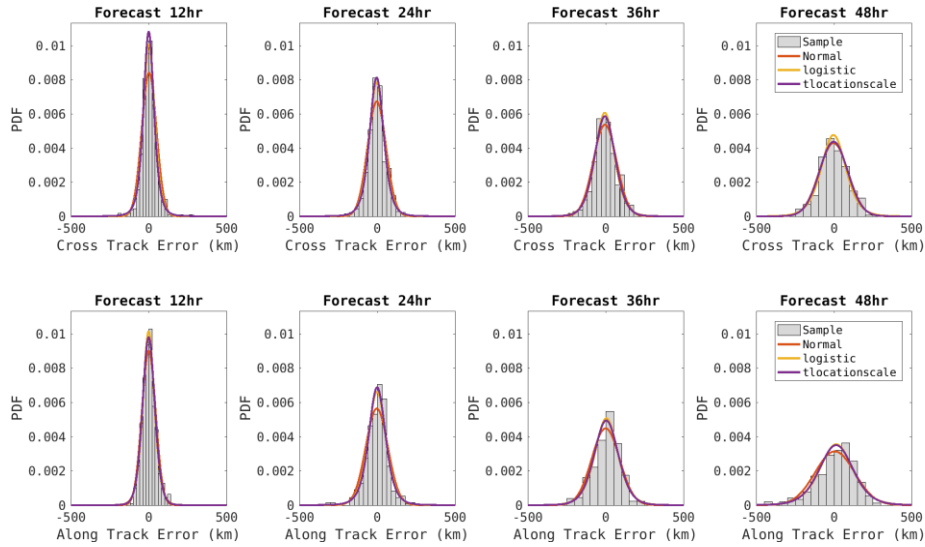


圖 3—7 颱風預報路徑誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。
上排為垂直路徑誤差、下排為平行路徑誤差。

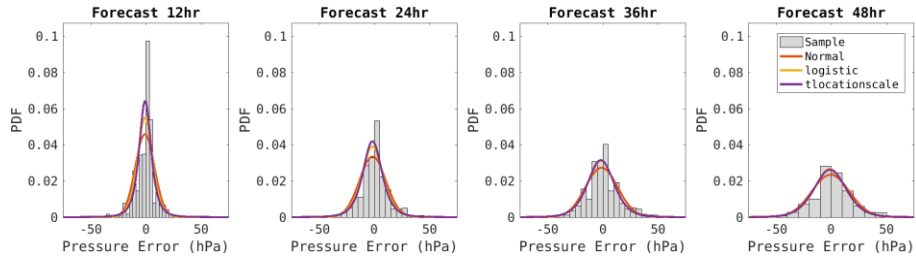


圖 3—8 颱風預報氣壓值誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。

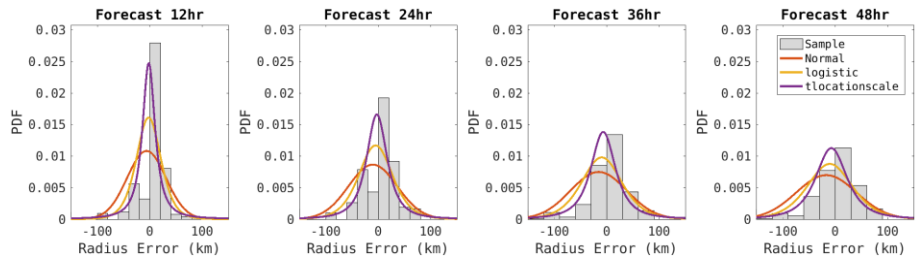


圖 3—9 颱風預報七級風半徑誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。

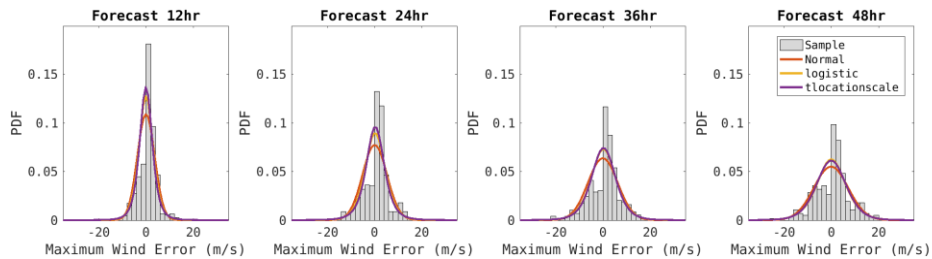


圖 3—10 颱風預報近中心最大風速誤差分布及各項機率密度函數擬合情形。

表 3—3 重建各項機率密度函數分布曲線所需之參數

誤差 種類	預 報 小 時	Normal Distribution		Logistic Distribution		T Location-scale Distribution		
參數		μ	σ	μ	σ	μ	σ	ν
垂直 路徑 誤差 (CTE)	12	2.588	47.458	1.404	24.831	0.000	34.798	4.220
	24	-2.564	59.366	-3.350	31.915	-3.526	46.715	5.039
	36	-4.470	74.335	-5.608	41.215	-4.985	66.362	9.623
	48	-1.699	93.067	-2.288	52.490	-1.686	90.902	46.718
平行 路徑 誤差 (ATE)	12	0.408	44.343	-0.683	24.655	-0.413	39.710	9.956
	24	-2.285	70.817	-0.588	37.844	-0.211	55.290	5.057
	36	0.052	89.040	4.956	49.355	4.077	78.602	8.995
	48	6.371	127.278	15.611	70.365	14.860	110.509	8.003
氣壓 誤差	12	-0.752	8.707	-0.626	4.545	-0.511	5.694	2.922
	24	-1.410	11.910	-1.538	6.399	-1.559	8.962	4.105
	36	-0.942	14.631	-1.559	8.004	-1.629	12.157	6.089
	48	-0.489	17.037	-0.948	9.389	-0.936	14.748	7.674
七級風 半徑 誤差	12	-5.864	36.956	-1.943	15.553	-1.634	13.672	1.418
	24	-9.954	46.232	-4.702	21.418	-2.342	21.269	1.953
	36	-15.015	53.398	-9.244	25.580	-6.420	25.530	1.942
	48	-16.464	57.299	-9.942	28.603	-6.978	31.939	2.315
近中心 最大 風速 誤差	12	0.134	3.664	0.128	1.962	0.122	2.748	4.117
	24	0.241	5.168	0.405	2.794	0.475	3.908	4.066
	36	0.085	6.280	0.345	3.426	0.380	5.156	5.779
	48	-0.025	7.266	0.073	4.005	0.054	6.319	7.940

表 3—4 切割 T 位置尺度分布曲線下面積所得之誤差成員分布情形

誤差 類別	預 報 小 時	面積均分數								
		2			4		6			
垂直路 徑誤差 CTE (km)	12	0.0	-126.7	126.7	-25.6	25.6	-38.0	-16.1	16.1	38.0
	24	-3.5	-160.2	153.2	-37.5	30.4	-53.5	-24.9	17.8	46.4
	36	-5.0	-189.7	179.8	-51.5	41.5	-72.6	-34.5	24.5	62.6
	48	-1.7	-220.7	217.3	-63.5	60.1	-90.5	-41.1	37.7	87.2
平行路 徑誤差 ATE (km)	12	-0.4	-110.3	109.4	-28.2	27.4	-40.8	-18.0	17.2	40.0
	24	-0.2	-185.4	185.0	-40.4	39.9	-59.3	-25.5	25.1	58.9
	36	4.1	-217.7	225.9	-51.2	59.3	-76.3	-30.9	39.1	84.4
	48	14.9	-305.1	335.0	-63.2	92.9	-98.9	-34.5	64.3	128.6
氣壓 誤差	12	-0.5	-26.9	25.9	-4.9	3.9	-7.1	-3.2	2.2	6.1
	24	-1.6	-34.7	31.6	-8.2	5.1	-11.4	-5.7	2.6	8.3
	36	-1.6	-39.7	36.4	-10.3	7.1	-14.4	-7.1	3.9	11.1
	48	-0.9	-44.1	42.2	-11.4	9.5	-16.2	-7.5	5.7	14.3
七級風 半徑	12	-1.6	-163.9	181.0	-13.7	10.5	-21.1	-8.8	5.7	18.0
	24	-2.3	-153.4	153.0	-19.8	15.1	-29.4	-13.0	8.3	24.8
	36	-6.4	-187.9	182.7	-27.3	14.6	-38.9	-19.2	6.4	26.2
	48	-7.0	-190.8	180.5	-32.3	18.4	-45.8	-22.6	8.7	31.9
近中心 最大 風速	12	0.1	-10.0	10.3	-1.9	2.2	-2.9	-1.2	1.4	3.1
	24	0.5	-14.0	15.0	-2.4	3.4	-3.8	-1.3	2.3	4.8
	36	0.4	-16.0	16.8	-3.3	4.1	-5.1	-2.0	2.7	5.8
	48	0.1	-18.3	18.4	-4.4	4.5	-6.5	-2.8	2.9	6.6

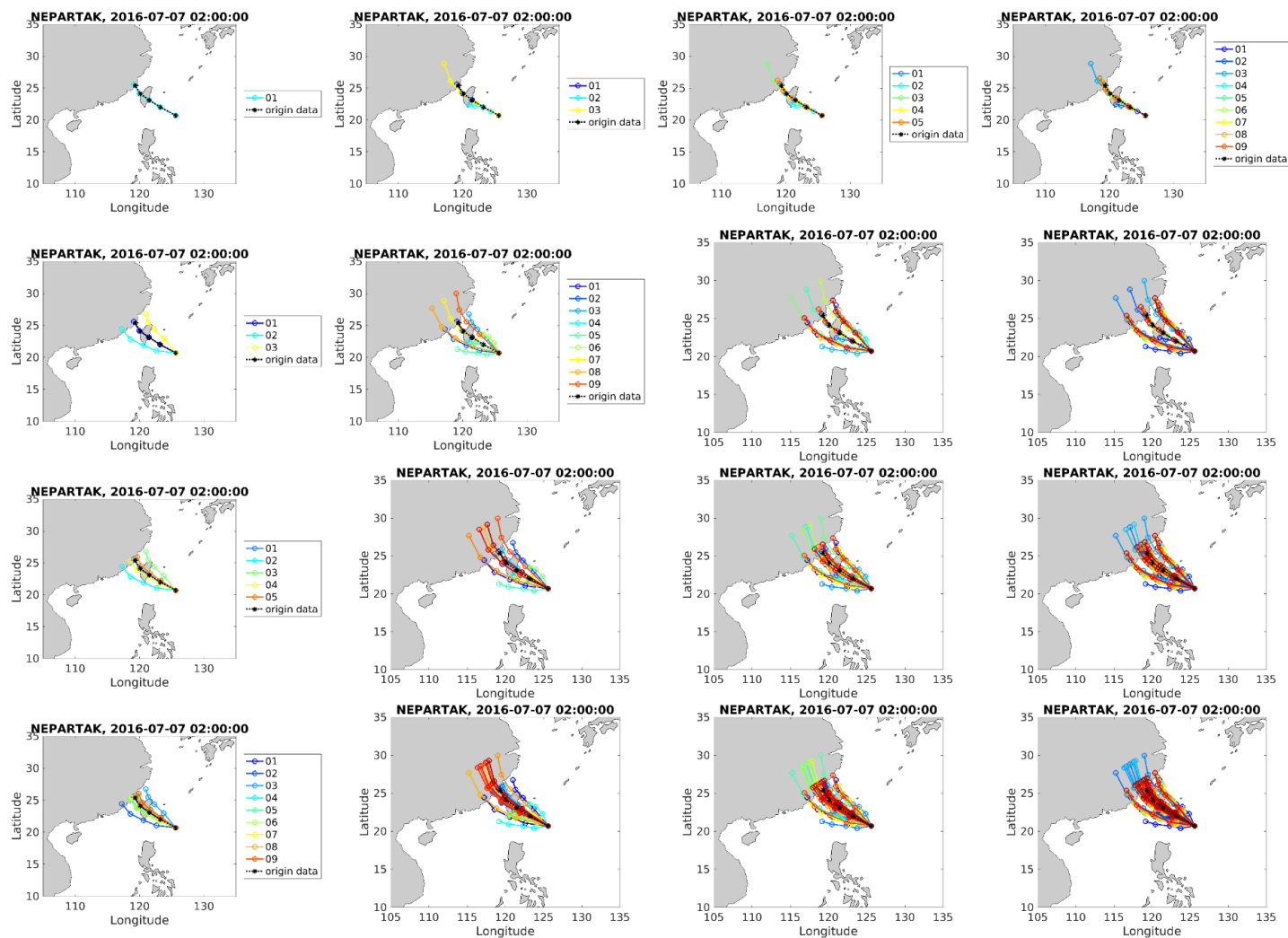


圖 3—11 誤差機率分布曲線及颱風警報單所產出之系集成員路徑分布情形。

圖由左至右依序為考量平行路徑成員數 1、3、5、9 組，由上而下依序為考量垂直路徑成員數 1、3、5、9 組所得之系集路徑成員組成。

3-6-2 風場結構系集成員

本研究利用非單一理想風場模式產生暴潮系集預報成員，以將風場結構變化納入成為系集成員的考量之一。於第一年度相關計畫工作項目中，本研究利用表 3—5 統整之理想風場相關公式與歐洲氣象再分析場 ECMWF ERA5 近五年(2016-2020 年)，中颱級別以上之二維風場資料，取得近中心最大風速半徑及近中心最大風速後，利用 R_m (近中心最大風速半徑)、 V_m (近中心最大風速) 兩項參數，搭配前人公式重新建構理想風場模型。透過將各理想風場與再分析風場之風速分布相互比對，並計算兩者風速分布之方均根誤差，便得以檢視現有研究中哪些理想風場模式相對適用近年侵(近)台之颱風案例。

選用颱風案例時，本研究選用日本氣象廳(Japan Meteorological Agency, JMA)東京區域專業氣象中心(Regional Specialized Meteorological Center, RSMC Tokyo)的最佳路徑資料做為參考基準，原因是該研究單位負責北半球子午線和東經 100 度之間的熱帶氣旋監測，且分類颱風強度的基準依據颱風委員會(The Economic and Social Commission for Asia and the Pacific/World Meteorological Organization, ESCAP/WMO Typhoon Committee)，皆以 10 分鐘持續風速(10-minute sustained winds)作為分類颱風強度的基準。

颱風委員會分類颱風強度使用的最低級別是熱帶低氣壓，其 10 分鐘持續風速低於 17 公尺/秒。如果熱帶低氣壓進一步增強，它會被命名並歸類為熱帶風暴，其風速在 17-24 公尺/秒之間。如果該系統繼續加強，那麼它將被歸類為嚴重的熱帶風暴，風速在 25 至 32 公尺/秒之間，而颱風委員會針對熱帶氣旋分類的最高級別是颱風，10 分鐘持續風速高於風速 33 公尺/秒便符合該級別，日本氣象廳則對於颱風更加細分為「強(33-43 公尺/秒)」、「非常強(44-54 公尺/秒)」及「猛烈的(>54 公尺/秒)」三種強度。雖然中央氣象署在中文發布颱風消息時有自己的颱風分類(17.5~32.7 公尺/秒屬輕颱、32.8~50.7 公尺/秒屬中颱、50.8 公尺/秒以上為強颱)，但在發布英文版颱風消息時乃採用颱風委員會的分類方法。

依據日本氣象廳對颱風強度之分類，則各參數模式對於不同強度之熱帶氣旋所得出之方均根誤差可整理於表 3—6。表中由上至下依序呈現由弱至強之熱帶氣旋分類，由左至右依前人研究發表年代展示參數化模式，最右欄則登錄有效資料數。分析結果呈現出 W06 在近中心最大風速小於 44 公尺/秒之颱風表現在所有理想風場模式中為最佳，而 E11 則在近中心最大風速大於 44 公尺/秒之颱風可以得到所有理想風場模式中最小之方均根誤差。而由於 2016 年至 2020 年登錄之颱風資料，近中心最大風速小於 44 公尺/秒之颱風佔相對多數，因此在固定近中心最大風速及最大風速半徑兩種參數的前提下，W06 在理想風場與再分析風場的比對下，是現有收集模式中擁有最小方均根誤差者，但適用不同強度之熱帶氣旋的最佳理想風場模式並非唯一一種。

於第二年度工作項目中，本研究發現在執行系集預報時將風場結構納入系集成員的組成選項之一時，將會有助於提升系集預報成果的分散度，並以此完成第二代暴潮系集預報模式。此外，研究中發現利用少量之參數誤差成員搭配彈性理想風場選項，與選用多種參數誤差成員搭配單一風場選項之組合在系集預報產品上之表現大致相近，但所需計算時間大幅減少，顯示增加風場結構的選項之後有助於增加系集預報成員配置的彈性。

本年度預計更進一步以現有之系集預報系統作為計算工具，執行近年案例分析後，將研究成果作為精進決定性預報系統的參考依據。

表 3—5 理想風場公式統整

文獻	公式
Holland 1980 (H80)	$V(r) = \sqrt{\left(\frac{R_m}{r}\right)^B \frac{B\Delta P}{\rho} \exp\left[-\left(\frac{R_m}{r}\right)^B\right] + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{fr}{2}}$ $B = \frac{V_m^2 e \rho + f V_m R_m e \rho}{\Delta P}, \rho = 1.15, e = \exp(1)$
Jelesnianski et al, 1992 (J92)	$V(r) = \frac{2rR_m V_m}{R_m^2 + r^2}$
Willoughby et al, 2006 (W06)	For $0 \leq r \leq R_m$: $V(r) = V_m \left(\frac{r}{R_m}\right)^n$ with $n = 0.79$ For $r > R_m$: $V(r) = V_m \exp\left(-\frac{r - R_m}{X}\right)$ with $X = 243 \text{ km}$
Emanuel and Rotunno 2011 (E11)	$V(r) = \frac{2r(R_m V_m + 0.5fR_m^2)}{R_m^2 + r^2} - \frac{fr}{2}$
Murty et al., 2016 (M16)	$V(r) = V_m \left(\frac{2rR_m}{R_m^2 + r^2}\right)^n, n = 0.6$

表 3—6 各颱風強度下各理想風場與 ERA5 再分析風場之方均根誤差 (m/s)。

選用資料區間為 2016-2020 年，計算誤差半徑為 250 公里。

模式編號	H80	J92	W06	E11	M16	CWB	Nd
熱帶低氣壓 (<17 公尺/秒)	-	-	-	-	-	-	0
熱帶風暴 ($17-24$ 公尺/秒)	9.184	8.304	6.801	8.812	9.116	8.304	244
嚴重的熱帶風暴 ($25-32$ 公尺/秒)	12.909	11.613	9.798	10.582	12.631	11.613	276
颱風 (強) ($33-43$ 公尺/秒)	15.435	13.415	11.409	11.841	14.678	13.415	482
颱風 (非常強) ($44-54$ 公尺/秒)	18.968	15.816	13.759	13.660	17.525	15.816	328
颱風 (猛烈的) (>54 公尺/秒)	19.315	15.508	13.538	13.114	17.366	15.508	48
all	14.831	12.838	10.945	11.538	14.104	12.838	1378

3-7 三維 Splash3D 模式

本計畫將承接過去成果，持續開發並執行臺灣風暴潮溢淹預報模式，其前身為康乃爾大學劉立方教授團隊所發展之多重網格海嘯模式 COMCOT (COrnell Multi-grid COupled of Tsunami Model)，本團隊以其為基石，開發風暴潮溢淹模式。風暴潮溢淹模式能同時且快速地求解卡氏座標及球座標系統下深度積分之非線性淺水波方程式 (Pugh, 1987)。茲列卡氏座標控制方程式如下：

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial t} - fQ &= -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\tau_s^x}{\rho_w} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + fP &= -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\tau_s^y}{\rho_w}\end{aligned}\quad (\text{式 3—36})$$

其中， t 為時間， P, Q 分別為 x, y 方向之體積通量 ($P = \int_{-h}^{\eta} \bar{u}(x, y, z, t) dz$ ， $Q = \int_{-h}^{\eta} \bar{v}(x, y, z, t) dz$ ， $\bar{u}, \bar{v}$ 為時間平均流速)， f 為科氏力係數 ($f = 2\omega \sin \varphi$ ， $\omega = 7.2921\text{e} - 5$ 為地球自轉角頻率， φ 為緯度)， η 為自由液面高程， h 為靜水深， H 為總水深 ($H = h + \eta$)， τ_s^x, τ_s^y 分別為 x, y 方向之風剪力， g 為重力加速度 (9.81ms^{-2})， ρ_w 為海水密度， P_a 為大氣壓力。

受颱風氣象力影響所驅動之風暴潮傳遞為一大尺度現象，為涵蓋完整颱風之生命週期，數值模擬需採用大計算域，同時網格系統必須考慮地球曲面變化和科氏力之效應，因此，風暴潮之模擬應使用球座標系統下之非線性淺水波方程式為佳，茲列出球座標控制方程式如下：

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi \cdot Q) \right\} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ &= -\frac{H}{\rho_w R \cos \varphi} \frac{\partial P_a}{\partial \psi} + \frac{\tau_s^\psi}{\rho_w} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP &= -\frac{H}{\rho_w R} \frac{\partial P_a}{\partial \varphi} + \frac{\tau_s^\varphi}{\rho_w}\end{aligned}\quad (\text{式 3—37})$$

其中， φ, ψ ：球座標系統下之空間座標； P, Q 分別為 x, y 方向之體積通量 ($P = \int_{-h}^{\eta} \bar{u}(\varphi, \psi, z, t) dz$ ， $Q = \int_{-h}^{\eta} \bar{v}(\varphi, \psi, z, t) dz$ ， $\bar{u}, \bar{v}$ 為時間平均流速)； H ：總水深； η ：自由液面高程； h ：靜水深； g ：重力加速度； R ：地球半徑； f 為科氏力係數 ($f = 2\omega \sin \varphi$ ， $\omega = 7.2921\text{e} - 5$ 為地球自轉角頻率， φ 為緯度)， $\tau_s^\psi, \tau_s^\varphi$ 分別為 φ, ψ 方向之風剪力， g 為重力加速度 (9.81ms^{-2})， ρ_w 為海水密度， P_a 為大氣壓力。

波浪傳遞至近岸時，受到水深、地形與海岸結構物之影響，波浪將產生淺化效應與變形，港灣內與港灣外之波浪特性並不一致，二維淺水波方程式大多不能滿足真實情況。為探討此一港灣地形內之遮蔽效應，將帶入高解析度之地形進行三維模式模擬。

本年度之研究將使用 Splash3D 三維水動力模式，其基礎為美國國家實驗室（Los Alamos National Laboratory, LANL）所發展之 Truchas 模式，其為提供原始碼之開放數值模式，可依照使用需要而自行修改與增加需要之功能，Wu (2004) 與 Liu 等人 (Liu et al., 2005) 以 2.0.0 版本之 Truchas 模式作為基礎而進行研究與相關功能開發，Wu 將大渦模擬 (Large Eddy Simulation, LES) 與原始之 Truchas 模式結合後稱為 Splash3D 多相流數值模式。三維水動力模式主要求解三維不可壓縮流之 Navier-Stokes 方程式，假設質量守恆、流體不可壓縮條件下，其控制方程式 Navier-Stokes 可表示如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tilde{\tau} + \mathbf{g} \quad (\text{式 3—38})$$

$$\tilde{\tau} = \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u})$$

其中， $\mathbf{u}$ 為速度向量， ρ 為有效密度， g 為重力， t 為時間， p 為壓力， $\tilde{\tau}$ 為應力張量， μ 分子黏滯係數 (molecular viscosity)。當假設為牛頓流體時如上所示。式中主要描述單一流體之運動過程，然而由於波浪與崩落體之數值模擬需要同時包含水流與空氣兩種流體，甚至在其他模擬情形中可能會同時需要更多種流體同時存在，如此由於流體密度與特性不同，則需要設定兩種或更多流體之 Navier-Stokes 方程式以描述各流體之運動過程，如此會使求解過程過於複雜。為解決此問題，採用 Hirt 與 Nichols (Hirt and Nichols, 1981) 提出之流體體積法 (Volume of Fluid, VOF)，並由 Kothe (Kothe, 1996) 修改並加入模式後用以求解多項流體之複雜自由液面，使用此法可以單一 Navier-Stokes 方程式求解複雜之多種流體問題。

應用 VOF 方法之後，其網格內部之特性（如速度、密度與黏滯性等）將以網格內各項流體之分配百分比計算，而將網格內部假設為網格平均項流 (Cell-Averaged Fluid)。因此將原先之質量守恆方程式轉換為尤拉 (Eulerian) 座標之形式，並且 Navier-Stokes 方程式改為以下形式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (\text{式 3—39})$$

$$\frac{D(\rho \mathbf{u})}{Dt} = \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(\rho \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \tilde{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (\text{式 3—40})$$

此處所使用之 ρ 為各網格內，各流體依照比例而之網格平均流體密度。

本模式採用流體體積法（Volume of Fluid, VOF）以描述計算自由液面隨時間變化之位置，其圖片示例展示於圖 3—12。利用質量守恆定理與不可壓縮流之特性，分別將不同物理特性之不同物質分別帶入連續方程式。透過各流體之體積分率（Volume Fraction）可計算局部網格內部之各種流體所佔體積百分比，以此得出下一時間步之網格內部流體分布，再藉此追蹤自由液面位置隨時間變化情形。流體體積法是由 Hirt 與 Nichols（Hirt and Nichols, 1981）發展而來，並由 Kothe（Kothe, 1996）修改並加入模式後用以求解多項流體之複雜自由液面（圖 3—13）。

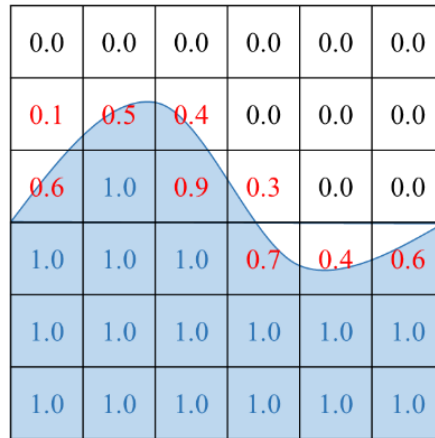


圖 3—12 流體體積法之體積分率示意圖

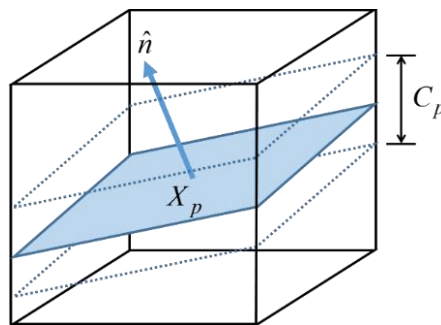


圖 3—13 自由液面重建示意圖

假設各種流體如空氣、水等彼此互不相溶，又將流場中之第 m 種流體於網格中之有效密度為 ρ_m ，其質量守恆方程式如下：

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(\rho_m) = 0 \quad (\text{式 3—41})$$

式中 $\mathbf{u}$ 表示速度向量。

$$f_m = \frac{V_m}{V} \quad (\text{式 3—42})$$

$$\rho_m^0 = \frac{M_m}{V_m} \quad (\text{式 3—43})$$

上式中之 V 表示網格體積， V_m 為第 m 種流體於網格中所佔之體積， ρ_m^0 為各流體之密度， f_m 為第 m 種流體於該網格中所佔之體積分率。體積分率 f_m 之概念可由圖 3—12 說明，若以水與空氣兩種流體做說明時， f_m 為水之體積分率，當 $f_m = 1$ 代表網格中完全充滿水，若 $f_m = 0$ 時則表示此網格中不存在水而充滿空氣，當 f_m 介於 0 至 1 之間且不等於 0 或 1 時，則表示此網格中有一部分網格體積被空氣所佔據，而此網格之另一部分被水佔據，表示此網格同時具有一部分水與一部分空氣，則可知空氣與水之交界面存在與此網格中。

則網格之有效密度 ρ_m 可以藉由體積分率之(7)式，再配合各流體密度之(8)式，而改將 ρ_m 寫為(9)形式：

$$\rho_m = \frac{M_m}{V} = \left(\frac{V_m}{V}\right) \left(\frac{M_m}{V_m}\right) = f_m \rho_m^0 \quad (\text{式 3—44})$$

因此質量守恆之(4)式可改以下面方法表示：

$$\frac{\partial f_m \rho_m^0}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(f_m \rho_m^0) = 0 \quad (\text{式 3—45})$$

並且由於假設流體為不可壓縮，因此將各流體之密度 ρ_m^0 視為定值而可消去，由此將質量守恆式改寫為不可壓縮流如下，並可以此計算所有 M_m 表示第 m 種流體之質量如下：

$$\frac{\partial f_m}{\partial t} + \nabla \cdot (f_m \mathbf{u}) = 0 \quad (\text{式 3—46})$$

此即為流體體積法方程式（VOF Equation），並且可以有限體積法（Finite Volume Method, FVM）離散之後供數值模式用以計算新時間步之流體分配情形，如下式：

$$f_m^{n+1} = f_m^n - \frac{1}{V_i} \sum_f \Delta t [A \cdot \mathbf{u}^n]_f f_{m,f}^n \quad (\text{式 3—47})$$

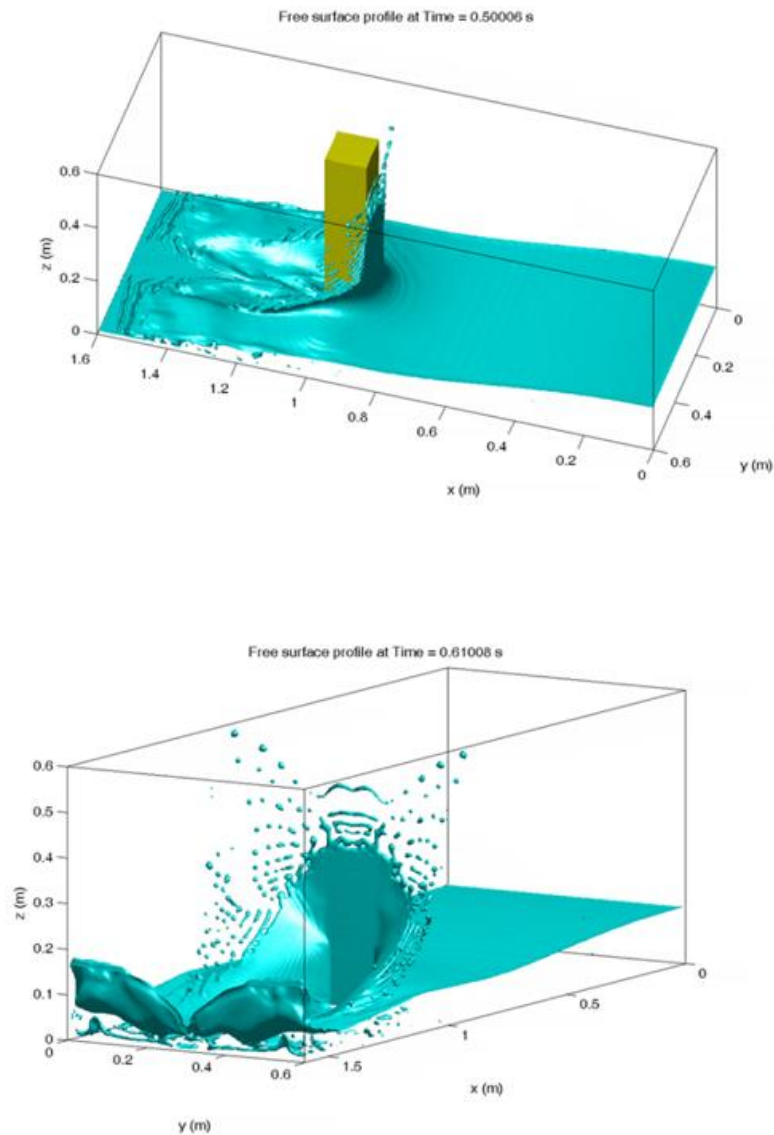


圖 3—14 湧潮與結構物之交互作用（上）黃色柱體為結構物。

本模式可精確模擬複雜之三維碎波情形。（下）

結構物改以透明著色以呈現碎波與夾氣作用。

本三維流體動力學模式可以精確求解海嘯湧潮或洪水撞擊近岸結構物（如橋面板、跨河管線、海底纜線或複雜植生）時之結構物受力與流場情形（圖 3—14）。此為學界少數可精確模擬海嘯碎波及水花飛濺之三維模式。過去受原能會、中華顧問、中興顧問、世曦工程、高工局、鐵路局等單位之高度重視並委託研究計畫，已受多方肯定與認證（圖 3—15）。並為核三廠進行海嘯數值模擬研究，以了解海嘯溢淹情形。先以二維 COMCOT 海嘯模式模擬馬尼拉海溝北段之海嘯情境，透過 COMCOT 耦合模組，將該模擬結果導入三維數值模式，再以地形導入模組，引入高解析度地形資料，並依核三廠廠房位置，建構核三廠臨海結構物，以模擬核三廠於海嘯侵襲下之情形（圖 3—16 至圖 3—17）。

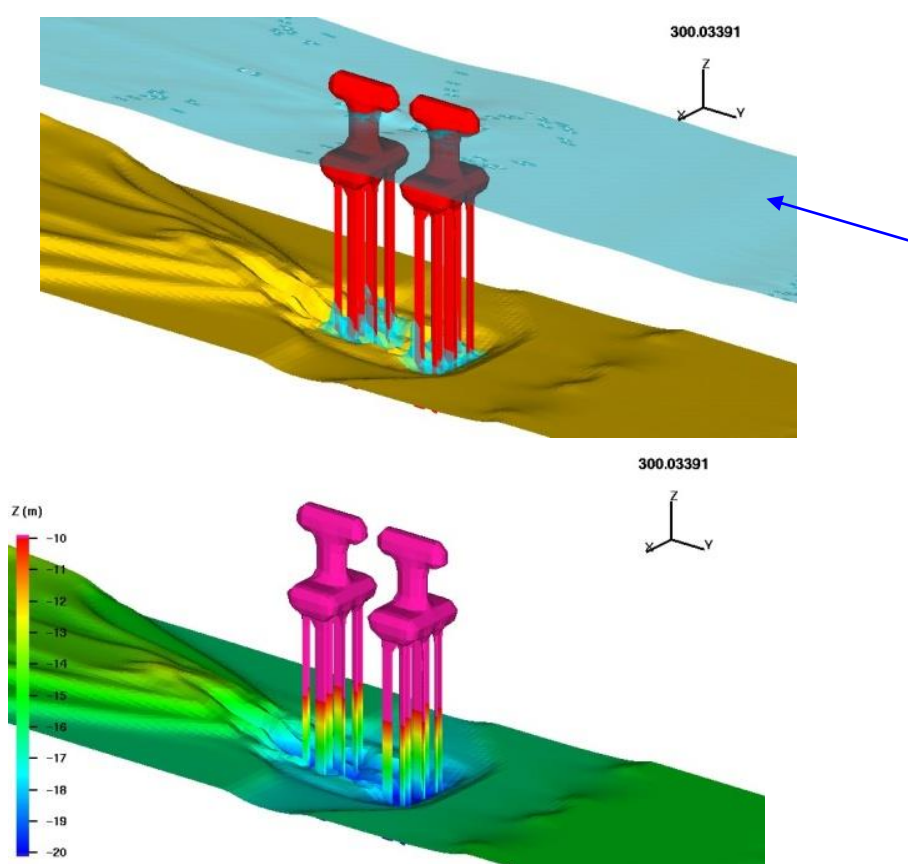


圖 3—15 三維模式模擬雙園大橋沖刷坑型態。

此為目前學界僅見之三維動床沖刷模擬結果。

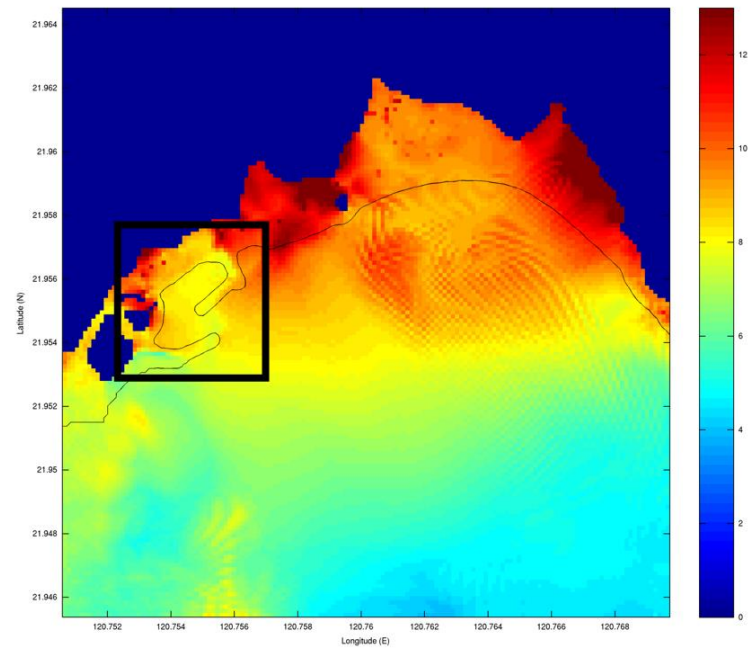


圖 3—16 COMCOT 二維數值模擬核三場海域之最大波高圖。

圖中黑色方框為三維數值模式模擬之範圍。

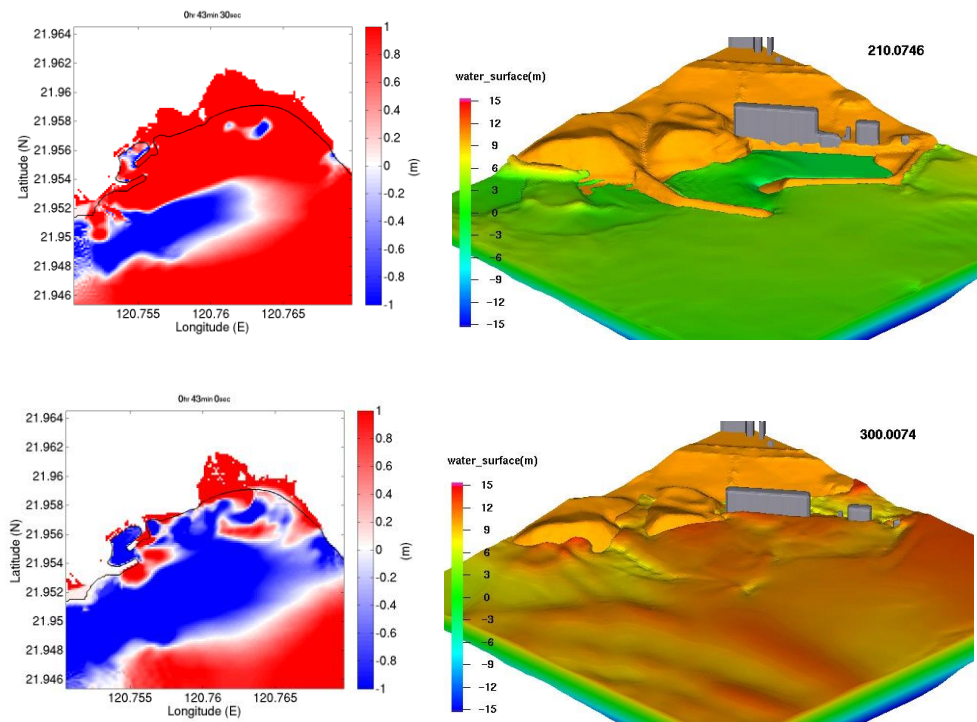


圖 3—17 核三廠海嘯淹溢過程。

(左欄) COMCOT 二維海嘯數值模擬結果

(右欄) 三維模式模擬海嘯之情形。色階表為水位面高程(公尺)。

第4章、理想風場模式暴潮預報結果比較與分析

本年度重點工作項目之一為參考歷史侵台颱風資料，利用已開發完成之暴潮系集預報系統量化分析適合臺灣之理想風場模式，並將研究成果作為精進決定性預報系統的參考依據。研究過程中，為瞭解理想風場模式與颱風案例間之關係，首先收集過往颱風路徑與強度參數及歷史颱風預報資料，並利用委託研究計劃成果所得之候選理想風場模式，進行近 10 年侵台颱風案例之系集預報模擬。模擬完成後將收集、整理模擬結果與觀測資料進行比對，使用統計方法進行評估及驗證後，將本研究所得具備最佳校驗結果之理想風場模式選項加入現行之暴潮預報系統中，以期精進暴潮預報成果。

4-1 颱風案例資料收集

為提升暴潮決定性預報系統的預報準確性，本研究規劃在未來預報作業中，依據颱風的強度變化，選用更符合颱風當下結構之理想風場模式進行預報。以理想風場模式作為氣象輸入場執行颱風暴潮模擬時，必要之參數資訊有包含路徑、中心氣壓、最大風速、最大風速所在半徑等，上述資料皆可透過歷史颱風最佳路徑參數資料、二維再分析風場分布與過往之颱風警報單等取得。其中，颱風警報單為三種資料中唯一可在預報作業中取得之資料，而再分析風場及最佳路徑參數等則需等到當次颱風事件結束後，透過多方單位比對並校正重新整理及進一步跟實時收集的數據作比對及核實才能獲得。

圖 4—1 為 2013 至 2022 年間之颱風與颱風警報數量分布。橫軸標記年份，左縱軸標記發布歷年警報數量，資料以長條圖表示。藍色為海上颱風警報、紅色為陸上颱風警報，發布數量標記於長條頂部便於辨識。右縱軸標示歷年颱風侵台個數，資料以黑色圓圈表示。表 4—1 展示圖 4—1 對應之資料細節。

颱風警報發布期間，發布時間間隔為 3 小時一筆。海上颱風警報之發布時機為預測颱風之 7 級風暴風範圍可能侵襲臺灣本島或澎湖、金門、馬祖 100 公里以

內海域時之前 24 小時，陸上颱風警報之發布時機為預測颱風之 7 級風暴風範圍可能侵襲臺灣本島或澎湖、金門、馬祖陸上之前 18 小時。研究中可以透過海上警報與陸上警報之發布情形，得知颱風於該次預報中是否有侵襲台灣陸上領土甚至登陸的機會，並可以此定性判定與臺灣本島或澎湖、金門、馬祖等地的遠近。

圖 4—1 及表 4—1 中可以看出，近十年間侵台颱風計有 43 個，海上與陸上颱風警報發布數量各半，合計 656 報。2015 年為侵台颱風總數及發布警報總數最多的年份；2018 年為近十年中最少侵台颱風，發布警報次數亦最低的一年。然而從其他年份的資料顯示侵台颱風數量與發布警報的種類與次數並無直接關聯，以 2016 年與 2017 年為例，即使在兩年中侵台颱風個數皆為 5 個，但是 2017 年發布的陸警次數為 10 年間第三低，而 2016 年為發布陸上警報次數最多的年份。

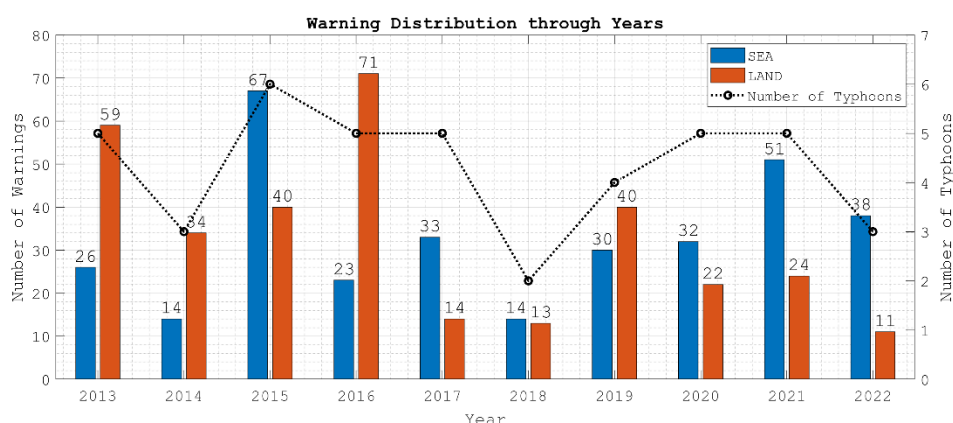


圖 4—1 2013 至 2022 年間之颱風與颱風警報數量分布

表 4—1 2013 至 2022 年間颱風海上/陸上警報數量分布表

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	總數
警報總數	85	48	107	94	47	27	70	54	75	49	656
海警	26	14	67	23	33	14	30	32	51	38	328
陸警	59	34	40	71	14	13	40	22	24	11	328
颱風個數	5	3	6	5	5	2	4	5	5	3	43

本研究規劃在未來預報作業中，依據颱風的強度變化，選用更符合颱風當下

結構之理想風場模式進行預報。表 4—2 為颱風強度分類表，參考基準依據颱風委員會（The Economic and Social Commission for Asia and the Pacific/World Meteorological Organization，ESCAP/WMO Typhoon Committee）。表中展示颱風強度分類、對應分類英文名稱、英文代號、強度分類之最大風速下限及上限，風速單位為公尺/秒。

圖 4—2 為颱風警報預報期間之颱風平均強度分類長條圖，展示各警報中颱風在預報期間內之平均強度分布情形。颱風在預報期間內之平均強度可由預報期間之最大風速平均值進行判定，並以此分類。圖中縱軸為警報數量，橫軸為颱風強度，由左至右表弱至強，強度分類門檻參考表 4—2。長條圖藍色表示海上颱風警報、紅色表陸上颱風警報。表 4—3 為颱風警報預報期間颱風平均強度分布表。表中欄位橫向依據颱風平均強度排列，縱向欄位則為警報分類，依序為全部警報、海警、陸警。

圖 4—2 及表 4—3 中展示，近 10 年資料區間中，海警與陸警皆是以颱風（風速介於 33-44 公尺/秒）強度的警報數量最多，而在預報期間內皆維持猛烈強度（風速為 54 公尺/秒以上）的颱風警報數量為 0。熱帶低氣壓全部警報中有 48 筆，但由於強度低於熱帶氣旋定義的門檻，理想風場模式恐不適用，故在後續研究中將會排除熱帶低氣壓的資料，有效資料筆數餘 608 筆，其中海警 299 筆、陸警 309 筆。

表 4—2 颱風強度分類表

颱風強度	強度英文	英文代號	最大風速 下限 (m/s)	最大風速 上限 (m/s)
熱帶低氣壓	Tropical Depression	TD	0	17
熱帶風暴	Tropical Storm	TS	17	25
嚴重的熱帶風暴	Severe Tropical Storm	TS(S)	25	33
颱風	Typhoon	TY	33	44
非常強的颱風	Very Strong Typhoon	TY(VS)	44	54
猛烈的颱風	Violent Typhoon	TY(V)	54	-

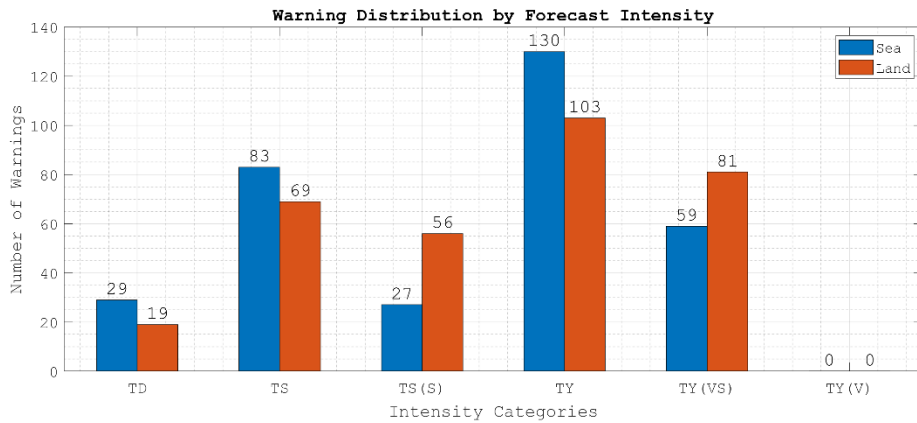


圖 4—2 2013 至 2022 年間之颱風警報預報颱風平均強度分類長條圖

表 4—3 颱風警報預報颱風平均強度分類表

		颱風強度						
		TD	TS	TS(S)	TY	TY(VS)	TY(V)	All
警報 類型	全部	48	152	83	233	140	0	656
	海警	29	83	27	130	59	0	328
	陸警	19	69	56	103	81	0	328

為探討各理想風場模式描述颱風結構之相對準確性，可以利用颱風最佳路徑參數計算各理想風場模式對於指定時刻之風速結構分布情形，並將之與再分析風場為基準互相比較，即可看出各模式間之差異性。本研究所收集之資料區間為 2013 年至 2022 年間，選用之二維再分析風場資料為 ECMWF ERA5，最佳路徑參數來自中央氣象署颱風資料庫，以颱風資料庫內最大風速達熱帶風暴標準之資料點為主。

表 4—4 為本年度研究中選用之各項理想風場模式之參考文獻及方程式列表。左側欄位標記參考文獻及後續研究所用之代號縮寫，右側則呈現對應該文獻之方程式。其中 $V(r)$ 為以距離颱風中心距離 r 之風速分布、 R_m 為近中心最大風速所在半徑、 B 為尺度參數、 P 為氣壓、 ρ 為海水密度、 f 為科里奧利頻率。

圖 4—3 展示單一時刻之再分析風場與各理想風場模式風速分布比對圖，繪製範圍同暴潮預報系統計算域母層。色階表示 10 米平均風速分布，範圍為 0 至 30 公尺/秒。展示資料之擷取時間為 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC)，案例為 2016 年颱風梅姬 (MEGI)。於颱風資料庫中，該時間颱風近中心最大風速為 40

公尺/秒，換算為 10 米平均風速則約為 26 公尺/秒，與再分析風場中所得之近中心最大風速值相當。圖片上排由左至右依序為 ECMWF ERA 5 再分析風場、H80 及 J92 理想風場模式之 10 米風速分布。圖片下排由左至右依序為 W06、E11、CWB 作業用理想風場模式之 10 米風速分布。再分析風場風速分布圖中黃圈為颱風中心位置，為颱風資料庫登錄之最佳路徑所在位置，藍圈為 ECMWF ERA5 於本時間步近颱風中心最大風速所在位置。其他理想風場模式風速分布資料依據颱風資料庫登錄之最大風速與最大風速所在半徑進行繪製。理想風場風速分布圖標註記與再分析風場比對半徑 200 公里內之方均根誤差值。圖中可以看出，於該時刻，E11 模式與再分析風場之整體風速資料有最小之方均根誤差，為 9.25 公尺/秒；其次為 J92，半徑 200 公里內風速之方均根誤差為 10.92 公尺/秒。

表 4—4 理想風場方程式列表

Reference (short name)	Formula
Holland 1980 (H80)	$V(r) = \sqrt{\left(\frac{R_m}{r}\right)^B \frac{B\Delta P}{\rho} \exp\left[-\left(\frac{R_m}{r}\right)^B\right] + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{fr}{2}}$ With $B = \frac{V_m^2 e \rho + f V_m R_m e \rho}{\Delta P}$, $\rho = 1.15$, $e = \exp(1)$
Jelesnianski et al, 1992 (J92)	$V(r) = \frac{2rR_m V_m}{R_m^2 + r^2}$
Willoughby et al, 2006 (W06)	For $0 \leq r \leq R_m$: $V(r) = V_m \left(\frac{r}{R_m}\right)^n$ with $n = 0.79$ For $r > R_m$: $V(r) = V_m \exp\left(-\frac{r - R_m}{X}\right)$ with $X = 243 \text{ km}$
Emanuel and Rotunno, 2011 (E11)	$V(r) = \frac{2r(R_m V_m + 0.5fR_m^2)}{R_m^2 + r^2} - \frac{fr}{2}$
CWB	$V(r) = \frac{2rR_m V_m}{R_m^2 + r^2}, \quad R_m \text{ depends on } P_c$

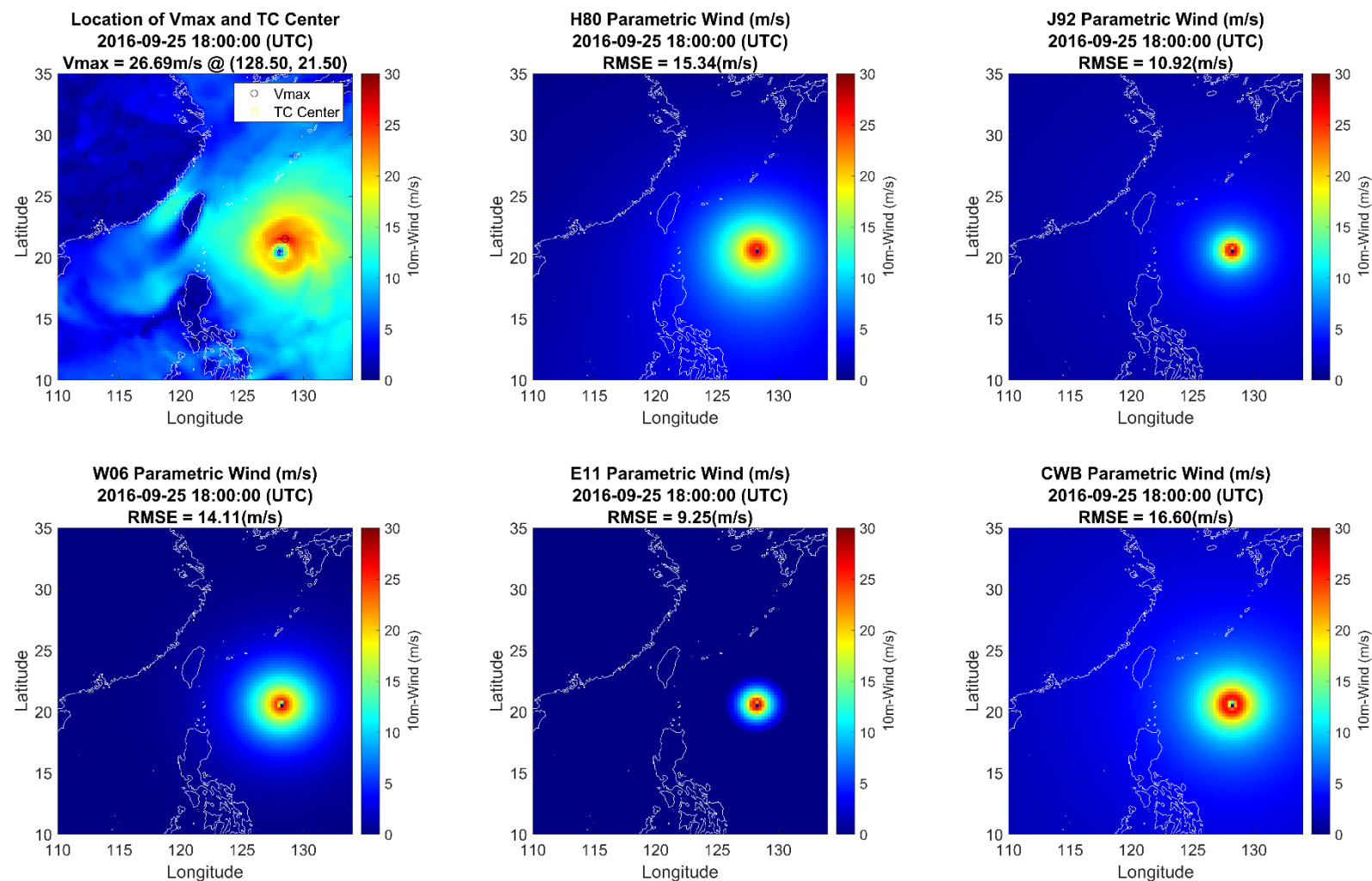


圖 4—3 各理想風場模式搭配 CWB 最佳路徑參數與 ERA5 再分析風場之方均根誤差分布（公尺/秒）。

由於風速分布的準確性影響暴潮模擬甚鉅，而若要檢視理想風場模式與再分析風場間的差異，選取的風場資料範圍可能會影響分析結果。故本研究依據颱風強度將資料分類，自颱風中心向外每隔 10 公里計算一次範圍內方均根誤差，檢視選用不同颱風半徑內資料對範圍內風速誤差的影響。

圖 4—4 為在各颱風強度下理想風場與 ERA5 整體風場之方均根誤差分布，圖片由上至下依颱風強度弱至強排序，著色實線標示各理想風場模式結果。圖中橫軸表示風速資料選取範圍（距颱風中心半徑），單位為公里。縱軸為理想風場模式與再分析風場於資料選取範圍內之方均根誤差，單位為公尺/秒。圖中可以看到在強度為 TS 或 TS(S)時，W06 模式在距颱風中心半徑 100 公里內可以得到所有模式中最小之方均根誤差。而 CWB 在強度為 TY 以上時，可在距颱風中心半徑 70 公里內可以得到所有模式中最小之方均根誤差。自距颱風中心 100 公里外，則以 E11 有最佳表現。

利用本次工作項目收集之資料，本研究將最佳路徑參數生成之理想風場分布與再分析風場互相比較，可以得到以下初步結論：在使用固定的水動力模式模擬颱風暴潮時，假設路徑預報及強度皆準確，可以預期颱風遠離台灣時（颱風中心距離台灣 100 公里以上），使用 E11 可以得到所有模式中最佳之暴潮模擬水位；颱風距離台灣 100 公里內時，則須依據颱風強度判斷。當近中心最大風速大於 33 公尺/秒，CWB 模式可能表現較好；近中心最大風速小於 33 公尺/秒時，W06 可能有較低誤差。

由於颱風之路徑及強度難以精準預測，預報誤差的產生為必然，因此研究中探討各理想風場模式之表現時，仍需要將預報過程中可能產生的誤差納入考量。為達到這項目標，本研究透過重新執行過去 10 年的預報作業，檢視暴潮預報系統在選用不同理想風場模式時可能得到的水位預報結果，並將之與觀測資料比對得到統計分析，以得到在預報當下可能有最佳表現的理想風場模式。

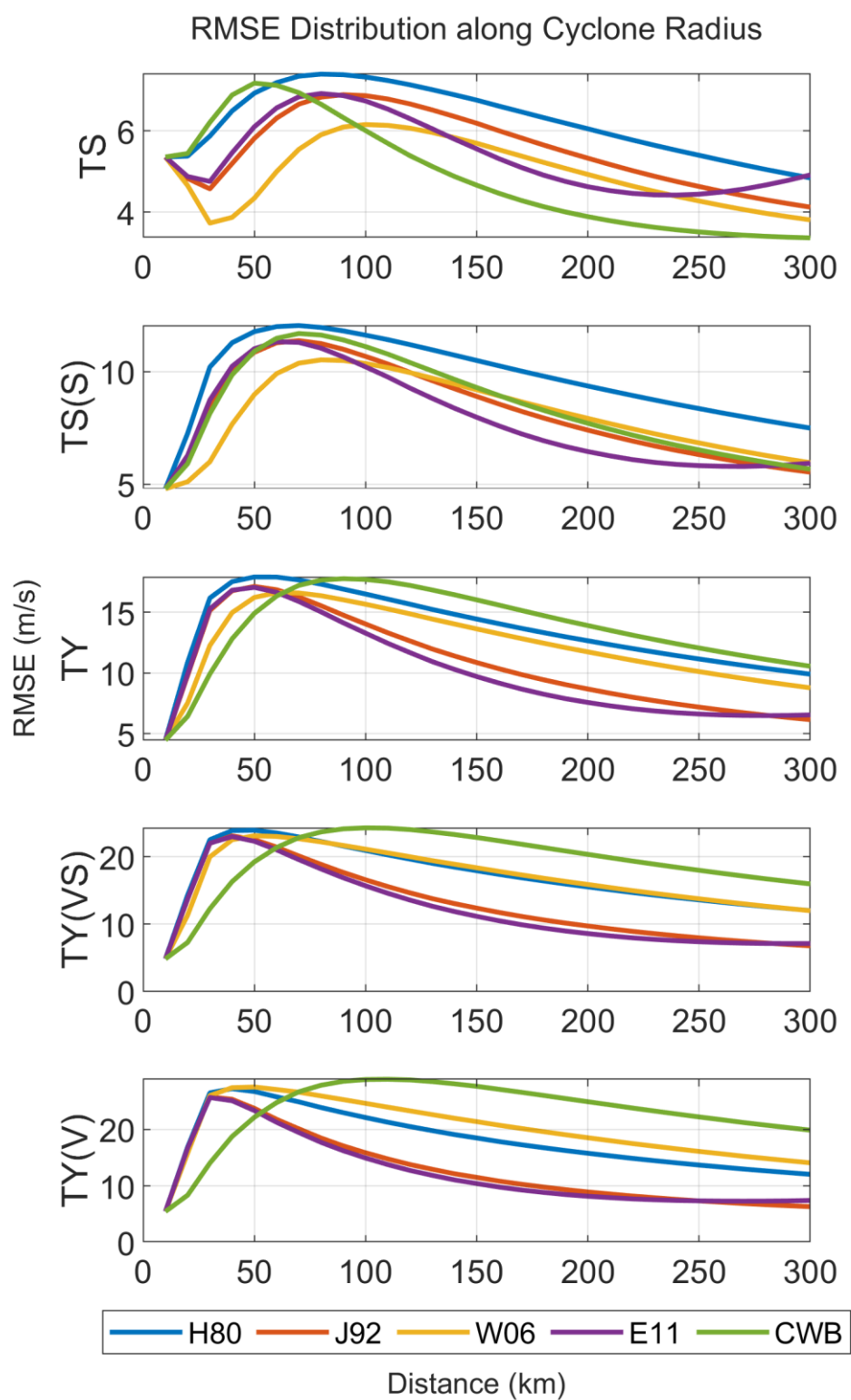


圖 4—4 在各颱風強度下理想風場與 ERA5 整體風場之方均根誤差分布。
橫軸為計算誤差選用半徑範圍值，縱軸為選用範圍內風場計算所得之誤差值。

4-2 理想風場模式之暴潮系集預報系統模擬

在完成收集颱風案例及預報資料後，為分析與比較各理想風場模式在颱風預報作業期間的可能表現，本研究整理近 10 年之颱風警報單，並收集警報單內各項預報參數，包含路徑、中心氣壓、最大風速、最大風速所在半徑等，執行颱風暴潮系集預報系統並收集暴潮水位系集預報結果，以進行後續的統計分析。

本研究所發展出之暴潮系集預報系統，可以依據誤差機率分布法及調整風場結構選項以產生系集成員。於第二年研究計畫中，系集預報系統已成功將數個理想風場模式加入系集成員產生模組，包含 Holland (1980)、Jelesnianski et al(1992)、Willoughby et al (2006)、Emanuel and Rotunno (2011)，搭配原有作業中之氣象署理想風場模式，合計有五組。

暴潮系集預報系統之一般作業流程圖如圖 4—5 所示。預報員於啟動系集預報前須先決定考量颱風參數預報誤差之成員數量。颱風參數預報誤差分為路徑與強度兩種，其中路徑區分為平行路徑方向與垂直路徑方向，強度則有中心氣壓、近中心最大風速及最大風速所在半徑等參數。系集成員數為選用之各項參數誤差成員數相乘之總和。若不考量指定參數之誤差分布，則該參數將會直接沿用決定性預報之預報值。

決定系集成員組合方式後，便可手動啟動系集預報第一報，系統將會進行預報前初始環境設置，並查找是否存在對應指定預報時間之颱風警報單，並依據颱風警報單內之颱風預報參數及手動設置之誤差成員組合產生系集成員參數及暴潮模式核心之控制檔。系統流程將更進一步利用 TPXO 模式產生潮汐邊界，並啟動核心程式進行模擬。核心模式結束模擬後便會產出系集預報產品，包含系集成員路徑分布圖、測站統計水位圖、10%超越機率水位分布圖、門檻水位達成機率分布圖、系集平均與標準差二維分布圖。

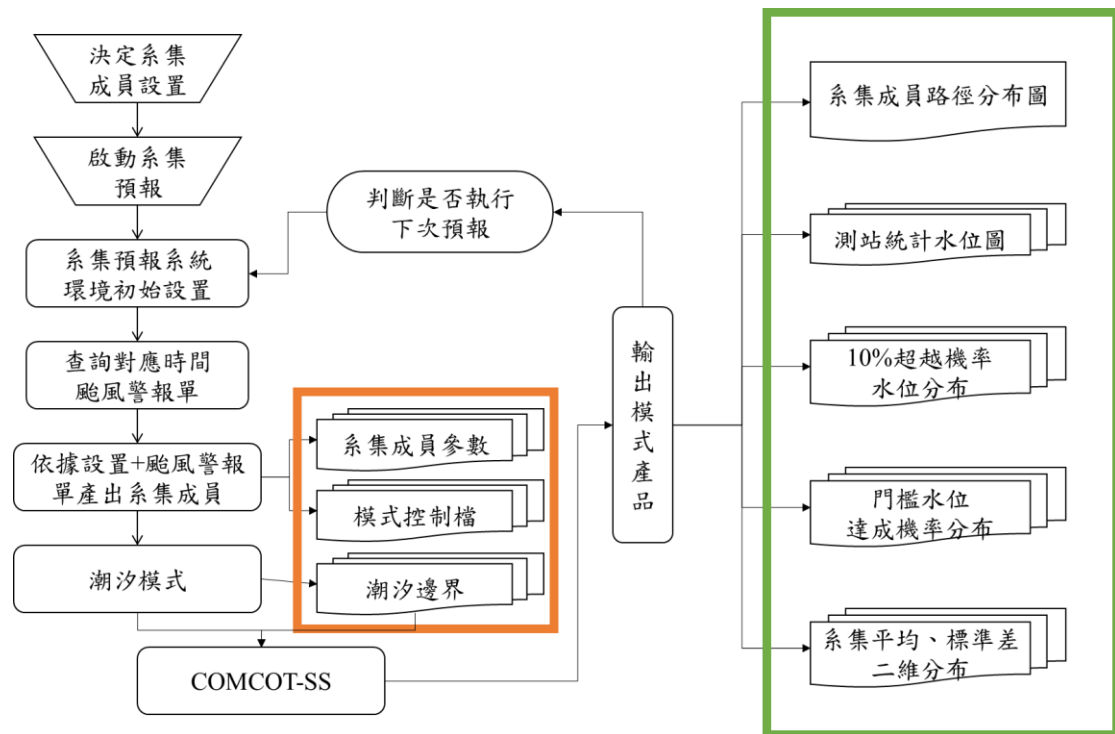


圖 4—5 暴潮系集預報流程圖。

於本年度研究中，由於研究目標為探討理想風場模式的變化對暴潮水位模擬結果的影響，因此在路徑與颱風強度等參數部分，將會直接沿用決定性預報之預報值，而風場結構選項則會有 5 組，即單次預報中將會有 5 組水位預報結果可供分析。

研究中所收集之資料區間為 2013 至 2022 年，有效預報發布數為 656 筆，平均單次 48 小時預報之執行時間約為 2.5 小時，包含系統啟動、核心程式必要輸入檔之產出、核心程式計算暴潮、預報系統產品輸出等，其中核心模式計算時間所需時間為最多，約 2.3 小時。產出核心模式所需輸入檔需時約 2 分鐘，產出預報產品需時約 10 分鐘。為提升計畫執行效率，本研究於計畫執行過程中關閉部分二維系集預報產品輸出選項以節省系集預報系統執行時間。在完成所有預報資料的模擬後，水位模擬結果將與模擬時間區段內之觀測資料進行初步比對，並進行後續的統計校驗。

4-3 模式模擬結果之統計與分析

研究中定義模式預報之暴潮偏差，為模式耦合潮汐預報與氣象風場驅動水動力模式後之水位起伏，扣除模式單純耦合潮汐預報所得水位之結果，如此便可在暴潮偏差水位中保留潮汐與颱風暴潮可能之非線性效應。模式預報暴潮水位則為前述暴潮偏差加上氣象署作業中調和分析潮汐預報水位所得之結果，因為對於單點而言，在具備品質良好及完整的歷史資料時，調和分析法產出的潮汐預報結果通常要比依據動量和質量守恆的流體力學方程式構成的數值模式數值方法準確，採用此方法可以避免潮汐模式產生之預報誤差影響暴潮預報結果。於模式校驗中，暴潮偏差之校驗對象則為潮位站觀測值扣除氣象署作業中之調和分析潮汐預報水位，暴潮總水位校驗對象為潮位站之觀測資料。

所有的預報水位資料，皆可利用方均根誤差、偏差量及相關係數等統計參數，檢視各理想風場模式模擬水位與觀測資料間之差異。其中，方均根誤差（root-mean-square error, RMSE）是所有誤差的平方均值的平方根。方均根誤差的使用非常普遍，它被認為是用於數值預測時優秀且通用的誤差度量，但由於方均根誤差與尺度相關，因此僅適用於比較特定變量的不同模型或模型設置的預測誤差。其計算公式為：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (\text{式4—1})$$

其中 O_i 是觀測值， S_i 是變量的預測值， n 是可用於分析的觀測值數量。

偏差量（Bias）為預測和實際值之間差異的平均值。偏差量為零時，表示預測模型的平均值和實際資料相同。偏差量接近 0 為較佳情況。若偏差量為負值，表示預測結果通常低於實際情形。反之若偏差量較高則表示預測通常有高估的情形。偏差量計算公式如下：

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{n} \quad (\text{式4—2})$$

其中 O_i 是觀測值， S_i 是變量的預測值， n 是可用於分析的觀測值數量。

相關係數 (correlation coefficient, r) 是一種相關程度的測量，在統計學上的意義是兩個變數之間的關係，定義為兩個變數的共變異數除以它們標準差的乘積：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (\text{式4—3})$$

其中 $\bar{S}$ 及 $\bar{O}$ 分別代表預測值平均及觀測值平均。相關係數值介於 -1 至 1 之間。係數的值為 ± 1 意味著兩項變量可以很好的由直線方程式來描述，相關係數的值為 0 意味著兩個變數之間沒有線性關係。

圖 4—6 為暴潮系集預報之各系集成員預報水位校驗示意圖。上圖展示暴潮偏差水位，下圖展示暴潮總水位。產品展示之預報資料起始時間為 2016 年 09 月 13 日 11 時，為 2016 年颱風莫蘭蒂 (MERANTI) 影響台灣期間，展示測站為大武測站。橫軸為預報區間，縱軸為水位高度，單位為公尺。不同色線對應不同理想風場模式所得之預報結果，黑色圓圈表示校驗對象，於暴潮偏差產品中為潮位站觀測值扣除氣象署作業中之調和分析潮汐預報水位；暴潮總水位產品中為潮位站之觀測資料。

表 4—5 為對應圖 4—6 模式結果之校驗參數，橫向欄位標記理想風場模式，縱向欄位為各項統計參數，依據暴潮偏差與暴潮總水位分類。水位校驗結果中可見 W06 與觀測資料相比有最小的方均根誤差，CWB 有最小的偏差量，而 W06 有最高的相關係數。

透過統整歷年颱風警報所得之預報水位，我們可以得到歷年預報的相關統計參數，以評估過往預報的準確性，並展示歷史預報中，若採用其他理想風場模式可能對預報結果的精進程度。

圖 4—7 至圖 4—8 展示各理想風場模式執行所有颱風預報資料後所得預報水位與觀測資料之統計校驗結果，各圖中橫軸標記統計參數值，縱軸對應測站名稱，圖中色線表示不同理想風場模式結果於該測站觀測資料比對後所得之統計參數，依序為方均根誤差、偏差量值與相關係數。圖 4—7 展示暴潮偏差統計資料，圖 4—8 展示暴潮總水位統計資料。鹿港與東沙島測站因有效觀測資料長度短於

三年，故自本研究分析中排除，故研究中有效可供分析之測站合計為 32 站。

暴潮偏差之方均根誤差分析中，各理想風場模式所得之結果皆落於 0.1 至 0.35 公尺間。大部分之測站表現以 CWB 模式為佳，普遍次佳者為 W06，但各模式在同一測站之方均根誤差差距不超過 0.01 公尺。大部分測站之模擬水位與觀測資料之方均根誤差小於 0.2 公尺，而平均方均根誤差大於 0.2 公尺的測站有新竹、後龍、梧棲、金門、馬祖等站。不同理想風場模式於南部測站如蟬廣嘴、南灣等站所得之水位預報方均根誤差較為相近，無法看出明顯差異。理想風場模式的變化對北部及部分離島測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、澎湖、金門、馬祖等站有較顯著的差異，不同模式選項可以導致方均根誤差之差距可達 0.05 公尺。

暴潮偏差之偏差量值分析中，黑色實線為偏差量值為 0 之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為高估或低估之情形。各理想風場模式的暴潮偏差偏差量值在各測站中皆落於 ± 0.1 公尺內。各模式在同一測站之偏差量值差距介於 0.02 至 0.06 公尺間，顯示選用不同理想風場模式將會對上述測站之預報結果的確會產生分歧。各模式預報結果普遍高估的測站分布主要位於台灣東北部、東部、西南部及南部地區，如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、將軍、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等地；預報結果普遍低於預期的測站則大部分位於台灣西北部、西部及離島地區如淡水、麥寮、台西、東石、澎湖、金門、馬祖等地。偏差量值明顯分歧的測站中，J92 模式在台灣北部及西北部地區如龍洞、基隆、福隆、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲等測站之表現明顯偏離其他理想風場模式所得之預報結果，有明顯低估情形。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，其中 J92 為北部測站表現最佳之模式，CWB 為表現最佳模式之測站普遍落於台灣東北部及東部地區，而西南部以 E11 為表現最佳模式，西部及南部地區測站則無法明顯區分和者表現最佳，須留待後續分析。

暴潮偏差之相關係數分析中，各圖繪製範圍固定為-20%至 100%以利於視覺

化比較不同強度間各測站之變化情形。一般普遍認為，相關係數 30%以下為低相關，30%至 70%為中等相關，70%以上為高度相關。圖中黑色實線為相關係數 0%之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為正相關或負相關之情形。藍線為 30%基準線，紅線為 70%基準線，分別協助判別低、中、高度相關情形。各理想風場模式對各測站的暴潮偏差相關係數落於-5%至 60%間，屬於中度及低度相關，各模式在同一測站之相關係數差距範圍最大約為 10%至 40%。暴潮偏差相關性為中度相關者多為台灣部分北部、東部及南部測站，如基隆、福隆、花蓮、石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、石門、蟬廣嘴、南灣、小琉球、馬祖等；暴潮偏差相關性為低度相關者則多為東北部、西北部、西部及部分離島測站，如頭城、蘇澳、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、將軍、金門等站。其他測站則受理想風場模式的選用差異，相關係數可能為中度相關或低度相關。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式除了金門測站為 J92，桃園測站為 W06 外，其他表現最佳者皆為 CWB，W06 明顯於各測站之相關係數表現僅次於 CWB，其他模式則表現相當。

暴潮總水位之方均根誤差分析中，各理想風場模式所得之結果落於 0.1 至 0.55 公尺間。大部分之測站表現以 CWB 模式為佳，普遍次佳者為 W06，但各模式在同一測站之方均根誤差差距落於 0.01 至 0.1 公尺。大部分測站之模擬水位與觀測資料之方均根誤差小於 0.2 公尺，而平均方均根誤差大於 0.2 公尺的測站有石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、澎湖、金門、馬祖等站。不同理想風場模式於東部及南部測站如石梯、成功、台東、大武、蟬廣嘴、南灣、小琉球等站所得之水位預報方均根誤差較為相近，無法看出明顯差異。理想風場模式的變化對北部及部分離島測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、金門、馬祖等站有較顯著的差異，不同模式選項可以導致方均根誤差之差距可達 0.1 公尺。

暴潮總水位之偏差量值分析中，黑色實線為偏差量值為 0 之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為高估或低估之情形。各理想風場模式的暴潮總水位偏差量

值在各測站中皆落於 ± 0.1 公尺內。各模式在同一測站之偏差量值差距介於 0.02 至 0.06 公尺間，顯示選用不同理想風場模式將會對上述測站之預報結果的確會產生分歧。各模式預報結果普遍高估的測站分布主要位於台灣東北部、東部、西南部及南部地區，如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、將軍、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等地；預報結果普遍低於預期的測站則大部分位於台灣西北部、西部及離島地區如淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、澎湖、金門、馬祖等地。偏差量值明顯分歧的測站中，J92 模式在台灣北部及西北部地區如龍洞、基隆、福隆、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲等測站之表現明顯偏離其他理想風場模式所得之預報結果，有明顯低估情形。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，其中 J92 為北部測站表現最佳之模式，CWB 為表現最佳模式之測站普遍落於台灣東北部及東部地區，而西南部以 E11 為表現最佳模式，西部及西北部測站以 W06 為表現最佳模式，南部地區測站則無法明顯區分和者表現最佳，須留待後續分析。

暴潮總水位之相關係數分析中，橫軸繪製範圍為 60%至 100%。一般研究普遍認為，相關係數 30%以下為低相關，30%至 70%為中等相關，70%以上為高度相關。圖中黑色實線為相關係數 0%之基準線，藍線為 30%基準線，紅線為 70%基準線，協助判斷模式預報結果正相關之程度。各理想風場模式對各測站的暴潮總水位之相關係數落於 80%以上，皆屬於高度相關，主要原因為暴潮總水位之主要成分為潮汐水位。各模式在同一測站之相關係數差距範圍最大不超過 10%。大部分風場模式於各測站中所得之相關係數皆為 90%以上，僅有部分測站如基隆、福隆等站，E11 與 J92 之相關係數落於 85%至 90%。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式為 CWB，W06 為次佳。

本研究於後續章節中展示，將各項統計參數依據歷史預報當下之情境，如預報颱風強度、颱風警報類別等做更精細的區分，以展示各理想風場模式在暴潮水位的預報表現中是否有情境上的差異。上述步驟將會有助於本研究改良暴潮預報

系統，提供對颱風暴潮相關的更全面資訊。

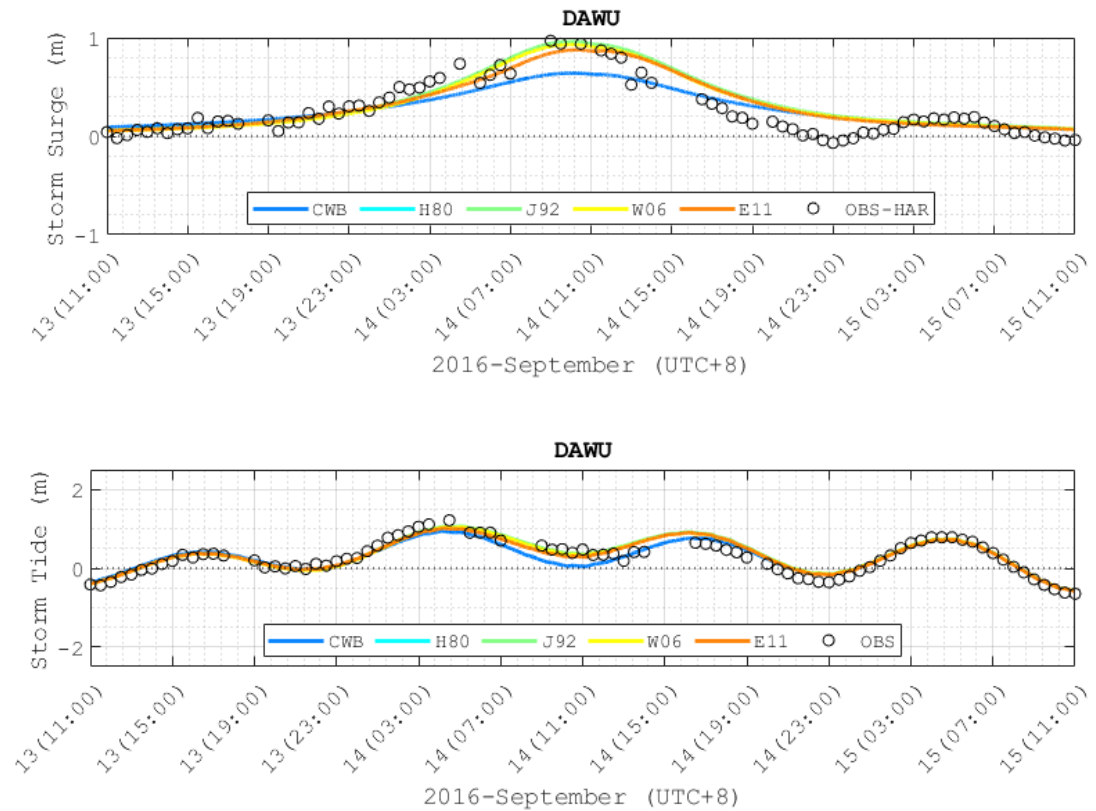


圖 4—6 暴潮系集預報之各系集成員預報水位校驗示意圖

表 4—5 對應圖 4—6 模式結果之校驗參數

Model		CWB	H80	J92	W06	E11
SS	RMSE (m)	0.152	0.122	0.126	0.121	0.122
	Bias (m)	-0.006	0.028	0.050	0.035	0.028
	R (%)	91.818	91.684	91.902	91.822	91.684
ST	RMSE (m)	0.159	0.131	0.134	0.130	0.131
	Bias (m)	-0.007	0.027	0.049	0.034	0.027
	R (%)	93.195	95.474	95.617	95.597	95.474

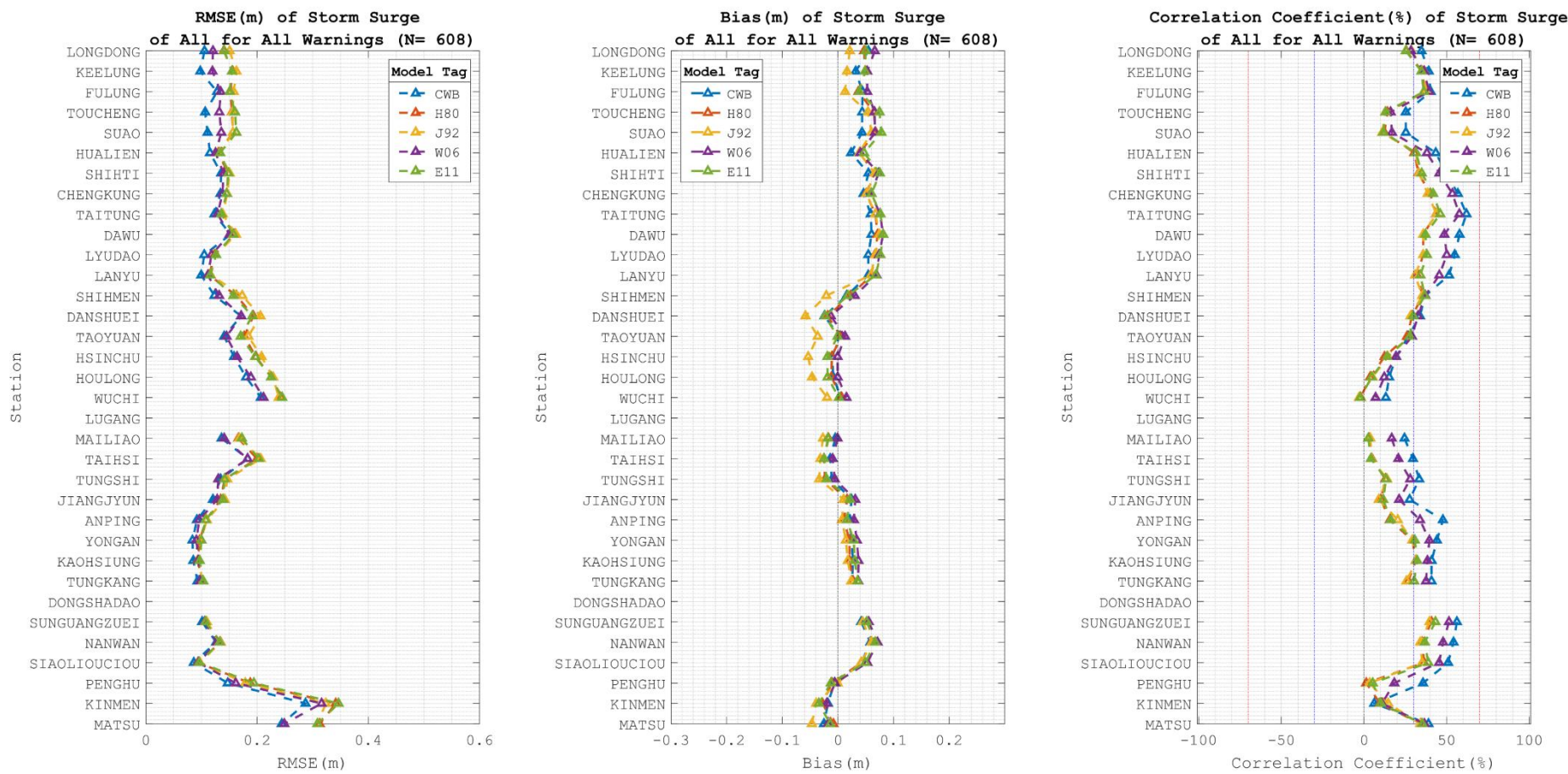


圖 4—7 所有警報中各站於各理想風場模式所得暴潮偏差之統計參數

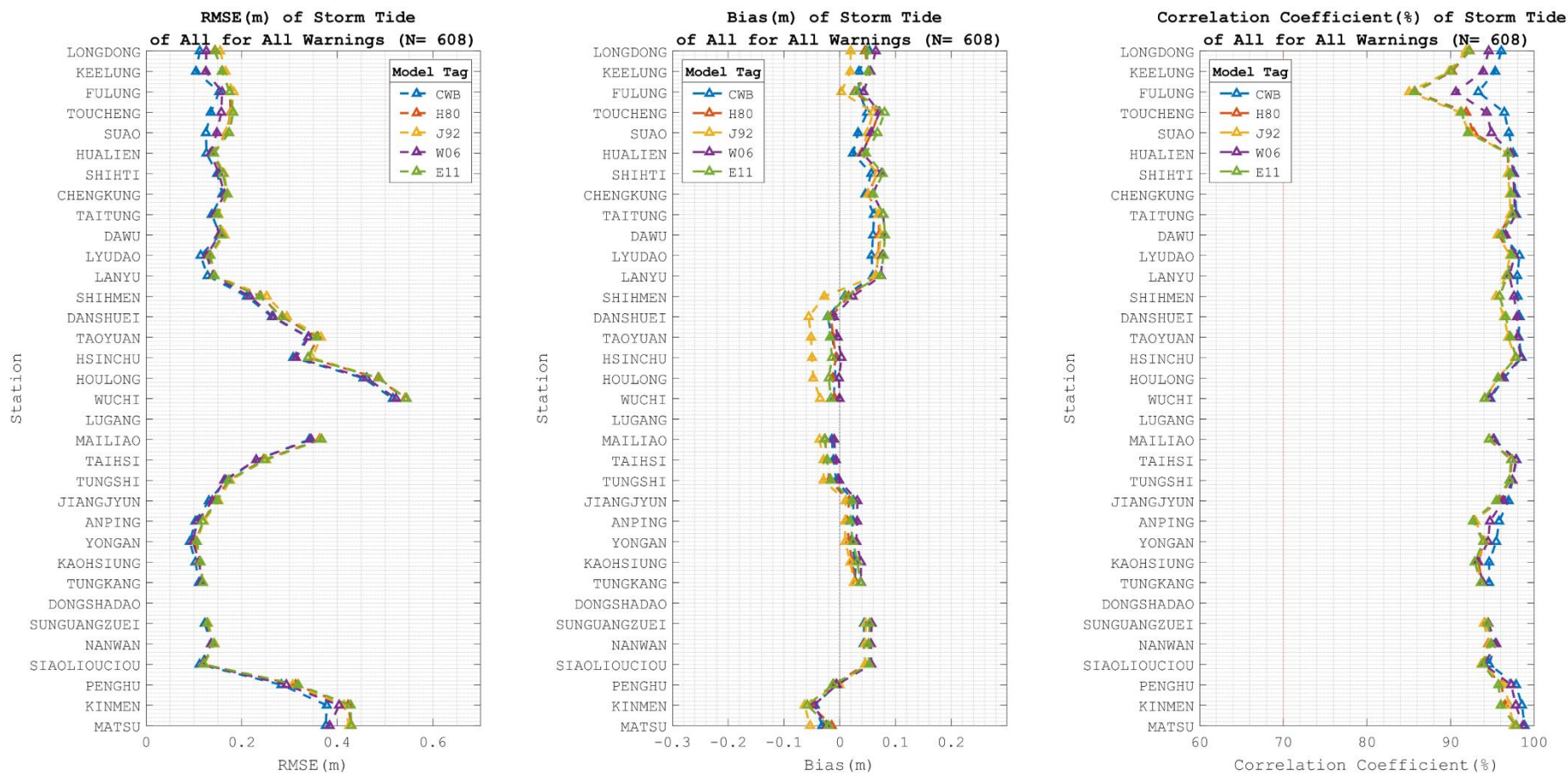


圖 4—8 所有警報中各站於各理想風場模式所得暴潮總水位之統計參數

4-3-1 依颱風強度分類之統計分析

颱風預報資料中，可以取得的參數有警報分類、颱風位置、中心氣壓、近中心最大風速及七級暴風半徑等資訊。其中，颱風近中心最大風速即為颱風強度分類之主要標準。為提升暴潮決定性預報系統的預報準確性，本研究規劃在未來預報作業中，利用預報區間內之近中心最大風速平均值，可以得知在預報期間之颱風強度分類，並選用本研究所得之對應表現較佳之理想風場進行暴潮預報模擬。

本章節依序展示所有颱風警報中，各測站於不同颱風強度分類下選用各理想風場模式計算所得之暴潮預報水位與觀測資料之差距，資料展示圖如圖 4—9 至圖 4—14，各圖中橫軸標記統計參數值，縱軸對應測站名稱，圖中色線表示不同理想風場模式結果於該測站觀測資料比對後所得之統計參數，依序為方均根誤差、偏差量值與相關係數。圖中颱風強度分類依據表 4—2，資料展示圖排序由左至右依據颱風強度弱至強排序。使用資料筆數參照表 4—3。其中圖 4—9 至圖 4—11 展示暴潮偏差統計資料，圖 4—12 至圖 4—14 展示暴潮總水位統計資料。

圖 4—9 為所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮偏差之方均根誤差值。圖中橫軸為方均根誤差值，各圖繪製範圍固定為 0 至 0.6 公尺以利於視覺化比較不同強度間各測站之變化情形。

TS 強度下，各理想風場模式的暴潮偏差方均根誤差在各測站中落於 0.1 公尺至 0.25 公尺間。大部分之測站表現以 CWB 為佳，但各模式在同一測站之方均根誤差差距不超過 0.05 公尺。大部分測站之模擬水位與觀測資料之方均根誤差小於 0.1 公尺，而平均方均根誤差大於 0.2 公尺的測站有梧棲、金門、馬祖等站，可能與測站位址周圍水深較淺或地形過於破碎有關。大部分測站如福隆、成功、石門、淡水、桃園、高雄、東港、蟳廣嘴等站，各模式所得之水位誤差十分接近，可能與該颱風強度於近十年之行進路徑對上述測站影響有限相關。

TS(S)強度下，基隆、金門、馬祖等地區在選用不同理想風場模式時所得知水位模擬結果會有較大的落差，最佳與最差表現者，方均根誤差之差距可達 0.1

公尺。大部分之測站表現以 CWB 為佳，其次為 W06。東部及南部測站，如石梯、成功、台東、大武、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣等站在嚴重的熱帶風暴侵襲台灣時，不同理想風場模式所得之水位預報方均根誤差較為相近，無法看出明顯差異。

TY 強度下，大部分測站所得之方均根誤差與較低強度熱帶氣旋的統計圖表相比有上升之情形，而誤差維持在 0.1 公尺以下之測站有蘭嶼、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、小琉球等站。理想風場模式的變化對於龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、澎湖、金門、馬祖等站有較顯著的差異，不同模式選項可以導致方均根誤差之差距多達 0.1 公尺。在颱風強度下，各理想風場模式中以 CWB 模式的表現為最佳，W06 次之，而 J92 在該強度下通常會得到最大的方均根誤差。

TY(VS)強度下，各理想風場所得之方均根誤差普遍大於 0.1 公尺，而 CWB 在各地測站表現明顯優於其他理想風場模式，除了金門的方均根誤差超過 0.2 公尺外，大部分測站之誤差直接落於 0.1 至 0.2 公尺之間，而表現次佳者為 W06，通常與 CWB 理想風場之誤差相比略高 0.02 至 0.04 公尺。在該颱風強度下，J92 與 E11 通常會有較高的方均根誤差。

圖 4—10 為所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮偏差之偏差量值。圖中橫軸為偏差量值，各圖繪製範圍固定為-0.2 至 0.2 公尺以利於視覺化比較不同強度間各測站之變化情形。黑色實線為偏差量值為 0 之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為高估或低估之情形。

TS 強度下，各理想風場模式的暴潮偏差偏差量值在各測站中皆落於 ± 0.1 公尺內。大部分之測站表現以 CWB 為佳，但各模式在同一測站之偏差量值差距不超過 0.02 公尺。部分測站如安平、澎湖、金門等地，各模式間偏差量值間差距落於 0.04 公尺內。各模式預報結果普遍高估的測站分布主要位於台灣東北部、東部、西南部及南部地區，如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、石門、將軍、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南

灣、小琉球等地；預報結果普遍低於預期的測站則大部分位於台灣西北部、西部及離島地區如淡水、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、澎湖、金門、馬祖等地。

TS(S)強度下，大部分測站使用各理想風場模式預報水位時皆有高估之情形，僅台西、東石及馬祖站有低估情形。各模式預報高估測站水位最大不超過 0.15 公尺，而普遍高估超過 0.1 公尺之測站主要位於東部，如石梯、台東、大武及綠島測站。各模式預報低估測站水位最多不超過 0.05 公尺，主要發生在台灣西部及離島如東石及馬祖地區。各模式在同一測站之偏差量值差距普遍不超過 0.02 公尺，部分北部、西北部及離島測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、澎湖等站之偏差量值落於 0.02 至 0.04 公尺間，金門之模式間偏差量值差距可達 0.08 公尺。偏差量值分歧的測站中，J92 模式在台灣西北部地區如淡水、桃園、新竹、後龍等測站之表現明顯偏離其他理想風場模式所得之預報結果，有明顯低估情形。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，其中 J92 為北部測站表現最佳之模式，CWB 為表現最佳模式之測站普遍落於台灣東北部及東部地區，而西南部以 E11 為表現最佳模式，西部及南部地區測站則無法明顯區分和者表現最佳，須留待後續分析。

TY 強度下，大部分測站所得之偏差量值分部有明顯分歧，除東部及南部測站如成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、蟬廣嘴、南灣等站各模式所得之偏差量值小於 0.02 公尺外，其他測站各模式所得之偏差量值皆大於 0.02 公尺，與較弱熱帶氣旋強度之預報統計結果有明顯差距。其中部分北部、西北部及離島如龍洞、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、金門等站模式間偏差量值差距可達 0.06 至 0.1 公尺，顯示選用不同理想風場模式將會對上述測站之預報結果產生明顯分歧。大部分測站使用各理想風場模式預報水位時皆有高估之情形，而西北部及部分離島測站如淡水、桃園、新竹、後龍、澎湖、金門、馬祖等地有低估情形，高估/低估之範圍不超過 ± 0.1 公尺。J92 模式在 TS(S)強度下已有在西北部測站明顯低於其他模式預報結果之情形，在 TY 強度下之預報結果中呈現該特性的測站有明顯增加，主要發生之測站位於台灣北部、西北部、西部及離島地區，如龍洞、基隆、

福隆、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、將軍、安平、永安、高雄、東港、馬祖等站。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，其中以 J92 為表現最佳者主要落於北部、西南部及南部測站，CWB 為表現最佳者主要為於台灣東北部及部分離島測站，W06 為表現最佳者主要為西北部測站。

TY(VS)強度下，所有測站採用各理想風場所得之偏差量值皆有明顯分歧，彼此偏差量值落差高於 0.04 公尺，東北部、西部及部分離島測站如頭城、蘇澳、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、安平、馬祖等站各模式之偏差量值差距可達 0.08 至 0.1 公尺。顯示選用不同理想風場模式預報該強度之熱帶氣旋，將會對上述測站之預報結果產生明顯分歧。大部分測站使用各理想風場模式預報水位時有高估之情形，如北部、東部、西南部及南部測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石梯、城東、大武、綠島、蘭嶼、石門、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等。而西部及部分離島測站如淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、將軍、安平、澎湖、金門、馬祖等地有低估情形，高估/低估之範圍不超過 ± 0.12 公尺。J92 模式在台灣北部及西部地區之偏差量值有明顯低於其他模式預報結果之情形，如龍洞、基隆、福隆、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、將軍、安平、永安、高雄等站；CWB 模式在台灣東北部、東部、南部及部分離島地區之偏差量值有明顯低於其他模式預報結果之情形，如頭城、蘇澳、花蓮、石梯、城東、大武、綠島、蘭嶼、蟬廣嘴、南灣、小琉球、澎湖、金門、馬祖等地。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，其中以 J92 為表現最佳者主要落於北部、西南部及部分離島測站，CWB 為表現最佳者主要為於台灣東部及南部測站，W06 為表現最佳者主要為西北部及西部測站。

圖 4—11 為所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮偏差之相關係數視覺化展示圖。圖中橫軸為相關係數，各圖繪製範圍固定為-20%至 100%以利於視覺化比較不同強度間各測站之變化情形。一般普遍認為，相關係數 30%以下

為低相關，30%至 70%為中等相關，70%以上為高度相關。圖中黑色實線為相關係數 0%之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為正相關或負相關之情形。藍線為 30%基準線，紅線為 70%基準線，分別協助判別低、中、高度相關情形。

TS 強度下，各理想風場模式對各測站的暴潮偏差相關係數落於 0 至 60%間，屬於中度及低度相關，各模式在同一測站之相關係數差距範圍最大約為 20%至 30%。暴潮偏差相關性為中度相關者多為台灣東部、西南部及南部測站，如石梯、成功、台東、大武、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等；暴潮偏差相關性為低度相關者則多為台灣北部、西北部、西部及部分離島測站，如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、將軍、澎湖、金門、馬祖等站。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，大部分測站之相關係數最高者多為 CWB 模式，其次則多為 J92 及 W06 模式。

TS(S)強度下，各理想風場模式對各測站的暴潮偏差相關係數落於-10%至 60%間，屬於中度及低度相關，各模式在同一測站之相關係數差距範圍落於 10%至 40%。所有理想風場模式預報測站之暴潮偏差相關性皆達到中度相關者，有成功、台東、石門、淡水、馬祖等站；所有理想風場模式預報測站之暴潮偏差相關性皆為低度相關者，有頭城、蘇澳、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、將軍、金門等站，其他測站則受理想風場模式的選用差異，相關係數可能為中度相關或低度相關。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式除了淡水測站為 W06；石門、桃園測站為 E11、金門測站為 J92，外，其他表現最佳者皆為 CWB。

TY 強度下，各理想風場模式對各測站的暴潮偏差相關係數落於-10%至 60%間，屬於中度至低度相關。各模式在同一測站之相關係數差距範圍落於 20%至 40%，與前述較弱之熱帶氣旋強度資料相比，各理想風場模式在各測站中預報所得之分散程度較大。所有理想風場模式預報測站之暴潮偏差相關性皆達到中度相關者，有基隆、福隆、成功、台東、石門、淡水、馬祖等站；所有理想風場模式預報測站之暴潮偏差相關性皆為低度相關者，有頭城、蘇澳、新竹、後龍、梧棲、

麥寮、台西、東石、將軍、金門等站，與 TS(S)強度下之分布情形相似。其他測站則受理想風場模式的選用差異，相關係數可能為中度相關或低度相關。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式除了桃園測站為 W06、金門測站為 J92 外，其他表現最佳者皆為 CWB。W06 明顯在 TY 強度下於各測站之相關係數表現僅次於 CWB，其他模式則表現相當，部分測站則以 J92 所得之相關係數為最低。

TY(VS) 強度下，各理想風場模式對各測站的暴潮偏差相關係數落於-10%至 70%間，屬於中度至低度相關。各模式在同一測站之相關係數差距範圍落於 20%至 70%，與前述較弱之熱帶氣旋強度資料相比，各理想風場模式在各測站中預報所得之分散程度較大。所有理想風場模式預報測站之暴潮偏差相關性皆達到中度相關以上者，有龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、石門、淡水、桃園、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球、馬祖等站，數量較其他熱帶氣旋強度分析結果為多；所有理想風場模式預報測站之暴潮偏差相關性皆為低度相關者，有新竹、後龍、梧棲、金門等站。其他測站則受理想風場模式的選用差異，相關係數可能為中度相關或低度相關。其中安平測站之比較結果最為懸殊，依據選用模式的不同，暴潮偏差與觀測資料之相關係數可落於-5%至 70%以上，即低度相關至高度相關。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式為 CWB，表現次佳者為 W06，在東部、西部、南部等地區測站皆可觀察到此特徵。

圖 4—12 為所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮總水位之方均根誤差值。圖中橫軸為方均根誤差值，各圖繪製範圍固定為 0 至 0.7 公尺以利於視覺化比較不同強度間各測站之變化情形。

TS 強度下，各理想風場模式的暴潮總水位方均根誤差在各測站中落於 0.1 公尺至 0.5 公尺，且各模式在同一測站之方均根誤差差距較小，於視覺化圖形中各標號幾乎重疊，最大差距不超過 0.02 公尺，因此判別何種理想風場模式在整體測站表現中為最佳相對困難。大部分測站之模擬水位與觀測資料之方均根誤差小於 0.2 公尺，而平均方均根誤差為 0.1 公尺以下的測站有龍洞、基隆、花蓮、綠

島、永安站等；平均方均根誤差大於 0.2 公尺的測站有淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、澎湖、金門、馬祖等站，其中後龍與梧棲站的平均暴潮總水位誤差大於 0.4 公尺。

TS(S)強度下，北部及部分離島地區如基隆、金門、馬祖等地區在選用不同理想風場模式時所得知水位模擬結果會有較大的落差，最佳與最差表現者，方均根誤差之差距介於 0.08 至 0.1 公尺；大部分之測站表現以 CWB 為佳，其次為 W06，但兩者之平均方均根誤差差距最大不超過 0.04 公尺。台灣東南部及西南部地區如石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、台西、東石、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等站，在 TS(S)強度之熱帶氣旋侵襲台灣時，不同理想風場模式所得之水位預報方均根誤差較為相近，無法看出明顯差異。歷年預報水位中，所有模式皆可得到 0.1 公尺以下平均方均根誤差之測站主要位於台灣西南部如安平、永安、高雄等站；西部及部分離島測站如淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、台西、澎湖、金門、馬祖等站，平均方均根誤差在歷年預報中為 0.3 公尺以上。

TY 強度下，大部分測站所得之方均根誤差與較低強度熱帶氣旋的統計圖表相比有上升之情形，所有測站於歷史預報中之平均方均根誤差皆為 0.1 公尺以上。理想風場模式的變化對於北部、西北部及部分離島測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、澎湖、金門、馬祖等站有較顯著的差異，不同模式選項可以導致方均根誤差之差距介於 0.06 至 0.1 公尺。在 TY 強度的熱帶氣旋案例下，各理想風場模式中以 CWB 模式的表現為最佳，W06 次之，而 J92 及 E11 在該強度下通常會得到最大的方均根誤差。

TY(VS)強度下，各理想風場所得之方均根誤差普遍大於 0.1 公尺。各理想風場模式之預報結果普遍小於 0.2 公尺之測站有北部、東部、西南部等測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石梯、成功、台東、大武、綠島、將軍、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等，而所有模式之誤差皆大於 0.4 公尺之測站主要位於西部地區，如後龍、梧棲等站。CWB 在各地測站表現明顯優

於其他理想風場模式，而表現次佳者為 W06，通常與 CWB 理想風場之誤差相比略高 0 至 0.06 公尺。在 TY(VS)之熱帶氣旋強度下，J92 與 E11 通常會有較高的方均根誤差。

圖 4—13 為所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮總水位之偏差量值。圖中橫軸為偏差量值，各圖繪製範圍固定為-0.3 至 0.3 公尺以利於視覺化比較不同強度間各測站之變化情形。黑色實線為偏差量值為 0 之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為高估或低估之情形。

TS 強度下，各理想風場模式的暴潮偏差偏差量值在各測站中皆落於 ± 0.06 公尺內。各模式在同一測站之偏差量值差距不超過 0.04 公尺，視覺產品中無法明顯觀察出何種理想模式表現為最佳。部分測站如安平、澎湖、金門等地，各模式間偏差量值間差距落於 0.02 公尺至 0.04 公尺，屬於模式間差異較大之測站。各模式預報結果普遍高估的測站分布主要位於台灣東北部、東部、西南部及南部地區，如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、將軍、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等地；預報結果普遍低於預期的測站則大部分位於台灣西北部、西部及離島地區如淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、金門、馬祖等地。

TS(S)強度下，大部分測站使用各理想風場模式預報水位時皆有高估之情形，僅桃園、東石及馬祖站使用各理想風場模式預報水位時有低估情形，而淡水、新竹、後龍、梧棲、金門等站則視使用之模式不同，有高估或低估之差異。各模式預報高估測站水位最大不超過 0.15 公尺，而普遍高估超過 0.1 公尺之測站主要位於東部，如石梯、台東、大武及綠島測站。各模式預報低估測站水位最多不超過 0.05 公尺，主要發生在台灣西部及離島如東石及馬祖地區。各模式在同一測站之偏差量值差距最大不超過 0.08 公尺，差距最大之測站為金門，偏差量值差距為 0.08 公尺。部分北部、西北部及離島測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、澎湖、馬祖等站之偏差量值落於 0.02 至 0.06 公尺間；東部及西南部測站如石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、麥

寮、台西、東石、將軍、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等站之偏差量值為 0.02 公尺以下。偏差量值分歧的測站中，J92 模式在台灣西北部地區如石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、金門等測站之表現明顯偏離其他理想風場模式所得之預報結果，有明顯低估情形。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，其中 J92 為北部測站表現最佳之模式，CWB 為表現最佳模式之測站普遍落於台灣東北部及東部地區，而西南部以 E11 為表現最佳模式，西部及南部地區測站則無法明顯區分和者表現最佳，須留待後續分析。

TY 強度下，大部分測站所得之偏差量值分部有明顯分歧，除東部及南部測站如成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等站各模式所得之偏差量值小於 0.02 公尺外，其他測站各模式所得之偏差量值皆大於 0.02 公尺，與較弱熱帶氣旋強度之預報統計結果有明顯差距。其中部分北部、西北部及離島如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、金門等站模式間偏差量值差距可達 0.04 至 0.1 公尺，顯示選用不同理想風場模式將會對上述測站之預報結果產生明顯分歧。大部分測站使用各理想風場模式預報水位時皆有高估之情形，而西北部及部分離島測站如淡水、桃園、新竹、後龍、澎湖、金門、馬祖等地有低估情形，高估/低估之範圍不超過 ± 0.1 公尺。J92 模式在 TS(S)強度下已有在西北部測站明顯低於其他模式預報結果之情形，在 TY 強度的熱帶氣旋之預報結果中呈現該特性的測站有明顯增加，主要發生之測站位於台灣北部、西北部、西部及離島地區，如龍洞、基隆、福隆、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、將軍、安平、永安、高雄、東港、澎湖、馬祖等站。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，其中以 J92 為表現最佳者主要落於北部、西南部及南部測站，CWB 為表現最佳者主要為於台灣東北部及部分離島測站，W06 為表現最佳者主要為西北部測站。

TY(VS)強度下，所有測站採用各理想風場所得之偏差量值皆有明顯分歧，彼此偏差量值落至少為 0.04 公尺以上，東北部、西部及部分離島測站如福隆、頭城、蘇澳、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、安平、

馬祖等站各模式之偏差量值差距可達 0.06 至 0.1 公尺，顯示選用不同理想風場模式預報該強度之熱帶氣旋，將會對上述測站之預報結果產生明顯分歧。大部分測站使用各理想風場模式預報水位時有高估之情形，如北部、東部、西南部及南部測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石梯、成功、大武、綠島、蘭嶼、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等。而西部及部分離島測站如淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、安平、澎湖、金門、馬祖等地有低估情形，高估/低估之範圍不超過 ± 0.14 公尺。J92 模式在台灣北部及西部地區之偏差量值有明顯低於其他模式預報結果之情形，如龍洞、基隆、福隆、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、將軍、安平、永安、高雄等站；CWB 模式在台灣東北部、東部、南部及部分離島地區之偏差量值有明顯低於其他模式預報結果之情形，如頭城、蘇澳、花蓮、石梯、成功、大武、綠島、蘭嶼、蟬廣嘴、南灣、小琉球、澎湖、金門、馬祖等地。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，其中以 J92 為表現最佳者主要落於北部、西南部及部分離島測站，CWB 為表現最佳者主要為於台灣東部及南部測站，W06 為表現最佳者主要為西北部及西部測站。

圖 4—14 為所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮總水位之相關係數視覺化展示圖。圖中橫軸為相關係數，各圖繪製範圍固定為 70%至 100%以利於視覺化比較不同強度間各測站之變化情形。一般普遍認為，相關係數為 70%以上時便屬高度相關。圖中紅線為 70%基準線，協助判別資料之相關情形。

TS 強度下，各理想風場模式對各測站的暴潮總水位相關係數落於 90%以上，屬於高度相關。相關係數介於 90%至 95%間之測站多為台灣西部、西南部及南部地區如梧棲、麥寮、高雄、東港、南灣、小琉球等站，其他測站預報水位與觀測資料之相關係數皆在 95%以上。視覺化展示中，各模式在同一測站之相關係數差距範圍小於 5%，因此辨別何種理想風場模式表現最佳較為困難。

TS(S)強度下，各理想風場模式對各測站的暴潮總水位相關係數皆為 85%以上，屬於高度相關。除福隆站有部分理想風場模式預報結果之相關係數介於 85%

至 90%間外，其他測站之相關係數皆為 90%以上。北部及部分離島測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、澎湖、金門等站，受理想風場模式的選用差異，相關係數之落差約為 5%至 10%。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式多為 CWB，次佳者多為 W06。

TY 強度下，各理想風場模式對各測站的暴潮總水位相關係數皆為 80 以上，屬於高度相關。各模式在同一測站之相關係數差距範圍落於 5%至 15%，與前述較弱之熱帶氣旋強度資料相比，各理想風場模式在各測站中預報所得之分散程度較大，尤其北部與東北部測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳等站，各模式之相關係數差距範圍落於 10%至 15%。除基隆、福隆、頭城、蘇澳站有部分理想風場模式預報結果之相關係數介於 80%至 90%間外，其他測站之相關係數皆為 90%以上。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式多為 CWB，次佳者多為 W06。其他模式則表現相當，部分測站則以 J92 及 E11 所得之相關係數為最低。

TY(VS) 強度下，各理想風場模式對各測站的暴潮總水位相關係數皆為 80%以上，屬於高度相關。各模式在同一測站之相關係數差距範圍落於 5%至 15%，與前述較弱之熱帶氣旋強度資料相比，各理想風場模式在各測站中預報所得之分散程度較大，尤其北部與東北部測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳等站，各模式之相關係數差距範圍落於 10%至 15%。除基隆、福隆、頭城、蘇澳、安平、永安站有部分理想風場模式預報結果之相關係數介於 80%至 90%間外，其他測站之相關係數皆為 90%以上。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式多為 CWB，次佳者多為 W06。其他模式則表現相當，部分測站則以 J92 及 E11 所得之相關係數為最低，在東部、西部、南部等地區測站皆可觀察到此特徵。

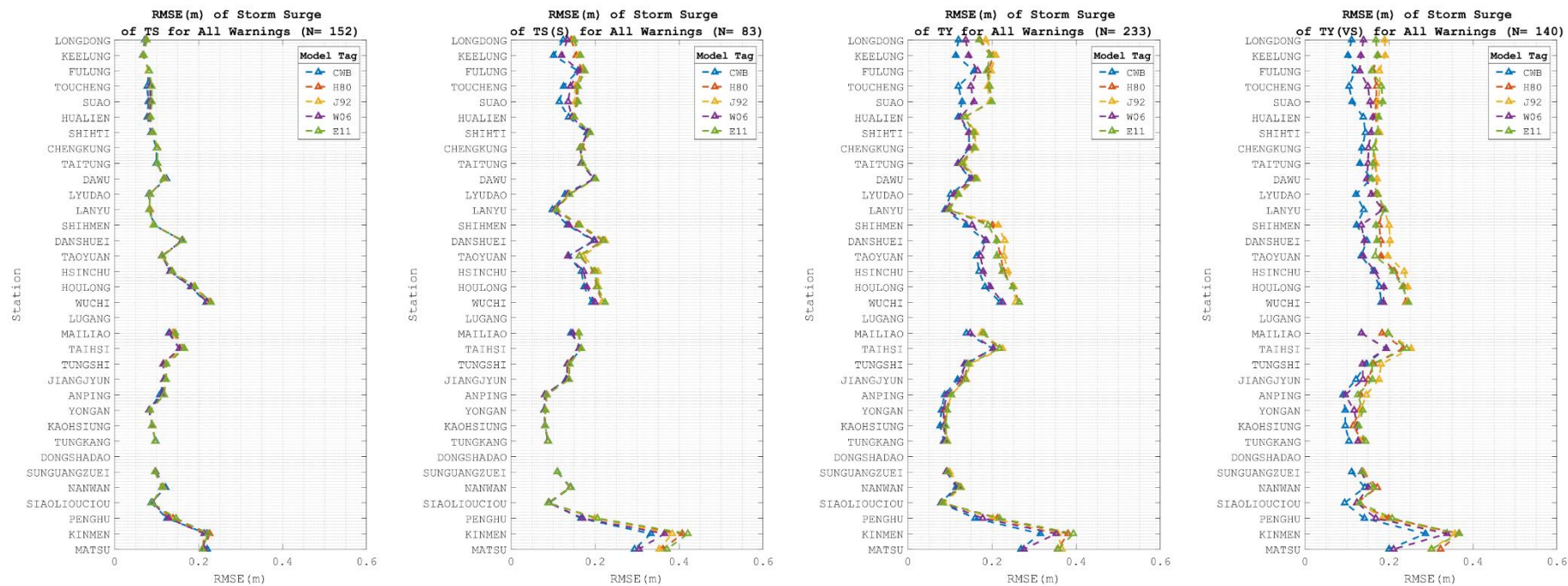


圖 4—9 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮偏差之方均根誤差值

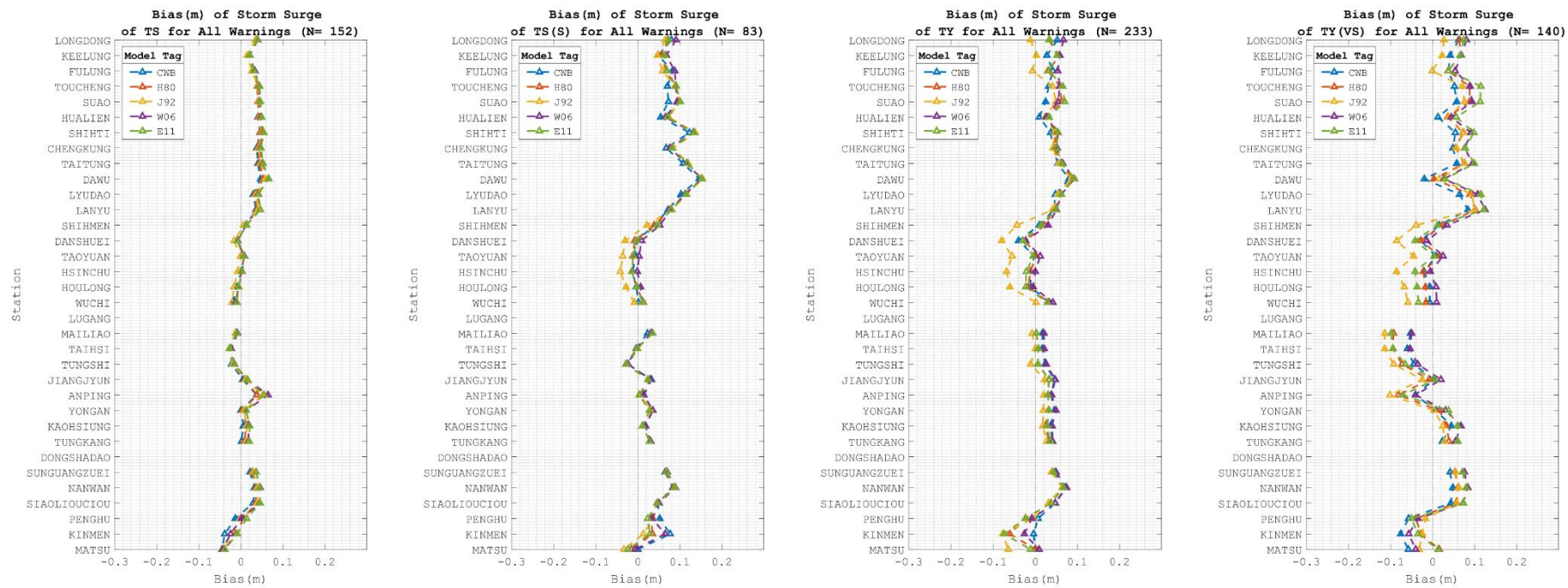


圖 4—10 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮偏差之偏差量值

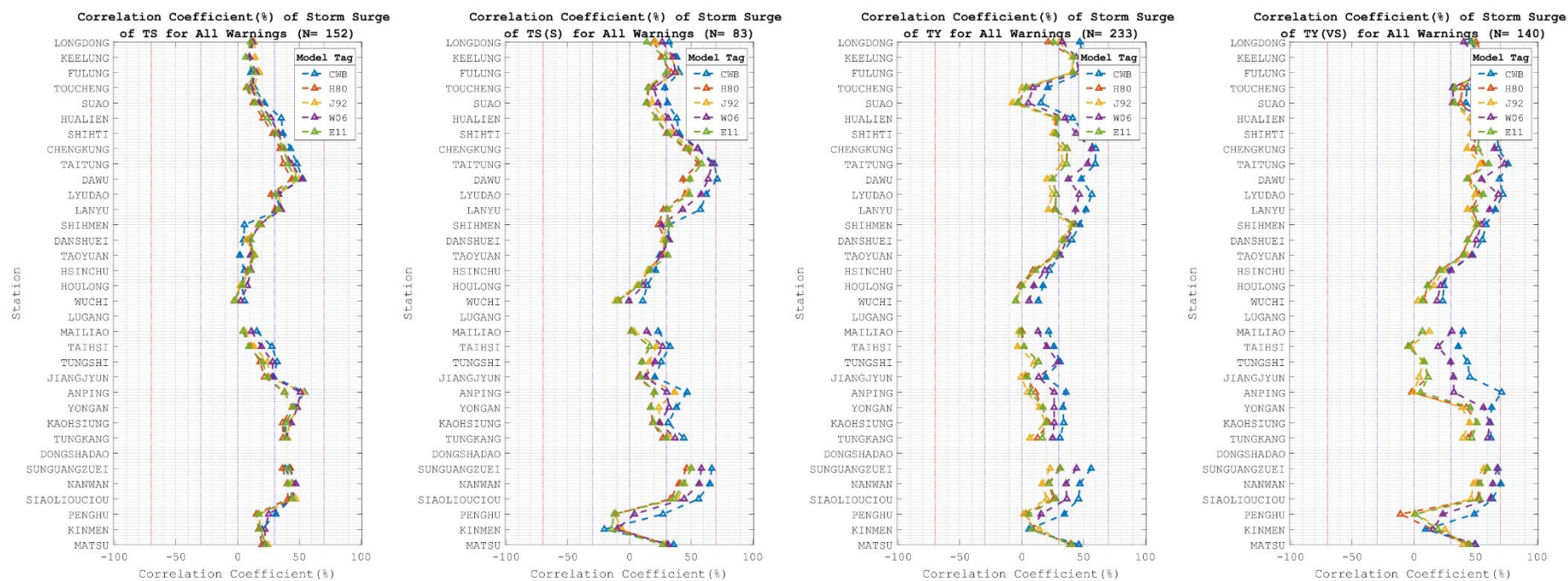


圖 4—11 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮偏差之相關係數

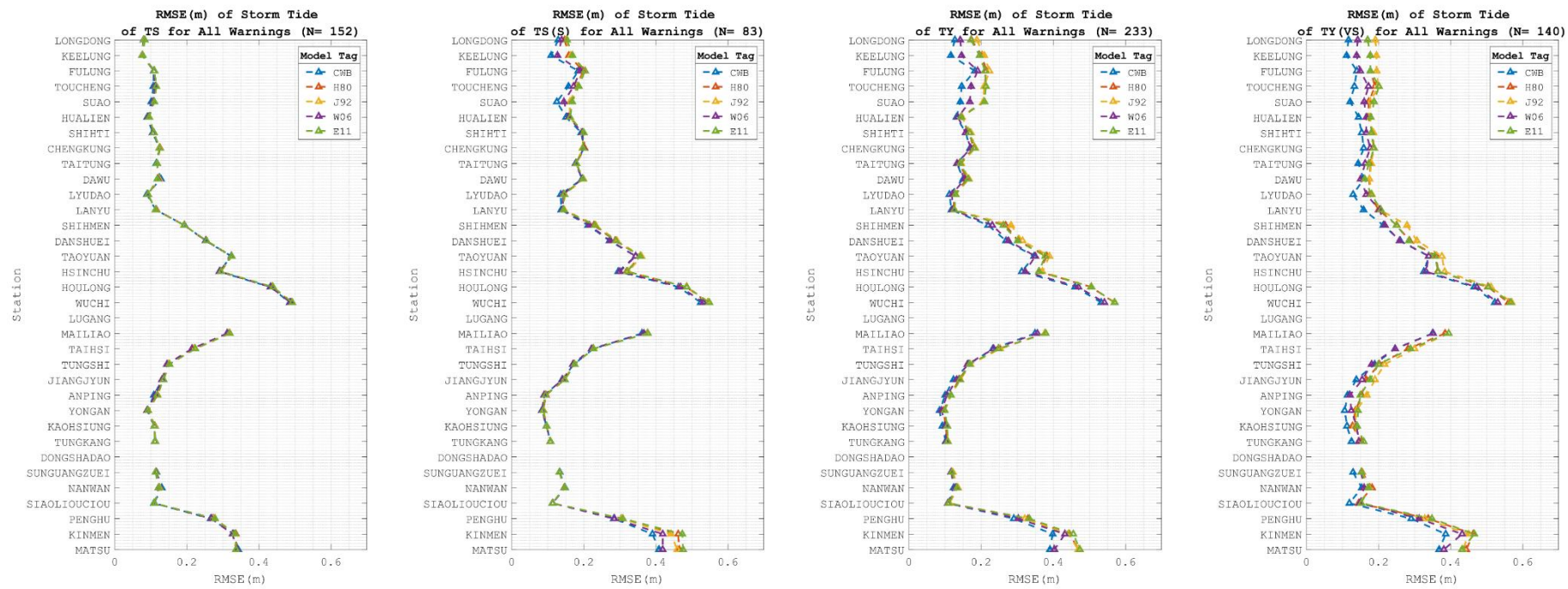


圖 4—12 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮總水位之方均根誤差值

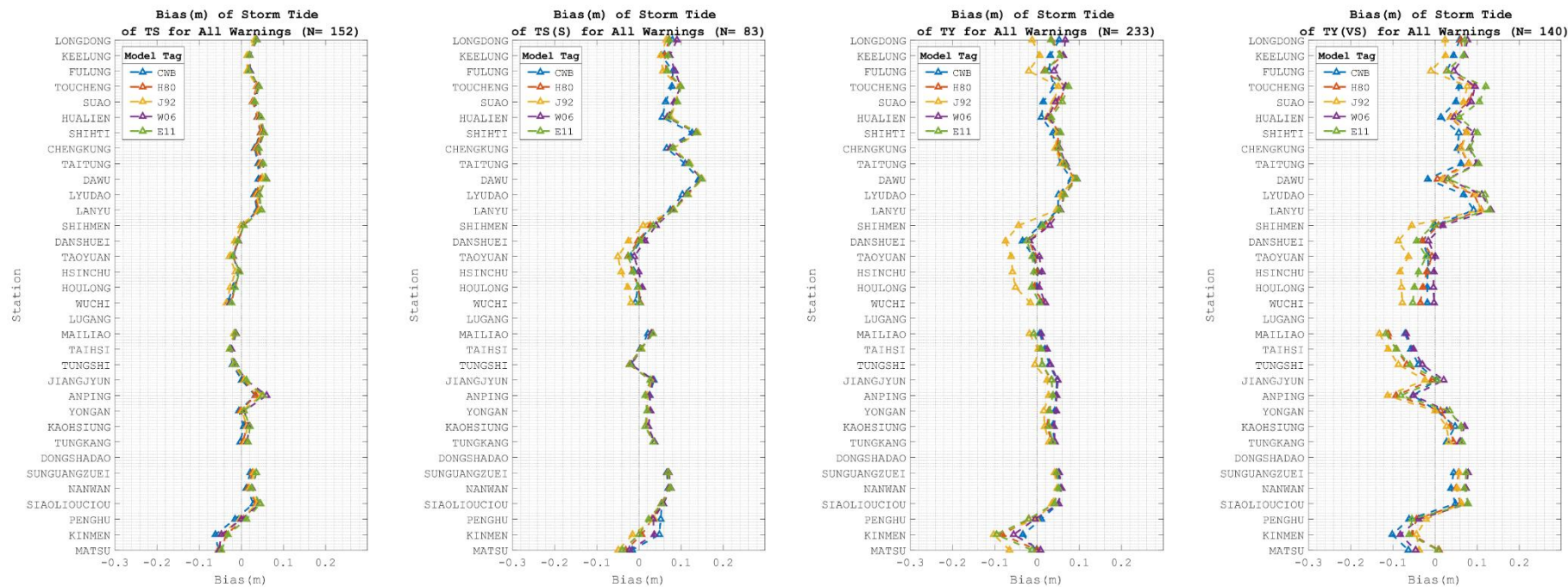


圖 4—13 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮總水位之偏差量值

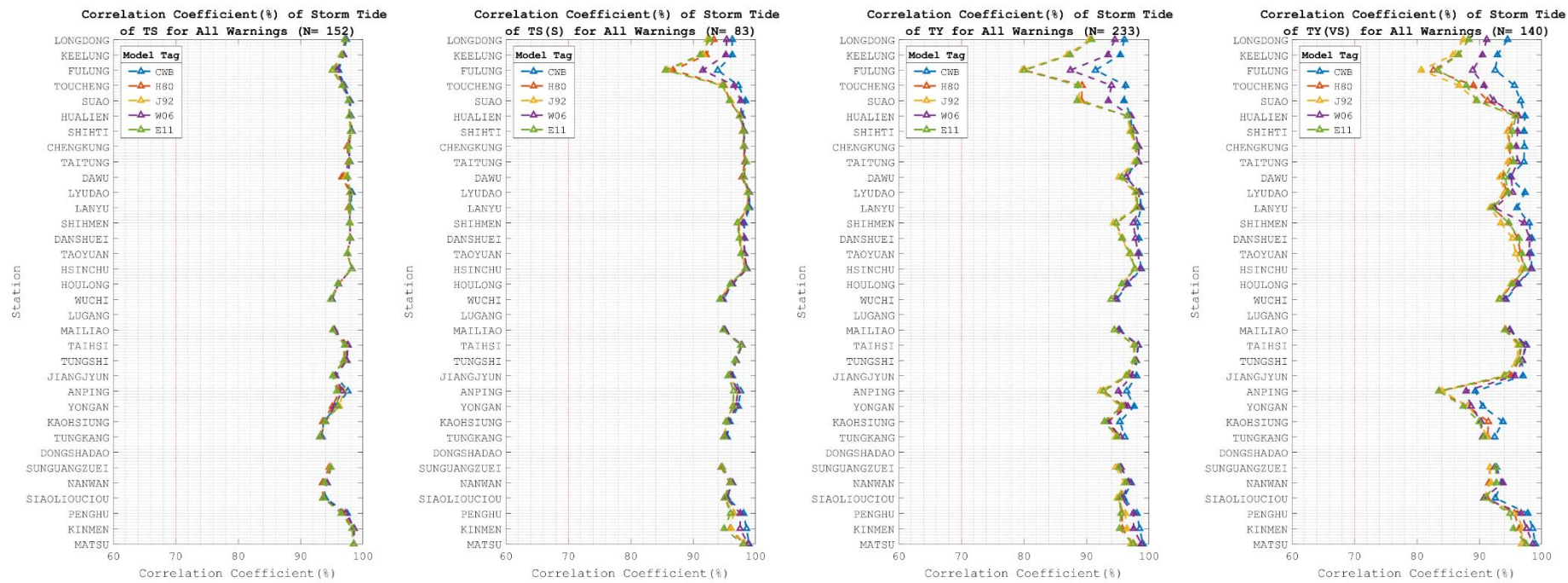


圖 4—14 所有警報中各測站於各颱風強度分類下所得暴潮總水位之相關係數

透過清點各測站具備最佳預報表現之理想風場模式，便可得到適合預報大部分測站者。表 4—6 至表 4—8 展示不同颱風強度下，歷年預報表現最佳/最差之理想風場模式及該模式對應之表現最佳/最差測站數，資料展示類型包含暴潮偏差（Storm Surge）與暴潮總水位（Storm Tide），依據颱風強度弱至強排序，欄位最下方則統整考量所有資料情形下，理想風場模式的表現。

表 4—6 中展示方均根誤差資料之分析結果，以方均根誤差最低者為最佳，最高者則為最差之原則進行統計。其中，CWB 在暴潮偏差與暴潮總水位之預報中，皆有最好之統計表現，最佳表現之測站為至少 20 個以上。若考量整體預報情形，則以 CWB 為最佳表現之測站為 31 至 32 個。鑒於本研究中鹿港及東沙島有效資料不足故排於本次研究分析之外，CWB 可以被視為在所有情況中表現最佳之理想風場模式。表現相對不如預期之理想風場模式主要為 E11 及 J92，於暴潮偏差與暴潮總水位之資歷類型表現皆相似，強度為 TS 或 TS(S)時，E11 之方均根誤差最高的測站為 19 至 20 站；強度為 TY 以上時，J92 之方均根誤差最高的測站為 19 至 24 站，若考量所有強度之預報情形，則 J92 在 21 個測站獲得最高之方均根誤差值，顯示表現不如預期。

表 4—7 中展示偏差量值資料分析結果，偏差量值以其絕對值最低者為最佳，最高者為最差之原則進行統計。其中在 TY 強度下，J92 在半數測站中之暴潮偏差與暴潮總水位預報資料有最佳之表現，其餘熱帶氣旋強度則以 CWB 有最佳表現。若考量整體預報情形，則以 CWB 為最佳表現之測站為 15 至 16 個，顯示在考慮偏差量值作為選用理想風場模式基準時，CWB 可以被視為在所有情況中表現最佳之理想風場模式。表現相對不如預期者有 E11、J92、W06 等模式，依據颱風強度分類而有所變化，而各理想風場在暴潮偏差與暴潮總水位中表現相近。其中 E11 在 TS 及 TY(VS)強度下在多數測站中有較高之偏差量值，佔有 13 至 16 站；J92 在 TS(S)強度下有 14 至 15 站有較高之偏差量值，而 W06 在 TY 強度下會在多數測站中有較高之偏差量值，佔有 18 至 19 站；若考量所有強度之預報情形，則 W06 分別在暴潮偏差與暴潮總水位預報中有 13 及 12 個測站獲得最高之

偏差量值。

表 4—8 中展示相關係數資料分析結果，而相關係數資料以最高者為佳，最低者為最不理想之原則進行統計。其中，CWB 在暴潮偏差與暴潮總水位之預報中，皆有最好之統計表現，最佳表現之測站為至少半數，而在熱帶氣旋強度為 TS(S)以上時，最佳表現模式為 CWB 的測站有 23 站以上。若考量整體預報情形，則以 CWB 為最佳表現之測站為 28 至 30 個。表現相對不如預期之理想風場模式有 H80、E11、J92 等模式，依據熱帶氣旋強度分類而有所變化，但各強度分類下表現較差之模式在各測站中佔比亦通常過半。其中 H80 在暴潮偏差資料中、TS(S)強度以下，被判定為表現最差之測站數有 18 至 19 站；暴潮總水位資料中，E11 在 TS(S)強度以下表現在 18 至 20 站中表現最不理想。當熱帶氣旋強度為 TY 以上，則 J92 在暴潮偏差與暴潮總水位預報中與其他模式相比有最低相關係數的測站有 19 至 25 站。若考量所有強度之預報情形，則 J92 分別在暴潮偏差與暴潮總水位預報中有 15 及 19 個測站獲得最高之偏差量值。

綜合評估表 4—6 至表 4—8 中，暴潮偏差與暴潮總水位資料各熱帶氣旋強度下表現最佳之理想風場模式為 CWB 模式，其他候選模式則可依據出現在表現較不如預期中之模式加以排序，則其餘模式表現次佳者依序為 H80、W06、E11 及 J92。

表 4—6 颱風強度分類下理想風場模式之表現與對應測站數（方均根誤差）

RMSE	Storm Surge				Storm Tide			
Intensity	BEST	NUM	WORST	NUM	BEST	NUM	WORST	NUM
TS	CWB	22	E11	20	CWB	20	E11	20
TS(S)	CWB	24	E11	19	CWB	26	E11	19
TY	CWB	31	J92	24	CWB	31	J92	24
TY(VS)	CWB	31	J92	19	CWB	30	J92	19
All	CWB	31	J92	21	CWB	32	J92	21

表 4—7 颱風強度分類下理想風場模式之表現與對應測站數（偏差量值）

BIAS	Storm Surge				Storm Tide			
Intensity	BEST	NUM	WORST	NUM	BEST	NUM	WORST	NUM
TS	CWB	18	E11	16	CWB	16	E11	15
TS(S)	CWB	15	J92	14	CWB	16	J92	15
TY	J92	16	W06	19	J92	16	W06	18
TY(VS)	CWB	16	E11	13	CWB	16	E11	13
All	CWB	16	W06	13	CWB	15	W06	12

表 4—8 颱風強度分類下理想風場模式之表現與對應測站數（相關係數）

R	Storm Surge				Storm Tide			
Intensity	BEST	NUM	WORST	NUM	BEST	NUM	WORST	NUM
TS	CWB	14	H80	19	CWB	20	E11	20
TS(S)	CWB	28	H80	18	CWB	24	E11	18
TY	CWB	30	J92	25	CWB	26	J92	23
TY(VS)	CWB	28	J92	19	CWB	29	J92	22
All	CWB	30	J92	15	CWB	28	J92	19

4-3-2 依颱風警報種類分類之統計分析

除了颱風強度外，研究區域與颱風的距離亦會影響沿海災害的嚴重程度。為提升暴潮決定性預報系統的預報準確性，本研究規劃在未來預報作業中，依據颱風與台灣之距離與熱帶氣旋強度，選用本研所得表現最佳之理想風場進行暴潮預報模擬。熱帶氣旋強度方面，可以利用颱風預報資料取得近中心最大風速並作為選用理想風場模式之標準，而颱風與台灣之距離亦可依據發布警報種類，初步辨別預報未來期間颱風與台灣之遠近。

本章節依序展示各項颱風警報分類中，各測站於不同颱風強度分類下選用各理想風場模式計算所得之暴潮預報水位與觀測資料之差距，資料展示圖如圖 4—15 至圖 4—44，各圖中橫軸標記統計參數值，縱軸對應測站名稱，圖中色線表示不同理想風場模式結果於該測站觀測資料比對後所得之統計參數，依序為方均根誤差、偏差量值與相關係數。颱風強度分類依據表 4—2，資料展示圖排序由左至右依據颱風警報分類排序，依序為所有警報、海上警報及陸上警報。使用資料筆數參照表 4—3。其中圖 4—15 至圖 4—29 展示暴潮偏差統計資料，圖 4—30 至圖 4—44 展示暴潮總水位統計資料。

圖 4—15 至圖 4—19 為各測站於各熱帶氣旋強度下預報之暴潮偏差水位，依警報類別所得之方均根誤差值。圖 4—15 至圖 4—19 依序展示 TS、TS(S)、TY、TY(VS)及綜合所有強度(All)之統計資料。各圖中橫軸為方均根誤差值，繪製範圍固定為 0 至 0.6 公尺以利於視覺化比較不同警報類別間各測站之變化情形。

圖 4—15 展示 TS 強度下，暴潮偏差於各測站預報之方均根誤差統計結果，各理想風場模式的暴潮偏差方均根誤差在各測站中落於 0.1 公尺至 0.25 公尺間，各模式在同一測站之方均根誤差差距不超過 0.04 公尺。海警中誤差小於 0.1 公尺之測站主要位於台灣北部、東部、西南部及南部地區，而陸警誤差小於 0.1 公尺之測站主要位於台灣北部。各測站於海警與陸警之誤差分配趨勢相似，但陸警中

的模式分散程度較海警顯著，如梧棲、麥寮、台西、東石、澎湖、金門等站。各測站於陸警期間預報誤差也普遍較海警期間大，海警之誤差最大不超過 0.2 公尺，陸警具有最大誤差之測站為梧棲及金門，約為 0.25 公尺。

圖 4—16 展示 TS(S)強度下，暴潮偏差於各測站預報之方均根誤差統計結果，海警中誤差小於 0.1 公尺之測站主要位於台灣東部、西南部及南部地區，而陸警誤差小於 0.1 公尺之測站主要位於台灣西南部。陸警中各測站誤差分散程度明顯大於海警，可在北部、西部及部分離島測站觀察到此現象，其中基隆、金門、馬祖等站，各模式之陸警預報結果彼此差距可達 0.1 至 0.15 公尺。海警與陸警中，大部分之測站表現以 CWB 為佳，其次為 W06。不同理想風場模式於台灣西南部所得之水位預報方均根誤差較為相近，無法看出明顯差異。

圖 4—17 展示 TY 強度下，暴潮偏差於各測站預報之方均根誤差統計結果，海警於該強度中，台灣西南部測站之誤差皆小於 0.1 公尺，且各模式表現皆相近，小於 0.02 公尺；陸警於該強度下，台灣東部及南部測站之各模式誤差分散程度小於 0.04 公尺，其他測站之各模式表現差距則皆為 0.06 公尺以上，且分散程度皆不小於海警預報統計誤差值，其中離島地區測站如澎湖、金門、馬祖等，模式間誤差可達 0.15 至 0.2 公尺。海警與陸警中，大部分之測站表現以 CWB 為佳，其次為 W06，其他理想風場模式如 J92、E11、H80 之誤差表現則彼此相似，方均根誤差分布明顯高於 CWB 及 W06。

圖 4—18 展示 TY(VS)強度下，暴潮偏差於各測站預報之方均根誤差統計結果，其中各理想風場於海警與陸警預報所得之方均根誤差普遍大於 0.1 公尺，且陸警資料於各測站之模式誤差分散程度普遍高於海警。海警中各測站所得之預報誤差皆不高於 0.3 公尺，而陸警資料中，部分離島測站如金門，模式預報誤差皆超過 0.3 公尺。大部分之測站表現最佳者以 CWB 為主，在北部、東部及西南部測站中，表現明顯優於其他理想風場模式。

圖 4—19 展示所有熱帶氣旋強度下，暴潮偏差於各測站預報之方均根誤差統計結果。其中各理想風場於海警預報資料中，誤差小於 0.1 公尺之測站集中於

台灣西南部與南部，皆誤差較小之測站普遍模式預報誤差分散程度亦較小，不超過 0.02 公尺。而各模式於陸警預報資料中所得之誤差皆高於 0.1 公尺，誤差分散程度介於 0.02 至 0.15 公尺之間。圖中可以看到，考量陸警與海警之差異，影響較大者主要集中於台灣西北部、西部及離島地區，且在陸警中，選擇何種理想風場模式將會顯著影響上述地區之颱風暴潮預報結果。CWB 在陸警預報中，各地測站表現明顯優於其他理想風場模式，誤差除離島地區如金門、馬祖高於 0.25 公尺外，其他地區皆不高於 0.2 公尺。

圖 4—20 至圖 4—24 為各測站於各熱帶氣旋強度下預報之暴潮偏差水位，依警報類別所得之偏差量值。圖 4—20 至圖 4—24 依序展示 TS、TS(S)、TY、TY(VS)及綜合所有強度(All)之統計資料。圖中橫軸為偏差量值，各圖繪製範圍固定為-0.2 至 0.2 公尺以利於視覺化比較不同警報類別間各測站之變化情形。黑色實線為偏差量值為 0 之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為高估或低估之情形。

圖 4—20 展示 TS 強度下，暴潮偏差於各測站預報之偏差量值統計結果，海警中各模式之偏差量值絕對值小於 0.05 公尺，而陸警之偏差量值介於-0.05 至 0.1 公尺間。海警中各模式在同一測站之偏差量值差距為 0.04 公尺以下，陸警中有部分測站如安平、澎湖、金門等之偏差量值差距可達 0.06 公尺。海警與陸警皆會有預報高估情形之測站主要位於台灣北部、東部、南部及離島地區；皆會有預報低估情形之測站主要位於西北部及西部地區。台灣西南部於海警期間有預報低估情形，於陸警中則會有預報高估的狀況。

圖 4—21 展示 TS(S)強度下，暴潮偏差於各測站預報之偏差量值統計結果，海警中淡水、金門、馬祖等站有明顯預報低估情形，其中各模式於金門與馬祖測站之偏差量值將近-0.2 公尺。陸警中除西北部測站外，大部分測站皆有顯著預報高估之情形，其中花蓮、台東、大武、金門等站之偏差量值高達 0.2 公尺。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，海警與陸警中，J92 為北部測站表現最佳之模式，CWB 為表現最佳模式之測站普遍落於台灣東北部及東部地區，

其他地區則各模式於不同警報類別中最佳表現者皆有所不同，無法明顯區分和者表現最佳，須留待後續分析。

圖 4—22 展示 TY 強度下，暴潮偏差於各測站預報之偏差量值統計結果。圖中各模式於海警與陸警所得之偏差量值皆有明顯分歧，依各測站不同，偏差量值介於 0.02 至 0.15 公尺之間。東北部、東部、西北部及部分離島地區測站，陸警中之偏差量值分歧範圍明顯大於海警偏差量值分歧範圍，其中差距最顯著之測站位於離島地區，海警之偏差量值範圍約為 0.04 公尺，而陸警範圍則約為 0.1 至 0.15 公尺。各模式於海警預報資料中略為高於觀測資料之測站位於東部、西部及南部地區，其他測站則視模式不同而有高估或低估表現；陸警預報中，各模式預報皆普遍高於觀測資料之測站主要位於北部、東部、西南部及南部地區，而普遍有預報低估情形之測站主要集中於西部及部分離島地區。各模式於海警及陸警預報中表現最佳之地區測站不一，如海警時 W06 於北部及東部地區有最佳表現，陸警期間於台灣西北部表現最佳；CWB 模式則於陸警期間於北部及東部地區表現最佳；J92 於海警期間則在台灣西南部之偏差量值為所有模式中最佳者，但在西北部測站預報有明顯低於其他模式預報水位之情形。

圖 4—23 展示 TY(VS)強度下，暴潮偏差於各測站預報之偏差量值統計結果，圖中各模式於海警與陸警所得之偏差量值皆有明顯分歧，依各測站不同，偏差量值介於 0.04 至 0.1 公尺之間。前述較弱之熱帶氣旋強度，偏差量值於各測站之分布範圍普遍為陸警大於海警，類似現象於 TY(VS)強度下亦可在北部、東部、西北部及南部測站觀察到。各理想風場模式預報水位北部、東部及南部測站時，在陸警與海警中皆有預報高估的情況，而在預報西部及離島測站時則皆有低估的情況，但高估/低估之範圍不超過 ± 0.12 公尺。各模式於海警及陸警預報中表現最佳之地區測站不一，無法歸納出顯著之區域特徵。

圖 4—24 展示所有熱帶氣旋強度下，暴潮偏差於各測站預報之偏差量值統計結果。各測站於海警與陸警期間各模式所得之偏差量值普遍集中於 ± 0.1 公尺間，各模式於海警中之偏差量則普遍落於 ± 0.05 公尺內，小於陸警之偏差量值。

各模式在陸警中普遍有預報高於實際水位的情形，好發於北部、東部及西南部測站，偏差量值可達 0.1 公尺，而台灣西北部、西部及部分離島地區則有預報低估的情形，約為 0.05 至 0.08 公尺。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，但可以看到 J92 在北部、西北部測站之預報水位通常低於其他理想風場模式，此特徵在海警與陸警預報中皆可觀察到。CWB 在陸警預報中，於台灣東北部及東部地區為表現最佳模式，而 W06 則在路徑預報中可在台灣西部得到優於其他模式之表現。

圖 4—25 至圖 4—30 為各測站於各熱帶氣旋強度下預報之暴潮偏差水位，依警報類別所得之相關係數。圖 4—25 至圖 4—30 依序展示 TS、TS(S)、TY、TY(VS)及綜合所有強度(All)之統計資料。圖中橫軸為相關係數，各圖繪製範圍固定為-20%至 100%以利於視覺化比較不同強度間各測站之變化情形。一般普遍認為，相關係數 30%以下為低相關，30%至 70%為中等相關，70%以上為高度相關。圖中黑色實線為相關係數 0%之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為正相關或負相關之情形。藍線為 30%基準線，紅線為 70%基準線，分別協助判別低、中、高度相關情形。

圖 4—25 展示 TS 強度下，暴潮偏差於各測站預報之相關係數統計結果。各模式於海警預報中，於各測站所得之預報結果普遍為低度相關，僅部分模式於特定測站表現可達中度相關，如 CWB 及 W06 於東南部測站有中度相關之預報結果，所有模式皆可於台灣西南部測站如安平及永安等站達到中度相關；各模式於陸警預報中，普遍可在台灣東部、西南部及南部地區達到中度相關。各模式在同一測站之相關係數差距範圍在海警預報中約為 10%至 20%，在陸警預報中最大可達 30%。視覺化展示中顯示各測站表現最佳之理想風場模式不一，且在警報分類中並無一致性。海警預報中，CWB 模式在東部地區測站表現最佳，於陸警中則在東北部及西部地區表現最佳。

圖 4—26 展示 TS(S)強度下，暴潮偏差於各測站預報之相關係數統計結果。各理想風場模式在海警中對各測站的暴潮偏差相關係數落於-10%至 70%間，在

陸警中則有-20%至 75%，顯示陸警預報資料與觀測的相關係數分布範圍較海警廣泛，各模式在同一測站之相關係數差距範圍在陸警中落於 10%至 50%，於海警中則不超過 30%。於海警及陸警中，各模式預報結果皆達到中度相關之測站為福隆、成功、台東、大武、綠島、蟳廣嘴、南灣等站。各模式預報結果皆屬低度相關之測站為新竹、後龍、梧棲、麥寮、將軍、澎湖、金門等站。其他測站則依據警報種類及選用模式之差異，相關係數可能為中度相關或低度相關。視覺化展示中，W06 及 CWB 在海警預報中於西部、西南部地區測站有表現最佳之相關係數值，在陸警預報中則明顯以 CWB 於各地測站中為表現最佳者。

圖 4—27 展示 TY 強度下，暴潮偏差於各測站預報之相關係數統計結果。各理想風場模式在海警中對各測站的暴潮偏差相關係數落於-20%至 55%間，在陸警中則有-20%至 75%，顯示陸警預報資料與觀測的相關係數分布範圍較海警廣泛。各模式在同一測站之相關係數差距範圍在陸警及海警中皆可達到 10%至 40%的差距，但相關係數在同一測站的落差範圍變化於兩種警報中無法觀察到明顯規律，例如各模式於海警預報中，在東南部測站表現明顯較陸警預報分歧，而在陸警預報中，各模式於西南部測站表現明顯較海警預報分歧。海警預報中，各模式於大部分測站表現皆為低度相關至中度相關，而陸警預報中，CWB 與 W06 在成功與台東站之表現可達高度相關。在海警預報中，東部及南部地區測站如花蓮、石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、蟳廣嘴、南灣站等受理想風場模式的選用差異，相關係數可能為中度相關或低度相關。在陸警預報中，有類似情況的測站有台西、東石、安平、永安、高雄、東港、澎湖等站。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不論在海警預報或陸警預報中，表現最佳者多為 CWB，而 W06 明顯在該強度下於各測站之相關係數表現次佳，其他模式則表現相當。

圖 4—28 展示 TY(VS)強度下，暴潮偏差於各測站預報之相關係數統計結果。各理想風場模式在海警中對各測站的暴潮偏差相關係數落於-20%至 65%間，在陸警中則有-25%至 80%，顯示陸警預報資料與觀測的相關係數分布範圍較海警廣泛。各模式在同一測站之相關係數差距範圍在陸警及海警中皆可達到 10%至

80%的差距，顯示選用不同理想風場模式進行預報時會產生有顯著差異的結果。相關係數在同一測站的落差範圍變化於兩種警報中無法觀察到明顯規律，例如各模式於海警預報中，在西北部、西南部測站表現明顯較陸警預報分歧，而在陸警預報中，各模式於東部及南部測站表現明顯較海警預報分歧。海警預報中，各模式於大部分測站表現皆為低度相關至中度相關，而陸警預報中，CWB 與 W06 在東部及南部測站之表現可達高度相關。所有理想風場模式在海警及陸警預報中，各測站暴潮偏差相關性皆達到中度相關以上者，有龍洞、基隆、福隆、花蓮、石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、石門、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等站，數量較其他熱帶氣旋強度分析結果為多，且在陸警中僅有部分模式在西部地區表現為低度相關，如麥寮、台西、東石、將軍、澎湖、金門等站。在海警與陸警預報中，西南部地區測站如麥寮、台西、東石、將軍、安平、澎湖站等受理想風場模式的選用差異，相關係數可能為中度相關或低度相關。其中安平測站之比較結果最為懸殊，依據選用模式的不同，暴潮偏差與觀測資料之相關係數可落於-10%至 70%以上，即低度相關至高度相關。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不論在海警預報或陸警預報中，表現最佳者多為 CWB，而 W06 明顯在該強度下於各測站之相關係數表現次佳，其他模式則表現相當。

圖 4—29 展示所有熱帶氣旋強度下，暴潮偏差於各測站預報之相關係數統計結果。各理想風場模式在海警中對各測站的暴潮偏差相關係數落於-5%至 50%間，在陸警中則有-15%至 75%，顯示陸警預報資料與觀測的相關係數分布範圍較海警廣泛。各模式在同一測站之相關係數差距範圍海警中最大可達到 40%的差距，於陸警中可達 50%以上，顯示選用不同理想風場模式進行預報時會產生有顯著差異的結果。海警及海警預報中，各模式於大部分測站表現皆為低度相關至中度相關，所有理想風場模式在陸警預報中，各測站暴潮偏差相關性皆達到中度相關以上者，有花蓮、石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、石門、安平、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等站，但在海警預報中，大部分測站皆受理想風場模式的選用差異，相關係數可能為中度相關或低度相關，所有模式在

海警預報中皆為低度相關表現之測站為頭城、蘇澳、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、將軍、金門等站。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不論在海警預報或陸警預報中，表現最佳者多為 CWB，而 W06 明顯在該強度下於各測站之相關係數表現次佳，其他模式則表現相當。

圖 4—30 至圖 4—34 為各測站於各熱帶氣旋強度下預報之暴潮總水位，依警報類別所得之方均根誤差值。圖 4—30 至圖 4—34 依序展示 TS、TS(S)、TY、TY(VS)及綜合所有強度(All)之統計資料。各圖中橫軸為方均根誤差值，繪製範圍固定為 0 至 0.7 公尺以利於視覺化比較不同警報類別間各測站之變化情形。

圖 4—30 展示 TS 強度下，暴潮總水位於各測站預報之方均根誤差統計結果。各理想風場模式於各測站之方均根誤差分布，在海警預報中落於 0.06 公尺至 0.5 公尺，略低於在陸警預報中的 0.08 至 0.5 公尺，且各理想風場模式於各測站之表現彼此差距普遍小於 0.02 公尺，最大不超過 0.04 公尺，因此判別何種理想風場模式在整體測站表現中為最佳者相對困難。於海警與陸警中，北部、東部、西南部及南部測站之誤差皆相對較小，為 0.2 公尺以下；西北部、西部及離島地區誤差為 0.2 公尺以上，其中後龍與梧棲站的平均暴潮總水位誤差大於 0.4 公尺。

圖 4—31 展示 TS(S)強度下，暴潮總水位於各測站預報之方均根誤差統計結果。海警預報中各模式於各測站之方均根誤差分布相對收斂，各模式差距為 0.04 公尺以內，因此較不易看出何種模式在該強度之熱帶氣旋中表現最佳；陸警預報中有部分測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、金門、馬祖等地，各模式間差距為 0.04 公尺以上，顯示各模式於陸警預報中所得之結果較海警分歧，而分歧較大之測站主要以 CWB 有最佳的表現，次佳者為 W06。

圖 4—32 展示 TY 強度下，暴潮總水位於各測站預報之方均根誤差統計結果。海警於該強度中，台灣西南部測站之誤差皆小於 0.1 公尺，且各模式表現皆相近，小於 0.02 公尺，因此較不易看出海警預報中，何種模式在該強度之熱帶氣旋中表現最佳，但可以看出 CWB 模式在北部測站之方均根誤差為最小。其他地

區如北部、西北部及離島地區，各模式之預報結果較為分歧，最大差距主要發生於北部測站，可達 0.1 公尺；陸警於該強度下，台灣東部及南部測站之各模式誤差分散程度小於 0.06 公尺，其他測站之各模式表現差距則皆為 0.06 至 0.15 公尺以上，且分散程度皆不小於海警預報統計誤差值，其中離島地區測站如澎湖、金門、馬祖等，模式間誤差可達 0.15 公尺，而分歧較大之測站主要以 CWB 有最佳的表現，次佳者為 W06。

圖 4—33 展示 TY(VS)強度下，暴潮總水位於各測站預報之方均根誤差統計結果，其中各理想風場於海警與陸警預報所得之方均根誤差普遍大於 0.1 公尺，各測站所得之預報誤差普遍為 0.2 公尺以下，僅西部、西北部及離島測站之方均根誤差超過 0.3 公尺，且陸警資料於各測站之模式誤差分散程度普遍高於海警；陸警資料中，部分測站如後龍、梧棲、金門站等，部分模式預報誤差可超過 0.5 公尺。大部分之測站表現最佳者以 CWB 為主，尤其在北部、東部及西南部測站中，表現明顯優於其他理想風場模式。

圖 4—34 展示所有熱帶氣旋強度下，暴潮總水位於各測站預報之方均根誤差統計結果。其中各理想風場於海警預報資料中，各理想風場模式所得之結果落於 0.1 至 0.55 公尺間，而陸警預報資料之誤差則落於 0.15 至 0.6 公尺之間，顯示整體陸警預報誤差略大於海警預報誤差。在陸警與海警中，大部分之測站表現以 CWB 模式為佳，普遍次佳者為 W06，但各模式在同一測站之方均根誤差差距落於 0.01 至 0.1 公尺。考量陸警與海警之差異，影響較大者主要集中於台灣西北部、西部及離島地區，且在陸警中，選擇何種理想風場模式將會顯著影響上述地區之颱風暴潮預報結果，部分測站如龍洞、金門、馬祖等站，用各模式預報之誤差可分歧至 0.15 公尺。

圖 4—35 至圖 4—39 為各測站於各熱帶氣旋強度下預報之暴潮總水位，依警報類別所得之偏差量值。圖 4—35 至圖 4—39 依序展示 TS、TS(S)、TY、TY(VS)及綜合所有強度(All)之統計資料。圖中橫軸為偏差量值，各圖繪製範圍固定為-0.3 至 0.3 公尺以利於視覺化比較不同警報類別間各測站之變化情形。黑色

實線為偏差量值為 0 之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為高估或低估情形。

圖 4—35 展示 TS 強度下，暴潮總水位於各測站預報之偏差量值統計結果。海警中各模式之偏差量值絕對值小於 0.05 公尺，而陸警之偏差量值介於-0.05 至 0.1 公尺間，普遍大於海警預報所得值。海警中各模式在同一測站之偏差量值差距為 0.04 公尺以下，陸警中有部分測站如安平、澎湖、金門等之偏差量值差距可達 0.06 公尺。海警與陸警皆會有預報高估情形之測站主要位於台灣北部、東部、南部及離島地區，海警預報高估值通常不超過 0.05 公尺，陸警預報高估則不超過 0.1 公尺；海警與陸警皆會有預報低估情形之測站主要位於西北部及西部地區，低估不低於 0.05 公尺。台灣西南部於海警期間有預報低估情形，於陸警中則會有預報高估的狀況。受限於各模式於海警預報中偏差量值差距較小，因此視覺產品中無法明顯觀察出何種理想模式在海警預報中表現為最佳。

圖 4—36 展示 TS(S)強度下，暴潮總水位於各測站預報之偏差量值統計結果。海警中大部分測站使用各理想風場模式預報水位時皆有高估之情形，淡水、金門、馬祖等站有明顯預報低估情形，其中各模式於金門與馬祖測站之偏差量值將近-0.2 公尺。陸警中除西北部測站外，大部分測站皆有顯著預報高估之情形，其中花蓮、台東、大武、金門等站之部分模式偏差量值超過 0.15 公尺。海警預報中，各模式表現相近，彼此差距不超過 0.04 公尺；陸警預報中各模式表現分歧之測站主要集中於北部、西北部及部分離島地區，且偏差量值分歧的測站中，可以觀察到 J92 模式之表現明顯偏離其他理想風場模式所得之預報結果，有低估情形。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，海警與陸警中，J92 為北部測站表現最佳之模式，CWB 為表現最佳模式之測站普遍落於台灣東北部及東部地區，其他地區則各模式於不同警報類別中最佳表現者皆有所不同，無法明顯區分和者表現最佳，須留待後續分析。

圖 4—37 展示 TY 強度下，暴潮總水位於各測站預報之偏差量值統計結果。圖中各模式於海警與陸警所得之偏差量值皆有明顯分歧，依各測站不同，海警預報之偏差量值介於 0.02 至 0.12 公尺之間，陸警預報之偏差量值介於 0.02 至 0.15

公尺之間。其中各模式於北部、西南部及南部測站之偏差量分歧程度，海警預報期間大於陸警預報期間，於東部、西北部及部分離島測站，陸警期間的偏差量值大於海警期間。各模式於海警預報資料中略為高於觀測資料之測站主要位於西部及南部地區，其他測站則視模式不同而有高估或低估表現；陸警預報中，各模式預報皆普遍高於觀測資料之測站主要位於北部、東部、西南部及南部地區，而普遍有預報低估情形之測站主要集中於西部及部分離島地區。各模式於海警及陸警預報中表現最佳之地區測站不一，如海警時 J92 在台灣西南部及南部之偏差量值為所有模式中最佳者，而 CWB 模式則於陸警期間於北部及東部地區表現最佳，W06 於陸警期間於台灣西北部表現最佳。

圖 4—38 展示 TY(VS)強度下，暴潮總水位於各測站預報之偏差量值統計結果。圖中各模式於海警與陸警所得之偏差量值皆有明顯分歧，依各測站不同，偏差量值介於 0.04 至 0.1 公尺之間。前述較弱之熱帶氣旋強度，偏差量值於各測站之分布範圍普遍為陸警大於海警，類似現象於 TY(VS)強度下亦可在北部、東部、西北部及南部測站觀察到。各理想風場模式預報水位北部、東部及南部測站時，在陸警與海警中皆有預報高估的情況，而在預報西部及離島測站時則皆有低估的情況，但低估之範圍不超過-0.14 公尺，高估範圍最大不超過 0.16 公尺。各模式於海警及陸警預報中表現最佳之地區測站不一，無法歸納出顯著之區域特徵。

圖 4—39 展示所有熱帶氣旋強度下，暴潮總水位於各測站預報之偏差量值統計結果。各測站於海警與陸警期間各模式所得之偏差量值普遍集中於±0.12 公尺間，各模式於海警中之偏差量則普遍落於±0.05 公尺內，小於陸警之偏差量值分歧範圍。各模式在海警預報中在各測站依據選用模式的不同，會有高估/低估水位的情形，於東部測站及南部測站高估預報水位之平均偏差量小於 0.04 公尺；各模式於陸警預報中普遍有預報高於實際水位的情形，好發於北部、東部及西南部測站，偏差量值可達 0.12 公尺，而台灣西北部、西部及部分離島地區則有預報低估的情形，約為 0.05 至 0.08 公尺。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，但可以看到 J92 在北部、西北部測站之預報水位通常低於其他理想風

場模式，此特徵在海警與陸警預報中皆可觀察到。CWB 在陸警預報中，於台灣東北部及東部地區為表現最佳模式，而 W06 則在陸警預報中可於台灣西部得到優於其他模式之表現。

圖 4—40 至圖 4—44 為各測站於各熱帶氣旋強度下預報之暴潮偏差總水位，依警報類別所得之相關係數。圖 4—40 至圖 4—44 依序展示 TS、TS(S)、TY、TY(VS)及綜合所有強度(All)之統計資料。圖中橫軸為相關係數，各圖繪製範圍固定為 60%至 100%以利於視覺化比較不同強度間各測站之變化情形。一般普遍認為，相關係數為 70%以上時便屬高度相關。圖中紅線為 70%基準線，協助判別資料之相關情形。

圖 4—40 展示 TS 強度下，暴潮偏差於各測站預報之相關係數統計結果。

各模式於海警與陸警預報中，各理想風場模式對各測站的暴潮總水位相關係數落於 90%以上，屬於高度相關，各模式在同一測站之相關係數差距範圍在海警預報中小於 5%，多數測站小於 2%，因此不易自視覺化展示中辨別表現最佳之理想風場模式。海警預報中，各模式於西部及西南部部分測站如梧棲、將軍、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等站之相關係數介於 90%至 95%間，其他測站則皆為 95%以上；陸警預報中，除上述測站外，福隆、大武、永安測站有部分模式之相關係數結果介於 90%至 95%間，其他測站則皆為 95%以上。

圖 4—41 展示 TS(S)強度下，暴潮總水位於各測站預報之相關係數統計結果。

各理想風場模式於海警預報中，對各測站的暴潮總水位相關係數皆為 90%以上，於陸警中則除了福隆站有部分模式相關係數介於 80%至 85%外，對各測站的暴潮總水位相關係數皆為 90%以上，屬於高度相關。視覺化展示中，各模式在同一測站之相關係數差距範圍在海警預報中小於 5%，多數測站小於 2%，因此不易自視覺化展示中辨別表現最佳之理想風場模式。福隆站在海警及陸警預報中皆有最大的相關係數分歧，於海警中約為 5%，而在陸警中約為 10%，顯示選用不同之理想風場模式對該測站之預報表現有顯著影響。陸警預報中，各測站表現最佳之理想風場模式多為 CWB，次佳者多為 W06。

圖 4—42 展示 TY 強度下，暴潮總水位於各測站預報之相關係數統計結果。

海警預報中，各理想風場模式對各測站的暴潮總水位相關係數皆為 80%以上；陸警預報中，除了部分模式於基隆、福隆測站之相關係數介於 70%至 80%間，其他測站之各模式預報相關係數皆為 80%以上，屬於高度相關。陸警預報資料與觀測的相關係數分布範圍較海警廣泛，以北部測站為例，相關係數差距範圍在陸警中皆達到 10%至 20%的差距，相同測站在海警預報中則約為 15%內。其他測站於海警預報中各模式之預報相關係數差距為 5%以內，而在陸警預報中，西北部、西南部及部分離島測站各模式之相關係數差距可達 10%，顯示選用不同之理想風場模式對陸警預報之影響較海警預報大。各測站表現最佳之理想風場模式於海警與陸警預報中多為 CWB，次佳者多為 W06。其他模式則表現相當。

圖 4—43 展示 TY(VS)強度下，暴潮總水位於各測站預報之相關係數統計結果。各理想風場模式在海警預報及陸警預報中對各測站的暴潮偏差相關係數落於 80%至 100%間，皆屬高度相關。各模式在同一測站之相關係數差距範圍在陸警及海警中皆可達到 5%至 15%的差距，且陸警預報所得之各模式相關係數在同一測站的落差範圍變化普遍大於海警預報，顯示選用不同理想風場模式進行預報時會產生有顯著差異的結果。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不論在海警預報或陸警預報中，表現最佳者多為 CWB，而 W06 明顯在該強度下於各測站之相關係數表現次佳，其他模式則表現相當。

圖 4—44 展示所有熱帶氣旋強度下，暴潮總水位於各測站預報之相關係數統計結果。海警與陸警預報中，各理想風場模式對各測站的暴潮總水位之相關係數落於 80%以上，皆屬於高度相關。各模式在同一測站之相關係數差距範圍，除福隆站之陸警預報約為 15%外，其他測站之差距範圍最大不超過 10%。海警與陸警預報中，大部分風場模式於各測站中所得之相關係數皆為 90%以上，僅有部分北部測站如基隆、福隆等站，E11 與 J92 於海警之相關係數落於 85%至 90%，於陸警預報中則為 80%至 85%。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式為 CWB，W06 為次佳。

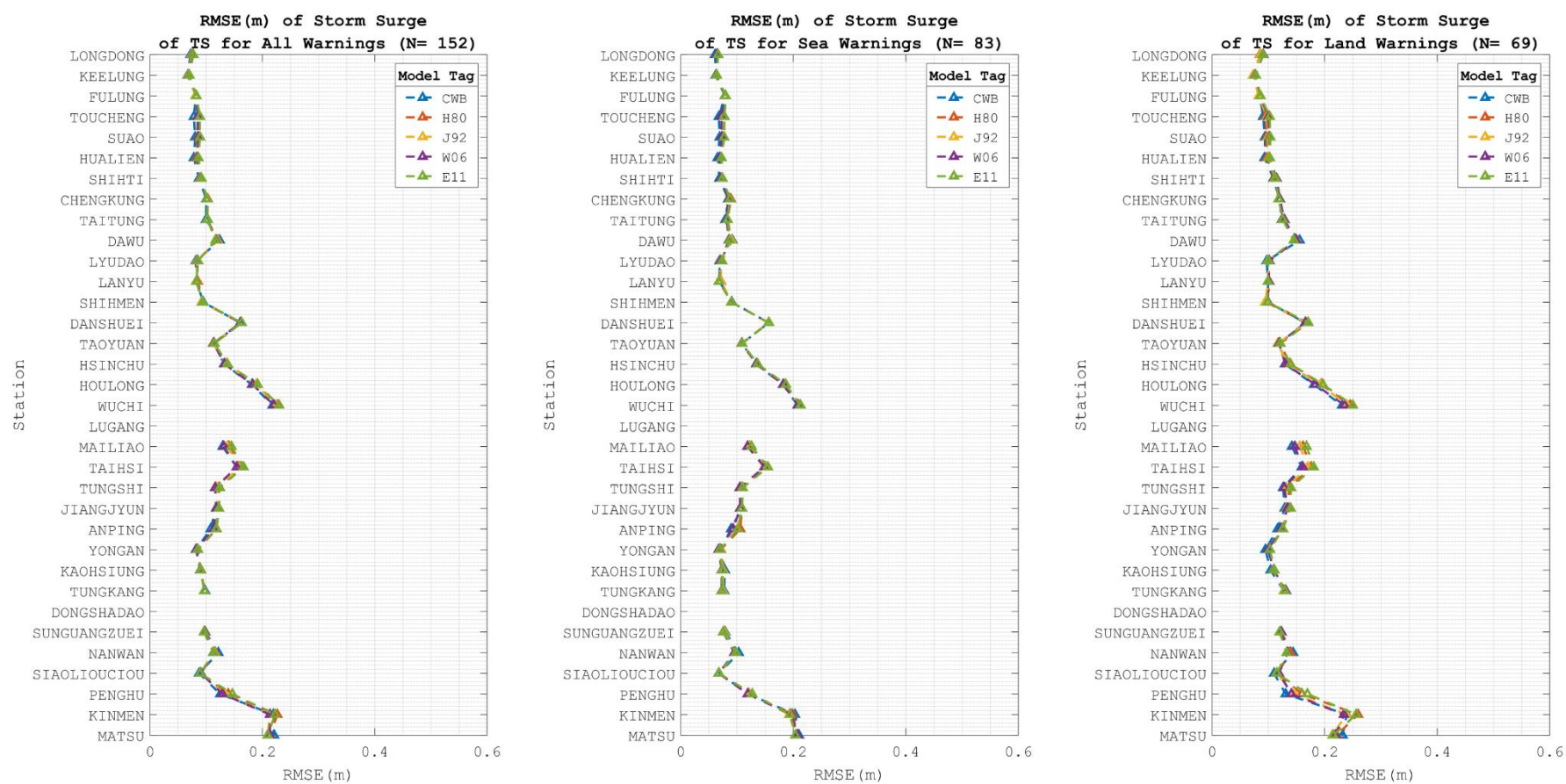


圖 4—15 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之方均根誤差值

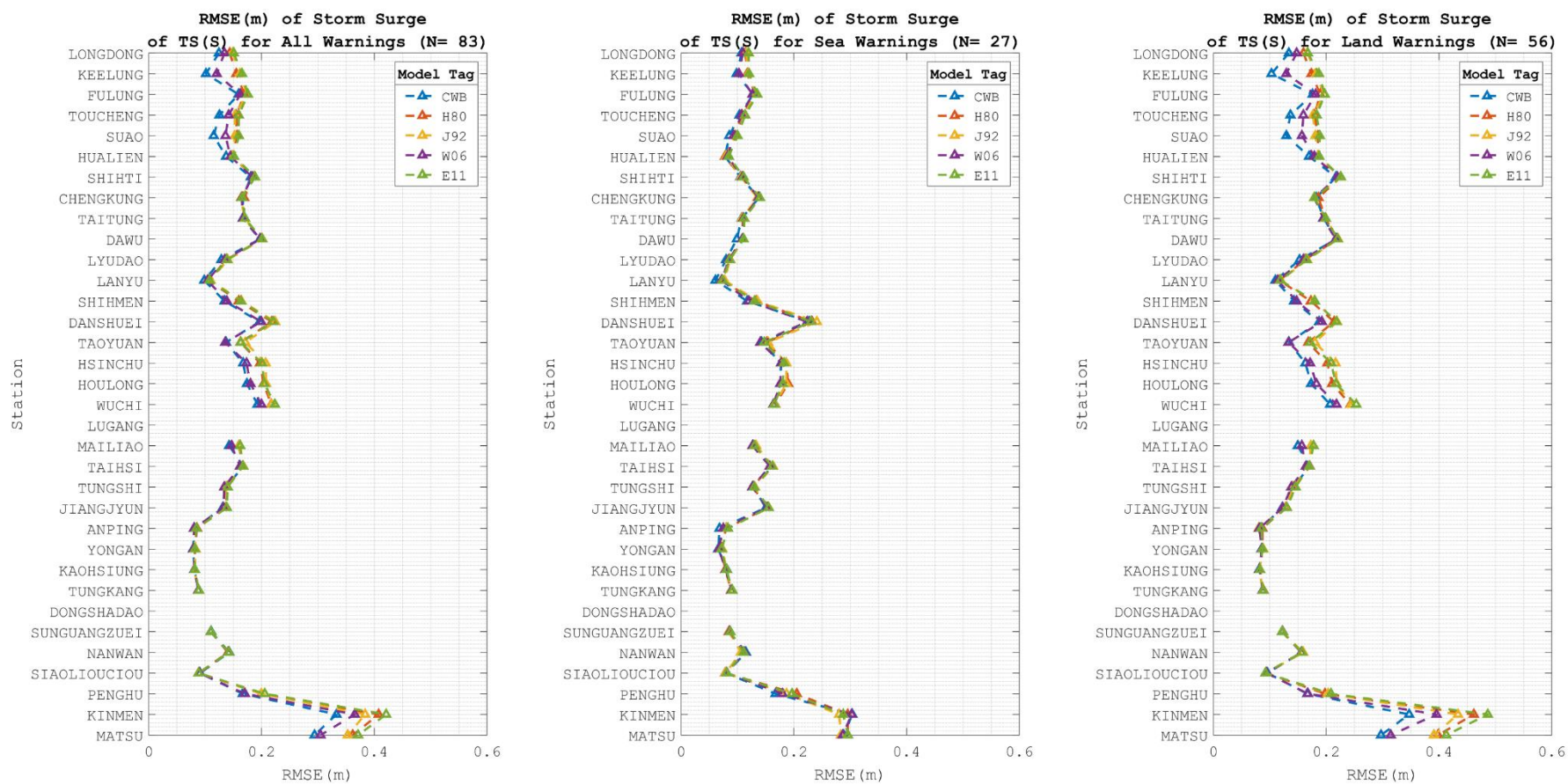


圖 4—16 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之方均根誤差值

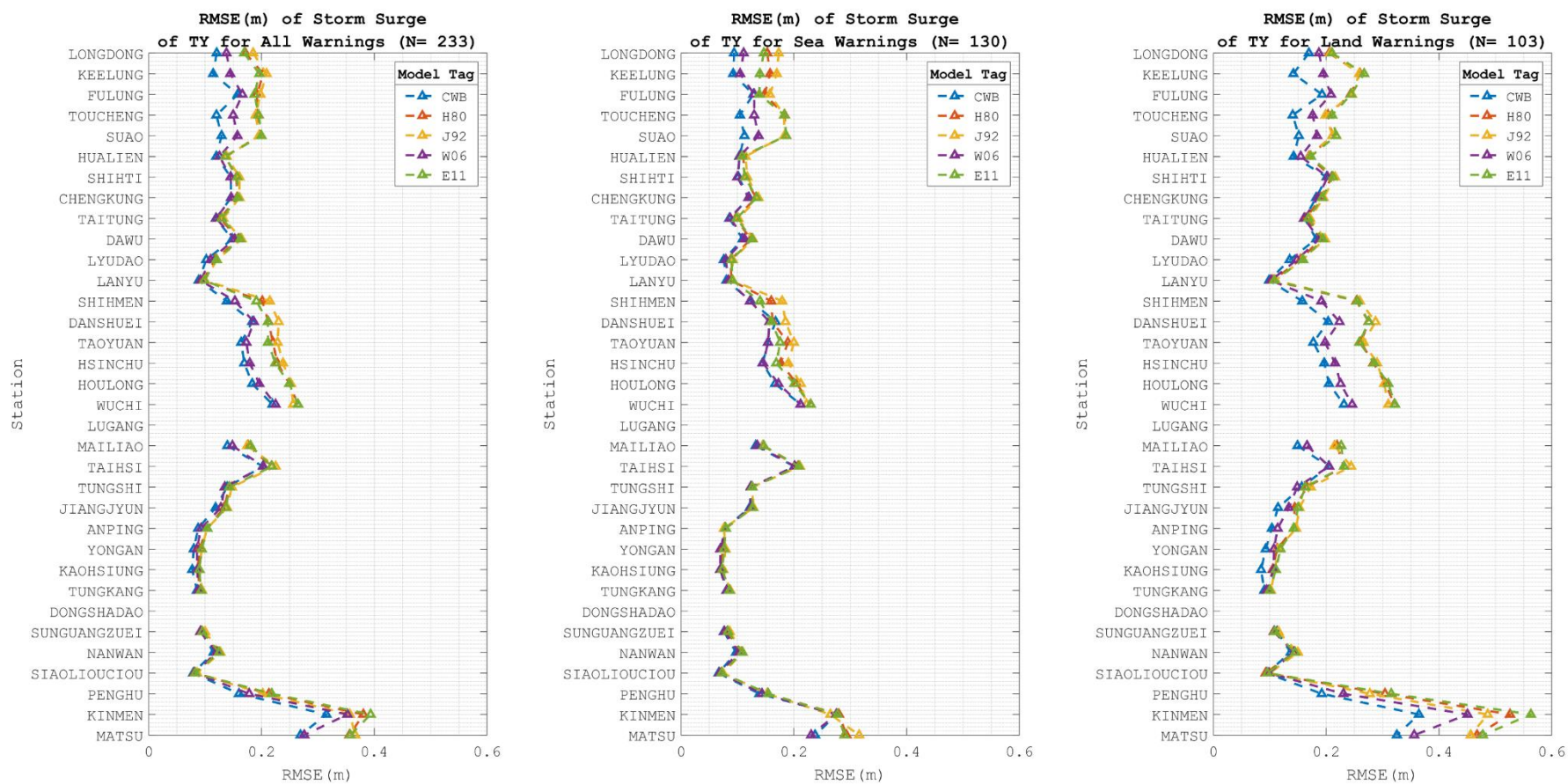


圖 4—17 颱風 TY 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之方均根誤差值

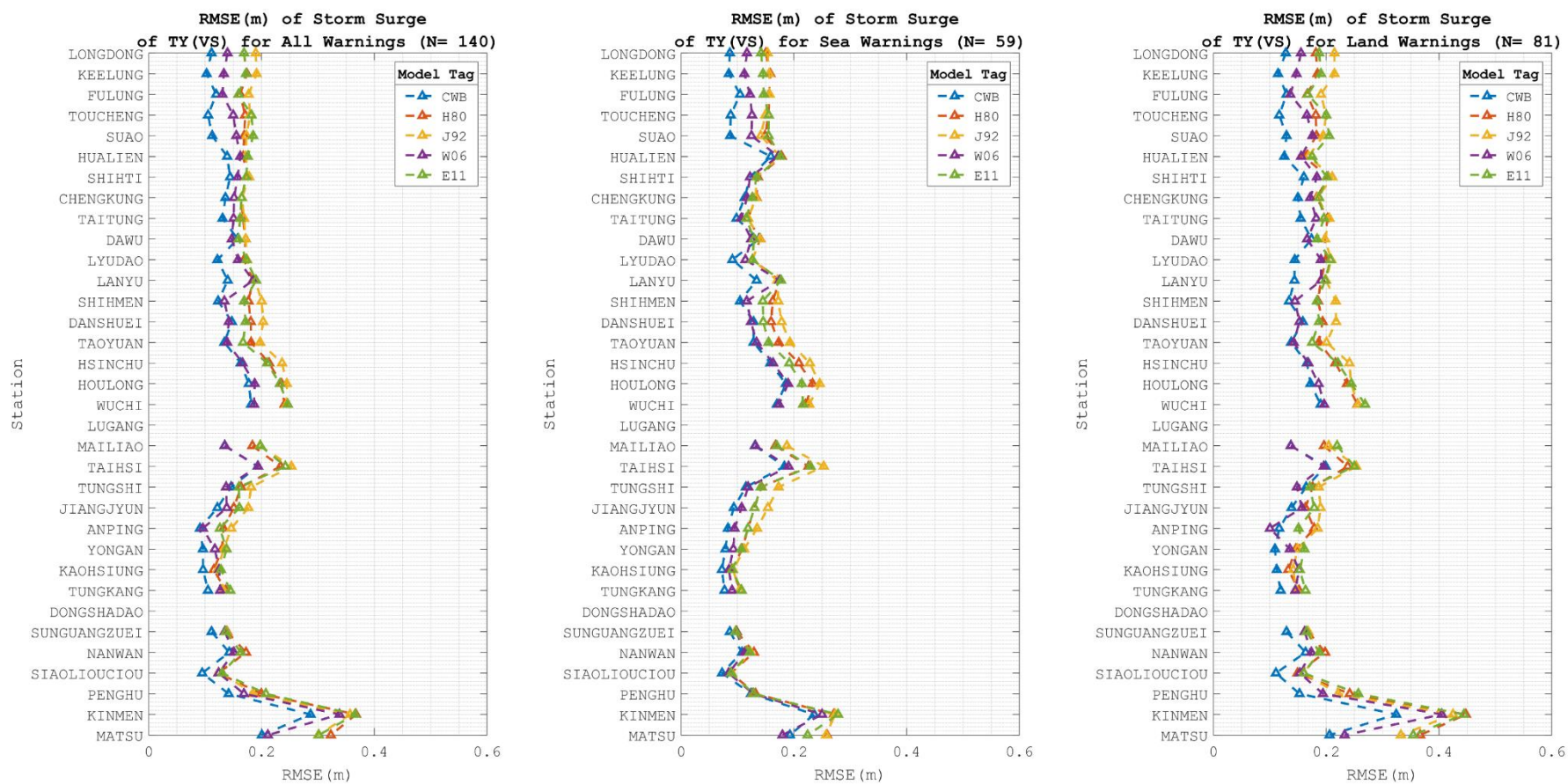


圖 4—18 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之方均根誤差值

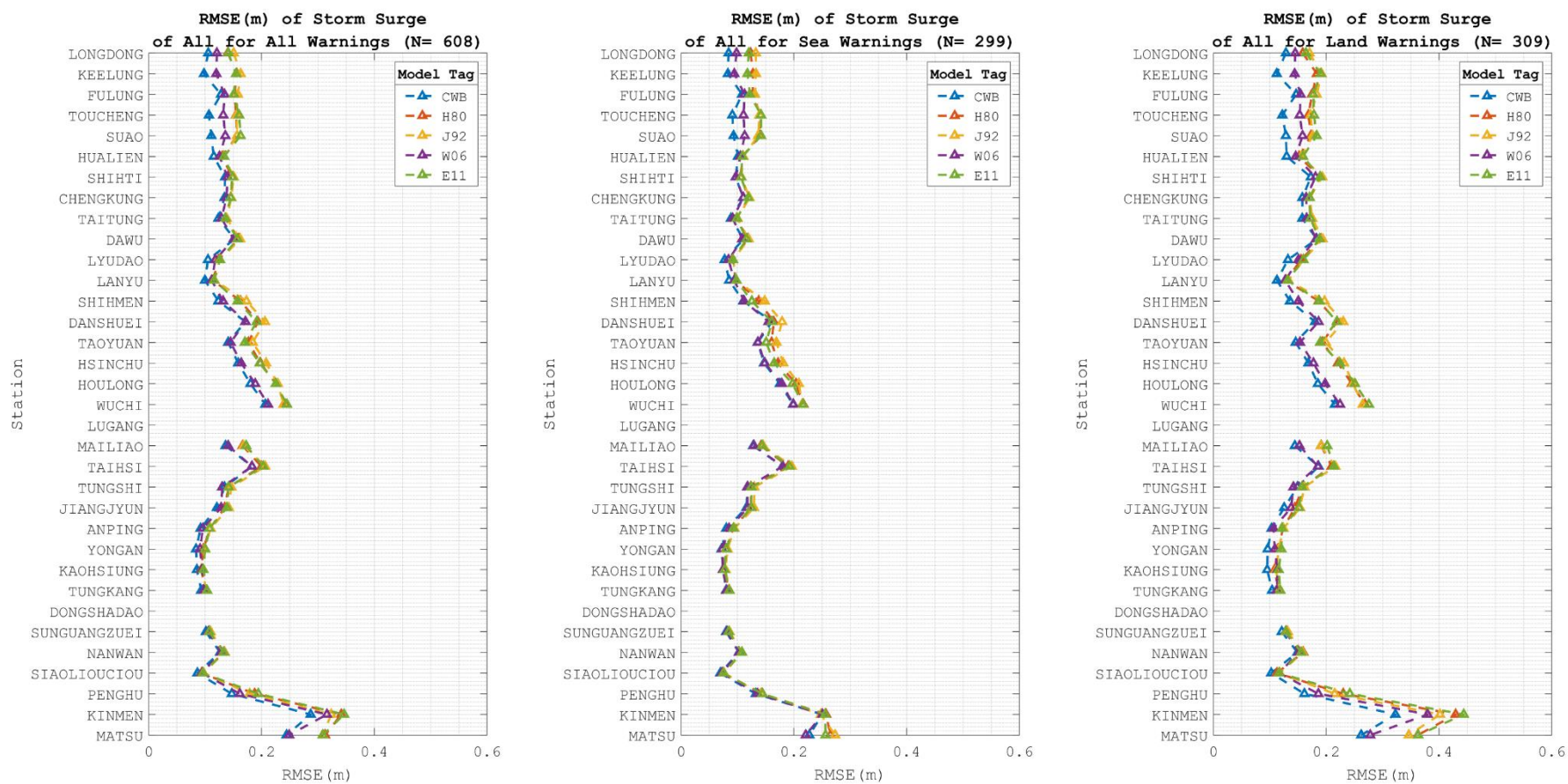


圖 4—19 所有颱風強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之方均根誤差值

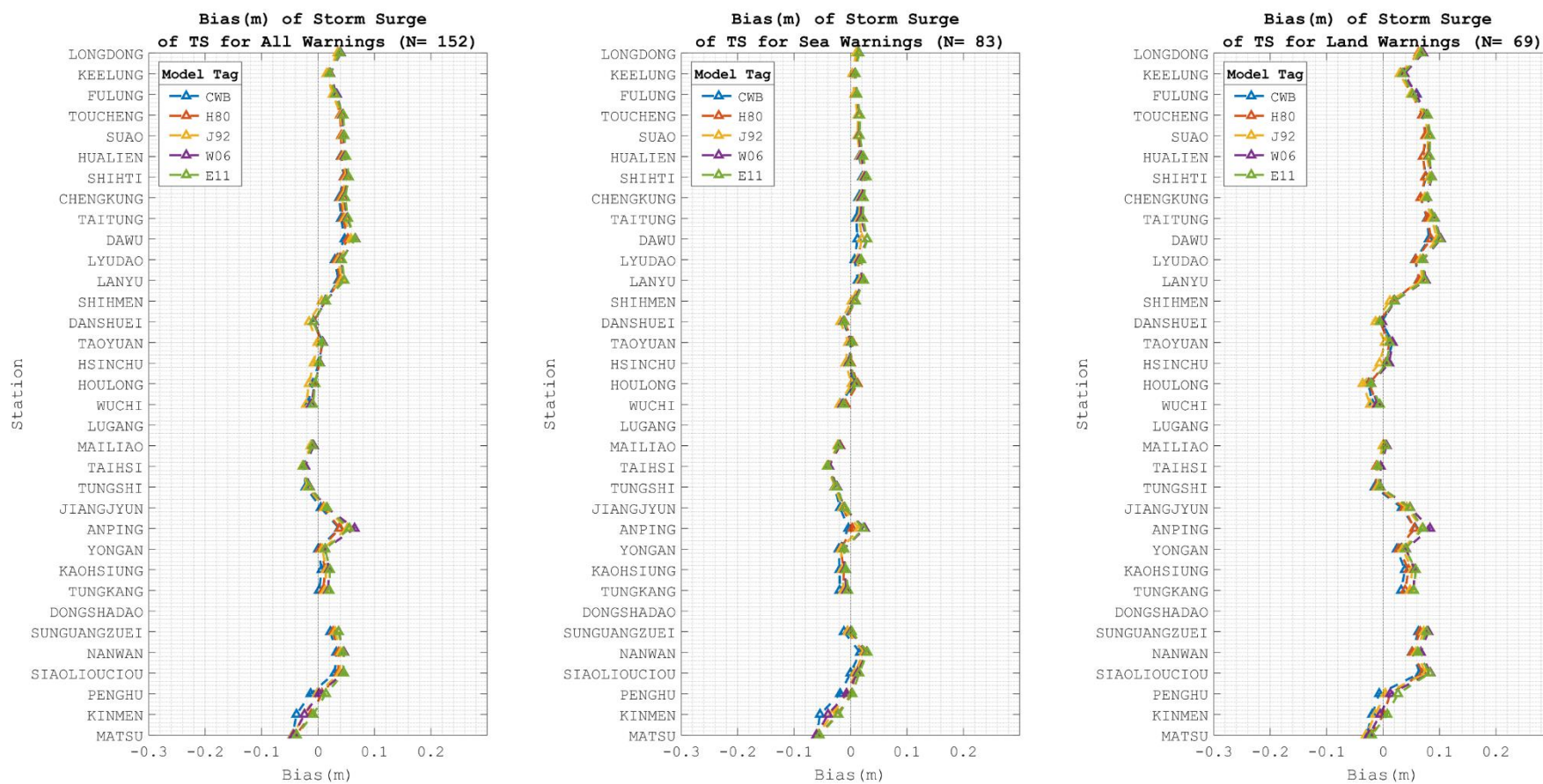


圖 4—20 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之偏差量值

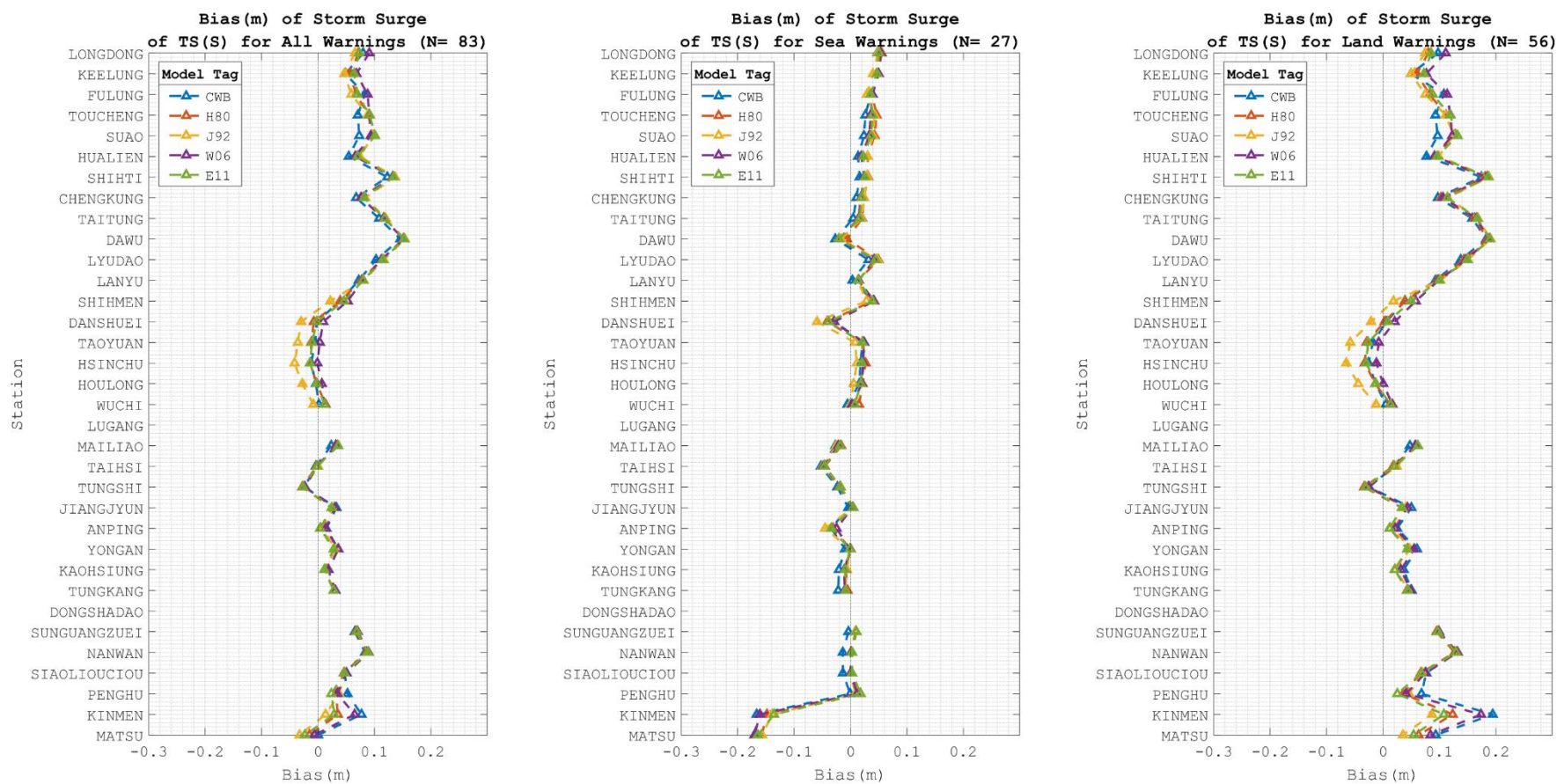


圖 4—21 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之偏差量值

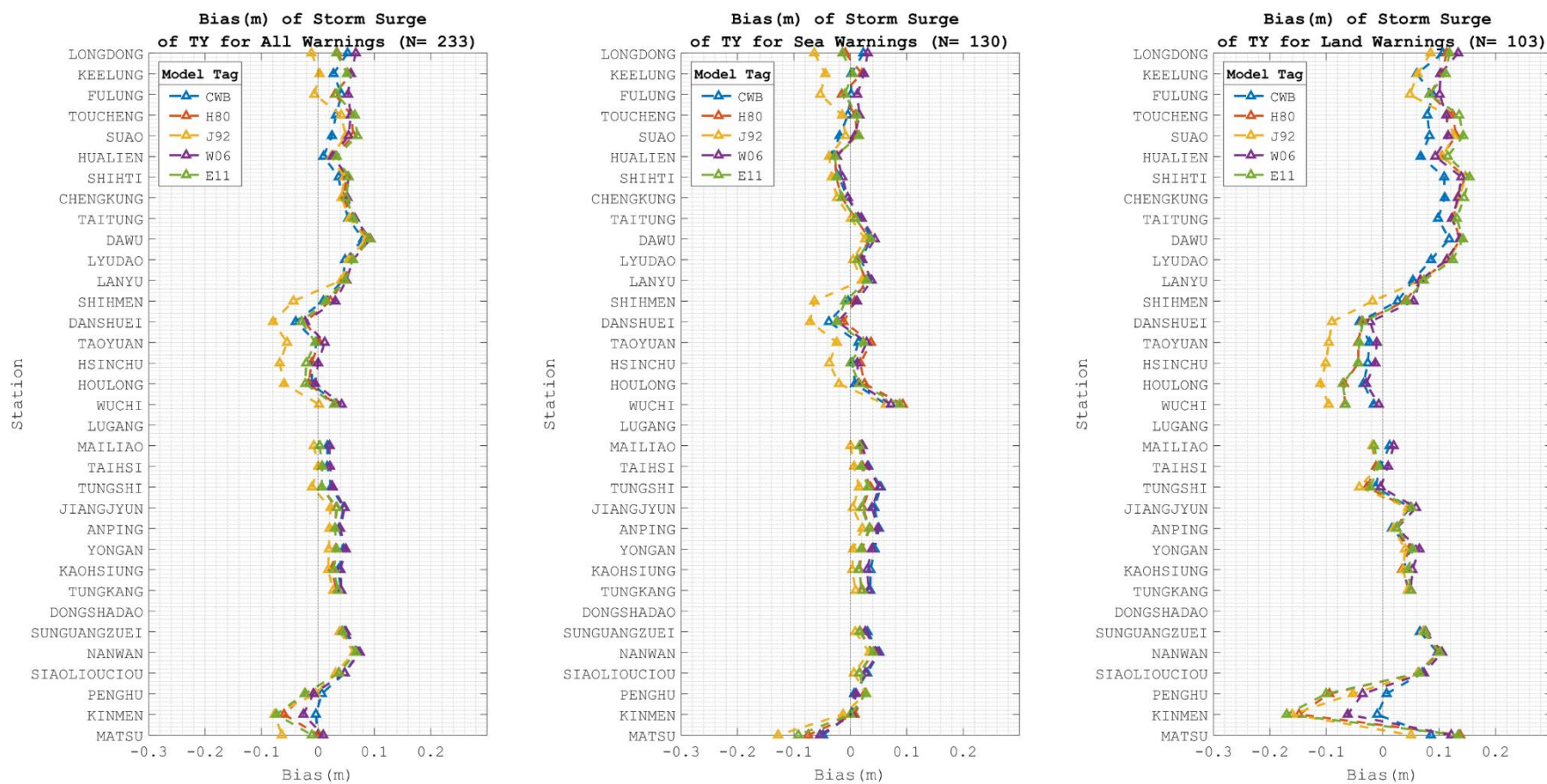


圖 4—22 颱風 TY 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之偏差量值

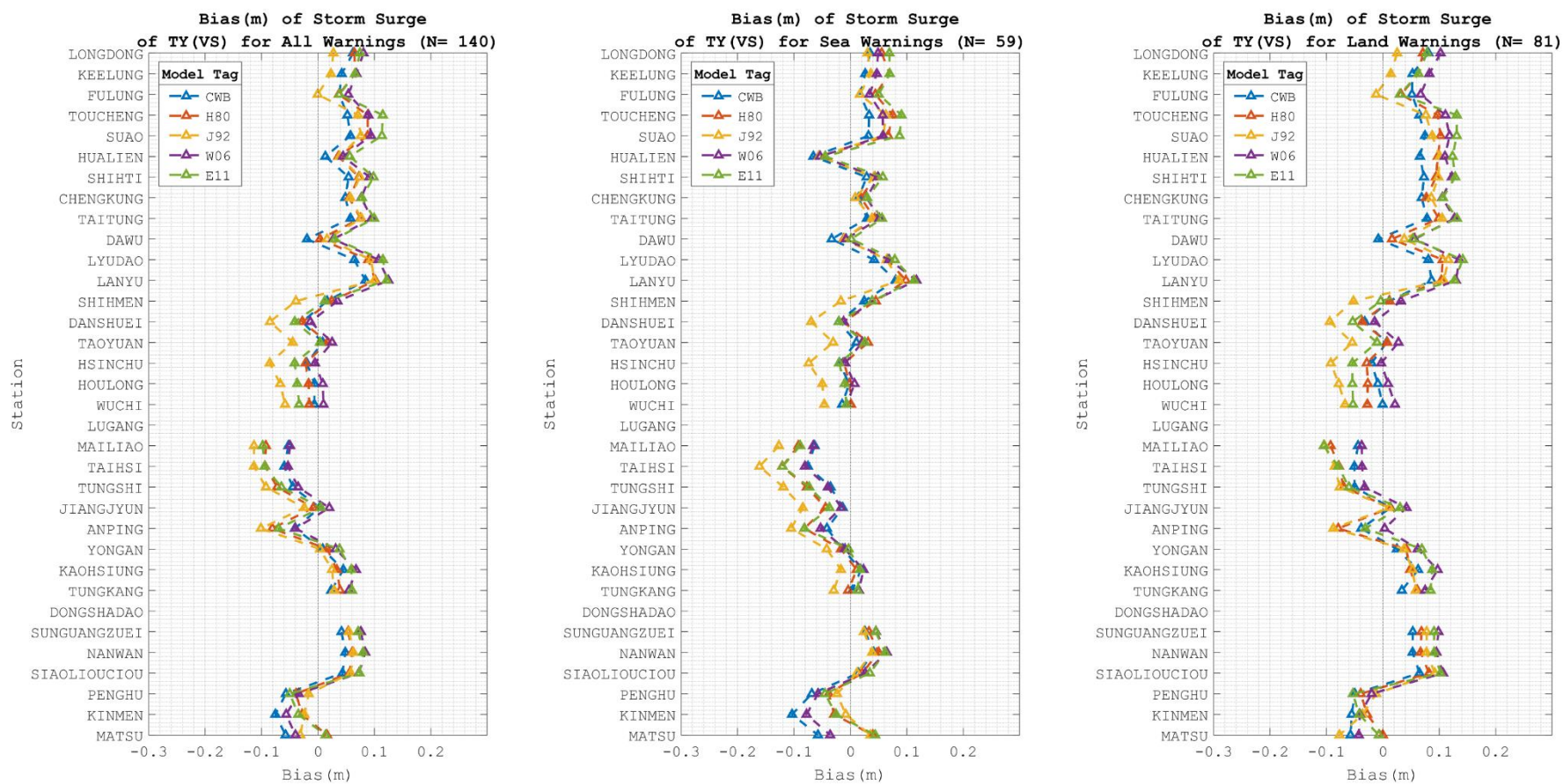


圖 4—23 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之偏差量值

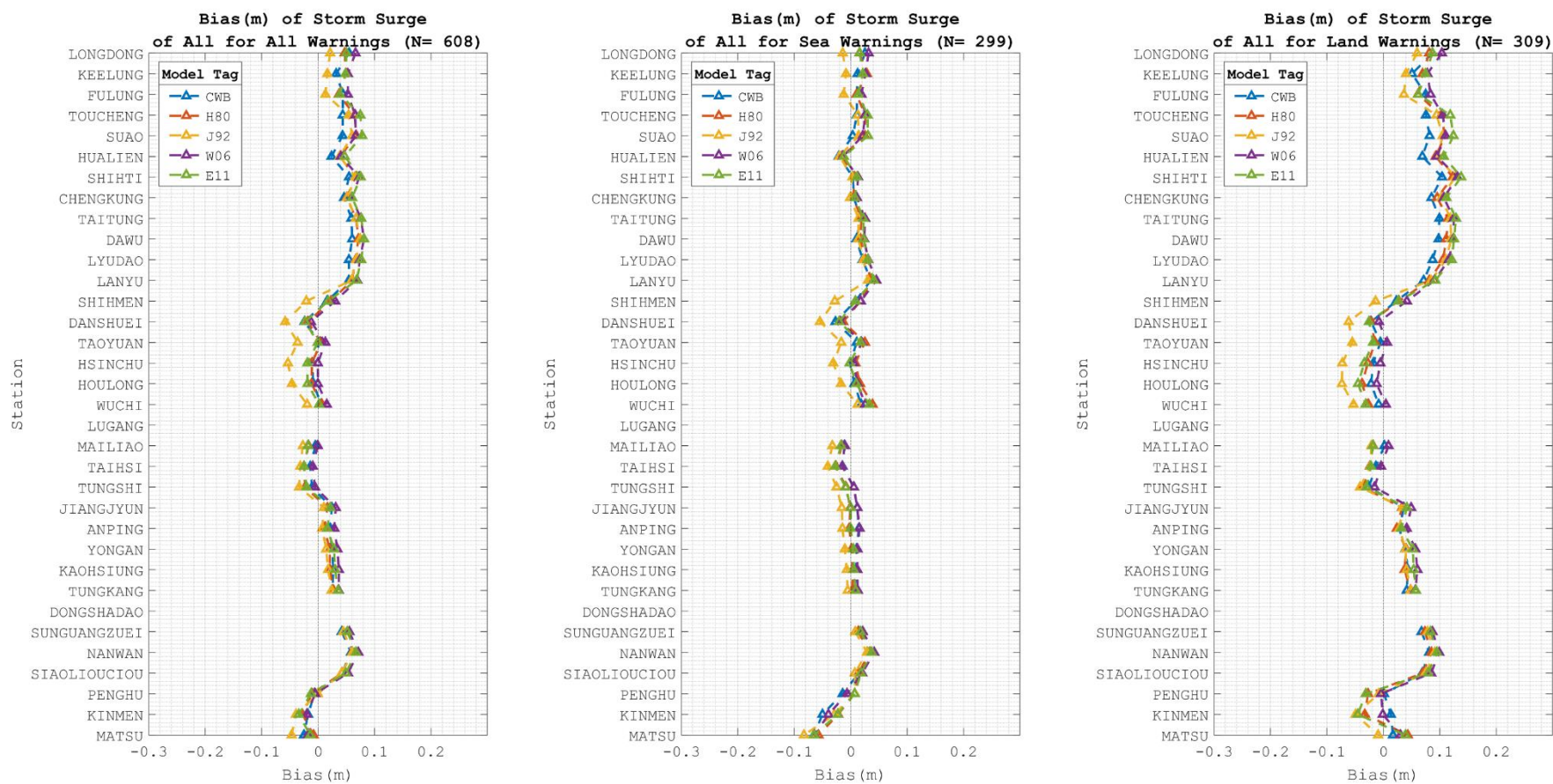


圖 4—24 所有颱風強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之偏差量值

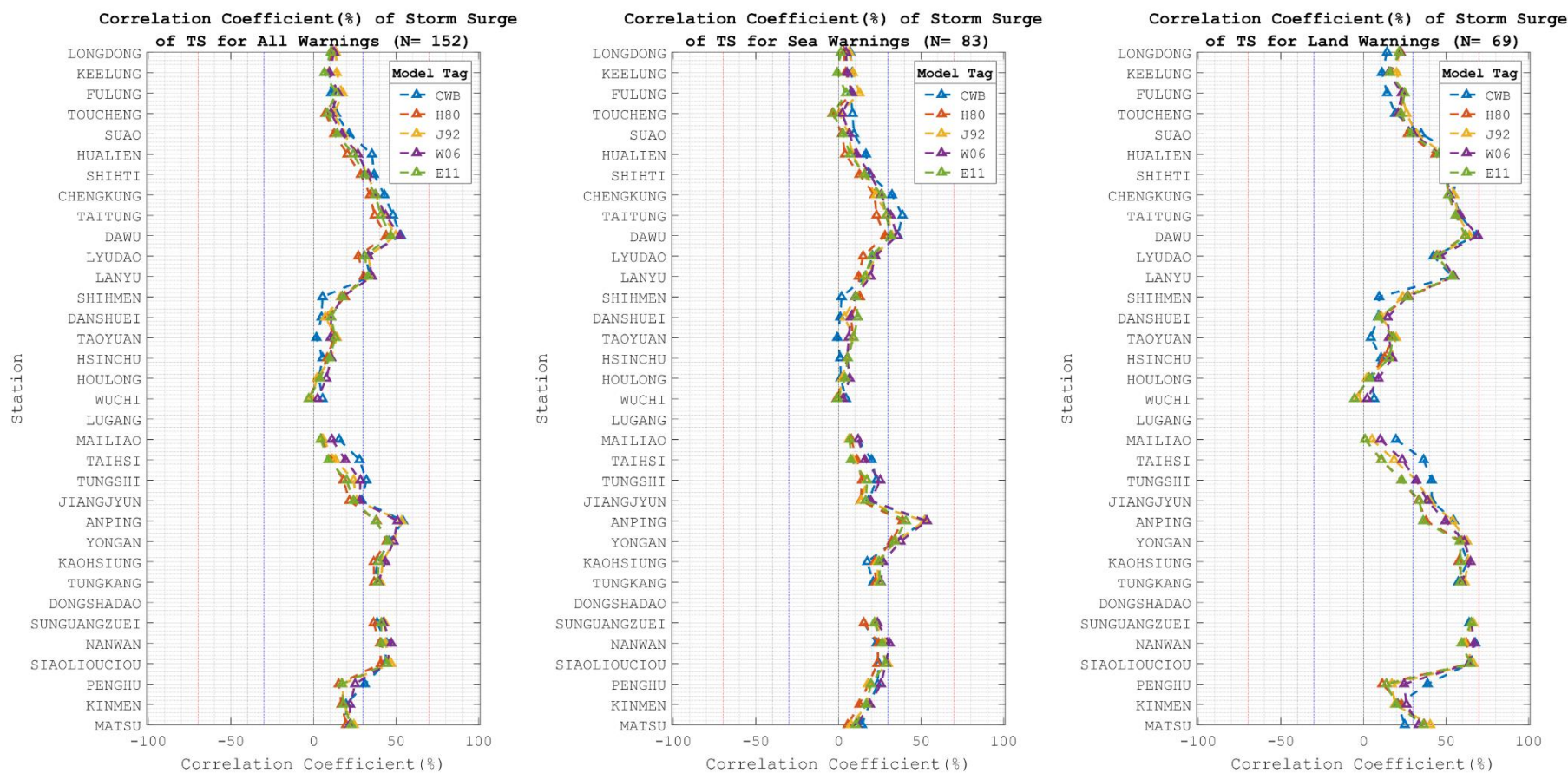


圖 4—25 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之相關係數

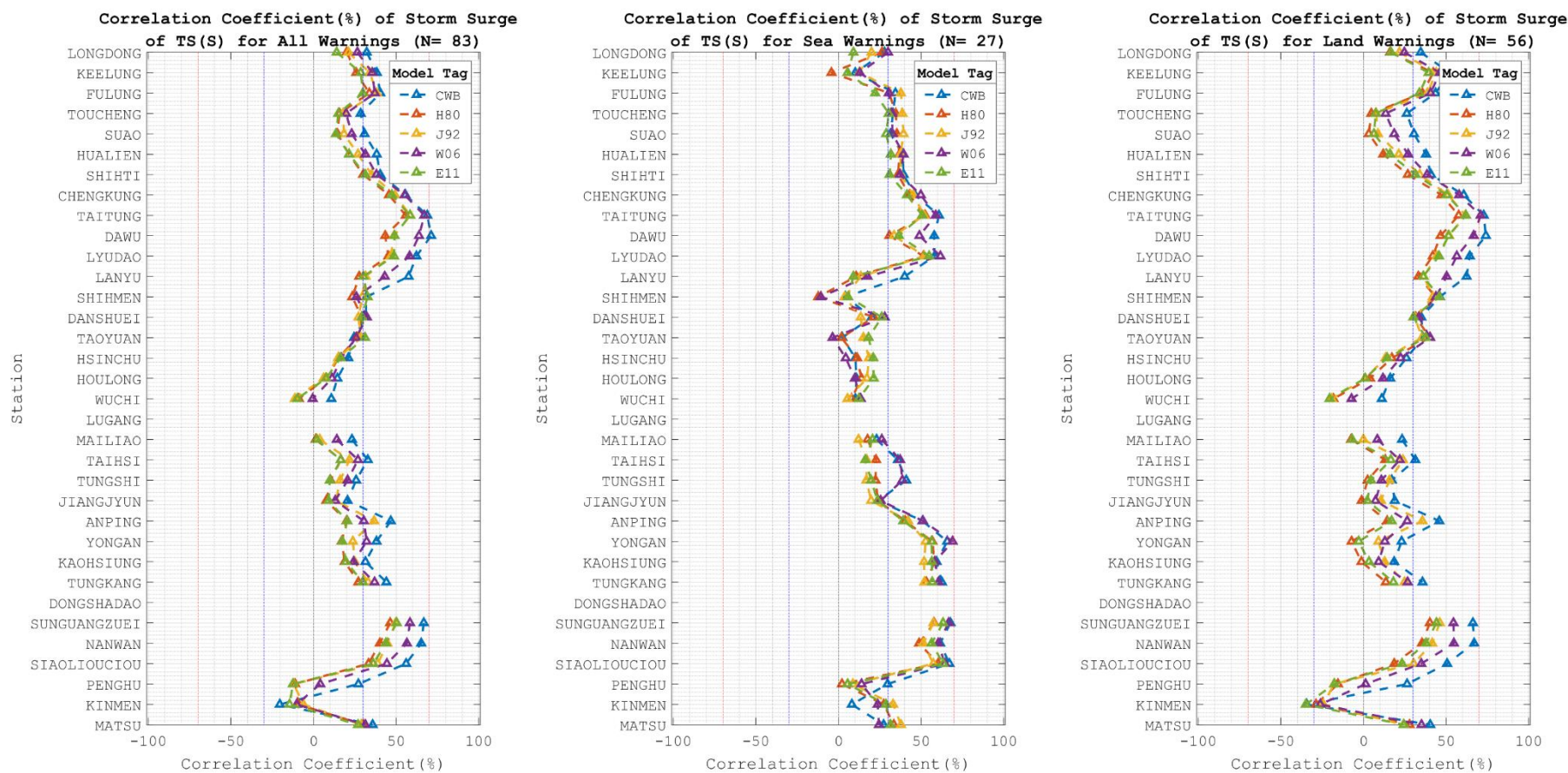


圖 4—26 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之相關係數

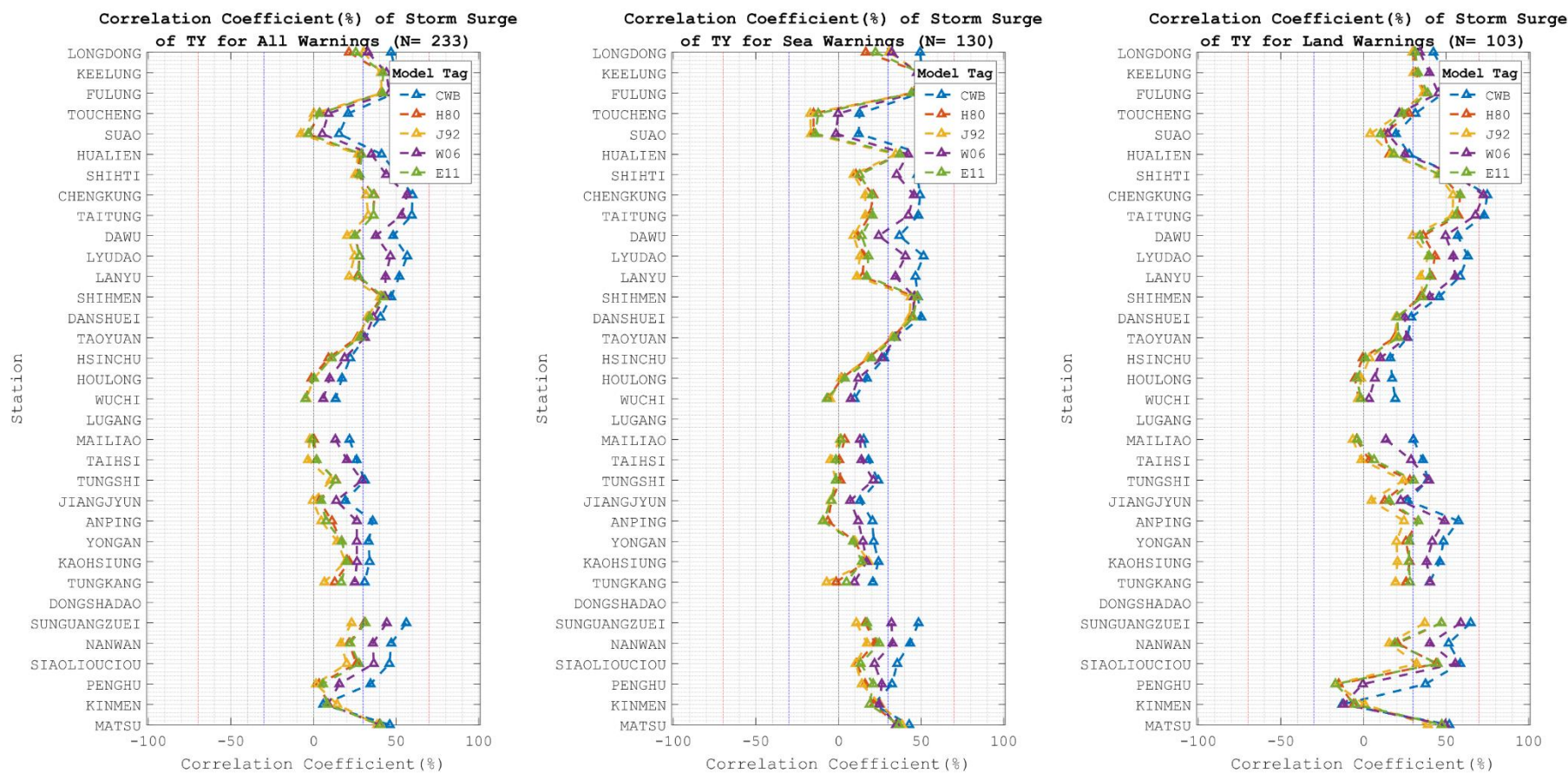


圖 4—27 颱風 TY 強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之相關係數

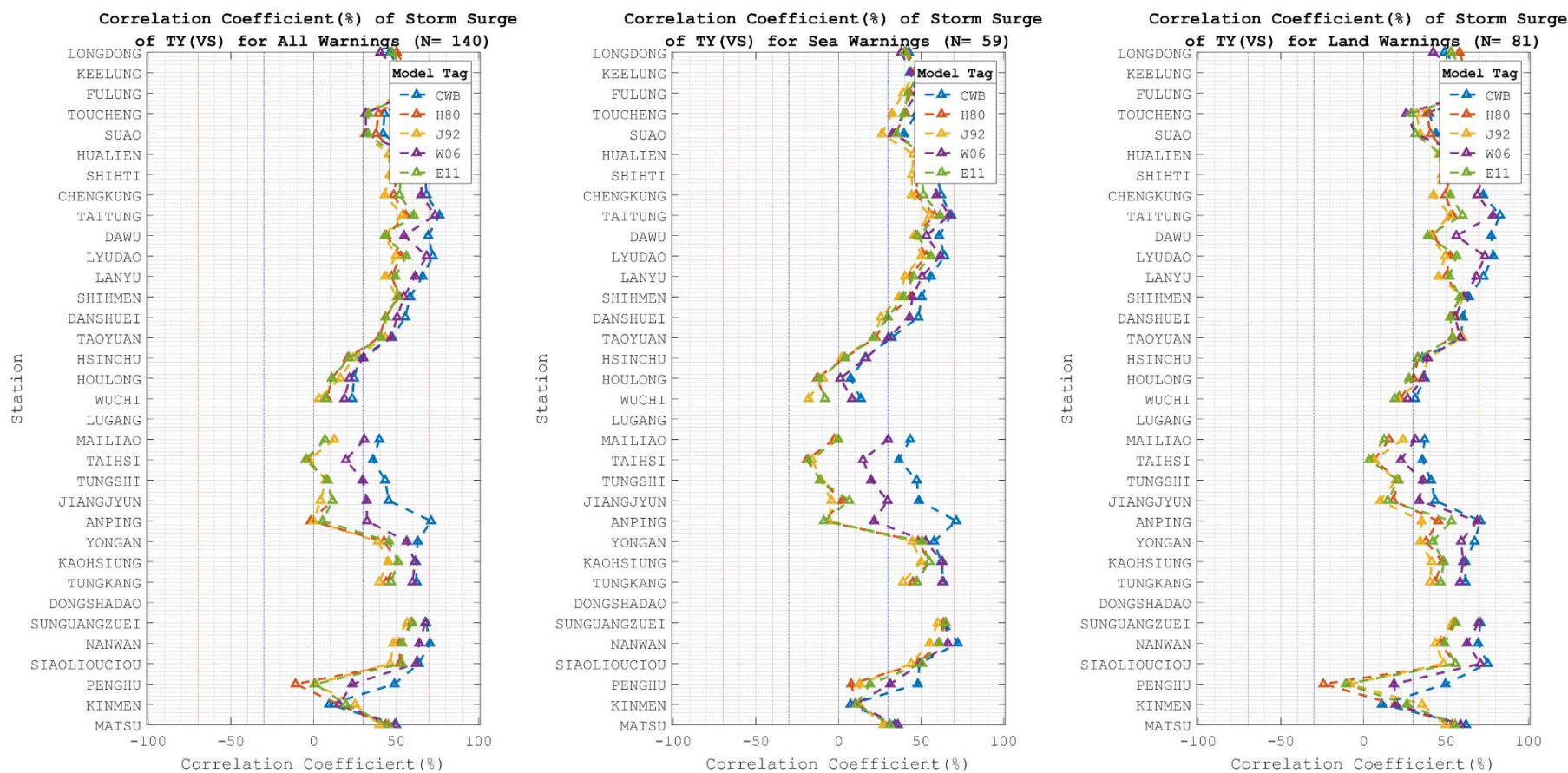


圖 4—28 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之相關係數

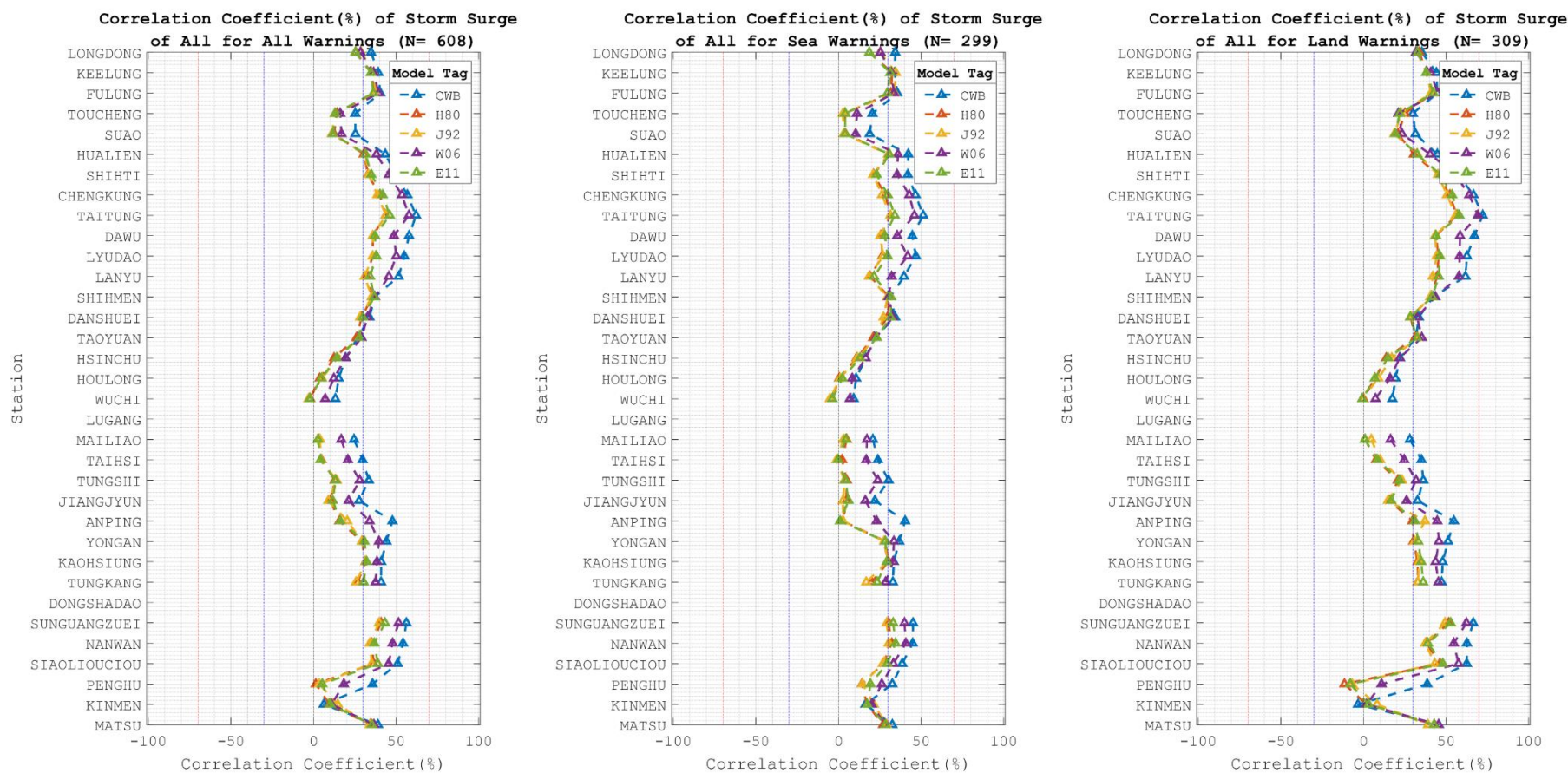


圖 4—29 所有颱風強度下各測站之暴潮偏差依據警報分類所得之相關係數

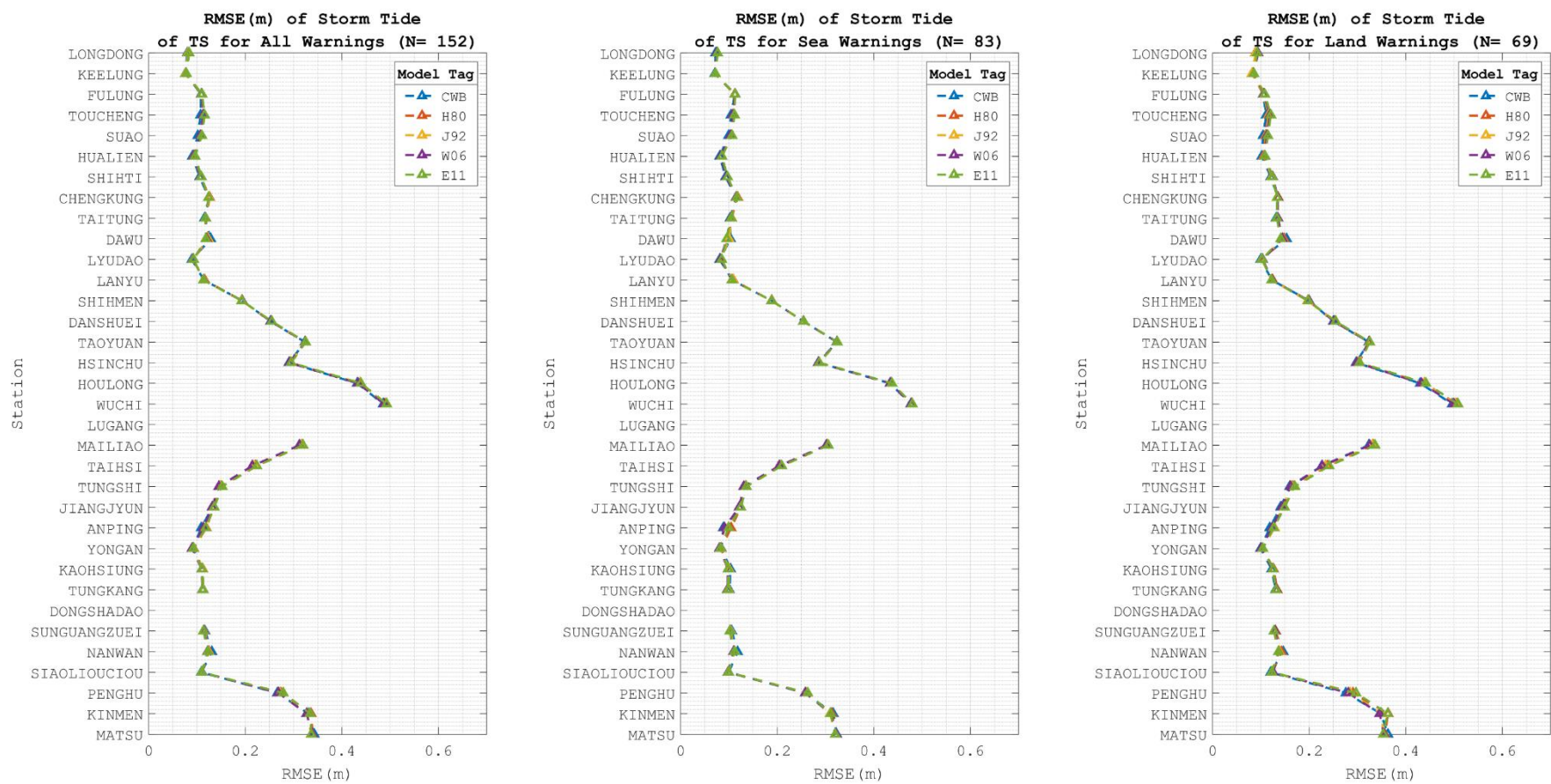


圖 4—30 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之方均根誤差值

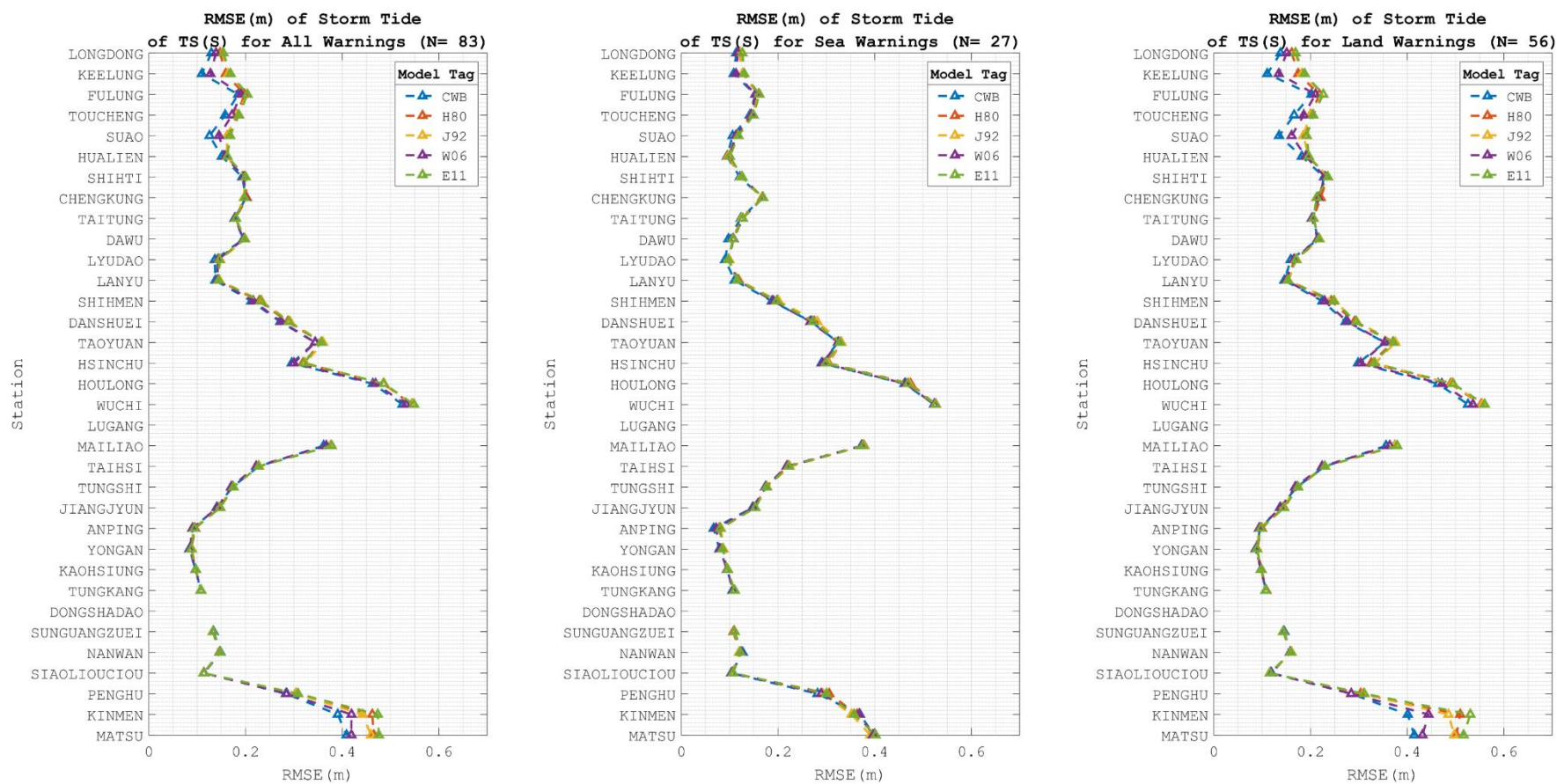


圖 4—31 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之方均根誤差值

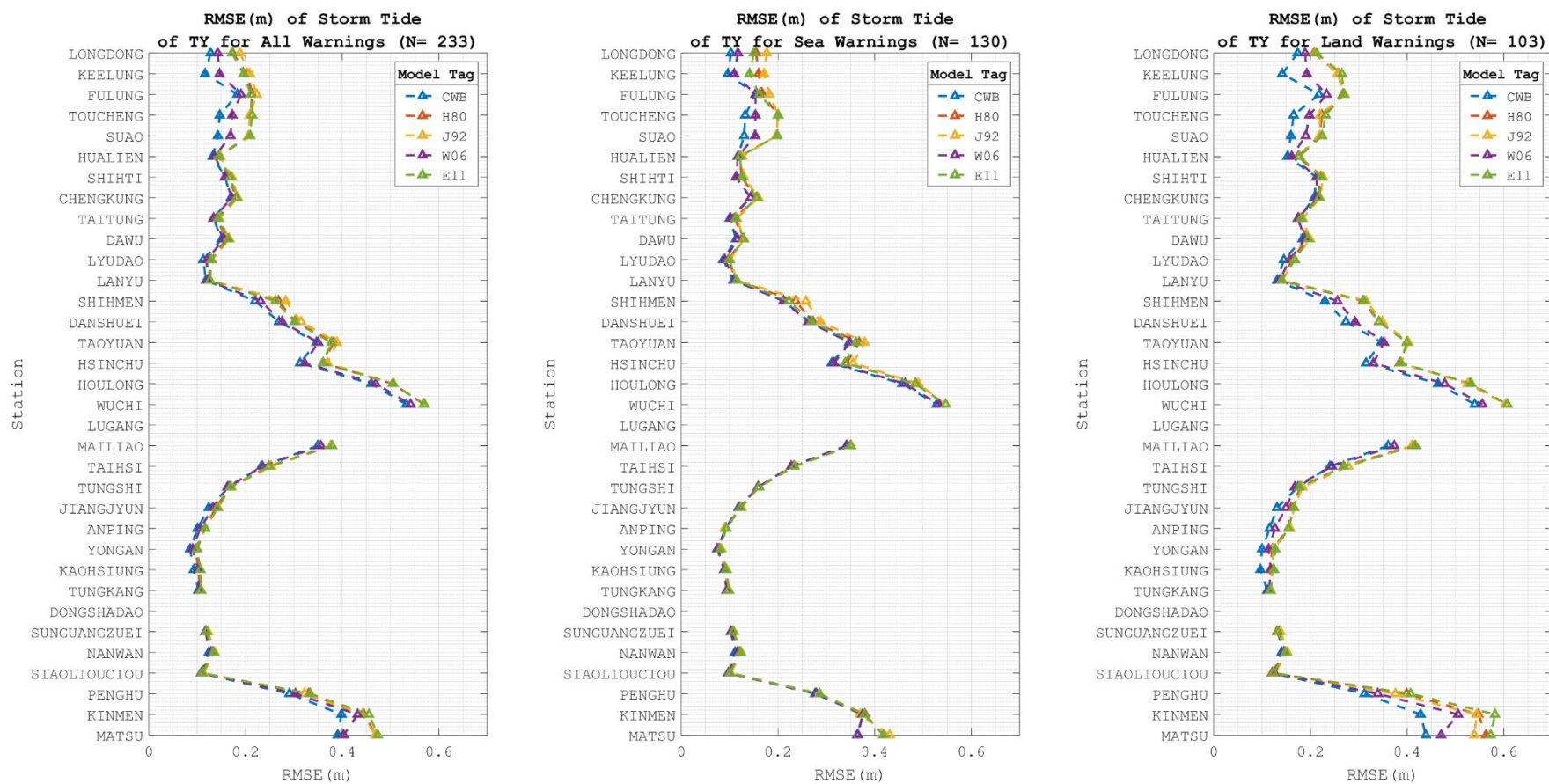


圖 4—32 颱風 TY 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之方均根誤差值

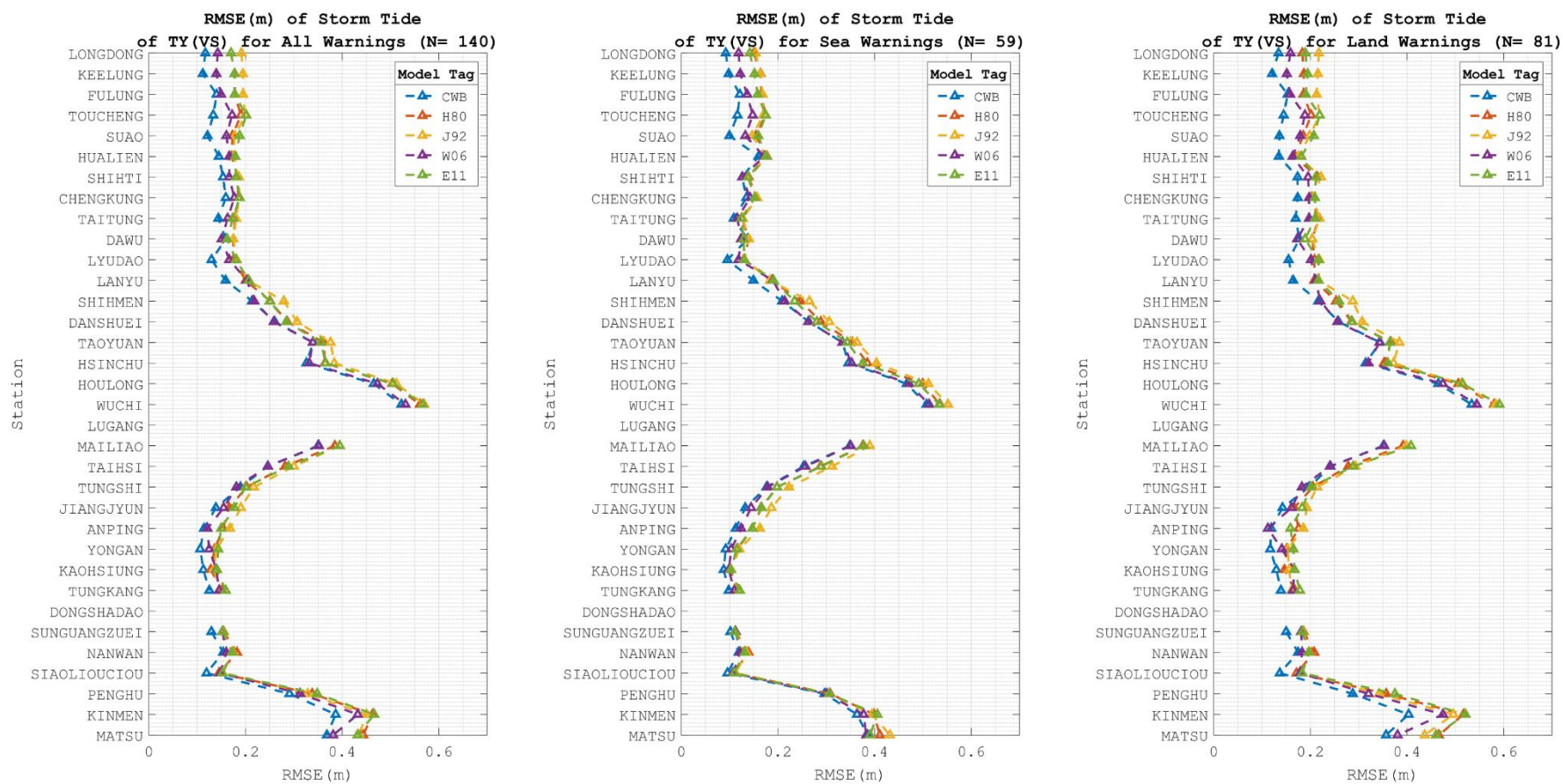


圖 4—33 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之方均根誤差值

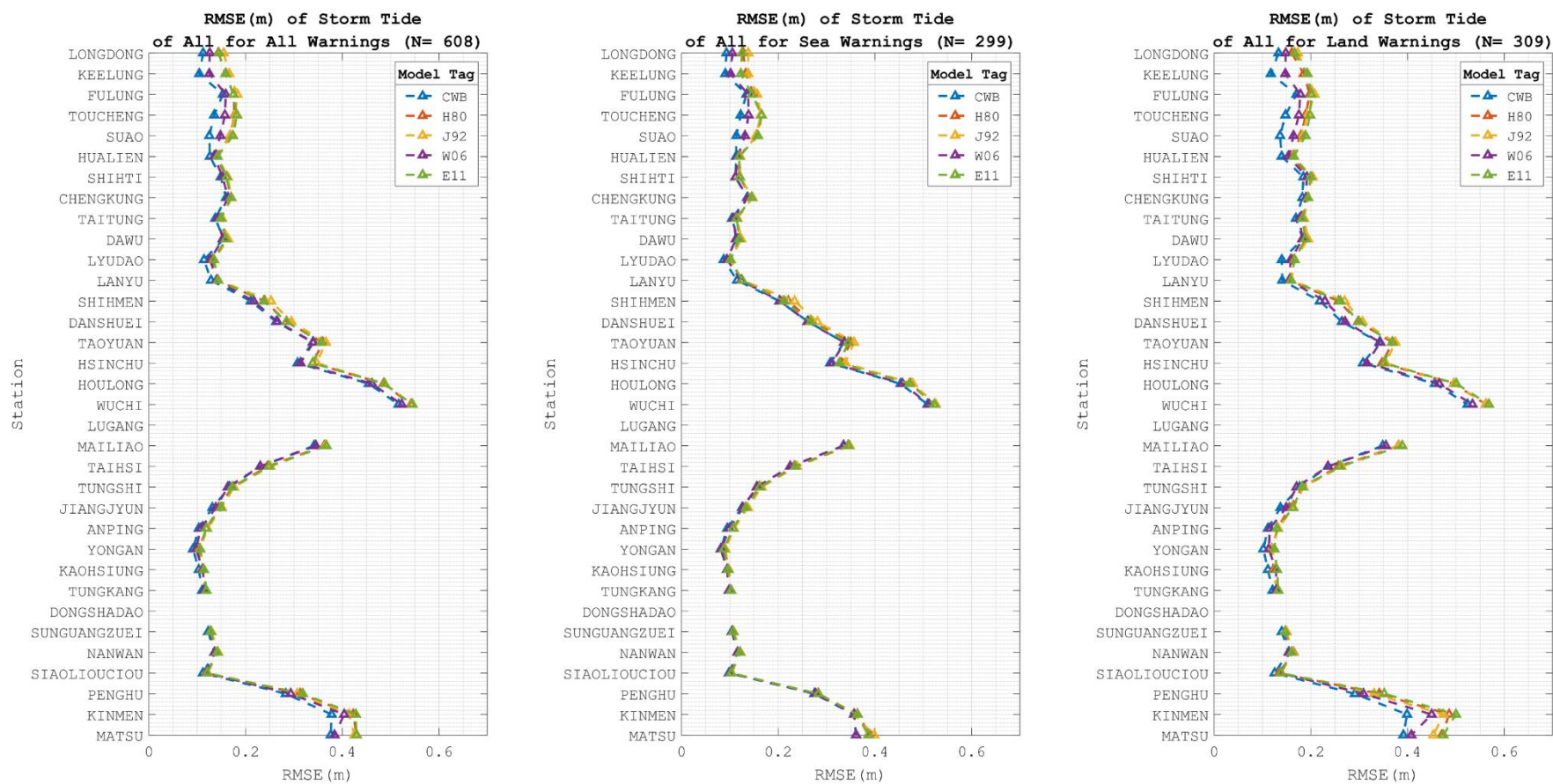


圖 4—34 所有颱風強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之方均根誤差值

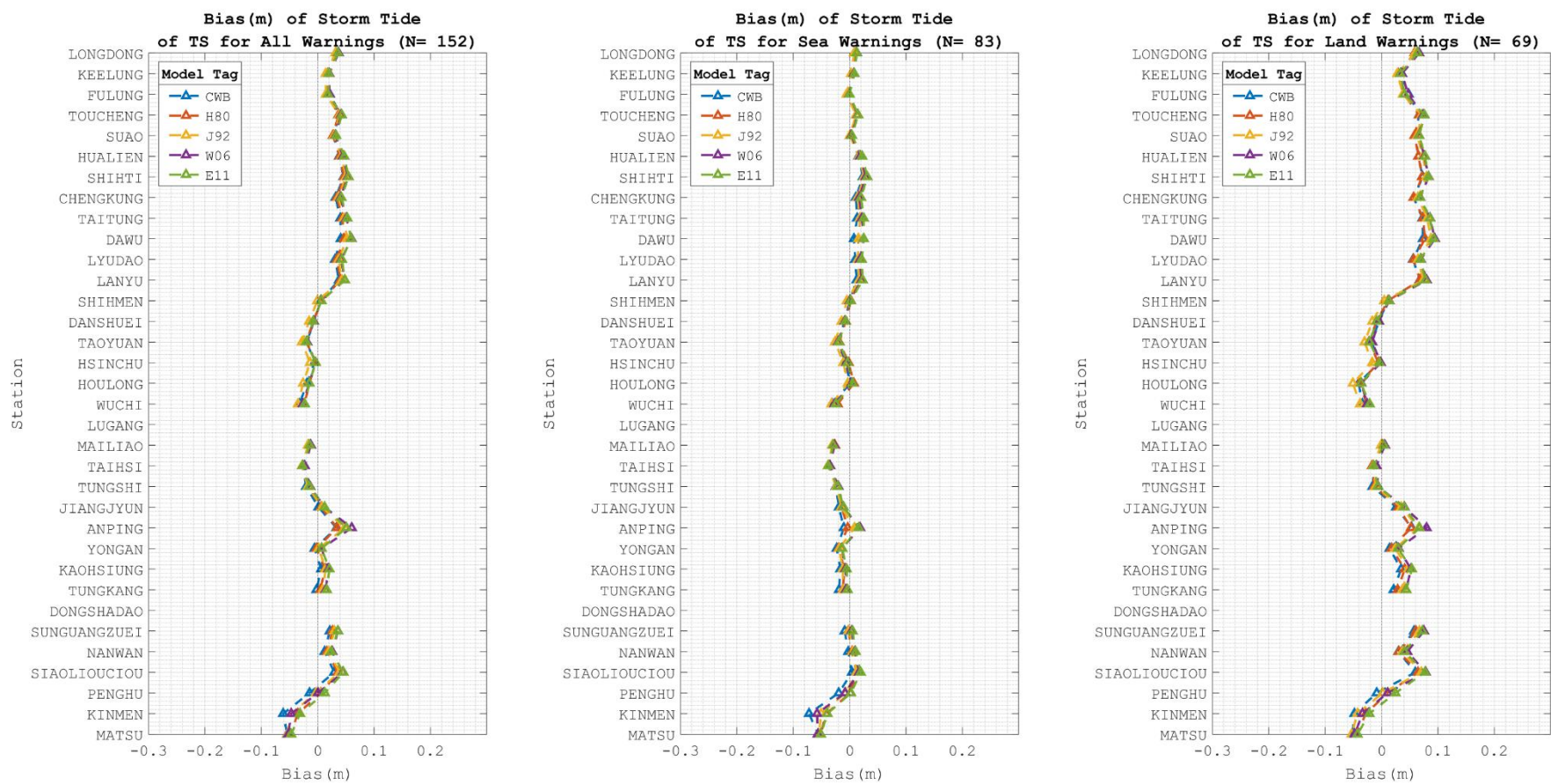


圖 4—35 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之偏差量值

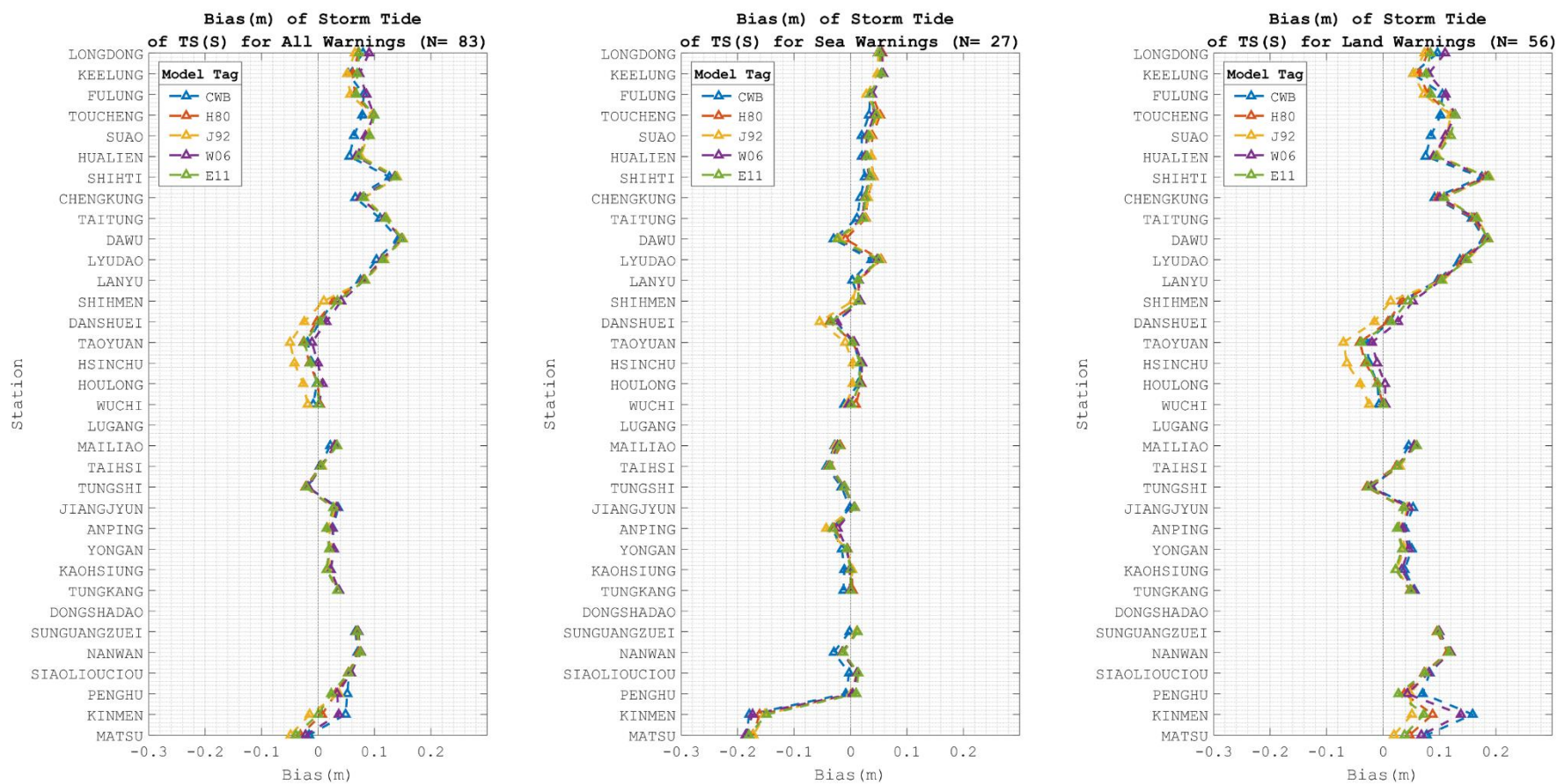


圖 4—36 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之偏差量值

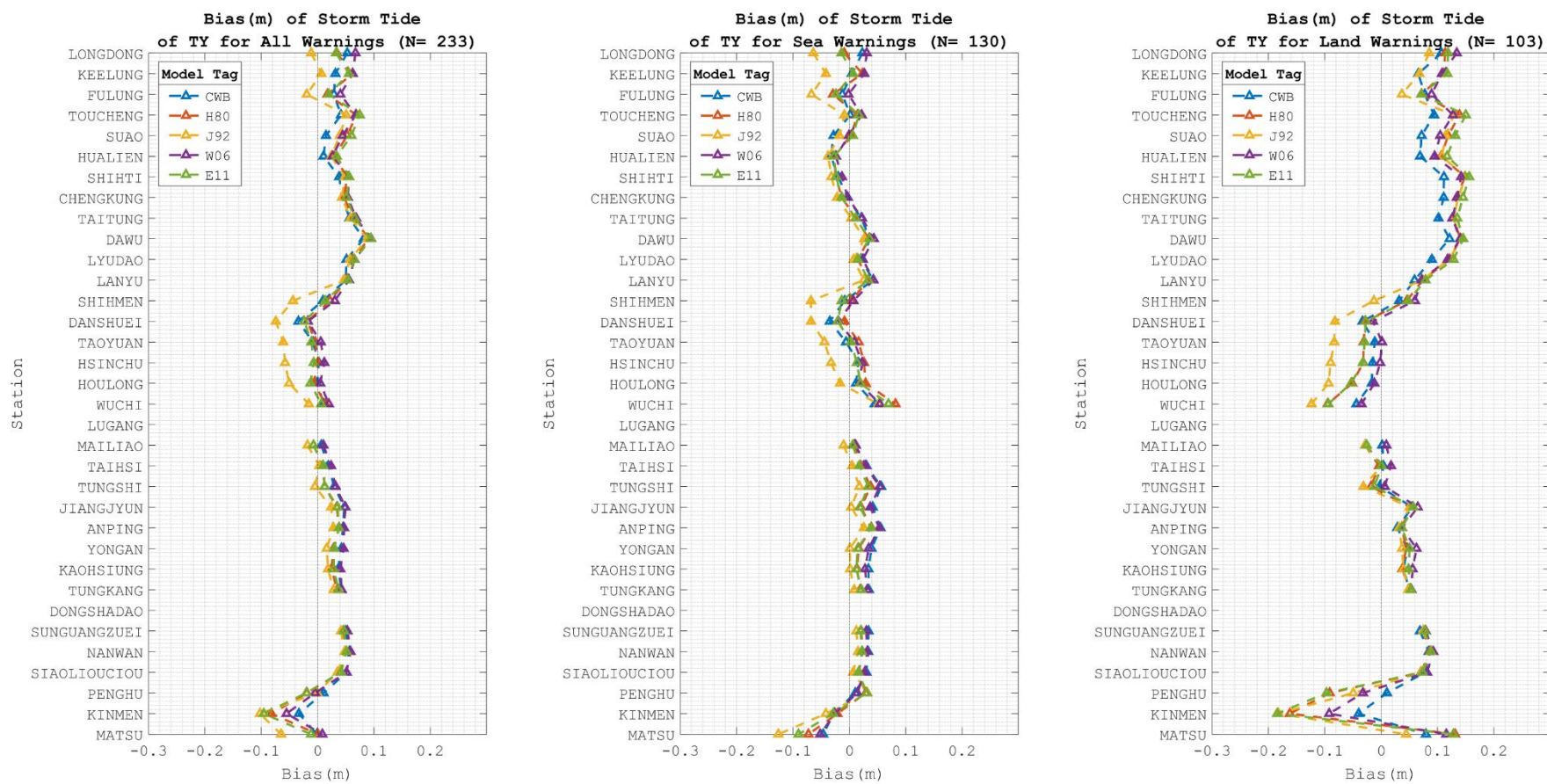


圖 4—37 颱風 TY 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之偏差量值

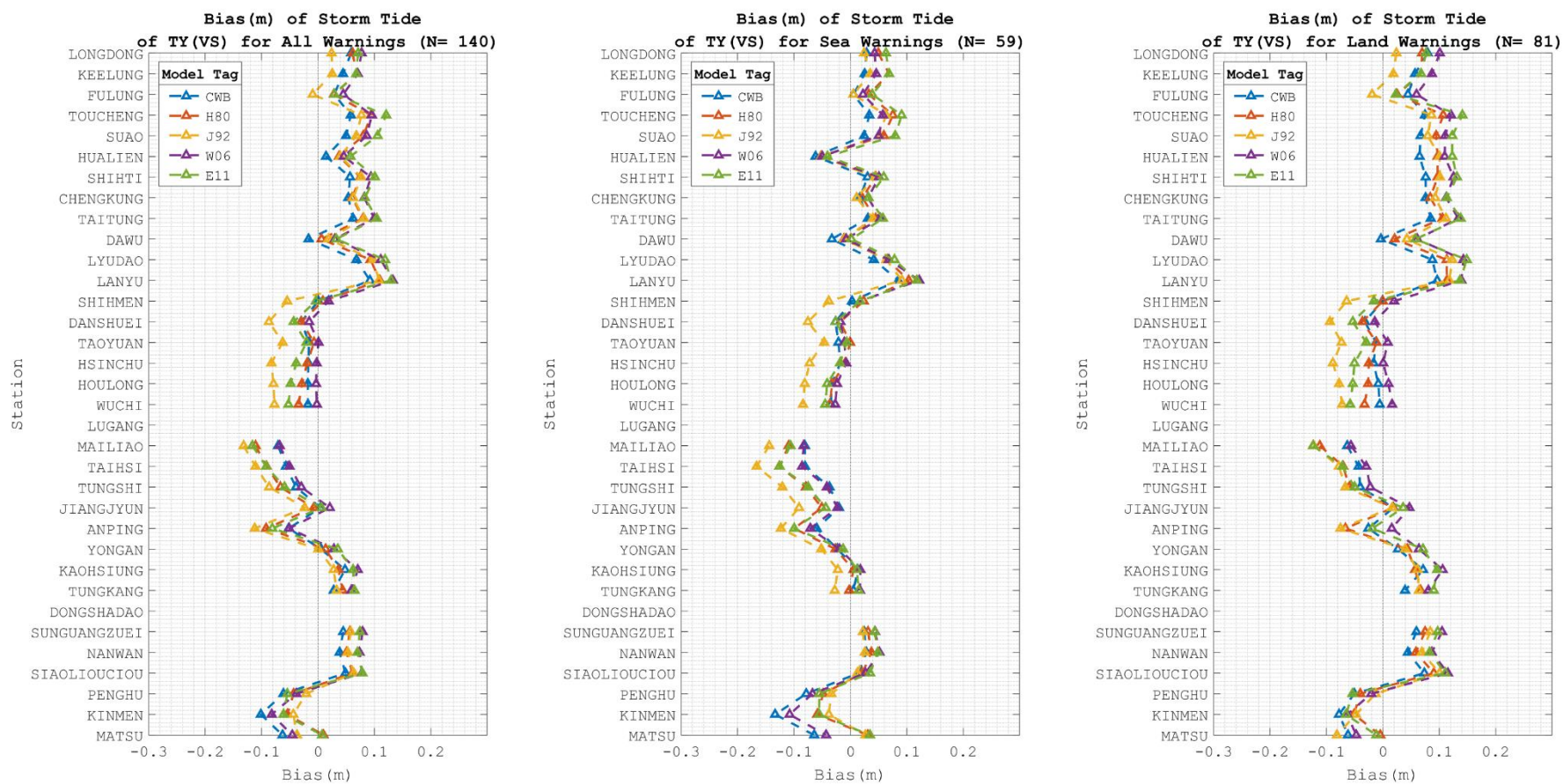


圖 4—38 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之偏差量值

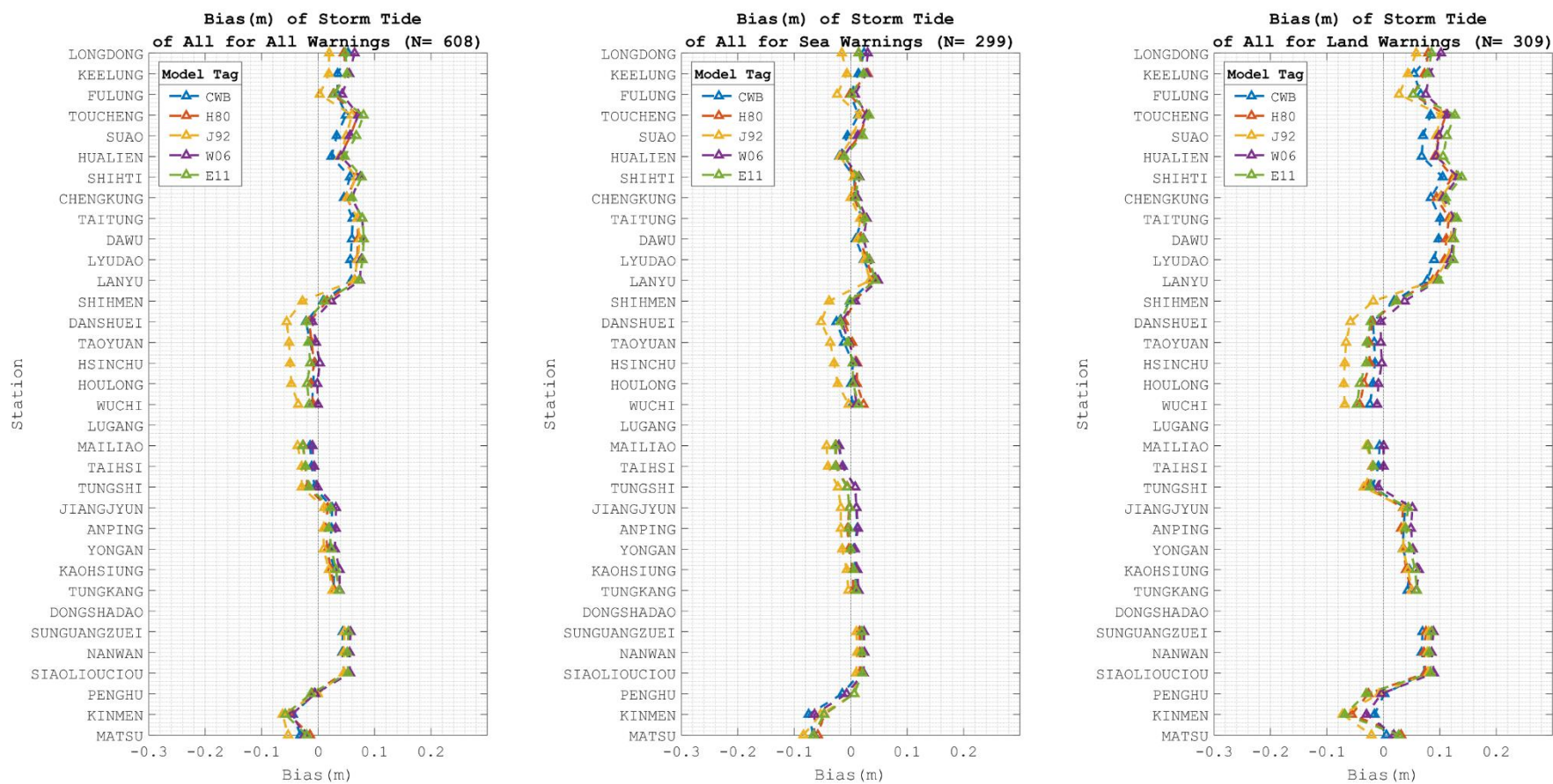


圖 4—39 所有颱風強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之偏差量值

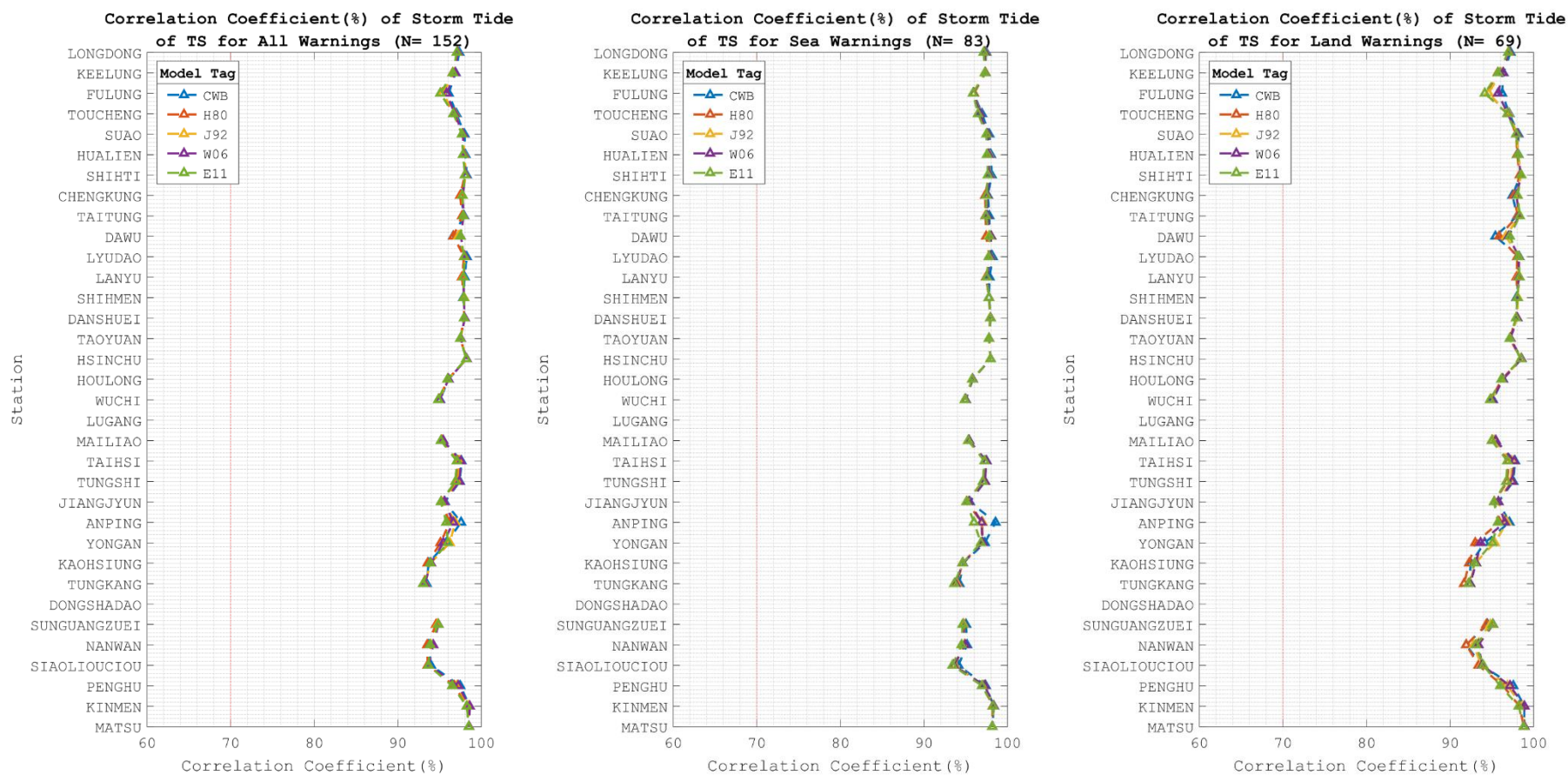


圖 4—40 熱帶風暴 TS 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之相關係數

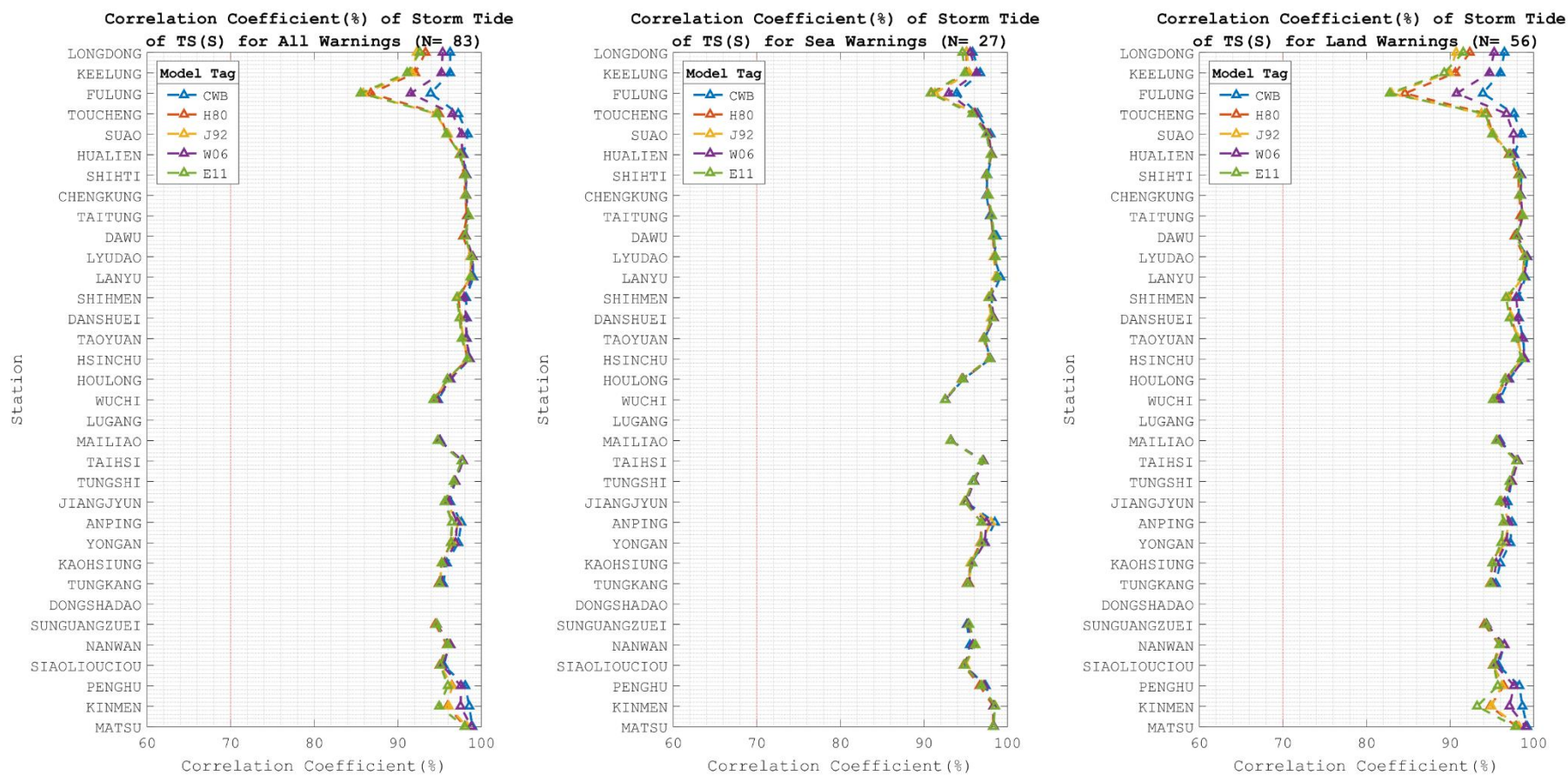


圖 4—41 嚴重熱帶風暴 TS(S)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之相關係數

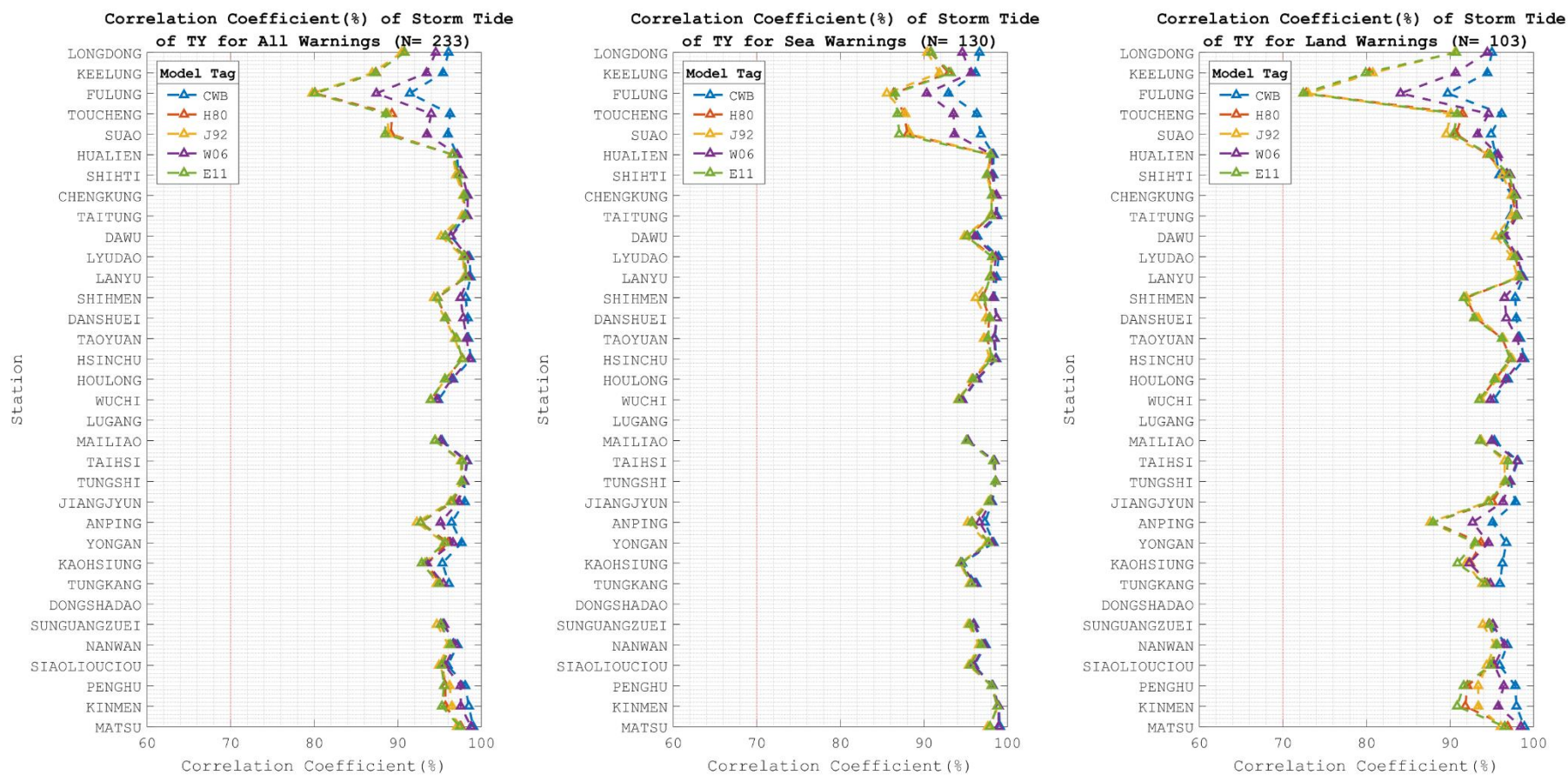


圖 4—42 颱風 TY 強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之相關係數

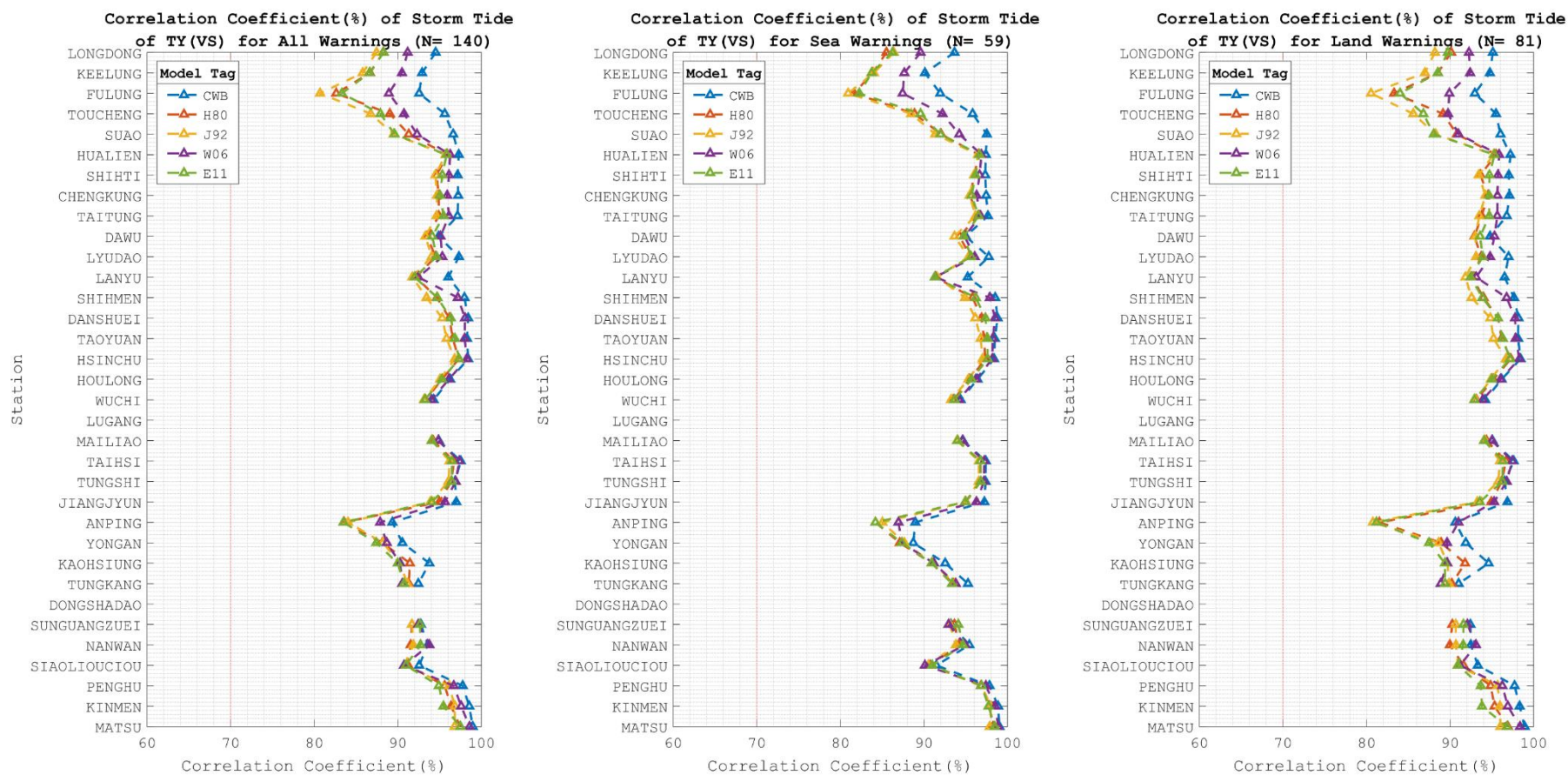


圖 4—43 非常強颱風 TY(VS)強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之相關係數

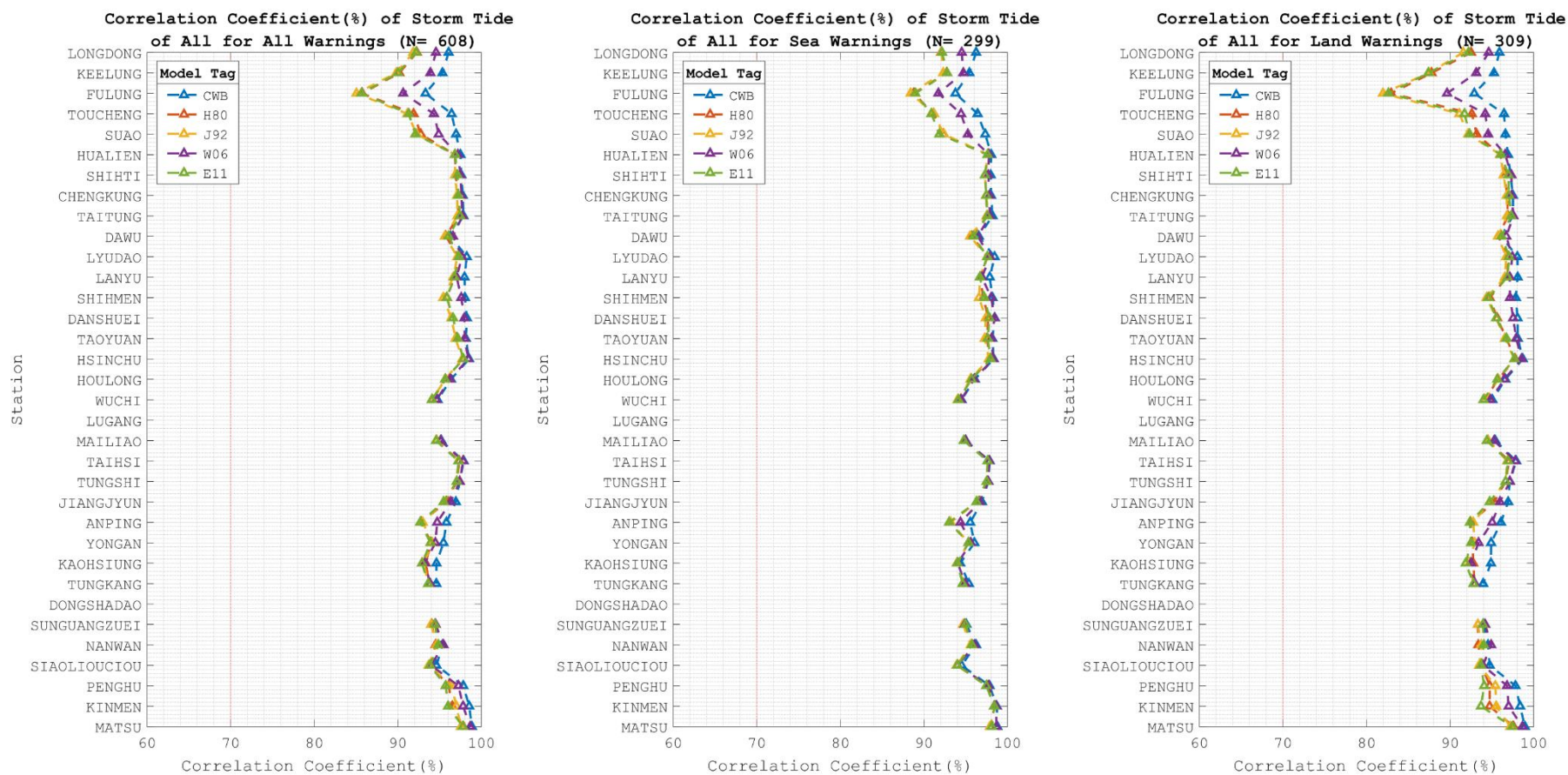


圖 4—44 所有颱風強度下各測站之暴潮總水位依據警報分類所得之相關係數

透過清點各測站具備最佳預報表現之理想風場模式，便可得到適合預報大部分測站者。表 4—9 至表 4—14 展示不同颱風強度下，歷年預報表現最佳/最差之理想風場模式及該模式對應之表現最佳/最差測站數，其中表 4—9 至表 4—11 展示海警預報資料統計結果，表 4—12 至表 4—14 展示陸警預報資料統計結果。資料展示類型包含暴潮偏差（Storm Surge）與暴潮總水位（Storm Tide），依據颱風強度弱至強排序，欄位最下方則統整考量所有強度情形下理想風場模式的表現。鑒於本研究中鹿港及東沙島有效資料不足故排於本次研究分析之外，有效測站數為 32 個。

表 4—9 展示海警預報中方均根誤差資料之分析結果，以方均根誤差最低者為最佳，最高者則為最差之原則進行統計。CWB 在暴潮偏差與暴潮總水位之預報中，皆有最好之統計表現，最佳表現之測站為至少 15 個以上。若考量整體預報情形，則暴潮偏差與暴潮總水位預報皆以 CWB 為最佳表現之測站為 28 個。表現相對不如預期之理想風場模式主要為 E11 及 J92，於暴潮偏差與暴潮總水位之資歷類型表現皆相似，強度為 TS 或 TS(S)時，E11 之方均根誤差最高的測站為 16 至 18 站；強度為 TY 以上時，J92 之方均根誤差最高的測站為 18 至 24 站，若考量所有強度之預報情形，則 J92 在海警與陸警中分別有 26 及 27 個測站獲得最高之方均根誤差值，顯示表現不如預期。

表 4—10 中展示海警預報中偏差量值資料之分析結果，偏差量值以其絕對值最低者為最佳，最高者為最差之原則進行統計。偏差量值在各測站中最佳表現之模式一致性並不高，其中在 TY 強度下，J92 在暴潮偏差與暴潮總水位預報資料有最佳之表現，分別有 16 站及 12 站，其餘熱帶氣旋強度則以 CWB 有最佳表現，為 11 至 16 站，依測站總數比例而論皆未過半數。若考量整體預報情形，則暴潮偏差以 CWB 為最佳表現之測站有 11 個，而有 10 個測站之暴潮總水位則以 J92 有最佳整體表現。表現相對不如預期者依據颱風強度分類而有所變化，且數量皆未過半。

表 4—11 中展示海警預報中相關係數資料之分析結果，而相關係數資料以

最高者為佳，最低者為最不理想之原則進行統計。其中 W06 在暴潮偏差預報中有最佳表現之測站有 14 站，而其他強度之暴潮偏差與暴潮總水位預報中，CWB 皆有最好之統計表現，最佳表現之測站為 13 站以上，而在熱帶氣旋強度為 TY 以上時，最佳表現模式為 CWB 的測站有 28 站以上。若考量整體預報情形，則以 CWB 為最佳表現之測站為 30 至 32 個。表現相對不如預期之理想風場模式有 H80、E11、J92 等模式，依據熱帶氣旋強度分類而有所變化。其中 H80 在 TS 強度的暴潮偏差資料中，被判定為表現最差之測站數有 17 站，在 TS(S)強度的暴潮總水位資料中，被判定為表現最差之測站數有 13 站。E11 在 TS(S)強度的暴潮偏差資料中，被判定為表現最差之測站數有 13 站，在 TS 強度的暴潮總水位資料中，被判定為表現最差之測站數有 24 站。當熱帶氣旋強度為 TY 以上，則 J92 在暴潮偏差與暴潮總水位預報中與其他模式相比有最低相關係數的測站有 16 至 25 站。

綜合評估表 4—9 至表 4—11 中，在海警預報時，暴潮偏差與暴潮總水位資料各熱帶氣旋強度下表現最佳之理想風場模式為 CWB 模式，其他候選模式則可依據出現在表現較不如預期中之模式加以排序，則其餘模式表現次佳者依序為 W06、H80、E11 及 J92。

表 4—12 展示陸警預報中方均根誤差資料之分析結果，以方均根誤差最低者為最佳，最高者則為最差之原則進行統計。CWB 在暴潮偏差與暴潮總水位之預報中，皆有最好之統計表現，最佳表現之測站為至少 22 個以上。若考量整體預報情形，則暴潮偏差與暴潮總水位預報皆以 CWB 為最佳表現之測站分別為 31 及 32 個。表現相對不如預期之理想風場模式主要為 E11 及 J92，於暴潮偏差與暴潮總水位之資歷類型表現皆相似，強度為 TS 或 TS(S)時，E11 之方均根誤差最高的測站為 16 至 18 站；強度為 TY 以上時，J92 之方均根誤差最高的測站為 15 至 18 站，若考量所有強度之預報情形，則 J92 在海警與陸警中分別有 18 及 19 個測站獲得最高之方均根誤差值，顯示表現不如預期。

表 4—13 中展示陸警預報中偏差量值資料之分析結果，偏差量值以其絕對

值最低者為最佳，最高者為最差之原則進行統計。偏差量值在各測站中最佳表現之模式為 CWB，各熱帶氣旋強度在暴潮偏差與暴潮總水位預報中以該模式為最佳表現之測站有 14 至 19 站。若考量整體預報情形，則暴潮偏差與暴潮總水位預報中以 CWB 為最佳表現之測站有 19 個。表現相對不如預期者依據颱風強度分類而有所變化，TS 強度中 W06 佔有 16 至 18 站，J92 再 TS(S)強度中則有 13 站，TY 強度以上則主要以 E11 之模擬偏差量佔所有模式中之最多數，有 13 至 14 站。

表 4—14 中展示陸警預報中相關係數資料之分析結果，而相關係數資料以最高者為佳，最低者為最不理想之原則進行統計。於暴潮偏差與暴潮總水位預報中，CWB 皆有最好之統計表現，最佳表現之測站為 13 站以上，而在熱帶氣旋強度為 TS(S)以上時，最佳表現模式為 CWB 的測站高達 28 站以上。若考量整體預報情形，則以 CWB 為最佳表現之測站為 28 至 30 個。表現相對不如預期之理想風場模式有 CWB、H80、E11、J92 等模式，依據熱帶氣旋強度分類而有所變化。其中 CWB 在 TS 強度的暴潮偏差資料中，被判定為表現最差之測站數有 13 站，H80 在 TS(S)強度的暴潮偏差資料中，被判定為表現最差之測站數有 21 站。E11 在 TS 與 TS(S)強度的暴潮總水位資料中，被判定為表現最差之測站數有 18 站。當熱帶氣旋強度為 TY 以上，則 J92 在暴潮偏差與暴潮總水位預報中與其他模式相比有最低相關係數的測站有 14 至 24 站。若考量所有強度之陸警預報，則依舊以 J92 在暴潮偏差與暴潮總水位預報中得到最低相關係數之測站數量最多，分別為 14 及 17 站。

綜合評估表 4—12 至表 4—14 中，在海警預報時，暴潮偏差與暴潮總水位資料各熱帶氣旋強度下表現最佳之理想風場模式為 CWB 模式，其他候選模式則可依據出現在表現較不如預期中之模式加以排序，則其餘模式表現次佳者依序為 W06、H80、E11 及 J92。

表 4—9 海警下各理想風場模式之表現與對應測站數（方均根誤差）

RMSE	Storm Surge				Storm Tide			
Intensity	BEST	NUM	WORST	NUM	BEST	NUM	WORST	NUM
TS	CWB	16	E11	18	CWB	16	E11	17
TS(S)	CWB	19	E11	16	CWB	25	E11	15
TY	CWB	23	J92	24	CWB	26	J92	24
TY(VS)	CWB	30	J92	18	CWB	31	J92	21
All	CWB	28	J92	27	CWB	28	J92	26

表 4—10 海警下各理想風場模式之表現與對應測站數（偏差量值）

BIAS	Storm Surge				Storm Tide			
Intensity	BEST	NUM	WORST	NUM	BEST	NUM	WORST	NUM
TS	CWB	12	E11	15	CWB	12	E11	14
TS(S)	CWB	13	H80	11	CWB	14	CWB	10
TY	J92	16	J92	12	J92	14	J92	13
TY(VS)	CWB	16	E11	12	CWB	15	J92	14
All	CWB	11	W06	15	J92	10	J92	13

表 4—11 海警下各理想風場模式之表現與對應測站數（相關係數）

R	Storm Surge				Storm Tide			
Intensity	BEST	NUM	WORST	NUM	BEST	NUM	WORST	NUM
TS	W06	14	H80	17	CWB	23	E11	24
TS(S)	CWB	13	E11	13	CWB	18	H80	13
TY	CWB	32	J92	21	CWB	30	J92	25
TY(VS)	CWB	28	J92	22	CWB	31	J92	20
All	CWB	30	J92	18	CWB	32	J92	16

表 4—12 陸警下各理想風場模式之表現與對應測站數（方均根誤差）

RMSE	Storm Surge				Storm Tide			
Intensity	BEST	NUM	WORST	NUM	BEST	NUM	WORST	NUM
TS	CWB	22	E11	18	CWB	24	E11	17
TS(S)	CWB	23	E11	16	CWB	24	E11	15
TY	CWB	30	J92	18	CWB	30	J92	18
TY(VS)	CWB	29	J92	16	CWB	28	J92	15
All	CWB	31	J92	19	CWB	32	J92	18

表 4—13 陸警下各理想風場模式之表現與對應測站數（偏差量值）

BIAS	Storm Surge				Storm Tide			
Intensity	BEST	NUM	WORST	NUM	BEST	NUM	WORST	NUM
TS	CWB	17	W06	18	CWB	17	W06	16
TS(S)	CWB	15	J92	13	CWB	14	J92	13
TY	CWB	19	E11	14	CWB	19	E11	14
TY(VS)	CWB	19	E11	13	CWB	18	E11	13
All	CWB	19	E11	13	CWB	19	E11	13

表 4—14 陸警下各理想風場模式之表現與對應測站數（相關係數）

R	Storm Surge				Storm Tide			
Intensity	BEST	NUM	WORST	NUM	BEST	NUM	WORST	NUM
TS	CWB	13	CWB	13	CWB	18	E11	18
TS(S)	CWB	32	H80	21	CWB	28	E11	18
TY	CWB	30	J92	24	CWB	28	J92	17
TY(VS)	CWB	28	J92	17	CWB	30	J92	21
All	CWB	30	J92	14	CWB	28	J92	17

4-4 暴潮預報系統理想風場模式更新及作業化測試

經由前述章節分析後，本研究發現考量預報誤差情形下，暴潮預報系統在選用 CWB 作為理想風場模式執行暴潮預報作業時通常與觀測資料較為接近。然而研究過程中亦發現某些理想風場模式在部分情況下亦有可能有較佳表現，因此本工作項目中選擇將研究中所用之理想風場模式皆加入現有暴潮預報系統，以供未來彈性選擇理想風場模式之可能性。

已更新之颱風暴潮決定性預報系統之作業流程如圖 4—45。其中梯形流程為手動執行作業，圓角實線方框為預報系統判斷流程分流步驟，圓角虛線方框為判斷流程分流選項之步驟。直角方框為預報系統自動執行作業步驟，橢圓實線框表示單次作業流程終點。六角實現框表示等待排程之作業步驟。

預報員只需於第一報預報時啟動系統，並輸入預報起始時間與颱風事件，即可執行暴潮預報系統。系統會依據作業員輸入之預報資訊利用 API 查找是否有相符之颱風預報資料，若存在相符事件則會進行下一步；若作業員於第一報中輸入之資訊無法透過 API 找到相符預報資料，預報系統將會返回至手動輸入資訊之使用者介面要求重新輸入正確資訊。預報系統於 API 介面取得預報資料後，將可判斷本次預報為陸警期間或海警期間。完成判斷颱風距離台灣遠近後，將會於下一步利用預報資料中之近中心最大風速預報平均值判斷未來預報區間內熱帶氣旋之平均強度，並依據警報類別與颱風強度分類選取預報作業用之理想風場模式。決定預報用之理想風場模式選項後，預報系統將會自動產生執行核心程式所需之輸入檔並執行預報作業。核心程式執行完畢後，預報系統會自動輸出預報產品並上傳至指定伺服器。接續之暴潮預報將透過 crontab 工作排程，於每日 0、3、6、9、12、15、18、及 21 時，自動確認系統內資料是否符合啟動下一次預報的條件，若符合將執行定時暴潮預報腳本；若不符條件則會結束本次颱風事件之暴潮預報。

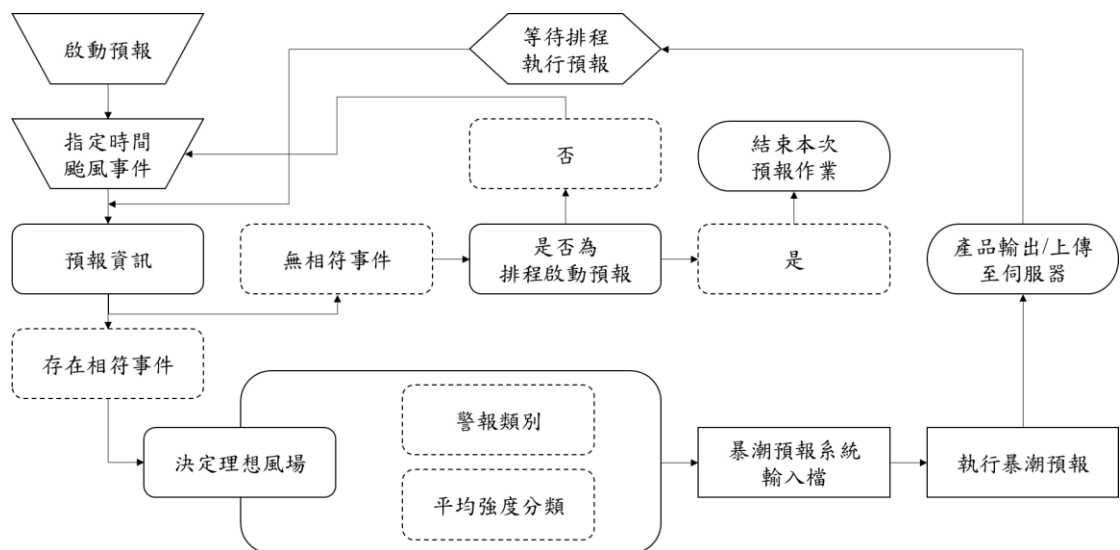


圖 4—45 颱風暴潮決定性預報系統作業流程圖

4-4-1 海上警報案例展示

本次計畫執行期間，有發警報之颱風中度颱風瑪娃 (MAWAR)，其生命期間路徑圖展示於圖 4—46，來自颱風資料庫。圖中顯示颱風於生命期間路徑圖，每 6 小時一筆之路徑與強度資料，圖檔資料顯示時間為 UTC。針對瑪娃颱風發布海警期間為 2023 年 05 月 29 日 20 時 30 分至 05 月 31 日 17 時 30 分，該颱風近台期間最低中心氣壓為 945 百帕、颱風近中心最大風速為 43 公尺/秒、7 級暴風半徑為 300 公里，於台灣颱風強度分類中屬中颱，國際強度分類中屬颱風 (Typhoon)。本次研究中選用 2023 年 05 月 30 日 20 時作為展示用預報範例，於本次預報中，警報分類屬於海上颱風警報，且預報期間颱風近中心最大風速屆於 33-43 公尺/秒，因此預報系統中選取 CWB 做為預報用理想風場模式，並展示其他理想風場模式於本次預報資料中之表現。

圖 4—47 至圖 4—50 為颱風暴潮決定性預報系統中針對水位預報結果，排序依照表 3—2 之指定預報潮位站排序。各子圖中標題展示測站名稱及起始預報時間，顯示時間為 UTC 以配合其他預報系統展示時區。各子圖上半部分別以藍線與黑線展示暴潮總水位及潮汐水位，下半部則以藍線展示總水位扣除潮汐水位後之殘差值，並將其定義為暴潮偏差。圖中橫軸標示預報時間，為自起始預報時間起之第 0 至 72 小時；縱軸為水位值，於暴潮總水位及潮汐水位展示中，繪製範圍為 -3.5 至 4.0 公尺，於殘差值水位圖中則為 -0.5 至 1.5 公尺。

圖中展示本次預報期間颱風對各測站影響相當有限，颱風對部分東部及南部測站如石梯、成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、蟬廣嘴、南灣、小琉球等地有造成小於 0.1 公尺之水位影響，其他測站之殘差水位幾乎為 0。

圖 4—51 至圖 4—54 為利用暴潮系集預報系統執行之預報水位校驗示意圖。本次系集預報系統選用之系集成員為各理想風場模式，圖 4—51 至圖 4—52 展示暴潮偏差水位預報結果，圖 4—53 至圖 4—54 展示暴潮總水位預報結果。產品展示之預報資料起始時間為 2023 年 05 月 30 日 20 時，橫軸為預報區間，縱軸

為水位高度，單位為公尺。不同色線對應不同理想風場模式所得之預報結果，黑色圓圈表示校驗對象，於暴潮偏差產品中為潮位站觀測值扣除氣象署作業中之調和分析潮汐預報水位；暴潮總水位產品中為潮位站之觀測資料。

暴潮偏差產品圖中，可以看到各模式在本次預報期間於北部、西北部及部分離島測站有較大分歧，於東南部、西部及南部地區測站之預報結果則較趨於一致。北部、西北部及部分離島測站中，E01(H80)之預報結果得到最大之暴潮偏差值，約為 0.2 公尺至 0.3 公尺，其他模式之預報結果則相對無明顯差異。北部測站中，實際觀測資料所得之暴潮偏差於該地區之水位變化並不明顯。部分離島測站如澎湖、金門、馬祖等站，受限於觀測資料之水位殘差值有明顯周期性震盪情形，無法輕易從觀測資料中辨識是否有暴潮訊號。透過其他地區之觀測資料加以輔助，由於距離颱風較近之台灣東部測站於該時段內並無明顯暴潮訊號，因此合理推論前述離島測站中主要訊號應由觀測水位與調和分析預報水位間之殘差值，颱風所引起的水位異常抬升訊號應屬有限。觀測資料之水位殘差值有明顯周期性震盪情形者除離島測站外，西北部測站如石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石等站亦有此現象，影響暴潮訊號之判讀。

暴潮總水位產品圖中，大部分測站之預報水位與觀測水位比對結果良好，但西北部及離島部分測站如石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、東石、澎湖、金門、馬祖等站之水位預報結果與觀測水位有較明顯之預報誤差，誤差值最大可達 0.4 公尺。鑒於利用其他地區測站之觀測資料，瑪娃颱風於此預報區間對各地測站之水位影響應屬有限，因此上述測站之誤差較有可能源自潮汐預報之誤差，可能源自港內外地形特徵，導致測站長期觀測資料特性並不能夠以天文潮物理完整描述。

圖 4—55 至圖 4—56 展示各理想風場模式執行所有颱風預報資料後所得預報水位與觀測資料之統計校驗結果，各圖中橫軸標記統計參數值，縱軸對應測站名稱，圖中色線表示不同理想風場模式結果於該測站觀測資料比對後所得之統計參數，依序為方均根誤差、偏差量值與相關係數。圖 4—55 展示暴潮偏差統計資

料，圖 4—56 展示暴潮總水位統計資料。其中大武、鹿港、安平與東沙島測站於本次預報期間無有效觀測資料，故自本研究分析中排除，故研究中有效可供分析之測站合計為 30 站。

暴潮偏差之方均根誤差分析中，各理想風場模式所得之結果皆落於 0.05 至 0.3 公尺間。大部分之測站表現以 CWB 模式為佳，H80 則在多數測站中有較高之方均根誤差。各模式在同一測站之方均根誤差差距不超過 0.2 公尺。大部分測站之模擬水位與觀測資料之方均根誤差小於 0.2 公尺，而有部分模式之平均方均根誤差大於 0.2 公尺的測站有龍洞、基隆、新竹、後龍、台西等站。不同理想風場模式於西部及南部測站如麥寮、台西、東石、將軍、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等站所得之水位預報方均根誤差較為相近，無法看出明顯差異。理想風場模式的變化對北部、西北部及部分離島測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、綠島、蘭嶼、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、金門、馬祖等站有較顯著的差異，不同模式選項可以導致方均根誤差之差距範圍落於 0.05 至 0.2 公尺。

暴潮偏差之偏差量值分析中，黑色實線為偏差量值為 0 之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為高估或低估之情形。各理想風場模式的暴潮偏差偏差量值在各測站中皆落於 ± 0.2 公尺內。各模式在同一測站之偏差量值差距介於 0.05 至 0.2 公尺間，顯示選用不同理想風場模式於本次預報中對所有測站之預報結果的確會產生分歧。各模式預報結果普遍高估的測站分布主要位於台灣北部、西北部地區，如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、綠島、蘭嶼、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲等測站；預報結果普遍低於預期的測站則大部分位於西南部如永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球等地。偏差量值明顯分歧的測站中，CWB 模式在台灣北部、東部、西北部、南部及部分離島地區之表現明顯偏離其他理想風場模式所得之預報結果，有明顯低估情形。J92 模式則在西南部地區有有明顯低估情形。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，以 CWB 為表現最佳模式之測站為主要多數。

暴潮偏差之相關係數分析中，各圖繪製範圍為-100%至 100%以利於視覺化比較不同強度間各測站之變化情形。一般普遍認為，相關係數 30%以下為低相關，30%至 70%為中等相關，70%以上為高度相關。圖中黑色實線為相關係數 0%之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為正相關或負相關之情形。藍線為 30%基準線，紅線為 70%基準線，分別協助判別低、中、高度相關情形。各理想風場模式對各測站的暴潮偏差相關係數落於-75%至 80%間，並無規律。各模式在同一測站之相關係數差距範圍最大落差範圍超過 100%，為中度正相關及中度負相關之差距，選示選用不同之理想風場模式對於模式預報結果在各測站之表現有極大的影響。視覺化展示中多數測站相關係數為正且最高之模式為 E11，其次為 W06。

暴潮總水位之方均根誤差分析中，各理想風場模式所得之結果落於 0.1 至 0.5 公尺間。大部分之測站表現以 E11 模式為佳，普遍次佳者為 CWB，但各模式在同一測站之方均根誤差差距落於 0.05 至 0.2 公尺。大部分測站之模擬水位與觀測資料之方均根誤差小於 0.2 公尺，而平均方均根誤差大於 0.2 公尺的測站有石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、澎湖、金門、馬祖等站。

暴潮總水位之偏差量值分析中，黑色實線為偏差量值為 0 之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為高估或低估之情形。各理想風場模式的暴潮總水位偏差量值在各測站中皆落於 ± 0.2 公尺內。各模式在同一測站之偏差量值差距介於 0.05 至 0.2 公尺間，顯示選用不同理想風場模式將會對上述測站之預報結果的確會產生分歧。各模式預報結果普遍高估的測站分布主要位於台灣東北部測站而預報結果普遍低於預期的測站則大部分位於台灣西部、西南部及部分離島測站。偏差量值明顯分歧的測站中，CWB 模式在台灣北部、東部、西北部、南部及部分離島地區之表現明顯偏離其他理想風場模式所得之預報結果，有明顯低估情形。J92 模式則在西南部地區有有明顯低估情形。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，難以判斷何種模式站最佳表現之多數。

暴潮總水位之相關係數分析中，橫軸繪製範圍為 60%至 100%。圖中紅線為 70%基準線，協助判斷模式預報結果正相關之程度。各理想風場模式對各測站的

暴潮總水位之相關係數落於 90%以上，皆屬於高度相關，主要因為暴潮總水位之主要成分為潮汐水位。各模式在同一測站之相關係數差距範圍最大不超過 5%。視覺化展示中，各模式於各測站表現皆相近，難以判斷何種模式表現為最佳。

表 4—15 至表 4—17 展示本次預報中，表現最佳/最差之理想風場模式及該模式對應之表現最佳/最差測站數，資料展示類型包含暴潮偏差 (Storm Surge) 與暴潮總水位 (Storm Tide)。左側欄位為模式代號，依序為 CWB、H80、J92、W06 及 E11，右側欄位則標註對應模式在所有預報點中表現最佳及最差之測站數，以此展示不同模式於本次預報之表現。

表 4—15 中展示方均根誤差資料之分析結果，以方均根誤差最低者為最佳，最高者則為最差之原則進行統計。其中，CWB 在暴潮偏差中有最好之統計表現，而暴潮總水位之預報中以 E11 表現最佳，次佳者為 CWB。表現相對不如預期之理想風場模式主要為 H80 及 J92，兩種模式合計所占比例超過測站總數之半數。

表 4—16 中展示偏差量值資料分析結果，偏差量值以其絕對值最低者為最佳，最高者為最差之原則進行統計。其中 CWB 之暴潮偏差與暴潮總水位預報資料皆有最佳之表現，則以其為最佳表現之測站分別有 13 及 11 個。表現相對不如預期者主要為 H80 模式，在暴潮偏差與暴潮總水位預報中分別在 13 及 10 站有最大之偏差值。

表 4—17 中展示相關係數資料分析結果，而相關係數資料以最高者為佳，最低者為最不理想之原則進行統計。其中，E11 在暴潮偏差與暴潮總水位之預報中，皆有最好之統計表現，最佳表現之測站數分別為 14 及 12 站。表現相對不如預期之理想風場模式則為 J92 等模式，在暴潮偏差與暴潮總水位之預報中，分別有 11 及 12 站有最低之相關係數。

綜合評估表 4—15 至表 4—17 中，利用表現最佳測站數與最不如預期之測站數進行分數加總，本次預報中於暴潮偏差與暴潮總水位資料之綜合表現最佳之理想風場模式為 CWB 模式，其餘模式表現次佳者依序為 W06、E11、J92 及 H80。

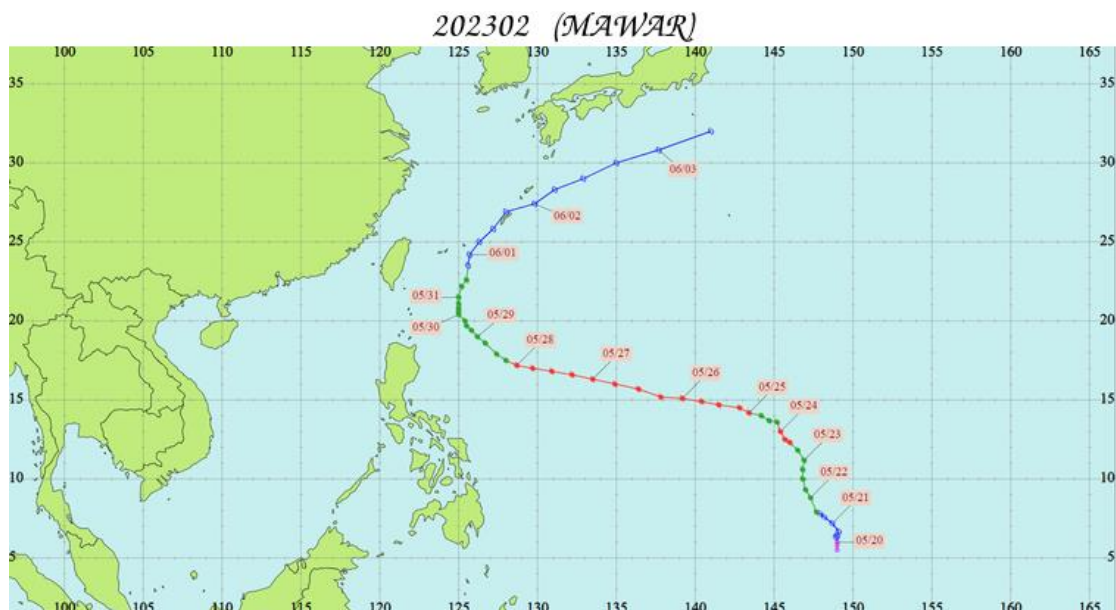


圖 4—46 颱風瑪娃 (MAWAR) 生命期間路徑圖 (資料來源：颱風資料庫)

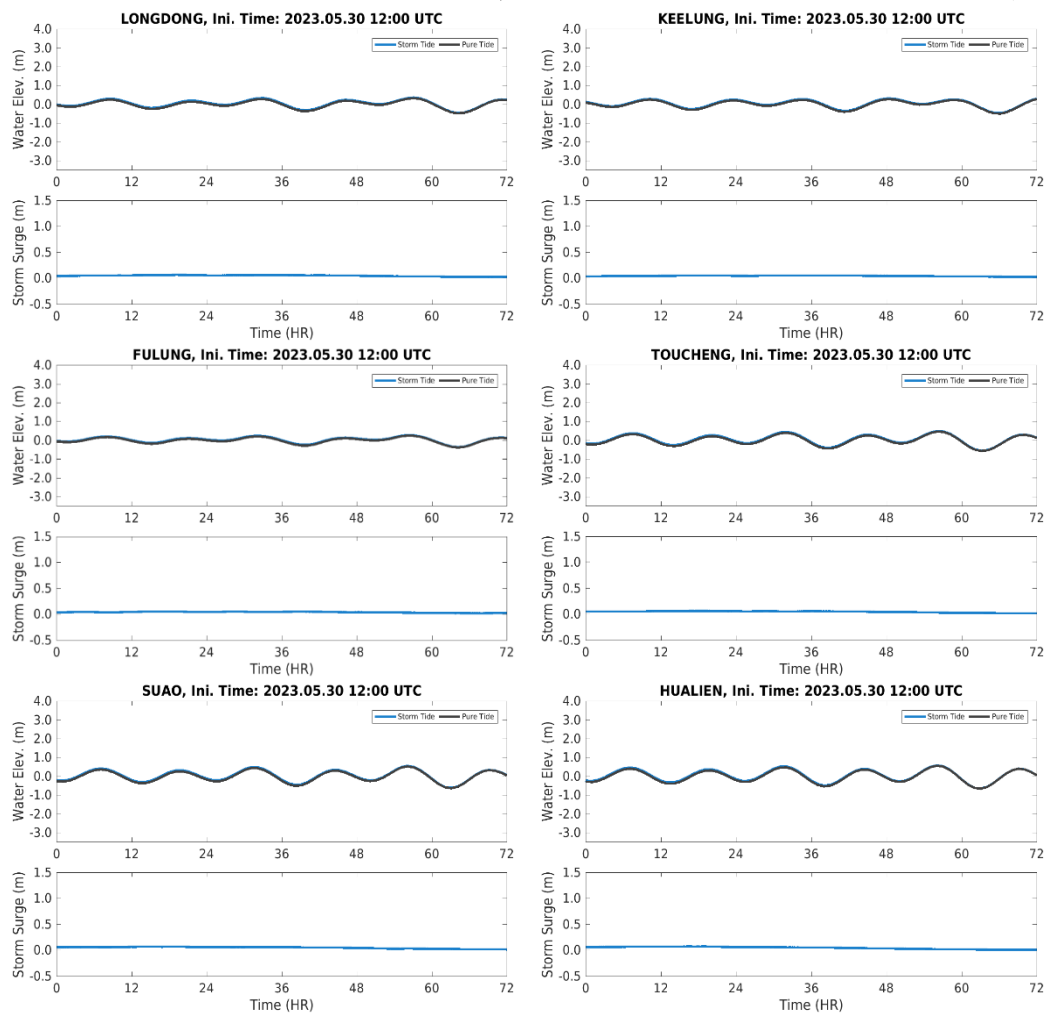


圖 4—47 颱風暴潮決定性預報系統之水位預報結果
(上圖為暴潮總水位與潮汐水位，下圖為暴潮偏差水位)

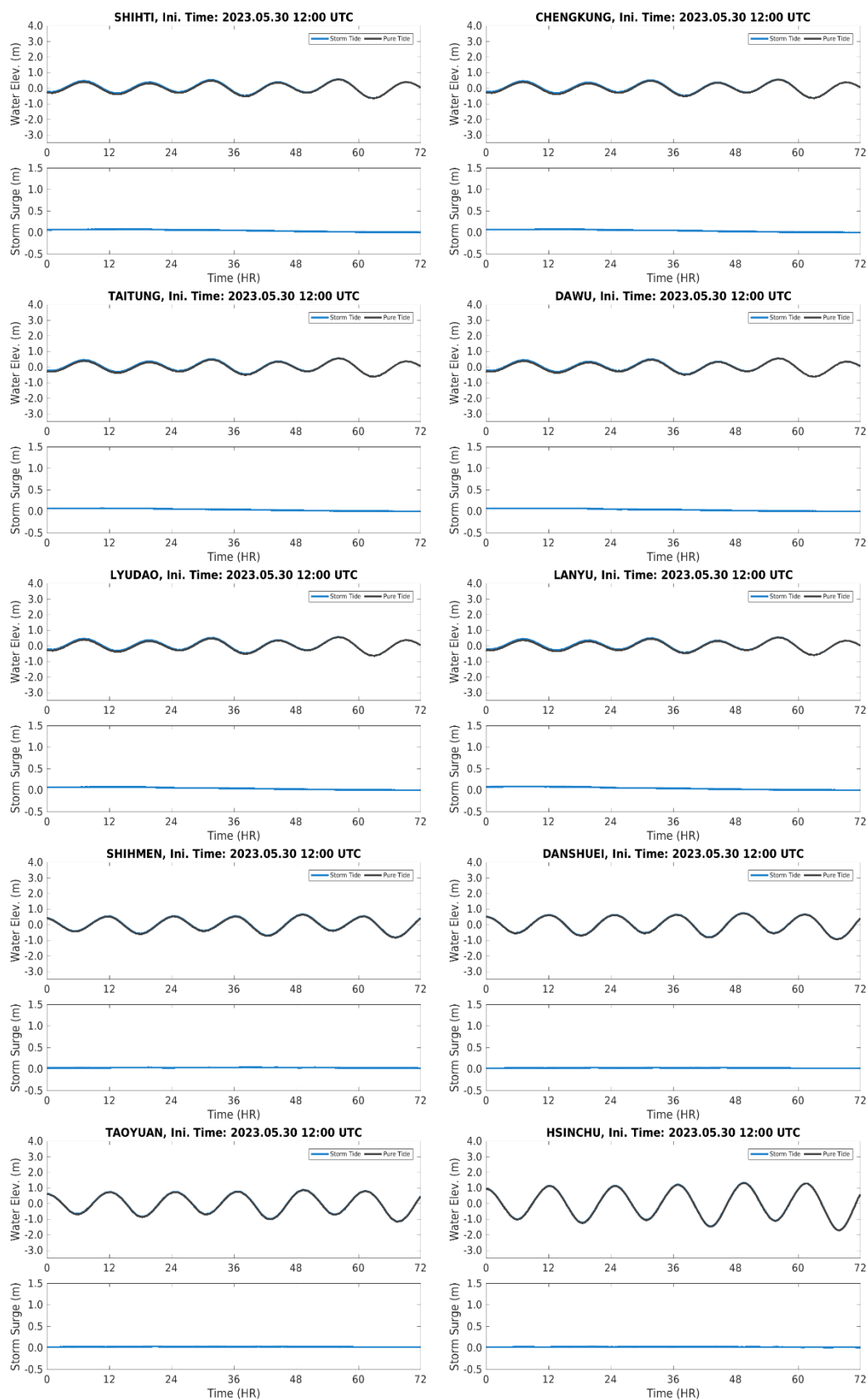


圖 4—48 颱風暴潮決定性預報系統之水位預報結果
(上圖為暴潮總水位與潮汐水位，下圖為暴潮偏差水位)

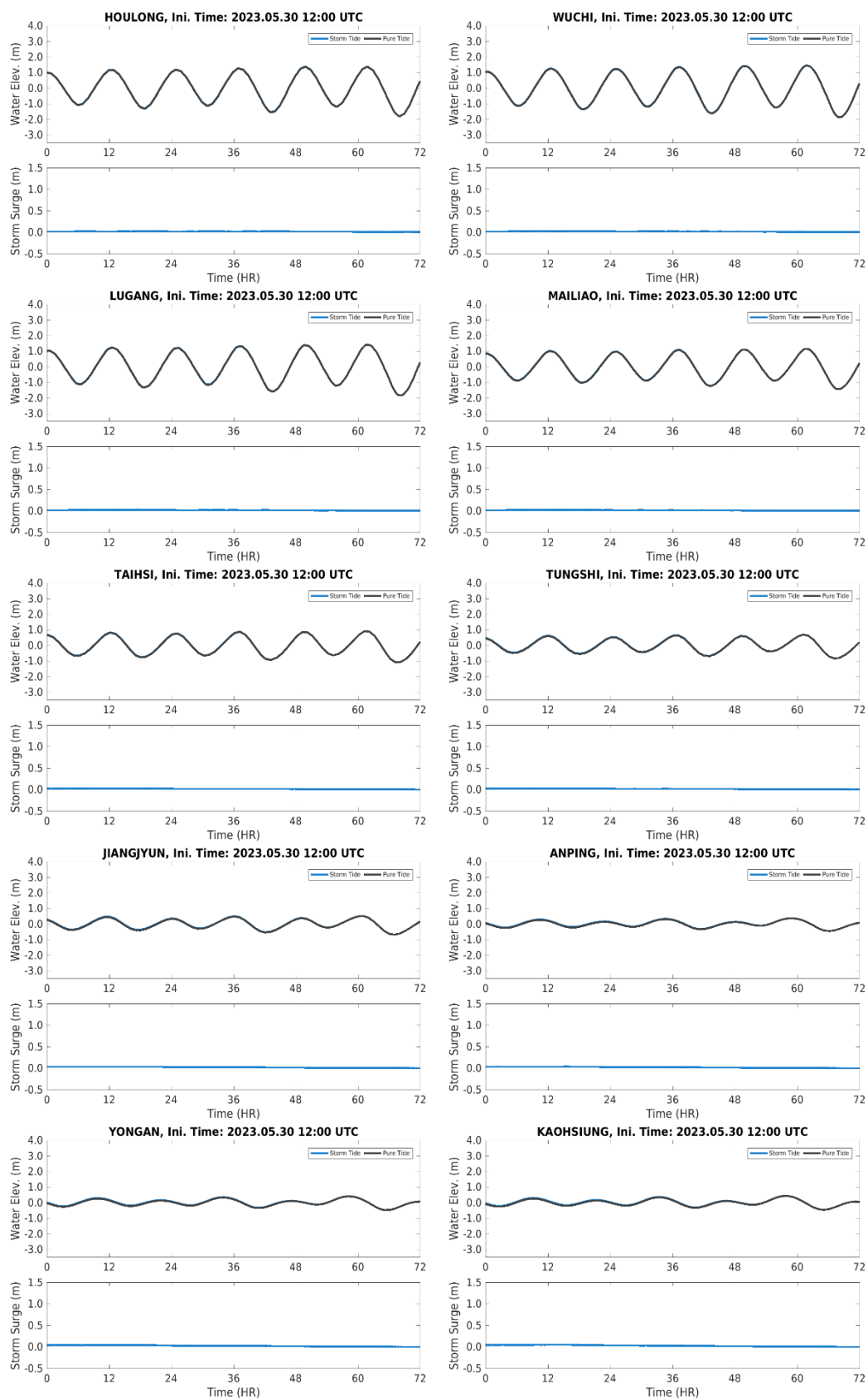


圖 4—49 颱風暴潮決定性預報系統之水位預報結果
(上圖為暴潮總水位與潮汐水位，下圖為暴潮偏差水位)

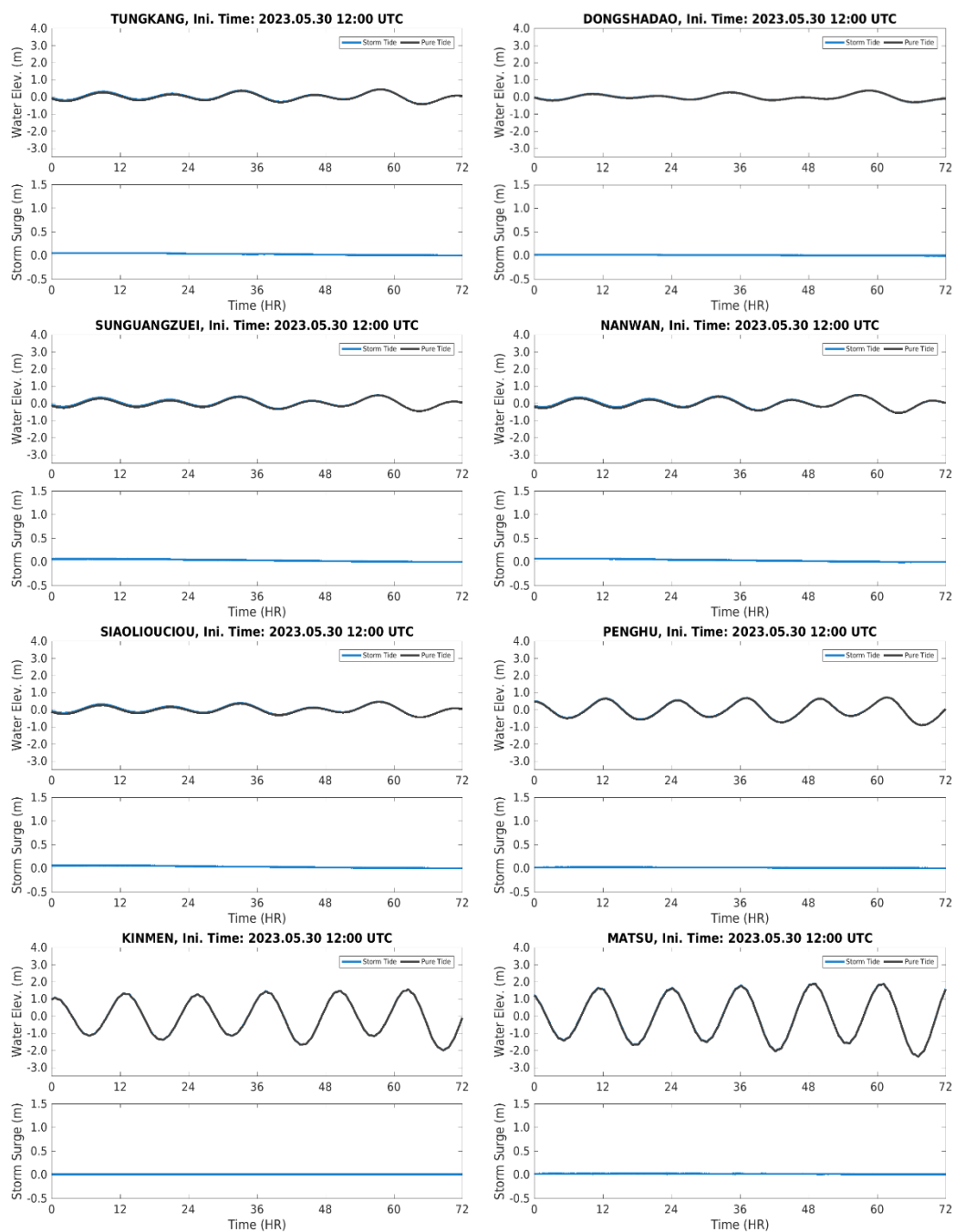


圖 4—50 颱風暴潮決定性預報系統之水位預報結果
(上圖為暴潮總水位與潮汐水位，下圖為暴潮偏差水位)



圖 4—51 各理想風場模式暴潮偏差水位預報圖



圖 4—52 各理想風場模式暴潮偏差水位預報圖

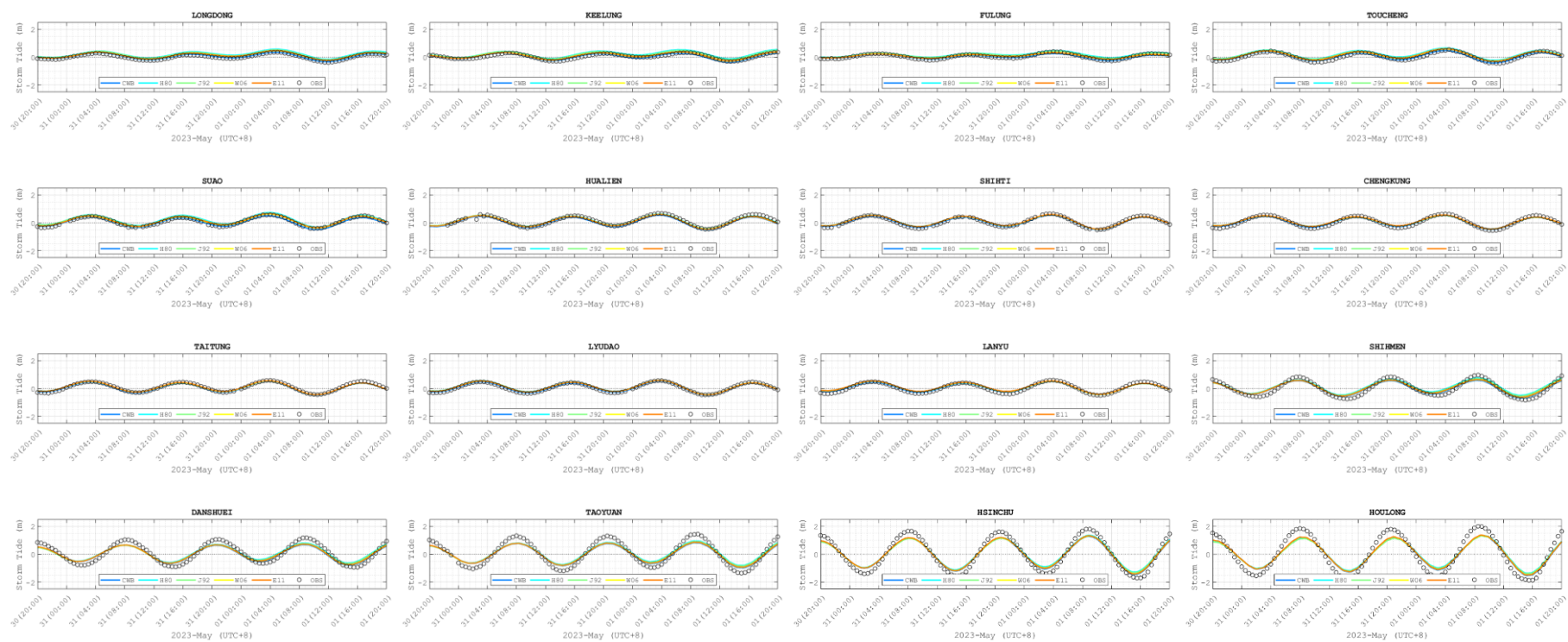


圖 4—53 各理想風場模式暴潮總水位預報圖

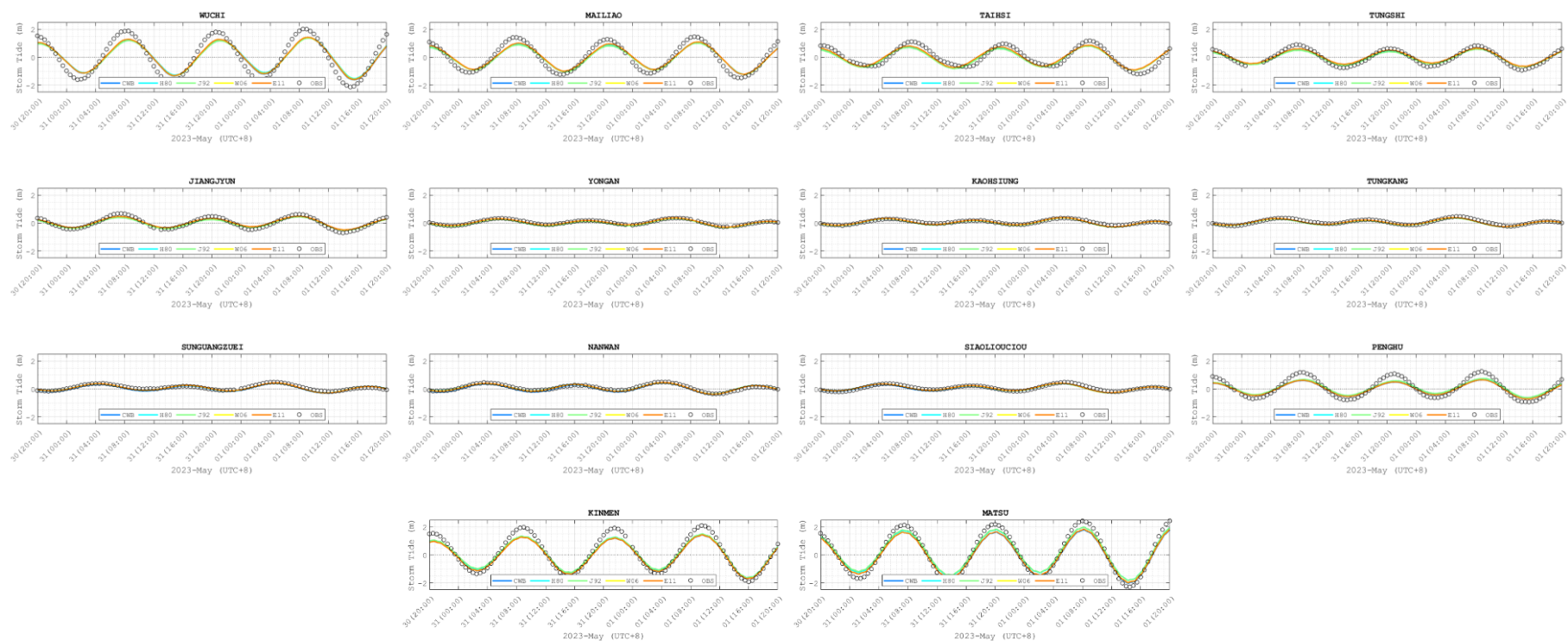


圖 4—54 各理想風場模式暴潮總水位預報圖

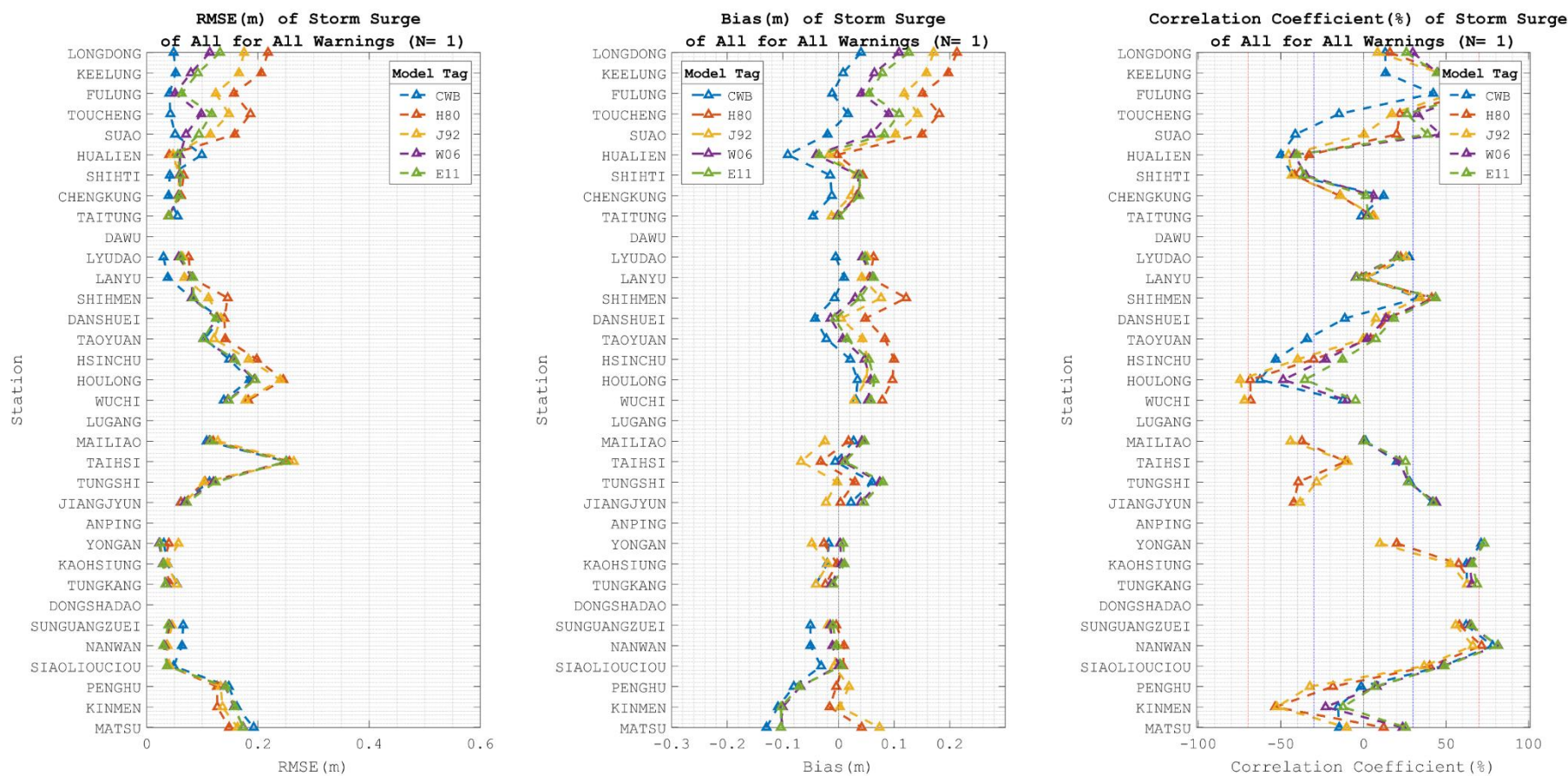


圖 4—55 各理想風場模式於本次示範案例中各測站之預報暴潮偏差所得之統計參數

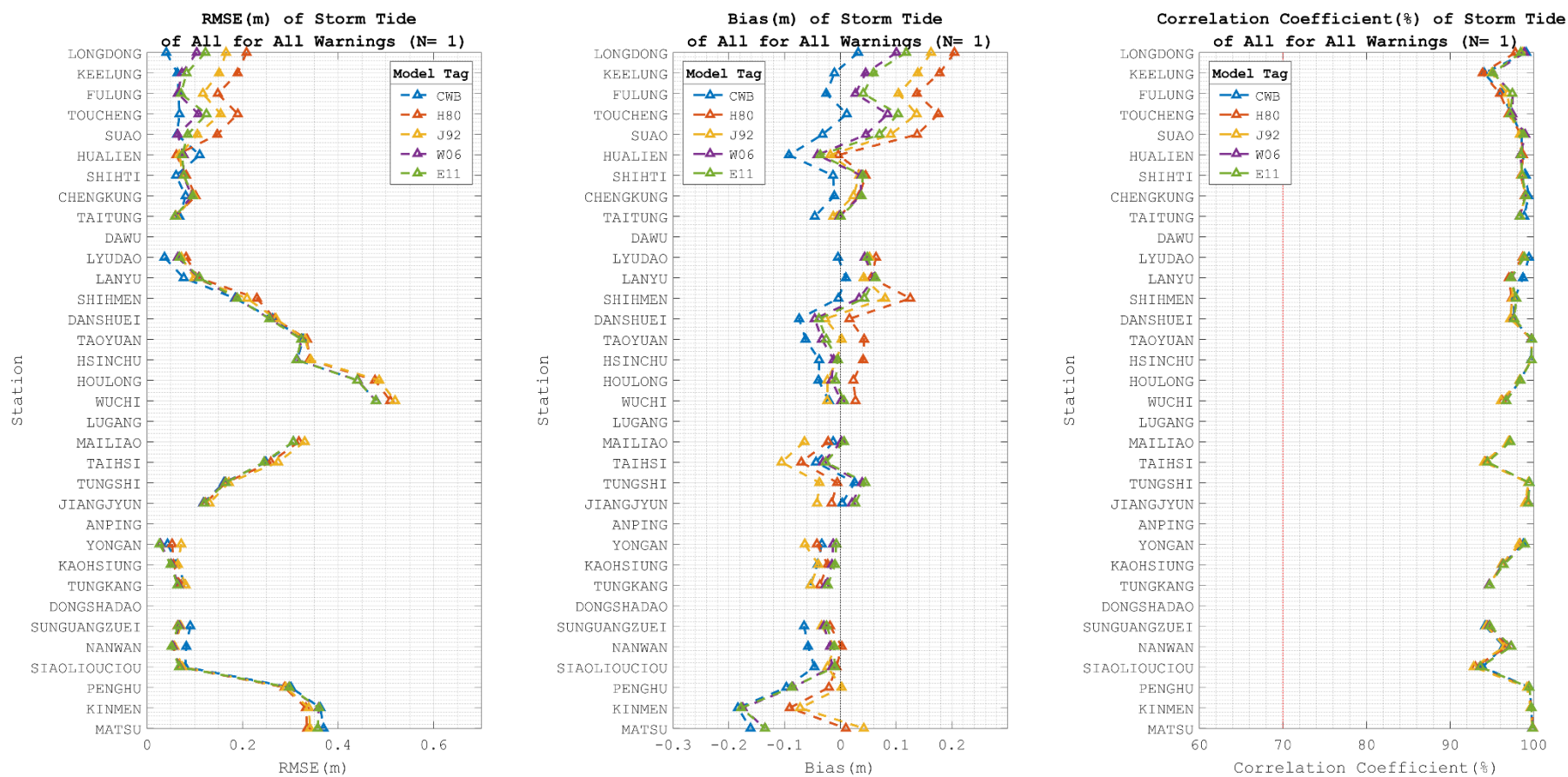


圖 4—56 各理想風場模式於本次示範案例中各測站之預報暴潮總水位所得之統計參數

表 4—15 各理想風場模式之表現與對應測站數（方均根誤差）

Storm Surge			Storm Tide		
MODEL	BEST NUM	WORST NUM	MODEL	BEST NUM	WORST NUM
CWB	15	6	CWB	10	4
H80	5	14	H80	5	10
J92	1	3	J92	0	11
W06	4	0	W06	2	0
E11	5	7	E11	12	5

表 4—16 各理想風場模式之表現與對應測站數（偏差量值）

Storm Surge			Storm Tide		
MODEL	BEST NUM	WORST NUM	MODEL	BEST NUM	WORST NUM
CWB	13	6	CWB	11	9
H80	7	13	H80	7	10
J92	5	2	J92	3	4
W06	3	0	W06	2	0
E11	2	9	E11	7	7

表 4—17 各理想風場模式之表現與對應測站數（相關係數）

Storm Surge			Storm Tide		
MODEL	BEST NUM	WORST NUM	MODEL	BEST NUM	WORST NUM
CWB	5	8	CWB	10	1
H80	2	5	H80	2	11
J92	1	11	J92	0	12
W06	8	2	W06	6	2
E11	14	4	E11	12	4

4-4-2 陸上警報案例展示

由於本年度計畫執行期間無發布陸上颱風警報，為展示預報系統於颱風登陸時之預報能力，故本節選用 2016 年中度颱風梅姬 (MEGI) 之歷史陸上警報案例展示各理想風場模式於預報中之表現，其生命期間路徑圖展示於圖 4—46，來自颱風資料庫。圖中顯示颱風於生命期間路徑圖，每 6 小時一筆之路徑與強度資料，圖檔資料顯示時間為 UTC。梅姬颱風發布海警期間為 2016 年 09 月 25 日 23 時 30 分，並且於 2016 年 09 月 26 日 11 時 30 分發布陸上颱風警報。於颱風發展期間，颱風最低中心氣壓為 940 百帕，近中心最大風速為 45 公尺/秒，7 級暴風半徑為 250 公里，於台灣颱風強度分類中屬中颱，國際強度分類中屬非常強的颱風 (Very Strong Typhoon)。本次研究中選用 2016 年 09 月 26 日 14 時作為展示用預報範例。於本次預報中，警報分類屬於陸上颱風警報，且預報期間颱風近中心最大風速屆於 30-45 公尺/秒，平均風速為 39.45 公尺/秒，平均強度屬於颱風 (Typhoon)，故於預報作業中應選用 CWB 作為指定預報用理想風場模式，本節將利用系集預報系統選用各理想風場模式作為系集成員，展示 CWB 模式與其他理想風場模式於本次預報資料中之表現差異。

圖 4—58 至圖 4—61 為利用暴潮系集預報系統執行之預報水位校驗示意圖。本次系集預報系統選用之系集成員為各理想風場模式，圖 4—58 至圖 4—59 展示暴潮偏差水位預報結果，圖 4—60 至圖 4—61 展示暴潮總水位預報結果。產品展示之預報資料起始時間為 2023 年 09 月 26 日 14 時，橫軸為預報區間，縱軸為水位高度，單位為公尺。不同色線對應不同理想風場模式所得之預報結果，黑色圓圈表示校驗對象，於暴潮偏差產品中為潮位站觀測值扣除氣象署作業中之調和分析潮汐預報水位；暴潮總水位產品中為潮位站之觀測資料。

暴潮偏差產品圖中，可以看到各模式在本次預報期間於台灣各地皆有明顯分歧。北部、東北部、西南部及部分離島測站中，E11 之預報結果得到最大之暴潮偏差值，訊號為 0.2 公尺至 0.6 公尺不等，且 H80、J92 等模式與之表現相近。西

北部地區測站與金門站中，CWB 之預報水位相對其他模式平緩，且其他模式於預報期間後期會得到負暴潮偏差水位；於觀測資料方面，受限於觀測資料之水位殘差值有明顯周期性震盪情形，無法輕易從觀測資料中辨識是否有暴潮訊號。南部地區測站中如東石、永安、高雄、東港等，由於觀測資料於預報後半區間有缺失情形，故預報期間之水位偏差無資料可供校驗。

暴潮總水位產品圖中，大部分測站之預報水位與觀測水位比對結果良好，但西北部及離島部分測站如石門、淡水、桃園、新竹、後龍、麥寮、台西、東石、金門等站之水位預報結果與觀測水位有較明顯之預報誤差，誤差值最大可達 0.4 公尺。鑒於利用其他地區測站之觀測資料，梅姬颱風於此預報區間對台灣西部各地測站之水位影響時段為起始預報時間起第 24 小時之後，而總水位預報誤差於預報時間起第 24 小時內就已經存在，因此上述測站之誤差較有可能源自潮汐預報之誤差，該類型誤差可能源自港內外地形特徵，導致測站長期觀測資料特性並不能夠以天文潮物理完整描述。

圖 4—62 至圖 4—63 展示各理想風場模式執行所有颱風預報資料後所得預報水位與觀測資料之統計校驗結果，各圖中橫軸標記統計參數值，縱軸對應測站名稱，圖中色線表示不同理想風場模式結果於該測站觀測資料比對後所得之統計參數，依序為方均根誤差、偏差量值與相關係數。圖 4—62 展示暴潮偏差統計資料，圖 4—63 展示暴潮總水位統計資料。其中龍洞、福隆、鹿港、安平、東沙島、澎湖及馬祖測站於本次預報期間無有效觀測資料，故自本研究分析中排除，故研究中有效可供分析之測站合計為 29 站。

暴潮偏差之方均根誤差分析中，各理想風場模式所得之結果皆落於 0.5 至 0.8 公尺間。大部分之測站表現以 CWB 模式為佳，J92 與 E11 則在多數測站中有較高之方均根誤差。大部分測站之模擬水位與觀測資料之方均根誤差小於 0.2 公尺，而有部分模式之平均方均根誤差大於 0.2 公尺的測站主要位於西北部集部分離島地區如淡水、桃園、新竹、後龍、麥寮、台西及金門等站。理想風場模式的變化對北部、西北部及部分離島測站有較顯著的差異，不同模式選項可以導致方均根

誤差之差距範圍落於 0.05 至 0.2 公尺。

暴潮偏差之偏差量值分析中，黑色實線為偏差量值為 0 之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為高估或低估之情形。各理想風場模式的暴潮偏差偏差量值在各測站中皆落於 ± 0.5 公尺內。各模式在同一測站之偏差量值差距介於 0.05 至 0.3 公尺間，顯示選用不同理想風場模式於本次預報中對所有測站之預報結果的確會產生分歧。各模式預報結果普遍高估的測站分布主要位於台灣東北部地區及台中、南灣等測站；預報結果普遍低於預期的測站則大部分位於西北部及台中以外之西部測站、西南部測站及金門測站。偏差量值明顯分歧的測站中，CWB 模式之表現明顯偏離其他理想風場模式所得之預報結果，於東部地區及南部地區有明顯低估情形，J92 模式則在西北部及西部地區有有明顯低估情形。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，以 CWB 為表現最佳模式之測站為主要多數。

暴潮偏差之相關係數分析中，各圖繪製範圍為-100%至 100%以利於視覺化比較不同強度間各測站之變化情形。一般普遍認為，相關係數 30%以下為低相關，30%至 70%為中等相關，70%以上為高度相關。圖中黑色實線為相關係數 0%之基準線，協助判斷模式預報結果普遍為正相關或負相關之情形。藍線為 30%基準線，紅線為 70%基準線，分別協助判別低、中、高度相關情形。各理想風場模式對各測站的暴潮偏差相關係數分布並無規律。各模式在同一測站之相關係數差距範圍最大落差範圍超過 100%，為高度正相關及高度負相關之差距，顯示選用不同之理想風場模式對於模式預報結果在各測站之表現有極大的影響。視覺化展示中多數測站相關係數為正且最高之模式為 E11，其次為 W06。

暴潮總水位之方均根誤差分析中，各理想風場模式所得之結果落於 0.1 至 0.* 公尺間。大部分之測站表現以 CWB 模式為佳，而各模式在同一測站之方均根誤差差距落於 0.05 至 0.3 公尺。大部分測站之模擬水位與觀測資料之方均根誤差小於 0.2 公尺，而平均方均根誤差大於 0.2 公尺的測站有石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、麥寮、台西、金門等站。

暴潮總水位之偏差量值分析中，黑色實線為偏差量值為 0 之基準線，協助判

斷模式預報結果普遍為高估或低估之情形。各理想風場模式的暴潮總水位偏差量值在各測站中皆落於 ± 0.5 公尺內。各模式在同一測站之偏差量值差距介於 0.05 至 0.3 公尺間，顯示選用不同理想風場模式將會對上述測站之預報結果的確會產生分歧。各模式預報結果普遍低於預期的測站則大部分位於台灣東部、西北部、西南部及金門測站。偏差量值明顯分歧的測站中，CWB 模式在台灣北部、東部、西南部地區之表現明顯偏離其他理想風場模式所得之預報結果，有明顯低估情形。J92 模式則在西北部及西部地區有有明顯低估情形。視覺化展示中各測站表現最佳之理想風場模式不一，難以判斷何種模式站最佳表現之多數。

暴潮總水位之相關係數分析中，橫軸繪製範圍為 60%至 100%。圖中紅線為 70%基準線，協助判斷模式預報結果正相關之程度。各理想風場模式對各測站的暴潮總水位之相關係數落於 80%以上，皆屬於高度相關，主要原因為暴潮總水位之主要成分為潮汐水位。各模式在同一測站之相關係數差距範圍最大不超過 10%。視覺化展示中，主要以 CWB 模式表現最佳，而 J92 與 E11 於各測站之相關係數表現明顯較低。

表 4—18 至表 4—20 展示本次預報中，表現最佳/最差之理想風場模式及該模式對應之表現最佳/最差測站數，資料展示類型包含暴潮偏差 (Storm Surge) 與暴潮總水位 (Storm Tide)。左側欄位為模式代號，依序為 CWB、H80、J92、W06 及 E11，右側欄位則標註對應模式在所有預報點中表現最佳及最差之測站數，以此展示不同模式於本次預報之表現。

表 4—18 中展示方均根誤差資料之分析結果，以方均根誤差最低者為最佳，最高者則為最差之原則進行統計。其中，CWB 在暴潮偏差與暴潮總水位中有最好之統計表現，表現次佳者為 W06。表現相對不如預期之理想風場模式主要為 J92 及 E11，兩種模式合計所占比例超過測站總數之半數。

表 4—19 中展示偏差量值資料分析結果，偏差量值以其絕對值最低者為最佳，最高者為最差之原則進行統計。其中 CWB 之暴潮偏差與暴潮總水位預報資料皆有最佳之表現，則以其為最佳表現之測站分別有 19 及 18 個。表現相對不如

預期者主要為 E11 模式，在暴潮偏差與暴潮總水位預報中皆有 11 站有最大之偏差值。

表 4—20 中展示相關係數資料分析結果，而相關係數資料以最高者為佳，最低者為最不理想之原則進行統計。其中，CWB 在暴潮偏差與暴潮總水位之預報中，皆有最好之統計表現，最佳表現之測站數分別為 27 及 25 站。表現相對不如預期之理想風場模式則為 J92 與 E11 等模式，在暴潮偏差與暴潮總水位之預報中，分別有 21 及 18 站有最低之相關係數。

綜合評估表 4—18 至表 4—20 中，利用表現最佳測站數與最不如預期之測站數進行分數加總，本次預報中於暴潮偏差與暴潮總水位資料之綜合表現最佳之理想風場模式為 CWB 模式，其餘模式表現次佳者依序為 W06、H80、J92 及 E11。

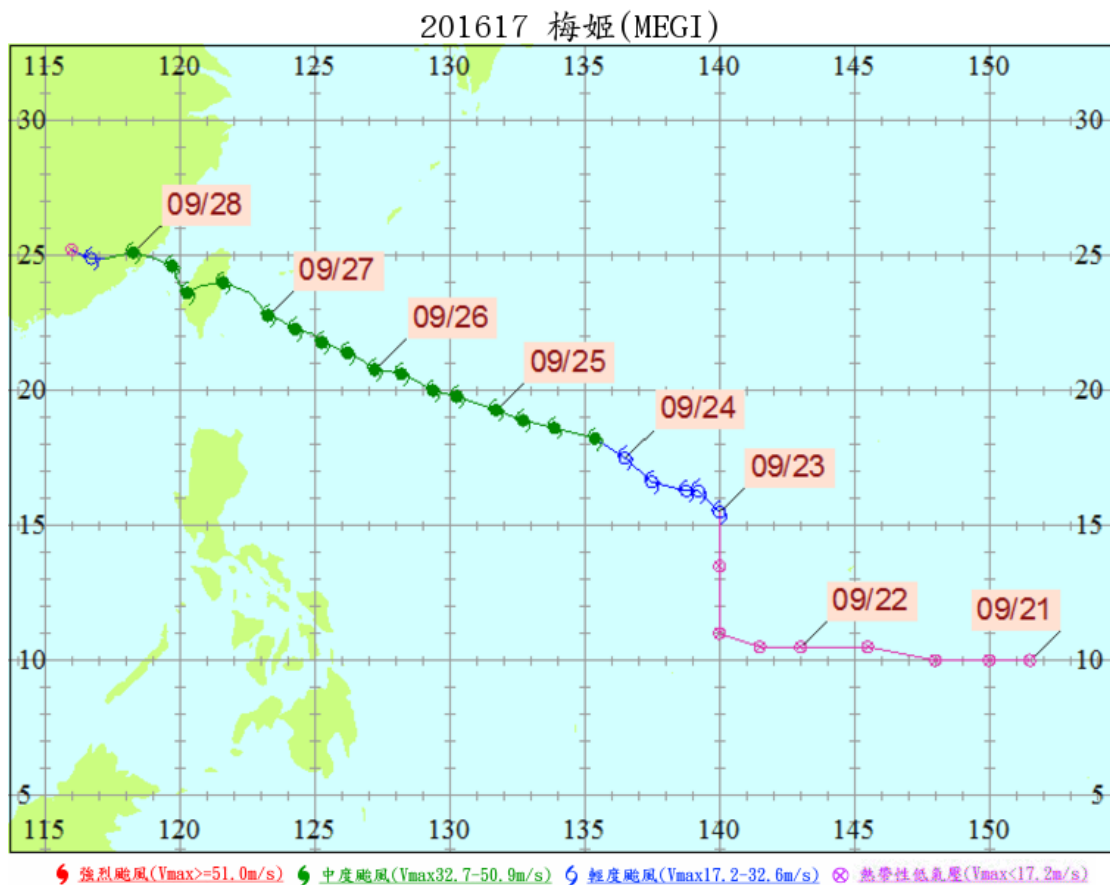


圖 4—57 颱風梅姬 (MEGI) 生命期間路徑圖
(資料來源：颱風資料庫)

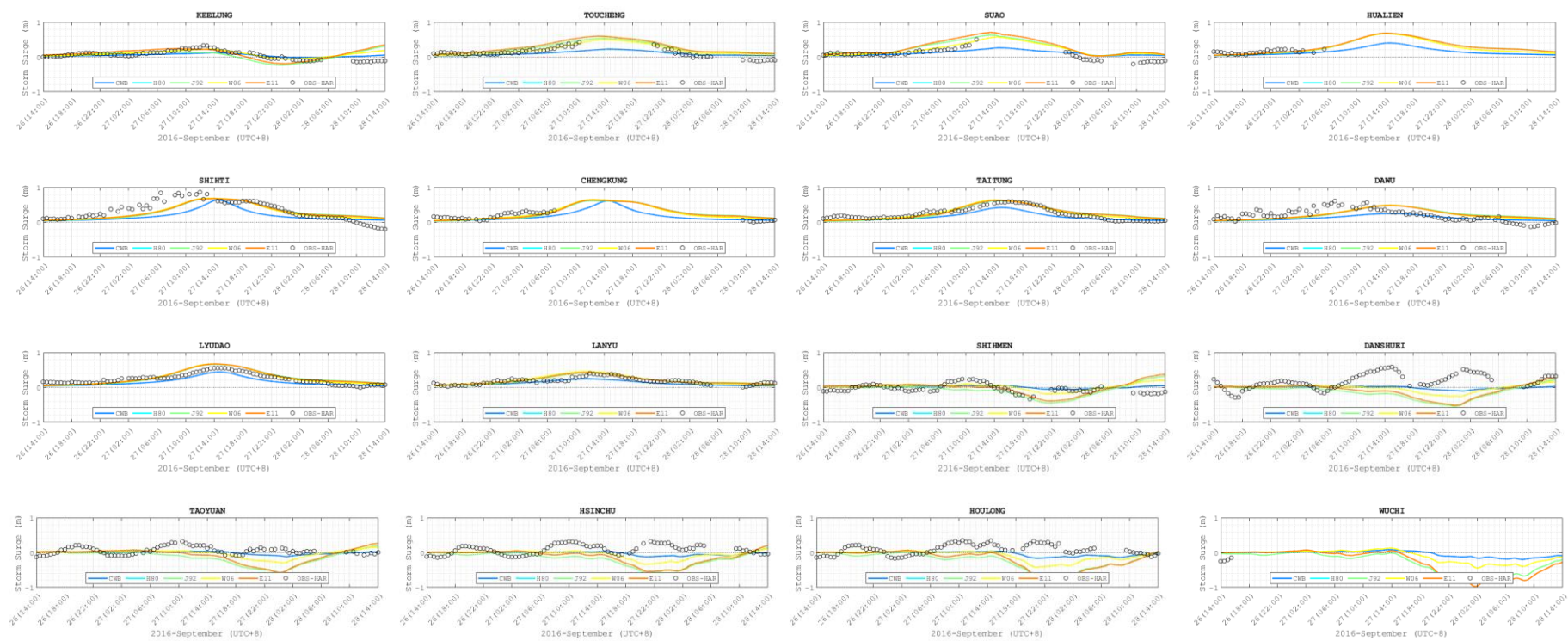


圖 4—58 各理想風場模式暴潮偏差水位預報圖

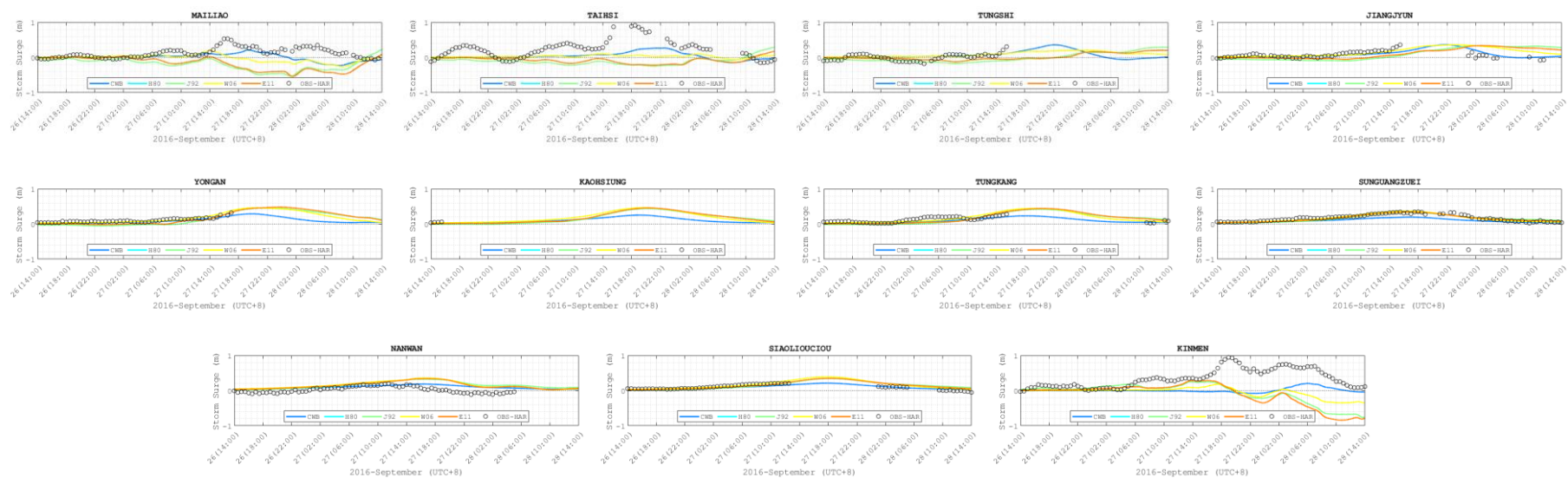


圖 4—59 各理想風場模式暴潮偏差水位預報圖

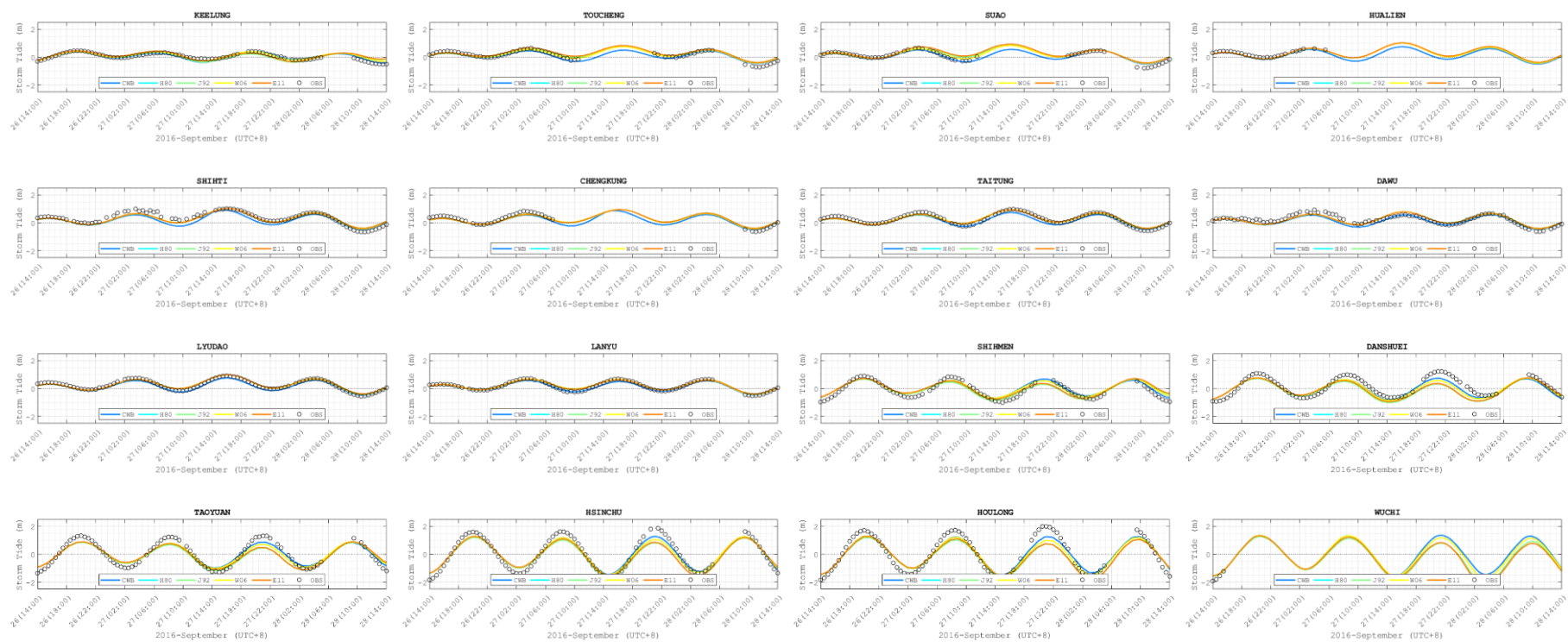


圖 4—60 各理想風場模式暴潮總水位預報圖

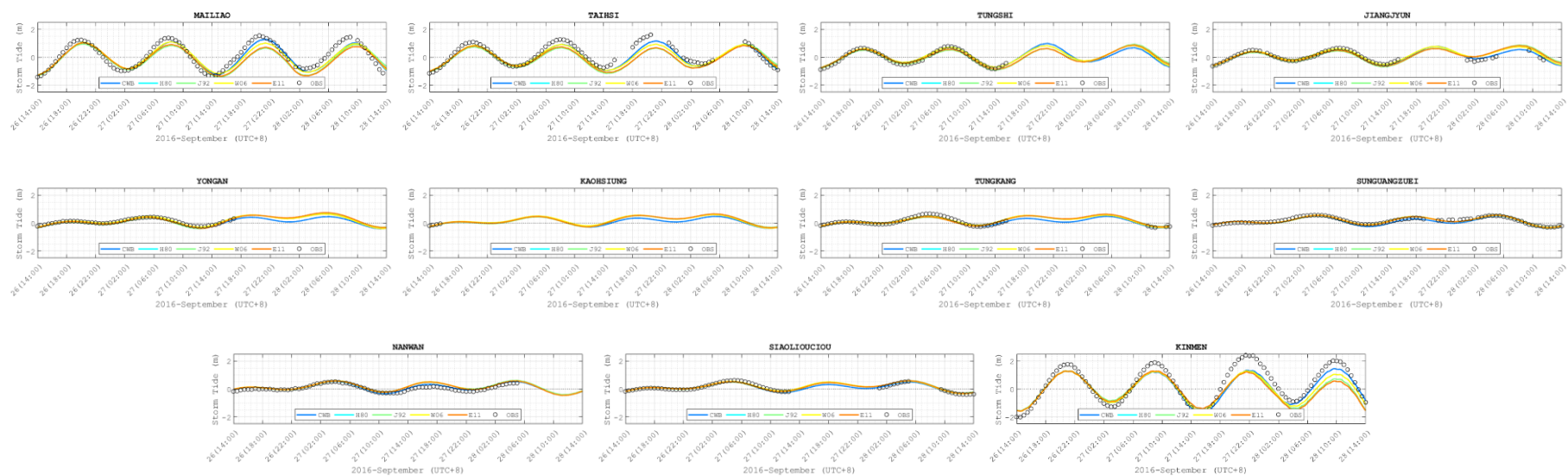


圖 4—61 各理想風場模式暴潮總水位預報圖

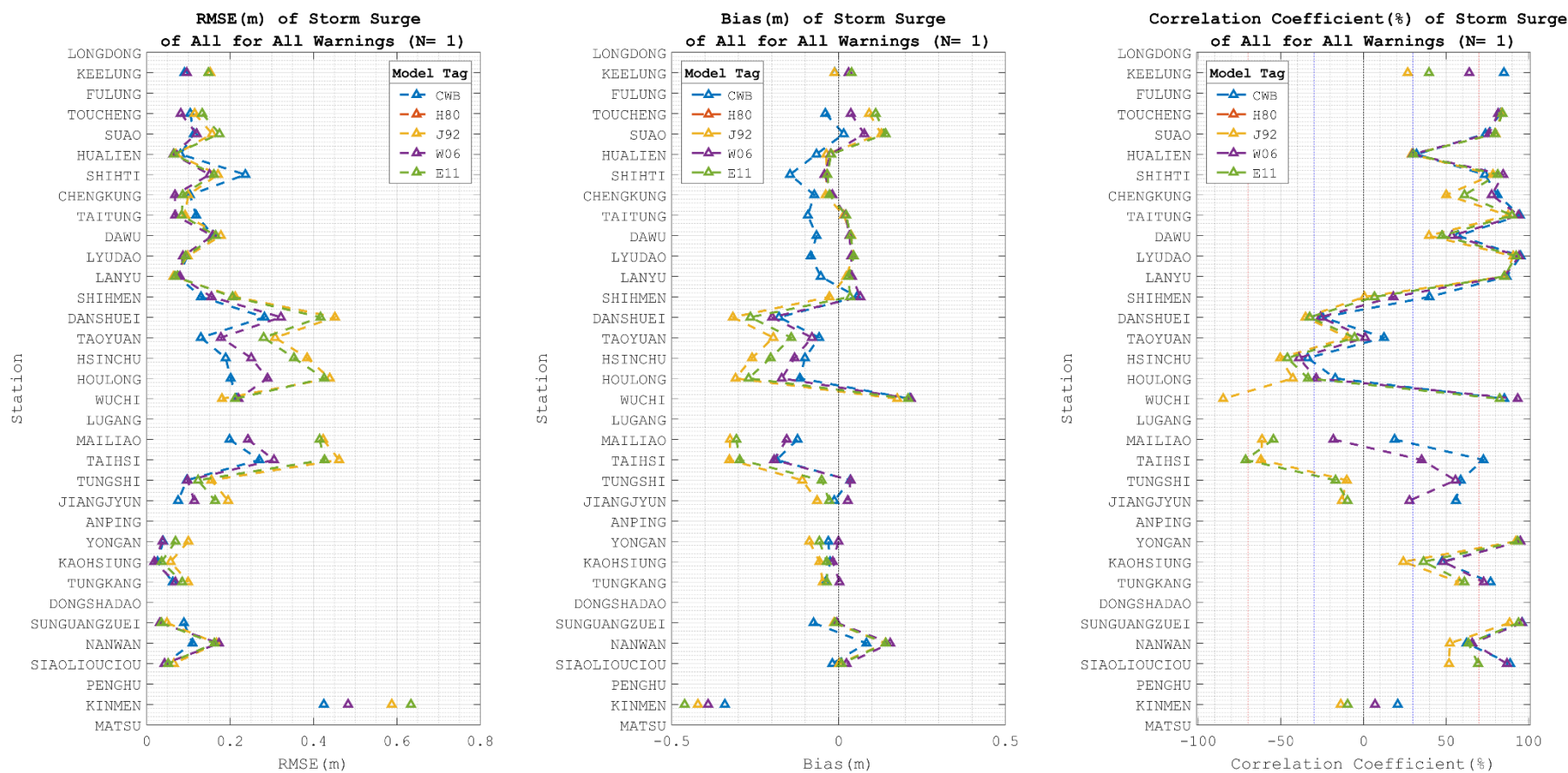


圖 4—62 各理想風場模式於本次示範案例中各測站之預報暴潮偏差所得之統計參數

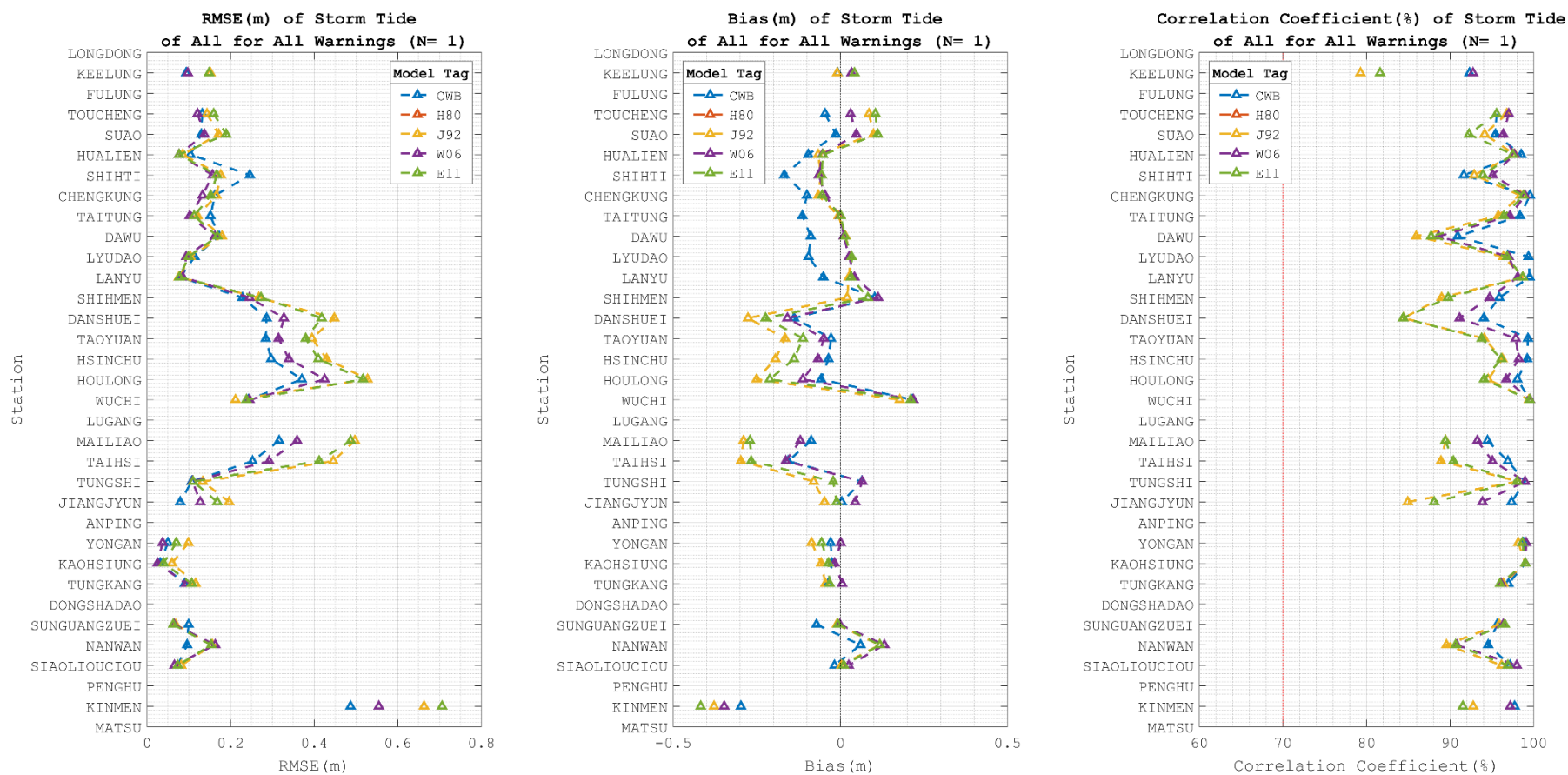


圖 4—63 各理想風場模式於本次示範案例中各測站之預報暴潮偏差所得之統計參數

表 4—18 各理想風場模式之表現與對應測站數（方均根誤差）

Storm Surge			Storm Tide		
MODEL	BEST NUM	WORST NUM	MODEL	BEST NUM	WORST NUM
CWB	22	5	CWB	21	5
H80	0	0	H80	1	0
J92	2	16	J92	2	15
W06	10	3	W06	10	3
E11	0	10	E11	0	11

表 4—19 各理想風場模式之表現與對應測站數（偏差量值）

Storm Surge			Storm Tide		
MODEL	BEST NUM	WORST NUM	MODEL	BEST NUM	WORST NUM
CWB	19	8	CWB	18	8
H80	2	0	H80	3	0
J92	5	11	J92	4	11
W06	8	4	W06	9	4
E11	0	11	E11	0	11

表 4—20 各理想風場模式之表現與對應測站數（相關係數）

Storm Surge			Storm Tide		
MODEL	BEST NUM	WORST NUM	MODEL	BEST NUM	WORST NUM
CWB	27	2	CWB	25	3
H80	1	0	H80	1	0
J92	1	21	J92	0	12
W06	5	1	W06	8	1
E11	0	10	E11	0	18

第5章、暴潮預報系統預報效能提昇評估

5-1 簡介

中央氣象署現有之 COMCOT 暴潮預報系統，擁有兩種版本之系統軟體程式，其中一種以 Matlab 程式語言銜接 COMCOT 暴潮模式以及預報作業系統，另一種為 109 年度委託研究計畫「氣象署暴潮預報溢淹模式精進」計畫中，以 Python 程式語言重新撰寫之暴潮預報系統。由於 Matlab 為商業軟體，於更新程式版本時需要高昂的授權費用，且可移植性較低，於轉移作業平台時通常需要額外安裝其他工具才能在其他作業平台順利執行。此外，由於使用該程式語言的社群多屬學術研究方面，通常無法在社群外得到廣泛的支援。故本團隊於 109 年度委託研究計畫「氣象署暴潮預報溢淹模式精進」計畫中，利用不須授權費用、轉移平台相對彈性且具有強大使用者社群的 Python 程式語言重新撰寫之暴潮預報系統，並於該年度計畫中完成系統測試。

暴潮預報系統中可以選用兩種不同之氣象場輸入來源，其中一種為利用颱風警報單紀錄之預報參數生成理想風場作為氣象輸入場，另一種則以二維大氣模式 TWRf (Typhoon WRF) V2 為氣象輸入場。

若以理想風場作為氣象輸入場，預報系統將依據颱風警報單中之颱風預估強度選用合適的理想風場，目前可供選用的理想風場選項包含 Holland (1980)、Jelesnianski et al (1992)、Willoughby et al (2006)、Emanuel and Rotunno (2011)，搭配原有作業中之氣象署理想風場模式，合計有五組，更為細節之比較與分析請參考第四章。

TWRf (Typhoon WRF) V2 為中央氣象署內作業預報用之大氣模式之一，模式網格之座標投影系統採藍伯特投影(Lambert)。模式之預報作業每日執行四次，分別為每日之 0000/0600/1200/1800 UTC，模式之初始場利用 3DVAR 資料同化技術將更多的即時觀測資料納入，並且利用 NCEP GFS 的分析場與 TWRf 相結合，

以改善天氣環流並保持模式內熱帶氣旋之結構平衡。COMCOT 暴潮預報系統所需讀取資料為 TWRf 2.0 模式提供之氣壓場 (SSL 檔頭)、經度風場向量 (B1020 檔頭)、及緯度風場向量 (B1021 檔頭)，將其轉換、內插為符合暴潮預報系統模式之網格資料，並代入統御方程式中之壓力梯度項與風剪力項，作為暴潮模式氣象場之驅動力。圖 5—1 為 TWRf V1 及 TWRf V2 版本之模式計算域範圍(Hsiao et al., 2020)，其中 TWRf V1 版本中三層巢狀網格的計算域，解析度依序為 45/15/5 公里；TWRf V2 版本中兩層巢狀網格的計算域分布，內外網格解析度分別為 15/3 公里。

目前兩種氣象輸入場版本之暴潮預報系統分別於指定機器執行預報作業：Matlab 版本於 IP 位址編號 157 機器執行以二維大氣模式 TWRf (Typhoon WRF) V2 為氣象輸入場之暴潮預報，IP 位址編號 234 機器執行以理想風場作為氣象輸入場之暴潮預報；而 Python 版本之兩種氣象輸入選項則分別於本計畫之 110 年度及 111 年重點工作項目中轉移至中央氣象署之叢集電腦平台 Intel-Cluster 並完成作業化，期待利用叢集式電腦強大之運算效能來提升預報效率。

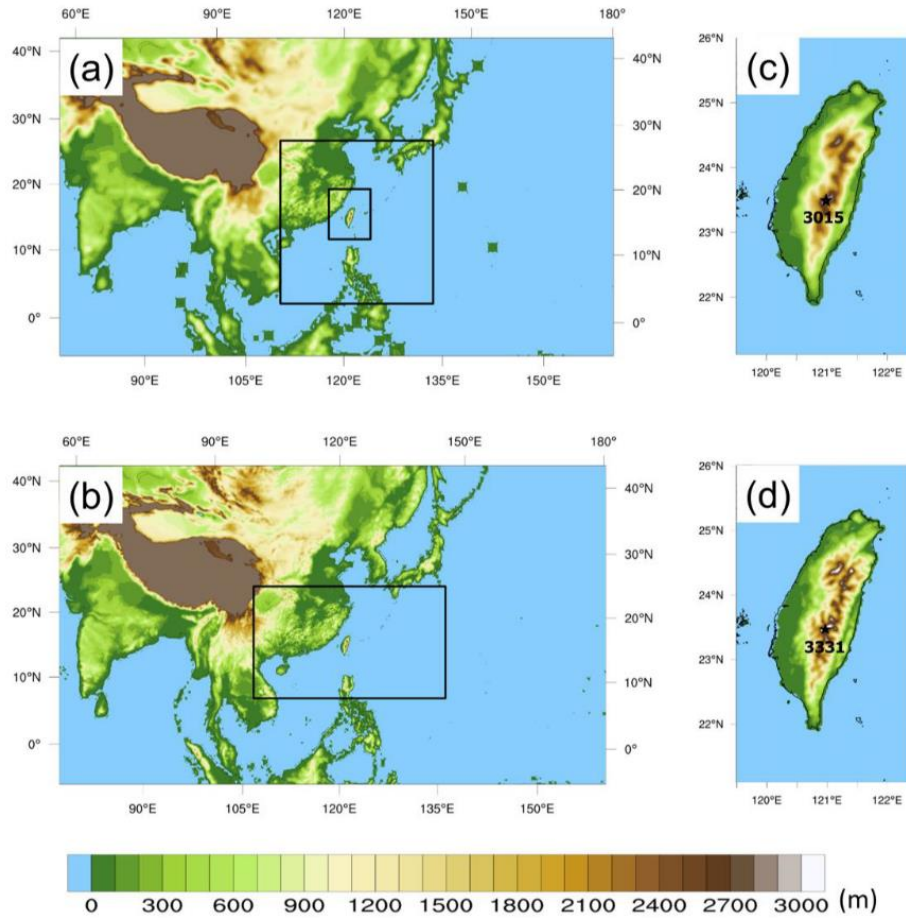


圖 5—1 (a) TWRP V1 版本中三層巢狀網格的計算域。

解析度依序為 45/15/5 公里；(b) TWRP V2 版本中兩層巢狀網格的計算域分布，內外網格解析度分別為 15/3 公里。(c,d) 分別以 V1 和 V2 的最內層計算域的解析度顯示地形高度。數字為出現在標記為星號的位置處的最大地形高度。(Hsiao et al., 2020)

5-2 暴潮預報系統各版本效能比較

預報系統於執行期間皆會產出記錄檔 (LOGFILE)，檔案內容主要記錄系統啟動時間及進入功能性模組的時間，其中包括讀取氣象輸入場資料、生成潮汐邊界、執行暴潮核心程式 (純潮汐驅動、潮汐與氣象力共同驅動) 以及模式資料後處理等。記錄檔之範例截圖如圖 5—2 至圖 5—5。於比較暴潮預報系統作業效能時，皆利用預報系統紀錄檔內所標註之功能性模組時間戳記判斷預報系統中各主要步驟所需之執行時間，精度以分鐘為單位。

針對颱風警報單作為氣象輸入之暴潮預報系統，兩種版本之預報效能詳細比較表整理如表 5—1。模式紀錄為求比較性一致，選用中度颱風海葵 (HAIKUI) 發布海警期間，即 9 月 1 日 20 時至 9 月 5 日 8 時之紀錄檔資料內容進行比對，紀錄檔起始紀錄截圖如圖 5—2 及圖 5—3。記錄檔中會於預報系統執行時登錄氣象輸入場的選項 (Parametric Typhoon Model 指理想風場)、預報時間 (預報模擬的初始時間)、執行緒數量 (CPU Threads)、執行預報時間 (Login Time) 及預報系統所在位置 (Dir)。後續則會記錄預報系統執行關鍵步驟的時間，以當地時間 (UTC+8) 為主。

圖 5—2 為颱風警報單暴潮預報系統記錄檔截圖，為於叢集電腦執行，以 Python 撰寫主要架構的版本。圖中紀錄內容顯示預報系統於當地時間 2023 年 09 月 01 日 21 時 02 分執行，並在一分鐘內完成讀取警報檔案、產生潮汐邊界、執行第一次模式預報等步驟。第一次核心程式完成模擬之時間為 21 時 34 分，並在這之後進行轉換數值水位計資料的步驟。

圖 5—3 為颱風警報單暴潮預報系統記錄檔截圖，為於 234 機器執行，以 Matlab 撰寫主要架構的版本。圖中紀錄內容顯示預報系統於當地時間 2023 年 09 月 01 日 21 時 00 分執行，並在一分鐘內完成讀取警報檔案、選取指定預報颱風事件、產生潮汐邊界、執行第一次模式預報等步驟。第一次核心程式完成模擬之時間為 21 時 31 分，並在這之後進行轉換數值水位計資料的步驟。

目前透過結算，於 234 機器之 Matlab 版本中，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘。COMCOT 暴潮模式執行純潮汐模擬及加入颱風氣象力參數一併進行運算時分別平均約需 31 分鐘，合計約為 62 分鐘。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需時平均約為 31 分鐘，合計平均一次預報約需 93 分鐘。叢集電腦之 Python 版本中，氣象輸入場之格式轉換平均約需 24 分鐘，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘。COMCOT 暴潮模式執行純潮汐模擬及加入颱風氣象力參數一併進行運算時分別平均約需 32 分鐘，合計約為 64 分鐘。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等平均需時 9 分鐘，合計完成一次預報平均約需 73 分鐘。於預報總時長之表現方面，叢集電腦 Python 版本執行時間於單次預報總時長平均少約 19.83 分鐘，執行效能高於 234 機器之 Matlab 版本約 21.34%。

以 TWRP 二維氣象預報模式作為氣象輸入之暴潮預報系統，兩種版本之預報效能詳細比較表整理如

表 5—2。模式紀錄為求比較性一致，選用 8 月 1 日 0 時至 8 月 31 日 0 時之紀錄檔資料進行比對，紀錄檔起始紀錄截圖如圖 5—4 及圖 5—5。記錄檔中會於預報系統執行時登錄氣象輸入場的選項（TWRP Typhoon Model 指二為大氣模式輸入場）、預報時間（預報模擬的初始時間）、執行緒數量（CPU Threads）、執行預報時間（Login Time）及預報系統所在位置（Dir）。後續則會記錄預報系統執行關鍵步驟的時間，以當地時間（UTC+8）為主。

圖 5—4 為 TWRP 二維氣象預報模式之暴潮預報系統記錄檔截圖，為於 157 機器執行，以 Matlab 撰寫主要架構的版本。圖中紀錄內容顯示預報系統於當地時間 2023 年 08 月 01 日 03 時 05 分執行，在預報啟動時約花費 7 分鐘將 TWRP 氣象場檔案轉換成 COMCOT-SURGE 核心程式讀取之格式。目前預報時間為 72 小時，氣象場須轉檔類別為氣壓、水平分量 10 米風速及垂直分量 10 米風速，可知平均一種氣象場資料轉檔時間約需 2 至 3 分鐘。預報系統於 03 時 12 分產出

潮汐邊界，並於同一時間啟動核心程式。第一次核心程式完成模擬之時間為 03 時 59 分，並在這之後進行轉換數值水位計資料的步驟，顯示本次核心程式所需時間為 47 分鐘。

圖 5—5 TWRP 二維氣象預報模式之暴潮預報系統記錄檔截圖，為於叢集電腦執行，以 Python 撰寫主要架構的版本。圖中紀錄內容顯示預報系統於當地時間 2023 年 08 月 01 日 03 時 15 分執行，在預報啟動時約花費 23 分鐘將 TWRP 氣象場檔案轉換成 COMCOT-SURGE 核心程式讀取之格式。目前預報時間為 72 小時，氣象場須轉檔類別為氣壓、水平分量 10 米風速及垂直分量 10 米風速，可知平均一種氣象場資料轉檔時間約需 7 至 8 分鐘。預報系統於 03 時 38 分產出潮汐邊界，並於同一時間啟動核心程式。第一次核心程式完成模擬之時間為 04 時 10 分，並在這之後進行轉換數值水位計資料的步驟，顯示本次核心程式所需時間為 32 分鐘。

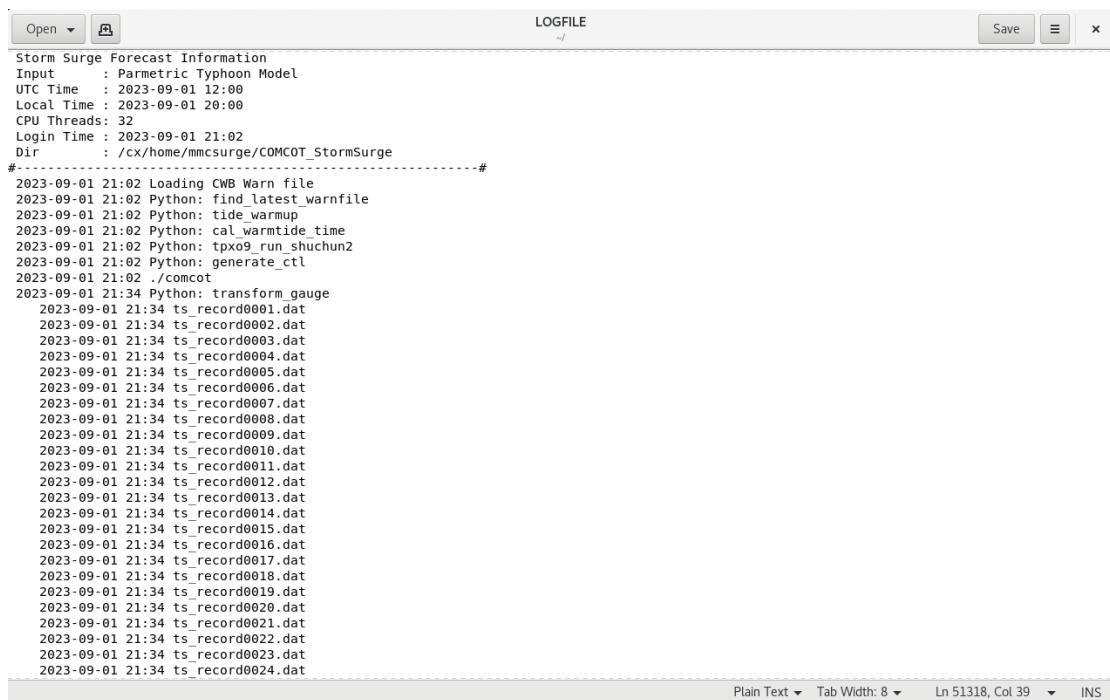
目前透過結算，於 157 機器之 Matlab 版本中，氣象輸入場之格式轉換平均約 13 分鐘，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘。COMCOT 暴潮模式執行純潮汐模擬及加入颱風氣象力參數一併進行運算時分別平均約需 27 分鐘，合計約為 54 分鐘。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需時平均約為 38 分鐘，合計平均一次預報約需 105 分鐘。叢集電腦之 Python 版本中，氣象輸入場之格式轉換平均約需 24 分鐘，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘。COMCOT 暴潮模式執行純潮汐模擬平均約 35 分鐘，加入颱風氣象力參數一併進行運算時則平均需約 34 分鐘，合計預報系統核心程式運算時間平均為 67 分鐘。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等平均需時 7 分鐘，合計完成一次預報平均約需 100 分鐘。

綜合表 5—1 及

表 5—2 之時間統計結果，可以看出兩種不同氣象輸入場所需時間的最大差異在於讀取氣象場所需之時間。由於預報系統核心程式 COMCOT-SURGE 在兩

預報系統版本中並未更動，故該核心程式執行所需時間部分應只受兩作業版本所處之系統及硬體效能的不同而反映出些微差異。值得注意的是，叢集電腦 Python 版本在氣象場之格式轉換所需時間與 157 機器之 Matlab 版本相比，所花時間增加超過 10 分鐘，效能差異約 80%。核心程式在不同平台中所需計算時間保守估計為 40 分鐘內執行 72 小時之預報，有鑑於叢集電腦執行核心程式時所需時間皆略長於其他計算機 (157&234)，研究團隊初步評估在讀寫資料效率上，叢集電腦所能提供之性能略遜於其他計算機。產品輸出部分，則會依據預報系統使用之程式語言在時效上有極大的差異，不同版本間的效能差異高達 70%至 80%，顯示 python 版本預報系統在產品輸出效能上極具優勢。

本研究工作項目為求精簡暴潮預報作業所需時間，將檢視預報系統內部副程式的編寫邏輯，並調整預報系統的程式架構。主要調整方式為改寫預報系統啟動核心程式之方式，將其並聯執行以取代現有的串聯執行預報流程，從而達到最佳化的效果。研究過程中團隊亦會持續監控系統之預報時效，以求預報系統作業穩定精進。

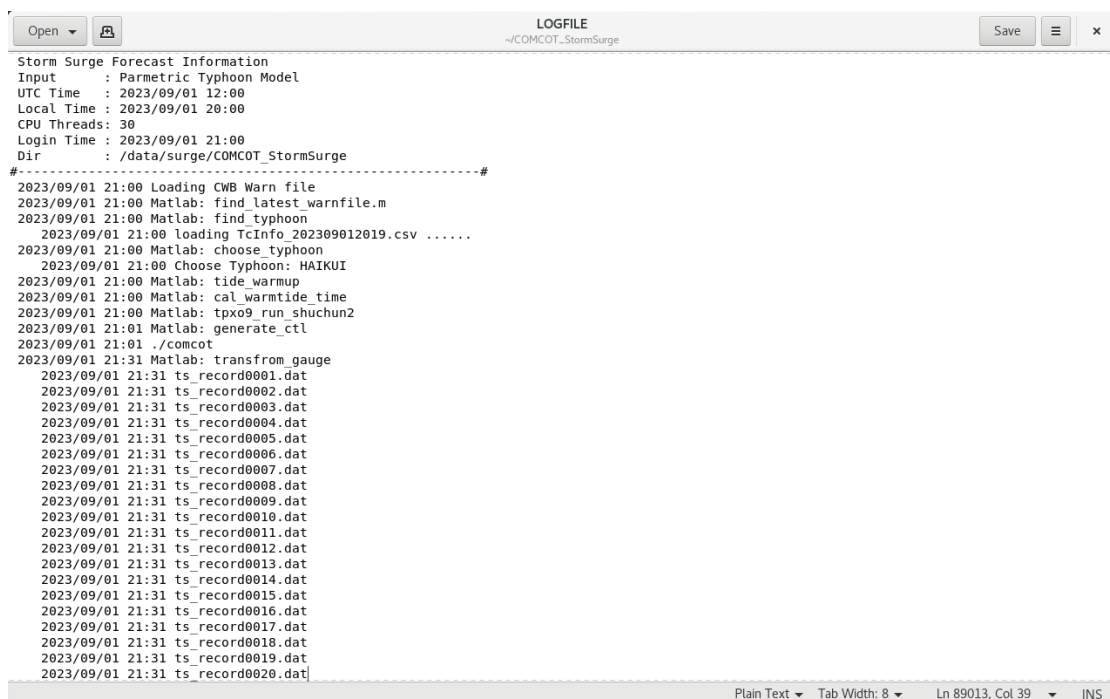


Open [icon] LOGFILE [Save] [Menu] [X]

```
Storm Surge Forecast Information
Input      : Parmetric Typhoon Model
UTC Time   : 2023-09-01 12:00
Local Time : 2023-09-01 20:00
CPU Threads: 32
Login Time : 2023-09-01 21:02
Dir        : /cx/home/mmsurge/COMCOT_StormSurge
#-----#
2023-09-01 21:02 Loading CWB Warn file
2023-09-01 21:02 Python: find_latest_warnfile
2023-09-01 21:02 Python: tide_warmup
2023-09-01 21:02 Python: cal_warmtide_time
2023-09-01 21:02 Python: tpxo9_run_shuchun2
2023-09-01 21:02 Python: generate_ctl
2023-09-01 21:02 ./comcot
2023-09-01 21:34 Python: transform_gauge
2023-09-01 21:34 ts_record0001.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0002.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0003.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0004.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0005.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0006.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0007.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0008.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0009.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0010.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0011.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0012.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0013.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0014.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0015.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0016.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0017.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0018.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0019.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0020.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0021.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0022.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0023.dat
2023-09-01 21:34 ts_record0024.dat
```

Plain Text Tab Width: 8 Ln 51318, Col 39 INS

圖 5—2 颱風警報單暴潮預報系統記錄檔截圖
(叢集電腦、Python 版本)



Open [icon] LOGFILE [Save] [Menu] [X]

```
Storm Surge Forecast Information
Input      : Parmetric Typhoon Model
UTC Time   : 2023/09/01 12:00
Local Time : 2023/09/01 20:00
CPU Threads: 30
Login Time : 2023/09/01 21:00
Dir        : /data/surge/COMCOT_StormSurge
#-----#
2023/09/01 21:00 Loading CWB Warn file
2023/09/01 21:00 Matlab: find_latest_warnfile.m
2023/09/01 21:00 Matlab: find_typhoon
2023/09/01 21:00 loading TcInfo_202309012019.csv .....
2023/09/01 21:00 Matlab: choose_typhoon
2023/09/01 21:00 Choose Typhoon: HAIKUI
2023/09/01 21:00 Matlab: tide_warmup
2023/09/01 21:00 Matlab: cal_warmtide_time
2023/09/01 21:00 Matlab: tpxo9_run_shuchun2
2023/09/01 21:01 Matlab: generate_ctl
2023/09/01 21:01 ./comcot
2023/09/01 21:31 Matlab: transform_gauge
2023/09/01 21:31 ts_record0001.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0002.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0003.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0004.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0005.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0006.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0007.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0008.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0009.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0010.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0011.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0012.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0013.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0014.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0015.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0016.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0017.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0018.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0019.dat
2023/09/01 21:31 ts_record0020.dat
```

Plain Text Tab Width: 8 Ln 89013, Col 39 INS

圖 5—3 颱風警報單暴潮預報系統記錄檔截圖
(234 機器、Matlab 版本)

```
LOGFILE
~/.COMCOT_TWRP

Storm Surge Forecast Information
Input      : TWRP Typhoon Model
UTC Time   : 2023/08/31 12:00
CPU Threads: 24
Login Time : 2023/09/01 03:05
Dir        : /home/wishdeen/COMCOT_TWRP
#-----#
2023/09/01 03:05 Loading TWRP file
2023/09/01 03:05 Matlab: check_twrfdata_two_point_zero
2023/09/01 03:05 ptransform_twr2comcot_two_point_zero
2023/09/01 03:07 wxtransform_twr2comcot_two_point_zero
2023/09/01 03:09 wytransform_twr2comcot_two_point_zero
2023/09/01 03:12 Matlab: tide warmup
2023/09/01 03:12 Matlab: cal_warmtide_time
2023/09/01 03:12 Matlab: tpx09_run_shuchun2
2023/09/01 03:12 Matlab: generate_ctl
2023/09/01 03:12 ./comcot
2023/09/01 03:59 Matlab: transform_gauge
2023/09/01 03:59 ts_record0001.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0002.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0003.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0004.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0005.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0006.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0007.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0008.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0009.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0010.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0011.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0012.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0013.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0014.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0015.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0016.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0017.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0018.dat
2023/09/01 03:59 ts_record0019.dat
Plain Text Tab Width: 8 Ln 954473, Col 35 INS
```

圖 5—4 TWRP 二維氣象預報模式之暴潮預報系統記錄檔截圖
(157 機器、Matlab 版本)

```
LOGFILE
~/

#-----#
Storm Surge Forecast Information
Input      : TWRP Typhoon Model
UTC Time   : 2023-07-31 12:00
CPU Threads: 24
Login Time : 2023-08-01 03:15
Dir        : /cx/home/mmcsurge/COMCOT_TWRP
#-----#
2023-08-01 03:15 Loading TWRP file
2023-08-01 03:15 Python: check_twrfdata_two_point_zero
2023-08-01 03:15 ptransform_twr2comcot_two_point_zero
2023-08-01 03:17 Data transfer complete
2023-08-01 03:22 wxtransform_twr2comcot_two_point_zero
2023-08-01 03:30 wytransform_twr2comcot_two_point_zero
2023-08-01 03:38 Python: tide warmup
2023-08-01 03:38 Python: cal_warmtide_time
2023-08-01 03:38 Python: tpx09_run_shuchun2
2023-08-01 03:38 Python: generate_ctl
2023-08-01 03:38 ./comcot
2023-08-01 04:10 Python: transform_gauge
2023-08-01 04:10 ts_record0001.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0002.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0003.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0004.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0005.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0006.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0007.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0008.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0009.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0010.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0011.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0012.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0013.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0014.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0015.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0016.dat
2023-08-01 04:10 ts_record0017.dat
Plain Text Tab Width: 8 Ln 465274, Col 39 INS
```

圖 5—5 TWRP 二維氣象預報模式之暴潮預報系統記錄檔截圖
(叢集電腦、Python 版本)

表 5—1 颱風警報單暴潮預報系統平均執行效能比較（單位：分鐘）

	潮汐邊界	PT	ST	後處理	總時長
234 Matlab	< 1	31.00	30.92	30.67	92.92
Intel-Cluster Python	< 1	31.91	32.18	8.64	73.09
效能差異	-	0.91	1.27	22.03	19.83
差異百分比	-	2.93%	4.09%	-71.84%	-21.34%

表 5—2 二維氣象場暴潮預報系統平均執行效能比較（單位：分鐘）

	氣象場 格式轉換	潮汐邊界	PT	ST	後處理	總時長
157 Matlab	13.38	<1	26.90	26.68	38.32	105.28
Intel-Cluster Python	24.09	<1	34.63	34.06	6.90	99.67
效能差異	10.71	-	7.73	7.38	-31.42	-5.60
差異百分比	80.02%	-	28.76%	27.66%	-82.00%	-5.32%

5-3 預報系統結構調整與前後版本效能比較報告

本研究工作項目為求精簡暴潮預報作業所需時間，調整預報系統現有之串聯執行預報流程為並聯執行。由前一節版本模式介紹可知，為提升預報系統效能，python 版本預報系統在產品輸出效能上極具優勢。因此後續調整預報模式架構及相關測試皆以 Python 版本為主，主要測試機器則為 Matlab 版本預報系統所在機器，其中颱風警報單暴潮預報系統位於 234 機器，而 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統位於 157 機器。

預報系統於結構調整前後之作業流程圖如圖 5—6 及圖 5—7，兩者依序代表颱風警報單暴潮預報系統及 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統。橘色方框內表示調整前之作業流程圖，綠色框內則為調整後之作業流程圖。

圖中梯形區塊為預報員需要手動執行之步驟，圓角方形區塊為預報系統執行核心程式前之前置步驟，虛線方形圓角區塊為判斷排程分歧路線之步驟，直角方形區塊為核心程式 COMCOT-SURGE 執行之重要步驟，長圓形區塊為核心程式執行後預報產品輸出之相關步驟，六角形區塊為等待排程執行預報之步驟。紅色圓角方形區塊為本次調整預報系統結構之重點區域。

颱風警報單暴潮預報系統作業流程中，預報員只需於第一報預報時手動啟動預報系統，並輸入預報起始時間與指定預報颱風事件，即可執行暴潮預報系統。若預報員輸入資料可在資料庫中找到相符颱風警報單，預報系統將會依據颱風警報單紀錄之警報類別及當次預報颱風平均強度決定適用本次預報之理想風場執行預報。接續之暴潮預報將定時排程，每三小時一次自動確認系統內資料是否符合啟動下一次預報的條件，若符合將執行定時暴潮預報；若不符條件則會結束本次颱風事件之暴潮預報。

TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統作業流程中，每日皆會定時執行排程預報作業，一日四次。啟動該次預報後，預報系統將會確認指定路徑之二維氣象場資料是否符合該次預報時間且資料完整無缺漏，若無異常情形則將繼續執行

預報，反之則會結束本次排程暴潮預報。若預報系統因異常情形結束預報時，則須待預報員檢測並手動排除異常情形後，判斷手動啟動預報的時間與排程啟動預報的時間是否間隔兩小時以上：若間隔時間超過兩小時，則可手動重新啟動該次預報，反之則應等候下次排程預報啟動，避免干擾系統原定之排程作業。

圖 5—8 及圖 5—9 為颱風警報單暴潮預報系統主程式修改前後截圖，橘色方框為結構修改及功能性模組補強之重點區塊。在主程式結構修改前，預報流程為串聯執行，意即在核心程式執行純潮汐模擬並完成數值潮位計格式轉換後，預報系統才會接續執行潮汐與氣象力輸入場之模擬。主程式結構修改後，預報流程改為並聯執行，即核心程式同步執行純潮汐模擬與潮汐同氣象力輸入場之模擬，監控兩者執行狀態，直到兩種設置之模擬皆完成後才接續進行數值潮位計之格式轉換步驟。

圖 5—10 為颱風警報單暴潮預報系統主程式修改後，紀錄檔內並聯執行核心程式步驟標記截圖。圖中記錄主要四項步驟之執行時間。預報系統啟動時間為 2023 年 10 月 16 日 09 時 00 分，模式於 09 時 01 分產出潮汐邊界條件（標記步驟 1），並分別於 01 分及 02 分啟動純潮汐（標記步驟 2）及潮汐加氣象力（標記步驟 3）之模擬，於作業系統中之執行程式編號分別為 48453 及 48456，並於 09 時 02 分起等待預報系統核心程式完成模擬（標記步驟 4）。於 09 時 37 分，預報系統偵測到核心程式皆已完成模擬，於同一時間執行數值潮位計之格式轉換步驟。

圖 5—11 及圖 5—12 為 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統主程式修改前後截圖，橘色方框為結構修改及功能性模組補強之重點區塊。在主程式結構修改前，預報流程為串聯執行，意即在核心程式執行純潮汐模擬並完成數值潮位計格式轉換後，預報系統才會接續執行潮汐與氣象力輸入場之模擬。主程式結構修改後，預報流程改為並聯執行，即核心程式同步執行純潮汐模擬與潮汐同氣象力輸入場之模擬，監控兩者執行狀態，直到兩種設置之模擬皆完成後才接續進行數值潮位計之格式轉換步驟。

圖 5—13 為 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統主程式修改後，紀錄檔內並聯執行核心程式步驟標記截圖。圖中記錄主要四項步驟之執行時間。預報系統啟動時間為 2023 年 10 月 19 日 06 時 00 分，模式於 06 時 00 分起讀去氣象場資料並進行轉檔，並於 06 時 17 分產出潮汐邊界條件（標記步驟 1），並分別啟動純潮汐（標記步驟 2）及潮汐加氣象力（標記步驟 3）之模擬，於作業系統中之執行程式編號分別為 19483 及 19484，並於 06 時 17 分起等待預報系統核心程式完成模擬（標記步驟 4）。於 06 時 53 分，預報系統偵測到核心程式皆已完成模擬，於同一時間執行數值潮位計之格式轉換步驟。

針對颱風警報單作為氣象輸入之暴潮預報系統，現有三種版本之預報效能詳細比較表整理如表 5—3。模式紀錄為求比較性一致，選用中度颱風海葵(HAIKUI)發布海警期間，即 9 月 1 日 20 時至 9 月 5 日 8 時之紀錄檔資料內容進行比對。

目前透過結算，於 234 機器之多工 (Multi-task) Python 版本中，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘，而核心程式完成模擬所需的時間平均約為 35.4 分鐘。由於純潮汐模擬及潮汐搭配氣象力的模擬需要同時進行，機器執行緒可分配給各次模擬的數量為原本的一半，因此在模式並聯執行情況下，核心程式計算所需時間增加是可預期的。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需時平均約為 7.8 分鐘，合計平均一次預報約需 44.4 分鐘。在效能提升方面，現有多工處理之預報系統版本於核心程式模擬所花時間較 234 機器 Matlab 版本減少 26 至 27 分鐘，效能提升 42.8%；後處理所需時間減少 22 至 23 分鐘，效能提升 74.6%，預報總時長為 44 至 45 分鐘，較先前版本減少 48 至 49 分鐘，效能提升超過 50%。

以 TWRF 二維氣象預報模式作為氣象輸入之暴潮預報系統，兩種版本之預報效能詳細比較表整理如表 5—4。模式紀錄為求比較性一致，選用 8 月 1 日 0 時至 8 月 31 日 0 時之紀錄檔資料進行比對。

目前透過結算，於 157 機器之多工 (Multi-task) Python 版本中，氣象輸入場之格式轉換平均約 17 分鐘，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不

到 1 分鐘，而核心程式完成模擬所需的時間平均約為 37.8 分鐘。由於純潮汐模擬及潮汐搭配氣象力的模擬需要同時進行，機器執行緒可分配給各次模擬的數量為原本的一半，因此在模式並聯執行情況下，核心程式計算所需時間增加是可預期的。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需時平均約為 8.0 分鐘，合計平均一次預報約需 62.8 分鐘。在效能提升方面，現有多工處理之預報系統版本於氣象輸入場之格式轉換較 157 機器 Python 版本增加 3 至 4 分鐘，效能下降約 27%；核心程式模擬所花時間減少 17 至 18 分鐘，效能提升 32.9%；後處理所需時間減少 30 至 31 分鐘，效能提升約 79%，預報總時長為 62 至 63 分鐘，較先前版本減少 42 至 43 分鐘，效能提升超過 40%。

綜合表 5—3 及表 5—4 之時間統計結果，可以看出兩種不同氣象輸入場所需時間的最大差異仍然在於讀取氣象場所需之時間。由於預報系統核心程式 COMCOT-SURGE 在各預報系統版本中並未更動，故該核心程式執行所需時間部分應只受作業版本所處之系統及硬體效能的不同而反映出些微差異。在同一機器中，Python 版本與 Matlab 版本相比，在氣象場之格式轉換所需時間是增加的，顯示在程式語言中 Python 讀取/輸出的效能略低於 Matlab 版本，若以維持核心程式不更動，則後續建議應精進 Python 版本轉換氣象場資料的模組架構以精省整體預報時間。在核心程式執行部分，由於同一時間可用執行緒數量減半，因此單次執行核心程式所花時間較原先版本略為增加，但整體計算效能仍可提升 30% 以上。產品輸出部分，則會依據預報系統使用之程式語言在時效上有極大的差異，不同版本間的效能差異高達 70%至 80%，顯示 python 版本預報系統在產品輸出效能上極具優勢，後續預報系統維護若為顧及預報效能，建議可以 Python 版本為主，且可在目前效能提升範圍內嘗試拉長系統預報時間至 96 至 120 小時，並評估系統拉長預報時間後是否仍符合預報時效。

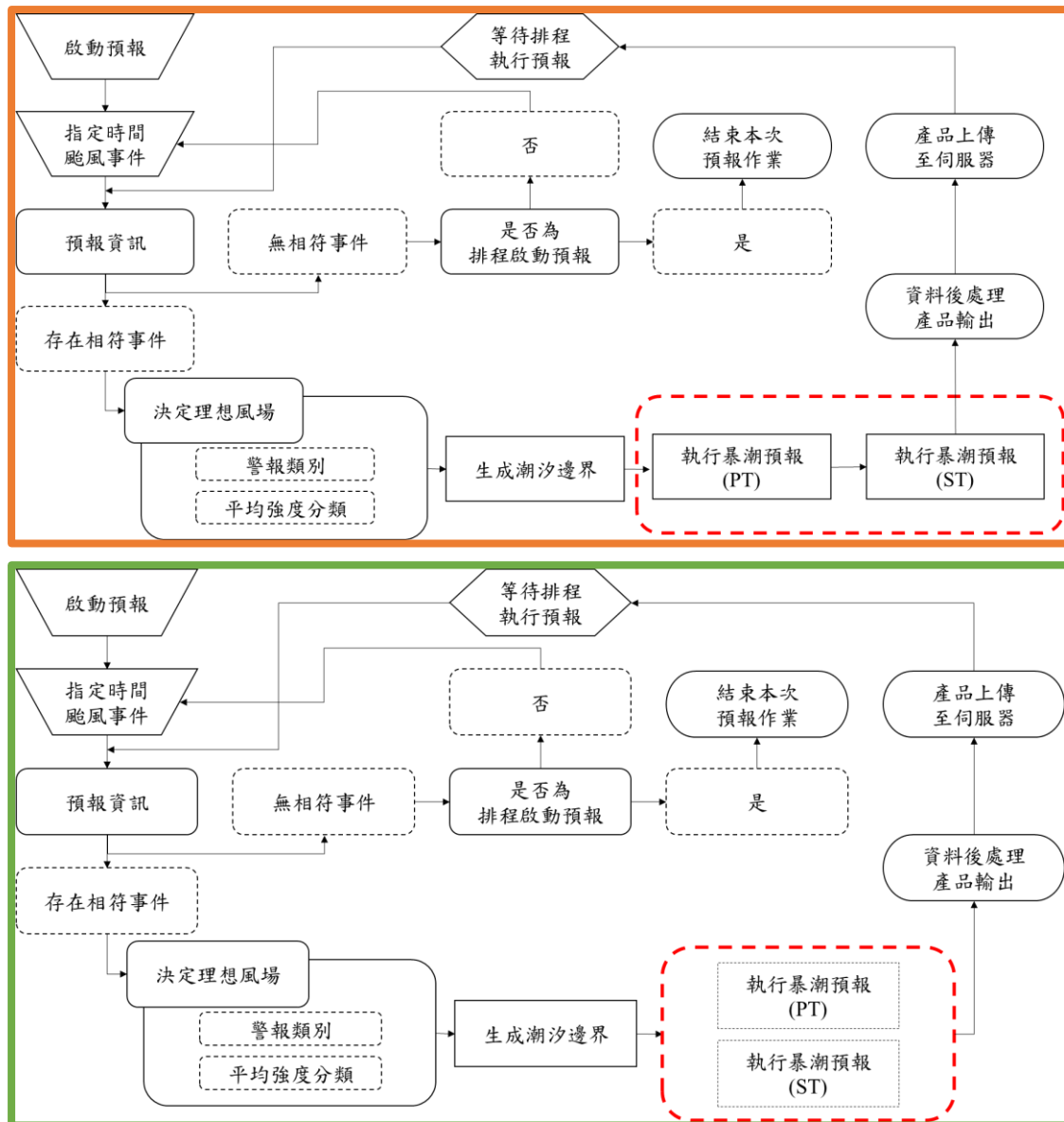


圖 5—6 颱風警報單暴潮預報系統作業流程圖

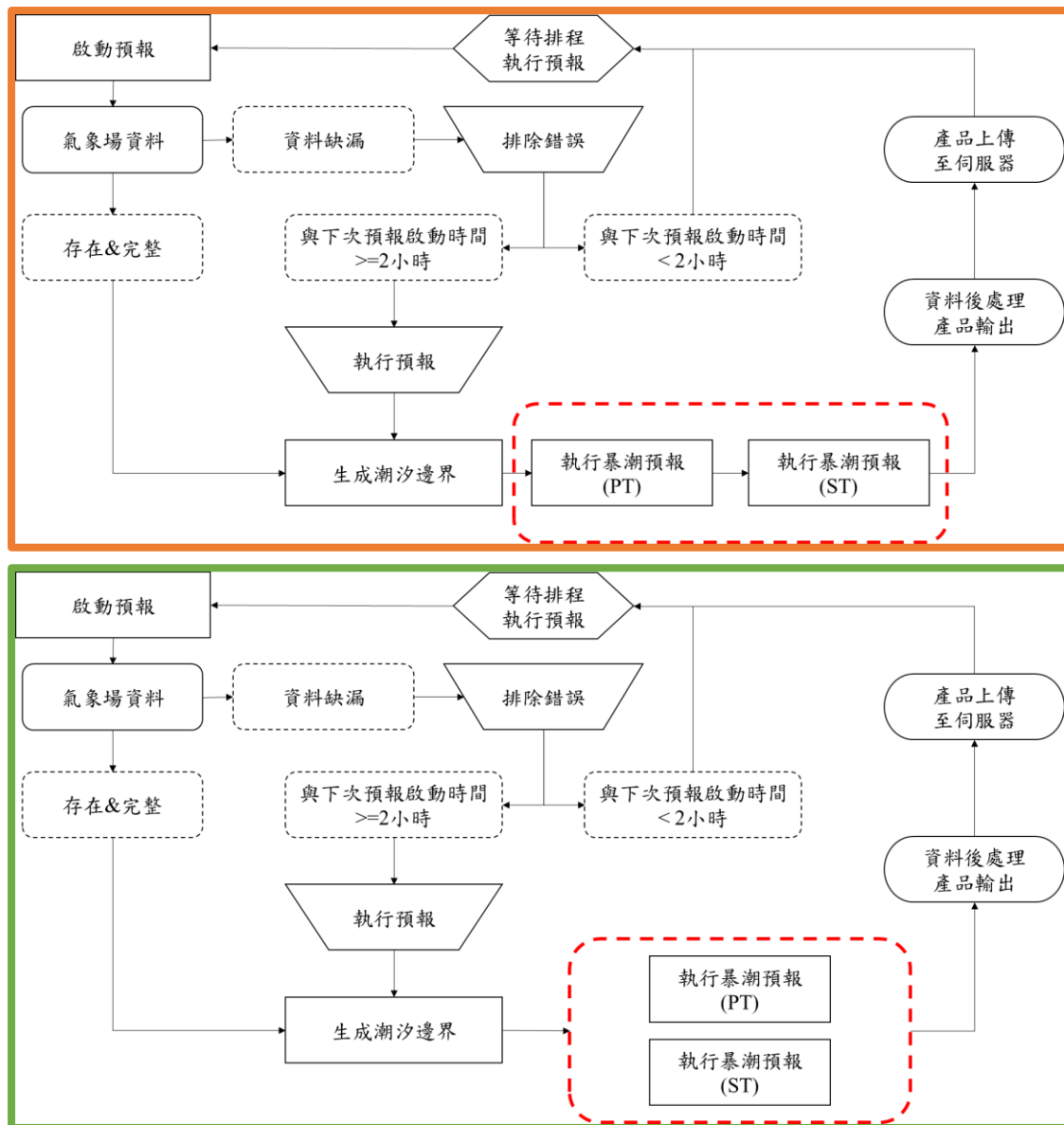
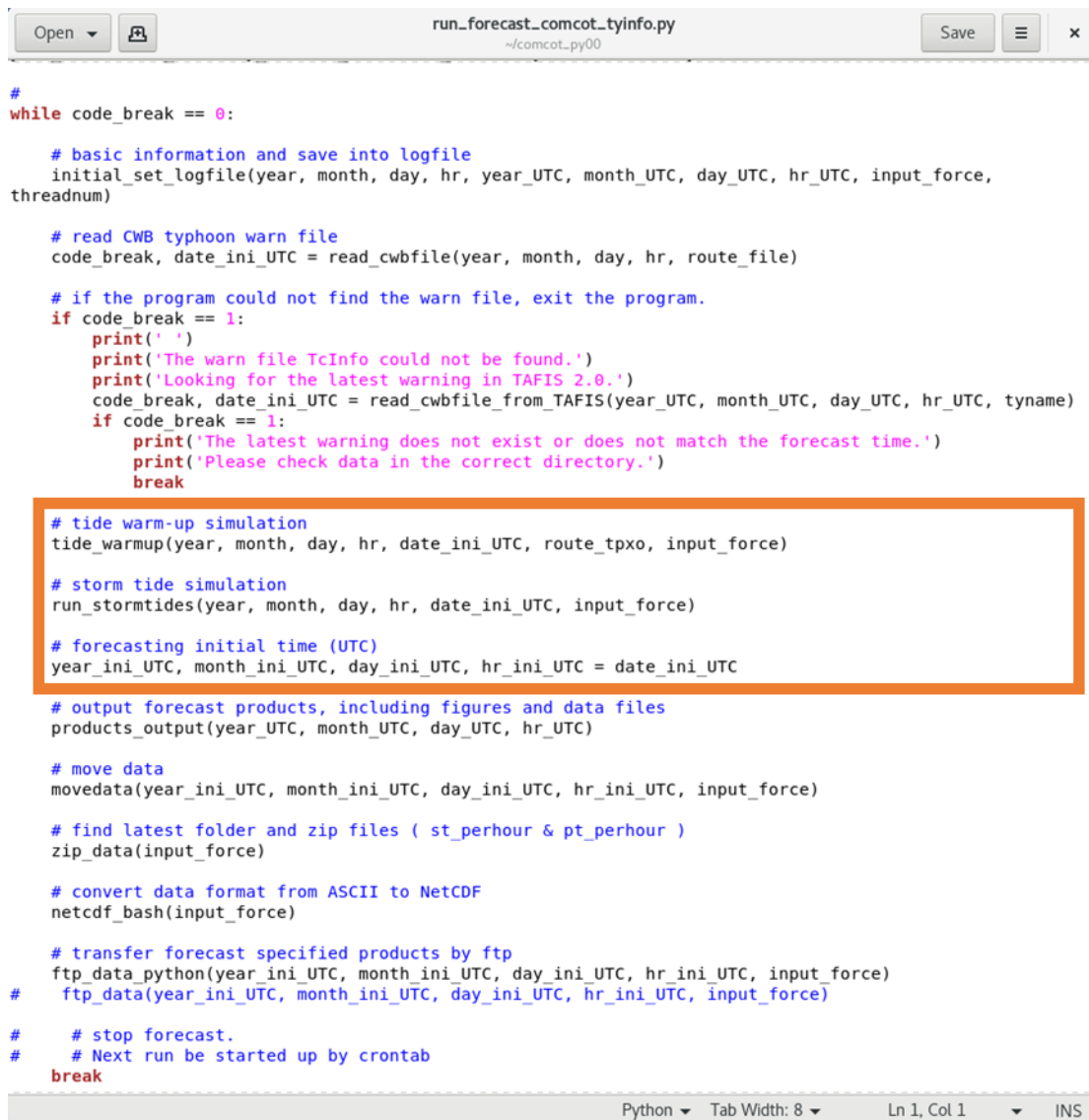


圖 5—7 TWRP 二維氣象預報模式之暴潮預報系統作業流程圖



```
#
while code_break == 0:

    # basic information and save into logfile
    initial_set_logfile(year, month, day, hr, year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC, input_force,
threadnum)

    # read CWB typhoon warn file
    code_break, date_ini.UTC = read_cwbfile(year, month, day, hr, route_file)

    # if the program could not find the warn file, exit the program.
    if code_break == 1:
        print(' ')
        print('The warn file TcInfo could not be found.')
        print('Looking for the latest warning in TAFIS 2.0.')
        code_break, date_ini.UTC = read_cwbfile_from_TAFIS(year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC, tyname)
        if code_break == 1:
            print('The latest warning does not exist or does not match the forecast time.')
            print('Please check data in the correct directory.')
            break

    # tide warm-up simulation
    tide_warmup(year, month, day, hr, date_ini.UTC, route_tpxo, input_force)

    # storm tide simulation
    run_stormtides(year, month, day, hr, date_ini.UTC, input_force)

    # forecasting initial time (UTC)
    year_ini.UTC, month_ini.UTC, day_ini.UTC, hr_ini.UTC = date_ini.UTC

    # output forecast products, including figures and data files
    products_output(year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC)

    # move data
    movedata(year_ini.UTC, month_ini.UTC, day_ini.UTC, hr_ini.UTC, input_force)

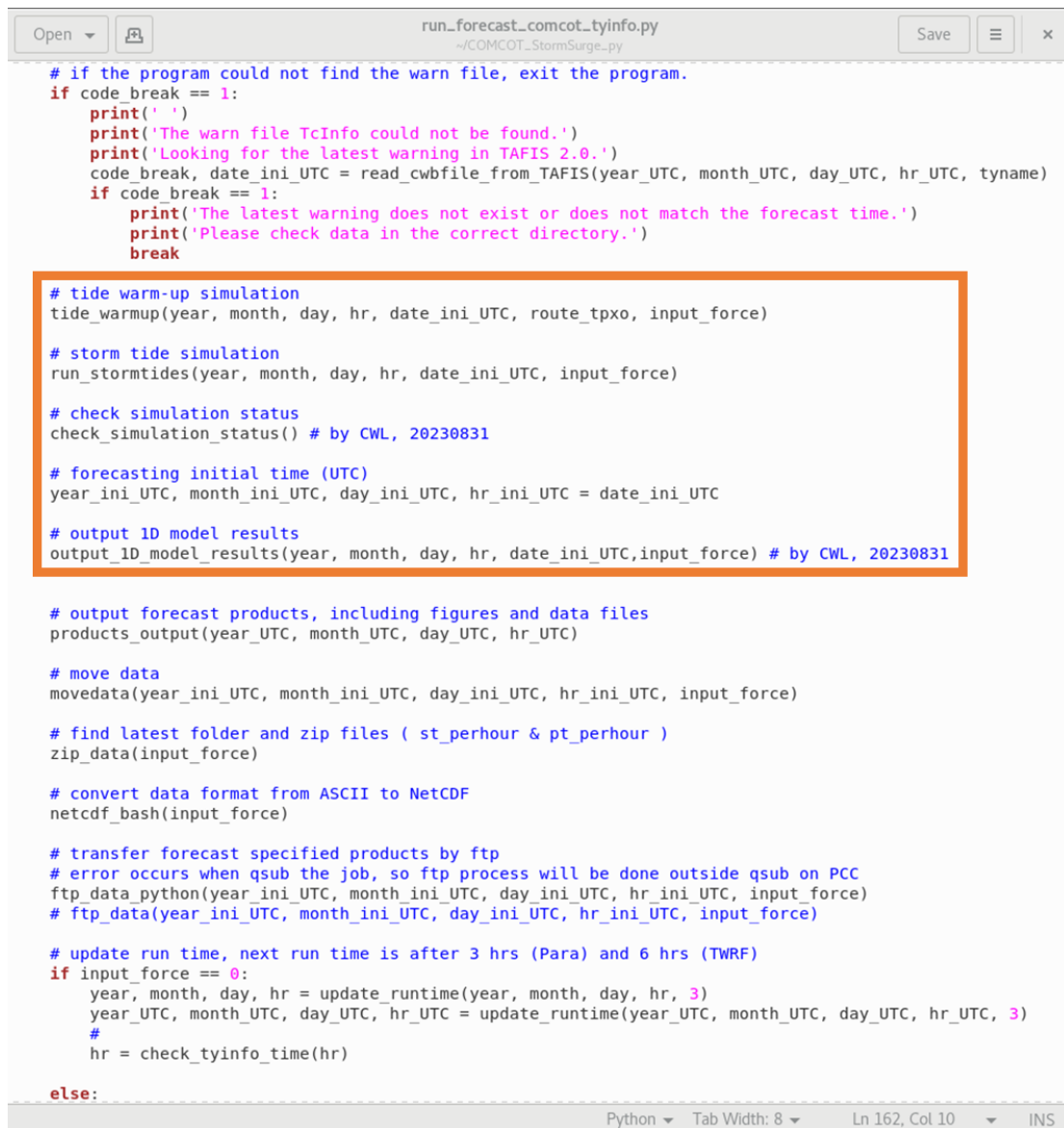
    # find latest folder and zip files ( st_perhour & pt_perhour )
    zip_data(input_force)

    # convert data format from ASCII to NetCDF
    netcdf_bash(input_force)

    # transfer forecast specified products by ftp
    ftp_data_python(year_ini.UTC, month_ini.UTC, day_ini.UTC, hr_ini.UTC, input_force)
#   ftp_data(year_ini.UTC, month_ini.UTC, day_ini.UTC, hr_ini.UTC, input_force)

#   # stop forecast.
#   # Next run be started up by crontab
break
```

圖 5—8 颱風警報單暴潮預報系統主程式修改前截圖（234 機器、Python 版本）



```
run_forecast_comcot_tyinfo.py
~/COMCOT_StormSurge.py

# if the program could not find the warn file, exit the program.
if code_break == 1:
    print(' ')
    print('The warn file TcInfo could not be found.')
    print('Looking for the latest warning in TAFIS 2.0.')
    code_break, date_ini_UTC = read_cwbfile_from_TAFIS(year_UTC, month_UTC, day_UTC, hr_UTC, tyname)
    if code_break == 1:
        print('The latest warning does not exist or does not match the forecast time.')
        print('Please check data in the correct directory.')
        break

# tide warm-up simulation
tide_warmup(year, month, day, hr, date_ini_UTC, route_tpxo, input_force)

# storm tide simulation
run_stormtides(year, month, day, hr, date_ini_UTC, input_force)

# check simulation status
check_simulation_status() # by CWL, 20230831

# forecasting initial time (UTC)
year_ini_UTC, month_ini_UTC, day_ini_UTC, hr_ini_UTC = date_ini_UTC

# output 1D model results
output_1D_model_results(year, month, day, hr, date_ini_UTC, input_force) # by CWL, 20230831

# output forecast products, including figures and data files
products_output(year_UTC, month_UTC, day_UTC, hr_UTC)

# move data
movedata(year_ini_UTC, month_ini_UTC, day_ini_UTC, hr_ini_UTC, input_force)

# find latest folder and zip files ( st_perhour & pt_perhour )
zip_data(input_force)

# convert data format from ASCII to NetCDF
netcdf_bash(input_force)

# transfer forecast specified products by ftp
# error occurs when qsub the job, so ftp process will be done outside qsub on PCC
ftp_data_python(year_ini_UTC, month_ini_UTC, day_ini_UTC, hr_ini_UTC, input_force)
# ftp_data(year_ini_UTC, month_ini_UTC, day_ini_UTC, hr_ini_UTC, input_force)

# update run time, next run time is after 3 hrs (Para) and 6 hrs (TWRP)
if input_force == 0:
    year, month, day, hr = update_runtime(year, month, day, hr, 3)
    year_UTC, month_UTC, day_UTC, hr_UTC = update_runtime(year_UTC, month_UTC, day_UTC, hr_UTC, 3)
    #
    hr = check_tyinfo_time(hr)
else:
```

圖 5—9 颱風警報單暴潮預報系統主程式修改後截圖（234 機器、Python 版本）

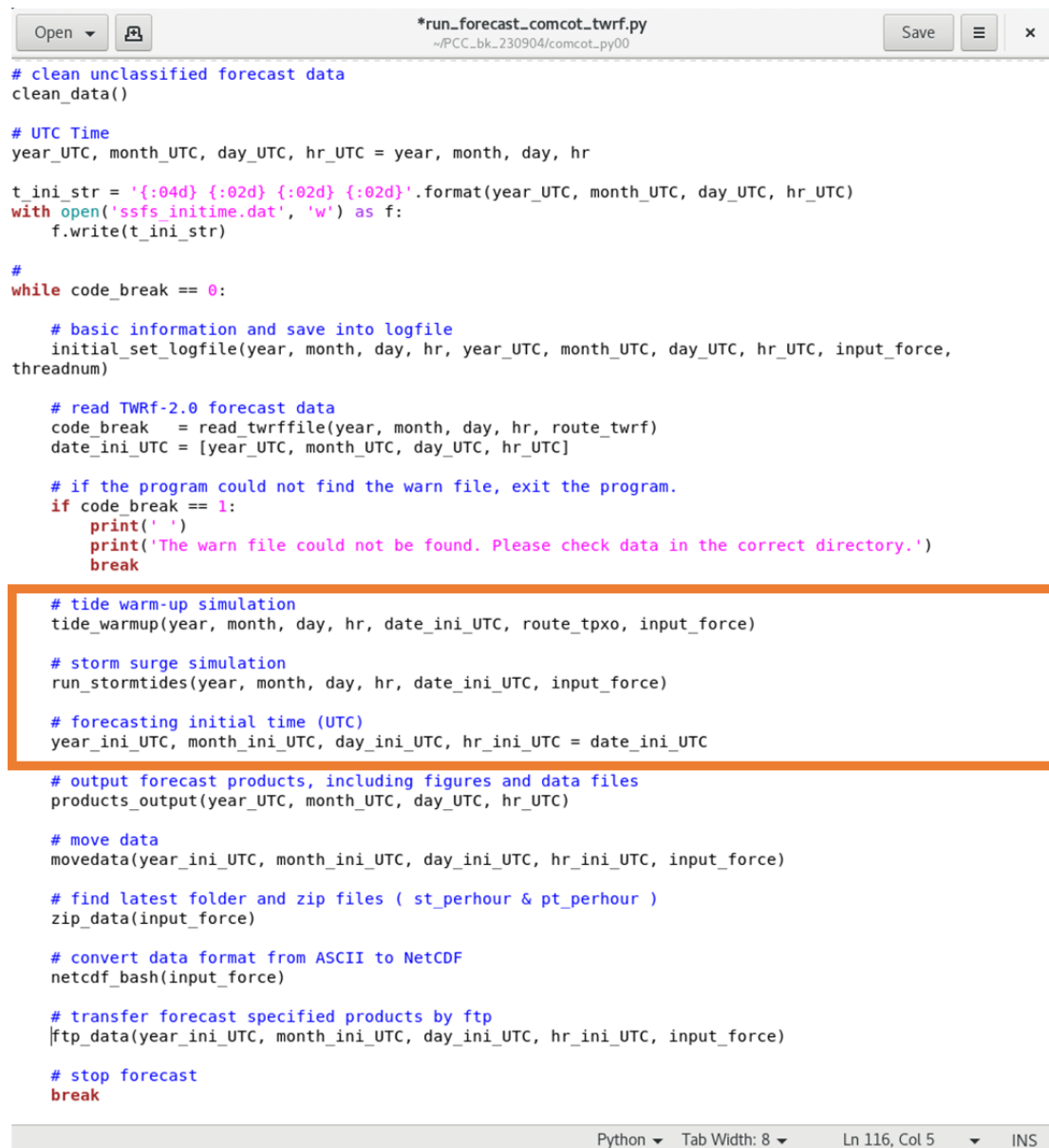

```
LOGFILE
~/COMCOT_StormSurge_py

#-----#
Storm Surge Forecast Information
Input      : Parmetric Typhoon Model
UTC Time   : 2023-10-04 15:00
Local Time : 2023-10-04 23:00
CPU Threads: 10
Login Time : 2023-10-16 09:00
Dir        : /data/surge/COMCOT_StormSurge_py
#-----#

2023-10-16 09:00 Loading CWB Warn file
2023-10-16 09:00 Python: find latest warnfile
2023-10-16 09:01 Python: tide warmup
2023-10-16 09:01 Python: cal warmtide time
2023-10-16 09:01 Python: tpxo9_run_shuchun2
2023-10-16 09:02 Python: generate_ctl
2023-10-16 09:02 process id: 48453
2023-10-16 09:02 Python: run_stormtides
2023-10-16 09:02 Python: generate_ctl
2023-10-16 09:02 process id: 48456
2023-10-16 09:02 Python: Wait for Pure Tide and Storm Tide simulation be finished.
2023-10-16 09:37 Both Simulations are finished.
2023-10-16 09:37 ['Python: transform_gauge: Pure_Tide']
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0001.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0002.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0003.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0004.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0005.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0006.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0007.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0008.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0009.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0010.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0011.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0012.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0013.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0014.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0015.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0016.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0017.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0018.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0019.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0020.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0021.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0022.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0023.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0024.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0025.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0026.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0027.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0028.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0029.dat
2023-10-16 09:37 Pure Tide/ts_record0030.dat

Plain Text Tab Width: 8 Ln 3614, Col 57 INS
```

圖 5—10 紀錄檔內並聯執行核心程式步驟標記示意圖
(234 機器、Python 版本)



```
# clean unclassified forecast data
clean_data()

# UTC Time
year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC = year, month, day, hr

t_ini_str = '{:04d} {:02d} {:02d} {:02d}'.format(year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC)
with open('ssfs_initime.dat', 'w') as f:
    f.write(t_ini_str)

#
while code_break == 0:

    # basic information and save into logfile
    initial_set_logfile(year, month, day, hr, year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC, input_force,
        threadnum)

    # read TWRf-2.0 forecast data
    code_break = read_twrffile(year, month, day, hr, route_twrp)
    date_ini.UTC = [year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC]

    # if the program could not find the warn file, exit the program.
    if code_break == 1:
        print(' ')
        print('The warn file could not be found. Please check data in the correct directory.')
        break

    # tide warm-up simulation
    tide_warmup(year, month, day, hr, date_ini.UTC, route_tpxo, input_force)

    # storm surge simulation
    run_stormtides(year, month, day, hr, date_ini.UTC, input_force)

    # forecasting initial time (UTC)
    year_ini.UTC, month_ini.UTC, day_ini.UTC, hr_ini.UTC = date_ini.UTC

    # output forecast products, including figures and data files
    products_output(year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC)

    # move data
    movedata(year_ini.UTC, month_ini.UTC, day_ini.UTC, hr_ini.UTC, input_force)

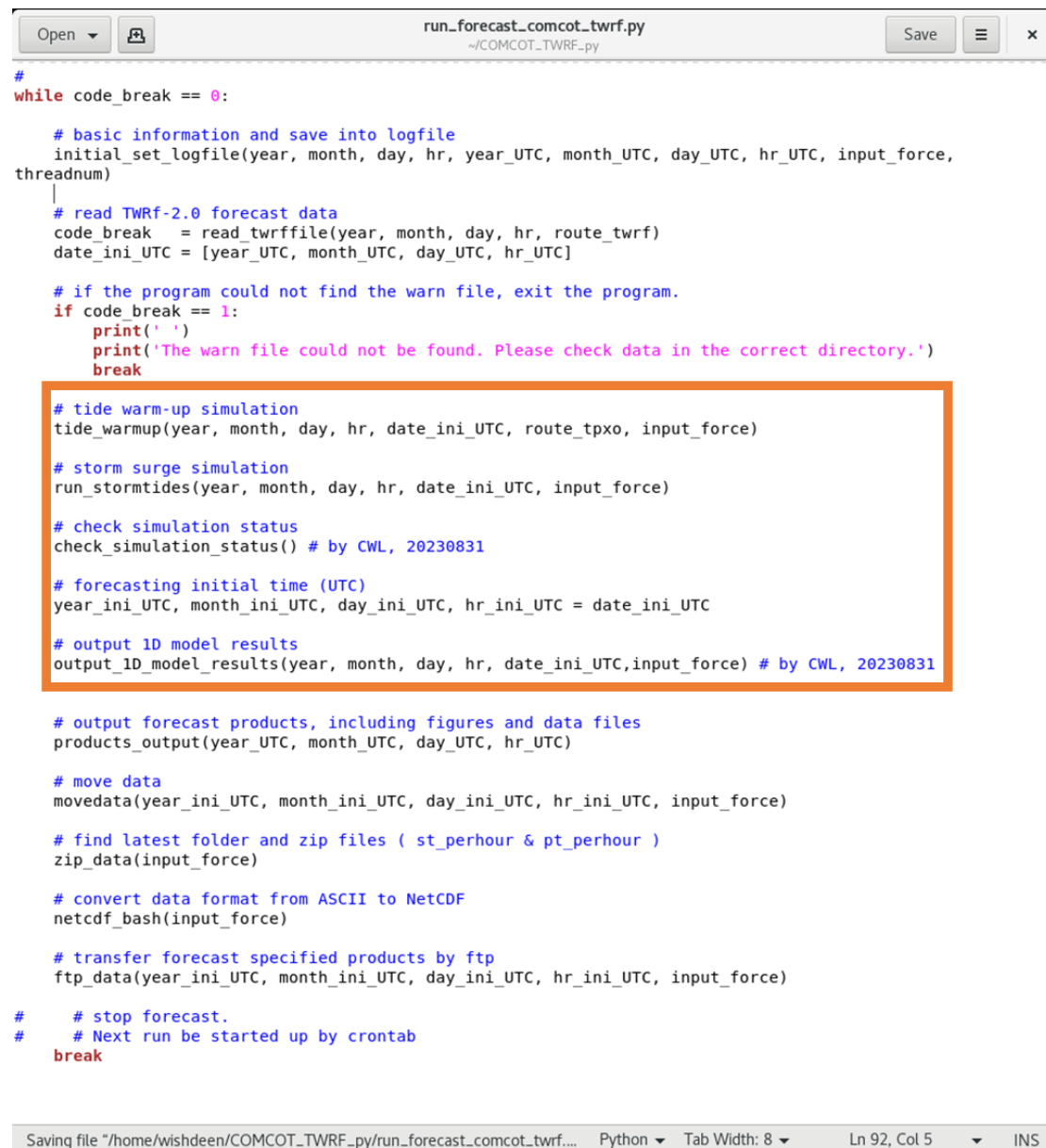
    # find latest folder and zip files ( st_perhour & pt_perhour )
    zip_data(input_force)

    # convert data format from ASCII to NetCDF
    netcdf_bash(input_force)

    # transfer forecast specified products by ftp
    ftp_data(year_ini.UTC, month_ini.UTC, day_ini.UTC, hr_ini.UTC, input_force)

    # stop forecast
    break
```

圖 5—11 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統主程式修改前截圖
(157 機器、Python 版本)



```
#
while code_break == 0:

    # basic information and save into logfile
    initial_set_logfile(year, month, day, hr, year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC, input_force,
threadnum)

    # read TWrf-2.0 forecast data
    code_break = read_twrf(file(year, month, day, hr, route_twrf)
    date_ini.UTC = [year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC]

    # if the program could not find the warn file, exit the program.
    if code_break == 1:
        print(' ')
        print('The warn file could not be found. Please check data in the correct directory.')
        break

    # tide warm-up simulation
    tide_warmup(year, month, day, hr, date_ini.UTC, route_tpxo, input_force)

    # storm surge simulation
    run_stormtides(year, month, day, hr, date_ini.UTC, input_force)

    # check simulation status
    check_simulation_status() # by CWL, 20230831

    # forecasting initial time (UTC)
    year_ini.UTC, month_ini.UTC, day_ini.UTC, hr_ini.UTC = date_ini.UTC

    # output 1D model results
    output_1D_model_results(year, month, day, hr, date_ini.UTC, input_force) # by CWL, 20230831

    # output forecast products, including figures and data files
    products_output(year.UTC, month.UTC, day.UTC, hr.UTC)

    # move data
    movedata(year_ini.UTC, month_ini.UTC, day_ini.UTC, hr_ini.UTC, input_force)

    # find latest folder and zip files ( st_perhour & pt_perhour )
    zip_data(input_force)

    # convert data format from ASCII to NetCDF
    netcdf_bash(input_force)

    # transfer forecast specified products by ftp
    ftp_data(year_ini.UTC, month_ini.UTC, day_ini.UTC, hr_ini.UTC, input_force)

# # stop forecast.
# # Next run be started up by crontab
break
```

Saving file "/home/wishdeen/COMCOT_TWRF_py/run_forecast_comcot_twrf.... Python Tab Width: 8 Ln 92, Col 5 INS

圖 5—12 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統主程式修改後截圖
(157 機器、Python 版本)

```
LOGFILE
~/.COMCOT_TWRF_py

#-----#
Storm Surge Forecast Information
Input      : TWRP Typhoon Model
UTC Time   : 2023-10-18 12:00
CPU Threads: 10
Login Time : 2023-10-19 06:00
Dir        : /home/wishdeen/COMCOT_TWRF_py
#-----#

2023-10-19 06:00 Loading TWRP file
2023-10-19 06:00 Python: check_twrfddata_two_point_zero
2023-10-19 06:00 ptransform_twrfd2comcot_two_point_zero
2023-10-19 06:05 wxtransform_twrfd2comcot_two_point_zero
2023-10-19 06:11 wytransform_twrfd2comcot_two_point_zero
2023-10-19 06:17 Python: tide_warmup
2023-10-19 06:17 Python: cal_warmtide_time
2023-10-19 06:17 Python: tpx09_run_shuchun2
2023-10-19 06:17 Python: generate_ctl
2023-10-19 06:17 process id: 19483
2023-10-19 06:17 Python: run_stormtides
2023-10-19 06:17 Python: generate_ctl
2023-10-19 06:17 process id: 19484
2023-10-19 06:17 Python: Wait for Pure Tide and Storm Tide simulation be finished.
2023-10-19 06:53 Both Simulations are finished.
2023-10-19 06:53 ['Python: transform_gauge: Pure_Tide']
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0001.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0002.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0003.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0004.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0005.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0006.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0007.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0008.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0009.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0010.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0011.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0012.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0013.dat
2023-10-19 06:53 Pure_Tide/ts_record0014.dat

Plain Text Tab Width: 8 Ln 5320, Col 45 INS
```

圖 5—13 紀錄檔內並聯執行核心程式步驟標記示意圖
(157 機器、Python 版本)

表 5—3 颱風警報單暴潮預報系統
結構調整前後所需執行時間（單位：分鐘）

理想風場	潮汐邊界	(Pure Tide)	(Storm Tide)	後處理	總時長
234 Matlab	< 1	31.00	30.92	30.67	92.92
Intel-Cluster Python	< 1	31.91	32.18	8.64	73.09
234 (Multi-task) Python	<1	35.4		7.8	44.4
效能差異 (比較 Matlab 版本)	-	減少 26.52		減少 22.87	減少 48.52
差異百分比	-	42.8%		74.56%	52.2%

表 5—4 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統
結構調整前後所需執行時間（單位：分鐘）

TWRF	資料 轉換	潮汐 邊界	(Pure Tide)	(Storm Tide)	後處理	總時長
157 Matlab	13.38	<1	26.90	26.68	38.32	105.28
Intel-Cluster Python	24.09	<1	34.63	34.06	6.90	99.67
157 (Multi-task) Python	17.0	<1	37.8		8.0	62.8
效能差異 (比較 Matlab 版本)	增加 3.62	-	減少 17.62		減少 30.32	減少 42.48
差異百分比	-27.1%	-	32.9%		79.1%	40.3%

第6章、港灣遮蔽效應之數值分析

風暴潮預報之重要性在於即時掌握海水倒灌範圍、河川排洪規劃、及港灣風險控制。針對台灣之特殊性，如多颱風、多高山、範圍較小卻人口稠密、需要高解析度與高精確度暴潮預報需求等，中央氣象署於綜合比較多種國際間所使用之風暴潮數值模式後，決定自主研發適合於台灣之二維風暴潮預報系統 COMCOT-SS。該二維風暴潮預報模式以 COMCOT 海嘯模式為基礎，並導入風暴潮模擬所需之動力邊界而成。模式求解非線性球座標方程式，具有可局部加密解析度，可納入潮汐邊界條件，及計算局部海水溢淹，以及高準確度之特色。

眾所周知，任何模擬現狀之數值模式皆須經過反覆模式校驗，並針對該地區之特色，進行模式調校。風暴潮校驗主要方式為與將模擬結果與觀測資料進行比對，並從觀測數據中濾除天文潮並提取風暴潮之水位時序歷線進行比對。觀測資料之主要來源為中央氣象署設立於港灣內之 34 個潮位站。天文潮之濾除可透過扣除調和分析或 TPXO 之天文潮預測、低通濾波等。然而於校驗風暴潮水位時，常有部分潮位站之水位資料在扣除調和分析之模擬水位後，仍有週期性擺盪之殘差，且不論風暴潮現象有無發生，週期性擺盪於濾波後皆存在，此結果易導致無法精確辨識風暴潮水位。

因此，為了解潮位站觀測水位與調和分析殘差值之週期性擺盪，並提升分析颱風暴潮時可校驗資料之品質，並進一步量化探討潮位站之於港灣海堤遮蔽效應間之關聯性，本年度之重點工作項目採用二維風暴潮預報模式、與三維 Splash3D 模式進行數值模擬，藉由提升地形解析度與網格收斂分析，獲取數個現有不同潮位計在特定期間(颱風季、非颱風季)之潮汐水位校驗結果，以觀察港灣遮蔽效應對於潮汐水位模擬、潮汐水位預報，以至於風暴潮事件之影響。

6-1 地形建置

由於本工作項目之目標為凸顯港灣海堤遮蔽效應之影響，因此在進行潮汐水位之模擬分析時，模式需採用細緻化之地形、設定之數值網格解析度需加密以建構完整港口細節(包含海堤、港池、碼頭等)，並搭配 TPX0 潮汐模式以獲取邊界潮位條件，以取得特定港口區域隨時間變化之潮汐水位模擬結果。最終，將結果與觀測資料進一步比對校驗，以瞭解港灣遮蔽效應於殘差值之影響，以及是否能成功降低模擬結果與實際觀測值間之差異。

本工作項目之地形資料來源，採用內政部之 10 公尺與 20 公尺網格數值地形模型資料 (DEM 10m & DEM 20m) 作為陸上地形範本、科技部之 200 公尺網格解析度水深資料 (TAIDP 200m) 及中央氣象署內提供之 20 公尺解析度點水深資料作為水下地形範本。後續高精度地形之建置須將原始地形檔案帶入 Global Mapper 軟體後，針對特定港口範圍耦合成高解析度整合地形 (後稱整合地形)，再將其帶入二維風暴潮預報模式或三維 Splash3D 模式，搭配網格收斂分析與潮汐邊界條件，進行完整時序歷程之模擬，以求得數值模擬之潮汐水位結果。

本項目之地形資料除採用了上述之地形範本外，亦採用預報模式現有、公開之美國國家海洋暨大氣總署 (NOAA) 之 ETOPO 地形 (1 弧分解析度) 與英國海洋數據中心 (BODC) 之 GEBCO 地形 (1/4 弧分解析度)，作為高地形解析度之整合地形對照組之一，並套用至現有風暴潮預報模式之設定，以量化分析整合地形及現有地形於模擬結果之差異，以顯現港灣海堤之遮蔽效應於港灣內之潮位計受海堤遮蔽效應之影響。

本項目所使用之 Global Mapper 為 Blue Marble Geographics 公司所開發之 GIS 軟體，被廣泛用於處理及分析地形數據。其中包含 3D 數據視覺化、套用並編輯數值地形高程模型 (DEM) 等多功能之空間數據處理工具，並可以將地形產品根據使用者需求，轉換為不同檔案格式來儲存。該軟體相對直觀的使用介面和工具套疊之提示及佈局，對於初次嘗試之研究工作者，或有其他相關 GIS 軟體經

驗之地理領域專業人員，皆能快速、有效地瞭解軟體使用方法並視覺化處理地形相關數據，以準確地輸出地形資訊及為地形優化。目前所採用之版本為 23.1 版。

圖 6—1 為 Global Mapper 23.1 版之使用者介面示意圖。透過上方之視覺化小工具及直觀之操作設定方式，能有效整合本項目中使用之海洋、陸域地形。

圖 6—2 至圖 6—4 則分別為經 Global Mapper 軟體處理後之高精度整合地形示意圖、預報模式現有之 ETOPO 及 GEBCO 地形示意圖，展示之地點為相同經緯度之台中港及周遭區域，從圖片之網格細緻度、海岸線等，可明顯分別出整合地形與其餘地形之地形解析度差異，並透過在地形中重建完整港口地形特徵，以體現港灣內之潮位計受港灣海堤遮蔽效應影響之結果。

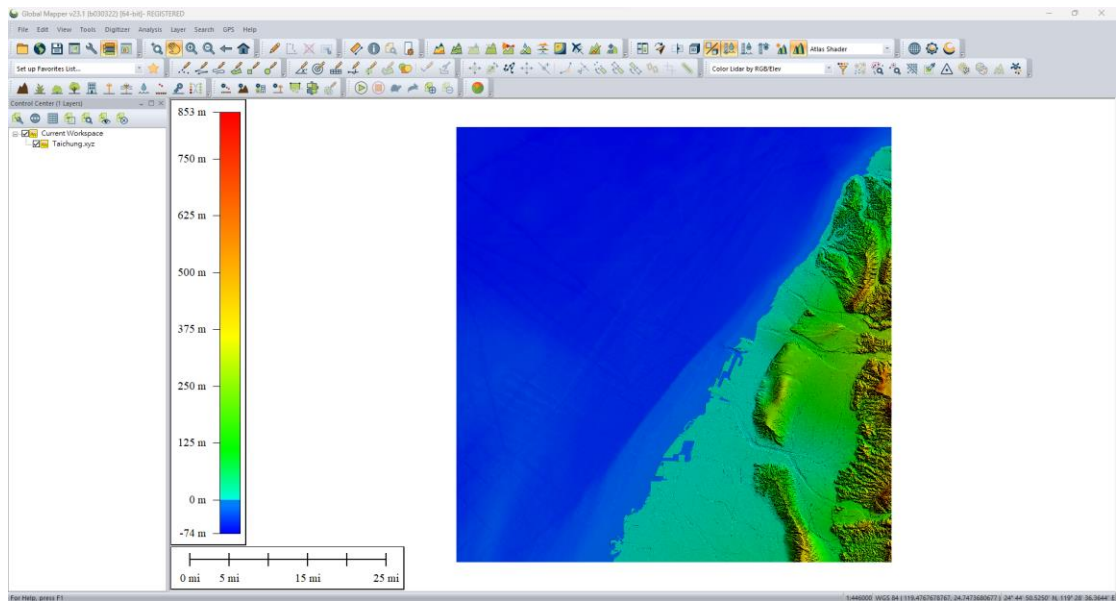


圖 6—1 Global Mapper 23.1 版之使用者介面展示圖

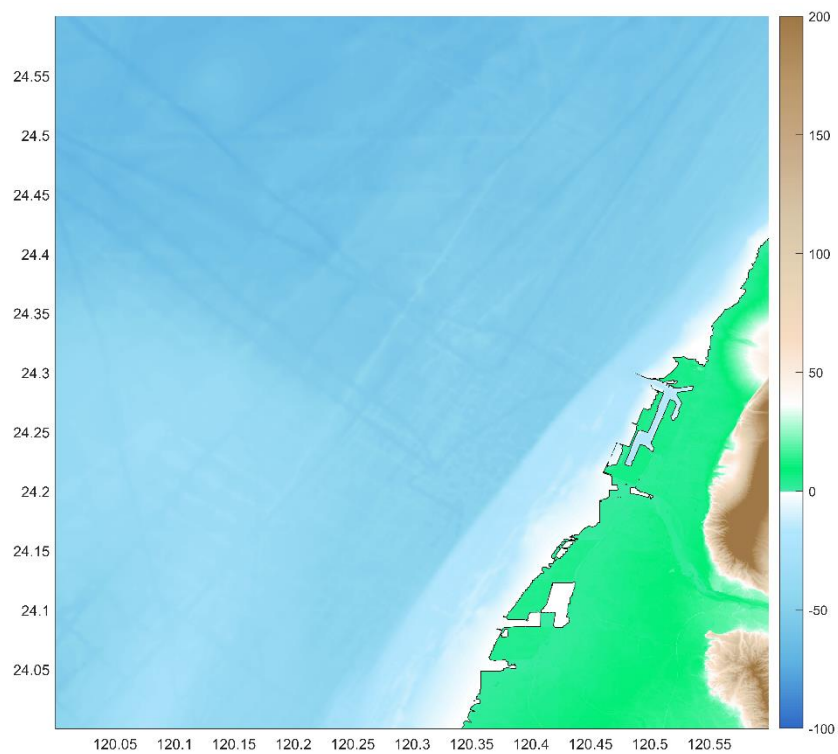


圖 6—2 整合地形示意圖

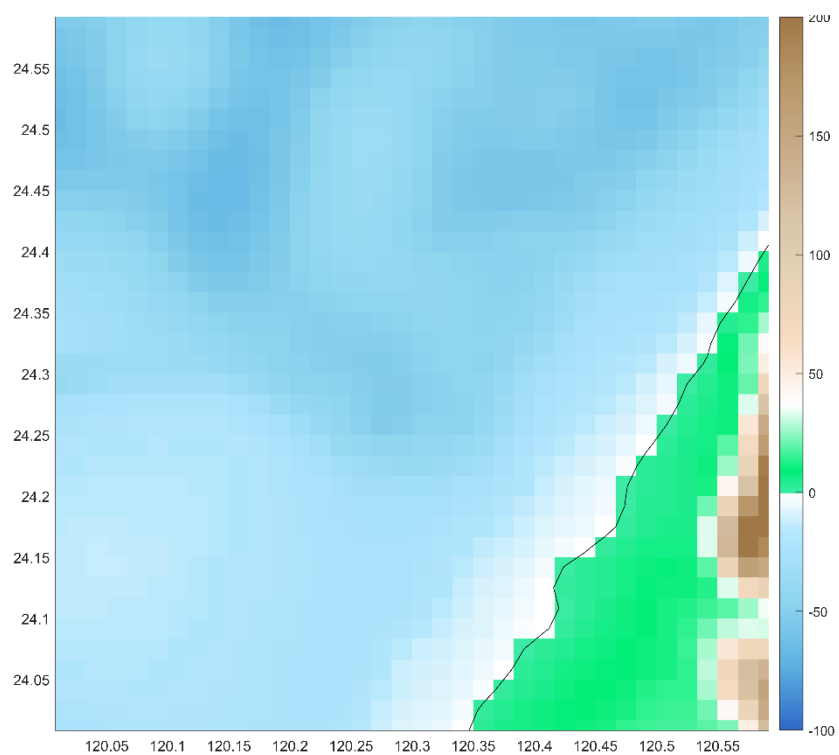


圖 6—3 ETOPO 地形示意圖

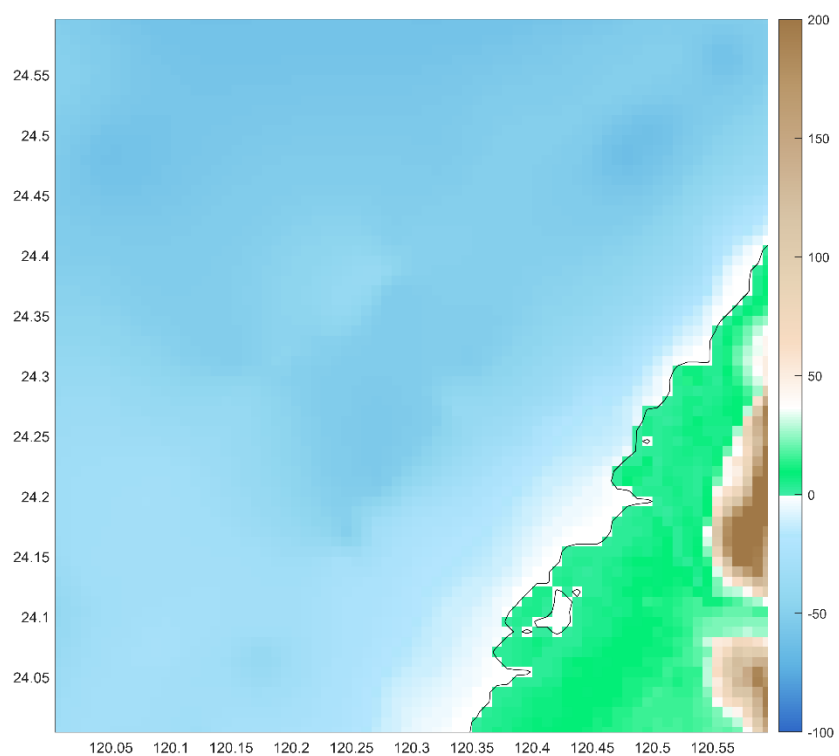


圖 6—4 GEBCO 地形示意圖

6-2 三維 Splash3D 模式分析

6-2-1 前言與模擬方法

在過去工作項目之案例分析中，本團隊分析地形解析度與數值網格解析度於二維風暴潮預報模式模擬結果之差異，並分析台中港潮位站於非颱風季時期受港灣遮蔽效應之影響及提供高解析度產品所需之模擬時間。為進一步了解是否有潛在之三維港灣效應，今年度延續製作 Splash3D 模式之三維數值模擬，以了解三維數值模式結果與觀測資料間之差異，及港灣內潮位計是否受到影響。

為探討港灣海堤之遮蔽效應於三維模式地形之影響，本計畫透過以下之分析方法來進行三維結果之模擬：

1. 透過 Global Mapper 軟體設定範圍、設定經緯度轉換並輸出整合地形後，將該整合地形做為三維 Splash3D 模式之地形資料，將其帶入模式後設定水位面與模擬時長等相關初始設定。
2. 藉由 TPXO 潮汐模式取得該地區範圍之邊界潮汐條件資料。
3. 由於 TPXO 潮汐模式僅能提供特定時間之水位高程，因此團隊採用壓力邊界法，在獲取邊界網格之水位後，藉由壓力公式 ($P=\rho g(h-H)$ ， P 為壓力項， ρ 為海水密度項， g 為重力項， $(h-H)$ 為海水面高程與網格頂部之高程差異)，給予三維邊界上所有含水網格壓力值，而空氣則給予壓力值等於零，再藉由邊界網格與內部網格之壓力差，做為驅動潮汐的動力來源，使其根據潮汐邊界設定之變化流動。
4. 最終，完成三維 Splash3D 模式之模擬，得出指定時間歷程之潮汐水位模擬結果，並與觀測資料校驗比對。

圖 6—5 展示了 Splash3D 之操作介面，可在此控制檔中設定模擬時長、初始水位面、使用地形與否等相關初始設定。

圖 6—6 則展示壓力邊界法於 3D 模型邊界上之作用方式，壓力邊界法之相關設置可參考步驟三。

```

1  &MESH
2  Ncell          = 40, 60, 51
3  Coord          = 0.0, 0.0, -20.0, 10000.0, 15000.0, 5.0
4  Fuzz           = 3*0.0
5  Ratio          = 3*1.0
6
7  /
8
9  &OUTPUTS
10
11  Output_T       = 0.0, 518400.0
12  Output_Dt      = 3600.0
13  Int_Output_Dt_Multiplier = 0
14  Gra_Output_Dt_Multiplier = 1
15  Short_Output_Dt_Multiplier = 0
16  Long_Output_Dt_Multiplier = 0
17  User_Output_Dt_Multiplier = 0
18  Graphics_Format = 'gmw'
19  Restart_Input_Format = 'ascii'
20  Restart_Output_Dt_multiplier = 4
21  Restart_Output_Format = 'ascii'
22
23  /
24  Output_T       = 0.0, 86400.0
25  Output_Dt      = 1800.0
26
27  &LINEAR_SOLVER
28
29  name           = 'projection'
30  method         = 'gmres'
31  preconditioning_method = '2level'
32  preconditioning_preconditioner = 'ssor'
33  convergence_criterion = 1.0e-4
34  relaxation_parameter = 1.3

```

圖 6—5 Splash3D 之控制檔操作介面

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$
$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$
$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$	$\rho g(h-H)$

h：水面高程
H：網格頂部高程

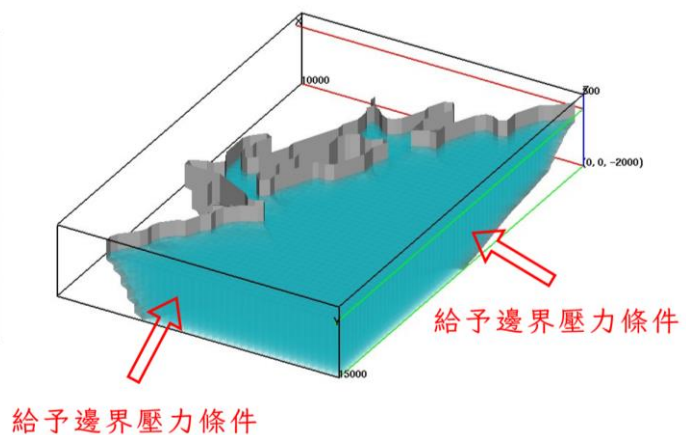


圖 6—6 壓力邊界法示意圖， ρ 為海水密度項， g 為重力項，
h 為海水面之高程，H 為網格頂部之高程

6-2-2 台中港案例模式模擬結果

在本項目之三維模擬案例中，地形採用整合地形、港口地點選址於港灣結構完整穩固、港口水深較深、潮差大、台中港潮位站所在之台中港，該港口之特性能更容易分析港灣遮蔽效應之影響。模擬時間設定於 2022 年 1 月，以確保結果之時序資料不受到風暴潮之影響。

綜觀地形剖面之壓力梯度與速度分量結果，除速度分量位於地形邊界時可能產生小範圍渦漩外，三維模式之模擬結果整體於港內及港外呈現均勻之壓力及速度分布情形（可參考圖 6—9 及圖 6—11，左側小區塊屬於港內，右側大區塊屬於港外），此現象顯示港灣海堤之遮蔽效應於三維模式當中並不明顯。此外，在製作三維模式分析案例時，由於台中港港區之覆蓋範圍大，模式為求運算之效率需降低解析度，並針對地形中部分水深進行修正，以免結果可能受三維模式之流體體積法運算影響，而導致完成模擬之所需時間大幅提升。在現有之模擬中，x 方向（圖 6—7 地形之短邊，紅色線段方向）共採用 40 個網格，y 方向（圖 6—7 地形之長邊，綠色線段方向）採用 60 個網格，z 方向（圖 6—7 地形水深，藍色線段方向）採用 51 個網格，總計 122,240 個網格。運行模式一天之潮汐分析需約 23 小時，且若於影響地形解析度之 y 方向提升一倍之解析度，運行模式中一天之潮汐分析所需約 62 小時。上述模擬顯示三維模式於港口之大範圍尺度下，難以取得解析度提升及模擬時效上之平衡點。考量三維模式無明顯之港灣遮蔽效應，以及時間成本之影響，且有鑑於過去二維預報產品之結果，藉由運算淺水波方程式，即能明確顯示港灣遮蔽效應帶來之影響，並進一步根據港口特性修正並減低觀測資料和二維模式模擬結果之差異，因此，後續團隊決定新增更多二維風暴潮預報模式之港口分析案例。

圖 6—7 為時間歷程第 0 小時至第 15 小時（每 3 小時為一間隔，左上至右下）之三維台中港潮位模擬示意圖，灰色部分表示地形，藍色部分反映潮位變化。

圖 6—8 為時間歷程第 0 小時至第 15 小時之三維台中港潮位壓力梯度示意

圖，在該系列圖片中可看出壓力梯度之變化，進一步確認壓力梯度隨時間及水位高程變化之情形。

圖 6—9 為時間歷程第 0 小時至第 15 小時之台中港橫切剖面之壓力梯度示意圖，藉此以觀察潮汐漲退過程中水體是否均勻地運動，並了解港內外之壓力梯度是否均勻或有所差異（意味是否有港灣遮蔽效應之作用）。

圖 6—10 為時間歷程第 0 小時至第 15 小時之台中港縱切剖面之壓力梯度示意圖，藉此以觀察潮汐漲退過程中水體是否均勻地運動。

圖 6—11 為時間歷程第 0 小時至第 15 小時之台中港橫切剖面之速度分量示意圖，藉此以觀察潮汐漲退過程中水體是否均勻地運動，並了解港內外之速度分量是否均勻或有所差異（意味是否有港灣遮蔽效應之作用）。

圖 6—12 為時間歷程第 0 小時至第 15 小時之台中港縱切剖面之速度分量示意圖，藉此以觀察潮汐漲退過程中水體是否均勻地運動。

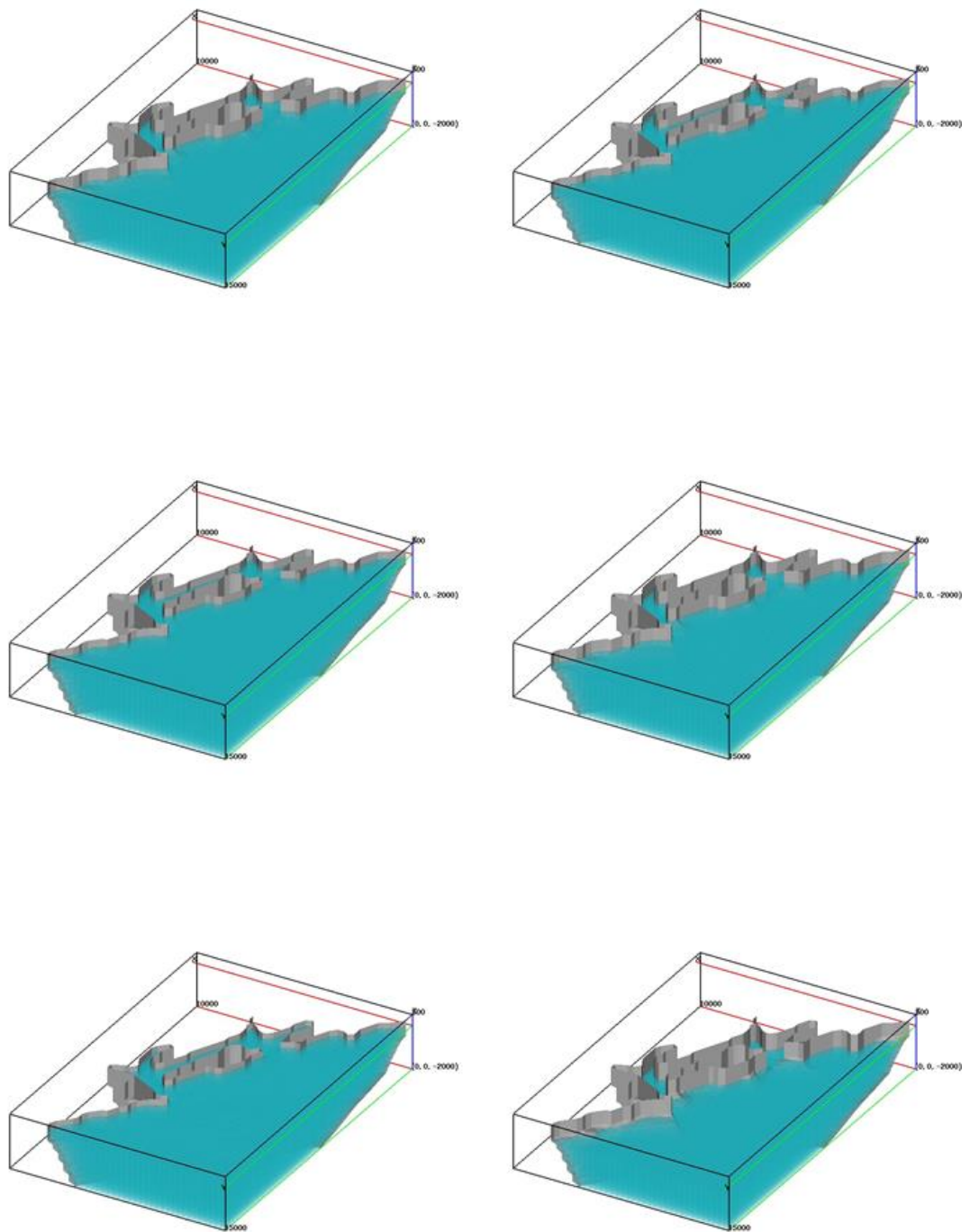


圖 6—7 三維台中港潮位模擬示意圖（第 0 小時至第 15 小時）

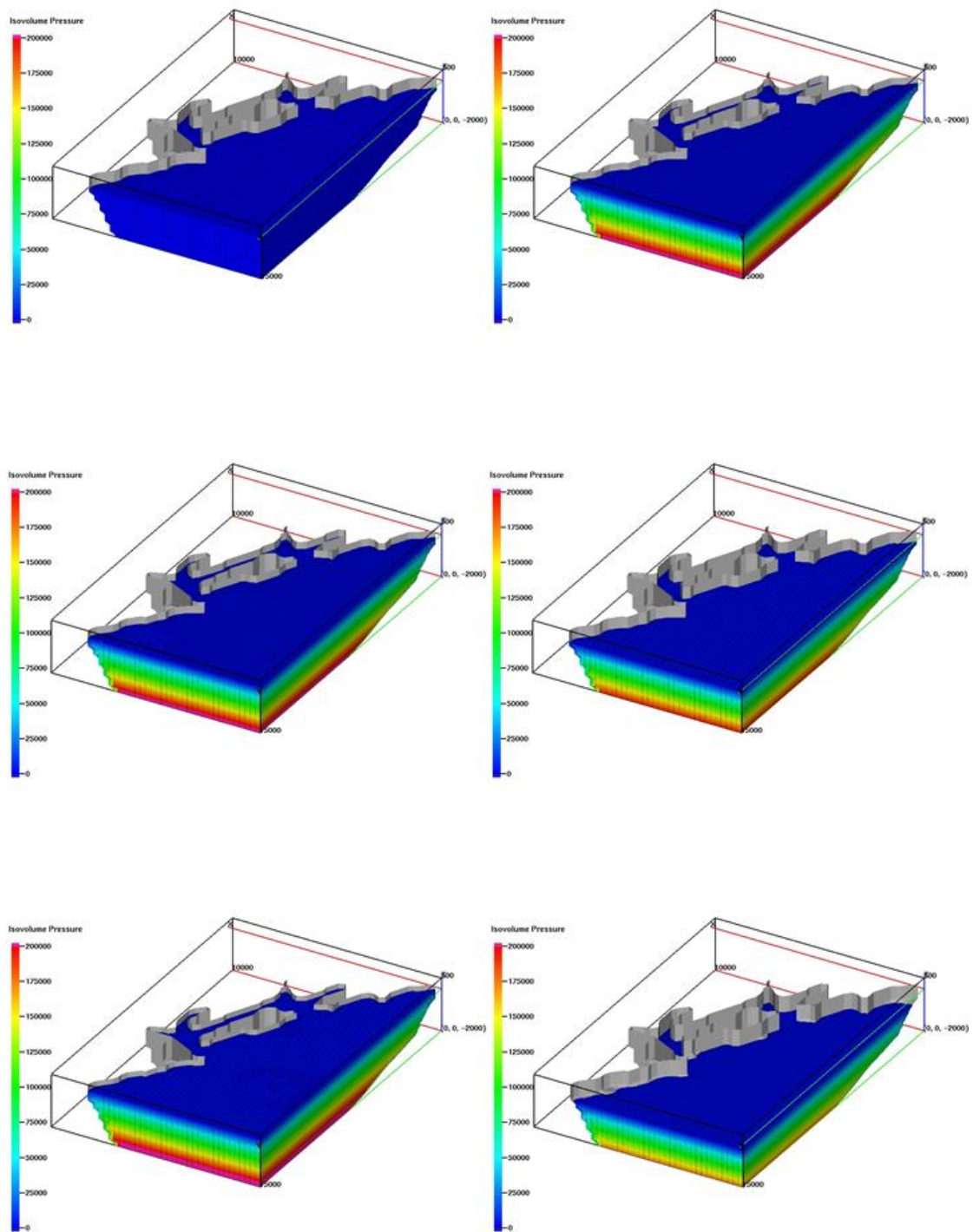


圖 6—8 三維台中港潮位壓力梯度示意圖（第 0 小時至第 15 小時）

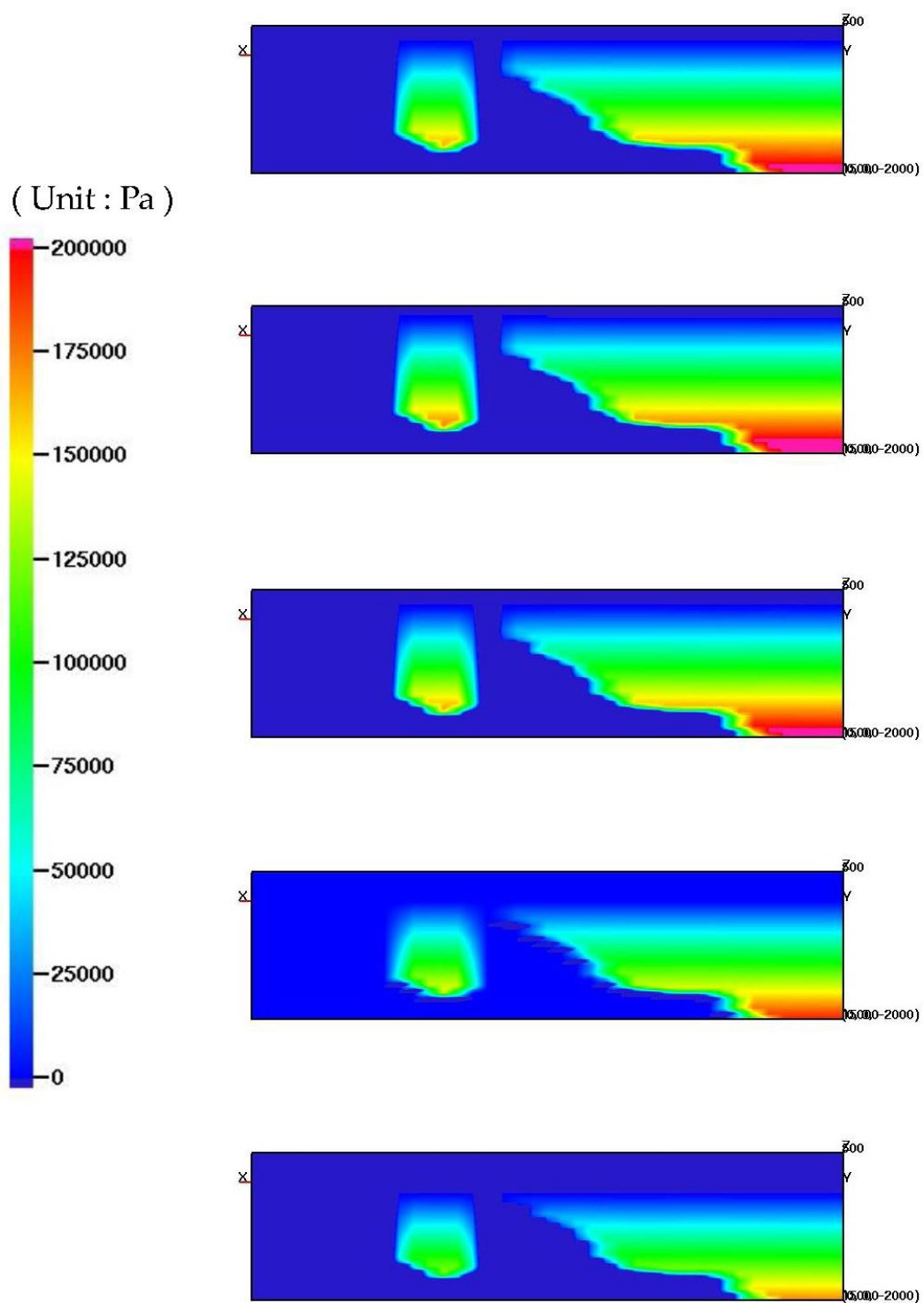


圖 6—9 台中港橫切剖面之壓力梯度示意圖

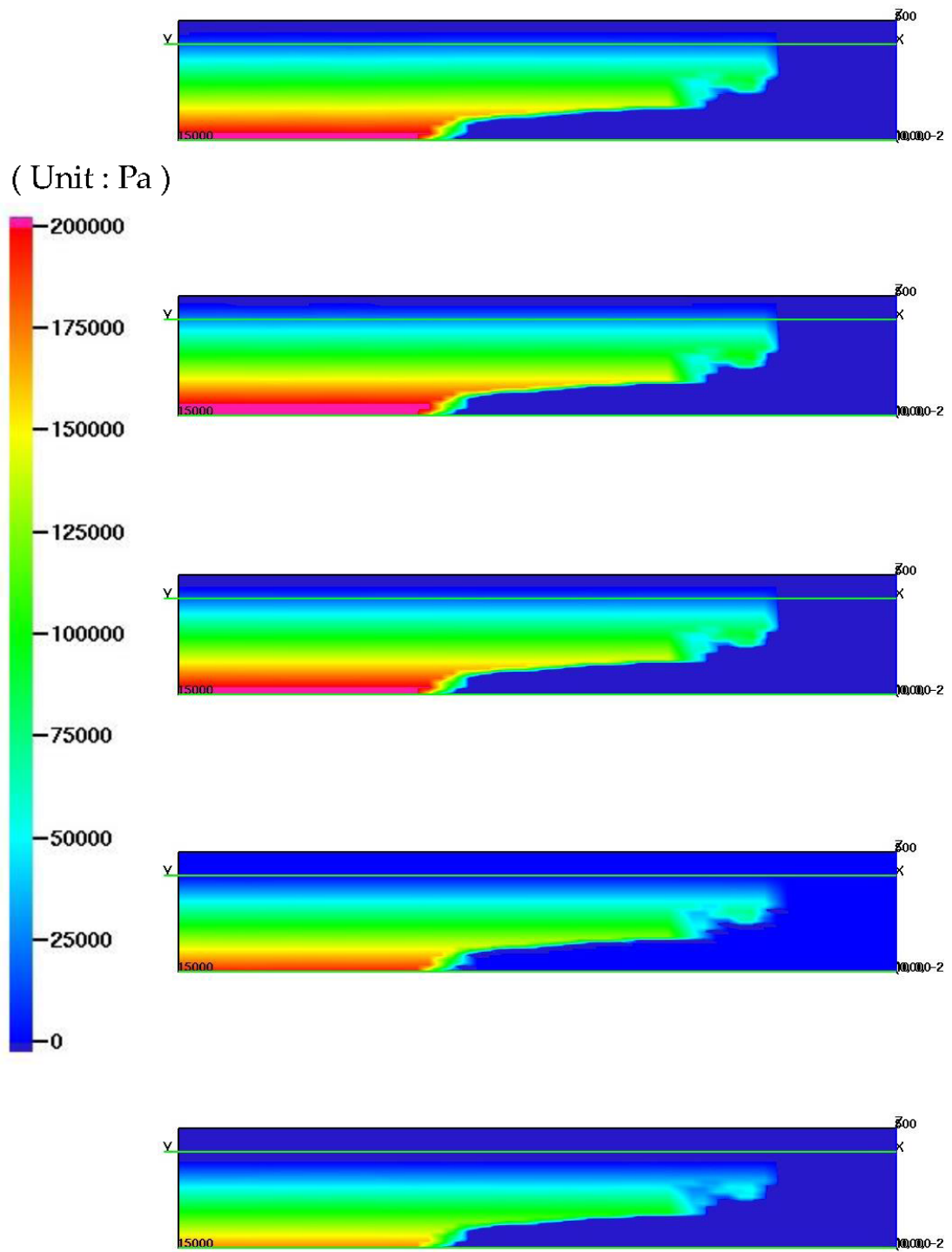


圖 6—10 台中港縱切剖面之壓力梯度示意圖

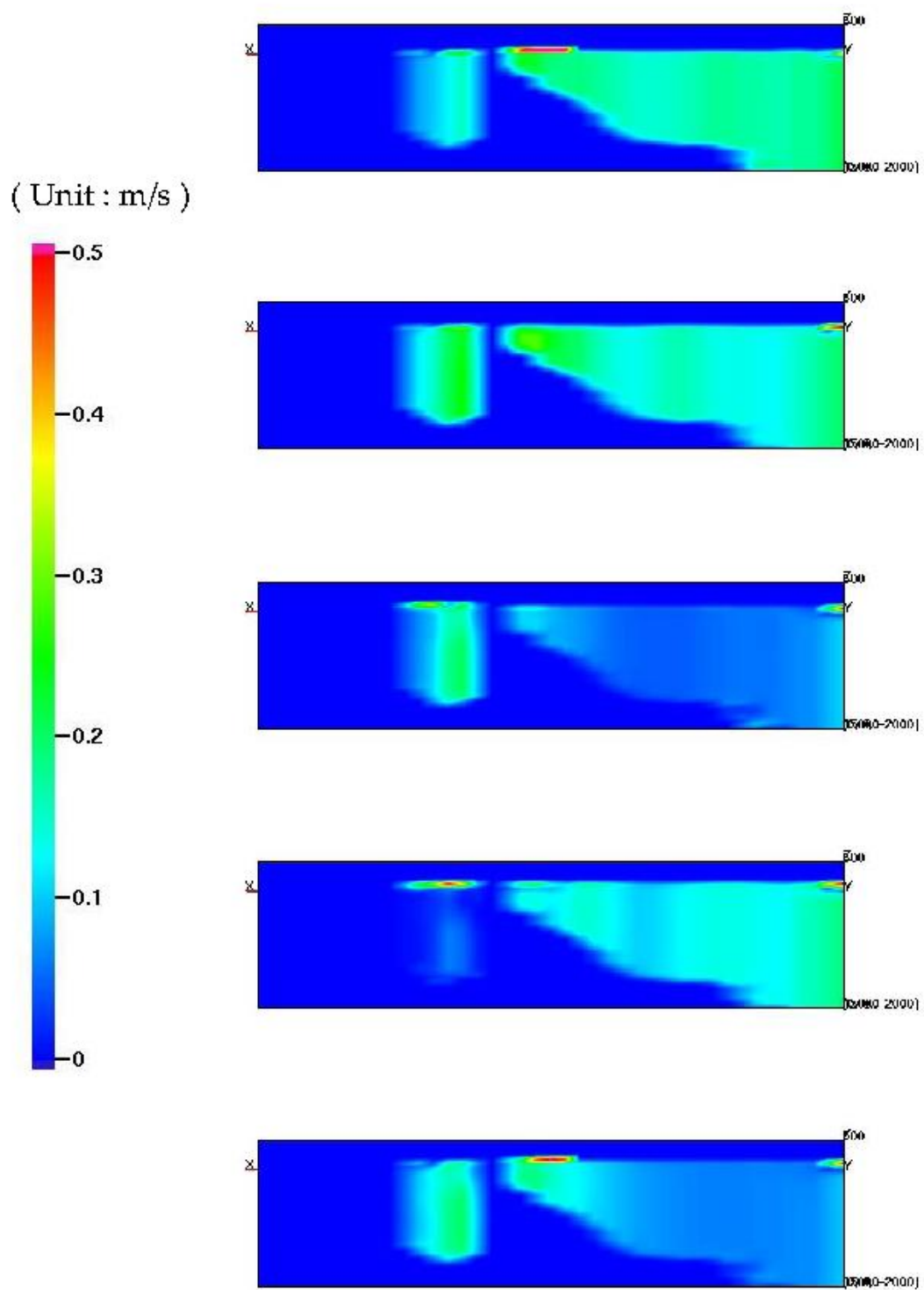


圖 6—11 台中港橫切剖面之速度分量示意圖

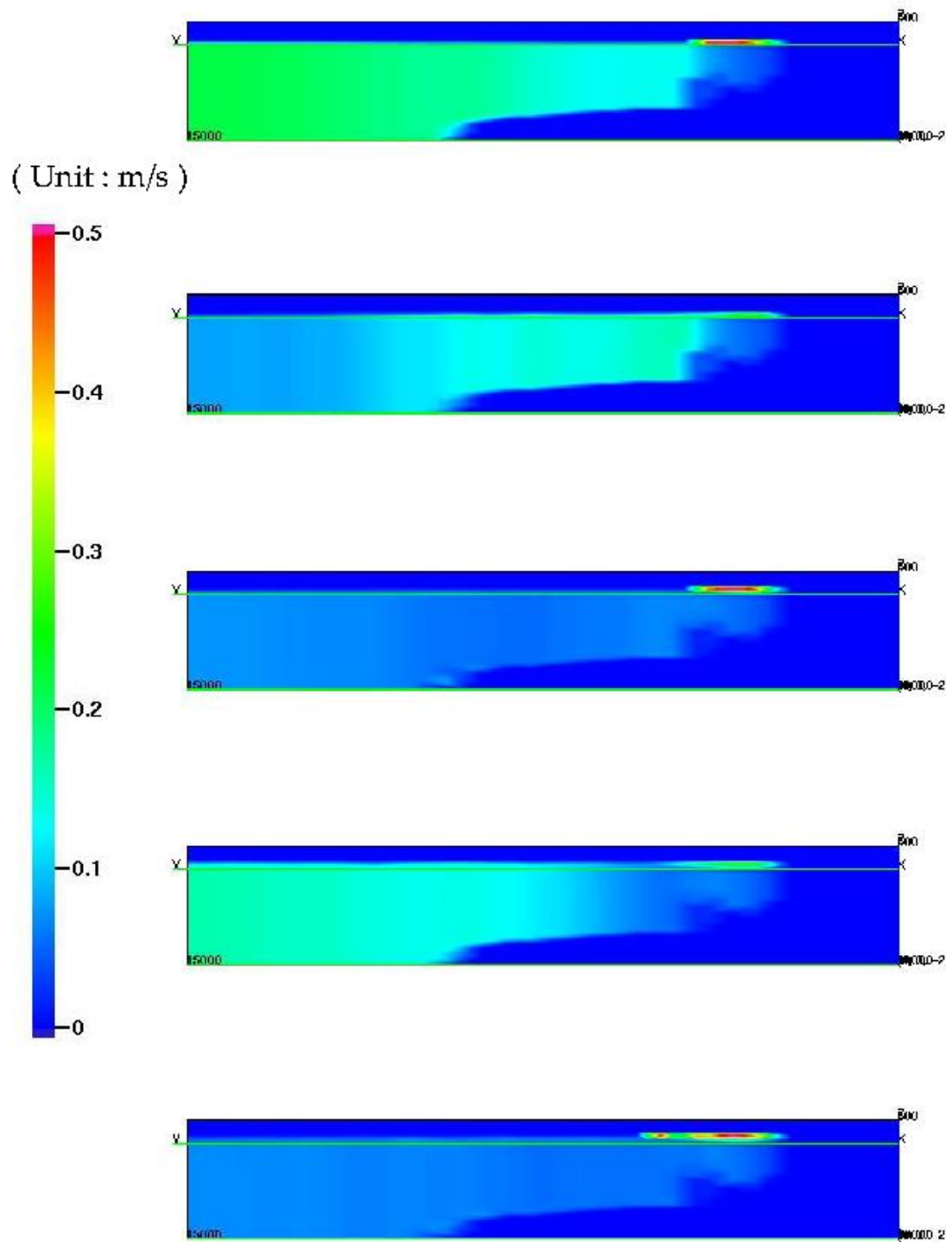


圖 6—12 台中港縱切剖面之速度分量示意圖

6-3 二維風暴潮預報模式分析

6-3-1 前言與模擬方法

在過去之二維風暴潮預報模式分析案例中，產品結果得出提升地形解析度與數值網格解析度，能有效降低預報模式之結果和觀測資料間之差異，並發現台中港潮位站存在潮時差異，顯示該潮位站確實受港灣遮蔽效應影響。因此，今年度之工作目標為進一步考量港灣海堤對於台灣其餘港口是否亦有遮蔽效應，進而進行多處港口之二維風暴潮預報模式之案例分析。

其中需考量之要素包含不同港口大小尺度、位處台灣東西岸、緯度南北差異等。因此，本項目除原先之台中港潮位站外，亦選定將軍潮位站（位於台南將軍漁港）、龍洞潮位站（位於新北龍洞南口遊艇港）、花蓮潮位站（位於花蓮港）、成功潮位站（位於台東新港漁港）、蘭嶼潮位站（位於台東蘭嶼開封漁港），共計六處位處港內之潮位站，以了解不同港口特性，與港灣遮蔽效應間之關聯性。

為探討各港口於二維風暴潮模式中受港灣遮蔽效應之影響，本計畫透過以下之分析方法來進行二維結果之模擬：

1. 透過 Global Mapper 軟體設定範圍、設定經緯度轉換並輸出整合地形後，將該整合地形做為二維風暴潮預報模式之地形資料，將其帶入模式後設定水位面與模擬時長等相關初始設定。
2. 藉由 TPXO 潮汐模式取得該地區範圍之邊界潮汐條件資料。
3. 將取得之潮汐邊界資料帶回二維風暴潮預報模式，得出指定時間歷程之潮汐水位模擬結果，並與觀測資料校驗比對。

圖 6—13 至圖 6—18 展示使用現行預報模式解析度之六個港口之地形示意圖。其中，圖 6—13 為台中港與其周遭區域、圖 6—14 為台南將軍漁港與其周遭區域、圖 6—15 為龍洞南口遊艇港與其周遭區域、圖 6—16 為花蓮港與其周遭區域、圖 6—17 為台東新港漁港與其周遭區域、圖 6—18 為台東蘭嶼開封漁港與其周遭區域。

圖 6—19 至圖 6—24 展示使用高解析度模式解析度（整合地形）之六個港口之地形示意圖。其中，圖 6—19 為台中港與其周遭區域、圖 6—20 為台南將軍漁港與其周遭區域、圖 6—21 為龍洞南口遊艇港與其周遭區域、圖 6—22 為花蓮港與其周遭區域、圖 6—23 為台東新港漁港與其周遭區域、圖 6—24 為台東蘭嶼開封漁港與其周遭區域。

表 6—1 標明六個潮位站於預報模式中之站碼、英文站名，以及經緯度資訊。而表 6—2 則標明六個潮位站於高解析度模式中之站碼、英文站名，以及經緯度資訊。

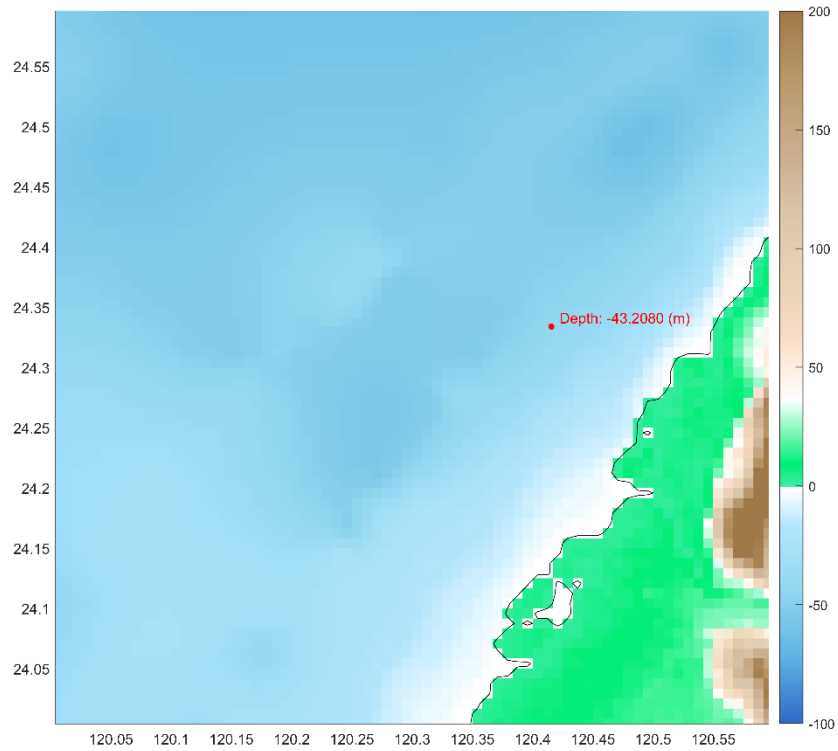


圖 6—13 台中港潮位站於預報模式解析度之地形示意圖
(紅點為預報模式中潮位站之位置與水深)

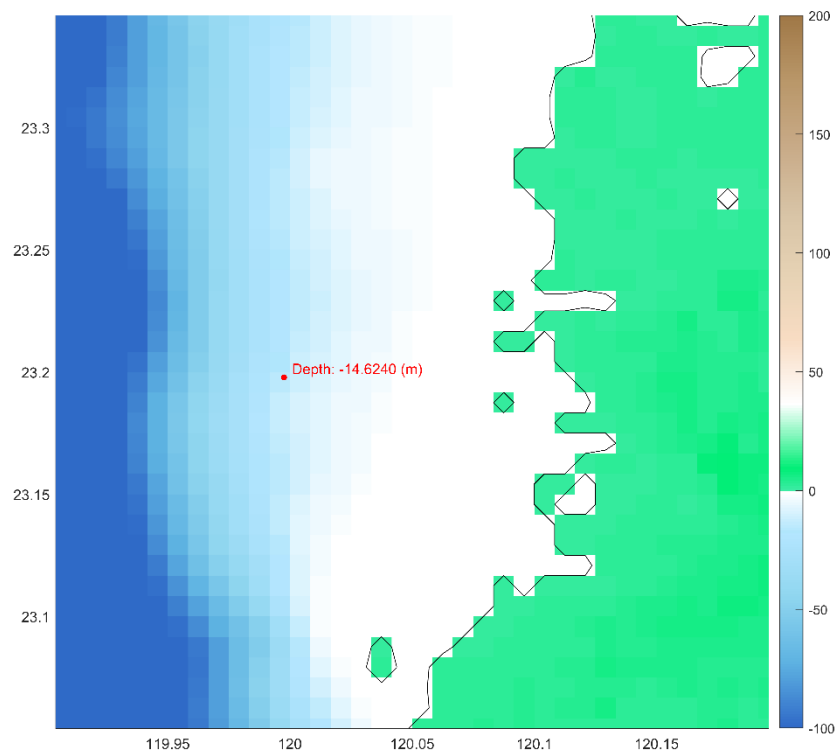


圖 6—14 將軍潮位站於預報模式解析度之地形示意圖
(紅點為預報模式中潮位站之位置與水深)

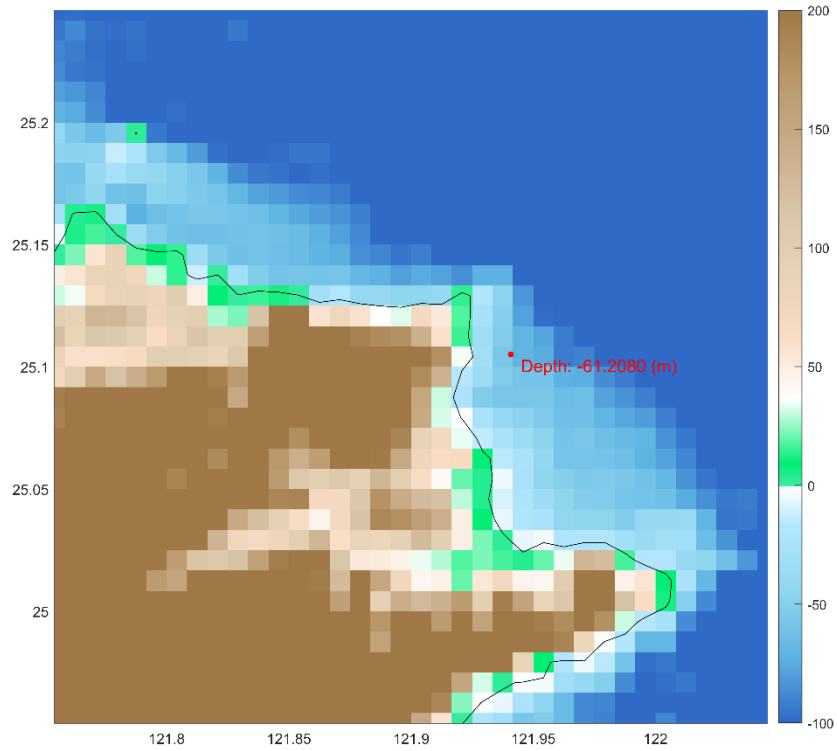


圖 6—15 龍洞潮位站於預報模式解析度之地形示意圖

(紅點為預報模式中潮位站之位置與水深)

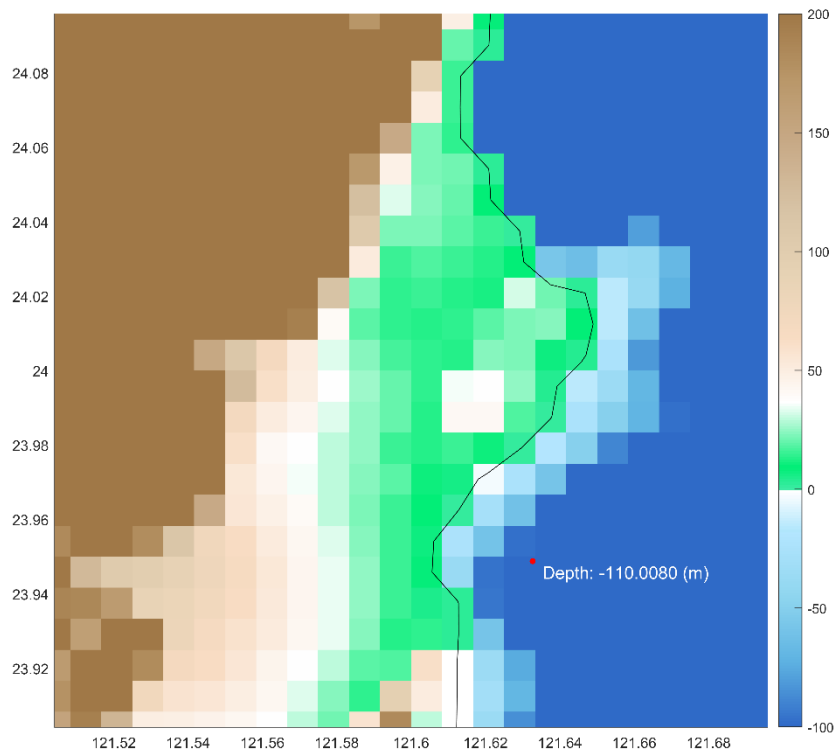


圖 6—16 花蓮潮位站於預報模式解析度之地形示意圖

(紅點為預報模式中潮位站之位置與水深)

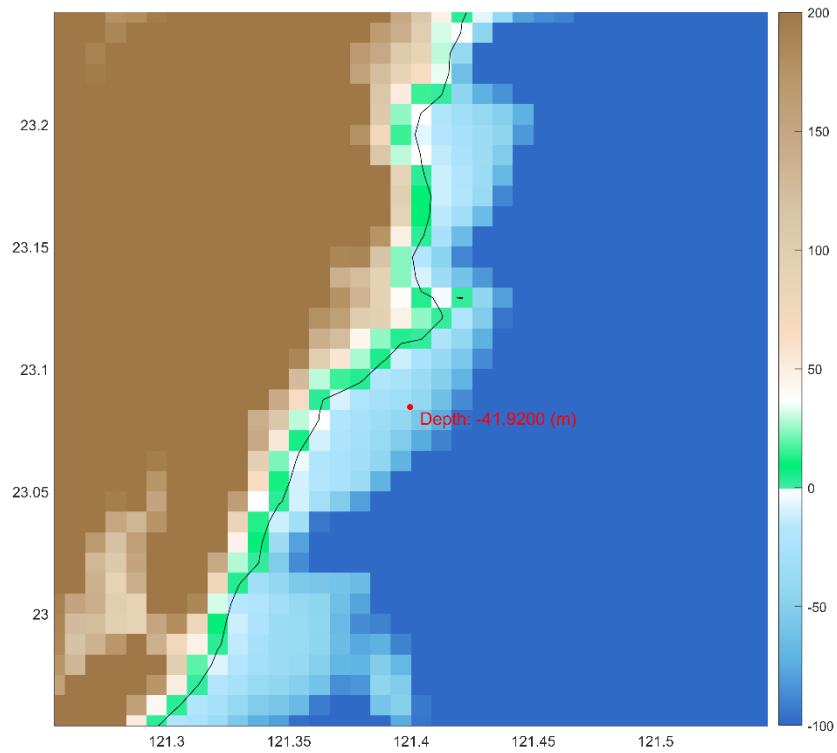


圖 6—17 成功潮位站於預報模式解析度之地形示意圖
(紅點為預報模式中潮位站之位置與水深)

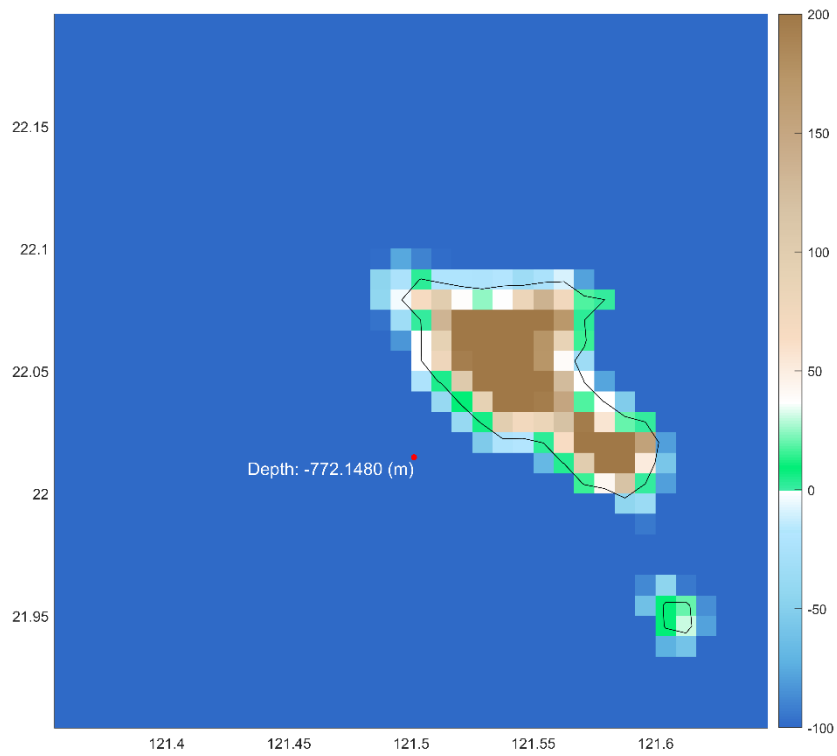


圖 6—18 蘭嶼潮位站於預報模式解析度之地形示意圖
(紅點為預報模式中潮位站之位置與水深)

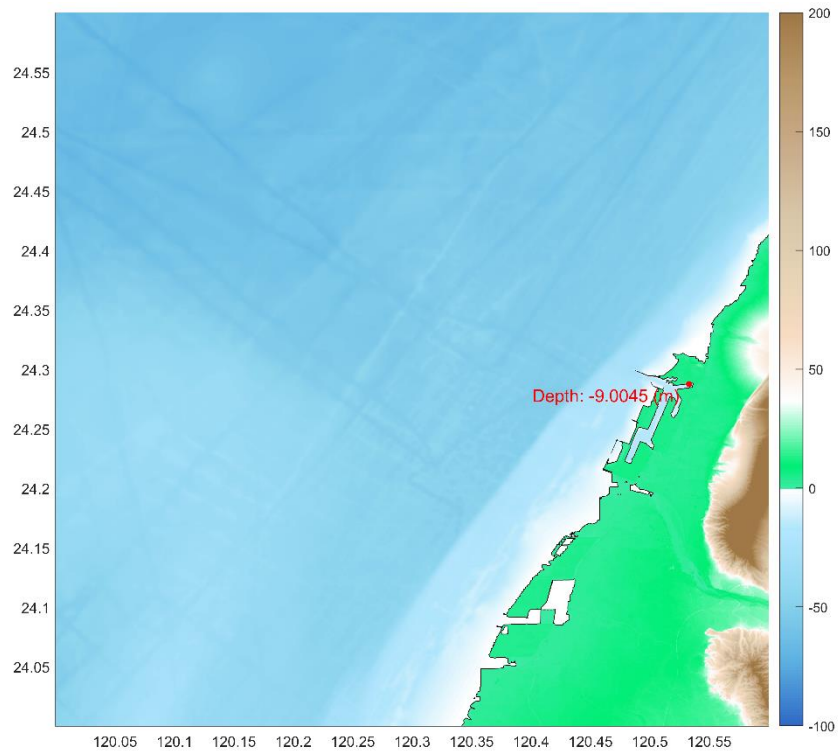


圖 6—19 台中港潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖
(紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)

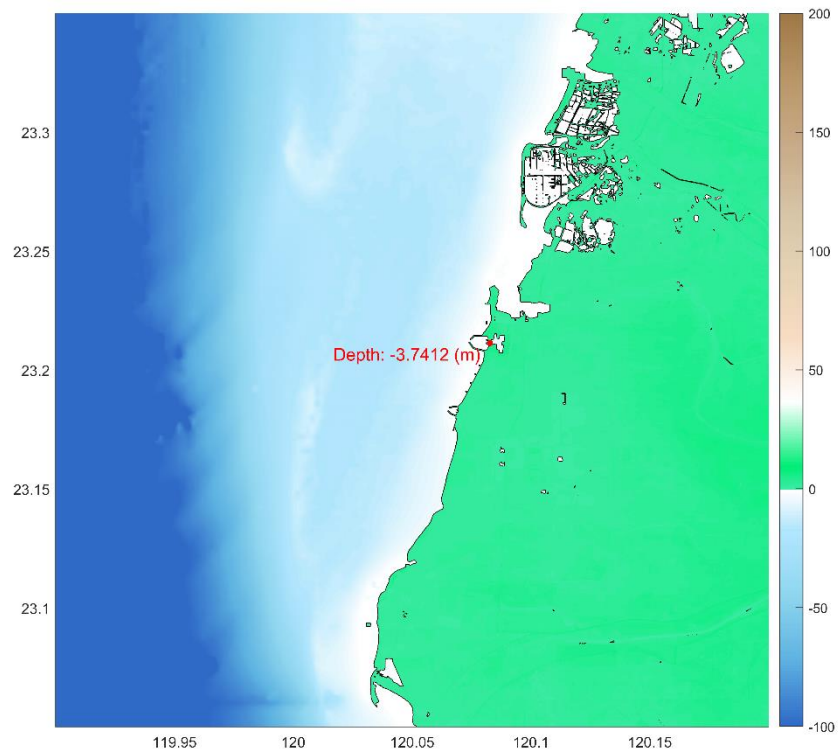


圖 6—20 將軍潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖
(紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)

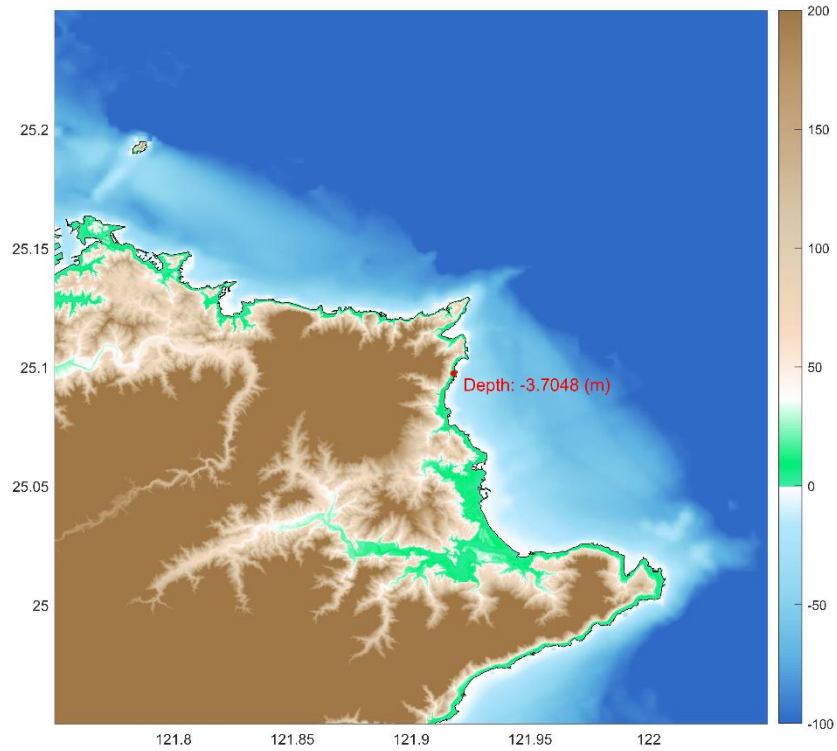


圖 6—21 龍洞潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖
(紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)

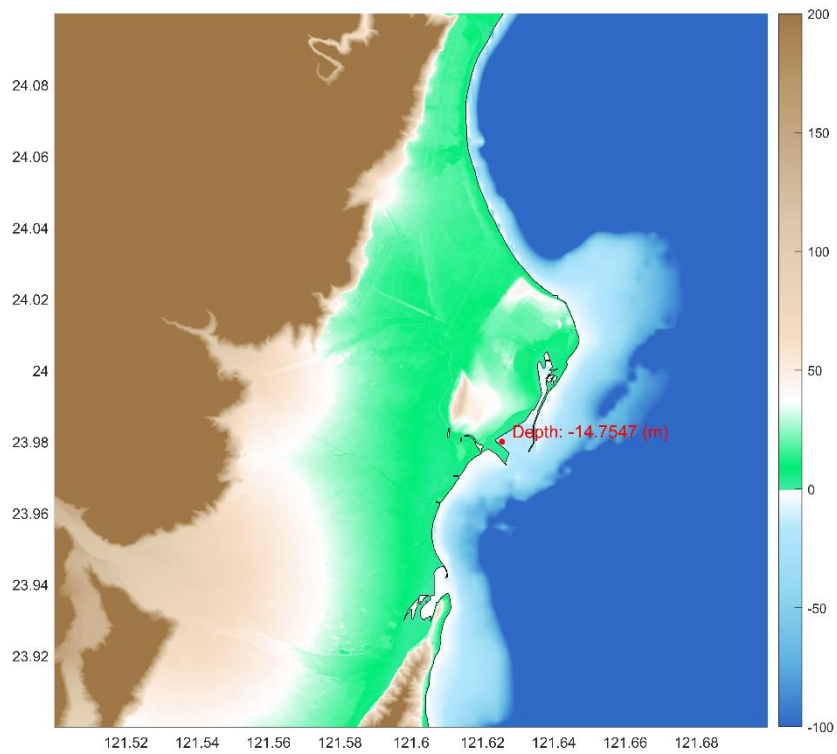


圖 6—22 花蓮潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖
(紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)

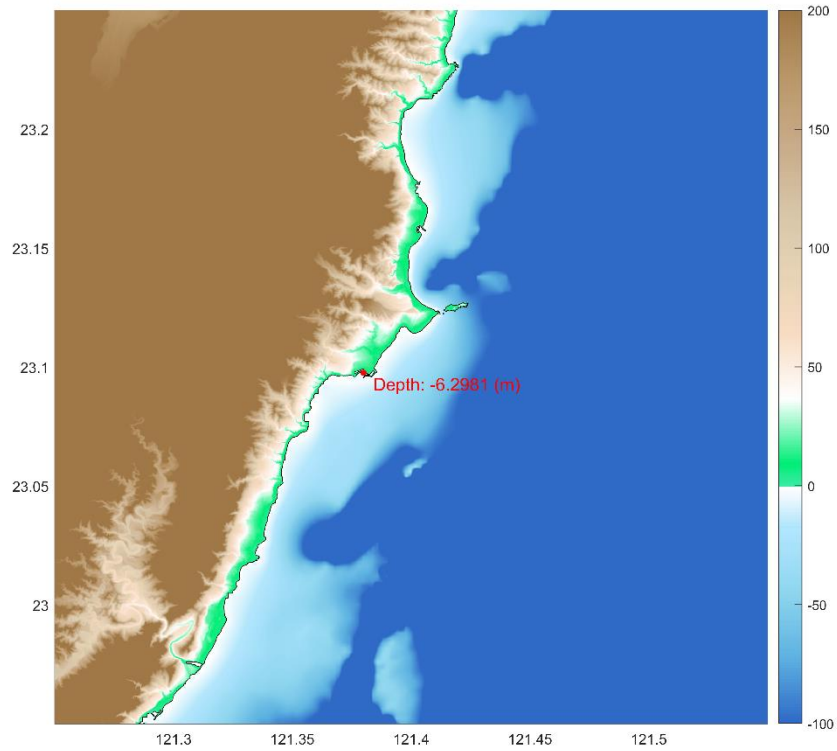


圖 6—23 成功潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖
(紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)

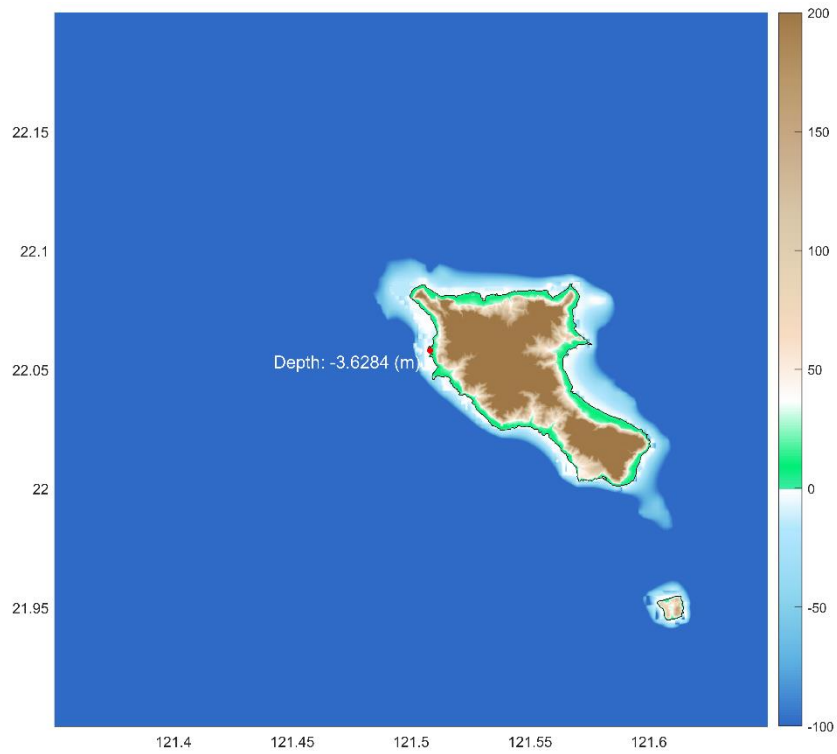


圖 6—24 蘭嶼潮位站於高解析度模式解析度之整合地形示意圖
(紅點為高解析度模式中潮位站之位置與水深)

中文站名	英文站名	站碼	經度	緯度
台中港潮位站	Taichung Port	1436	120.415600	24.334000
將軍潮位站	Jiangjun	1176	119.997600	23.197800
龍洞潮位站	Longdong	1226	121.940800	25.105100
花蓮潮位站	Hualien	1256	121.632700	23.948800
成功潮位站	Chenggong	1276	121.399600	23.084500
蘭嶼潮位站	Lanyu	1396	121.501200	22.014800

表 6—1 預報模式潮位站之中文站名、英文站名、站碼、經緯度資訊

中文站名	英文站名	站碼	經度	緯度
台中港潮位站	Taichung Port	1436	120.531380	24.287500
將軍潮位站	Jiangjun	1176	120.082770	23.211380
龍洞潮位站	Longdong	1226	121.917770	25.097220
花蓮潮位站	Hualien	1256	121.623610	23.980270
成功潮位站	Chenggong	1276	121.380000	23.097222
蘭嶼潮位站	Lanyu	1396	121.507770	22.057500

表 6—2 高解析度模式潮位站之中文站名、英文站名、站碼、經緯度資訊

6-3-2 無暴潮作用下之潮汐校驗案例：2022 年 1 月

本項目提升地形解析度之方式，期望將地形細緻化以建構完整港口細節（包含海堤、港池、碼頭等），並藉由加密數值網格解析度，搭配 TPXO 潮汐模式以獲取邊界潮位條件，以取得特定港口區域隨時間變化之潮汐水位模擬結果，最終將其與觀測資料進一步比對校驗，以期降低潮汐效應之殘差值，因此，除搭配整合地形外，亦須優先瞭解純潮汐水位受港灣遮蔽效應之反應與二維模式模擬結果，因而挑選 2022 年 1 月份作為校驗資料之時段，以比對校驗六個港口內潮位站之潮位差異。

在探討及校驗潮汐或風暴潮水位時，皆可利用方均根誤差、偏差量及相關係數等統計參數，檢視模式之模擬水位與觀測資料間之差異。其中，方均根誤差（root-mean-square error，RMSE）是所有誤差的平方均值的平方根。方均根誤差的使用非常普遍，它被認為是用於數值預測時優秀且通用的誤差度量，但由於方均根誤差與尺度相關，因此僅適用於比較特定變量的不同模型或模型設置的預測誤差。其計算公式為：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (\text{式6—1})$$

其中 O_i 是觀測值， S_i 是變量的預測值， n 是可用於分析的觀測值數量。

偏差量（Bias）為預測和實際值之間差異的平均值。偏差量為零時，表示預測模型的平均值和實際資料相同。偏差量接近 0 為較佳情況。若偏差量為負值，表示預測結果通常低於實際情形。反之若偏差量較高則表示預測通常有高估的情形。偏差量計算公式如下：

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{n} \quad (\text{式6—2})$$

其中 O_i 是觀測值， S_i 是變量的預測值， n 是可用於分析的觀測值數量。

相關係數（correlation coefficient， r ）是一種相關程度的測量，在統計學上的意義是兩個變數之間的關係，定義為兩個變數的共變異數除以它們標準差的乘積：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (\text{式6—3})$$

其中 $\bar{S}$ 及 $\bar{O}$ 分別代表預測值平均及觀測值平均。相關係數值介於-1 至 1 之間。係數的值為±1意味著兩項變量可以很好的由直線方程式來描述，相關係數的值為 0 意味著兩個變數之間沒有線性關係。

在分析六個不同潮位站之潮位後，發現各個潮位站之整合地形二維模擬結果與觀測資料之潮位間皆有一定之時間差，台中港潮位站為 12 分鐘，將軍潮位站為 17 分鐘，龍洞潮位站為 22 分鐘，花蓮潮位站為 12 分鐘，成功潮位站為 6 分鐘，蘭嶼潮位站為 5 分鐘。各潮位站反應之潮時差顯示在純潮汐情境下，港灣遮蔽效應確實反映於各個區域、不分範圍大小之港口。因此，若要提升各港口間之校驗資料準確度，降低與觀測資料間之殘差，則可針對各個港口之時間差特徵進行修正（後稱之為時間校正）。此外，在與現行預報模式之二維模式結果比較後，採用整合地形之高解析度二維模式結果在各個測站之表現皆優於現行二維預報模式之結果，顯示提升解析度對校驗資料之幫助。

於無暴潮情境下之港內外差異，可由港內之高解析度模式與港外之預報模式結果比較。其結果顯示，於台中港、將軍、龍洞潮位站，無論港內外皆存在時間差之現象，其餘測站在港外之預報模式表現，則無顯示港內高解析度模式結果之時間差特徵，於潮位大小上則僅台中港潮位站有明顯之差異（港內較港外潮位站之方均根誤差提升約 45 公分），其餘潮位站於港內外無明顯區別。

圖 6—25 至圖 6—28 為台中港潮位站之时序系列校驗圖。

圖 6—25 為時間歷程自 2022 年 1 月 1 日 0 時起（UTC+0），台中港周遭之第 0 小時至第 15 小時（每 3 小時為一間隔，左上至右下）之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—26 為台中港潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之时序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差

(模擬值減去觀測值)，並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—27 為台中港潮位站之觀測資料與時間校正（12 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—28 為台中港潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果（較低解析度）之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—29 至圖 6—32 為將軍潮位站之時序系列校驗圖。

圖 6—29 為時間歷程自 2022 年 1 月 1 日 0 時起（UTC+0），將軍漁港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時（每 3 小時為一間隔，左上至右下）之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—30 為將軍潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—31 為將軍潮位站之觀測資料與時間校正（17 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—32 為將軍潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果（較低解析度）之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值

(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—33 至圖 6—36 為龍洞潮位站之时序系列校驗圖。

圖 6—33 為時間歷程自 2022 年 1 月 1 日 0 時起 (UTC+0)，龍洞南口遊艇港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時 (每 3 小時為一間隔，左上至右下) 之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—34 為龍洞潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之时序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差 (模擬值減去觀測值)，並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—35 為龍洞潮位站之觀測資料與時間校正 (22 分鐘時差) 之二維風暴潮預報模式結果之时序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差 (模擬值減去觀測值)，並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—36 為龍洞潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果 (較低解析度) 之时序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差 (模擬值減去觀測值)，並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—37 至圖 6—40 為花蓮潮位站之时序系列校驗圖。

圖 6—37 為時間歷程自 2022 年 1 月 1 日 0 時起 (UTC+0)，花蓮港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時 (每 3 小時為一間隔，左上至右下) 之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—38 為花蓮潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之时序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差 (模擬值減去觀測值)，並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe.

Corr.)之統計結果。

圖 6—39 為花蓮潮位站之觀測資料與時間校正（12 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之时序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—40 為花蓮潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果（較低解析度）之时序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—41 至圖 6—44 為成功潮位站之时序系列校驗圖。

圖 6—41 為時間歷程自 2022 年 1 月 1 日 0 時起（UTC+0），新港漁港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時（每 3 小時為一間隔，左上至右下）之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—42 為成功潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之时序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—43 為成功潮位站之觀測資料與時間校正（6 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之时序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—44 為成功潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果（較低解析度）之时序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—45 至圖 6—48 為蘭嶼潮位站之時序系列校驗圖。

圖 6—45 為時間歷程自 2022 年 1 月 1 日 0 時起 (UTC+0)，蘭嶼開封漁港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時 (每 3 小時為一間隔，左上至右下) 之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—46 為蘭嶼潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差 (模擬值減去觀測值)，並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—47 為蘭嶼潮位站之觀測資料與時間校正 (5 分鐘時差) 之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差 (模擬值減去觀測值)，並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—48 為蘭嶼潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果 (較低解析度) 之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差 (模擬值減去觀測值)，並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

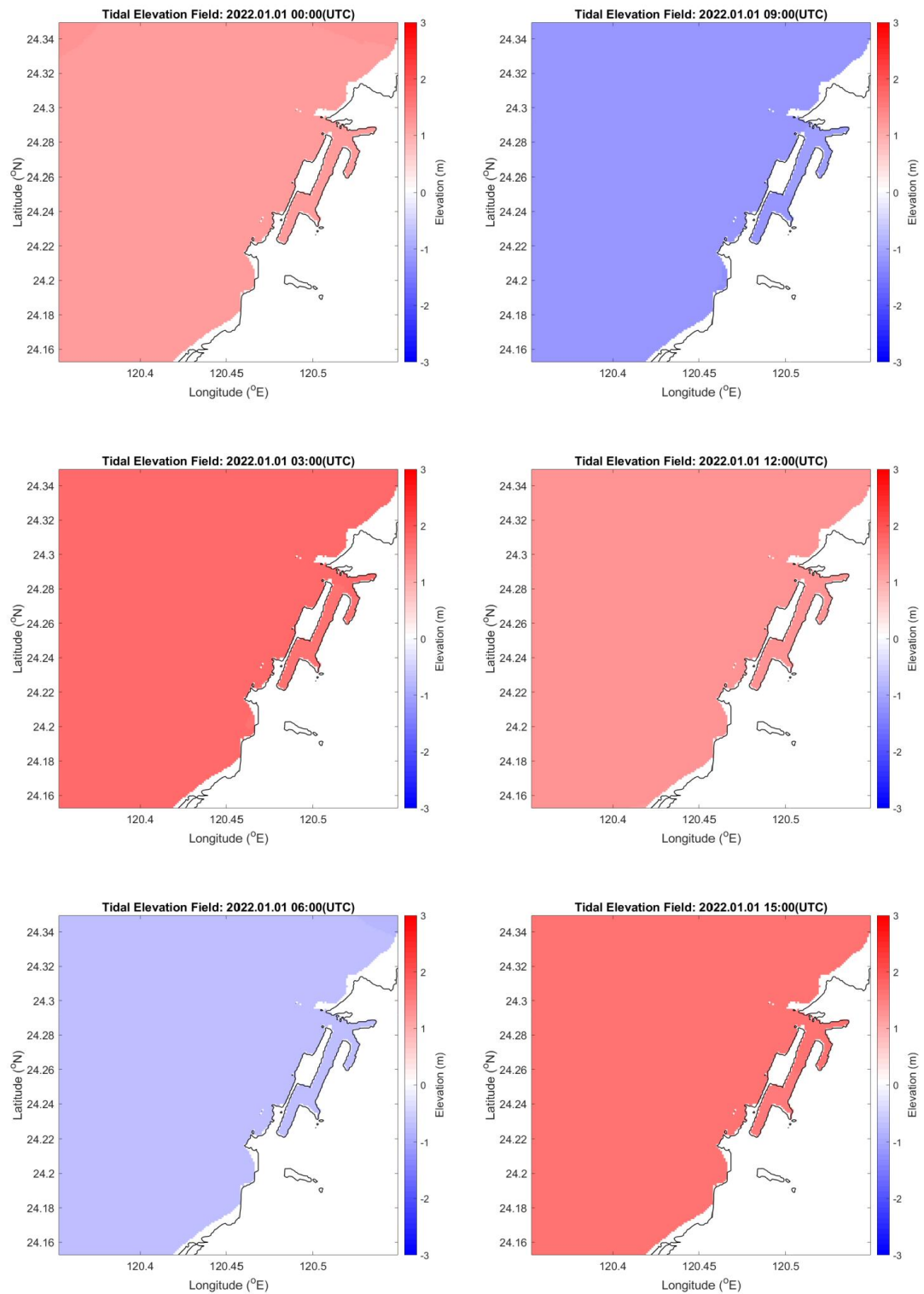


圖 6—25 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之台中港周遭二維潮位變化圖
(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

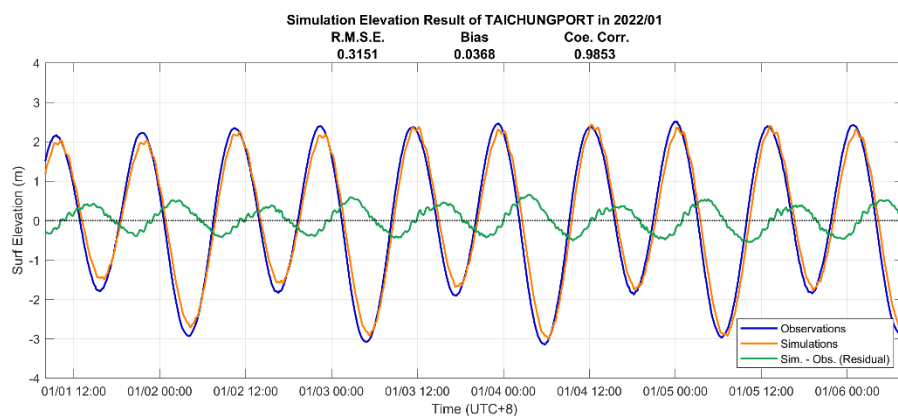


圖 6—26 整合地形／原始時間之台中港潮位站時序校驗圖

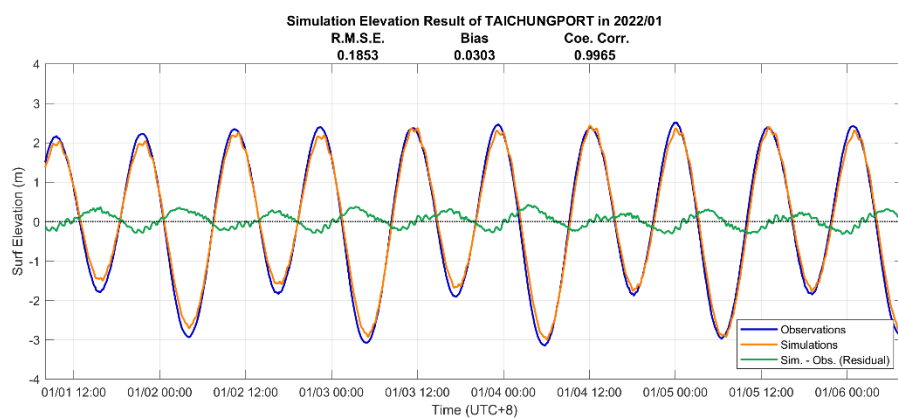


圖 6—27 整合地形／時間校正之台中港潮位站時序校驗圖

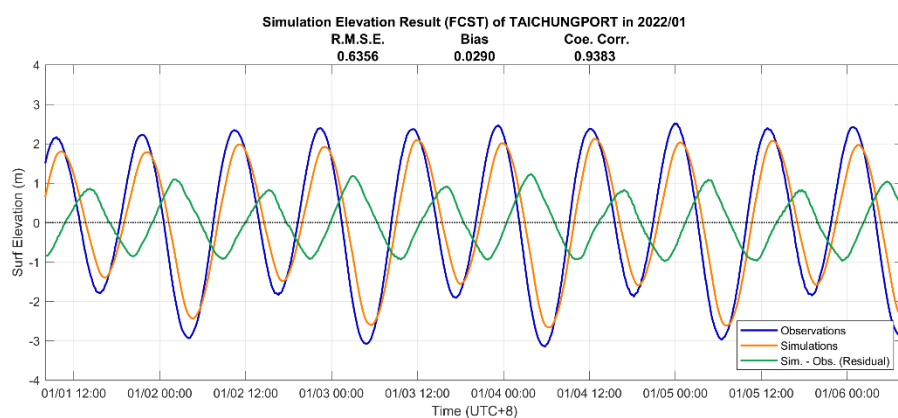


圖 6—28 現行預報模式之台中港潮位站時序校驗圖

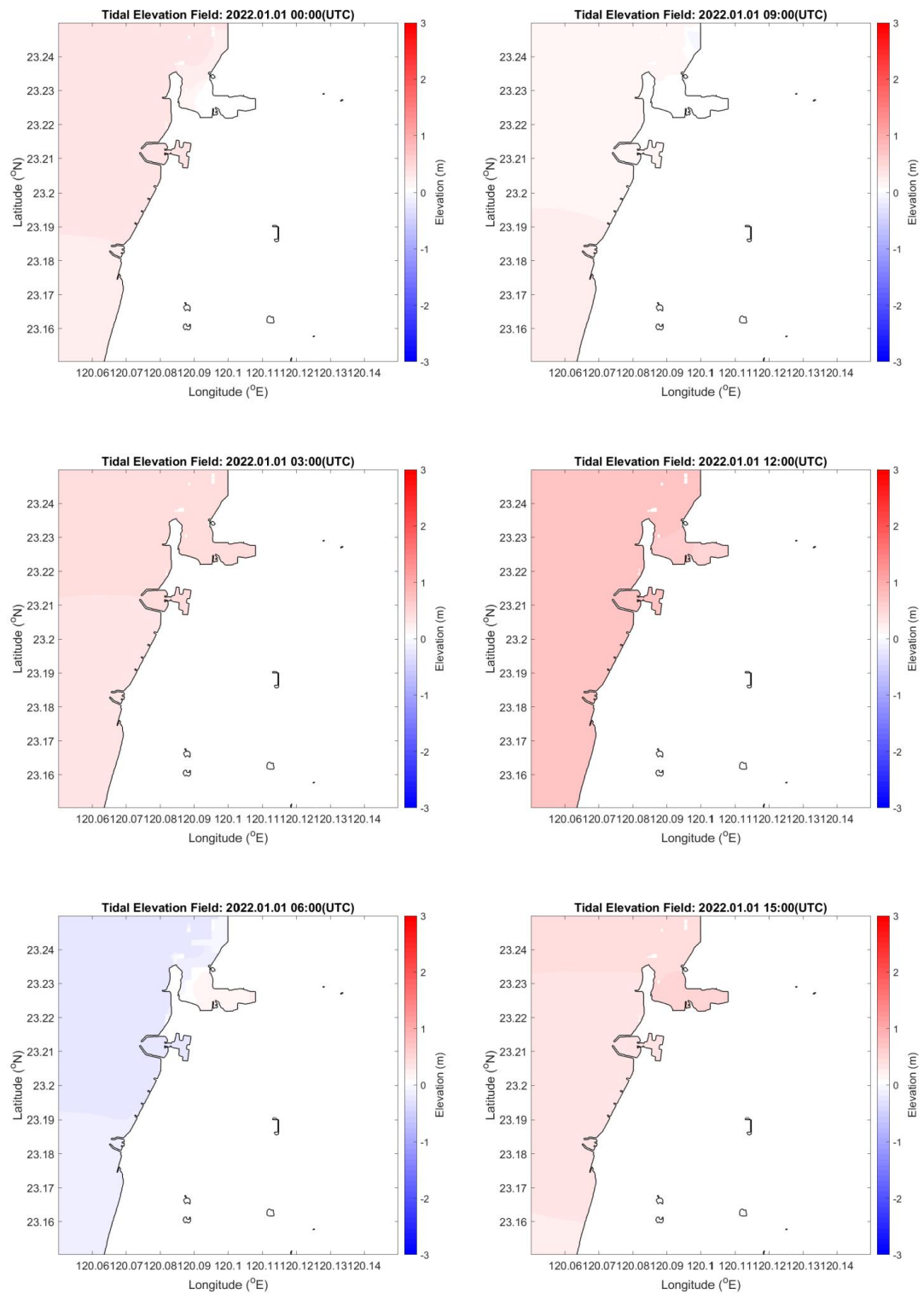


圖 6—29 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之將軍漁港周遭二維潮位變化圖
(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

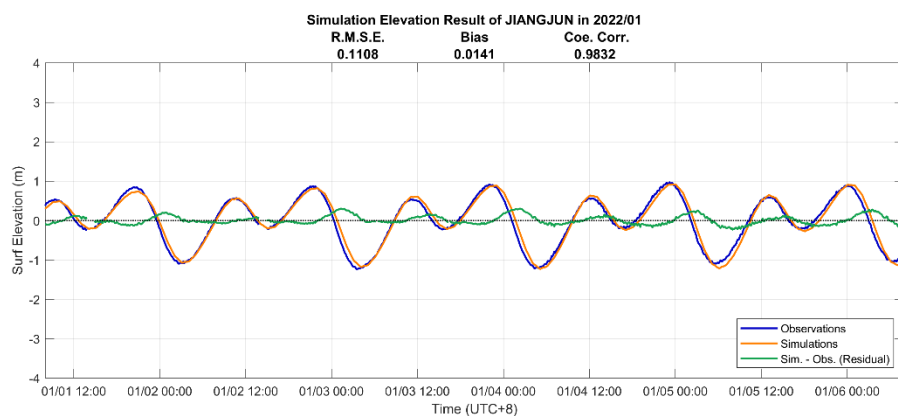


圖 6—30 整合地形／原始時間之將軍潮位站時序校驗圖

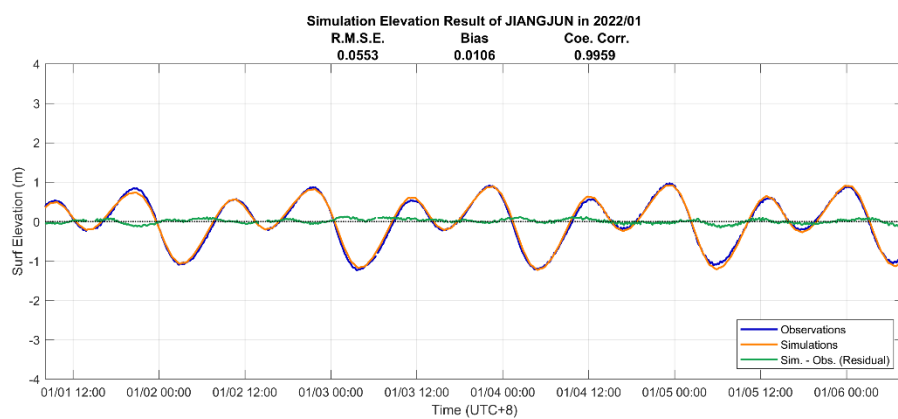


圖 6—31 整合地形／時間校正之將軍潮位站時序校驗圖

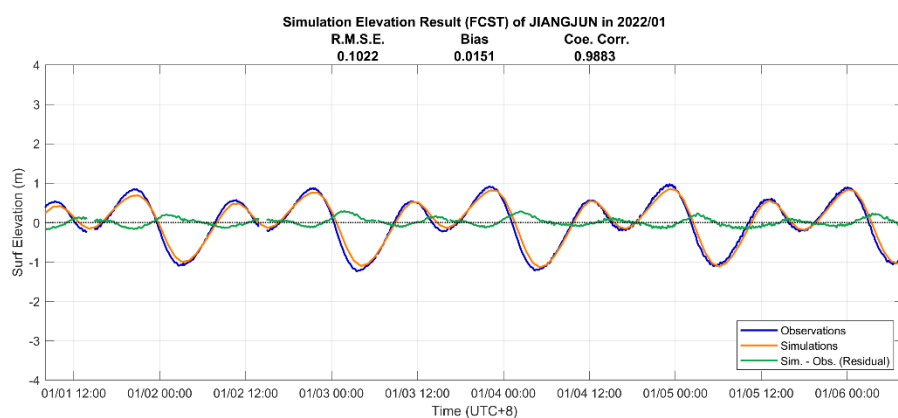


圖 6—32 現行預報模式之將軍潮位站時序校驗圖

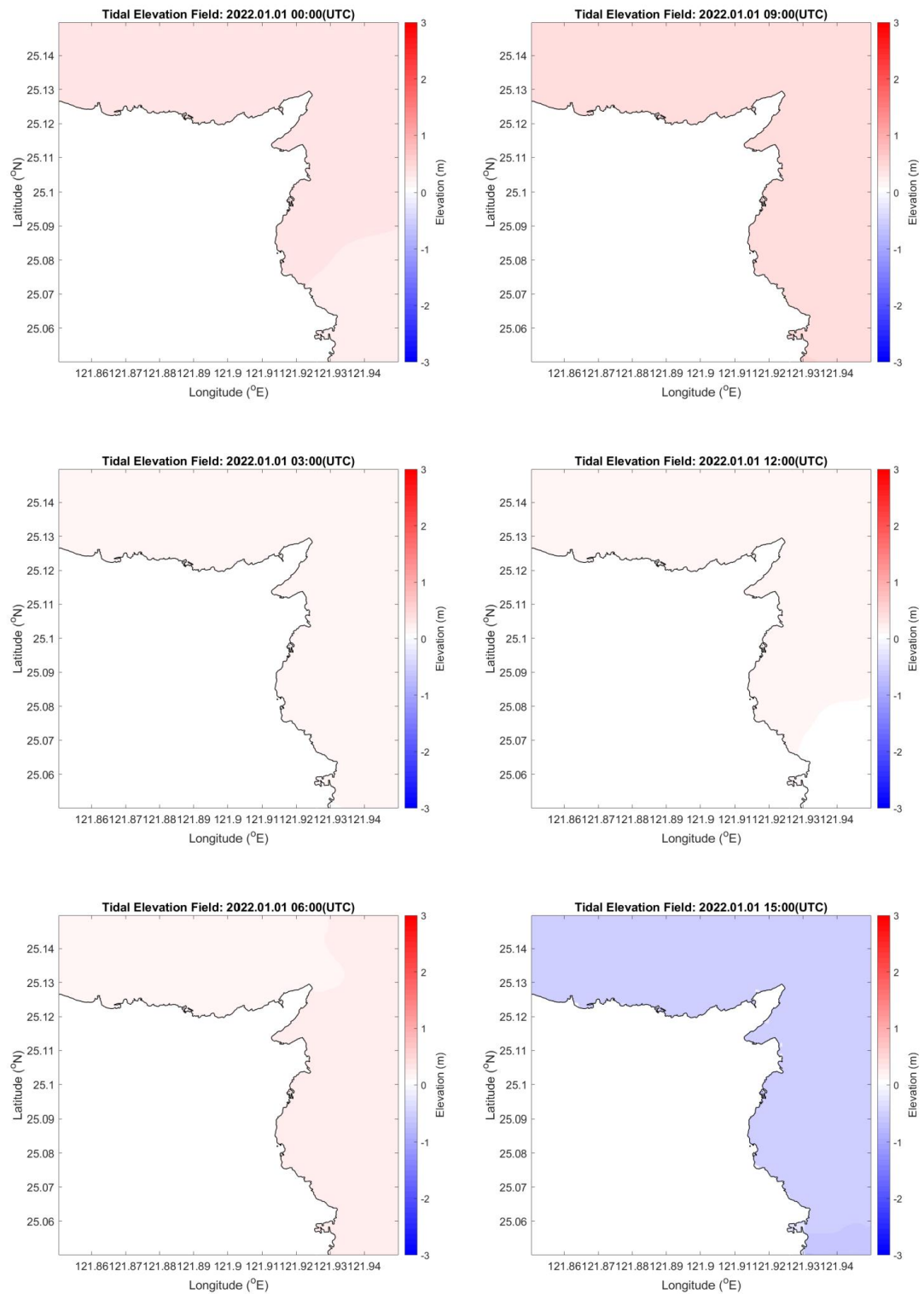


圖 6—33 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之龍洞南口潛艇港周遭二維潮位變化圖
(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

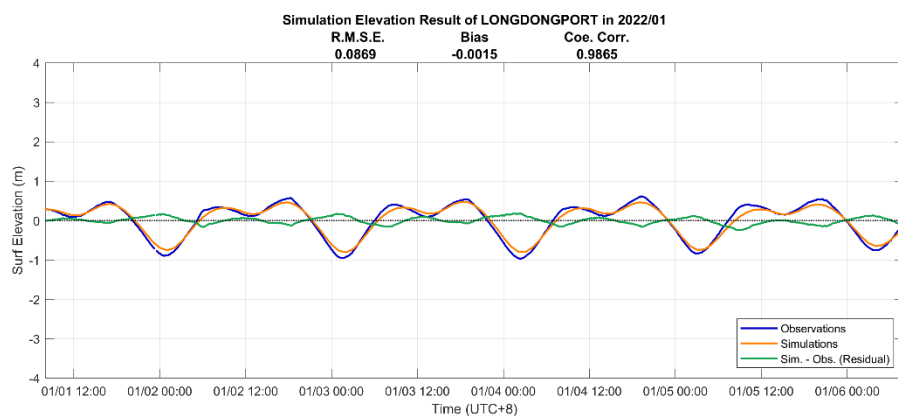


圖 6—34 整合地形／原始時間之龍洞潮位站時序校驗圖

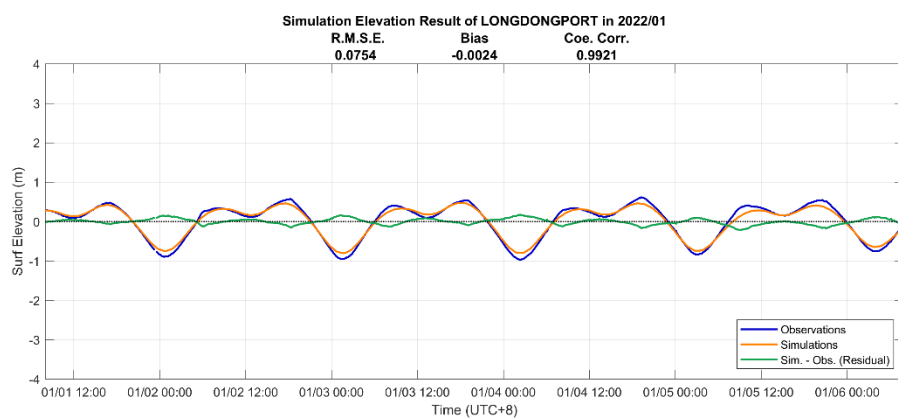


圖 6—35 整合地形／時間校正之龍洞潮位站時序校驗圖

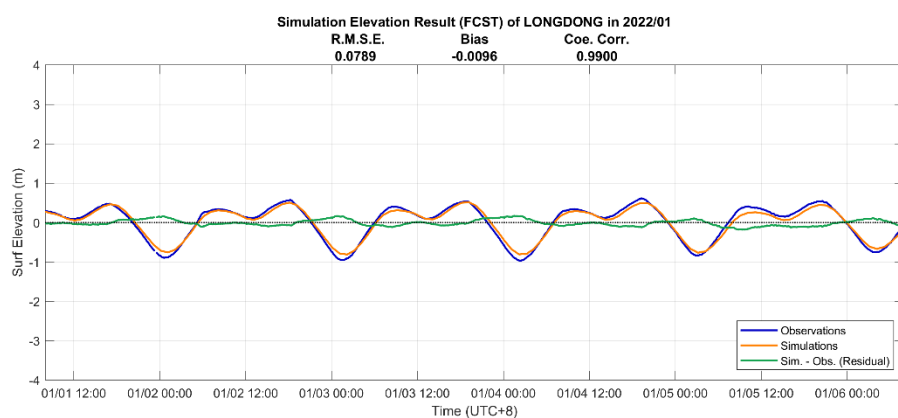


圖 6—36 現行預報模式之龍洞潮位站時序校驗圖

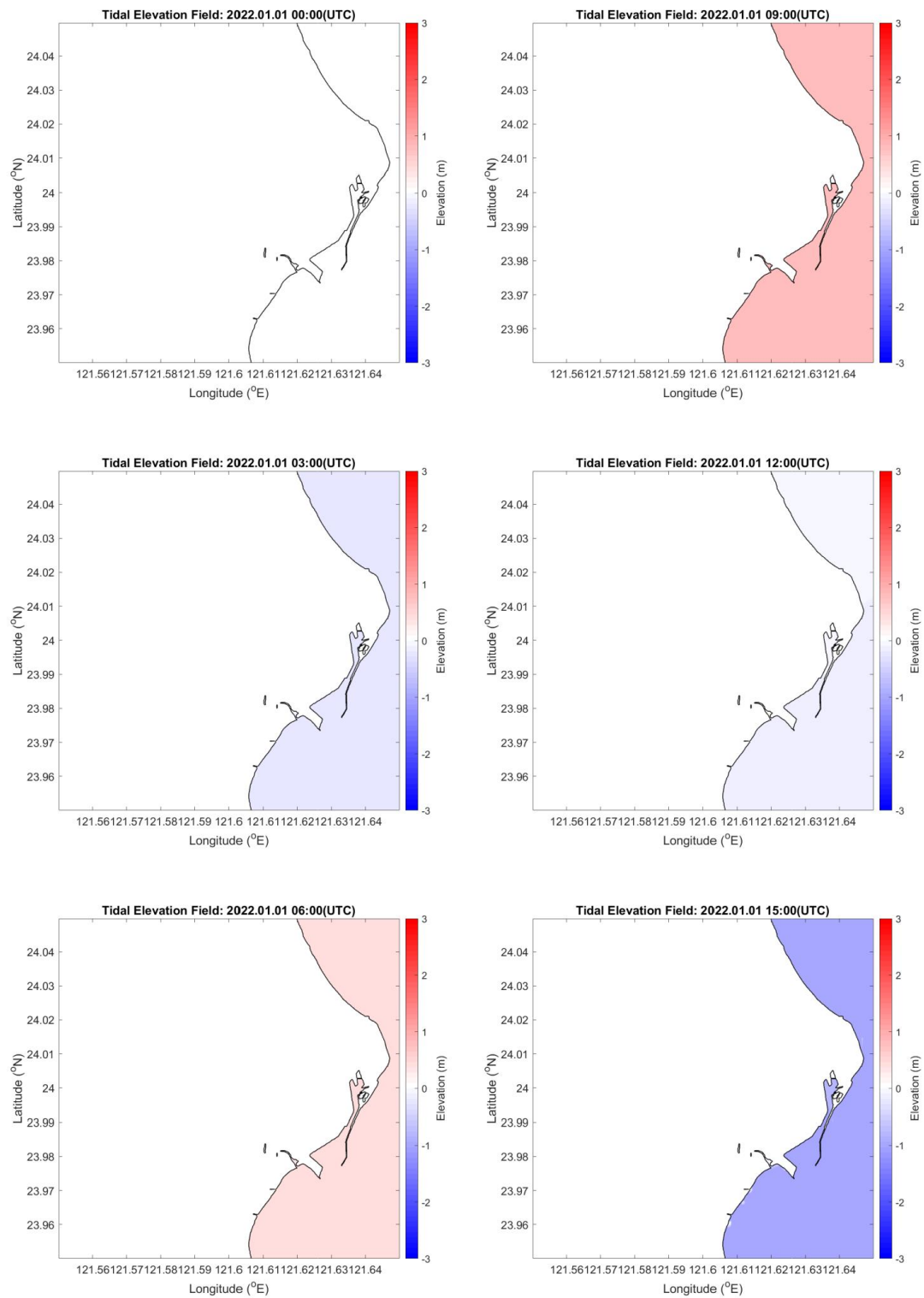


圖 6—37 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之花蓮港周遭二維潮位變化圖
(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

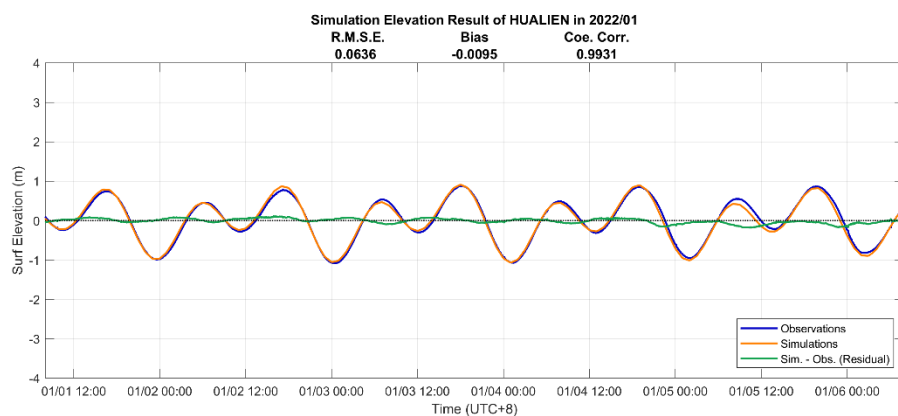


圖 6—38 整合地形／原始時間之花蓮潮位站時序校驗圖

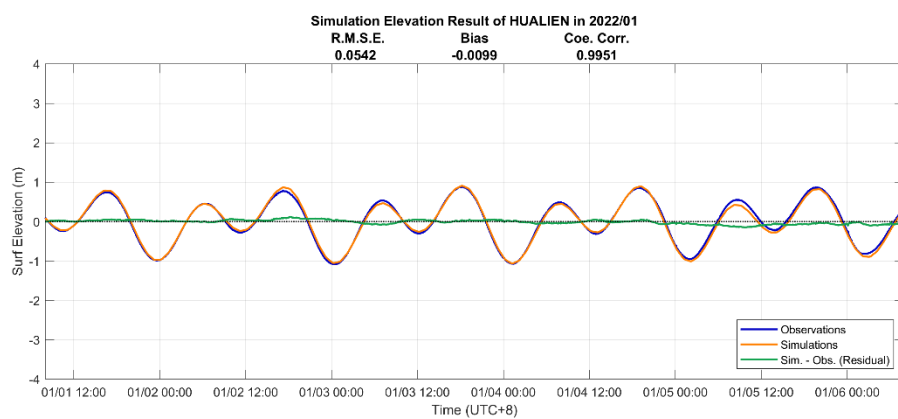


圖 6—39 整合地形／時間校正之花蓮潮位站時序校驗圖

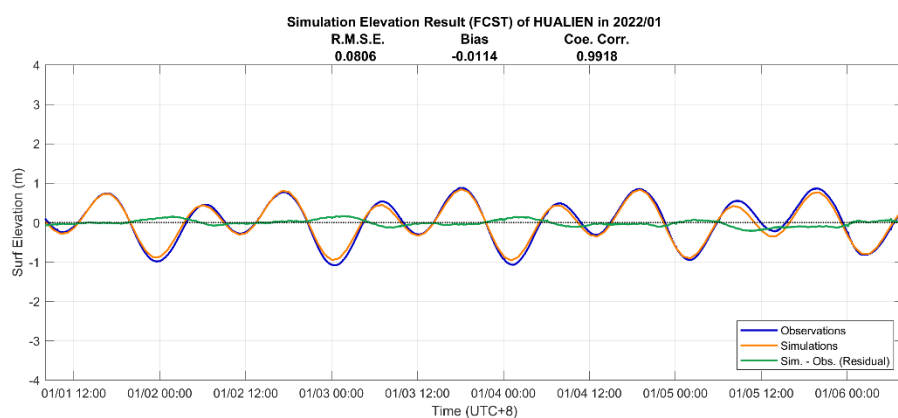


圖 6—40 現行預報模式之花蓮潮位站時序校驗圖

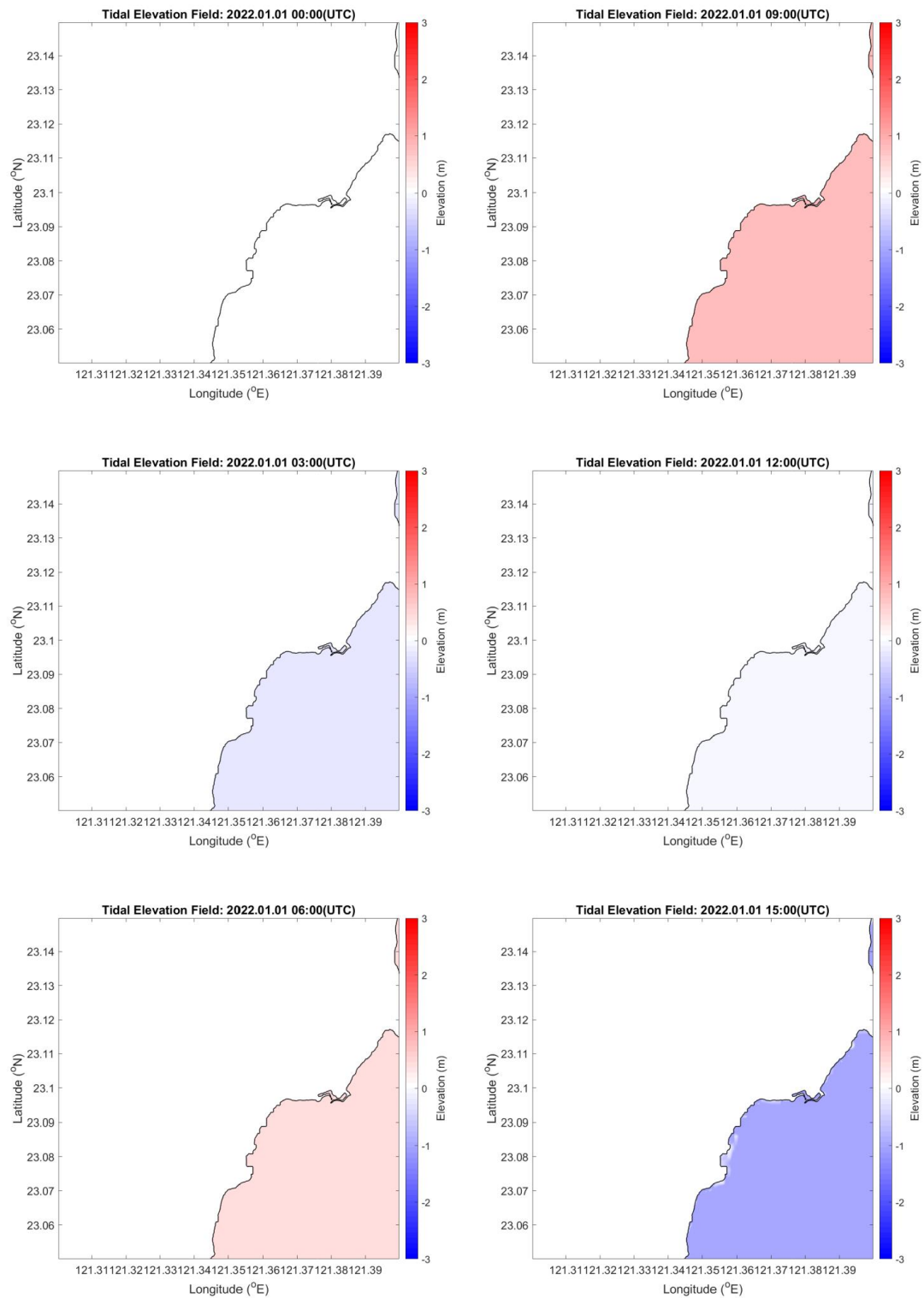


圖 6—41 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之新港漁港周遭二維潮位變化圖

(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

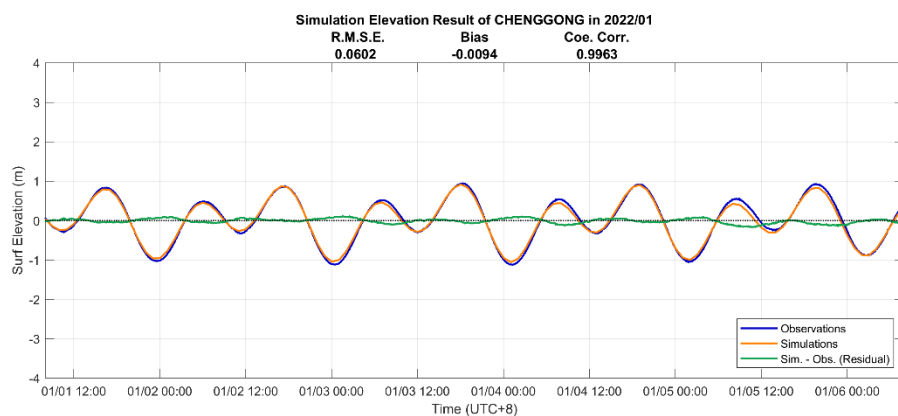


圖 6—42 整合地形／原始時間之成功潮位站時序校驗圖

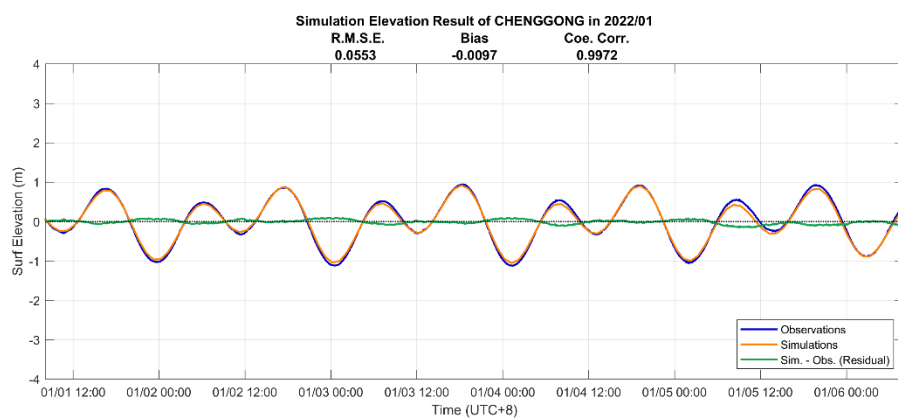


圖 6—43 整合地形／時間校正之成功潮位站時序校驗圖

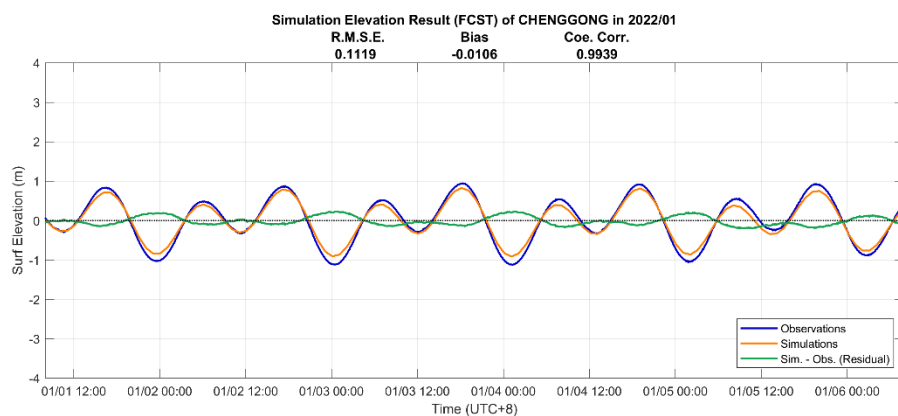


圖 6—44 現行預報模式之成功潮位站時序校驗圖

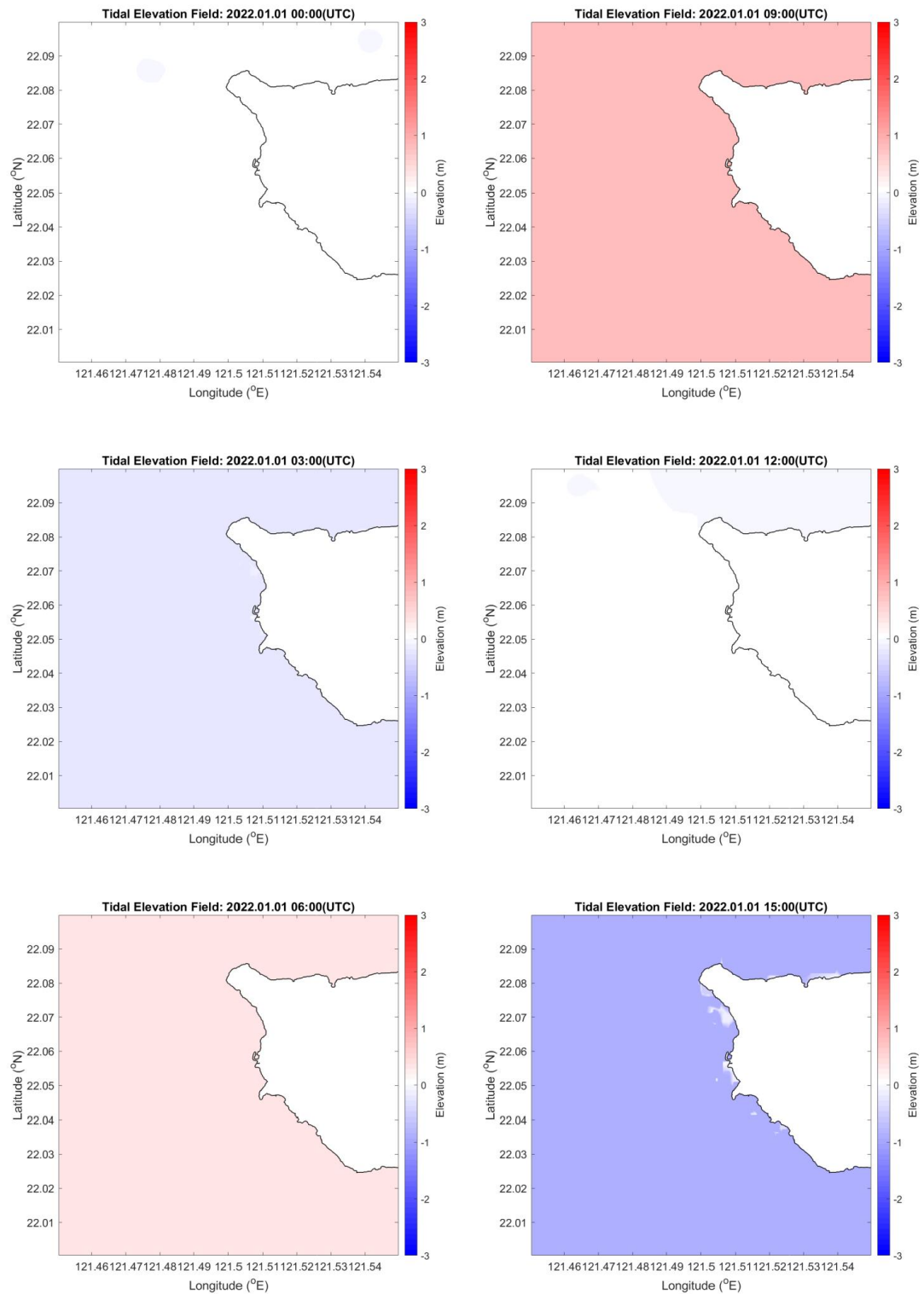


圖 6—45 自 2022 年 1 月 1 日 0 時起之蘭嶼開封漁港周遭二維潮位變化圖

(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

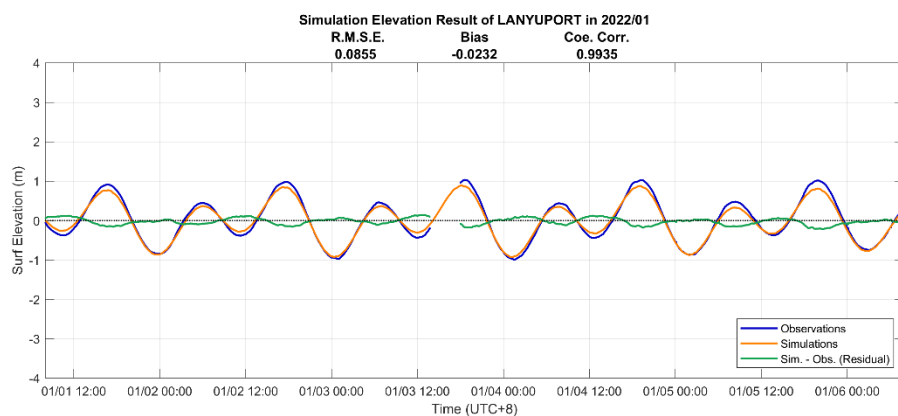


圖 6—46 整合地形／原始時間之蘭嶼潮位站時序校驗圖

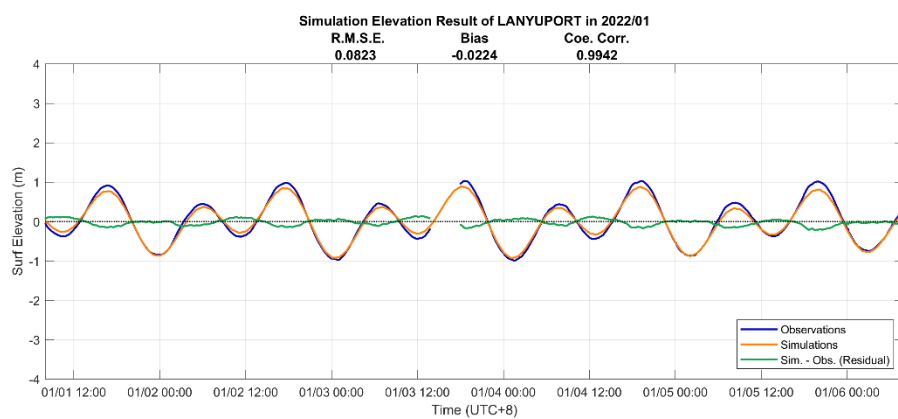


圖 6—47 整合地形／時間校正之蘭嶼潮位站時序校驗圖

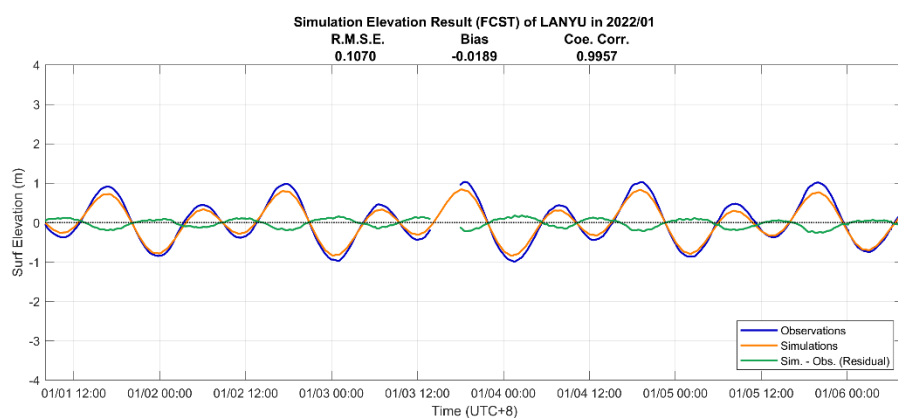


圖 6—48 現行預報模式之蘭嶼潮位站時序校驗圖

6-3-3 暴潮作用下之潮汐校驗案例：2023 年海葵颱風

為進一步考量在受颱風影響之情形下，風暴潮總水位（等於純潮汐水位加上風暴潮水位）受港灣遮蔽效應之反應與二維模式模擬結果，颱風季之校驗案例採用了今年度之海葵颱風，以比對校驗六個港口內潮位站之潮位差異及先前於非颱風季案例中發現之時間校正準確性。

在分析六個不同潮位站之潮位後，針對各個潮位站之整合地形二維模擬結果之時間校正依然有效，依舊能提升各港口間之校驗資料準確度，及降低與觀測資料間之殘差，同時再次顯示港灣遮蔽效應存在於各個港口當中。此外，在與現行預報模式之二維模式結果比較後，採用整合地形之高解析度二維模式結果在潮差較大之潮位站（如：台中港潮位站），表現優於現行二維預報模式之結果，而其餘港口在受到颱風影響下，風暴潮水位有高估的情形產生，這可能是採用高解析度整合地形之港內潮位計通常位於水深較淺之區域，模式在受到計算風暴潮之淺水波方程式在遭遇港內水深較淺之海底地形時容易有更強烈之非線性作用，而可能導致風暴潮水位受到影響；預報模式潮位站皆位於港外、水深較深之位置，因此在受颱風影響下之水位較符合觀測資料結果。

於暴潮情境下之港內外差異，可由港內之高解析度模式與港外之預報模式結果比較。其結果顯示，於台中港、將軍、龍洞潮位站，無論港內外皆存在時間差之現象，其餘測站在港外之預報模式表現，則無顯示港內高解析度模式結果之時間差特徵，此結果與 6-3-2 節之無暴潮情境相符。於潮位大小上則於台中港潮位站有明顯之差異（港內較港外潮位站之方均根誤差提升約 45 公分），其餘港內高解析度模式潮位站水位於暴潮期間之暴潮總水位有高估情形、港外預報模式潮位站於花蓮、成功之暴潮總水位略為低估，其餘潮位站則與觀測資料近乎相同。

圖 6—49 至圖 6—52 為台中港潮位站之時序系列校驗圖。

圖 6—49 為時間歷程自 2023 年 8 月 31 日 0 時起 (UTC+0)，台中港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時（每 3 小時為一間隔，左上至右下）之二維潮位變

化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—50 為台中港潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—51 為台中港潮位站之觀測資料與時間校正（12 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—52 為台中港潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果（較低解析度）之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—53 至圖 6—56 為將軍潮位站之時序系列校驗圖。

圖 6—53 為時間歷程自 2023 年 8 月 31 日 0 時起 (UTC+0)，將軍漁港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時（每 3 小時為一間隔，左上至右下）之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—54 為將軍潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—55 為將軍潮位站之觀測資料與時間校正（17 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與

相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—56 為將軍潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果（較低解析度）之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—57 至圖 6—60 為龍洞潮位站之時序系列校驗圖。

圖 6—57 為時間歷程自 2023 年 8 月 31 日 0 時起 (UTC+0)，龍洞南口遊艇港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時（每 3 小時為一間隔，左上至右下）之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—58 為龍洞潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—59 為龍洞潮位站之觀測資料與時間校正（22 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—60 為龍洞潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果（較低解析度）之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—61 至圖 6—64 為花蓮潮位站之時序系列校驗圖。

圖 6—61 為時間歷程自 2023 年 8 月 31 日 0 時起 (UTC+0)，花蓮港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時（每 3 小時為一間隔，左上至右下）之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色

部分為整合地形。

圖 6—62 為花蓮潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—63 為花蓮潮位站之觀測資料與時間校正（12 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—64 為花蓮潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果（較低解析度）之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—65 至圖 6—68 為成功潮位站之時序系列校驗圖。

圖 6—65 為時間歷程自 2023 年 8 月 31 日 0 時起 (UTC+0)，新港漁港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時（每 3 小時為一間隔，左上至右下）之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—66 為成功潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—67 為成功潮位站之觀測資料與時間校正（6 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—68 為成功潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果（較低解析度）之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—69 至圖 6—72 為蘭嶼潮位站之時序系列校驗圖。

圖 6—69 為時間歷程自 2023 年 8 月 31 日 0 時起 (UTC+0)，蘭嶼開封漁港周遭時間歷程第 0 小時至第 15 小時（每 3 小時為一間隔，左上至右下）之二維潮位變化圖，其中潮汐之大小會隨時間變化顏色，紅色表正潮位，藍色表負潮位，白色部分為整合地形。

圖 6—70 為蘭嶼潮位站之觀測資料與原始時間之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—71 為蘭嶼潮位站之觀測資料與時間校正（5 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 6—72 為蘭嶼潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果（較低解析度）之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

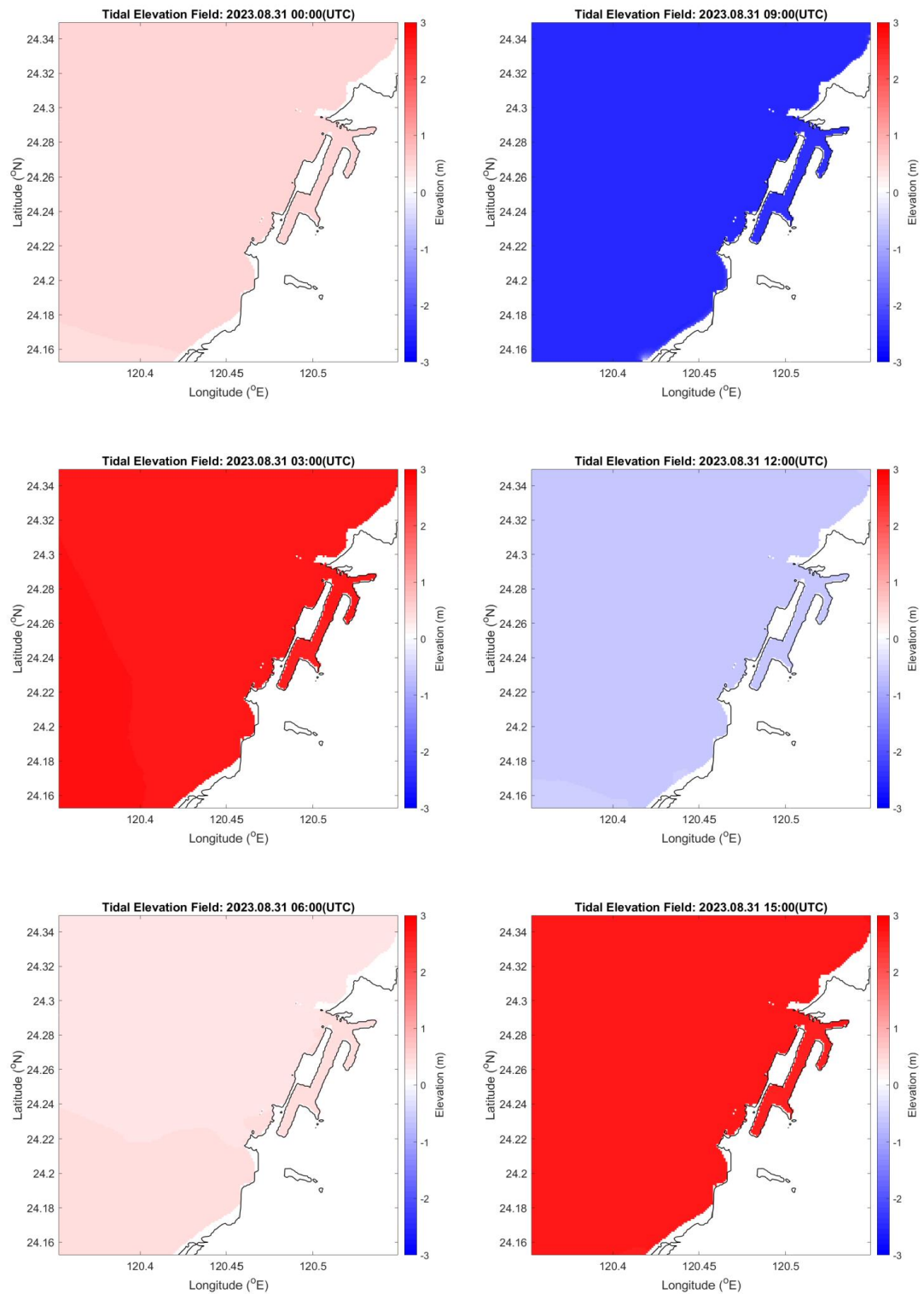


圖 6—49 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之台中港周遭二維潮位變化圖
(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

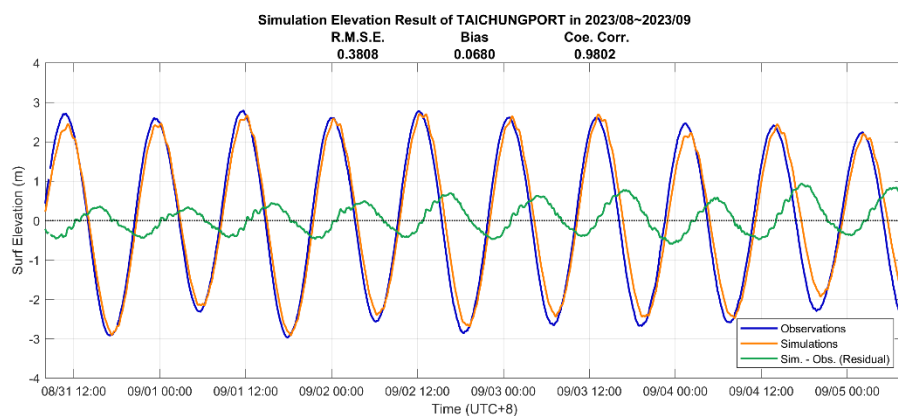


圖 6—50 整合地形／原始時間之台中港潮位站時序校驗圖

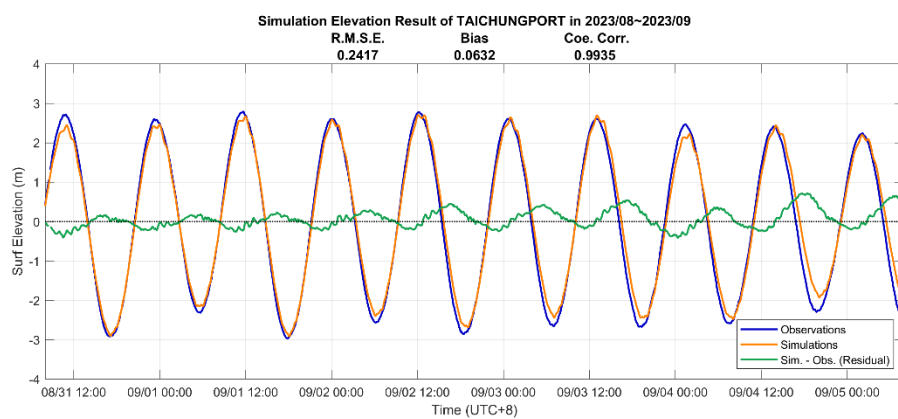


圖 6—51 整合地形／時間校正之台中港潮位站時序校驗圖

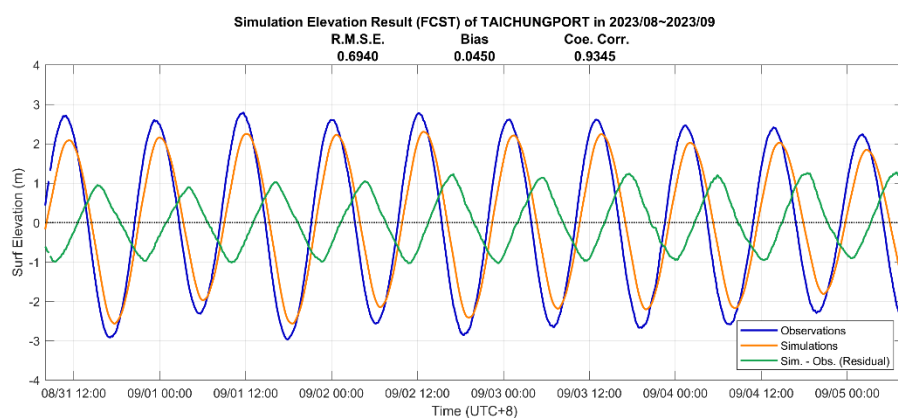


圖 6—52 現行預報模式之台中港潮位站時序校驗圖

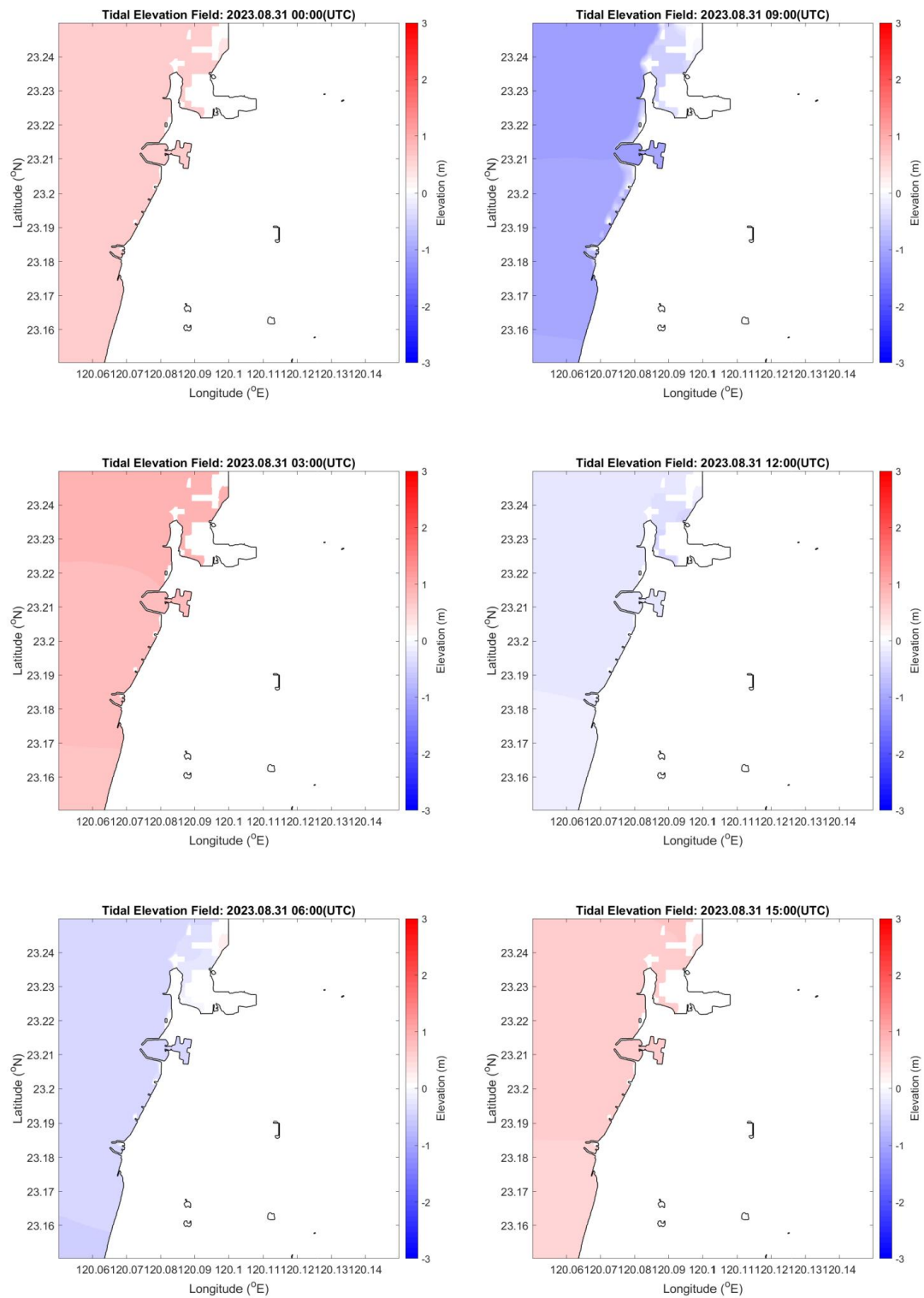


圖 6—53 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之將軍漁港周遭二維潮位變化圖
(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

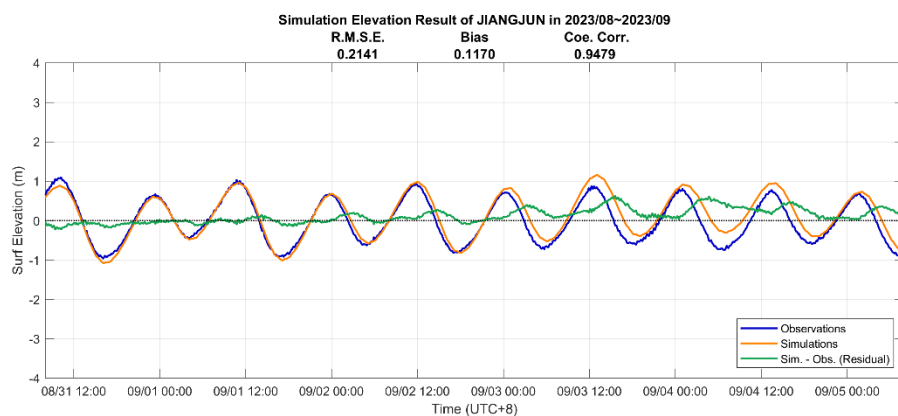


圖 6—54 整合地形／原始時間之將軍潮位站時序校驗圖

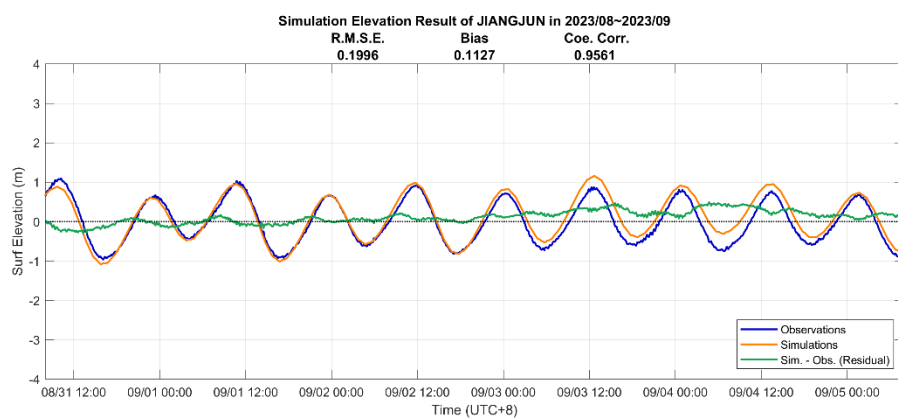


圖 6—55 整合地形／時間校正之將軍潮位站時序校驗圖

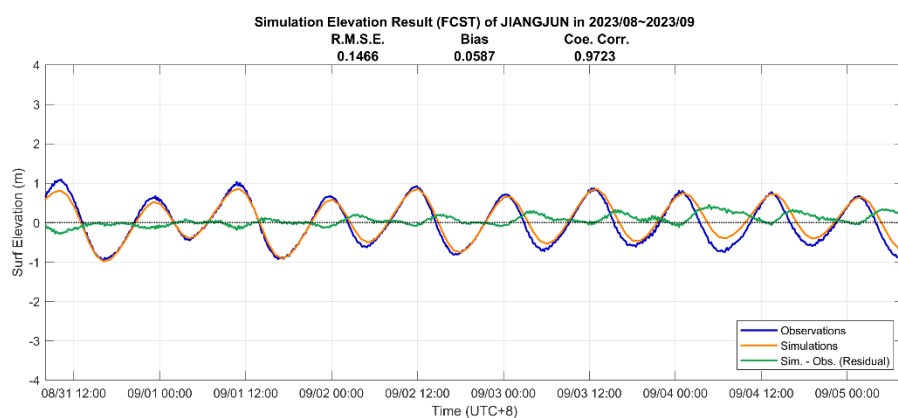


圖 6—56 現行預報模式之將軍潮位站時序校驗圖

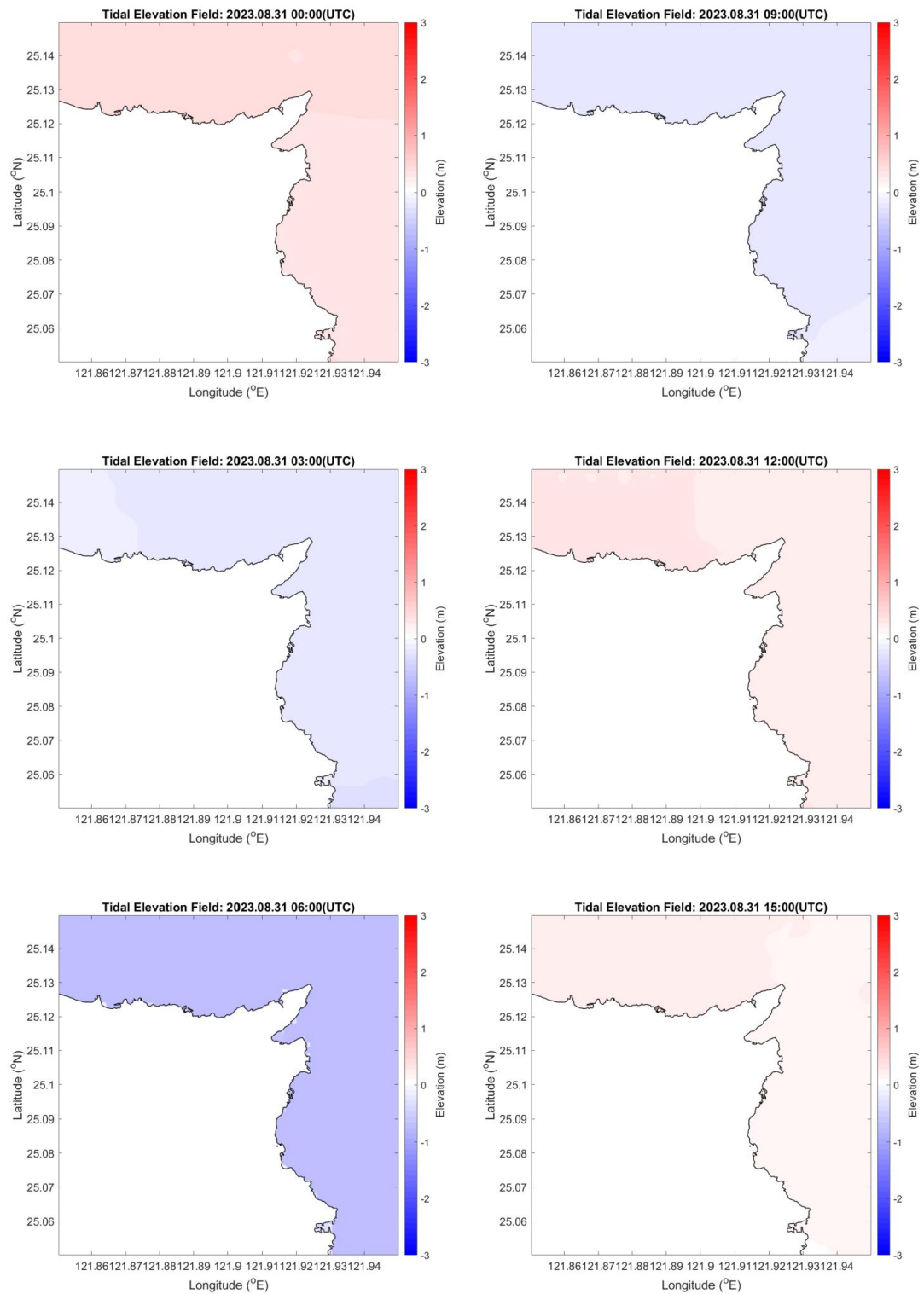


圖 6—57 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之龍河南口潛艇港港周遭二維潮位變化圖
(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

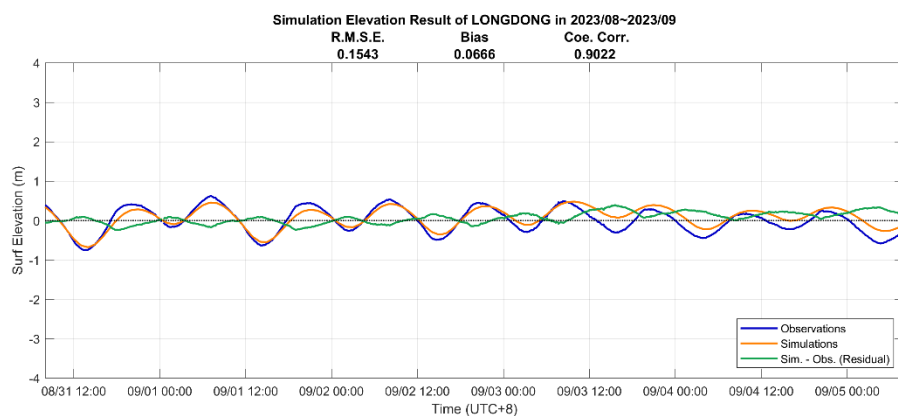


圖 6—58 整合地形／原始時間之龍洞潮位站時序校驗圖

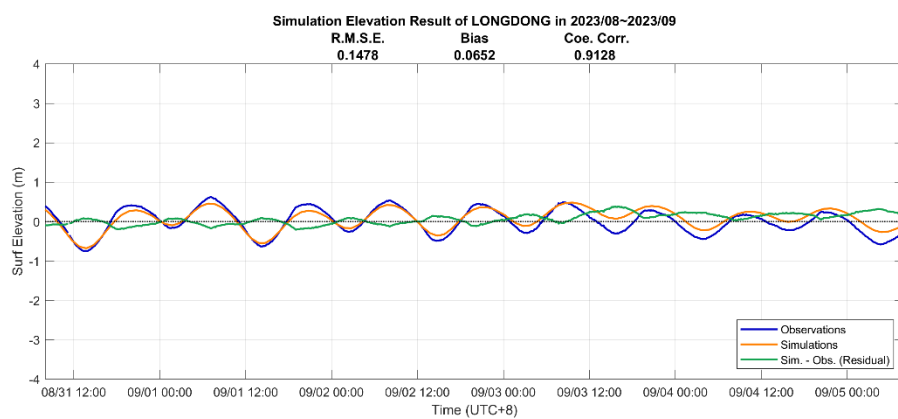


圖 6—59 整合地形／時間校正之龍洞潮位站時序校驗圖

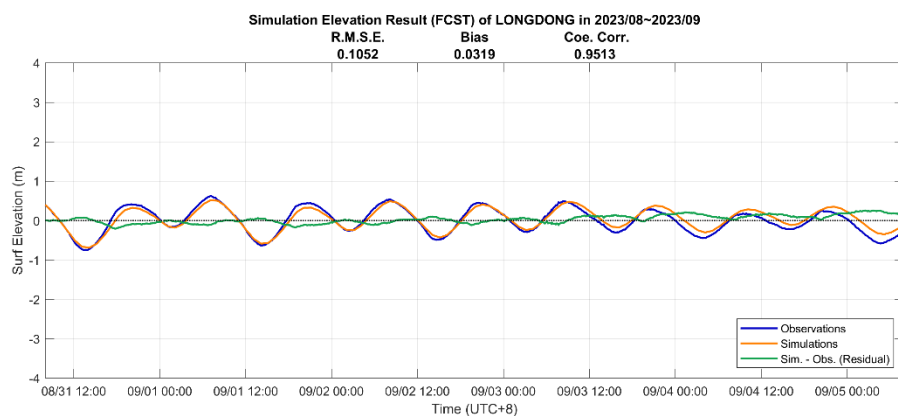


圖 6—60 現行預報模式之龍洞潮位站時序校驗圖

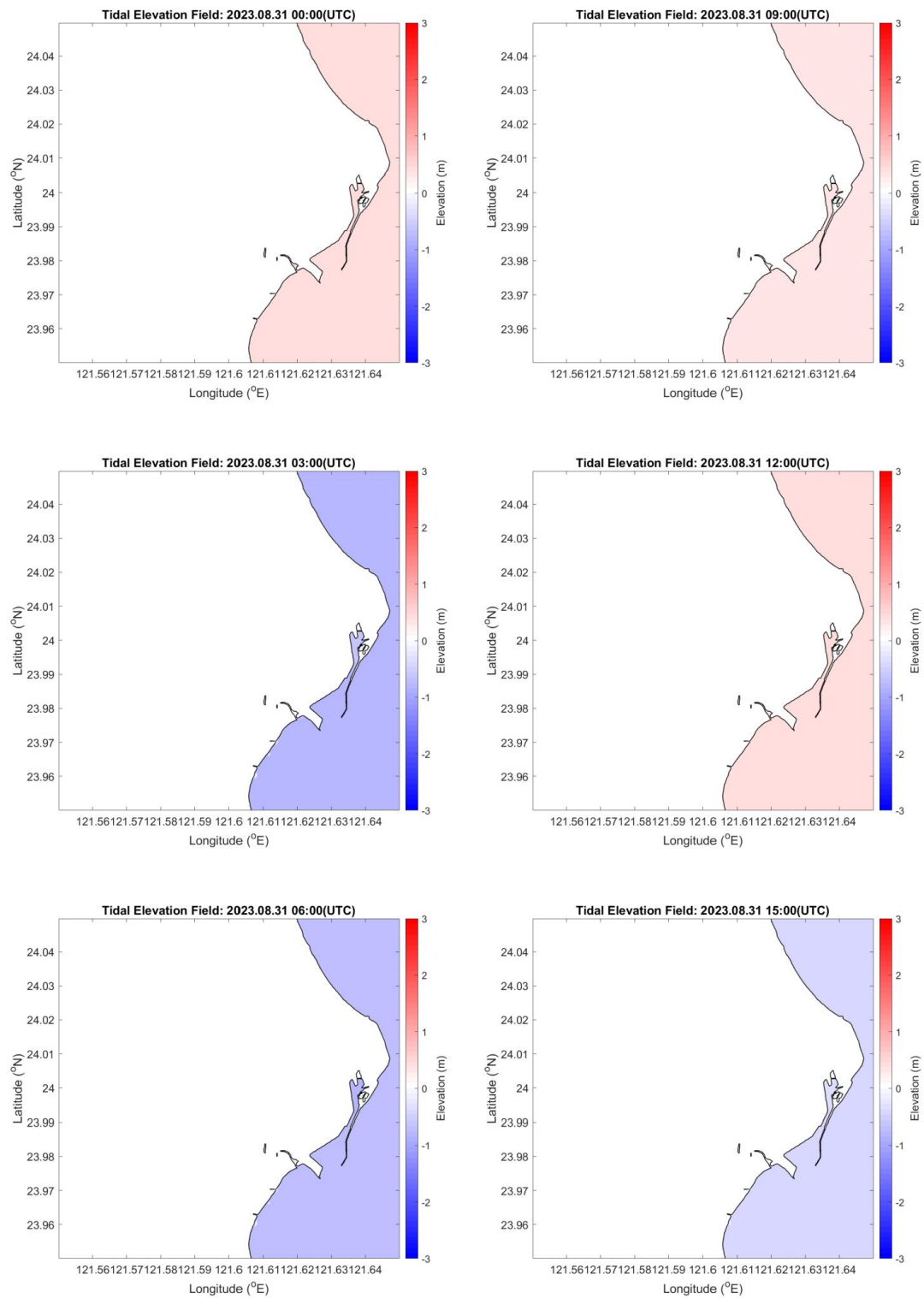


圖 6—61 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之花蓮港周遭二維潮位變化圖
(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

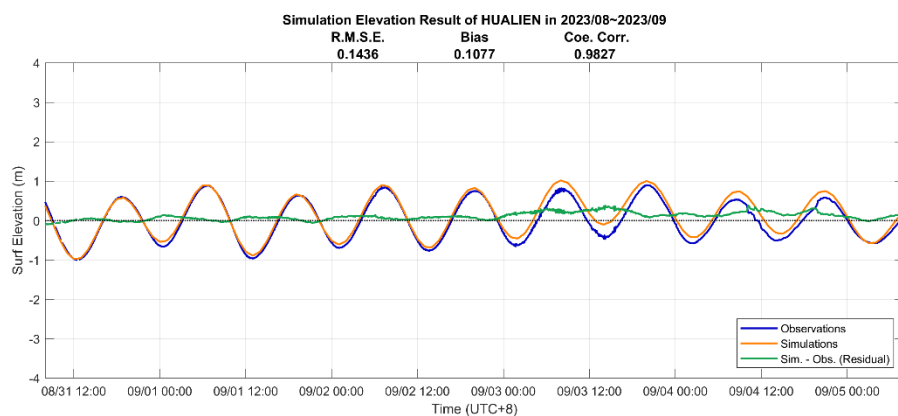


圖 6—62 整合地形／原始時間之花蓮潮位站時序校驗圖

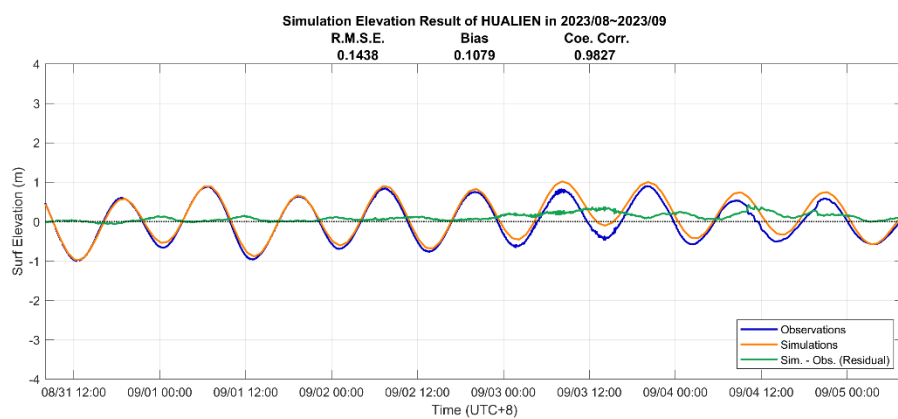


圖 6—63 整合地形／時間校正之花蓮潮位站時序校驗圖

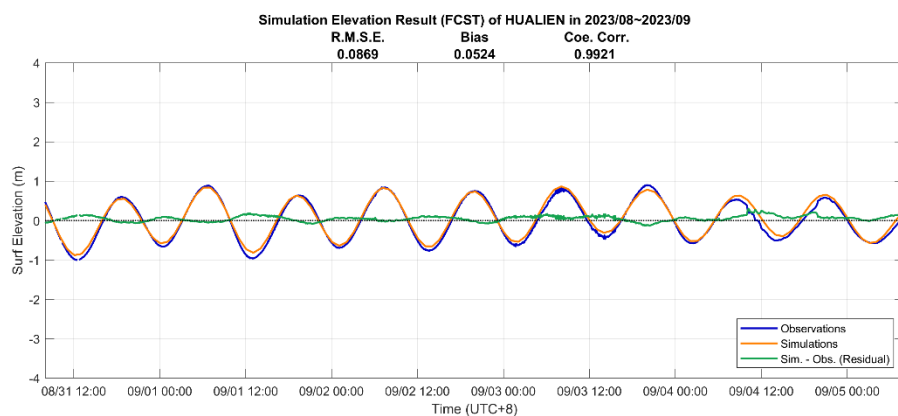


圖 6—64 現行預報模式之花蓮潮位站時序校驗圖

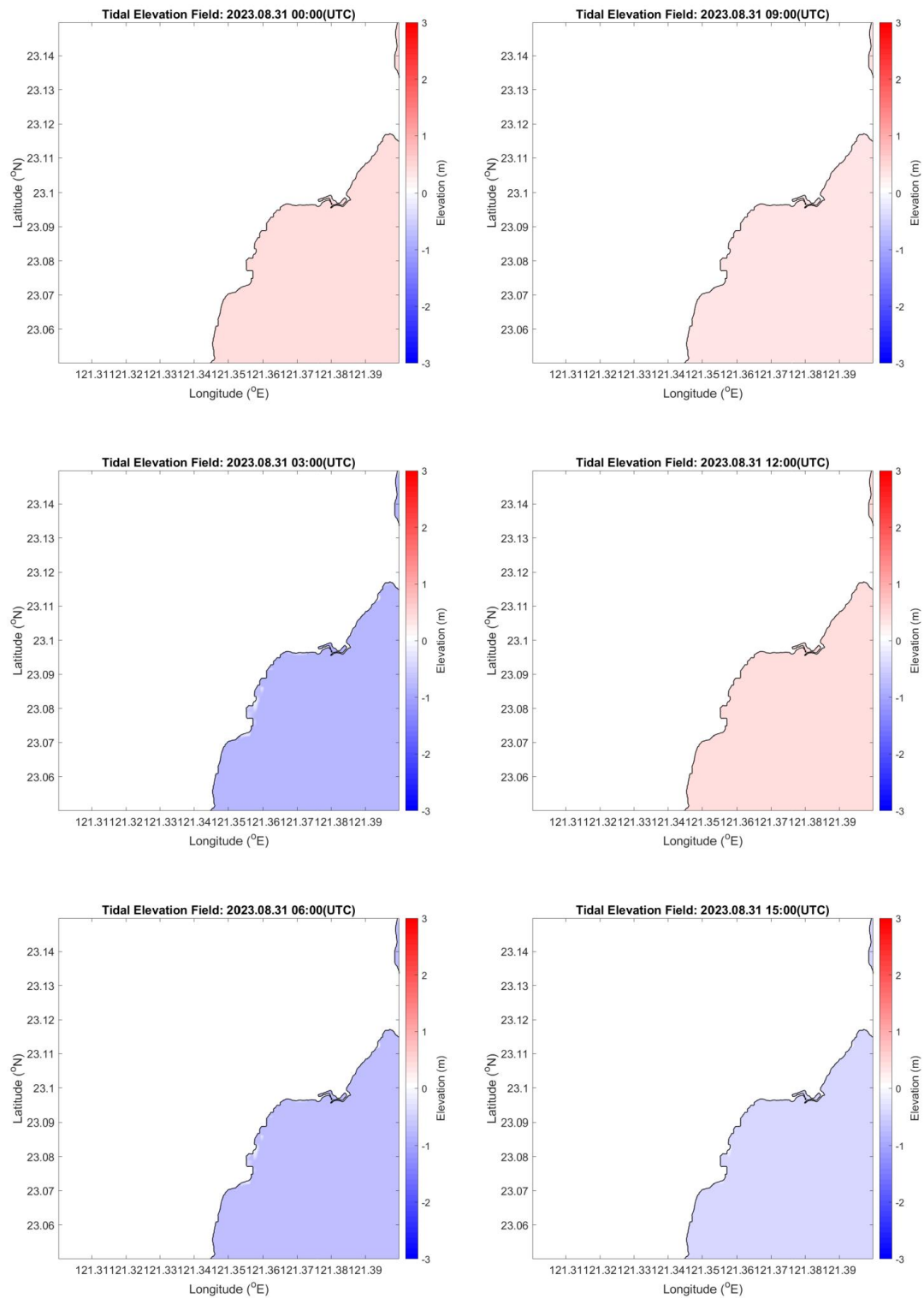


圖 6—65 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之新港漁港周遭二維潮位變化圖
(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

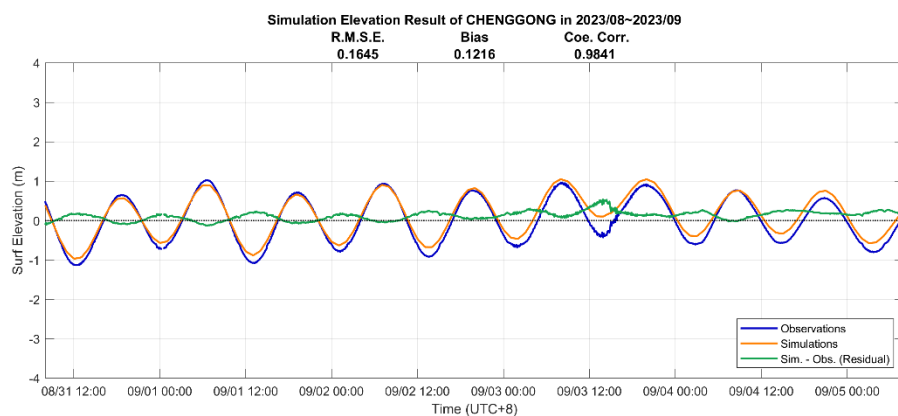


圖 6—66 整合地形／原始時間之成功潮位站時序校驗圖

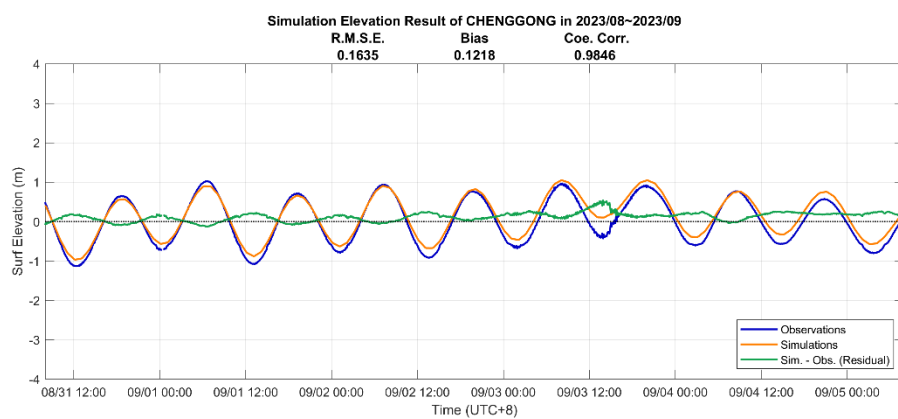


圖 6—67 整合地形／時間校正之成功潮位站時序校驗圖

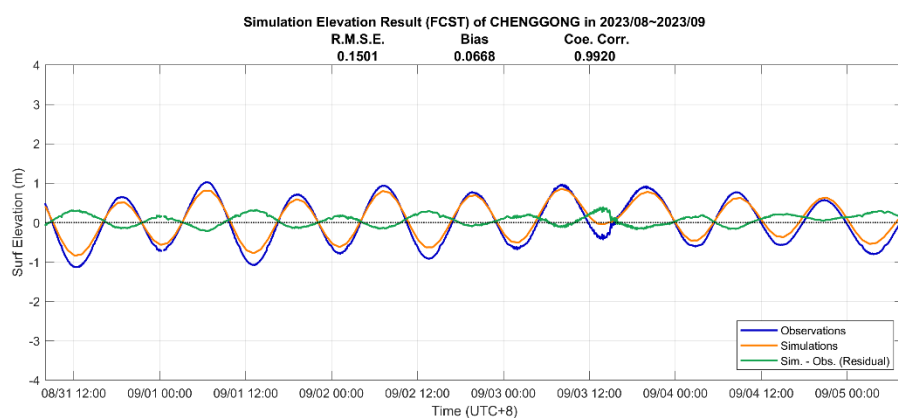


圖 6—68 現行預報模式之成功潮位站時序校驗圖

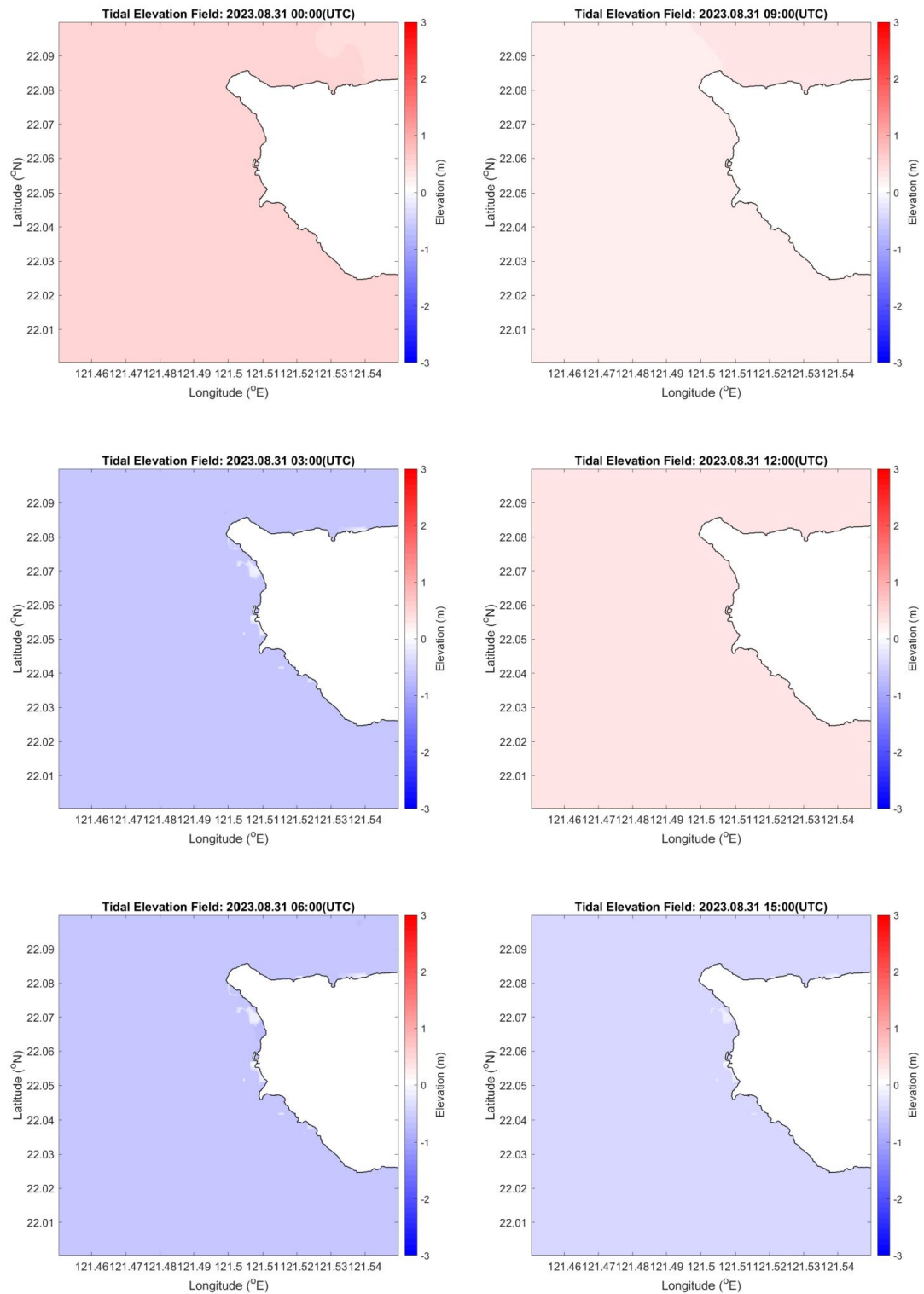


圖 6—69 自 2023 年 8 月 31 日 0 時起之蘭嶼開封漁港周遭二維潮位變化圖
(第 0 至第 15 小時，間隔為 3 小時)

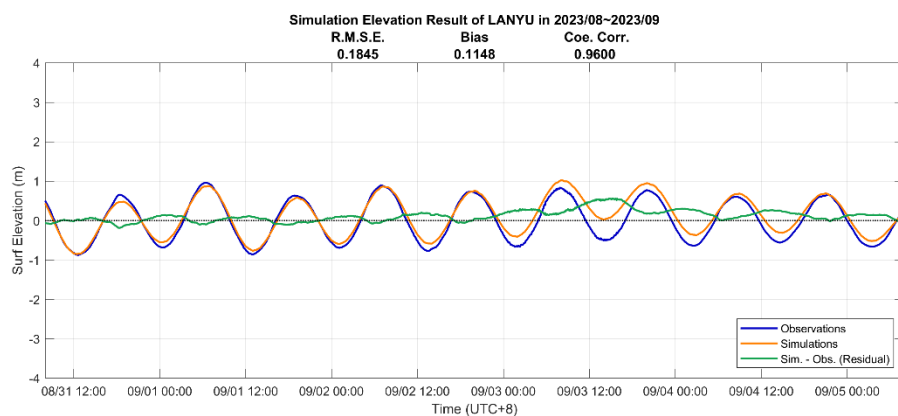


圖 6—70 整合地形／原始時間之蘭嶼潮位站時序校驗圖

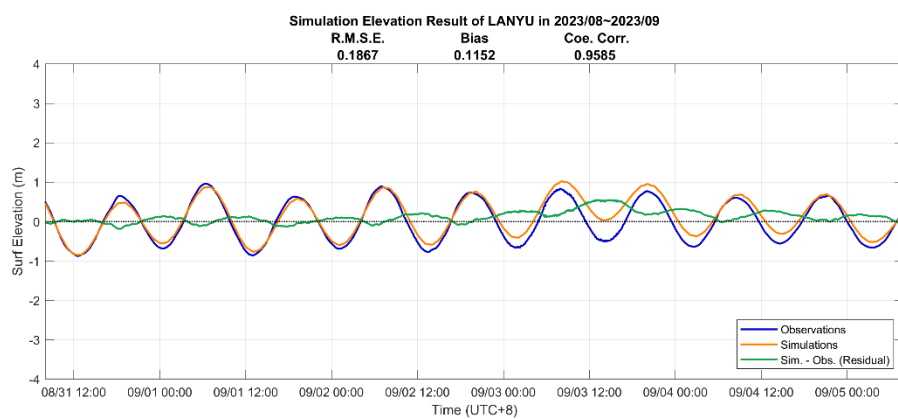


圖 6—71 整合地形／時間校正之蘭嶼潮位站時序校驗圖

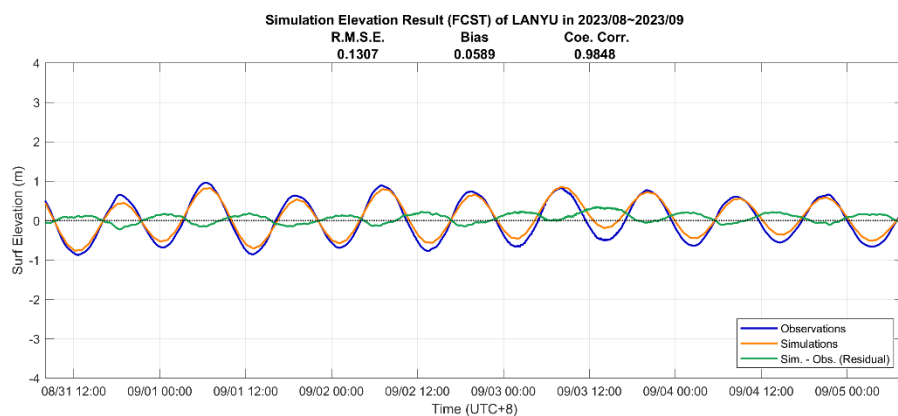


圖 6—72 現行預報模式之蘭嶼潮位站時序校驗圖

結論

本計畫「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究」為三年期研究計畫，於本年度上半年執行重點以「暴潮溢淹預報模式精準度提升研究」為主要工作項目。

於執行「暴潮溢淹預報模式精準度提升研究」工作項目期間，本研究利用已開發完成之暴潮系集預報系統量化分析適合臺灣之理想風場模式，並將研究成果作為精進決定性預報系統的參考依據。研究過程中，為瞭解理想風場模式與颱風案例間之關係，首先收集過往颱風路徑與強度參數及歷史颱風預報資料，並利用委託研究計劃成果所得之候選理想風場模式，進行近 10 年侵台颱風案例之系集預報模擬，並將之與觀測資料比對得到統計分析，檢視各理想風場模式模擬水位與觀測資料間之差異，將表現最佳之理想風場模式加入現有決定性預報系統。

於收集氣象資料方面，本研究將最佳路徑參數生成之理想風場分布與再分析風場互相比較，可以得到以下初步結論：在使用固定的水動力模式模擬颱風暴潮時，假設路徑預報及強度皆準確，可以預期颱風遠離台灣時（颱風中心距離台灣 100 公里以上），使用 E11 可以得到所有模式中最佳之暴潮模擬水位；颱風距離台灣 100 公里內時，則須依據颱風強度判斷。當近中心最大風速大於 33 公尺/秒，氣象署局理想風場模式可能表現較好；近中心最大風速小於 33 公尺/秒時，W06 可以得到較低之風速誤差。

由於颱風之路徑及強度難以精準預測，預報誤差的產生為必然，因此研究中探討各理想風場模式之表現時，仍需要將預報過程中可能產生的誤差納入考量。為達到這項目標，本研究透過重新執行過去 10 年的預報作業，檢視暴潮預報系統在選用不同理想風場模式時可能得到的水位預報結果，利用方均根誤差、偏差量及相關係數等統計參數，檢視各理想風場模式模擬水位與觀測資料間之差異。

於檢視模式預報誤差時，本研究更進一步將預報情境依據警報類型及預報期間颱風強度進行分類以檢視各理想風場模式是否會在不同情境下之預報表現有明顯差異。

在本研究中，可以看到在颱風警報分類與颱風強度分類下，各模式於預報測站中之表現的確不盡相同，但若以模式預報整體表現而論，通常以氣象署現有作業用理想風場模式表現為目前所有理想風場模式中最適合執行暴潮預報者，即使考量預報過程中其他之可能誤差來源，依舊可以與其他模式相比得到最接近觀測資料之預報水位。然而研究過程中亦發現某些理想風場模式在部分情況下亦有可能有較佳表現，因此本工作項目中選擇將研究中所用之理想風場模式皆加入現有暴潮預報系統，以供未來彈性選擇理想風場模式之可能性。

於執行「暴潮系集預報模式精準度提升研究」工作項目期間，為求精簡暴潮預報作業所需時間，調整預報系統現有之串聯執行預報流程為並聯執行。由前一節版本模式介紹可知，為提升預報系統效能，python 版本預報系統在產品輸出效能上極具優勢。因此後續調整預報模式架構及相關測試皆以 Python 版本為主，主要測試機器則為 Matlab 版本預報系統所在機器，其中颱風警報單暴潮預報系統位於 234 機器，而 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統位於 157 機器。

目前透過結算，於 234 機器之多工 (Multi-task) Python 版本中，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘，而核心程式完成模擬所需的時間平均約為 35.4 分鐘。由於純潮汐模擬及潮汐搭配氣象力的模擬需要同時進行，機器執行緒可分配給各次模擬的數量為原本的一半，因此在模式並聯執行情況下，核心程式計算所需時間增加是可預期的。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需時平均約為 7.8 分鐘，合計平均一次預報約需 44.4 分鐘。在效能提升方面，現有多工處理之預報系統版本於核心程式模擬所花時間較 234 機器 Matlab 版本減少 26 至 27 分鐘，效能提升 42.8%；後處理所需時間減少 22 至 23 分鐘，效能提升 74.6%，預報總時長為 44 至 45 分鐘，較先前版本減少 48 至 49 分鐘，效能提升超過 50%。

於 157 機器之多工 (Multi-task) Python 版本中，氣象輸入場之格式轉換平均約 17 分鐘，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘，而核心程式完成模擬所需的時間平均約為 37.8 分鐘。由於純潮汐模擬及潮汐搭配

氣象力的模擬需要同時進行，機器執行緒可分配給各次模擬的數量為原本的一半，因此在模式並聯執行情況下，核心程式計算所需時間增加是可預期的。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需時平均約為 8.0 分鐘，合計平均一次預報約需 62.8 分鐘。在效能提升方面，現有多工處理之預報系統版本於氣象輸入場之格式轉換較 157 機器 Python 版本增加 3 至 4 分鐘，效能下降約 27%；核心程式模擬所花時間減少 17 至 18 分鐘，效能提升 32.9%；後處理所需時間減少 30 至 31 分鐘，效能提升約 79%，預報總時長為 62 至 63 分鐘，較先前版本減少 42 至 43 分鐘，效能提升超過 40%。

於執行「港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析」工作項目期間，為凸顯港灣海堤遮蔽效應之影響，因此在進行潮汐水位之模擬分析時，模式需採用細緻化之地形、設定之數值網格解析度需加密以建構完整港口細節（包含海堤、港池、碼頭等），並搭配 TPXO 潮汐模式以獲取邊界潮位條件，以取得特定港口區域隨時間變化之潮汐水位模擬結果。最終，將結果與觀測資料進一步比對校驗，以瞭解港灣遮蔽效應於殘差值之影響，以及是否能成功降低模擬結果與實際觀測值間之差異，因而製作後續二維風暴潮預報模式及三維 Splash3D 模式產品。

在本項目之三維模擬案例中，地形採用整合地形、港口地點選址於港灣結構完整穩固、港口水深較深、潮差大、台中港潮位站所在之台中港，該港口之特性更容易分析港灣遮蔽效應之影響。綜觀地形剖面之壓力梯度與速度分量結果，除速度分量位於地形邊界時可能產生小範圍渦漩外，三維模式之模擬結果整體於港內及港外呈現均勻之壓力及速度分布情形，此現象顯示港灣海堤之遮蔽效應於三維模式當中並不明顯。

本項目之二維模擬案例中，透過提升地形解析度之方式，期望將地形細緻化以建構完整港口細節（包含海堤、港池、碼頭等），並藉由加密數值網格解析度，搭配 TPXO 潮汐模式以獲取邊界潮位條件，以取得特定港口區域隨時間變化之潮汐水位模擬結果，最終將其與觀測資料進一步比對校驗，以期降低潮汐效應之殘差值，此案例中總計比對校驗六個港口內潮位站之潮位。在分析六個不同潮位

站之潮位後，發現各個潮位站之整合地形二維模擬結果與觀測資料之潮位間皆有一定之時間差，台中港潮位站為 12 分鐘，將軍潮位站為 17 分鐘，龍洞潮位站為 22 分鐘，花蓮潮位站為 12 分鐘，成功潮位站為 6 分鐘，蘭嶼潮位站為 5 分鐘。各潮位站反應之潮時差顯示在純潮汐情境下，港灣遮蔽效應確實反映於各個區域、不分範圍大小之港口。因此，若要提升各港口間之校驗資料準確度，降低與觀測資料間之殘差，則可針對各個港口之時間差特徵進行修正（後稱之為時間校正）。此外，在與現行預報模式之二維模式結果比較後，在純潮汐情境之校驗下，採用整合地形之高解析度二維模式結果在各個測站之表現整體優於現行二維預報模式之結果，顯示提升解析度對校驗資料之幫助。

參考文獻

- [1]. Atkinson, G.D.; Holliday, C.R. Tropical cyclone minimum sea level pressure/maximum sustained wind relationship for the Western North Pacific. *Mon. Weather Rev.* 1977, 105, 421–427.
- [2]. Bernier, N. B., & Thompson, K. R. (2015). Deterministic and ensemble storm surge prediction for Atlantic Canada with lead times of hours to ten days. *Ocean Modelling*, 86, 114-127.
- [3]. Codiga, D. L. (2011). Unified tidal analysis and prediction using the UTide Matlab functions.
- [4]. Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1984. Water wave mechanics for engineers and scientists. Chapter 5. Pren-tice-Hall, New Jersey.
- [5]. Ding, X., Chen, Y., Pan, Y., & Reeve, D. (2016). Fast ensemble forecast of storm surge along the coast of China. *Journal of Coastal Research*, (75), 1077-1081.
- [6]. Dushaw, B. D., Egbert, G. D., Worcester, P. F., Cornuelle, B. D., Howe, B. M., & Metzger, K. (1997) . A TOPEX/POSEIDON global tidal model (TPXO. 2) and barotropic tidal currents determined from long-range acoustic transmissions. *Progress in Oceanography*, 40 (1-4) , 337-367.
- [7]. Egbert, Gary D., and Svetlana Y. Erofeeva. "Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19.2 (2002): 183-204.
- [8]. Emanuel, Kerry, and Richard Rotunno. "Self-stratification of tropical cyclone outflow. Part I: Implications for storm structure." *Journal of the Atmospheric Sciences* 68.10 (2011): 2236-2249.
- [9]. FANG, Pingzhi; YE, Gengjiao; YU, Hui. A parametric wind field model and its application in simulating historical typhoons in the western North Pacific Ocean. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 199: 104131.
- [10]. Fang,W.; Chen, G.P.; Zhao, H.J.; Yan, S.C. A Comparative Study on the Calculation effect of maximum wind speed Radius on station wind wave. *J. Waterw. Harb.* 2017, 38, 574–580. (In Chinese)
- [11]. Flowerdew, Jonathan, et al. "Extending the forecast range of the UK storm surge ensemble." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 139.670 (2013): 184-197.
- [12]. Forbes, C., Rhome, J., Mattocks, C., & Taylor, A. (2014). Predicting the storm surge threat of Hurricane Sandy with the National Weather Service SLOSH model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2(2), 437-476.
- [13]. Foreman, M. G. G., & Henry, R. F. (1989). The harmonic analysis of tidal model time series. *Advances in water resources*, 12(3), 109-120.

- [14]. Foreman, M. G., Cherniawsky, J. Y., & Ballantyne, V. A. (2009). Versatile harmonic tidal analysis: Improvements and applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 26(4), 806-817.
- [15]. Foreman, M.G.G. 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. . Pacific
- [16]. Foreman, M.G.G. 1978. Manual for tidal currents analysis and prediction. . Pacific
- [17]. Fujita, H. 1952. The exact pattern of a concentration-dependent diffusion in a semi-infinite medium, Part II. *Text. Res. J.* 22: 823-827.
- [18]. Godin, G. 1972. The analysis of tides. University of Toronto Press, Toronto.
- [19]. Haigh, I.D.; MacPherson, L.R.; Mason, M.S.; Wijeratne, E.M.S.; Pattiaratchi, C.B.; Crompton, R.P.; George, S. Estimating present day extreme water level exceedance probabilities around the coastline of Australia: Tropical cyclone-induced storm surges. *Clim. Dyn.* 2014, 42, 139–157.
- [20]. Harper, B. A. and Holland, G. J. 1999. An updated parametric model of the tropical cyclone. *Proceedings of the 23rd Conference of Hurricane and Tropical Meteorology* Dallas, Texas, pp. 893-896.
- [21]. Hirt, Cyril W., and Billy D. Nichols. "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries." *Journal of computational physics* 39.1 (1981): 201-225.
- [22]. Holland, G. J. 1980. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Weather Rev.* 108, 1212-1218.
- [23]. Hsiao, L.F.; Chen, D.S.; Kuo, Y.H.; Guo, Y.R.; Yeh, T.C.; Hong, J.S.; Fong, C.T.; Lee, C.S. Application of WRF 3DVAR to operational typhoon prediction in Taiwan: Impact of outer loop and partial cycling approaches. *Weather Forecast.* 2012, 27, 1249–1263.
- [24]. Hu, C. K., Chiu, C. T., Chen, S. H., Kuo, J. Y., Jan, S., & Tseng, Y. H. (2010). Numerical simulation of barotropic tides around Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 21(1).
- [25]. Huang, X., Peng, X., Fei, J., Cheng, X., Ding, J., & Yu, D. (2021). Evaluation and error analysis of official tropical cyclone intensity forecasts during 2005–2018 for the western North Pacific. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 99(1), 139-163.
- [26]. Hubbert, K. P. and Wolf, J. 1991. Numerical investigation of depth and current refraction of waves. *J. Geophys. Res.* 96 (9), 2737-2748.
- [27]. Hwung, H. H., Tsai, C. L. and Wu, C. C. (1986) “Studies on the correlation of tidal elevation changes along the western coastline of Taiwan,” *Proceedings of the 20th International Conference on Coastal Engineering*, Taipei, pp. 293-305.
- [28]. Jan, S. C. S. Chern, J. Wang, and S. Y. Chao, 2004a: The anomalous amplification of M2 tide in the Taiwan Strait. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L07308, doi: 10.1029/2003GL019373.

- [29]. Jan, S., Wang, Y. H., Chao, S. Y., & Wang, D. P. (2001). Development of a nowcast system for the Taiwan Strait (TSNOW): numerical simulation of barotropic tides. *Ocean and Polar Research*, 23(2), 195-203.
- [30]. Jan, S., Y. H. Wang, D. P. Wang, and S. Y. Chao, 2004b: Incremental inference of boundary forcing for a three-dimensional tidal model: Tides in the Taiwan Strait. *Cont. Shelf Res.*, 24, 337-351, doi: 10.1016/j.csr.2003.11.005.
- [31]. Jelesnianski, C. P., Chen, J. and Wilson, A. Shaffer 1992. SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes, NOAA Technical Report, NWS 48, Silver Springs, Maryland.
- [32]. Jiang, Z.H.; Hua, F.; Qu, P. A new tropical cyclone parameter adjustment scheme. *Adv. Mar. Sci.* 2008, 1, 1–7. (In Chinese)
- [33]. Kato, F. Study on Risk Assessment of Storm Surge Flood, Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management of Japan; No.275; National Institute for Land and Infrastructure Management: Tokyo, Japan, 2005.
- [34]. Knaff, J.A.; Sampson, C.R.; DeMaria, M.; Marchok, T.P.; Gross, J.M.; McAdie, C.J. Statistical Tropical Cyclone Wind Radii Prediction Using Climatology and Persistence. *Weather Forecast.* 2007, 22, 781–791.
- [35]. Kothe, Douglas, et al. "Volume tracking of interfaces having surface tension in two and three dimensions." 34th aerospace sciences meeting and exhibit. 1996.
- [36]. Krien, Y.; Dudon, B.; Roger, J.; Arnaud, G.; Zahibo, N. Assessing storm surge hazard and impact of sea level rise in Lesser Antilles-Case study of Martinique. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2017, 17, 1559–1571.
- [37]. Krien, Y.; Dudon, B.; Roger, J.; Zahibo, N. Probabilistic hurricane-induced storm surge hazard assessment in Guadeloupe, Lesser Antilles. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2015, 15, 1711–1720.
- [38]. Krien, Y.; Testut, L.; Durand, F.; Mayet, C.; Islam, A.K.M.S.; Tazkia, A.R.; Becker, M.; Calmant, S.; Papa, F.; Ballu, V.; et al. Towards improved storm surge models in the northern Bay of Bengal. *Cont. Shelf Res.* 2017, 135, 58–73.
- [39]. Lakshmi, D.; Murty, P.L.N.; Bhaskaran, P.K.; Sahoo, B.; Srinivasa Kumar, T.; Shenoi, S.S.C.; Srikanth, A.S. Performance of WRF-ARW winds on computed storm surge using hydrodynamic model for Phailin and Hudhud cyclones. *Ocean Eng.* 2017, 131, 135–148.
- [40]. Large, W. G., and S. Pond. "Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds." *Journal of physical oceanography* 11.3 (1981): 324-336.
- [41]. Leffler, K. E., & Jay, D. A. (2009). Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L1/L2) solutions. *Continental Shelf Research*, 29(1), 78-88.
- [42]. Lin, M. C., Juang, W. J., & Tsay, T. K. (2001). Anomalous amplifications of semidiurnal tides along the western coast of Taiwan. *Ocean Engineering*, 28(9), 1171-1198.

- [43]. Lin, N.; Chavas, D. On hurricane parametric wind and applications in storm surge modeling. *J. Geophys. Res.* 2012, 117, D09120.
- [44]. Lin, N.; Emanuel, K.A. Grey swan tropical cyclones. *Nat. Clim. Chang.* 2016, 6, 106–111.
- [45]. Lin, N.; Smith, J.A.; Villarini, G.; Marchok, T.P.; Baeck, M.L. Modeling extreme rainfall, winds, and surge from Hurricane Isabel (2003). *Weather Forecast.* 2010, 25, 1342–1361.
- [46]. Lin, W.; Fang, W.H. Study on the Regional Characteristics of Holland B coefficient in the Typhoon wind field model in the Northwest Pacific Ocean. *Trop. Geogr.* 2013, 33, 124–132, (In Chinese with English Abstract).
- [47]. Liu, PL-F., et al. "Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses." *Journal of fluid Mechanics* 536 (2005): 107-144.
- [48]. MacAfee, A. W. and Pearson, G. M. 2006. Development and testing of tropical cyclone parametric wind models tailored for multitude application preliminary results. *J. Appl. Meteorol.* 45, 1244-1260.
- [49]. Marine Science Rep. 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, 101 pp.
- [50]. Marine Science Rep. 78-6, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, 70 pp.
- [51]. Mattocks, C.; Forbes, C. A real-time, event-triggered storm surge forecasting system for the state of North Carolina. *Ocean Model.* 2008, 25, 95–119.
- [52]. Mei, C.C., 1983. The applied dynamics of ocean surface waves. Chapter 6. Wiley, New York.
- [53]. Mel, R., & Lionello, P. (2014). Storm surge ensemble prediction for the city of Venice. *Weather and forecasting*, 29(4), 1044-1057.
- [54]. Niedoroda, A.W.; Resio, D.T.; Toro, G.R.; Divoky, D.; Das, H.S.; Reed, C.W. Analysis of the coastal Mississippi storm surge hazard. *Ocean Eng.* 2010, 37, 82–90.
- [55]. Olfateh, M.; Callaghan, D.P.; Nielsen, P.; Baldock, T.E. Tropical cyclone wind field asymmetry—Development and evaluation of a new parametric model. *J. Geophys. Res. Oceans* 2017, 122, 458–469
- [56]. Orton, P.M.; Hall, T.M.; Talke, S.A.; Blumberg, A.F.; Georgas, N.; Vinogradov, S. A validated tropical-extratropical flood hazard assessment for New York harbor. *J. Geophys. Res. Oceans* 2016, 121, 8904–8929.
- [57]. Ou, S. H., Liao, J. M. and Hsu, T. W. 2002. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan. *J. Ocean Engineering.* 29(18), 947-971.
- [58]. Palmer, T., R. Buizza, R. Hagedorn, A. Lawrence, M. Leutbecher, and L. Smith, Ensemble prediction: A pedagogical perspective, *ECMWF Newsletter*, (106) , 2005.

- [59]. Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929-937.
- [60]. Phadke, A. C., Martino, C. D., Cheung, K. F. and Houston, S. H. 2003. Modeling of tropical cyclone winds and waves for emergency management. *J. Ocean Engineering*. 30(4), 553-578.
- [61]. Powell, Mark D., Peter J. Vickery, and Timothy A. Reinhold. "Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones." *Nature* 422.6929 (2003): 279-283.
- [62]. Powell, M. D., Soukup, G., Cocke, S., Gulati, S., Morisseau-Leroy, N., Hamid, S., Dorst, N., Axe, L., 2005. State of Florida hurricane loss projection model: atmospheric science component. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 93(8), 651–674.
- [63]. Powers, J.; Klemp, J.; Skamarock, W.; Davis, C.; Dudhia, J.; Gill, D.; Coen, J.; Gochis, D.; Ahmadov, R.; Peckham, S.; et al. The weather research and forecasting (WRF) model: Overview, system efforts, and future directions. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2017.
- [64]. Pugh, D.T. (1987) *Tides, surges and mean sea level*. John Wiley & Sons.
- [65]. Saito, K., Kuroda, T., Kunii, M., & Kohno, N. (2010). Numerical simulation of Myanmar cyclone Nargis and the associated storm surge part II: ensemble prediction. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 88(3), 547-570.
- [66]. Schloemer, R. W. 1954. Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okechobee. Florida US Weather Bureau, Hydromet. Rep., 31, 1-49.
- [67]. Shao, Z.; Liang, B.; Li, H.; Wu, G.; Wu, Z. Blended wind fields for wave modeling of tropical cyclones in the South China Sea and East China Sea. *Appl. Ocean Res.* 2018, 71, 20–33.
- [68]. Smith, S. D., and E. G. Banke. "Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 101.429 (1975): 665-673.
- [69]. Taylor, A. A., & Glahn, B. (2008, January). Probabilistic guidance for hurricane storm surge. In *19th Conference on probability and statistics (Vol. 74)*.
- [70]. Vickery, P. J. Masters, F. J., Powell, M. D., and Wadhera, D., 2009. Hurricane hazard modeling: The past, present, and future. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 47, 2497-2517.
- [71]. Vickery, P. J., & Wadhera, D. Statistical models of Holland pressure profile parameter and radius to maximum winds of hurricanes from flight-level pressure and H* Wind data. *Journal of Applied Meteorology and climatology*, 2008, 47(10), 2497-2517.
- [72]. Vickery, P.J.; Skerlj, P.F.; Steckley, A.C.; Twisdale, L.A. HurricaneWind Field Model for Use in Hurricane Simulations. *J. Struct. Eng.* 2000, 126, 1203–1221.

- [73]. Vickery, P.J.; Skerlj, P.F.; Twisdale, L.A. Simulation of Hurricane Risk in the U.S. Using Empirical Track Model. *J. Struct. Eng.* 2000, 126, 1222–1237.
- [74]. Willoughby, H. E. Darling, R. W. and Rahn, M. E. 2006. Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part II: A new family of sectional continuous profiles. *Mon. Weather Rev.* 134, 1102-1120.
- [75]. Willoughby, H.E.; Rahn, M.E. Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part I: Observations and evaluation of the Holland (1980) model. *Mon. Weather Rev.* 2004, 132, 3033–3048.
- [76]. Wu, D., Fang, G., Cui, X., & Teng, F. (2018). An analytical study of M 2 tidal waves in the Taiwan Strait using an extended Taylor method. *Ocean Science*, 14(1), 117-126.
- [77]. Wu, Tso-Ren. A numerical study of three-dimensional breaking waves and turbulence effects. Cornell University, 2004.
- [78]. Yen, P. H., Jan, C. D., Lee, Y. P., & Lee, H. F. (1996). Application of Kalman filter to short-term tide level prediction. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 122(5), 226-231.
- [79]. Zhu, J., Hu, J. Y., Zhang, W. Z., Zeng, G. N., Chen, D. W., Chen, J. Q., & Shang, S. P. (2009). Numerical study on Tides in the Taiwan Strait and its adjacent areas. *Marine Science Bulletin*, 11(2), 23-36.
- [80]. 王玉懷 (1998) 台灣海峽的潮汐特性。八十七年國科會海洋成果發表會論文摘要集，第203-208頁。
- [81]. 王玉懷 (1999) ,”TSNOW 現場觀測資料報告”，台灣海峽海況即時預報模式計畫(TSNOW)研討會論文集, pp. 16-21,
- [82]. 吳建民和馮德榮，”淡水河感潮水位站調和分析”，第五屆水利工程研討會，1990，PP. 1023~1030。
- [83]. 李志昕、洪景山，“區域系集預報系統研究：物理參數化擾動”。*大氣科學*，第39期第2號，95 -116，2011。
- [84]. 李汴軍, 范揚泓, 董東璟, & 高家俊. (2005). 台灣海域潮汐空間均勻特性之研究. *海洋工程學刊*, 5(1), 67-83.
- [85]. 李清勝. "台灣地區颱風路徑之預報分析." *大氣科學* 16.2 (1988): 133-140.
- [86]. 李賢文 (1989)，「台灣鄰近海域潮汐預報數值模式」，第二屆海洋數值模式研習會論文集，台灣省交通處港灣技術研究所，第179-195頁。
- [87]. 周宗仁,施士力，”淡水港潮汐分析研究”，國立海洋大學，河海工程學系，河海研究第八號，民國七十年四月。
- [88]. 林炤圭、林玉峰、戴益寶, 2005: “基隆港及花蓮港的水位觀測研究”，第27屆海洋工程研討會論文集, 949-956

- [89]. 林嫩瑛、邱銘達、柳文成、陳致穎、鄭皓元(2016) 颱風暴潮預報之不確定性分析，臺灣水利，第64卷，第3期，2016。
- [90]. 林演斌、陳聖學、施孟憲、滕春慈、林燕璋, 2020: “港內外潮位差異分析”, 109 年天氣分析與預報研討會, A5-O-N07。
- [91]. 林演斌、陳聖學、滕春慈、林燕璋, 2019: “港內外潮位分析”, 108 年天氣分析與預報研討會, A7-14。
- [92]. 張恆文, ”建構波浪系集預報系統 (4/4) ”, 交通部中央氣象局委託研究計畫期末成果報告, 2015。
- [93]. 張國棟、何崇華、沈建全、陳昭憲 (2001), 「台灣西南海域潮汐特性分析」, 第23屆海洋工程研討會論文集, 第112-119頁。
- [94]. 張憲國, 莊文傑, & 曾相茂. (2013). 臺灣商港的主要天文潮汐與潮流的特性比較. 海洋工程學刊, 13(4), 393-410.
- [95]. 陳怡發、黃煌輝 (1990) 「台灣沿海潮汐資料之整理及分析」, 第五屆水利工程研討會論文集, 第1050-1063頁。
- [96]. 詹森 (2006) 東亞海域之潮汐：1/12°三維斜壓潮汐模式之數值模擬，天氣分析與預報研討會論文彙編，7-27~7-32。
- [97]. 葉天降, 吳石吉, & 謝信良. (1998). 台灣附近颱風路徑預報校驗與統計方法之應用. 大氣科學, 26(3-4), 227-248.
- [98]. 劉文俊 (1999), 「台灣的潮汐」, 第二版。自費出版。
- [99]. 劉肖孔 (1983), 「中國海域三度空間數值模式」, 行政院科技顧問組, 共156頁。
- [100]. 蔡育霖 (2014) 風暴潮速算系統之建立及1845年雲林口湖事件之還原與研究。中央大學水海所研究所碩士論文。
- [101]. 蔡瓊林, 黃煌輝, ”台灣平均海水面特性變化研究(一)南灣實測資料之分析”, 第六屆海洋工程研討會論文集, 民國七十一年九月。
- [102]. 蘇青和、江中權 (1992), 台灣各港口潮汐相關性與預報模式研究。台灣省政府交通處港灣技術研究所, 81-研 (十三)

附錄 A、名詞對照說明表

暴潮總水位	觀測暴潮總水位為指定潮位站觀測之水位值。 模式暴潮總水位為潮汐水位與颱風造成水位增加。
潮汐水位	由月球、太陽之引力激起之潮汐現象。有別於受風及氣壓影響之氣象潮。
最大暴潮總水位	暴潮總水位之時序水位最大值。
最大潮汐水位	潮汐水位之時序水位最大值。
暴潮偏差	暴潮總水位減去潮汐水位之時序水位值。
殘差值	最大暴潮總水位減去最大潮汐水位之水位值。

附錄 B、預報模式之時差特徵修正校驗結果

A. 無暴潮作用下之潮汐校驗案例：2022 年 1 月

本部分針對現有預報模式，透過在高解析度模式搭配整合地形所發現之各港口時差特徵進行修正。為了解純潮汐情境下之差異，因此模式以 2022 年 1 月 1 日 0 時 (UTC+0) 之無颱風事件期間為起始時間，比較是否修正時差之模式結果與觀測資料之差異。

以無暴潮作用情境下之結果而言，於台中、將軍、龍洞潮位站在校正後均有校驗水位變佳之情形，分別約能提升 13 公分、3 公分、1 公分之方均根誤差校驗結果，而花蓮、成功、蘭嶼等潮位站在時間校正後則幾乎沒有影響（均小於 0.4 公分）。

圖 A—1 至圖 A—3 為台中港潮位站之時序系列校驗圖。

圖 A—1 為台中港潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—2 為台中港潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（12 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—3 為台中港潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（12 分鐘時差）後之結果與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

圖 A—4 至圖 A—6 為將軍潮位站之時序系列校驗圖。

圖 A—4 為將軍潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—5 為將軍潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（17 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—6 為將軍潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（17 分鐘時差）後之結果與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

圖 A—7 至圖 A—9 為龍洞潮位站之時序系列校驗圖。

圖 A—7 為龍洞潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—8 為龍洞潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（22 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—9 為龍洞潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（22 分鐘時差）後之

結果與與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

圖 A—10 至圖 A—12 為花蓮潮位站之時序系列校驗圖。

圖 A—10 為花蓮潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—11 為花蓮潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（12 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—12 為花蓮潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（12 分鐘時差）後之結果與與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

圖 A—13 至圖 A—15 為成功潮位站之時序系列校驗圖。

圖 A—13 為成功潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—14 為成功潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（6 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—15 為成功潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（6 分鐘時差）後之結果與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

圖 A—16 至圖 A—18 為蘭嶼潮位站之時序系列校驗圖。

圖 A—16 為蘭嶼潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—17 為蘭嶼潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（5 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 A—18 為蘭嶼潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（5 分鐘時差）後之結果與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

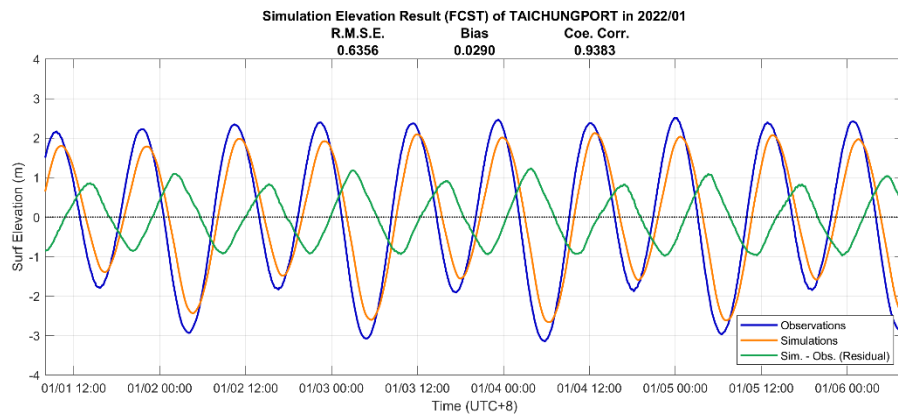


圖 A—1 預報模式原始時間之台中港潮位站時序校驗圖

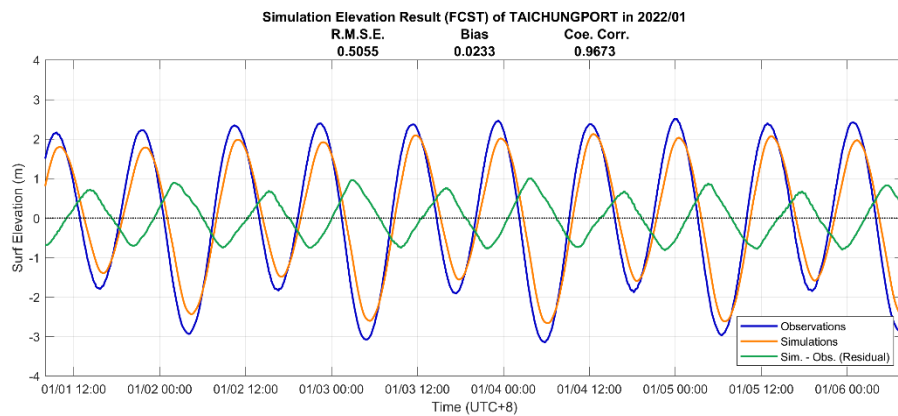


圖 A—2 預報模式時間校正之台中港潮位站時序校驗圖

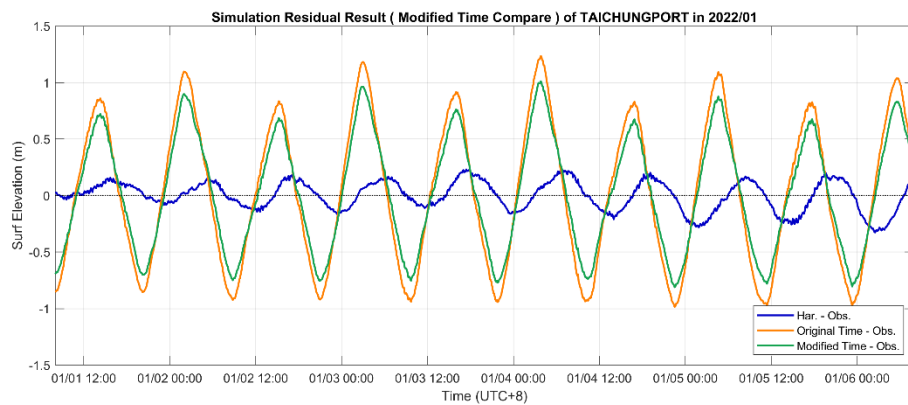


圖 A—3 台中港潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

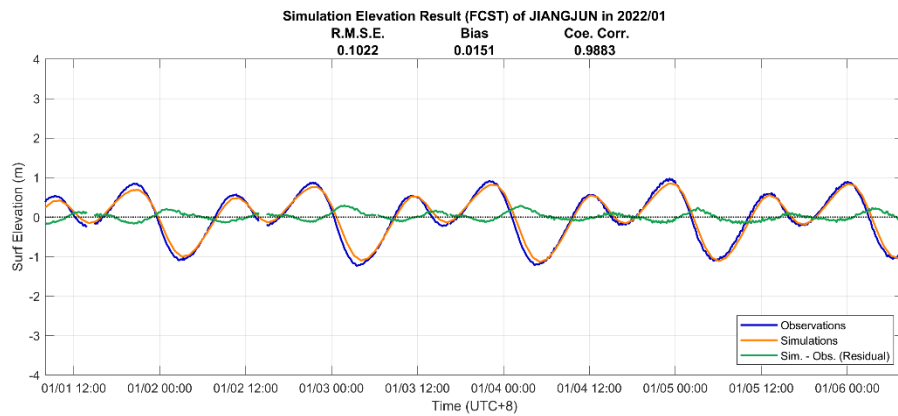


圖 A—4 預報模式原始時間之將軍潮位站時序校驗圖

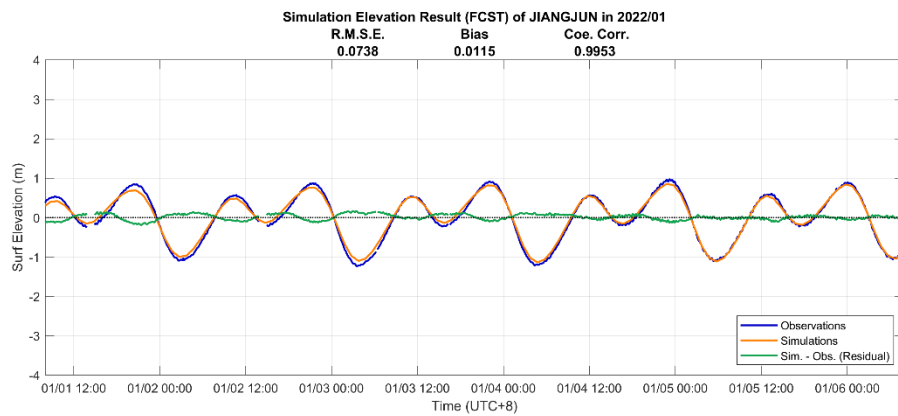


圖 A—5 預報模式時間校正之將軍潮位站時序校驗圖

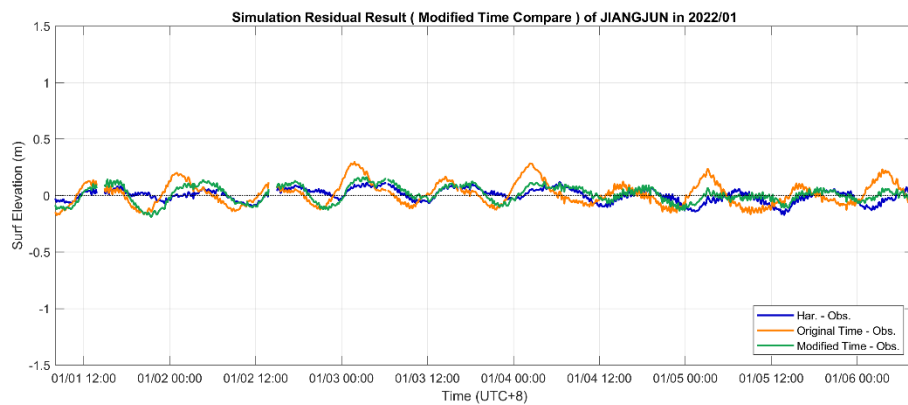


圖 A—6 將軍潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

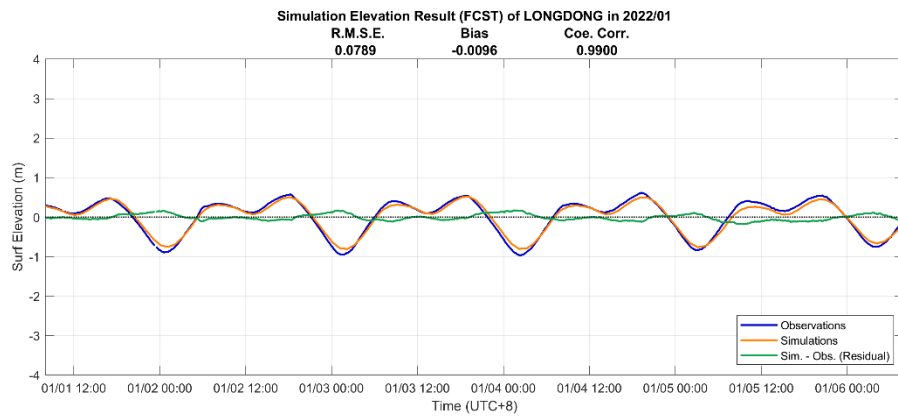


圖 A—7 預報模式原始時間之龍洞潮位站時序校驗圖

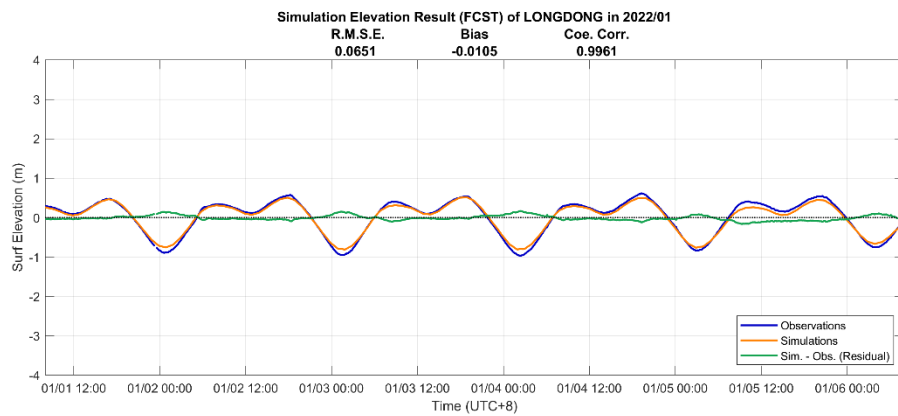


圖 A—8 預報模式時間校正之龍洞潮位站時序校驗圖

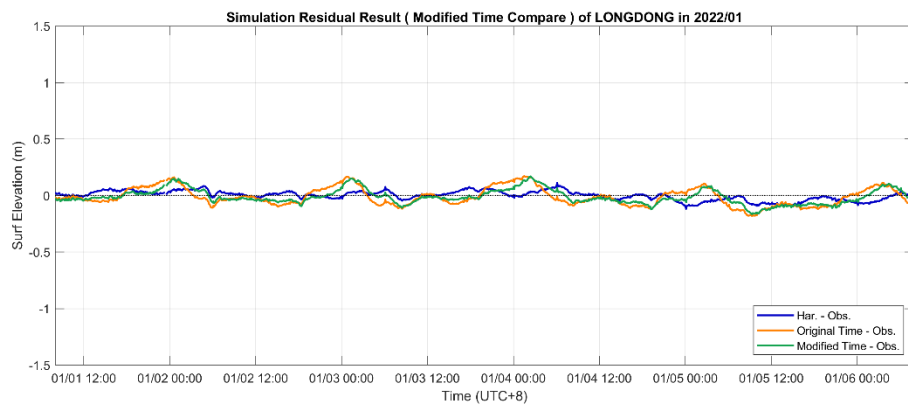


圖 A—9 龍洞潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

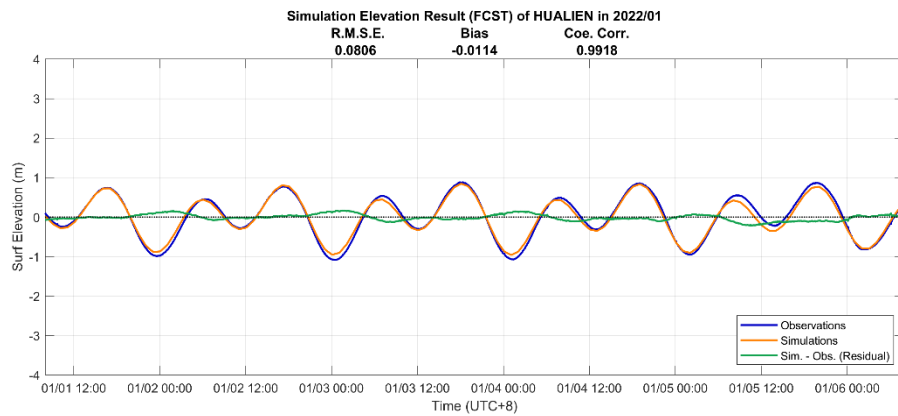


圖 A—10 預報模式原始時間之花蓮潮位站時序校驗圖

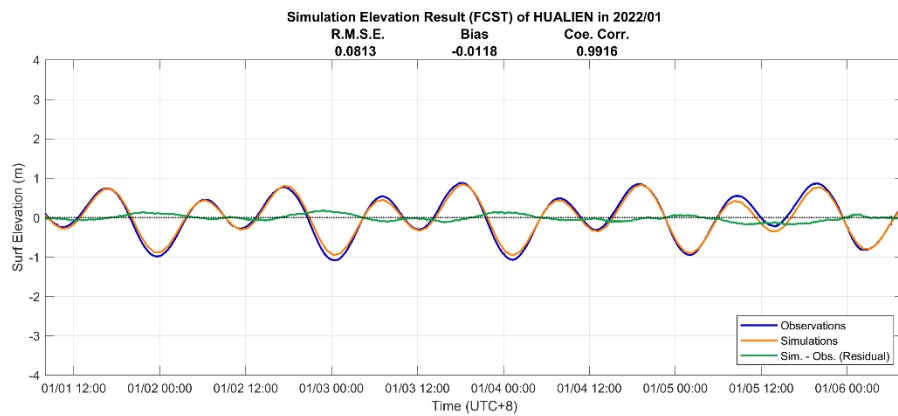


圖 A—11 預報模式時間校正之花蓮潮位站時序校驗圖

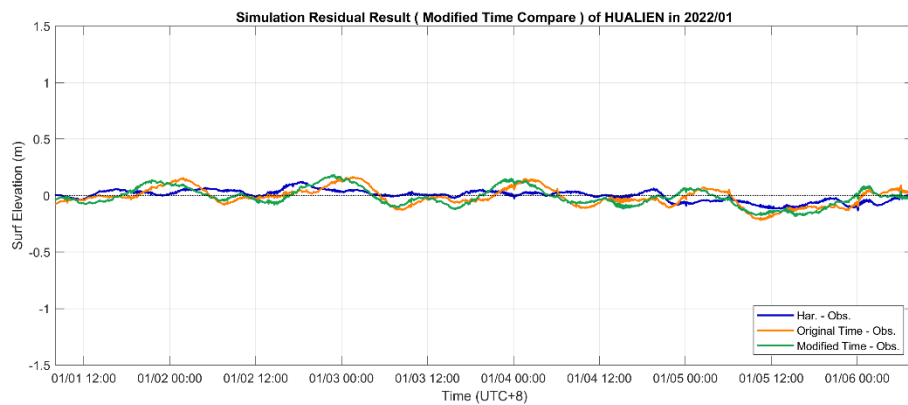


圖 A—12 花蓮潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

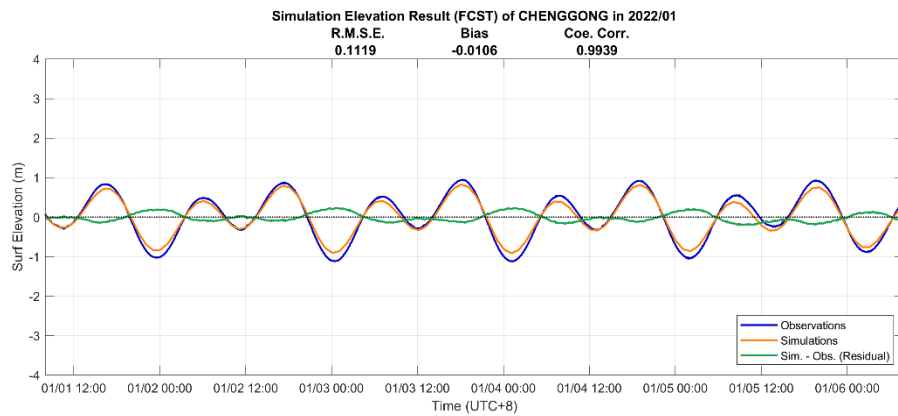


圖 A—13 預報模式原始時間之成功潮位站時序校驗圖

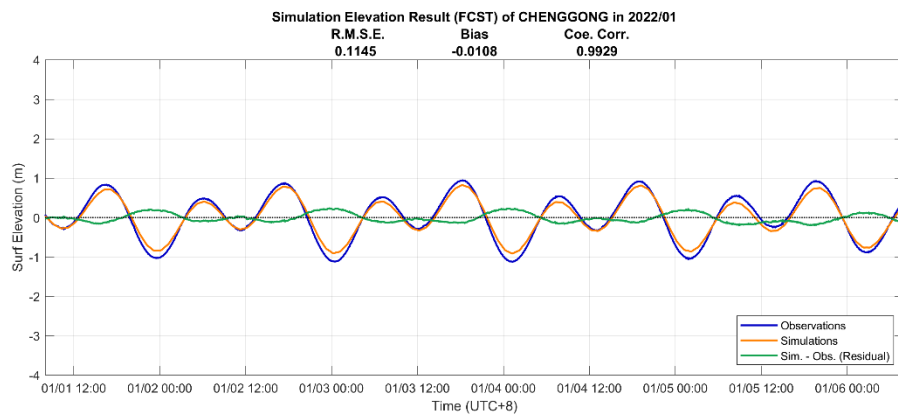


圖 A—14 預報模式時間校正之成功潮位站時序校驗圖

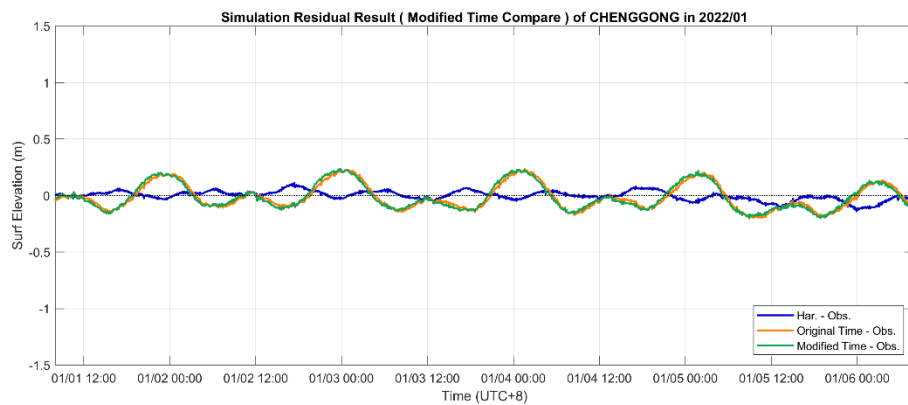


圖 A—15 成功潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

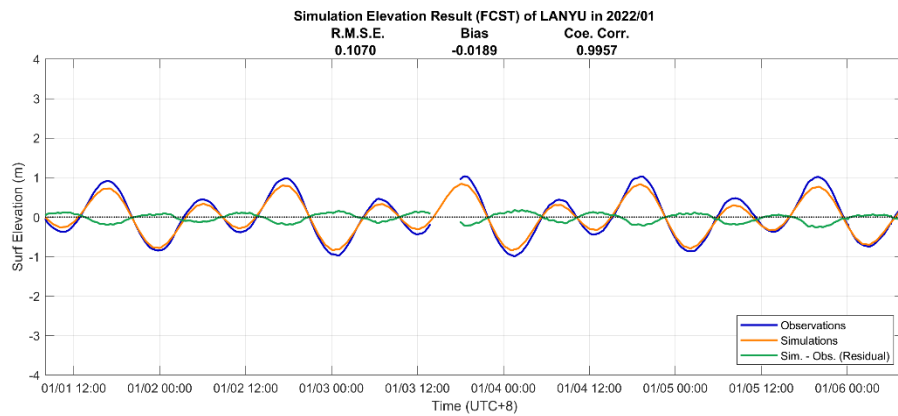


圖 A—16 預報模式原始時間之蘭嶼潮位站時序校驗圖

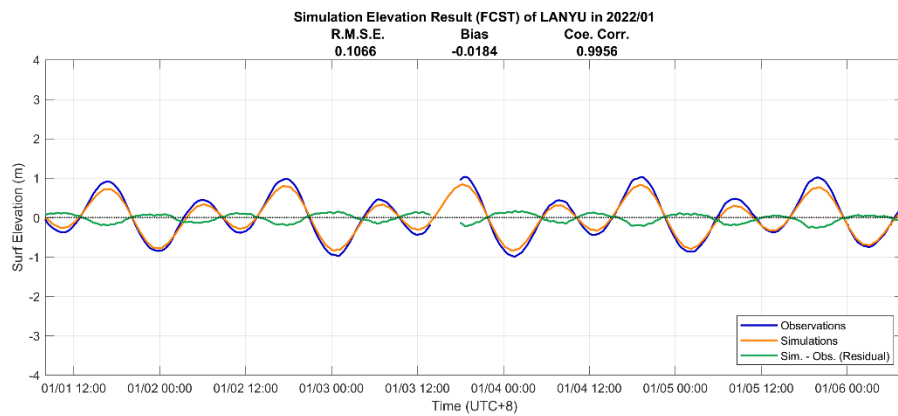


圖 A—17 預報模式時間校正之蘭嶼潮位站時序校驗圖

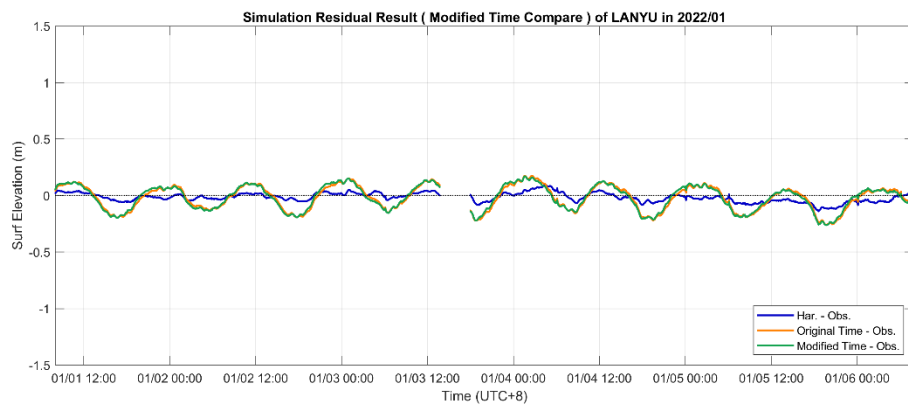


圖 A—18 蘭嶼潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

B. 暴潮作用下之潮汐校驗案例：2023 年海葵颱風

本部分針對現有預報模式，透過在高解析度模式搭配整合地形所發現之各港口時差特徵進行修正。為了解受颱風影響情境下之差異，因此模式以 2023 年 8 月 31 日 0 時 (UTC+0) 之受海葵颱風影響期間為起始時間，比較是否修正時差之模式結果與觀測資料之差異。

在海葵颱風之暴潮作用情境下之結果而言，於台中、將軍、龍洞潮位站在校正後均有校驗水位變佳之情形，分別約能提升 14 公分、0.7 公分、1 公分之方均根誤差校驗結果，而成功、蘭嶼等潮位站在時間校正後則幾乎沒有影響（均小於 0.4 公分），花蓮則是略為變差 0.6 公分。

在非暴潮與暴潮作用之整體考量之下，顯示高解析度地形所發現之港灣遮蔽效應時差特徵，可應用於台灣西南部及北部區域，而東部區域需做進一步評估。

圖 B—1 至圖 B—3 為台中港潮位站之時序系列校驗圖。

圖 B—1 為台中港潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—2 為台中港潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（12 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—3 為台中港潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（12 分鐘時差）後之結果與與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

圖 B—4 至圖 B—6 為將軍潮位站之時序系列校驗圖。

圖 B—4 為將軍潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—5 為將軍潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（17 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—6 為將軍潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（17 分鐘時差）後之結果與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

圖 B—7 至圖 B—9 為龍洞潮位站之時序系列校驗圖。

圖 B—7 為龍洞潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—8 為龍洞潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（22 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—9 為龍洞潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（22 分鐘時差）後之

結果與與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

圖 B—10 至圖 A—12 為花蓮潮位站之時序系列校驗圖。

圖 B—10 為花蓮潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—11 為花蓮潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（12 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—12 為花蓮潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（12 分鐘時差）後之結果與與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

圖 B—13 至圖 B—15 為成功潮位站之時序系列校驗圖。

圖 B—13 為成功潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—14 為成功潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（6 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—15 為成功潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（6 分鐘時差）後之結果與與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

圖 B—16 至圖 B—18 為蘭嶼潮位站之時序系列校驗圖。

圖 B—16 為蘭嶼潮位站之觀測資料與現行預報模式之二維模式結果之時序校驗圖，以作為比對。其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—17 為蘭嶼潮位站之觀測資料與現行預報模式經時間校正（5 分鐘時差）之二維風暴潮預報模式結果之時序校驗圖，其中深藍色線為觀測資料，橘色線為模擬結果，綠色線為殘差（模擬值減去觀測值），並提供方均根誤差(RMSE)、偏誤值(Bias)與相關係數(Coe. Corr.)之統計結果。

圖 B—18 為蘭嶼潮位站之調和分析結果與觀測資料之殘差、現行預報模式未調整之結果與與觀測資料之殘差、現行預報模式經時間校正（5 分鐘時差）後之結果與與觀測資料之殘差比較圖，其中深藍色線為調和分析殘差，橘色線為未調整模擬結果殘差，綠色線為調整後模擬結果殘差。

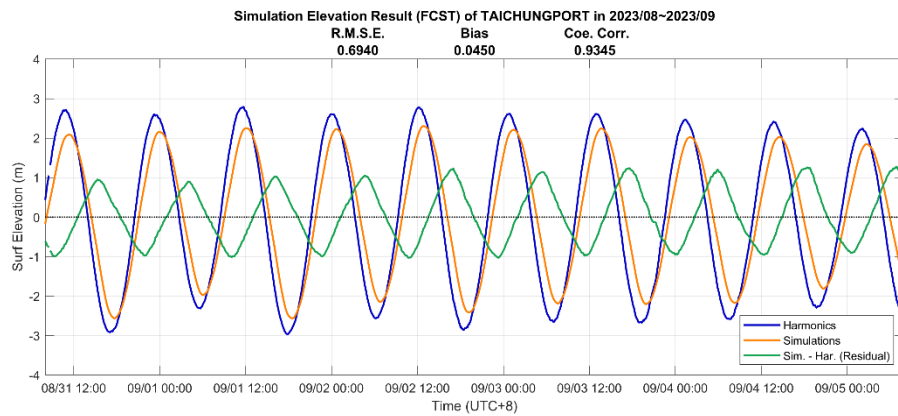


圖 B—1 預報模式原始時間之台中港潮位站時序校驗圖

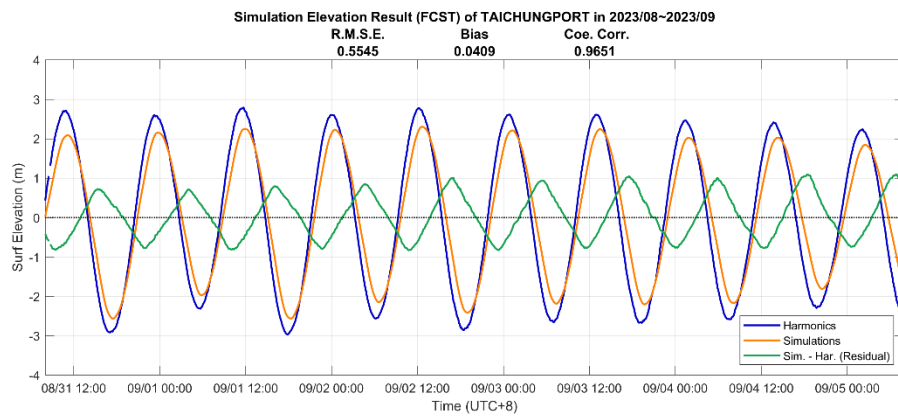


圖 B—2 預報模式時間校正之台中港潮位站時序校驗圖

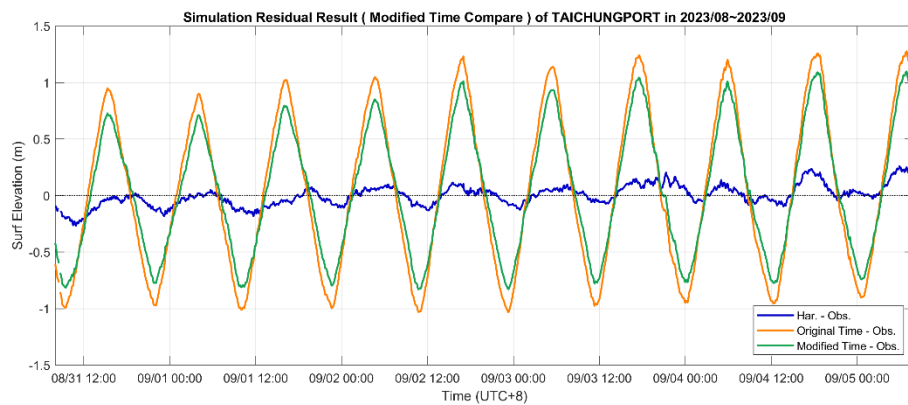


圖 B—3 台中港潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

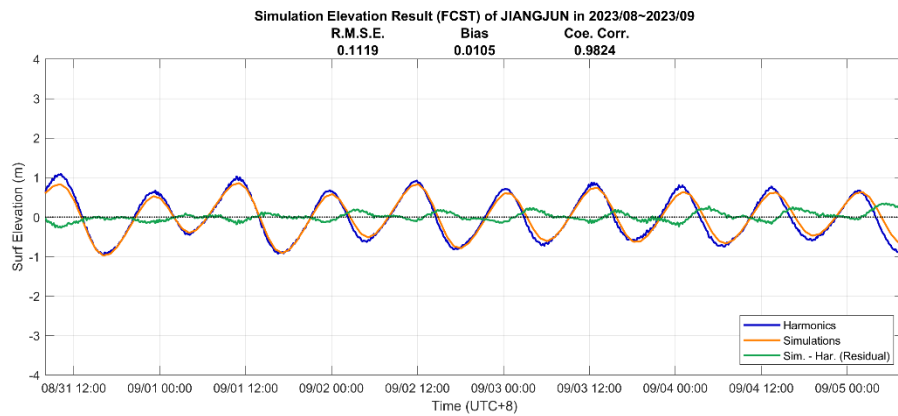


圖 B—4 預報模式原始時間之將軍潮位站時序校驗圖

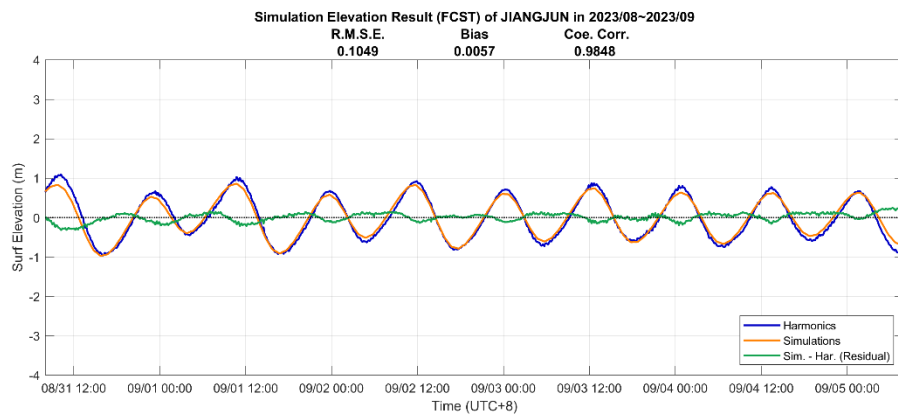


圖 B—5 預報模式時間校正之將軍潮位站時序校驗圖

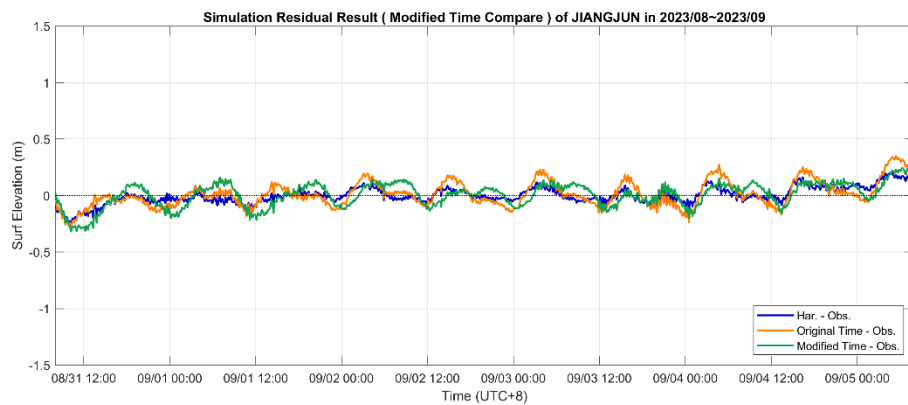


圖 B—6 將軍潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

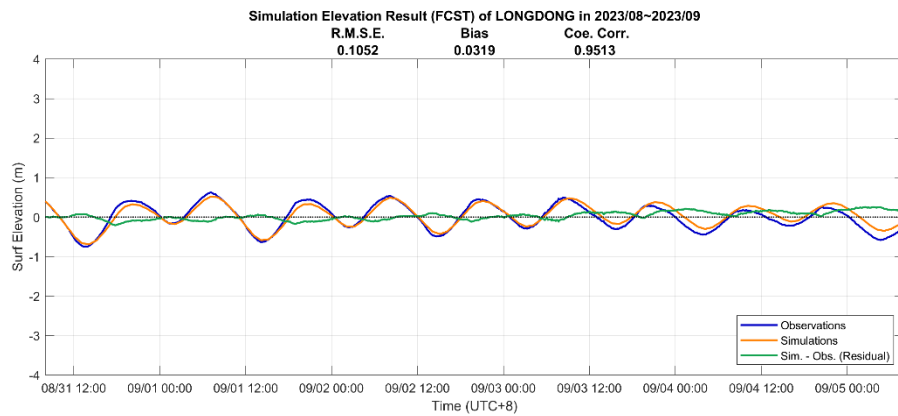


圖 B—7 預報模式原始時間之龍洞潮位站時序校驗圖

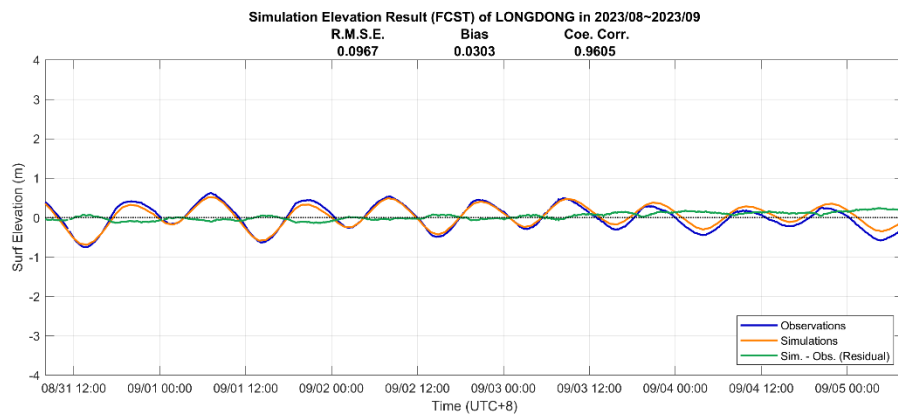


圖 B—8 預報模式時間校正之龍洞潮位站時序校驗圖

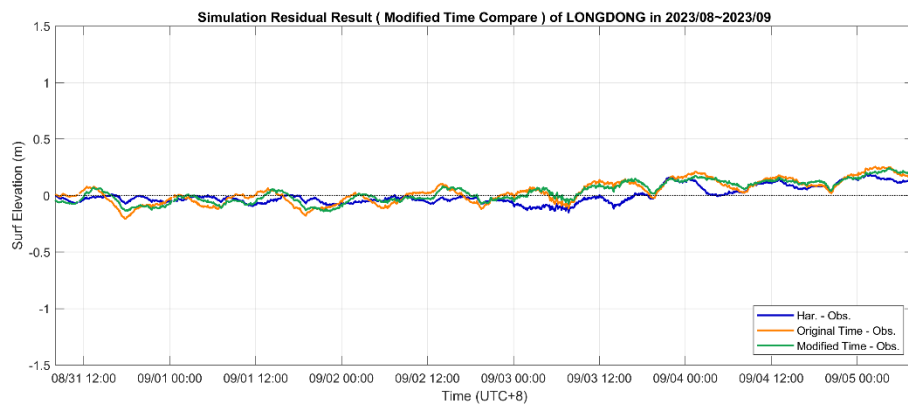


圖 B—9 龍洞潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

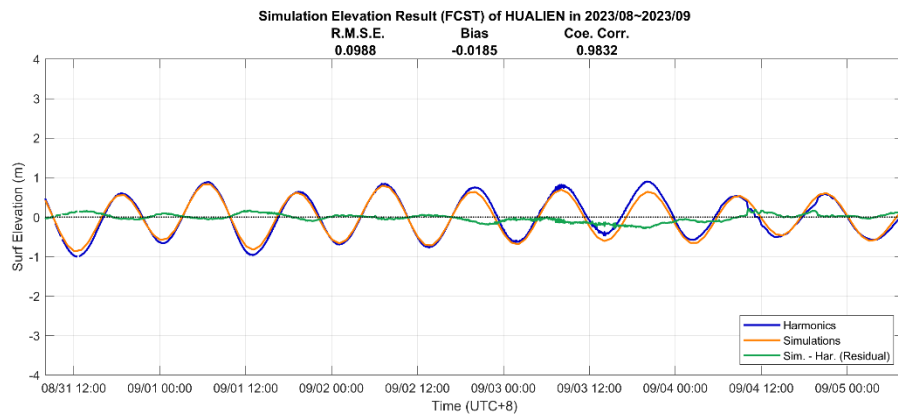


圖 B—10 預報模式原始時間之花蓮潮位站時序校驗圖

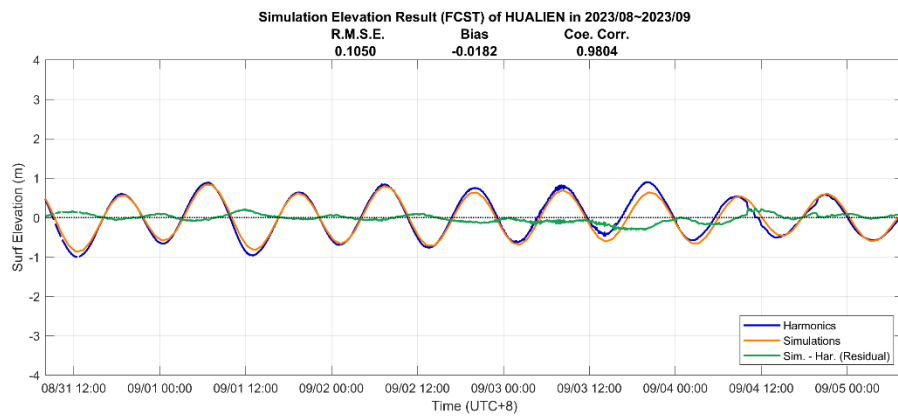


圖 B—11 預報模式時間校正之花蓮潮位站時序校驗圖

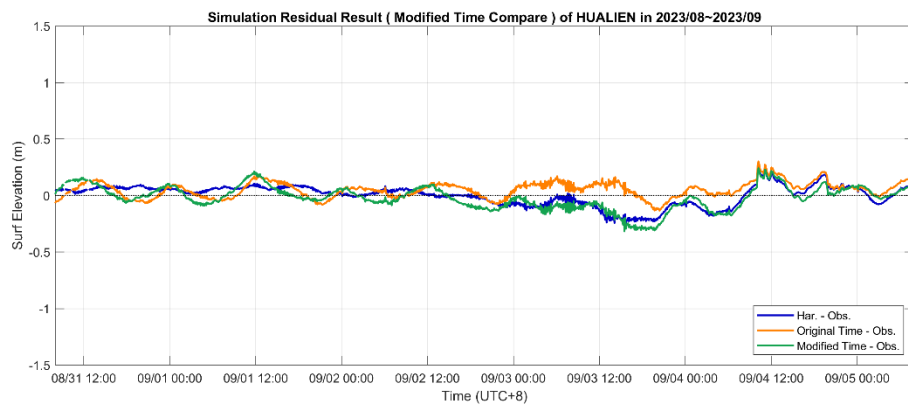


圖 B—12 花蓮潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

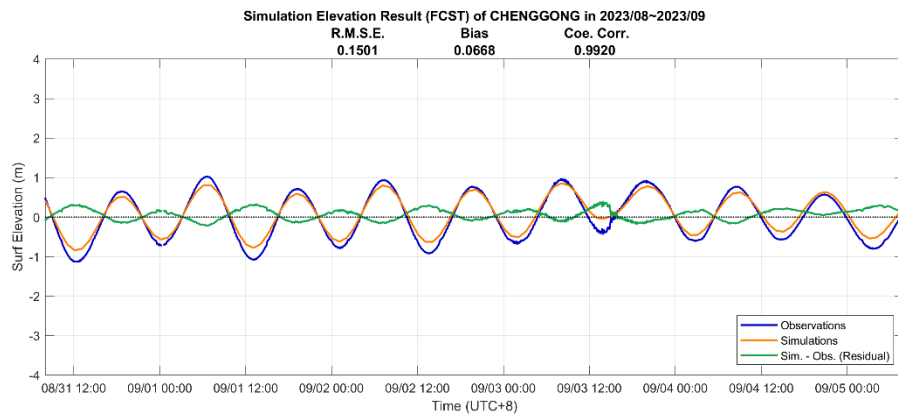


圖 B—13 預報模式原始時間之成功潮位站時序校驗圖

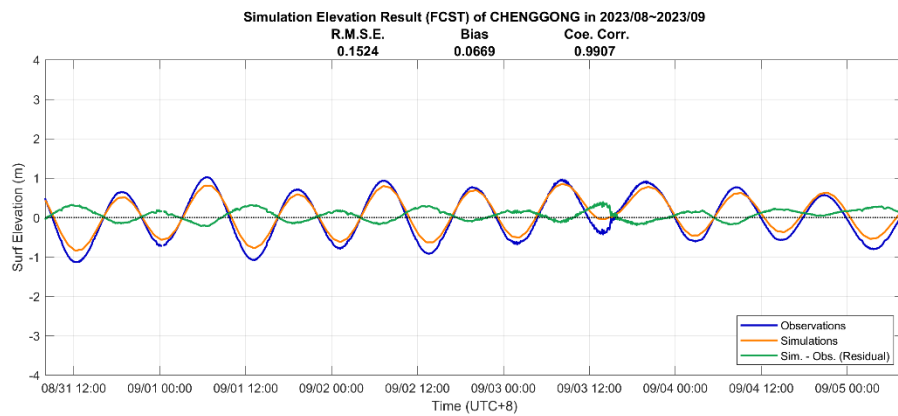


圖 B—14 預報模式時間校正之成功潮位站時序校驗圖

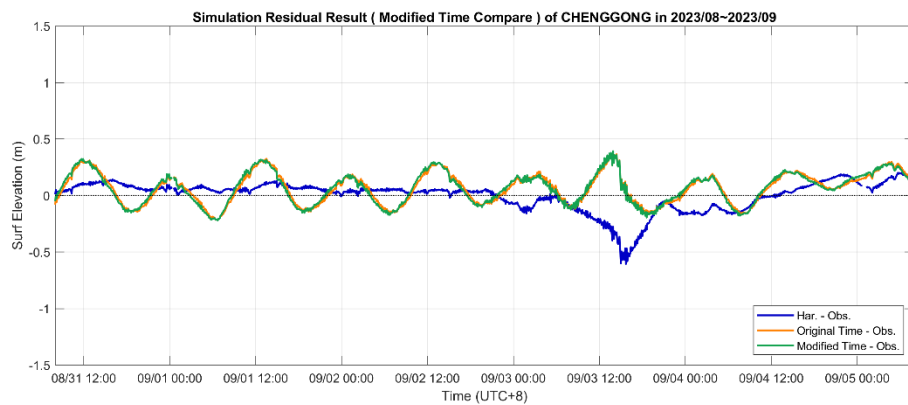


圖 B—15 成功潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

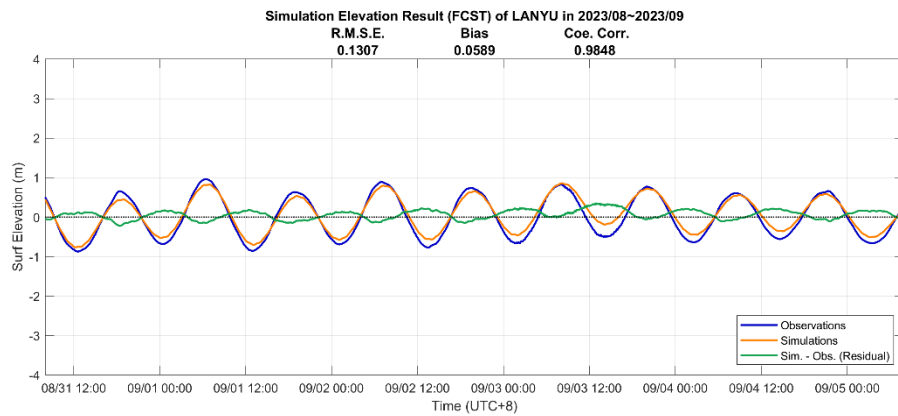


圖 B—16 預報模式原始時間之蘭嶼潮位站時序校驗圖

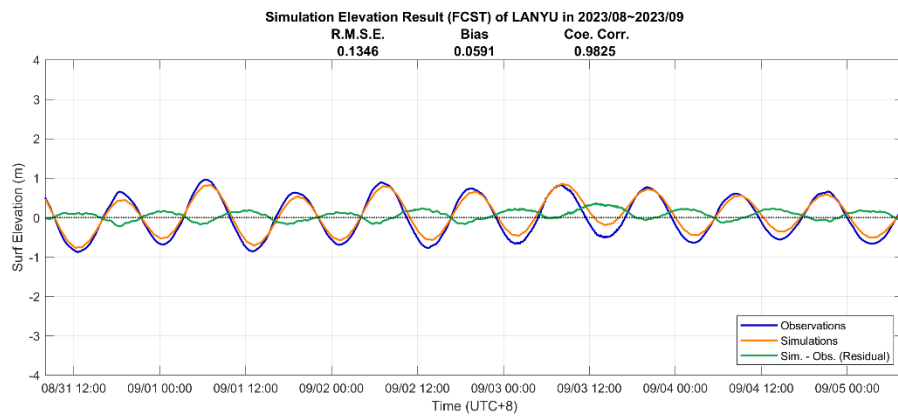


圖 B—17 預報模式時間校正之蘭嶼潮位站時序校驗圖

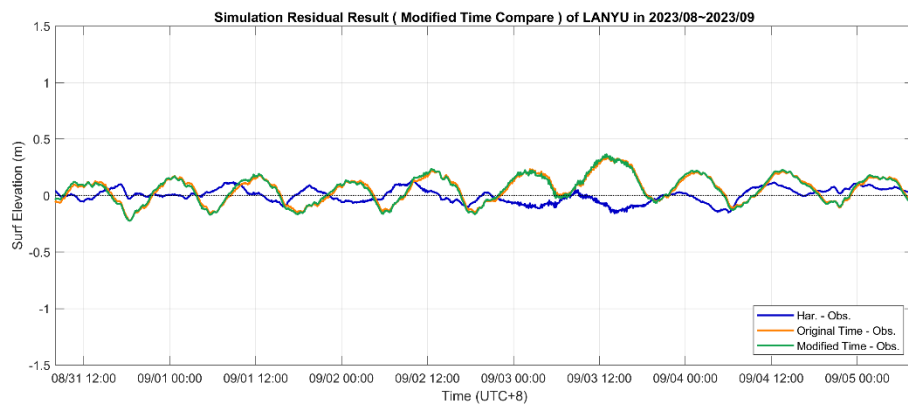


圖 B—18 蘭嶼潮位站之調和分析、預報模式調整前後之殘差比較圖

附錄 C、會議紀錄

交通部中央氣象局

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (3/3)」

期初報告審查會議紀錄

一、標案名稱：「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (3/3)」

二、廠商名稱：中華民國地球物理學會

三、審查日期：112 年 2 月 16 日 (星期四) 10 時 0 分

四、地點：616 會議室

五、主持人：滕委員春慈

紀錄：陳維翔

六、出席人員：

單位	姓名	簽名
國立臺灣海洋大學	蘇仕峯	蘇仕峯
	簡仲璟	簡仲璟
中央氣象局 海象測報中心	滕春慈	滕春慈
中央氣象局 氣象預報中心	林秉煜	請假
中央氣象局 海象測報中心	朱啟豪	朱啟豪

業務單位：

林芳如、陳維翔

廠商：

吳科任

七、簡報計畫研究成果：(略)

八、審查意見與回覆：

委員意見	廠商回覆
(一) 蘇委員仕峯	
1. 本研究計畫已進入第三年，主要目的為提升台灣暴潮預報溢淹模式(系統)之量化，對於海岸防災預報具有實質應用性，特別針對暴潮預報系統理想風場模式更新，並且採用三維模式模擬港灣遮蔽效應。 2. 有關理想風場，風速場與氣壓場受到中央山脈影響之風場特性，如何在模式空間上表現，可以補充說明，例如颱風由台灣分別由西部或東部北上，或是從中央山脈穿越等情況。 3. 本計畫將使用 Splash3D 三維模式模擬港灣遮蔽對潮汐水位與相位之影響，三維的網格解析是否有初步評估，例如水平方向採用 20 公尺乘 20 公尺的矩形網格，那垂直方向預計分幾層(根據網格解析)，例如港灣裡水深低於 20 公尺，網格選取之方式可在計畫中說明。 4. 採用三維模式所需計算時間是否影響預報時效？ 5. 第 26 頁提到更新模式內之數值地形，可以補充過去研究中發現那些特殊地形造成誤差。	1. 謝謝委員肯定，今年度將持續三方向之研究項目，持續發展精進結果。 2. 有關中央山脈之遮蔽效應，理想風場模式在未針對地形特徵調整的狀況下難以對其有所反映。團隊目前正在使用其他研究方法嘗試在理想風場模式中考量地形特性，預計將在今年度之研討會中發表成果。若學界反應正面，將在後續研究計畫中將該研究成果納入氣象局現有之預報系統中。 3. Splash3D 在設計網格時，以垂直部分而言，常會切分成 10 至 20 格，但因各港內水深較淺，其網格會變為扁平狀(如：20 公尺乘 20 公尺乘 1 公尺)。因此，處理方法可能會加密水平方向之網格(以過去之經驗，比例若不超過 1：50，結果皆能正常收斂)，但加密亦會導致計算潮汐時之模擬時間被拉長。 4. 解析度之提升與網格之調整對於時效上會有一定程度之影響，不過在 3 維數值模擬部分，目的並非直接以 3 維數值模式之模擬結果作為產品輸出，而是將 3 維數值模式做為修正經驗公式、參數之媒介，將此修正套用至 2 維數值模式，以期有更接近於觀測資料之預報結果。因此，在修正相關參數後，會持續追蹤修正對於 2 維模式運算時效之影響。 5. 在過去之研究中，主要發現在地形交界部分之結合不夠理想，希望可以透過由作業單位同仁取得之相關地形資料來改善現有的地形

6. 計畫執行結果可比較 Splash3D 與 COMCOT 之模擬結果。 7. 暴潮之定義應還有包含波浪碎波後產生之波揚，風吹水面之剪應力造成的水位抬升，可以在後續研究延續。	資料之問題。 6. 感謝委員建議，未來呈現計畫執行結果時將針對特定港口製作潮位高程等相關比對結果。 7. 在現有之二維預報系統中，氣壓及風速已經納入考量，碎波波揚等效應則礙於預報時效上之考量暫未納入。
(二) 簡委員仲璟	
1. 本計畫依據前期成果持續進行理想風場模式更新、三維模式之港灣海堤遮蔽效應，以及暴潮預報作業系統測試及效能提升等研究工作，所提研究方法與步驟合理可行，預期可達成計畫目標。	1. 感謝委員肯定，今年度將延續先前工作項目之結果持續精進，並持續發展系集預報系統集港灣遮蔽效應之模擬。
(三) 朱委員啟豪	
1. 3 維數值模擬須注意運算時間。	1. 感謝委員建議，關於 3 維數值模擬部分，目的並非直接以 3 維數值模式之模擬結果作為產品輸出，而是將 3 維數值模式做為修正經驗公式、參數之媒介，將此修正套用至 2 維數值模式，以期有更接近於觀測資料之預報結果。因此，在修正相關參數後，會持續追蹤修正對於 2 維模式運算時效之影響。
(四) 滕委員春慈	
1. 理想風場是否可以成為系集預報的成員選項？ 2. 三維模式所需地形資料取得是否有困難？ 3. 港內外潮站觀測資料的取得，是否已有備案？ 4. 潮位站水和和模式模擬的差異是	1. 可以。在選用系集成員時，除變動理想風場選項之外，颱風相關參數都與警報單相同，可以得知預報效能，並且已經在現有預報系統中作業。風場選定標準後續可能會根據颱風強度作為判斷標準，由系統自行決定後，在產品中會提供說明。 2. 地形將持續使用現有之地形資料，包含內政部網格數值地形模型資料、TORI 海科中心地形資料、海軍海岸點水深資料等；此外，團隊亦有向中心同仁取得相關地形資料，以期耦合之地形能精進特定港口之精度。 3. 關於「港內外潮位站」部分於期初報告中為文字之誤植，於台中港目前僅一筆來自「海象觀測站列表」之港內潮位資料，後續將予以修正，尚請見諒。

否可以由後處理方式解決？	4. 目前團隊有測試在模式模擬前套用參數修正，抑或是針對模式模擬之潮位結果進行後處理修正，後續將確認何者有較佳之結果。
--------------	---

九、審查結果：

審查通過。

十、散會。(11 時 40 分)

**「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究(3/3)」計畫案
【112年3月工作會議紀錄】**

時 間：112年3月29日(三)14時00分

地 點：視訊會議

主 席：滕春慈主任

出席人員：海象中心：滕春慈主任、林芳如課長、楊天瑋

國立中央大學：吳祚任教授、林君蔚、范子軒、莊美惠

記 錄：莊美惠

壹、工作進度簡報：

計畫執行進度報告。

貳、討論及決議事項：

1. Intel-Cluster 將於四月中旬進行維護，建請執行團隊提早因應。

參、散會：15時00分

楊天瑋
0331/1425

課長林芳如

0331/1430

主任滕春慈

0331/1440

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究(3/3)」計畫案
【112年5月工作會議紀錄】

時 間：112年5月31日(三)10時00分

地 點：視訊會議

主 席：滕春慈主任

出席人員：海象中心：滕春慈主任、朱啟豪技正、林芳如課長、楊天璋

國立中央大學：吳祚任教授、林君蔚、范子軒、莊美惠

記 錄：莊美惠

壹、工作進度簡報：

計畫執行進度報告：

1. 理想風場模式之暴潮系集預報系統模擬
2. 模式模擬結果之統計與分析
3. 暴潮預報系統理想風場模式更新

貳、討論及決議事項：

參、散會：12時00分

楊天璋 0531/1350

課長林芳如
0601/0753

主任滕春慈
0601/0910

交通部中央氣象局

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (3/3)」

期中報告審查會議紀錄

一、標案名稱：「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (3/3)」

1122122D 112-0650-01

二、廠商名稱：中華民國地球物理學會

三、審查日期：112年7月10日(星期一)14時0分

四、地點：311會議室

五、主持人：滕委員春慈

紀錄：陳維翔

六、出席人員：

單位	姓名	簽名
淡江大學	陳俊成	陳俊成
	簡仲璟	簡仲璟
中央氣象局 海象測報中心	滕春慈	滕春慈
中央氣象局 氣象預報中心	羅雅尹	請假
中央氣象局 海象測報中心	朱啟豪	朱啟豪

業務單位：

林芳如

陳維翔

廠商：

吳科任

七、簡報計畫研究成果：(略)

八、審查意見與回覆：

委員意見	廠商回覆
(一) 陳委員俊成	
1. 案例驗證建議選一有經過中央山脈之颱風案例。 2. 理想風場參數的選擇能否建立對應颱風路徑不同分類為指引？ 3. 暴潮預測與港灣海堤遮蔽效應推估，能否建立不同海岸位置分類關聯之指引？ 4. 從預報的角度3D 比2D 費時，建議比較潮位量測值，確認3D 是否真的比2D 精確度高？	1. 感謝委員建議。計畫工作項目中針對模式更新後之驗證，其主要目的為展示更新預報系統作業用理想模式後，預報系統之預報表現，故選用本年度颱風事件作為校驗對象。團隊將於期中報告完稿中額外展示經過中央山脈之歷史颱風案例驗證。 2. 以現有預報系統而言，根據颱風路徑分類手動挑選理想模式執行預報是可行的，但颱風之路徑分類資訊通常無法在警報期間取得，而是在事件過後才得以進行判定。作為折衷選項，團隊認為後續研究針對理想風場的選擇，可在陸上警報中更進一步區分預報路徑是否登陸進行模式選項指引分析。 3. 由於地形解析度的提升，會極大程度地延長預報時效，因此此部分並非要納入現有之預報系統當中，而是預期找出在現有之預報當中，因解析度不足而無法體現之調和分析扣除觀測資料間殘差之來源。在今年度之計畫中，預期會新增幾處港口，以觀察是否各港口導致潮汐殘差之特性是否有所異同。 4. 於去年度之計畫中，團隊已進行港灣遮蔽效應之2D 分析，得出潮汐會有一定延時之結論，但潮位之高程並不會與實際觀測值有太大區別。另，有關3D 模擬部分，目前並無法確定一定會較2D 之潮汐水位結果更為精準，但包含碎波效應或是其他導致潮汐濾波無法處理乾淨之要素，或許在3D 之

	結果中更能體現，也是今年度要進行3D 模擬的關鍵因素。
(二) 簡委員仲璟	
1. 本計畫針對五種風場模式依颱風強度分類及颱風警報分類進行暴潮水位預報結果之統計分析，結果顯示 CWB 模式是最理想風場模式。對照報告書第14頁，此結果大致已完成第3年第一項工作項目，後續港灣海堤遮蔽效應及預報系統測試及效能提升評估，則請於期末報告時提出。	1. 感謝委員認可，港灣遮蔽效應之相關模擬及預報系統之效能評估會如期於下半年度完成。
2. 第4-3節中，建議圖4-6中各理想風場模式標示與表4-5應一致，此外建議補充統計試算之數據數量（式4-1及式4-3之n值）。表4-5顯示不同風場模式之暴潮預報其誤差統計分析結果差異不大。此對不同颱風及不同測站是否有相同情形？（表4-5是2016年莫蘭蒂；台東大武測站）。	2. 感謝委員建議，圖標差異及統計之數據數量將會修正於完稿。表4-5僅展示單次預報事件中單一測站於48小時預報期間所得數值水位與觀測水位比較之統計參數，僅能代表該測站之單次事件。
3. 為何選用近中心最大風速作為颱風強度分類？暴風半徑對暴潮也可能有影響，是否也應考量？請再評估。	3. 在世界氣象組織(WMO)之強度分類定義中，僅以近中心最大風速作為判斷基準，主要原因為強風速有致災性，而暴風半徑的大小則主要描述致災風速的影響範圍。因此案例分析中亦參考 WMO 之颱風強度標準進行分類。團隊將於後續研究中考慮並嘗試將暴風半徑做為選用模式參考之一，並與下游單位確認合適之產品型態，提供民眾適合的防災產品進行參考。
4. 颱風警報種類分類，目前僅海上及陸上兩類，若由颱風預報資料中用颱風之中心位置與預報測站之距離大小作分類是否更佳？請考量。	4. 團隊於研究過程中曾經考慮選用此種分類方法，不過，颱風於預報期間位置並非固定，因此對應各測站之距離亦會隨之變化，導致各測站於特定距離中可供分析之事件數量不一致。以金門、馬祖為例，大部分颱風警報發布

5. 五種風場模式皆加入預報系統中是否會影響預報作業之時效性？若有則請再評估哪幾個放入預報系統中	時距離該地區皆為400至500公里以上。相較於此，海上/陸上颱風警報對於不同測站間之基準較為統一，是最後作為分類標準的原因。 5. 在目前之預報系統中，會根據不同情境自動挑選最適合之理想風場作為模擬基準，因此只會運行一個理想風場之結果，並不會造成時效上之太大影響，後續如有需要，仍可手動挑選特定理想風場以進行預報。
(三) 朱委員啟豪	
1. P. 56 沒有代號 "E04"，應該是 "E11"。 2. P. 62 不管何種模擬，福隆相關係數都很低，why？	1. 感謝委員，文字植入之錯誤將會修正於完稿。 2. 在進行觀測資料品管過程中，的確有發現部分預報因觀測資料缺失或記錄基準水位有偏差導致該次預報所得之相關係數偏低，不過福隆測站並沒有類似情形。因此以現有資料而言，並沒有辦法確定福隆測站之相關係數較其他測站偏低的決定性因素。
(四) 滕委員春慈	
1. 研究成果豐碩。 2. 可否說明颱風強度和預報誤差差異的原因？	1. 感謝委員肯定。 2. 透過理想風場模式與再分析風場資料進行比對，可得知颱風強度越強時，理想風場模式所描述之結構越可能與實際風場結構有落差，該情形亦反映至暴潮水位預報之方均根誤差分布。

九、審查結果：

審查通過。

十、散會。(16時10分)

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究(3/3)」計畫案
【112年8月工作會議紀錄】

時 間：112年8月28日(一)14時00分

地 點：視訊會議

主 席：滕春慈主任

出席人員：海象中心：滕春慈主任、朱啟豪技正、林芳如課長、楊天瑋

國立中央大學：吳祚任教授、林君蔚、范子軒、莊美惠

記 錄：莊美惠

壹、工作進度簡報：

計畫執行進度報告。

貳、討論及決議事項：

1. 執行模擬成果於高潮位仍出現震動的現象，建議可以將冷啟動拉長至3-5天。
2. 資料課 API 提供之觀測資料於8/1~8/3之澎湖測站及8/2上午之將軍測站資料有偏高值被去除之現象，建議資料課確認資料檢核過程。
3. 調和分析與觀測值似乎有潮時差，未來可進行資料分析，確認各潮位站之潮時是否需要進行偏差校正。
4. 目前港灣效應三維數值分析初步成果顯示其效應並不明顯，未來將以二維高解析模擬進行台灣地區重要港口分析。

參、散會：16時10分

楊天瑋 0829/0920

朱啟豪

課長林芳如

0829/0927

主任滕春慈
0829/0935

**「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究(3/3)」計畫案
【112年10月工作會議紀錄】**

時 間：112年10月24日(二)14時00分

地 點：視訊會議

主 席：齊祿祥副組長

出席人員：海象氣候組：齊祿祥副組長、朱啓豪科長、楊天瑋

國立中央大學：吳祚任教授、林君蔚、范子軒、莊美惠

記 錄：莊美惠

壹、工作進度簡報：

計畫執行進度報告。

貳、討論及決議事項：

1. 業務單位已添購伺服器取代 Intel-Cluster 計算服務，預計明年正式上線，屆時須將預報系統轉移至伺服器執行。
2. 執行團隊提供海葵颱風與小犬颱風模擬成果校驗，因氣象署伺服器通訊協定更新，無法透過 FTP 下載資料，暫時無法展示小犬颱風之 TWRP 模擬成果，業務單位已經協助向資訊中心申請變更設定。

參、散會：16時10分

楊天瑋 1026/1130

科長朱啓豪
1026/1130

副組長齊祿祥
1026/1130

交通部中央氣象署

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (3/3)」

期末報告審查會議紀錄

一、標案名稱：「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (3/3)」

二、廠商名稱：中華民國地球物理學會

三、審查日期：112 年 12 月 18 日（星期一）10 時 0 分

四、地點：617 會議室

五、主持人：齊委員祿祥

紀錄：陳維翔

六、出席人員：

單位	姓名	簽名
淡江大學	陳俊成	陳俊成
	簡仲璟	簡仲璟
中央氣象署 海象氣候組	齊祿祥	齊祿祥
中央氣象署 氣象預報中心	林秉煜	林秉煜
中央氣象署 海象氣候組	黃士哲	黃士哲

業務單位：

朱啓豪 陳維翔

廠商：

吳科仁

七、簡報計畫研究成果：(略)

八、審查意見與回覆：

委員意見	廠商回覆
(一) 陳委員俊成	
1. 表 4-11, 4-14 相關係數應介於 0~1，或標示單位為% (百分比)。 2. 針對暴潮預測在東北、東部、西南及南部偏低，而在西北部、西部及離島高估原因？ 3. 驗證颱風選擇如有通過台灣島與無通過台灣之差異請補充說明。	1. 表 4-11 與表 4-14 為統計颱風事件屬海上/陸上颱風警報單期間的理想風場模式統計結果之「站數」表現。其中，NUM 為預報模式分析採用之 32 個測站中，選用特定理想風場模式涵蓋最佳 (BEST) 或最差 (WORST) 的潮位站數量。以表 4-11 為例，在 Storm Surge 案例、強度為 TS (Tropical Storm) 的情況下，最佳 (BEST) 之理想風場模式為 W06，其對應之 NUM 表示在統計所有海警事件的 32 個潮位站中，有 14 個潮位站在選用 W06 模式時呈現最佳結果。報告完稿中會加強表格說名，感謝委員提醒。 2. 理想風場模式在特定區域出現高估/低估並沒有一定規律，隨理想風場模式更動，模擬結果會隨之呈現不同之高估或低估的現象，並非所有颱風事件中都存在台灣區域性之高估或低估特性，未來可探討是否有類似特性並進行歸納。 3. 針對台灣通過台灣本島與否，在期末報告之第 4-4 章中係以發布海上警報之案例-中度颱風瑪娃，以及發布陸上颱風警報案例-中度颱風梅姬做分別，並選定發布警報期間內之特定時間作為作業化測試之起始時間。若以綜合表現評估，在海上警報案例中，以 CWB 模式表現為最佳，其次為 W06、E11、J92 及 H80；在陸上警報案例中，以 CWB 模式表現為最佳，其次為 W06、H80、J92 及 E11。此結果顯示無論發布海上或陸上颱風警報，預報系統皆會以最佳之 CWB 作為預報作業理想風場評估之選擇。

4. 圖 6-9~6-12 請標示單位。 5. 表 5-4 之預報效能提升呈現方式，請修正。	4. 感謝委員指正，已於報告中更新圖 6-9 至圖 6-12 壓力梯度與速度梯度圖之單位。 5. 感謝委員建議，已更新表 5-3 及 5-4 中效能差異之相關敘述。
(二) 簡委員仲璟	
1. 簡報第 49 頁所述有關 Splash3D 模式，雖可精確求解海嘯湧潮或洪水撞擊近岸結構物時之結構物受力與流場情形，但此與暴潮預報似乎關聯性不高。若考量暴潮潮波受地形或港灣結構物影響，以目前之三維模式是否適宜？(海嘯波、洪水波、暴潮波在時間尺度上有差異)是否符合預報作業需求？請再評估說明。「湧潮」是否指潮波？何為「夾氣」作用？海嘯碎波與一般風浪或湧潮碎波是否不同？ 2. 依第 198 頁說明顯示目前 Splash3D 模式無法確定暴潮是否有港灣遮蔽效應(影響暴潮水位及暴潮作用時間等)，換言之可能有也可能沒有。此與第 191 頁所述「濾掉天文潮後仍存在週期性擺盪」，這可能非暴潮所造成，而有可能是長週期波之港池共振所致，建議後續可再深入探討。	1. 感謝委員建議，在完成三維 Splash3D 模式工作項目期間，在台中港之案例中發現，地形剖面之壓力梯度與速度分量呈現均勻之垂直分布情形，顯示港灣遮蔽效應於三維模式中並不明顯，同時顯示夾氣作用等在本次案例中並無出現。且三維模式之相關評估係為瞭解可能之三維港灣效應，並無符合預報作業需求之考量，但完成模擬之所需時間仍相當耗時。有鑑於過去之二維模式結果，提升解析度後仍可在較短時間內完成相關案例模擬，因此在與署內同仁研議後，決定將本部分之重心轉往完成多個二維港口案例以評估港灣遮蔽效應之影響。 當波浪進入淺灘受到溯昇效應影響而堆疊產生「湧潮」，在波浪破碎時則與空氣混合產生「夾氣」現象。一般波浪於岸邊即破碎導致能量逸散，海嘯湧潮與一般波浪型態不同，高度可以由數十公分到數十公尺，具有相當破壞力。 2. 感謝委員建議，關於港灣遮蔽效應之相關工作項目，係因在過往暴潮相關分析時，發現台灣本島部分測站之暴潮偏差(Storm Surge)及暴潮總水位(Storm Tide)，在方均根誤差之統計參數上存在差異，顯示存在非暴潮水位影響了暴潮總水位，因此，計畫決定優先考量潮汐水位相關問題因而執行港灣遮蔽效應項

3. 6-3-2 小節標題建議改為「無暴潮作用下潮汐檢驗案例」，6-3-3 小節標題則改為「暴潮作用下潮汐檢驗案例」。這兩小節之檢驗結果建議應有小結之總體說明以明瞭有無暴潮作用下港內港外潮位之差異。6 個港口港內、外之潮位比較點為建議以圖標示其位置。台中、花蓮港型較狹長，港內不同位置之潮位其時間校正可能會有差異，請再檢視。 4. 第 265 頁期中審查回覆說明「目前之預報系統中，會根據不同情境自動挑選（如何挑選？）最適合之理想風場…」此與第 247 頁第 6 行之結論說明，似有矛盾？若取最適合之 2 個是否符合預報作業需求？ 5. 文中仍有部分誤置，例如目錄 4-4-2 小節名稱，第 46 及 47 頁「錯誤！找不到參照來源」。	目，其餘可能影響暴潮總水位之機制可再研議。 3. 感謝委員指正，報告書中 6-3-2 及 6-3-3 節之標題已更新為「無暴潮作用下之潮汐檢驗案例：2022 年 1 月」及「暴潮作用下之潮汐檢驗案例：2023 年海葵颱風」，並新增有無暴潮作用下之相關潮位說明，以及新增現行預報模式之港外潮位站位置及整合地形之高解析度模式之港內潮位站位置（並提供水深）之相關圖片於圖 6-13 至圖 6-24，以及表 6-1 至表 6-2。目前高解析度模式之港內潮位站位置選擇是以署內海象觀測站列表提供之經緯度為基準，會詳細確認潮位站位置，避免潮位延時問題，若有其他港內水位之評估需求亦可再新增數值潮位計。 4. 挑選風場係依據預報時間內的平均颱風強度做選擇，但目前透過研究發現，無論在颱風強度不同或海上、陸上警報情境下，都普遍以 CWB 之作業化模式結果最好。而若考量兩個以上理想風場時，其時效需參考系集預報系統之時效，在過往之經驗中，於現行之單機版本機器上，三個小時左右可以完成相關模擬。 5. 感謝委員指正，已更新第 4-4-2 節標題名稱錯誤以及參照來源之闕漏。
(三) 林委員秉煜	
1. 文字勘誤，內容有找不到參照來源的眾委員已經提到，就不贅述，麻煩更正。 2. 內容對於實務應用面上，有實質幫助，可以發現近年的暴潮在定性上越來越準確，定量預報是最困難的部分，請團隊持續努力 3. 有一個建議及兩個問題提供： (1)建議的部分是，報告內提及會用過去十年的警報資料去做理	1. 感謝委員指正，已更新報告書中之相關參照來源。 2. 謝謝委員之肯定與努力，後續會持續維護與精進暴潮相關產品。 3. 感謝委員建議，關於颱風半徑之差異，目前之 CWB 理想風場模式是以署內颱風資料庫所提供之相

想風場預報，不過近五年的警報單提的颱風半徑和過去有顯著不同： (a)第 1 個是過去常常七級風半徑和十級風半徑會有 3:1(參考論文理想半徑)的比例，這部分近年參考 RAMMB CIRA 風場後，已經逐漸脫鉤此 3:1 比例 (b)現在的七/十級風半徑多參考 RAMMB CIRA 風場來分析，因此有可能近年的風場分析會比過去歷史個案的大 (2)第一個問題是想問，暴潮如何校驗？觀測的方式是如示性波高取前 1/3 平均？還是瞬間強度？ (3)第二個問題是，文中看到海堤結構的研究分析，近年苗栗至彰化有很多風電場域，風機的設置對於暴潮是否有影響？	關警報單/最佳路徑資料為主，其他理想模式則可以依照委員的相關建議改進。 針對委員提問，現行之暴潮水位校驗是透過音波式及壓力式水位計等進行監測，係以瞬間之潮位為主，因此後續產製之資料可能受波浪影響而有瞬間峰值，需於後處理中濾除。 而關於風機之設置，根據團隊過往之相關案例評估，由於風機之大小尺度（數公尺）與暴潮影響範圍尺度（數百公里）存在差異，意即在離岸地區設置風機對潮汐乃至暴潮總水位之影響輕微，可忽略其對現行潮位站之影響。
(四) 黃委員士哲	
1. 第 46、47 頁，「錯誤！找不到參照來源」 2. 圖 4-15~4-21 有標註颱風強度之英文簡寫，但圖 4-22~4-44 突然沒標註英文簡寫，建議都標註上。 3. 章節 4-4-2，標題有誤，應為「陸上警報」 4. 第 192 頁，「氣象署內提供之 20 公尺解析度水深資料」，其資料來源為內政部，若是，請注意該資料不可提供給第三者。 5. 第 215 頁，圖 6-39、圖 6-40 重複。 6. 從「6-3-2 非颱風季」中可看到，預報與觀測相近，但「6-3-3 海葵颱風案例」中發現，當受颱風影響時，預報皆有偏大之情形，是否有原因？	1. 感謝委員指正，已更新報告書中之相關參照來源。 2. 感謝委員指正，已更新圖 4-22 至圖 4-44 之關於颱風強度之相關英文簡寫至圖片名稱中。 3. 感謝委員指正，已更新第 4-4-2 節標題名稱錯誤於報告書中 4. 謝謝委員提醒，該地形資料僅用於本次二、三維港灣遮蔽效應之相關研究結果。 5. 感謝委員指正，已刪除報告書中誤植之圖片。 6. 在預報模式與整合地形之港灣內潮位站之比較中，由於兩者之潮位站位置與水深存在差異，港灣內之潮位站通常水深較淺。因此在計算風暴潮之淺水波方程式在遭遇港內水深較淺之海底地形時容易有更強烈之非線性作用，而

7. 「6-3-3 海葵颱風案例」除了台中港外，其餘地點之「現行預報模式」預報結果，皆比「整合地形」還要優，與結論（第 248 頁）不符。	可能導致風暴潮水位出現高估。此外，根據模式計算風剪力產生暴潮偏差分量之相關公式，剪力係數C_d值會受到平面上 10 公尺風速值U_{10}影響而選定特定值（第 3-2-3 節），此部份亦有導致暴潮水位產生高估之可能。 7. 以非風暴潮事件之 6-2 節結果而言，整合地形之高解析度模式能體現出港灣遮蔽效應對於潮汐水位之影響，亦有比預報模式更佳之潮汐校驗結果。而受海葵颱風風暴潮事件(6-3 節)影響下，目前潮汐水位耦合風暴潮水位時確實存在高估，會針對委員之指正修改結論說明。
(五) 齊委員祿祥	
1. 內文部分所提之「系級」個數與提升解析度…，應為「系集」，請修正。 2. 第 7 頁中 Emanuel and Rotunno (2011) 參考資料未列於參考文獻，請加入。 3. 第 8 頁「…透過陷波理論 (trapped waves, Mei, 1983) 和共振盪潮的共振理論 (Dean 和 Dalrymple, 1984) …」，資料未列於參考文獻，請加入。 4. 第 8 頁「…詹等人 (2004a, 2006b) 則利用…」，及第 10 頁「…Flowerdew 等人 (2013) 採納了全球和區域系集預報系統…」，資料未列於參考文獻，請加入。 5. 第 18 頁「…導過颱風氣象力（氣壓梯度力及風剪力）之加入…」，「導過」是否為誤植文字？請修正。 6. 第 25 頁內文中之「…Smith 與 Banke (1975) …」、「… (Large 與 Pond, 1981; Powell, 2003) …」，資料未列於參考文獻，請加入。	1. 感謝委員指正，已更新報告書中之相關文字錯誤。 2. 感謝委員指正，理想風場之文獻已補充於報告書附件之參考文獻中。 3. 感謝委員指正，兩文獻已補充於報告書附件之參考文獻中。 4. 感謝委員指正，部分潮汐與系集模式之參考文獻缺漏已於更新之報告書中補正。 5. 感謝委員指正，此處應為「…”透過”颱風氣象力（氣壓梯度力及風剪力）之加入…」，已更新於報告書中。 6. 感謝委員指正，有關風剪力之相關文獻已補充於報告書附件之參考文獻中。

7. 第 30 頁「…根據氣象署海象測報中心所提…」請修正為海象氣候組。	7. 感謝委員指正，已更新單位名稱於報告書中。
8. 圖說 3-5 之圖號請加於內文適當位置。	8. 感謝委員建議，已於報告書中之第 3-5 節補正圖 3-5 之相關說明。
9. 報告中所引用參考資料，並未完整列於參考文獻中，請再次檢視內文，予以修正。	9. 感謝委員指正，已再次檢視報告書提及之參考資料並附錄於參考文獻中。
10. 第 41 頁研究利用歐洲氣象再分析場 ECMWF ERA5 近五年（2016-2020 年），中颱級別以上之二維風場資料，僅採用 5 年的原因為何？	10. 此部分採用美國國家海洋暨大氣總署（NOAA）對路徑誤差分析之時間週期做分析（以五年為單位分析誤差），為援引先前研究計畫成果。
11. 第 46 頁「…採用流體體積法（Volume of Fluid, VOF）…自由液面隨時間變化之位置，其圖片示例展示於錯誤！找不到參照來源。…」請修正。	11. 感謝委員指正，已更新報告書中相關圖片參照來源。
12. 第 47 頁「…體積分率 f_m 之概念可由錯誤！找不到參照來源。…」請修正。	12. 感謝委員指正，已更新報告書中相關圖片參照來源。
13. 第 55 頁圖 4-2 颱風警報預報颱風平均強度分類長條圖，請加註年份期間。	13. 感謝委員建議，已更新報告書中圖 4-2 之相關年份說明。
14. 第 63 頁圖 4-6 為暴潮系集預報之各系集成員預報水位校驗示意圖？示意圖還是實際觀測與模式輸出？	14. 為確認暴潮系集預報之設定及單一測站之預報水位及觀測水位比較情形，因而透過選定特定起始時間搭配 2016 年颱風莫蘭蒂之案例，完成「暴潮系集預報之各系集成員預報水位校驗示意圖」，其觀測資料來源為大武潮位站之實際資料，其餘理想風場模式則為預報模式之輸出結果。
15. 內文中使用之圖資有明確之日期，請加上時間，勿用示意圖說說明。	15. 感謝委員指正，相關包含明確日期之圖片已修正報告書中內文及其圖標說明。
16. 圖 6-18~圖 6-38，前重複插入圖 6-39~圖 6-41 請修正。	16. 感謝委員指正，已刪除報告書中誤植之圖片。
17. 有關暴潮溢淹模式，研究團隊已有執行效能的改進方法，為日後再提供作業單位之標準作業流程為何？另因未來模式將納入本署	17. 相關標準作業流程已列於計畫書中第 5-3 節及圖 5-6。針對本計畫之暴潮系集預報系統，使用之計算資源均為署內業務單位提供之特定單機版本機器，因此即使

HPC 執行，團隊是否有評估使用之計算資源？	在颱風來臨之高機器使用峰期，依然能保持預報系統之運作。
(六) 業務單位意見	
3-7 章節有幾處「錯誤!找不到參照表」，請修正。 - 第 156 頁，「4-4-2 海上」標題應為陸上，請修正。 - 第 215~216 頁，圖片應為重複植入，請移除。 - 第 218~245 頁，請補上校正後現行預報模式的結果，以供比較。	- 感謝業務單位同仁指正，已更新報告書中相關圖片參照來源。 - 感謝業務單位同仁指正，已更新報告書中第 4-4-2 節標題名稱錯誤。 - 感謝業務單位同仁指正，已刪除報告書中誤植之圖片。 - 現行預報模式之時差調整前後結果已列於「附錄 B、預報模式之時差特徵修正校驗結果」中，以供參考，並更新其他附錄名稱。

九、審查結果：

審查通過。

十、散會。(16時10分)

附錄 D、績效報告書

112 年度政府科技發展計畫
績效報告書
(D006)

計畫名稱：

中央氣象署暴潮預報溢淹模式精進

執行期間：

全程：自 110 年 03 月 31 日 至 112 年 12 月 29 日止

本期：自 112 年 03 月 21 日 至 112 年 12 月 29 日止

主管機關：交通部

執行單位：中央氣象署

中華民國 112 年 11 月 29 日

年度	階段性目標達成情形(每年度以 300 字為限)	重要成果摘要說明 (每年度以 600 字為限，過程性結果請免列)
1. 112	1. 收集過往 10 年侵台颱風資料，並透過第二代暴潮系集預報系統進行系集計算，量化分析適合臺灣之理想風場模式。更新暴潮預報系統中作業用理想風場模式選項為本次研究中擁有最佳表現者。 2. 進行二維與三維模式之港灣海堤遮蔽效應模擬分析，透過提升地形解析度之方式，進行港口尺度之模式模擬與模式校驗，以瞭解港灣遮蔽效應於模式結果之關聯性。 3. 暴潮預報系統預報效能提升評估，針對更新理想風場模式後之暴潮預報系統進行作業化測試、維護預報系統及評估更進一步提升預報效能之可行性。	1. 本研究將最佳路徑參數生成之理想風場分布與再分析風場互相比較，可以得到以下初步結論：在使用固定的水動力模式模擬颱風暴潮時，假設路徑預報及強度皆準確，可以預期颱風遠離台灣時（颱風中心距離台灣 100 公里以上），使用 E11 可以得到所有模式中最佳之暴潮模擬水位；颱風距離台灣 100 公里內時，則須依據颱風強度判斷。當近中心最大風速大於 33 公尺/秒，氣象署局理想風場模式可能表現較好；近中心最大風速小於 33 公尺/秒時，W06 可以得到較低之風速誤差。 2. 分析六個不同潮位站之結果後，發現各個潮位站之高解析度地形模擬結果與觀測資料之潮位間皆有一定之時間差，如台中港潮位站為 12 分鐘，將軍潮位站為 17 分鐘，龍洞潮位站為 22 分鐘，花蓮潮位站為 12 分鐘，成功潮位站為 6 分鐘，蘭嶼潮位站為 5 分鐘。各潮位站反應之潮時差顯示港灣遮蔽效應確實反映於各個區域之港口。若要提升各港口間之校驗資料準確度，則可針對各個港口之時間差特徵進行修正。 3. 透過結算，於 234 機器之多工 (Multi-task) Python 版本中，核心程式完成模擬所需的時間平均約為 35.4 分鐘。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需時平均約為 7.8 分鐘，合計平均一次預報約需 44.4 分鐘。效能提升方面，現有多工處理之預

		報系統版本於核心程式模擬所花時間較 234 機器 Matlab 版本減少 26 至 27 分鐘，效能提升 42.8%；後處理所需時間減少 22 至 23 分鐘，效能提升 74.6%，預報總時長為 44 至 45 分鐘，較先前版本減少 48 至 49 分鐘，效能提升超過 50%。
--	--	--

第一部分

壹、目標與架構

一、目標與效益

目標

未來氣候變遷所導致之全球暖化暨海平面上升之情境下，潛在強烈颱風生成機率將會提高，深受風暴潮威脅所苦之世界各國，更加重視風暴潮科學之相關研究，針對颱風暴潮預報技術之發展，更是不遺餘力。中央氣象署已主動建立一套功能完整、計算快速且精準之風暴潮溢淹預報速算系統，並為因應未來潛在強烈颱風強度變動、路徑和相關物理因子之不確定因素，成功發展暴潮系集預報作業系統及相關機率預報產品。針對現有已開發之暴潮預報系統，本計畫預計透過更新系統設備硬體及模式理論方法，包含調教理想風場模式、發展二代系集預報模式、執行潮位站所在位置對暴潮預報準確度影響等之分析與研究，以求更加提升現有預報系統之精準度與效率，為沿海區域之民眾提供詳細且精準之暴潮預報資訊，以期達到減災和防災之目的，降低生命財產損失。

效益

本計畫重點預期完成之工作項目及具體成果主要分為3大項，皆屬提升模式精準度之相關研究，重點工作項目包含：「暴潮溢淹預報模式精準度提升研究」、「暴潮系集預報模式精準度提升研究」、「港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析」等，使中央氣象署可透過本團隊開發之系集模式替臺灣預報沿海地區可能之風暴潮災害，減少沿海地區民眾之財產損失和保障其生命安全。本計畫將持續精進此一風暴潮速算系統，其效益如下所列：

1. 收集過往10年侵台颱風資料，並透過第二代暴潮系集預報系統進行系集計算，量化分析適合臺灣之理想風場模式。更新暴潮預報系統中作業用理想風場模式選項為本次研究中擁有最佳表現者。
2. 進行二維與三維模式之港灣海堤遮蔽效應模擬分析，透過提升地形解析度之方式，進行港口尺度之模式模擬與模式校驗，以瞭解港灣遮蔽效應於模式結果之關聯性。
3. 暴潮預報系統作業化測試及預報效能提升評估，針對更新理想風場模式後之暴潮預報系統進行作業化測試、維護預報系統及評估更進一步提升預報效能之可行性。

● 國際比較與分析

(如有計畫執行前後之國際比較，請列出，並以表格方式呈現為佳。)

比較項目或 計畫產出成果	計畫執行前	計畫執行後
收集過往 10 年侵台颱風資料，並透過第二代暴潮系集預報系統進行系集計算，量化分析適合臺灣之理想風場模式。	本研究預計發展與精進之風暴潮溢淹預報模式，透過收集近 10 年有登陸臺灣或造成影響的颱風之各項理想風場模式所需之必要參數，利用委託研究計劃成果所得之候選理想風場模式，進行台灣颱風案例之系集預報模擬，並調整適合台灣之理想風場參數，可以提升暴潮預報模式模擬之精準度，並有機會在針對性之作業化測試後提升其預報時效。	本研究中，在颱風警報分類與颱風強度分類下，各模式於預報測站中之表現的確不盡相同，但若以模式預報整體表現而論，通常以氣象署現有作業用理想風場模式表現為目前所有理想風場模式中最適合執行暴潮預報者，即使考量預報過程中其他之可能誤差來源，依舊可以與其他模式相比得到最接近觀測資料之預報水位。然而研究過程中亦發現某些理想風場模式在部分情況下亦有可能有較佳表現，因此本研究選擇將研究中所用之理想風場模式皆加入現有暴潮預報系統，以供未來彈性選擇理想風場模式之可能性。

貳、 主要內容

一、 執行內容

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究」計畫擬訂之重點類別分為三類，一為暴潮溢淹預報模式精準度提升研究，二為港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析，三為暴潮系集預報模式精準度提升研究。計畫執行內容如下：

1. 收集過往 10 年侵台颱風資料，並透過第二代暴潮系集預報系統進行系集計算，量化分析適合臺灣之理想風場模式。更新暴潮預報系統中作業用理想風場模式選項為本次研究中擁有最佳表現者。

本研究利用已開發完成之暴潮系集預報系統量化分析適合臺灣之理想風場模式，並將研究成果作為精進決定性預報系統的參考依據。研究過程中，為瞭解理想風場模式與颱風案例間之關係，首先收集過往颱風路徑與強度參數及歷史颱風預報資料，並利用委託研究計劃成果所得之候選理想風場模式，進行近 10 年侵台颱風案例之系集預報模擬，並將之與觀測資料比對得到統計分析，檢視各理想風場模式模擬水位與觀測資料間之差異，將表現最佳之理想風場模式加入現有決定性預報系統。

於收集氣象資料方面，本研究將最佳路徑參數生成之理想風場分布與再分析風場互相比較，可以得到以下初步結論：在使用固定的水動力模式模擬颱風暴潮時，假設路徑預報及強度皆準確，可以預期颱風遠離台灣時（颱風中心距離台灣 100 公里以上），使用 E11 可以得到所有模式中最佳之暴潮模擬水位；颱風距離台灣 100 公里內時，則須依據颱風強度判斷。當近中心最大風速大於 33 公尺/秒，氣象署局理想風場模式可能表現較好；近中心最大風速小於 33 公尺/秒時，W06 可以得到較低之風速誤差。

由於颱風之路徑及強度難以精準預測，預報誤差的產生為必然，因此研究中探討各理想風場模式之表現時，仍需要將預報過程中可能產生的誤差納入考量。為達到這項目標，本研究透過重新執行過去 10 年的預報作業，檢視暴潮預報系統在選用不

同理想風場模式時可能得到的水位預報結果，利用方均根誤差、偏差量及相關係數等統計參數，檢視各理想風場模式模擬水位與觀測資料間之差異。

於檢視模式預報誤差時，本研究更進一步將預報情境依據警報類型及預報期間颱風強度進行分類以檢視各理想風場模式是否會在不同情境下之預報表現有明顯差異。

在本研究中，可以看到在颱風警報分類與颱風強度分類下，各模式於預報測站中之表現的確不盡相同，但若以模式預報整體表現而論，通常以氣象署現有作業用理想風場模式表現為目前所有理想風場模式中最適合執行暴潮預報者，即使考量預報過程中其他之可能誤差來源，依舊可以與其他模式相比得到最接近觀測資料之預報水位。然而研究過程中亦發現某些理想風場模式在部分情況下亦有可能有較佳表現，因此本工作項目中選擇將研究中所用之理想風場模式皆加入現有暴潮預報系統，以供未來彈性選擇理想風場模式之可能性。

2. **進行二維與三維模式之港灣海堤遮蔽效應模擬分析，透過提升地形解析度之方式，進行港口尺度之模式模擬與模式校驗，以瞭解港灣遮蔽效應於模式結果之關聯性。**
為凸顯港灣海堤遮蔽效應之影響，因此在進行潮汐水位之模擬分析時，模式需採用細緻化之地形、設定之數值網格解析度需加密以建構完整港口細節(包含海堤、港池、碼頭等)，並搭配 TPXO 潮汐模式以獲取邊界潮位條件，以取得特定港口區域隨時間變化之潮汐水位模擬結果。最終，將結果與觀測資料進一步比對校驗，以瞭解港灣遮蔽效應於殘差值之影響，以及是否能成功降低模擬結果與實際觀測值間之差異，因而製作後續二維及三維模式產品。

本項目之二維模擬案例中，透過提升地形解析度之方式，期望將地形細緻化以建構完整港口細節(包含海堤、港池、碼頭等)，並藉由加密數值網格解析度，搭配 TPXO 潮汐模式以獲取邊界潮位條件，以取得特定港口區域隨時間變化之潮汐水位模擬結果，最終將其與觀測資料進一步比對校驗，以期降低潮汐效應之殘差值，此案例中

總計比對校驗六個港口內潮位站之潮位。在分析六個不同潮位站之潮位後，發現各個潮位站之整合地形二維模擬結果與觀測資料之潮位間皆有一定之時間差，台中港潮位站為 12 分鐘，將軍潮位站為 17 分鐘，龍洞潮位站為 22 分鐘，花蓮潮位站為 12 分鐘，成功潮位站為 6 分鐘，蘭嶼潮位站為 5 分鐘。各潮位站反應之潮時差顯示在純潮汐情境下，港灣遮蔽效應確實反映於各個區域、不分範圍大小之港口。因此，若要提升各港口間之校驗資料準確度，降低與觀測資料間之殘差，則可針對各個港口之時間差特徵進行修正（後稱之為時間校正）。此外，在與現行預報模式之二維模式結果比較後，採用整合地形之高解析度二維模式結果在各個測站之表現整體優於現行二維預報模式之結果，顯示提升解析度對校驗資料之幫助。

在本項目之三維模擬案例中，地形採用整合地形、港口地點選址於港灣結構完整穩固、港口水深較深、潮差大、台中港潮位站所在之台中港，該港口之特性能更容易分析港灣遮蔽效應之影響。綜觀地形剖面之壓力梯度與速度分量結果，除速度分量位於地形邊界時可能產生小範圍渦漩外，三維模式之模擬結果整體於港內及港外呈現均勻之壓力及速度分布情形，此現象顯示港灣海堤之遮蔽效應於三維模式當中並不明顯。

3. 暴潮預報系統作業化測試及預報效能提升評估，針對更新理想風場模式後之暴潮預報系統進行作業化測試、維護預報系統及評估更進一步提升預報效能之可行性。

本研究為求精簡暴潮預報作業所需時間，調整預報系統現有之串聯執行預報流程為並聯執行，並且在提升預報系統效能方面，python 版本預報系統在產品輸出效能上極具優勢。因此後續調整預報模式架構及相關測試皆以 Python 版本為主，主要測試機器則為 Matlab 版本預報系統所在機器，其中颱風警報單暴潮預報系統位於 234 機器，而 TWRF 二維氣象預報模式之暴潮預報系統位於 157 機器。

目前透過結算，於 234 機器之多工（Multi-task）Python 版本中，潮汐模式輸出潮汐

邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘，而核心程式完成模擬所需的時間平均約為 35.4 分鐘。由於純潮汐模擬及潮汐搭配氣象力的模擬需要同時進行，機器執行緒可分配給各次模擬的數量為原本的一半，因此在模式並聯執行情況下，核心程式計算所需時間增加是可預期的。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需時平均約為 7.8 分鐘，合計平均一次預報約需 44.4 分鐘。在效能提升方面，現有多工處理之預報系統版本於核心程式模擬所花時間較 234 機器 Matlab 版本減少 26 至 27 分鐘，效能提升 42.8%；後處理所需時間減少 22 至 23 分鐘，效能提升 74.6%，預報總時長為 44 至 45 分鐘，較先前版本減少 48 至 49 分鐘，效能提升超過 50%。

二、 遭遇困難與因應對策

(執行計畫過程中所遭遇困難、執行落後之因應措施及建議，如無遭遇困難或落後情形者，請填寫「無」即可。)

類別	說明	因應措施與建議
執行困難	無	
執行落後	無	

參、經費與人力執行情形

肆、已獲得之主要成果與重大突破(含量化 output) (E003)

屬性	績效指標類別	績效指標項目		108 年度		效益說明 (每項以 500 字為限)	重大突破
				原訂目標值	實際達成值		
學術成就 (科技基礎研究)	A.論文	期刊論文	國內(篇)	0		論文發表數量高達 10 篇，研究成果於國內外重要研討會受高度肯定。	
			國外(篇)		1		
		研討會論文	國內(篇)		5		
			國外(篇)		4		
		專書論文	國內(篇)				
			國外(篇)				
	B. 合作團隊 (計畫)養成	機構內跨領域合作團隊(計畫)數				效益說明可包含合作團隊(計畫)進一步形成研究中心、實驗室等情形。	
		跨機構合作團隊(計畫)數					
		跨國合作團隊(計畫)數					
		簽訂合作協議數					
		形成研究中心數					
		形成實驗室數					

112 年度計畫績效指標實際達成與原訂目標差異說明：與原訂目標無差異

第二部分

壹、 主要成就及成果之價值與貢獻度(outcome)

一、 學術成就(科技基礎研究)

國外期刊論文 1 篇

Lin, Chun-Wei, Tso-Ren Wu*, Yu-Lin Tsai, Shu-Chun Chuang, Chi-Hao Chu and Chuen-Teyr Terng, “Member Formation Methods Evaluation for a Storm Surge Ensemble Forecast System in Taiwan,” Water, <https://doi.org/10.3390/w15101826>, 15(10), 1826, May 2023. (SCI)

國內研討會論文 5 篇

第一作者：Satriana Roguna

論文名稱：An Approach to Forecast Typhoon’s Pressure and Wind Field Around Taiwan by Using Weighting Function Method

研討會名稱：2022 臺灣地球科學聯合學術研討會

第一作者：林君蔚

論文名稱：暴潮預報系統作業用理想風場模式之準確度評估

研討會名稱：112 年天氣分析與預報研討會

第一作者：范子軒

論文名稱：以 COMCOT-SS 與 Splash3D 分析港灣遮蔽效應於潮汐水位之影響

研討會名稱：112 年天氣分析與預報研討會

第一作者：林君蔚

論文名稱：卡努颱風與年度大潮對雲林沿海之影響

研討會名稱：第 45 屆海洋工程研討會

第一作者：Roguna, Satriana

論文名稱：An Approach to Realistic Parameterization (REP) Model of Pressure and Wind Fields of Typhoon Around Taiwan

研討會名稱：第 45 屆海洋工程研討會

國際研討會 4 篇

第一作者：Roguna, Satriana

論文名稱：A New Realistic Model of Generating Pressure and Wind Fields of Typhoon for Storm Surge Forecasting

研討會名稱：Japan Geoscience Union Meeting 2023

第一作者：Wu, Tso-Ren

論文名稱：A New Realistic Model of Generating Pressure and Wind Fields of Typhoon for Storm Surge Forecasting

研討會名稱：The 20th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2023)

第一作者：Wu, Tso-Ren

論文名稱：The Recent Development of the Official Storm Surge Forecast System in Taiwan

研討會名稱：The 20th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2023)

第一作者：Roguna, Satriana

論文名稱：An Approach to Realistic Parameterization (REP) Model of Pressure and Wind Fields of Typhoon Around Taiwan

研討會名稱：The 13th South China Sea Tsunami Workshop

.

二、 技術創新(科技技術創新)

為提升暴潮決定性預報系統的預報準確性，本團隊為中央氣象署所發展之暴潮系集預報模式，其基於中央氣象署現有採用之 COMCOT 暴潮模式為基礎，而 COMCOT 暴潮模式之前身為國際知名之海嘯模式 COMCOT (Cornell Mutli-grid Coupled Tsunami Model)，導過颱風氣象力（氣壓梯度力及風剪力）之加入，使模式具備以非線性之淺水波方程式計算並分析風暴潮生成、傳播以及近岸溯上之完整歷程。

本研究規劃在未來預報作業中，依據颱風的強度變化，選用更符合颱風當下結構之理想風場模式進行預報。以理想風場模式作為氣象輸入場執行颱風暴潮模擬時，必要之參數資訊有包含路徑、中心氣壓、最大風速、最大風速所在半徑等，上述資料皆可透過歷史颱風最佳路徑參數資料、二維再分析風場分布與過往之颱風警報單等取得。其中，颱風警報單為三種資料中唯一可在預報作業中取得之資料，而再分析風場及最佳路徑參數等則需等到當次颱風事件結束後，透過多方單位比對並校正重新整理及進一步跟實時收集的數據作比對及核實才能獲得。

為探討各理想風場模式描述颱風結構之相對準確性，可以利用颱風最佳路徑參數計算各理想風場模式對於指定時刻之風速結構分布情形，並將之與再分析風場為基準互相比較，即可看出各模式間之差異性。本研究所收集之資料區間為 2013 年至 2022 年間，選用之二維再分析風場資料為 ECMWF ERA5，最佳路徑參數來自中央氣象署颱風資料庫，以颱風資料庫內最大風速達熱帶風暴標準之資料點為主。

利用本次工作項目收集之資料，本研究將最佳路徑參數生成之理想風場分布與再分析風場互相比較，可以得到以下初步結論：在使用固定的水動力模式模擬颱風暴潮時，假設路徑預報及強度皆準確，可以預期颱風遠離台灣時（颱風中心距離台灣 100 公里以上），使用 E11 可以得到所有模式中最佳之暴潮模擬水位；颱風距離台灣 100 公里內時，則須依據颱風強度判斷。當近中心最大風速大於 33 公尺/秒，CWB 模式可能表現較好；近中心最大風速小於 33 公尺/秒時，W06 可能有較低誤差。

由於颱風之路徑及強度難以精準預測，預報誤差的產生為必然，因此研究中探討各理想風場模式之表現時，仍需要將預報過程中可能產生的誤差納入考量。為達到這項目標，本研究透過重新執行過去 10 年的預報作業，檢視暴潮預報系統在選用不同理想風場模式時可能得到的水位預報結果，並將之與觀測資料比對得到統計分析，以得到在預報當下可能有最佳表現的理想風場模式。

三、 經濟效益(經濟產業促進)

風暴潮預報之重要性在於即時掌握海水倒灌範圍、河川排洪規劃、及港灣風險控制。針對台灣之特殊性，如多颱風、多高山、範圍較小卻人口稠密、需要高解析度與高精確度暴潮預報需求等，中央氣象署於綜合比較多種國際間所使用之風暴潮數值模式後，決定自主研發適合於台灣之二維風暴潮預報系統 COMCOT-SS。該二維風暴潮預報模式以 COMCOT 海嘯模式為基礎，並導入風暴潮模擬所需之動力邊界而成。模式求解非線性球座標方程式，具有可局部加密解析度，可納入潮汐邊界條件，及計算局部海水溢淹，以及高準確度之特色。

眾所周知，任何模擬現狀之數值模式皆須經過反覆模式校驗，並針對該地區之特色，進行模式調校。風暴潮校驗主要方式為與將模擬結果與觀測資料進行比對，並從觀測數據中濾除天文潮並提取風暴潮之水位時序歷線進行比對。觀測資料之主要來源為中央氣象署設立於港灣內之 34 個潮位站。天文潮之濾除可透過扣除調和分析或 TPXO 之天文潮預測、低通濾波等。然而於校驗風暴潮水位時，常有部分潮位站之水位資料在扣除調和分析之模擬水位後，仍有週期性擺盪之殘差，且不論風暴潮現象有無發生，週期性擺盪於濾波後皆存在，此結果易導致無法精確辨識風暴潮水位。

因此，為了解潮位站觀測水位與調和分析殘差值之週期性擺盪，並提升分析颱風暴潮時可校驗資料之品質，並進一步量化探討潮位站之於港灣海堤遮蔽效應間之關聯性，本年度之重點工作項目採用二維風暴潮預報模式、與三維 Splash3D 模式進行數值模擬，藉由提升地形解析度與網格收斂分析，獲取數個現有不同潮位計在特定期間(颱風季、非颱風季)之潮汐水位校驗結果，以觀察港灣遮蔽效應對於潮汐水位模擬、潮汐水位預報，以至於風暴潮事件之影響，以期在將來遇上颱風等極端氣象事件時，能有效、快速且準確做出判斷，以期降低社會經濟損失。

本研究之二維模擬案例中，透過提升地形解析度之方式，期望將地形細緻化以建構完整港口細節（包含海堤、港池、碼頭等），並藉由加密數值網格解析度，搭配 TPXO 潮汐模式以獲取邊界潮位條件，以取得特定港口區域隨時間變化之潮汐水位模擬結果，最終將其與觀測資料進一步比對校驗，以期降低潮汐效應之殘差值，此案例中總計比對校驗六個港口內潮位站之潮位。在分析六個不同潮位站之潮位後，發現各個潮位站之整合地形二維模擬結果與觀測資料之潮位間皆有一定之時間差，顯示在純潮汐情境下，港灣遮蔽效應確實反映於各區域之港口。若要提升各港口間之校驗資料準確度，降低與觀測資料間之殘差，則可針對各個港口之時間差特徵進行修正。此外，在與現行預報模式之二維模式結果比較後，採用整合地形之高解析度二維模式結果在各個測站之表現整體優於現行二維預報模式之結果，顯示提升解析度對校驗資料之幫助。

四、 社會影響(社會福祉提升、環境保護安全)

中央氣象署現有之 COMCOT 暴潮預報系統，擁有兩種版本之系統軟體程式，其中一種以 Matlab 程式語言銜接 COMCOT 暴潮模式以及預報作業系統，另一種為 109 年度委託研究計畫「氣象署暴潮預報溢淹模式精進」計畫中，以 Python 程式語言重新撰寫之暴潮預報系統。由於 Matlab 為商業軟體，於更新程式版本時需要高昂的授權費用，且可移植性較低，於轉移作業平台時通常需要額外安裝其他工具才能在其他作業平台順利執行。此外，由於使用該程式語言的社群多屬學術研究方面，通常無法在社群外得到廣泛的支援。故本團隊於 109 年度委託研究計畫「氣象署暴潮預報溢淹模式精進」計畫中，利用不須授權費用、轉移平台相對彈性且具有強大使用者社群的 Python 程式語言重新撰寫之暴潮預報系統，並以今年度的海葵颱風案例進行作業化效率分析，其成果如下表：

表 1：颱風警報單暴潮預報系統平均執行效能比較（單位：分鐘）

	潮汐邊界	PT	ST	後處理	總時長
234 Matlab	< 1	31.00	30.92	30.67	92.92
Intel-Cluster Python	< 1	31.91	32.18	8.64	73.09
效能差異	-	0.91	1.27	22.03	19.83
差異百分比	-	2.93%	4.09%	-71.84%	-21.34%

表 2：颱風警報單暴潮預報系統
結構調整前後所需執行時間（單位：分鐘）

理想風場	潮汐邊界	(Pure Tide)	(Storm Tide)	後處理	總時長
157 Matlab	< 1	31.00	30.92	30.67	92.92
Intel-Cluster Python	< 1	31.91	32.18	8.64	73.09
157 (Multi-task) Python	<1	35.4		7.8	44.4
效能差異	-	-26.52		-22.87	-48.52
差異百分比	-	42.8%		74.56%	52.2%

目前透過結算，於 234 機器之 Matlab 版本中，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘。COMCOT 暴潮模式執行純潮汐模擬及加入颱風氣象力參數一併進行運算時分別平均約需 31 分鐘，合計約為 62 分鐘。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需時平均約為 31 分鐘，合計平均一次預報約需 93 分鐘。叢集電腦之 Python 版本中，氣象輸入場之格式轉換平均約需 24 分鐘，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘。COMCOT 暴潮模式執行純潮汐模擬及加入颱風氣象力參數一併進行運算時分別平均約需 32 分鐘，合計約為 64 分鐘。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等平均需時 9 分鐘，合計完成一次預報平均約需 73 分鐘。於預報總時長之表現方面，叢集電腦 Python 版本執行時間於單次預報總時長平均少約 19.83 分鐘，執行效能高於 234 機器之 Matlab 版本約 21.34%。

於 157 機器之多工 (Multi-task) Python 版本中，氣象輸入場之格式轉換平均約 17 分鐘，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘，而核心程式完成模擬所需的時間平均約為 37.8 分鐘。由於純潮汐模擬及潮汐搭配氣象力的模擬需要同時進行，機器執行緒可分配給各次模擬的數量為原本的一半，因此在模式並聯執行情況下，核心程式計算所需時間增加是可預期的。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需時平均約為 8.0 分鐘，合計平均一次預報約需 62.8 分鐘。在效能提升方面，現有多工處理之預報系統版本於氣象輸入場之格式轉換較 157 機器 Python 版本增加 3 至 4 分鐘，效能下降約 27%；核心程式模擬所花時間減少 17 至 18 分鐘，效能提升 32.9%；後處理所需時間減少 30 至 31 分鐘，效能提升約 79%，預報總時長為 62 至 63 分鐘，較先前版本減少 42 至 43 分鐘，效能提升超過 40%。

由於預報系統核心程式 COMCOT-SURGE 在各預報系統版本中並未更動，故該核心程式執行所需時間部分應只受作業版本所處之系統及硬體效能的不同而反映出些微差異。在同一機器中，Python 版本與 Matlab 版本相比，在氣象場之格式轉換所需時間是增加的，顯示在程式語言中 Python 讀取/輸出的效能略低於 Matlab 版本，若以維持核心程式不更動，則後續建議應精進 Python 版本轉換氣象場資料的模組架構以精省整體預報時間。在核心程式執行部分，由於同一時間可用執行緒數量減半，因此單次執行核心程式所花時間較原先版本略為增加，但整體計算效能仍可提升 30% 以上。產品輸出部分，則會依據預報系統使用之程式語言在時效上有極大的差異，不同版本間的效能差異高達 70% 至 80%，顯示 python 版本預報系統在產品輸出效能上極具優勢，後續預報系統維護若為顧及預報效能，建議可以 Python 版本為主。提升運算效率後，藉由模式高效產出之準確度之預報結果，安撫民眾對於風暴潮可能造成災害之不安定，對於民生社會安定發展之目標有相當之助益。

五、 其他效益(科技政策管理、人才培育、法規制度、國際合作、推動輔導等)

本計畫培養兩名碩士生及兩名博士生，積極參與國內研討會發表風暴潮相關研究成果，共計 10 篇，表現優良。疫情期間亦成功發表風暴潮數值模式之論文於國際研討會，成果倍受肯定。

貳、 檢討與展望

(請檢討計畫執行可改善事項或後續可精進處，並說明後續工作構想重點與未來展望等；)

在現有之風暴潮預報中，其氣象場輸入資料主要來自颱風警報單，透過颱風警報單所提供之颱風強度與路徑，透過 HOLLAND 或本署參數化風場模型，建立颱風壓力場與風速場後，再輸入風暴潮模式進行速算而得。其中 HOLLAND 模型為學界廣為使用，而本署參數化模型則是以 HOLLAND 模型為基礎，針對台灣過去資料擬合而成。此類模型都有一共通點，即為不考慮地形對颱風所造成之影響。

然而，眾所周知，台灣有超過 3500 公尺之「護國神山」中央山脈阻攔，因此真實之颱風氣象場在與中央山脈接觸後，即會對整個颱風氣壓場及風速場造成重大影響，不僅颱風結構改變，氣壓與風速之分布亦與 HOLLAND 或本署參數化風場模型產生差異。此現象在中央山脈西側更是明顯，也因此造成風暴潮之預報在台灣西部沿海容易產生較大誤差。

為提升風暴潮預報之準確度，如何改良現有參數化風場之準確度是關鍵。過去學界於參數化風場準確度之提升，主要著重於係數校正與不對稱型態之描述，而非針對地形進行精進，因此對於經過中央山脈之颱風準確度提升甚為有限。本研究創新開發 Realistic 與 AI 參數化風場，以突破過往參數化風場無法反映地形因子之困境，並大幅提升參數化風場與風暴潮之準確度。本研究透過統計之 Realistic 及 AI 機器學習進行氣壓場與風速場之分析，以產生受中央山脈影響、接近真實之颱風氣象場，並取代現有之 HOLLAND 與本署參數化風場，提升風暴潮之準確度。

未來全球暖化暨潛在強烈颱風生成機率提高之情境下，世界各國更加重視風暴潮科學之研究，本署除主動建立一套功能較為完整、計算較為快速且精準之風暴潮溢淹預報速算系統外，希望使風暴潮預報系統與時俱進，預計以近年逐漸成熟之 Realistic 與 AI 資料分析技術，提升風暴潮預報系統之精準度與效率，加強保障臺灣地區沿海地區居民生命財產安全。

附表、佐證資料表

【A 論文表】

題 名	第一作者	發表年(西元年)	文獻類別
Member Formation Methods Evaluation for a Storm Surge Ensemble Forecast System in Taiwan	Lin, Chun-Wei	2023	D
A New Realistic Model of Generating Pressure and Wind Fields of Typhoon for Storm Surge Forecasting	Roguna, Satriana	2023	F
A New Realistic Model of Generating Pressure and Wind Fields of Typhoon for Storm Surge Forecasting	Wu, Tso-Ren	2023	F
The Recent Development of the Official Storm Surge Forecast System in Taiwan	Wu, Tso-Ren	2023	F
暴潮預報系統作業用理想風場模式之準確度評估	林君蔚	2023	E
以 COMCOT-SS 與 Splash3D 分析港灣遮蔽效應於潮汐水位之影響	范子軒	2023	E
卡努颱風與年度大潮對雲林沿海之影響	林君蔚	2023	E
An Approach to Realistic Parameterization (REP) Model of Pressure and Wind Fields of Typhoon Around Taiwan	Roguna, Satriana	2023	E
An Approach to Realistic Parameterization (REP) Model of Pressure and Wind Fields of Typhoon Around Taiwan	Wu, Tso-Ren	2023	F

註：文獻類別分成 A 國內一般期刊、B 國內重要期刊、C 國外一般期刊、D 國外重要期刊、E 國內研討會、F 國際研討會、G 國內專書論文、H 國際專書論文