

交通部中央氣象署

委託研究計畫(期末)成果報告

以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度 (1/3)  
Research on improving the accuracy of  
storm surge models using Realistic statistical analysis and  
machine learning (1/3)

計畫類別：氣象    海象    地震

計畫編號：MOTC-CWA-113-O-03

執行期間：113 年 05 月 02 日至 113 年 12 月 31 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 113 年 12 月 25 日



## 政府研究計畫（期末）報告摘要資料表

計畫中文名稱	以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度 (1/3)		
計畫編號	MOTC-CWA-113-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	113	執行期間	113.05.02 至 113.12.31
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100%	100%	0 %
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	吳祚任		林君蔚
			莊美惠
			李薇
			曾歆倚
		張明南	
報告頁數	226 頁	使用語言	中文
中英文 關鍵詞	COMCOT 風暴潮溢淹預報模式、颱風數值預報系統、現實參數化模型；COMCOT Storm Surge and Inundation Forecasting System, Typhoon WRF (TWRF), ( Realistic Parameterization Model, REP Model)		
研究目的	<p>本計畫針對現有之暴潮預報系統加以精進，台灣有超過 3500 公尺之中央山脈阻攔，因此真實之颱風氣象場在與中央山脈接觸後，其整體氣壓場與風速場即會產生重大變化，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。因此本計畫將開發 Realistic 統計分析，收集歷史二維大氣模式資料及相關颱風參數建立模擬暴潮資料庫，以 Realistic 統計分析得出適宜之權重以合成報潮水位分布，突破過往參數化風場無法反映地形因子之困境，並取代現有之 HOLLAND 與本署參數化風場，提升風暴潮之準確度。</p>		
研究成果	<p>1. 建立颱風資料庫並分析颱風特性：</p> <p>研究團隊成功收集並分析近 40 年的颱風資料，包括 ECMWF ERA5 再分析資料、颱風資料庫最佳路徑資料，TWRF (Typhoon WRF) 模式重新模擬了 1990-2021 年間有發布警報的颱風案例。研究中整理展示影響台灣的颱風路徑和強度特徵。分析結果顯示，颱風主要從西北太平洋向西北方向移</p>		

	<p>動，在台灣東南部海域路徑較為密集。大多數颱風的近中心最大風速在 20 至 50 公尺/秒之間，中心氣壓在 980 至 1000 百帕之間，七級風半徑在 100 至 300 公里之間。TWRP 模型還顯示七級風半徑的特殊分佈特徵，以及颱風強度與七級風半徑之間的負相關關係。</p> <p>2. 多源資料比較分析：</p> <p>研究團隊比較了 ECMWF ERA5、颱風資料庫和 TWRP 模式三種資料來源的特點和優缺點。比較結果顯示，ECMWF ERA5 具有最大的覆蓋範圍，TWRP 模式資料具有最高的資料密度，而在颱風強度參數方面，TWRP 模式資料與颱風資料庫最為接近。</p> <p>3. 暴潮預報系統時效精進：</p> <p>研究團隊成功將原作業於叢集電腦平台的 Python 版本暴潮預報系統轉移至新伺服器。轉移後的預報系統可以在 40 分鐘內完成 72 小時預報並完成上傳資料，且系統效能較前版本提升 44.3%。</p> <p>4. 潮汐-暴潮非線性效應分析：</p> <p>研究團隊分析了近 40 年颱風事件中潮汐與氣象場對水位的影響，並發現潮汐與暴潮交互作用的非線性強度與潮差大小並非呈現簡單的正相關關係。非線性效應在淺水區域（如離島地區）或複雜地形區域表現得更為顯著，顯示這兩點可能為決定當地非線性效應強度的關鍵因素。若忽略非線性交互作用，暴潮預報可能產生至少 15% 的系統性誤差，歷史事件中大多數測站的非線性效應在正負 50% 之間波動。</p>
<p>建議事項</p>	<p>無</p>
<p>具體落實應用情形</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 建立颱風資料庫並分析颱風特性：利用 40 年颱風資料分析結果，優化台灣地區的颱風預警系統，特別是針對東部地區可能面臨的強烈颱風威脅。根據颱風路徑和強度的統計特徵，為不同地區（如台灣東部、西部）制定更有針對性的防災預案。</li> <li>2. 多源資料比較分析：根據比較結果，為不同預報需求選擇最合適的資料來源。例如，在需要大範圍覆蓋時使用 ECMWF ERA5，需要高密度資料時選用 TWRP 模式資料。利用多源資料比較結果，識別現有模型的優缺點，為進一步改進數值模式提供方向。</li> </ol>

	<p>3. 暴潮預報系統精進：將原叢集電腦平台的預報系統成功移植至新伺服器，使預報時效從原本 62.8 分鐘縮短至 35 分鐘，新系統效能提升 44.3%，可直接應用於作業預報，提高預報效率。</p> <p>4. 潮汐—暴潮非線性效應分析：根據研究成果，可以為 REP 資料庫建立預報水位修正模組，自動根據不同地區的非線性效應特性調整預報結果，或依據非線性效應強度分布特徵，針對離島地區設置更保守的預警門檻，因其具有較強的非線性效應。未來針對預報產品可以增加非線性效應的不確定性範圍說明，並為預報員提供各區域可能的系統性誤差參考值，提升暴潮預報的準確度，並強化防災與減災工作的效能。</p>
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



交通部中央氣象署  
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署委託執行研究計畫「以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)」(計畫編號 MOTC-CWA-113-O-03，採購案號：113067A)，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。

此致

交通部中央氣象署

計畫主持人：吳祚任 (簽章)

中華民國 113 年 11 月 28 日



# 目錄

目錄	I
圖目錄	V
表目錄	XI
<b>第 1 章、緒論</b>	<b>1</b>
1-1 計畫中英文摘要	1
1-2 計畫背景與目的	2
1-3 文獻回顧	4
1-3-1 颱風結構與地形效應對颱風暴潮預報技術的影響	4
1-3-2 颱風暴潮與潮汐間之非線性交互作用	9
<b>第 2 章、計畫重點工作項目及規劃</b>	<b>11</b>
2-1 計畫重點工作項目	11
2-2 預計獲得成果	13
2-3 交付項目及驗收標準	15
2-4 預定進度甘梯圖	19
<b>第 3 章、颱風暴潮預報系統發展與研究</b>	<b>23</b>
3-1 颱風暴潮預報模式	23
3-1-1 線性淺水波方程式	25
3-1-2 非線性淺水波方程式	26

<b>3-2 颱風大氣模式</b>	<b>28</b>
3-2-1 HOLLAND MODEL 理想風場模式	28
3-2-2 CWB MODEL 理想風場模式	29
3-2-3 風剪力和風阻力係數	30
<b>3-3 地形與網格設置</b>	<b>31</b>
<b>3-4 暴潮模式指定預報潮位站</b>	<b>35</b>
<b>3-5 TPXO 天文潮模式結合</b>	<b>37</b>
<b>3-6 現實參數化模型</b>	<b>38</b>
<b>第 4 章、 颱風案例資料收集與統計分析</b>	<b>43</b>
4-1 颱風資料庫最佳參數資料收集	43
4-2 取得 ECMWF-ERA5 之重點颱風參數	55
4-3 取得 TWRF 二維大氣風場之重點颱風參數	67
4-4 視覺化最佳路徑參數與 TWRF 參數差異	94
4-5 小結	117
<b>第 5 章、 暴潮預報系統預報時效精進</b>	<b>119</b>
<b>第 6 章、 颱風暴潮與潮汐之非線性效應分析</b>	<b>129</b>
6-1 分析方法與資料	130
6-2 依路徑分類之非線性效應分析	132
6-3 小結	152
<b>第 7 章、 結論</b>	<b>177</b>
<b>參考文獻</b>	<b>181</b>

會議記錄 185

---

維護記錄表 197

---

績效報告 209

---



## 圖目錄

圖 1—1、Hsiao et al. (2015)認為颱風環流引起的地形抬升和中央山脈造成的地形阻擋在確定與風暴相關的降雨量方面影響重大。.....	7
圖 1—2、Sheng 等人(2016)針對颱風案例展示之三種風場模式於同一時間之風場分布。由左至右依序來自 Xie et al. (2006)、Holland (1980)及 TWRP.....	8
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。.....	32
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。.....	32
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。.....	33
圖 3—4、34 處指定預報潮位站分布。.....	35
圖 3—5、全球潮汐模式 TPXO 模式示意圖（TPXO 官網）。.....	37
圖 3—6、REP 模型發展流程圖。.....	42
圖 4—1、1980 年代以來侵襲台灣之颱風個數及颱風警報單發布數量。黑色圓圈表示侵襲台灣之颱風個數，長條圖表示颱風警報單發布數量，其中藍色為海警，紅色為陸警。.....	50
圖 4—2、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風路徑分布圖。.....	51
圖 4—3、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風強度分布圖。.....	51
圖 4—4、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風中心資料密度分布圖。.....	52
圖 4—5、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風中心平均近中心最大風速分布圖。.....	52
圖 4—6、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風平均中心氣壓分布圖。.....	53
圖 4—7、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風平均七級風半徑分布圖。.....	53
圖 4—8、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風參數資料密度分布圖。（上）近中心最大風速、（中）颱風中心氣壓、（下）七級風半徑。.....	54
圖 4—9、ECMWF ERA5 全球（上）海表面氣壓與（下）10 米風速資料。.....	62
圖 4—10、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風路徑分布圖。.....	63
圖 4—11、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風強度分布圖。.....	63

圖 4—12、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風中心資料密度分布圖。	64
圖 4—13、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風中心平均近中心最大風速分布圖。	64
圖 4—14、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風平均中心氣壓分布圖。	65
圖 4—15、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風平均七級風半徑分布圖。	65
圖 4—16、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫之颱風參數資料密度分布圖。(上) 近中心最大風速 (中) 颱風中心氣壓 (下) 七級風半徑。	66
圖 4—17、自 TWRP 模式 Re-run 分析場資料擷取之模式內颱風路徑分布圖。	86
圖 4—18、自 TWRP 模式 Re-run 分析場資料擷取之模式內颱風強度分布圖。	86
圖 4—19、自 TWRP 模式 Re-run 分析場資料擷取之颱風中心資料密度分布圖。	87
圖 4—20、自 TWRP 模式 Re-run 分析場擷取之平均近中心最大風速分布圖。	87
圖 4—21、自 TWRP 模式 Re-run 分析場資料擷取之平均中心氣壓分布圖。	88
圖 4—22、自 TWRP 模式 Re-run 分析場擷取之颱風平均七級風半徑分布圖。	88
圖 4—23、TWRP 初始場之颱風參數資料密度分布圖。(上) 近中心最大風速、(中) 颱風中心氣壓、(下) 七級風半徑。	89
圖 4—24、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風預報路徑分布圖。	90
圖 4—25、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風強度分布圖。	90
圖 4—26、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風中心資料密度分布圖。	91
圖 4—27、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之平均近中心最大風速分布圖。	91
圖 4—28、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風平均中心氣壓分布圖。	92
圖 4—29、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風平均七級風半徑分布圖。	92
圖 4—30、TWRP 分析場及預報場之颱風參數資料密度分布圖。(上) 近中心最大風速、(中) 颱風中心氣壓、(下) 七級風半徑。	93
圖 4—31、不同資料來源所擷取之颱風路徑比對情形。	105
圖 4—32、不同資料來源所擷取之颱風強度分類分布比對情形。	106
圖 4—33、不同資料來源所擷取之平均近中心最大風速分布情形。	107

圖 4—34、自二維資料擷取之近中心最大風速與颱風資料庫之機率密度分布圖 比對結果。(上) ERA5 (中) TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場及預報場。 .....	108
圖 4—35、自各資料庫所擷取之相同颱風記錄點之近中心最大風速機率密度分 布圖比對結果。(上) 颱風資料庫與 ERA5 (中) 颱風資料庫與 TWRP 初始 場 (下) TWRP 初始場與 ERA5 之比對結果。.....	109
圖 4—36、不同資料來源所擷取之中心氣壓分布比對情形。.....	110
圖 4—37、自二維資料擷取之中心氣壓與颱風資料庫之機率密度分布圖比對結 果。(上) ERA5 (中) TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場及預報場。.....	111
圖 4—38、自各資料庫所擷取之相同颱風記錄點之中心氣壓機率密度分布圖比 對結果。(上) 颱風資料庫與 ERA5 (中) 颱風資料庫與 TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場與 ERA5 之比對結果。.....	112
圖 4—39、不同資料來源所擷取之七級風半徑分布比對情形。.....	113
圖 4—40、自二維資料擷取之七級風半徑與颱風資料庫之機率密度分布圖比對 結果。(上) ERA5 (中) TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場及預報場。.....	114
圖 4—41、自各資料庫所擷取之相同颱風記錄點之七級風半徑機率密度分布圖 比對結果。(上) 颱風資料庫與 ERA5 (中) 颱風資料庫與 TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場與 ERA5 之比對結果。.....	115
圖 4—42、不同資料來源之有效資料密度分布比對情形。.....	116
圖 5—1、(a) TWRP V1 版本中三層巢狀網格的計算域。.....	123
圖 5—2、COMCOT-TWRP 暴潮預報系統作業流程圖.....	124
圖 5—3、暴潮預報系統紀錄檔內執行核心程式步驟截圖 (1).....	124
圖 5—4、暴潮預報系統紀錄檔內執行核心程式步驟截圖 (2).....	125
圖 5—5、157 伺服器之 CPU 硬體規格截圖.....	126
圖 5—6、182 伺服器之 CPU 硬體規格截圖.....	126
圖 5—7、COMCOT-TWRP 暴潮預報系統作業紀錄截圖.....	127
圖 6—1、颱風事件路徑分類示意圖.....	157
圖 6—2、颱風事件路徑分類統計圖.....	157
圖 6—3、颱風事件路徑分類分布圖.....	158
圖 6—4、第一類路徑 (上) 非線性效應百分比與 (下) 各測站潮差分布。...	159
圖 6—5、第一類路徑 (左) 非線性效應百分比與 (右) 潮差二維分布情形。 .....	159

圖 6—6、第二類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。...	160
圖 6—7、第二類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。 .....	160
圖 6—8、第三類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。...	161
圖 6—9、第三類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。 .....	161
圖 6—10、第四類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。...	162
圖 6—11、第四類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。 .....	162
圖 6—12、第五類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。...	163
圖 6—13、第五類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。 .....	163
圖 6—14、第六類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。...	164
圖 6—15、第六類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。 .....	164
圖 6—16、第七類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。...	165
圖 6—17、第七類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。 .....	165
圖 6—18、第八類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。...	166
圖 6—19、第八類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。 .....	166
圖 6—20、第九類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。...	167
圖 6—21、第九類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。 .....	167
圖 6—22、其他特殊路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。 .....	168
圖 6—23、其他特殊路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。 .....	168
圖 6—24、所有颱風（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。.....	169
圖 6—25、所有颱風（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。...	169
圖 6—26、各分類颱風期間潮汐/暴潮作用之非線性效應強度（最大值）.....	170
圖 6—27、各分類颱風期間潮汐/暴潮作用之非線性效應強度（平均值）.....	171
圖 6—28、各分類颱風期間潮汐/暴潮作用之非線性效應強度（最小值）.....	172

圖 6—29、依路徑分類颱風事件期間潮差分布圖（最大值） .....	173
圖 6—30、依路徑分類颱風事件期間潮差分布圖（平均值） .....	174
圖 6—31、依路徑分類颱風事件期間潮差分布圖（最小值） .....	175



# 表目錄

表 2—1、研究計畫原預定交付項目及相關驗收標準.....	15
表 2—2、研究計畫修正後預定交付項目及相關驗收標準.....	17
表 2—3、計畫原定進度甘梯圖.....	19
表 2—4、五月工作會議後調整之進度甘梯圖.....	20
表 2—5、八月工作會議後調整之進度甘梯圖.....	21
表 3—1、現行中央氣象署採用之 COMCOT 暴潮溢淹預報模式 計算域網格範圍與解析度.....	34
表 3—2、34 處指定預報潮位站資訊。.....	36
表 4—1、TWRP (NCEPFV3) 模擬 2019 至 2023 年有發布警報颱風個案之模擬期間及總模擬組數。(初始時間格式為 yymmddhh，時間為 UTC).....	80
表 4—2、TWRP (NCEPGFS) 模擬 2009 至 2018 年有發布警報颱風個案之模擬期間及總模擬組數。(初始時間格式為 yymmddhh，時間為 UTC).....	80
表 4—3、TWRP (ECMWF ERA5) 模擬 1990 至 2009 年有發布警報颱風個案之模擬期間及總模擬組數。紅字為合作團隊已完成分析且可提供之個案。.....	82
表 5—1、各版本預報系統時效比較表 (單位：分鐘).....	125
表 6—1、研究採用之颱風事件模擬資訊列表 (2017—2023).....	154
表 6—2、研究採用之颱風事件模擬資訊列表 (2011—2016).....	155
表 6—3、研究採用之颱風事件模擬資訊列表 (1990—2010).....	156



# 第1章、緒論

## 1-1 計畫中英文摘要

本計畫針對現有之暴潮預報系統加以精進，台灣有超過 3500 公尺之中央山脈阻攔，因此真實之颱風氣象場在與中央山脈接觸後，其整體氣壓場與風速場即會產生重大變化，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。因此本計畫將開發 Realistic 統計分析，收集歷史二維大氣模式資料及相關颱風參數建立模擬暴潮資料庫，以 Realistic 統計分析得出適宜之權重以合成報潮水位分布，突破過往參數化風場無法反映地形因子之困境，並取代現有之 HOLLAND 與本署參數化風場，提升風暴潮之準確度。

This project aims to improve the existing storm surge forecasting system. As a barrier, Taiwan has the Central Mountain Range, over 3,500 meters high. When a typhoon's meteorological field comes into contact with the Central Mountain Range, it significantly affects its pressure and wind fields. Not only does the typhoon's structure change, but the distribution of pressure and wind speed also differs from the Holland model or CWA's parameterized wind field model. This phenomenon is even more pronounced on the western side of the Central Mountain Range, which often leads to more significant errors in storm surge forecasts along Taiwan's western coast.

Therefore, this project will develop a Realistic Parameterization analysis. It will collect historical two-dimensional atmospheric model data and related typhoon parameters to establish a simulated storm surge database called the Realistic Parameterization model (REP model). Appropriate weights will be derived using the REP model to synthesize the storm surge level distribution. This approach aims to overcome the limitations of previous parameterized wind fields that could not reflect topographical factors. It will replace the existing Holland model and CWA's parameterized wind field models, thereby improving the accuracy of storm surge predictions.

## 1-2 計畫背景與目的

在全球暖化和海平面上升的背景下，潛在強烈颱風生成機率將會提高。深受風暴潮威脅的各國，更加重視風暴潮科學研究，並積極發展颱風暴潮預報技術。臺灣位處西北太平洋，為颱風生成頻率高且行經路徑密度稠密的區域。加上臺灣四面環海，因此更需重視潛在強烈颱風所造成之暴潮威脅。其中，暴潮溢淹範圍與沿海地區居民生命安全和財產息息相關，是暴潮預報系統所需提供的重要訊息之一。因此，建立一套功能完整、計算快速且精準的風暴潮預報系統，實刻不容緩。該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和沿海地區之潛在暴潮等資訊予民眾或相關權責單位。

本研究團隊為中央氣象署所發展之暴潮預報系統，採用國際知名之淺水波模式 COMCOT (Cornell Mutli-grid Coupled Tsunami Model) 為核心。該模式具有以下優勢：

1. 能夠模擬颱風氣象力（氣壓梯度力及風剪力）對風暴潮的影響，因此能夠完整地分析風暴潮的生成、傳播以及近岸溯上之完整歷程。
2. 能夠同時求解卡氏座標與球座標系統下之淺水波傳遞過程，因此能夠更準確地模擬風暴潮在不同地形下的傳播特性。
3. 利用巢狀網格局部加密重點計算域，因此能夠提高計算效率，並更準確地模擬局部地區的風暴潮。
4. 利用移動邊界法計算陸地溢淹，因此能夠更準確地描述風暴潮對陸地的影響。

儘管台灣領土面積較小，但颱風登陸台灣造成影響的嚴重程度主要仍取決於颱風路徑，而中央山脈在其中扮演相當關鍵的腳色(Brand & Blelloch, 1974; Lin et al., 2006; Wu & Kuo, 1999)。中央山脈為臺灣地形之主幹，其平均高度超過 2,000 公尺，最高峰玉山海拔更達 3,952 公尺。如此高聳的山脈對颱風路徑具有明顯的阻擋作用。當颱風接近臺灣時，中央山脈會迫使颱風改變路徑，從而影響颱風登陸臺灣的機率，或在颱風登陸台灣時，對颱風產生強大的地形摩擦作用，導致

颱風眼牆結構被破壞，颱風之風速和氣壓降強度減少。中央山脈也會影響颱風風場的分布，進而影響台灣沿岸地區風暴潮之傳播。即使颱風沒有登陸臺灣，臺灣沿岸地區的地形複雜，不同地區的風暴潮響應也不同。且颱風的風場和氣壓場具有非對稱性，其風速和風壓仍然會對臺灣沿岸地區產生影響。因此，在進行風暴潮預測時，需要綜合考慮颱風的強度、路徑、地形等因素，而準確的風速及壓力資料是進行這些計算的基礎。

本研究團隊為中央氣象署所發展之暴潮預報系統，目前可以分別透過導入理想風場模式或大氣動力模式結果進行暴潮預報模擬，其中理想風場模型為簡化的數學模型，計算方法相對簡單，效率也較高，因此在預報時效上可以達到每3小時更新一次預報結果。然而，理想風場在描述颱風結構時，通常僅適用於描述颱風風場的基本特徵及核心結構，其適用範圍與大氣動力模式相比較為有限，尤其在描述颱風結構如何受中央山脈影響時，理想風場模式通常沒有辦法提出精準的模擬結果，進而導致暴潮預報的誤差。

過去學界於理想風場準確度之提升，主要著重於理想風場中的關鍵係數校正、描述颱風結構的非對稱性以及考慮地形因素對颱風風場的影響，而與考慮地形因素的相關研究可再被細分為地形摩擦效應與山脈阻擋效應。其中，透過將地形摩擦效應參數化，可以協助調整理想風場模式中的風速值以更接近實際情況，但針對該影響因素的相關研究並未對颱風核心結構進行調整；於考量山脈阻擋效應的相關研究中，大部分研究傾向直接利用大氣動力模式及案例分析直接展現山脈阻擋效應對於颱風路徑或外圍環流降雨的影響，並未針對颱風結構改變的可能性額外提出理想風場模式。

本次研究計畫中的重點為如何在現有預報時效限制中持續精進理想風場模式描述颱風的準確性，進而提升風暴潮預報的準確度。研究中預計發展現實參數化暴潮預報模式，突破過往參數化風場模式無法反映地形因子之困境，在時效高於大氣動力模式的前提下使參數化風場更接近實際風場分布情形，提昇風暴潮預報之準確度，並為臺灣沿岸地區的防災減災工作提供重要的科學依據。

## 1-3 文獻回顧

### 1-3-1 颱風結構與地形效應對颱風暴潮預報技術的影響

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。平均而言，颱風侵台的頻率一年約為四到五次，其中七月至九月都是統計上最嚴重的颱風侵襲台灣的月份(Wu & Kuo, 1999)，而颱風所帶來之淹水、山崩、土石流等災害，往往造成民眾生命財產嚴重損失。

颱風主要會帶來的災害類型包含風災、大(豪)雨、淹水、土石流、山崩等，而沿海地區則會有風暴潮。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。

風暴潮在遠洋深水地區主要由海平面上之氣壓分布所驅動，而在淺水區則由於颱風登陸時的風應力造成局部地區海水堆升更進一步致災(Dean & Dalrymple, 1991)。颱風的前進路徑，以及其強度、結構，至於近岸時當地海岸線特徵和潮汐相位等因素都會對風暴潮在沿海地區之溢淹高度與持續時間造成影響(Soria et al., 2016)。

其中，地形特徵在暴風潮對沿岸地區之影響方面扮演相當重要的角色。颱風和地形之間複雜的相互作用一直是相關研究的重要領域，兩者相互作用產生的地表摩擦阻力可能會影響颱風的路徑、強度和結構形狀(Sun et al., 2021)。橫跨台灣南北的台灣中央山脈平均海拔高達 2500 公尺，在颱風逼近和登陸期間會對其路徑、外圍環流和中心強度造成顯著影響。(Wei et al., 2018; Wu & Kuo, 1999)。尤其在颱風穿越台灣時，中央山脈會改變其路徑，減弱其中心氣壓和風速，導致難以準確預測氣壓和風速(Wu et al., 2022)。

就環流結構而言，台灣獨特的地形對橫越島嶼的颱風會加劇其非對稱性，造成不均勻的風場分布(Brand & Blelloch, 1974; Chu et al., 1977; Jian & Wu, 2008) 研究了台灣附近颱風環流和中心氣流結構之間的關係，包括渦旋脫落和流場受地形

分隔的現象，發現上游駛流（upstream steering flow）使颱風在抵達台灣之前向北偏轉，在越過中央山脈後向南偏轉。

而為了研究和評估地形對颱風偏轉路徑和強度減弱的影響，台灣島嶼一直是許多研究的焦點(Yang et al., 2021)。納莉颱風（2001 年）、莫拉克颱風（2009 年）、凡那比颱風（2010 年）、蘇力颱風（2013 年）、瑪莉亞颱風（2018 年）等登陸台灣東岸的強颱都是被選用於探討島嶼地形影響的熱門案例(Fang et al., 2011; Sheng et al., 2016; Xie & Zhang, 2012; Yang et al., 2021; Yang et al., 2008; Yang et al., 2011)。

Wang (1980)的研究中分析了 1946-1975 年間接近台灣的颱風，展示中央山脈對颱風路徑的影響。他基於 Brand and Brelloch (1974) 的概念模型辨識出不同的颱風路徑。向西移動的颱風較容易遇到中央山脈北部，強度平均減弱超過 40%。依據 Wei et al. (2018)提出的統計分析，由於侵台颱風通常起源於西北太平洋並向西移動，因此首先會侵襲台灣東部。

如果颱風尚未遭山脈干擾，則其強度相對容易預測。但是，一旦颱風越過山區，由於中央山脈的遮蔽效應，將使得預測台灣西側的氣壓和風速變得非常具有挑戰性，進而影響到風暴潮預測的準確性。當颱風經過台灣上空時，甚至有機會在背風側（相反側）形成地形輻合線和次級低壓區(Chang, 1982; Meng et al., 1998)。

在強度方面，颱風通常會在穿越台灣島嶼後減弱，且從東側登陸的颱風強度損失約為從西側登陸颱風的三倍(HU et al., 2012; Wu, 2001)。這主要是由於中央山脈對颱風內核結構的破壞作用，以及陸地表面增加的阻力所致。

台灣地形的多樣性為風暴潮研究帶來了許多複雜性。由於台灣位於東海大陸棚和太平洋之間，其沿海水深差異很大。東海岸面向開放的太平洋，水深達數千公尺，而西海岸毗鄰台灣海峽，水深較淺，從數公尺到幾十公尺不等，如圖 1(Liu & Huang, 2019; Yu et al., 2017)。其次，面向太平洋的台灣東岸海域地理構造由岩石和礫石組成，海底坡度陡峭，每 10 公尺海底深度變化約 1 公尺。相較之下，

台灣海峽西側沿岸地形則由細沙組成，坡度相對平緩，每 200-500 公尺的水深變化約 1 公尺(Liu & Huang, 2019)。

Fang et al. (2011)的研究指出，地形特徵會影響颱風登陸的時間和位置。Lin et al. (2018)表示，與其他大陸棚區域的淺坡和半封閉盆地地區相比，台灣沿海的風暴潮通常較弱。這是因為台灣位於大陸棚邊緣，導致東部擁有陡峭的斜坡緊鄰深水區，而西部台灣海峽雖為平緩的斜坡，擁有的吹風距離(fetch)卻相對有限，因此風暴潮高度通常不超過 1 公尺。

儘管如此，由於台灣經常遭受颱風侵襲，風暴潮仍然是個重大問題。Liu and Huang (2020)的研究指出，由於台灣西南海岸地形低窪和沿海底部坡度平緩，導致風暴潮更容易深入內陸，對台灣西南海岸造成更大的溢淹風險。於台灣東北海岸地區，則因沿海地形坡度較陡，經常會出現波浪非常靠近海岸線破碎的情況。這種波浪活動與風暴潮結合，可能導致特別具有破壞性的事件。

Yang et al. (2021)為了檢視地形對風暴潮、風場和洋流的影響，使用了將地形高度降低 25%的模型進行模擬。該研究發現，島嶼的存在影響了台灣海峽中颱風造成的風場和風暴潮傳播，而較高的風暴潮高度和這種阻塞效應會隨著島嶼地形高度的降低而減弱；與此同時，較高的島嶼地形更有可能產生地形誘發的引導效應，從而改變颱風環流並進一步影響風暴潮模式：若東部地形降低，將會導致沿岸風力減弱，但由於管流效應和地形引導氣流的影響，反而使得西側的風力增強。在風暴潮情境分析方面，則發現在地形高度降低的情況下，颱風登陸東部時可能引發更高的暴潮高度，而西部的暴潮則會略有減弱。

中央山脈除了作為屏障，使颱風與其相遇時改變路徑並減弱強度外，也有可能透過其高聳的地形扭曲颱風的結構，引起風場及氣壓分布的不對稱情況。這種由地形持續引起之不對稱現象可被稱作「地形鎖定(topography locking)」，表示颱風結構會受到地理特徵的影響，產生一致且可預測的改變。這種鎖定機制可能會導致經過該地區的颱風經歷可預測的不對稱變形模式，從而造成其強度減弱。

Hsiao et al. (2015)發現了一種被其稱作「階段性鎖定效應(phase-locked effect)」

的現象，該現象常發生在颱風穿越中央山脈期間。由於降雨量與颱風位置之間存在強烈相關性，因此颱風降雨模式和地形之間似乎存在階段性鎖定效應。舉例來說，Wu (2001)發現中央山脈顯著影響了1996年賀伯颱風侵台期間的降雨分布。Lin et al. (2002)則在研究中表明，2000年颱風碧利斯 (Bilis) 侵台期間，於高海拔地區的降雨主要是受地形抬升影響，而非颱風雨帶所導致。此外，由於地形鎖定現象，颱風對於其相對於中央山脈的位置特別敏感，這些研究都顯示了地形抬升與中央山脈的屏障效應，皆會對颱風環流及其降雨之強度、範圍分布等方面有顯著影響。

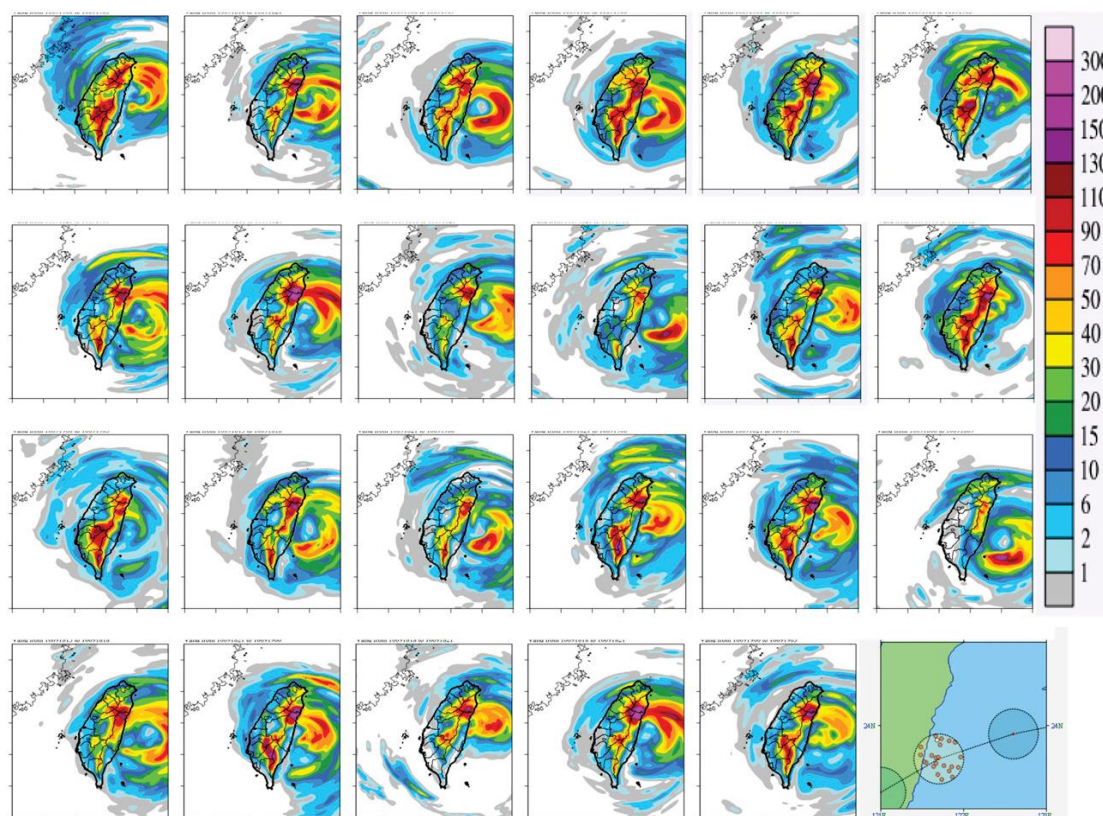


圖 1—1、Hsiao et al. (2015)認為颱風環流引起地形抬升和中央山脈造成的地形阻擋在確定與風暴相關的降雨量方面影響重大。

圖 1—1 展示系集颱風定量降水預報系統 (Ensemble Typhoon Quantitative Precipitation Forecast, ETQPF) 依據颱風預報位置自資料庫內篩選出之二維降雨量分布資料。圖中可以看到颱風在臺灣所造成的降水量與颱風中心和臺灣兩者之間的相對位置有著密切關係。

風暴潮模擬的精確度通常仰賴於大氣驅動力如何精確地被描述，通常由大氣

模式或參數化風場模式得到的風場和氣壓場提供。其中，參數化風場模式，也被稱為理想風場模式，通常使用中心氣壓、最大風速和最大風速半徑等參數來建構圍繞風暴中心的理想化風場分佈。理想風場模型計算效率高，可以輕鬆併入風暴潮模型，適合即時預報和系集模擬，但其通常假設對稱風場結構，可能無法準確捕捉真實熱帶氣旋中存在的非對稱性和小尺度特徵，並且對模式中使用的參數（如中心氣壓、最大風速等）相對敏感。此外，使用理想化的參數風場模型來模擬颱風的運動並不能充分代表真實的風場結構和與地形的交互作用。

Sheng et al. (2016)的研究中使用了三種不同的風模型來模擬颱風暴潮溢淹情況，由左至右分別來自 Xie et al. (2006)、Holland (1980)和中央氣象署提供的 TWRP 模型。從 TWRP 模式的風廓線來看，颱風明顯受到中央山脈影響，並在模式中展現颱風結構和中心被破壞之情形。

一般來說，大氣動力模型被認為在風暴潮模擬中更加精確，因為它們可以更真實地表述風場，並捕捉熱帶氣旋的複雜動力學過程。因此，當颱風的結構受到台灣地形的干擾時，使用真實風場的輸入可能會比使用理想風場的輸入得到更好的暴潮預報結果。

針對上述台灣地形與颱風相互作用的深入討論，本研究預計發展涵蓋地形鎖定效應的準確參數化方案來改良現有之理想風場模式暴潮預報。如果能夠在預報中準確捕捉"地形鎖定"效應所導致颱風結構的不對稱變形，並將其納入暴潮模式，將有助於提高暴潮預報模式的精確度。

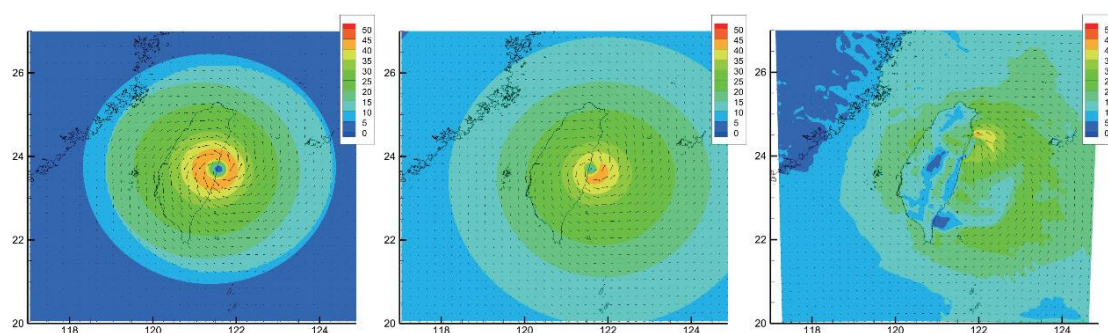


圖 1—2、Sheng 等人(2016)針對颱風案例展示之三種風場模式於同一時間之風場分佈。由左至右依序來自 Xie et al. (2006)、Holland (1980)及 TWRP

### 1-3-2 颱風暴潮與潮汐間之非線性交互作用

幾乎全球的海岸地區皆頻繁的遭受風暴潮災害侵襲，造成大範圍的溢淹並影響沿岸地區人民的生命財產安全，因此透過相關研究以了解暴潮災害，並規劃海岸保護措施是刻不容緩的議題。在進行暴潮預報時，潮汐與風暴潮之間的相互作用是準確預測極端沿海水位的關鍵因素。而在 60 多年來，世界各地許多地方都提出了風暴潮和潮位之間複雜的非線性相互作用在颱風期間對沿海水位所造成的影響，導致風暴潮的實際水位通常會偏離風暴潮和天文潮位的線性疊加結果。

先前的研究表明，當需要可靠的總水位極值預測時，不能忽視潮汐-風暴潮相互作用 (Tide-Surge Interaction, TSI)，但仍缺乏明確的全球量化研究。關於 TSI 的相關研究及其物理驅動機制的解釋通常主要集中於對於流體動力學及控制方程式的描述，單就計算過程中考慮潮汐分量與否，便會造成天文潮與風暴潮之間的相位互相影響：潮汐所引起的水位高低變化及潮流造成風暴潮的水位改變，而風暴潮所改變的水深則會影響潮汐的傳播速度，進而引起近岸天文潮的相位變化 (Bernier & Thompson, 2007; Rossiter, 1961)。

受潮汐與暴潮互相作用之影響，暴潮水位之最大值時常與潮汐之高潮/低潮發生時間有所差異 (Horsburgh & Wilson, 2007)，並且發生在漲潮期間的頻率通常較高 (Idier et al., 2012; Rossiter, 1961)。此外，這種交互作用的機制通常會顯著放大負暴潮的振幅，並減小正暴潮的振幅 (Wankang et al., 2019)。在南中國海地區，忽略潮汐-風暴潮之互動效應可能導致對極端風暴潮位的預估錯誤，誤差可高達 30% (Arns et al., 2020)。

透過非線性淺水波控制方程式中描述風暴潮時，其非線性項通常包含對流項、非線性底床摩擦以及淺水效應 (shallow water effects)。這些非線性項通常都直接與特定案例及現地環境有關。舉例來說，早期便已知道 TSI 會出現明顯空間變化的地區，主要集中在淺水、高潮差、水下地形為平緩斜坡或沿海地形屬於內凹之海岸線等區域 (Idier et al., 2012)，因此關於 TSI 的研究主要集中在河口 (Rossiter,

1961)或海灣，隨後的研究重點轉向廣闊的大陸棚地區，包括英國沿海(Horsburgh & Wilson, 2007)、英吉利海峽(Idier et al., 2012)和台灣海峽(Zhang et al., 2010)。這些研究都識別出了當地的特徵和主要驅動非線性效應的因子，但三種非線性項對於水位的貢獻程度也會因為案例分析或研究地區的環境特徵有所不同，導致這些研究結果無法推廣到其他地區，因此針對研究區域的提出細節的分析有其必要性。

現階段的其他研究中主要集中在數值模式的實驗上，這些數值實驗可以分離天文潮、風暴潮及兩者互相作用等分量所產生的水位貢獻。例如 Fernández-Montblanc et al. (2019)利用風暴潮數值模型分析，證實模式在與潮汐成分耦合的情況下，可以提高歐洲北海及英吉利海峽等地區的水位預測能力，方均根誤差降低約 0.03 公尺。

若利用數值模式分析潮汐與颱風交互作用之非線性效應，模式需要能夠準確地重現潮汐及氣象場對水位所造成的影響(Idier et al., 2012)，而這兩種元素對水位所造成的影響又通常會受到地區性的水深或局部地形特徵而有強烈的變化(Fernández-Montblanc et al., 2019)。然而，在部分資源受到限制的情況下（例如可用之氣象分析場所描述之細節有限或暴潮模式計算網格的解析度限制），這些非線性交互作用的特徵在數值模型中可能無法得到完全的分析(Zijl et al., 2013)。此外，上述之現有數值模式實驗，目前僅限於對數次風暴事件或幾天的研究，因此無法完整反映出水位受颱風與潮汐影響時的一般性特徵。

本研究計畫之重點工作項目之一為建置現實參數化模式（Realistic Parameterization, REP）資料庫，建置該模式資料庫之假設建立於颱風的移動速度遠低於自身風速，主要結構中的流場將快速從過渡階段轉變為準穩態，因此可以忽略颱風路徑帶來的瞬態效應。然而，颱風暴潮與潮汐間的非線性交互作用在 REP 模式建置過程中難以定義關鍵參數並將其量化，可能會成為後續預報之誤差來源。因此在建置 REP 資料庫前，本研究團隊將會利用中央氣象署作業中之暴潮預報系統搭配過往台灣地區歷史颱風案例模式資料，分析暴潮與潮汐在各測站位置之非線性交互作用強度，以作為未來預報誤差來源分析之參考。

## 第2章、計畫重點工作項目及規劃

### 2-1 計畫重點工作項目

本研究計畫為三年期，預計工作項目分年敘述如下：

#### 第一年工作項目：

- I. 二維大氣動力模式資料蒐集分析與資料庫建置
  - A. 自中央氣象署颱風資料庫收集並建置最佳路徑參數資料庫（路徑、中心氣壓、最大風速、七級風半徑等）以利後續研究分析。
  - B. 蒐集二維大氣動力模式資料，來源可分為再分析場氣象資料及過往的颱風案例預報資料（含分析場）。其中，再分析場可以選用免費公開之資料集如 ECMWF ERA5、NCEP-NCAR Reanalysis 1 等；颱風歷史預報資料可透過向氣象署業務單位/研究人員申請蒐集。
  - C. 取得二維大氣模式資料集之重點颱風參數（路徑、中心氣壓、最大風速、七級風半徑、移動速度等）檢視資料特性，並視覺化颱風資料庫最佳路徑參數與二維大氣模式參數資料的差異。
- II. 評估台灣沿海地區颱風暴潮之非線性效應強度
  - A. 颱風暴潮與潮汐間的非線性交互作用在 REP 模式建置過程中難以定義關鍵參數並將其量化，可能會成為後續 REP 模式預報暴潮水位之誤差來源。因此需要分析暴潮與潮汐在各測站位置之非線性交互作用強度，作為未來預報誤差來源分析之參考，必要時將誤差範圍依據情境量化，供預報員作業時參考。
  - B. 執行暴潮模式耦合大氣模式之水位模擬，並將模擬設定區分為考量潮汐/排除潮汐，檢視模式水位結果於各測站之分布情形，並比較耦合潮汐模式與否對模擬水位的影響。

#### 第二年工作項目：

- I. 建置現實參數化（Realistic Parameterization，REP）模式資料庫
  - A. 依據第一年度收集之大氣模式資料執行暴潮模擬，並輸出對應氣象場時間之水位資料。
  - B. 案例校驗(1)：將「REP 模式」與「理想風場模式分別搭配最佳路徑參數」

所得之暴潮水位結果與觀測資料進行比較，檢視 REP 模式結果取代理想風場模式之可行性。

- C. 案例校驗(2)：將 REP 模式與大氣模式資料所得之模擬水位進行比較，確認兩種模式表現是否相當。
- D. 案例預報測試：檢視 REP 模式、TWRP 預報場、理想風場模式在預報時暴潮水位結果與觀測資料的表現。

## II. 建置暴潮預報即時校驗模式

- A. 現有預報系統於後處理過程中，結合即時觀測資料對颱風暴潮預報結果進行校驗。包含調整預報系統產品輸出結構、系統界接海象氣候組觀測科即時資料庫及預報產品新增/調整等。

### 第三年工作項目：

以本計畫第二年度所得成果為基礎發展機器學習精進 REP 預報模式之關鍵參數權重計算方法，包含以下項目：

- I. 收集模式水位模擬資料與預處理，控管訓練模式用之資料品質和數量。
- II. 特徵工程 (Feature Engineering)，從原始數據中擷取特徵 (Feature) 的過程，其目標為擷取出對機器學習模型有用的特徵，以提高模型的性能。
- III. 選擇合適的機器學習演算法，並透過交叉驗證等技術改進模型的超參數 (Hyperparameter)。超參數是指在機器學習模型訓練之前需要手動設定的參數，這些參數會控制模型的訓練過程，並影響模型的最終性能。
- IV. 案例校驗與模式預報測試：檢視 REP 模式在精進權重計算方式後，模式預報暴潮水位之準確度與效能。

## 2-2 預計獲得成果

### 第一年：

1. 收集歷史登陸臺灣或造成影響的颱風之大氣模式二維資料集與最佳路徑參數，包含路徑、中心氣壓、最大風速、七級風半徑。在完成後可以用於後續研究改進理想風場模式，或利用已收集之資料驗證後續驗證颱風暴潮數值模式的準確性，或提供其他後續研究分析所需之資料來源。
2. 視覺化並比較颱風最佳路徑參數與二維大氣模式參數之差異，了解模式預報的潛在誤差來源，以及不同資料集間的差異。
3. 分析各測站位置暴潮與潮汐非線性交互作用強度，可以獲得颱風暴潮與潮汐在各測站位置的非線性交互作用強度分析結果。此結果可供後續研究分析REP模式預報誤差來源之用。
4. 透過模擬分析耦合/不耦合潮汐模式獲得考量潮汐與排除潮汐的暴潮模式水位模擬結果，可幫助研究人員了解潮汐對颱風暴潮的影響。

### 第二年：

1. 建置現實參數化(REP)模式資料庫，包含利用大氣模式資料模擬的暴潮水位資料。此結果可供後續研究比較REP模式與其他模式的表現。
2. 獲得REP模式與理想風場模式分別搭配最佳路徑參數所得之暴潮水位結果與觀測資料的比較結果。此結果可幫助研究人員評估REP模式取代理想風場模式的可行性。
3. 比較REP模式與大氣模式資料模擬的暴潮水位結果，可幫助研究人員確認兩種模式表現是否具備一致性。
4. 預報測試檢視REP模式、數值預報模式與理想風場模式在預報暴潮水位的差

異表現，可幫助研究人員比較不同模式的預報性能。

5. 建置暴潮預報即時校驗模式，透過觀測資料校正預報結果。此成果可使預報系統產品更容易與即時觀測資料結合進行校驗，搭配新增或調整後之預報產品，可使其更符合作業單位即時校驗的需求。

### 第三年：

1. 透過暴潮預報模式之水位模擬資料收集與預處理，研究人員可以獲得確保資料品質和數量，可用於訓練機器學習模型的模式水位模擬資料。
2. 利用特徵工程，研究人員可以獲得從原始數據中擷取的有效特徵，精進各項關鍵颱風參數生成暴潮模式預報水位之權重關係式，建立可反映出中央山脈對颱風阻隔效應之參數化暴潮預報水位模擬結果。
3. 更新氣象署風暴潮預報系統，提升氣象署風暴潮預報系統準確度，並提供預報系統準確度提昇報告。

中央山脈對穿越台灣之颱風影響巨大，且其對颱風之壓力與風速等結構之影響難以預測，透過 REP 氣象預報模式之建立，可以更加有效之預測颱風在穿越中央山脈之後對沿海水位之影響有助於防範颱風對台灣沿海造成之災害，有效精進台灣西部沿海之颱風暴潮預測，達成提升氣象署現有風暴潮預報系統之準確度，以保護人民之生命財產安全。

總結而言，這項研究計畫預計可以建置現實參數化暴潮預報模式，並利用工作項目規劃，分析並校正其預報誤差來源，最終導入機器學習技術提升預報模式關鍵參數的權重計算，以期能夠改善暴潮水位的預報準確度與效能。

## 2-3 交付項目及驗收標準

本研究計畫預定交付項目及相關驗收標準列表如表 2—1，五月工作會議討論研究成果後，業務單位表示可以提供 TWRP 模式之氣象場資料，以期得到更符合業務需求之研究計畫成果，五月工作會議後之預定交付項目及相關驗收標準調整為表 2—2。

表 2—1、研究計畫原預定交付項目及相關驗收標準

	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	113/07/01 (含)前	113/07/31 (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 113 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 20 年登陸臺灣或造成影響的颱風之再分析風場以及 Best Track 之參數，包含路徑、中心氣壓、最大風速、七級風半徑等。
	以合適之 Realistic 統計分析方法進行資料統計分析			針對歷史颱風再分析資料進行資料統計分析，將參考過往文獻針對資料特性揀擇合適之分析方法
	提供颱風氣象場之壓力與風速權重關係			篩檢模式關鍵參數，包括歷史颱風與研究案例之颱風中心距離、中心氣壓變化量、最大風速變化量、七級風暴風半徑變化量等，並以上述資料統計關鍵參數之權重。
	期中報告初稿、修正版			繳交期中報告，內容應含上述工項及委託研究計劃執行聲明書。

	交付項目	初稿日期	完成日期	驗收標準
期末	配合本署不定期之查訪	113/11/29 (含)前	113/12/31 (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 113 年 8 月、10 月各進行 1 次工作進度報告(簡報或會議型式)。
	建立 Realistic 颱風氣象場			透過前述關鍵參數之權重建立，產生隨研究案例變化之 Realistic 颱風氣象場。可提供真實反映出中央山脈對颱風阻隔效應之氣象場。
	建立 Realistic 風暴潮預報系統			將 Realistic 颱風氣象場資料轉變為適用預報系統之資料格式，結合現有風暴潮預報系統，完成考慮地形阻隔效應之預報系統。
	建立風暴潮即時校驗模式			在風暴潮預報後以觀測數據進行預報結果之即時校驗。
	進行 Realistic 暴潮預報系統預報效能評估			維護現有預報系統，並配合現行硬體資源提出本年度之 Realistic 暴潮預報系統效能評估報告。
	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，內容應含全年工項及委託研究計劃執行聲明書。
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。				

表 2—2、研究計畫修正後預定交付項目及相關驗收標準

	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	2. 配合本署不定期之查訪	113/07/01 (含)前	113/07/31 (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113年5月、7月各進行1次工作進度報告(簡報或會議型式)。
	3. 颱風資料庫最佳參數資料收集			收集近20年登陸臺灣或造成影響的颱風之再分析風場以及Best Track之參數，包含路徑、中心氣壓、最大風速、七級風半徑等。
	4. 取得TWRP二維大氣風場之重點颱風參數			自二維氣象場中篩檢颱風關鍵參數，包括颱風中心位置、中心氣壓、最大風速、七級風暴風半徑、移動速度等。
	5. 視覺化最佳路徑參數與TWRP參數差異			繪製颱風資料庫最佳路徑參數與TWRP颱風參數資料間的比較圖。
	6. 期中報告初稿、修正版			繳交期中報告，內容應含上述工項及委託研究計劃執行聲明書。
期末	7. 配合本署不定期之查訪	113/11/29 (含)前	113/12/31 (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113年9月、11月各進行1次工作進度報告(簡報或會議型式)。

	交付項目	初稿日期	完成日期	驗收標準
	8. 颱風暴潮與潮汐的非線性效應分析			提供在模擬過程中考量潮汐與否所得之暴潮模擬水位差異比較。
	9. 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）。
	10. 期末報告初稿、修正版			繳交期末報告，內容應含全年工項及委託研究計劃執行聲明書。
	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。			

## 2-4 預定進度甘梯圖

本研究計畫原定進度甘梯圖如表 2—3。五月工作會議討論研究成果後，業務單位表示可以提供 TWRP 模式之氣象場資料，以期得到更符合業務需求之研究計畫成果，五月工作會議後之工作項目預定進度甘梯圖調整為表 2—4。

八月工作會議後，因應作業單位預報時效需求，將原作業於叢集電腦平台之 Python 版本暴潮預報系統（COMCOT-TWRP）作業模式轉移至指定伺服器，並精進預報作業時效，故八月工作會議後之工作項目預定進度甘梯圖如表 2—5。

表 2—3、計畫原定進度甘梯圖

工作項目	第 1 月	第 2 月	第 3 月	第 4 月	第 5 月	第 6 月	第 7 月	第 8 月	期末月	備註
颱風案例資料收集	■									
以合適之 Realistic 統計分析方法進行資料統計分析	■	■								
提供颱風氣象場之壓力與風速權重關係		■	■							
期中報告撰寫		■	■							
建立 Realistic 颱風氣象場				■	■	■				
建立風暴潮即時校驗模式					■	■	■			
建立 Realistic 風暴潮預報系統						■	■	■		
進行 Realistic 暴潮預報系統預報效能評估								■	■	
期末報告撰寫							■	■	■	
工作進度估計百分比（累積數）	20	35	50	60	70	80	90	95	100	
預定查核點	第 1 季：對近 20 年登陸台灣之歷史颱風進行統計分析 第 2 季：進行各項颱風氣象場之壓力與風速權重關係比較與篩選 第 3 季：建立風暴潮即時校驗模式									

表 2—4、五月工作會議後調整之進度甘梯圖

工作項目	第 3 月	第 4 月	第 5 月	第 6 月	第 7 月	第 8 月	期 末 月	備 註
颱風資料庫最佳參數資料收集	■							
收集 TWRF 颱風案例	■	■						
取得 TWRF 二維大氣風場之重點颱風參數	■	■						
視覺化最佳路徑參數與 TWRF 參數差異		■	■					
期中報告撰寫		■						
颱風暴潮與潮汐的非線性效應分析			■	■	■	■	■	
期末報告撰寫							■	
工作進度估計百分比(累積數)	15	30	45	60	70	85	100	
預定查核點	第 1 季：對近 20 年登陸台灣之歷史颱風進行統計分析 第 2 季：取得 TWRF 二維大氣風場之重點颱風參數 第 3 季：颱風暴潮與潮汐的非線性效應分析							
說明：(1)工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。 (2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定： 1.工作天數 2.經費之分配 3.工作量之比重 4.擬達成目標之具體數字。 (3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。								

表 2—5、八月工作會議後調整之進度甘梯圖

工作項目	第 3 月	第 4 月	第 5 月	第 6 月	第 7 月	第 8 月	期 末 月	備 註
颱風資料庫最佳參數資料收集	■							
收集 TWRF 颱風案例	■	■						
取得 TWRF 二維大氣風場之重點颱風參數	■	■						
視覺化最佳路徑參數與 TWRF 參數差異		■	■					
期中報告撰寫		■						
暴潮預報系統時效精進			■	■				
颱風暴潮與潮汐的非線性效應分析					■	■	■	
期末報告撰寫							■	
工作進度估計百分比(累積數)	15	30	45	60	70	85	100	
預定查核點	第 1 季：對近 20 年登陸台灣之歷史颱風進行統計分析 第 2 季：取得 TWRF 二維大氣風場之重點颱風參數 第 3 季：颱風暴潮與潮汐的非線性效應分析							
說明：(1)工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。 (2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定： 1.工作天數 2.經費之分配 3.工作量之比重 4.擬達成目標之具體數字。 (3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。								



## 第3章、颱風暴潮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 Multi-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) 提供多執行緒編程，能使用單台機器多核心之不同執行緒 (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,  $\mu$  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,  $\varepsilon$  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（ $f = 2\omega \sin \varphi$ ， $\omega = 7.2921e - 5$ 為地球自轉角頻率， $\varphi$ 為緯度）， $\eta$ 為自由液面高程， $h$ 為靜水深， $H$ 為總水深（ $H = h + \eta$ ）， $\tau_s^x$ ， $\tau_s^y$ 分別為 $x$ ， $y$ 方向之風剪力， $g$ 為重力加速度（ $9.81\text{ms}^{-2}$ ）， $\rho_w$ 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：

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

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

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

其中， $\varphi$ ， $\psi$ ：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； $\eta$ ：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（ $f = 2\omega \sin \varphi$ ， $\omega = 7.2921e - 5$ 為地球自轉角頻率， $\varphi$ 為緯度）， $\tau_s^\psi$ ， $\tau_s^\varphi$ 分別為 $\varphi$ ， $\psi$ 方向之風剪力， $g$ 為重力加速度（ $9.81\text{ms}^{-2}$ ）， $\rho_w$ 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（ $f = 2\omega \sin \varphi$ ， $\omega = 7.2921e - 5$ 為地球自轉角頻率， $\varphi$ 為緯度）， $\eta$ 為自由液面高程， $h$ 為靜水深， $H$ 為總水深（ $H = h + \eta$ ）， $\tau_s^x$ ， $\tau_s^y$ 分別為 $x$ ， $y$ 方向之風剪力， $\tau_b^x$ ， $\tau_b^y$ 分別為 $x$ ， $y$ 方向之底床摩擦剪應力， $g$ 為重力加速度（ $9.81\text{ms}^{-2}$ ）， $\rho_w$ 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， $\varphi$ ， $\psi$ ：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； $\eta$ ：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（ $f = 2\omega \sin \varphi$ ， $\omega = 7.2921e - 5$ 為地球自轉角頻率， $\varphi$ 為緯度）， $\tau_s^\psi$ ， $\tau_s^\varphi$ 分別為 $\varphi$ ， $\psi$ 方向之風剪力， $\tau_b^\psi$ ， $\tau_b^\varphi$ 分別為 $\varphi$ ， $\psi$ 方向之底床摩擦剪應力， $g$ 為重力加速度（ $9.81\text{ms}^{-2}$ ）， $\rho_w$ 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、 $\rho_a$ 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 and 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 (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 and 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、 $\rho_a$ 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 & Pond, 1981; Powell et al., 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， $\theta$ 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。

本研究採用中央氣象署現行之 COMCOT 暴潮預報模式為基礎，發展 REP 暴潮預報模式，COMCOT 暴潮預報模式於作業中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，臺灣本島區為 A 區，解析度均為 1 弧分，約為 2 公里；非臺灣本島之澎湖、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。

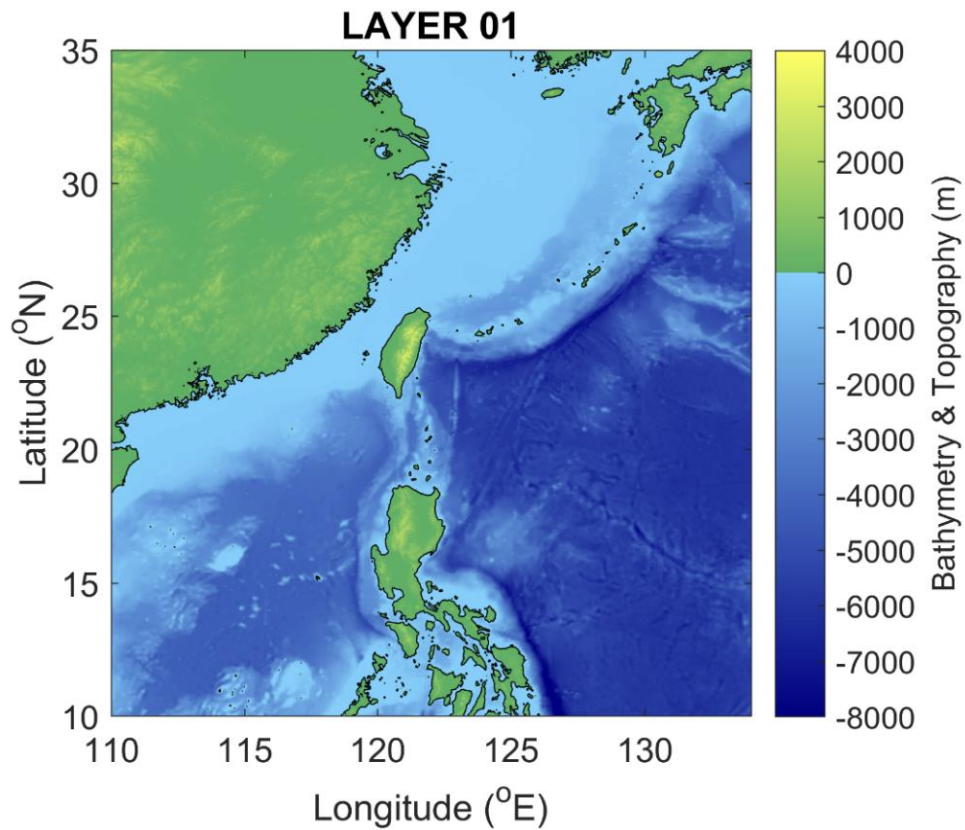


圖 3—1、中央氣象署採用之 COMCOT 風暴潮溢淹模式第一層巢狀網格計算域，範圍東經 110 度至 134 度，北緯 10 度至 35 度，解析度為 4 弧分（8 公里），資料來源為 ETOPO 1。

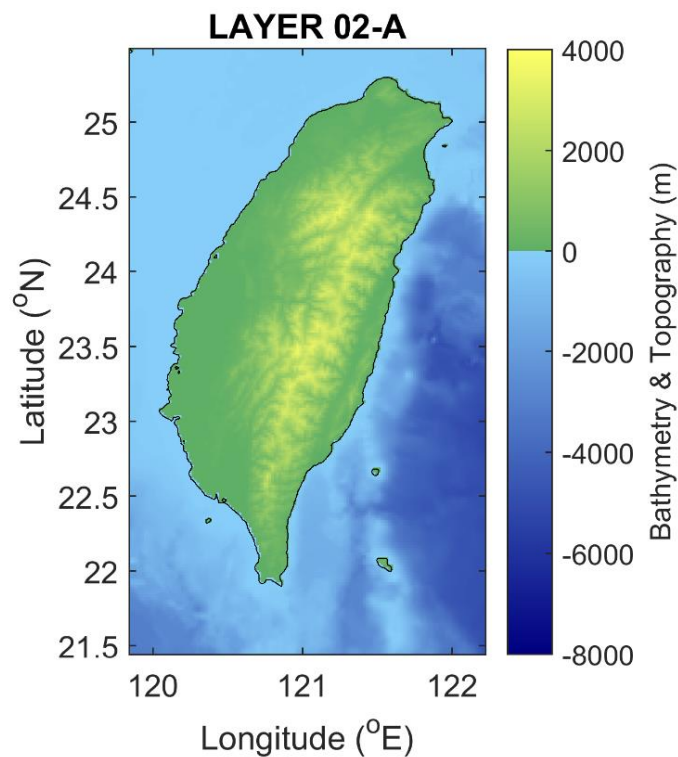


圖 3—2、中央氣象署採用之 COMCOT 風暴潮溢淹模式第二層巢狀網格計算域之台灣本島區域，編號為 02-A。

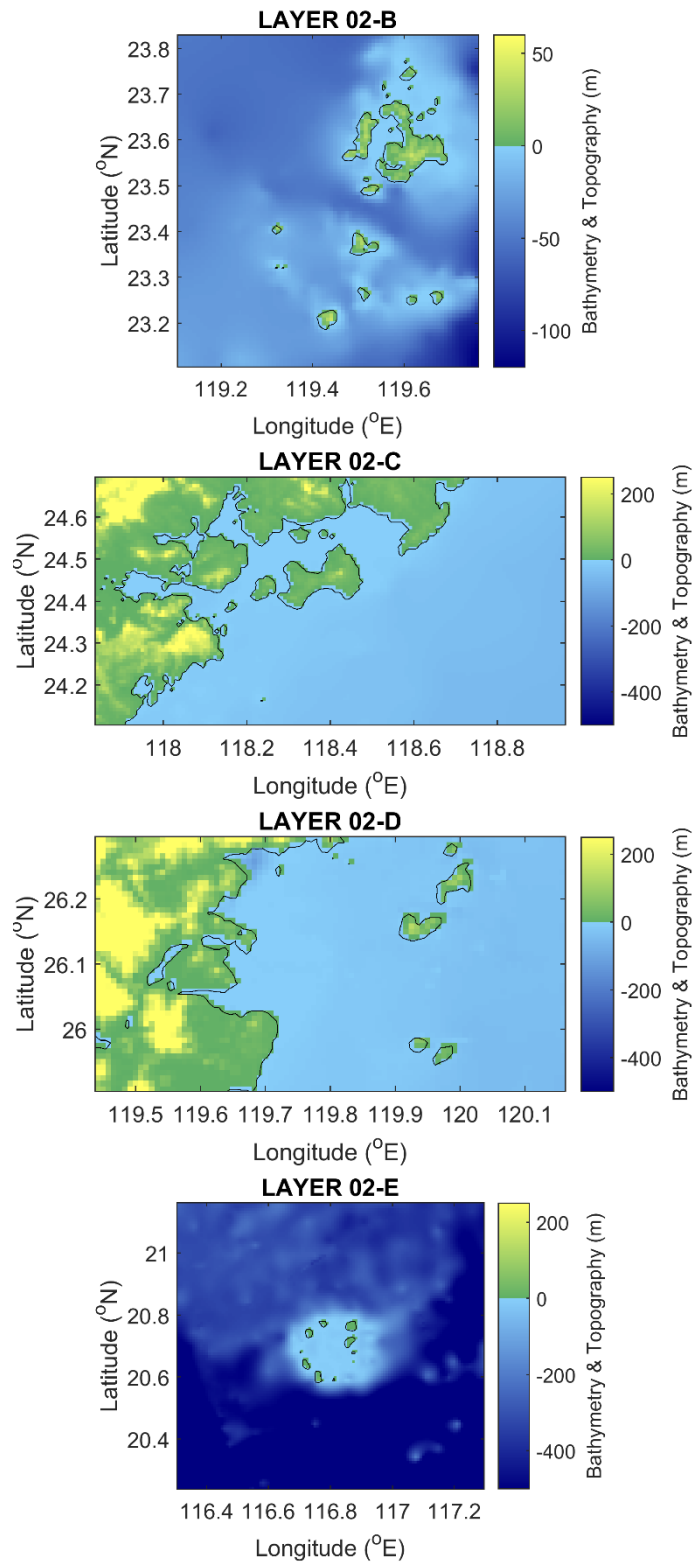


圖 3—3、中央氣象署採用之 COMCOT 風暴潮溢淹模式第二層巢狀網格計算域之離島區域，包含澎湖、金門、馬祖和東沙區域，編號分別為 02-B 至 02-E。

表 3—1、現行中央氣象署採用之 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。

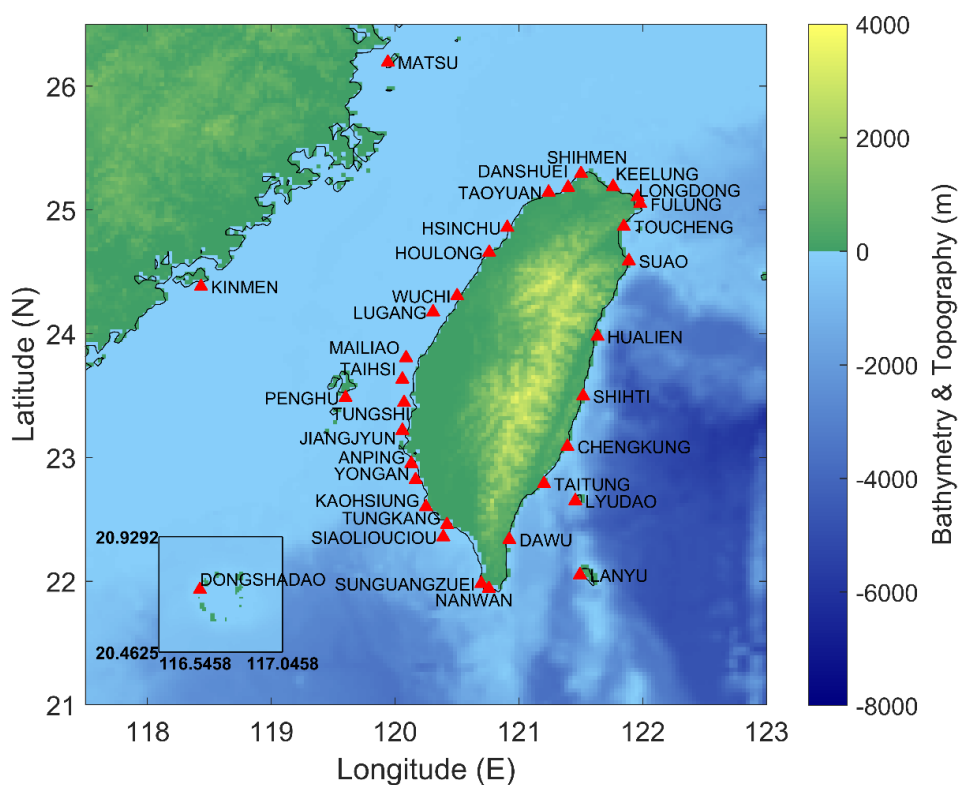


圖 3—4、34 處指定預報潮位站分布。

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	KAOHSIUNG	120.29	22.61
27	東港	1186	TUNGKANG	120.44	22.46
28	東沙島	198	DONGSHADAO	116.69	20.70
29	罈廣嘴	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  $\zeta$ ，水平速度分量  $u$ 、 $v$  (分別位於緯度  $\varphi$  與經度  $\lambda$  方向)，拉普拉斯潮汐方程式可以表示如下：

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

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

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

其中， $\Omega$  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 9.0 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。

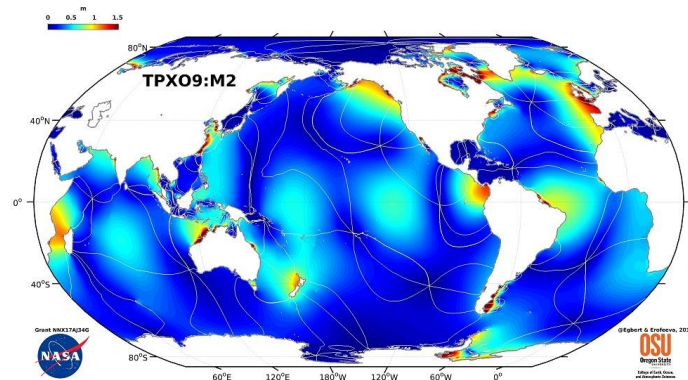


圖 3—5、全球潮汐模式 TPXO 模式示意圖 (TPXO 官網)。

### 3-6 現實參數化模型

本研究計畫的重點在於發展開發一種新的暴潮預報模型，透過建立大型暴潮模式與二維大氣模式耦合之模式資料庫，用於取代理想風場模式預報作業。該模型只需要作業單位提供熱帶氣旋的預報路徑和強度資訊，搭配統計方法便足以生成呈現地形阻擋效應的暴潮水位預報成果，以彌補理想風場於颱風暴潮預報上的不足。

由於颱風的移動速度遠低於自身風速，主要結構中的流場將快速從過渡階段轉變為準穩態，因此可以忽略颱風路徑帶來的瞬態效應。現實參數化模型 (Realistic Parameterization, REP) 開發主要分為三大部分：(1) 收集颱風二維模式資料及對應二維資料之重點颱風參數、(2) 模式發展、計算暴潮水位並產出模式成果以建立暴潮資料庫及 (3) 模式開發後之案例校驗。本研究計畫預計開發與驗證模型的流程圖如圖 3—6 所示。

第一部分中，我們預計利用 ECMWF ERA5 近 40 年之再分析資料 (1980 至 2023 年) 以及作業單位所提供之過往大氣模式預報結果，擷取台灣沿海及西北太平洋中的歷史颱風案例及其關鍵參數，包含最低中心氣壓、最大風速等，以分析歷史颱風的統計特性並建置資料庫。與使用理想參數模型來表示颱風風場和氣壓場結構不同，在使用再分析場或大氣模式預報風場做為資料來源的情況下，我們將有機會可以獲得考量到地形效應、結構相對理想風場逼真的氣象場。其中，再分析場具備時間跨度範圍大又具有一致性的資料特色，而作業單位則可以提供解析度較高且已針對台灣區域調整過模式參數之歷史預報結果，因此在研究前期將會需要大量時間蒐集並比對兩種資料集在關鍵颱風參數中資料分布之特性，搭配中央氣象署建置之颱風資料庫，以選擇參數分布範圍與颱風資料庫較相近者做為後續 REP 模型開發之依據。

在這一步驟中，將會收集中央氣象署颱風資料庫中登錄侵台紀錄的颱風之所有資料點，為了確保資料完整性，我們將空間上和時間上與同一區域 (暴潮預報

系統第一層計算域)內有其他颱風重疊的颱風資料點排除在外,以避免使用統計模型時,颱風資料相互干擾。除了最低中心氣壓、最大風速外,我們預計從中央氣象署(CWA)的颱風資料庫最佳路徑資料中獲取了這些歷史颱風的其他資訊,如颱風的中心位置,以及七級風半徑等資料,以在擷取再分析資料內的颱風訊息過程中輔助判斷資料的正確性。

第二部分主要集中於 REP 模式的發展、計算暴潮水位並產出模式成果以建立暴潮水位資料庫。過程中預計利用暴潮模式耦合大氣模式,輸出水位模擬結果,並透過上游氣象參數所登錄之關鍵資料,給予各水位模擬結果進行標記,以利後續資料庫擷取作業及 REP 模式發展。

本研究規劃利用 REP 模式預報潮水位的流程如下:在得知颱風預報位置後,首先將需要決定過濾資料半徑,決定選用資料庫中的哪些歷史水位模擬結果生成 REP 水位預報結果。其次將會需要計算本次預報颱風參數與過往資料庫間的差距,其中將會包含中心氣壓 $P_c$ 、最大風速 $V_m$ 、與台灣的距離 $X$ 以及 7 級風半徑等參數 $R_7$ ,藉此計算資料庫中二維水維分布用於生成 REP 水位之權重。

其中颱風位置差距可以利用半正矢(Haversine)公式計算:

$$dX = 2 \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (\text{式3-33})$$

其 $dX$ 為颱風預報位置 $(\lambda_2, \varphi_2)$ 與歷史颱風位置 $(\lambda_1, \varphi_1)$ 的距離。

由於每種參數的分布範圍與級數有相當的差距,因此在得到各項參數的變動範圍後,需要採用特徵縮放統計方法(Feature Scaling Statistic Method)以針對自變數或特徵的範圍進行標準化。主要目標是使所有這些參數(最低中心氣壓、最大風速、強風半徑)都處於相似尺度上。這可以確保沒有單一參數(例如壓力值遠大於風速)主導分析並扭曲結果。此外,特徵縮放還有助於消除測量單位(hPa 表示壓力, m/s 表示風速, km 表示半徑)的影響,將它們轉換為無因次的量。研究中預計採用四分位數的間距進行特徵縮放,以確保所有颱風參數在分析中都做出相同貢獻,而不管其原始單位如何,最終得出穩健且易於解釋的結果。

REP 模型在計算各項參數的權重時預計採用簡單的加權平均。這是一種常用的統計加權方法，透過為不同資料點賦予不同權重，計算得到綜合的加權平均值，可反映資料在不同重要程度上的影響。考慮目標颱風點周圍特定半徑（搜尋半徑）內的歷史颱風資料點，並計算各點與預報目標點之中心氣壓 $P_c$ 、最大風速 $V_m$ 、與台灣的距離 $X$ 以及 7 級風半徑等參數 $R_7$ 的差值。得到差值後，便可以依據各參數四分位數的間距進行特徵縮放，提出下列權重計算公式：

$$W_i = \frac{\frac{1}{\left(\frac{dP_{ci}}{IQR_{P_c}}\right)} * \frac{1}{\left(\frac{dV_{mi}}{IQR_{V_m}}\right)} * \frac{1}{\left(\frac{dX_i}{IQR_X}\right)} * \frac{1}{\left(\frac{dR_i}{IQR_R}\right)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\left(\frac{dP_{ci}}{IQR_{P_c}}\right)} * \frac{1}{\left(\frac{dV_{mi}}{IQR_{V_m}}\right)} * \frac{1}{\left(\frac{dX_i}{IQR_X}\right)} * \frac{1}{\left(\frac{dR_i}{IQR_R}\right)}} \quad (\text{式3—34})$$

其中 $W_i$ 表示過濾資料半徑內的每個歷史颱風資料點 $i$ 的權重， $dP_{ci}$ 、 $dV_{mi}$ 、 $dX_i$ 、 $dR_i$ 表示預報資料與歷史資料間的差距，而 $IQR$ 表示歷史資料分布的四分位距（interquartile range），依序為中心氣壓 $P_c$ 、最大風速 $V_m$ 、與台灣的距離 $X$ 以及 7 級風半徑等參數 $R_7$ 。在得到權重之後，便可以利用資料庫中既存的二維水位資料搭配權重計算出該時刻的 REP 水位分布。方程式可表示如下：

$$\bar{Z}_{REP} = \sum_{i=1}^n W_i \bar{Z}_i \quad (\text{式3—35})$$

其中 $\bar{Z}_{REP}$ 代表 REP 模型產出的水位分布情形， $\bar{Z}_i$ 則表示歷史颱風資料點對應的二維水位模式結果。

在這一步驟中，於選用資料過濾半徑時，可能會遭遇選取半徑內無資料、或資料筆數不足產製新水位資料，或是選取半徑過大導致所選資料數過多，無法有效呈現颱風主要結構對水位造成的影響。因此後續計畫執行過程中，應利用事前分析方法，提出選取有效資料過濾半徑的範圍，以方便後續預報作業執行。

研究中目前展示的權重公式為假設所有參數與颱風之間的變化為線性關係，然而這些線性關係並不完全準確，因此研究中將提出數個情境分析，以細部調整權重計算公式，檢視何種情境調整有助於產出更為準確的 REP 氣象場。現有設計情境公式如下方所示：

$$\left\{ \begin{array}{l}
W_i = \frac{\frac{1}{\left(\frac{dP_{ci}}{IQR_{Pc}}\right)^*} \frac{1}{\left(\frac{dV_{mi}}{IQR_{Vm}}\right)^*} \frac{1}{\left(\frac{dX_i}{IQR_X}\right)^2} \frac{1}{\left(\frac{dR_i}{IQR_R}\right)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\left(\frac{dP_{ci}}{IQR_{Pc}}\right)^*} \frac{1}{\left(\frac{dV_{mi}}{IQR_{Vm}}\right)^*} \frac{1}{\left(\frac{dX_i}{IQR_X}\right)^2} \frac{1}{\left(\frac{dR_i}{IQR_R}\right)}} \\
W_i = \frac{\left(\frac{1}{\left(\frac{dP_{ci}}{IQR_{Pc}}\right)^*} \frac{1}{\left(\frac{dV_{mi}}{IQR_{Vm}}\right)^*} \frac{1}{\left(\frac{dX_i}{IQR_X}\right)^2} \frac{1}{\left(\frac{dR_i}{IQR_R}\right)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\left(\frac{dP_{ci}}{IQR_{Pc}}\right)^*} \frac{1}{\left(\frac{dV_{mi}}{IQR_{Vm}}\right)^*} \frac{1}{\left(\frac{dX_i}{IQR_X}\right)^2} \frac{1}{\left(\frac{dR_i}{IQR_R}\right)}\right)^2} \\
W_i = \frac{\frac{1}{\left(\frac{dP_{ci}}{IQR_{Pc}}\right)^*} \frac{1}{\left(\frac{dV_{mi}}{IQR_{Vm}}\right)^*} \left(\frac{1}{\left(\frac{dX_i}{IQR_X}\right)^2}\right)^2 \frac{1}{\left(\frac{dR_i}{IQR_R}\right)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\left(\frac{dP_{ci}}{IQR_{Pc}}\right)^*} \frac{1}{\left(\frac{dV_{mi}}{IQR_{Vm}}\right)^*} \left(\frac{1}{\left(\frac{dX_i}{IQR_X}\right)^2}\right)^2 \frac{1}{\left(\frac{dR_i}{IQR_R}\right)}}
\end{array} \right. \quad (式3—36)$$

在第三部分，即選用案例執行後報驗證 (hindcast)，為了避免驗證案例本身於 REP 模型中直接使用自身資料以影響模型表現，將會先從 REP 模型中剔除預計校驗用的案例才執行後續的 REP 模式預報水位生成步驟。本研究中預計至少提出 2 個以上的颱風案例進行分析，並利用既存的二維氣象場資料，或其他理想風場模式加以評估 REP 模型的實用性與準確性。

本團隊預計開發之 REP 模型，透過加權演算法整合歷史颱風模式資料所提供之暴潮水位模擬結果，提供了一種由數據驅動的颱風預報方法。該模型將大量颱風參數資訊與空間距離權重相結合，透過加權平均歷史颱風點的場資訊獲得新的參數化水位模擬結果，並利用最佳化技術確定關鍵參數，以期能較好模擬出複雜環境下的颱風及其引起的風暴潮等現象。

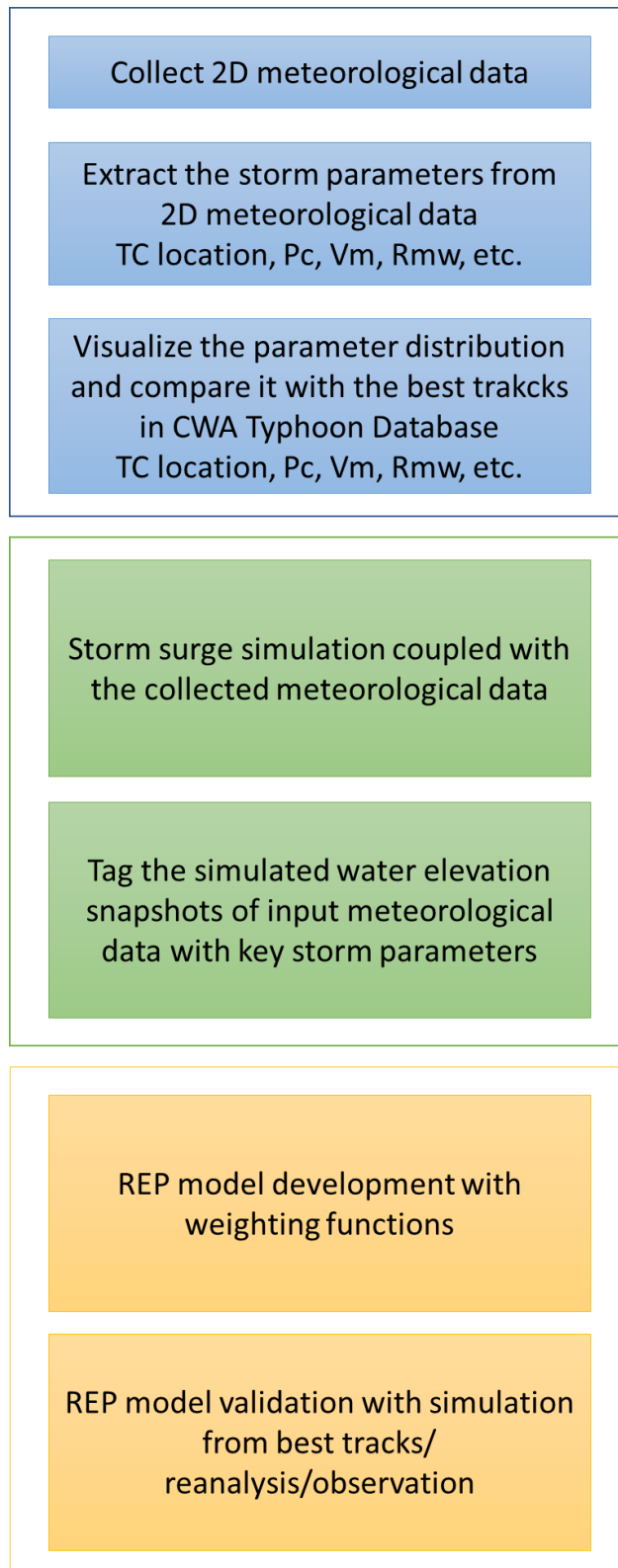


圖 3—6、REP 模型發展流程圖。

## 第4章、颱風案例資料收集與統計分析

本研究計畫工作目標首先需要系統性的收集並分析大量歷史侵台颱風個案，重點關注那些在逼近或橫越台灣時表現出明顯地形鎖定效應的案例，包括颱風在不同階段的路徑變化、環流結構扭曲、風場/氣壓場非對稱性等細節。透過資料分析，尋找地形鎖定效應的典型模式，並選用適當的案例作為後續驗證及分析的參考。

本章節依序收集並展示近 40 年間侵台之颱風資料（1980 至 2023 年），包含颱風資料庫中最佳路徑參數、歐洲中期天氣預報中心 ECMWF-ERA5 模式重分析資料集、TWRP 颱風資料等，並視覺化資料集間之差異，以利於後續暴潮模式之開發及相關參數調教。

### 4-1 颱風資料庫最佳參數資料收集

台灣位於西北太平洋盆地西側，每年平均有 3 至 4 個熱帶氣旋登陸。台灣中央氣象署自 1958 年起監測和預報西北太平洋和南海的所有熱帶氣旋活動，並針對影響台灣的熱帶氣旋發布海上和陸地警報。此外，中央氣象署收集了每一個熱帶氣旋的所有資料和相關分析結果，特別是影響台灣熱帶氣旋的全面原始觀測資料，建立颱風資料庫(Jian et al., 2022)。

本研究自颱風資料庫收集近年鄰近臺灣甚至造成影響的颱風之最佳路徑參數。其中，鄰近臺灣颱風定義參考自颱風資料庫，以其路徑經過 $19^{\circ}N \sim 28^{\circ}N$ ， $118^{\circ}E \sim 126^{\circ}E$ 範圍內，且在此範圍內該颱風之強度到達颱風定義以上者稱之。而中央氣象署所紀錄之颱風強度主要依據近中心最大平均風速值進行分類，熱帶性低氣壓之定義為平均風速 $<17.2$  公尺/秒，輕度颱風之平均風速介於 17.2 至 32.6 公尺/秒、中度颱風介於 32.7 至 50.9 公尺/秒，而強烈颱風之平均風速為 51.0 公尺/秒以上。

颱風資料庫在儲存及分析颱風最佳路徑時，通常優先儲存對台灣具有威脅的案例，即有發布過海上颱風警報或陸上颱風警報者為主，所存儲之颱風事件紀錄

檔案內容，皆包含颱風事件發生年、颱風事件名稱、資料日期與時間、颱風所在位置（緯度、經度）、中心氣壓、10 分鐘平均最大風速值、1 分鐘最大陣風值、七級風半徑、十級風半徑、位置紀錄期間是否對外發布颱風警報等。研究中蒐集其中的颱風所在位置（緯度、經度）、中心氣壓、近中心附近平均最大風速值（10 分鐘）、七級風半徑及颱風警報發布時間與類型，以作為後續研究之參考。

由於研究中橫跨時間區段為 40 年以上，資料精度隨預報技術及觀測技術進步持續精進。以資料紀錄時間間隔為例，在未發警報期間，資料紀錄時間間隔為每 6 小時一筆，而 2003 年之後在海上警報期間為每 3 小時一筆，2019 年後陸上警報期間則存有每小時一筆之路徑資料。最佳路徑資料所紀錄之最大風速值方面，於 1992 年前參考聯合颱風警報中心（Joint Typhoon Warning Center, JTWC）定位，因此最大風速為 1 分鐘平均風速，1992 至 1994 年為轉換期，1995 年後改為以 10 分鐘平均最大風速判斷定位。

圖 4—1 為 1980 年代以來侵襲台灣之颱風個數及颱風警報單發布數量。黑色圓圈表示侵襲台灣之颱風個數，長條圖表示颱風警報單發布數量，其中藍色為海上颱風警報，紅色為海上陸上颱風警報。

海上颱風警報的發布基準為預測颱風的七級風暴風範圍可能於 24 小時內侵襲台灣或金門、馬祖 100 公里以內海域時即發布，之後每隔 3 小時發布一次，必要時得加發之。海上陸上颱風警報的發布基準則為預測颱風的七級風暴風範圍可能於 18 小時內侵襲台灣或金門、馬祖陸上時即發布，之後每隔 3 小時發布一次，並每小時加發颱風最新位置。歷史颱風警報預報路徑細節可透過氣象署提供之 API 資料庫介面中存取，最早之預報路徑資料可追溯至 2004 年颱風米雷(Meari)。

從圖中檢視影響台灣的颱風個數，1980 至 2023 年間每年影響台灣颱風個數平均為 5.7 個，實際上每年數量變化很大，有的年份少至 2-3 次颱風（如 2018、2022 年），有的年份出現 5 次以上台風（如 1980 年代多數年份）。近年來，影響台灣的颱風數為 2 至 6 個不等，較 1990 年代和 2000 年代初有所減少，但每年仍存在顯著差異。

海上和陸地警報的發布次數通常與當年影響台灣的颱風數量相對應，平均一個颱風會發布 6.2 次海上颱風警報、11.2 次海上陸上颱風警報。如 2001、2004 年，颱風侵襲數量高達 9 個，因此海上陸上颱風警報發布個數於當年皆超過 100 起；2018 年颱風侵襲數量只有 2 個，因此發布警報總數少於 30 起。然而，近兩年（2022 至 2023 年）儘管颱風較少，單一事件平均警報發布數量卻超過 20 起，顯示警報發布數量的趨勢並非絕對。

圖 4—2 為中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風路徑分布圖，資料來源為為颱風資料庫，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，展示範圍與作業中暴潮預報系統相同，介於東經 110 度到東經 134 度及北緯 10 度到北緯 35 度。標題顯示圖中展示颱風路徑總數，合計為 252 條。圖中黑線表示海岸線，著色色線表示路徑期間之颱風強度分類。紫色、藍色、綠色、橘色依序代表熱帶性低氣壓、輕度颱風、中度颱風及強烈颱風。

從圖中可以看出，颱風主要自西北太平洋地區生成後往西北方向進入計算域。由於在西北太平洋地區對台灣造成威脅的颱風大多數沿著副熱帶高氣壓的邊緣由東南向西北移動，因此颱風路徑在接近陸地的區域及台灣東南部海域有更為密集的分佈。此外，從著色路徑分佈的範圍來看，強烈颱風記錄主要分佈在台灣東部及南部海域，這可能是由於台灣東部及南部海域的海洋條件更有利於颱風的發展。大部分颱風在台灣與菲律賓東部時強度較其位於台灣西部及中國沿海地區時強，在台灣西部地區幾乎沒有強烈颱風的紀錄，可能由於颱風途經陸地及相對淺水區域時受地形影響導致強度減弱。

值得注意的地方是，圖中展示的路徑資料皆為台灣曾對其發布警報之颱風個案，因此在南中國海地區發展之颱風於截取時間區段內路徑數較少，僅能表示途經該地區之颱風個案在過去對台灣地區造成危害的機會較小，或歷年影響台灣的颱風事件通常沒有途經此處，並非代表該區域生成颱風的機會較低。

圖 4—3 為中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風強度分布圖。資料來源為颱風資料庫，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，展示範圍與作業中暴潮預報系統相

同，介於東經 110 度到東經 134 度及北緯 10 度到北緯 35 度。圖中黑線表示海岸線，著色點表示該點紀錄位置之颱風強度分類。紫色、藍色、綠色、橘色依序代表熱帶性低氣壓、輕度颱風、中度颱風及強烈颱風。

圖中展示資料點數依據颱風資料庫儲存之歷史颱風位置，各事件資料點間隔依據觀測技術進步及警報發布階段不同，有 1 小時至 6 小時不等。颱風強度依據該紀錄點之近中心最大風速進行分類，分別為熱帶性低氣壓 (<17.2 公尺/秒)、輕度颱風 (介於 17.2 至 32.6 公尺/秒)、中度颱風 (介於 32.7 至 50.9 公尺/秒) 及強烈颱風 (51.0 公尺/秒以上)。其中輕颱紀錄為 3025 筆，占有資料中多數，其次為中颱 (2693 筆)、熱帶性低氣壓 (1026 筆) 及強颱 (771 筆)。

資料於台灣周圍海域相當密集，其中強颱資料多位於台灣東部、菲律賓東部及西北太平洋盆地地區。台灣本島及台灣海峽地區資料點則多為中颱及輕颱，中國沿海區域則多為輕颱及熱帶性低氣壓。在南中國海盆地中，影響台灣之颱風事件強度皆未達到強烈颱風水準。

由於圖 4—2 及圖 4—3 無法清楚展示颱風資料點的重疊分布情形。圖 4—4 展示最佳路徑資料庫中紀錄之颱風中心紀錄密度分布。資料來源為颱風資料庫，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年。圖中黑線表示海岸線，色階表示該點紀錄之計數，白色區域則顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的颱風中心紀錄密集程度越高，但與颱風強度無直接相關。

圖片中顯示颱風中心紀錄的分佈範圍並不均勻，最高密度集中在菲律賓東北方、台灣東部沿海地區及日本琉球地區的海域，也就是颱風在西北太平洋常見的發源地和途徑區域。整體來看，颱風中心位置密度分布沿著菲律賓東南部海域往西北方向逐漸增加，在台灣東南部、琉球群島地區及東海地區達到密度最高值後持續往西北方向遞減，延伸至中國內陸地區及長江三角洲外海，反映了許多颱風通過或影響臺灣的情況。

配合圖 4—2 及圖 4—3 檢視資料特性，颱風位置密度在台灣西北部往中國地區逐漸減少，可能是颱風結構受地形影響導致強度減弱甚至消散所導致。此外，

在日本南方海域，暴潮預報系統計算域之東部邊界及西南部地區之颱風位置資料密度較低，並不代表當地完全沒有颱風位置紀錄，僅能說明歷年影響台灣的颱風事件通常沒有途經此處。

圖 4—5 展示網格化之颱風事件近中心最大風速平均值分布，單位為公尺/秒，資料來源為中央氣象署颱風資料庫，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年。圖中黑線表示海岸線，網格色階表示該網格內所有資料點之近中心最大風速平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的近中心最大風速平均值越高。

以空間分布來看，台灣東部的颱風紀錄數量普遍多於西部，且台灣東部平均風速值也普遍高於西部。其他較高風速區域則集中在西北太平洋盆地區域、菲律賓東部沿岸及部分僅有單一事件標示之區域（展示範圍之東北部區域），風速高於 40 公尺/秒；菲律賓東部遠洋地區、南中國海、台灣海峽地區及陸地區域之平均最大風速則較小，通常在 40 公尺/秒以下。參考圖 4—2 之路徑分布，可以知道大部分颱風路徑自展示範圍東南區域往西北方向前進，由圖 4—5 之強度分布趨勢可見，颱風位於展示範圍東南區域時風速通常較低，往西北方向/北方逐漸加強，途經陸地後風速減弱。

圖 4—6 展示網格化之颱風事件中心氣壓平均值分布，單位為毫巴（百帕），資料來源為中央氣象署颱風資料庫，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年。圖中黑線表示海岸線，網格色階表示該網格內所有資料點之氣壓平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的颱風中心氣壓平均值越低。

與圖 4—5 近中心最大風速資料量相比，部分最佳路徑中紀錄的氣壓值受限於當年觀測技術而無法取得，導致資料數量較近中心最大風速值少，於視覺化圖形中較明顯之區域為中國南部及菲律賓西部海域。

以空間分布來看，台灣東部、東南部的有效氣壓紀錄數量普遍多於台灣西部

地區，且台灣東部平均氣壓值也普遍低於西部，顯示颱風強度在東部地區之記錄普遍高於西部地區紀錄。中國內陸地區及菲律賓東部、西北太平洋盆地區域之平均氣壓值紀錄值較高，顯示颱風於該區域紀錄普遍較弱，圖中呈現的颱風強度分布特徵大致與圖 4—5 相符。參考圖 4—2 之路徑分布，可以知道大部分颱風路徑自展示範圍東南區域往西北方向前進，由圖 4—6 之氣壓分布趨勢可見，颱風位於展示範圍東南區域時颱風中心氣壓通常較高，通常為 980 百帕以上，往西北方向/北方逐漸降低至 920 至 960 百帕，途經陸地後氣壓值回升至 980 百帕以上，顯示颱風登陸後其強度減弱。

圖 4—7 展示網格化之颱風事件七級風半徑平均值分布，單位為公里，資料來源為中央氣象署颱風資料庫，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年。圖中黑線表示海岸線，網格色階表示該網格內所有資料點之七級風半徑平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的七級風半徑平均值越高。

圖中顯示七級風半徑通常大於 100 公里，最大不超過 500 公里。其中較大七級風半徑者分布範圍呈東南—西北走向之帶狀，分別位於颱風紀錄區域之邊界，七級風半徑於該區域紀錄超過 300 公里。颱風紀錄分布較密集之區域位於台灣東南部海域，也呈帶狀東南—西北走向，平均介於 250 公里至 350 公里之間。與風速與氣壓分布情形略有不同的地方是，台灣東部與西部台灣海峽地區之七級風半徑平均值並無明顯差異，直到中國陸地區域之颱風紀錄，七級風半徑才有明顯下降情形，約降至 200 公里以下。

圖 4—8 為中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風參數資料機率密度分布圖。上、中、下圖依序展示近中心最大風速、颱風中心氣壓及七級風半徑之機率密度分布，依長條圖繪製。其中近中心最大風速機率密度分度圖之分帶為 10 公尺/秒，資料區間分布於 10 至 70 公尺/秒之間。分佈似乎大致呈現雙峰分佈，其中最高峰在 20 至 30 公尺/秒之間，次要的峰值位於 40 至 50 公尺/秒之間，在風速高於 55 公尺/秒的區間，機率密度顯著降低。

颱風中心氣壓機率密度分度圖之分帶為 20 百帕，氣壓值從左到右減小，因此颱風強度由左至右增強，以方便與近中心最大風速分布趨勢互相比較。氣壓分布之趨勢嚴重偏向左側，亦即多數颱風之中心氣壓值較高，且熱帶氣旋最常見的中心氣壓在 980 至 1000 百帕之範圍內。隨著氣壓值降低，機率密度呈現穩定下降的趨勢，而氣壓值低於 920 百帕之機率密度顯著降低，低於 900 百帕之資料數量十分稀少。

七級風半徑機率密度圖之分帶為 50 公里，資料區間分布介於 0 至 400 公里之間。圖中顯示，熱帶氣旋之尺寸於颱風資料庫之紀錄中通常有一定的範圍，分佈看起來大致呈常態（鐘形），略為右偏，且峰值集中在 150 至 200 公里之間，極值分布相對較少，多數資料介於 100 至 300 公里之間。

由圖 4—5 至圖 4—7 中顯示，颱風資料庫所紀錄之三種參數間互有關連。

以近中心最大風速與中心氣壓為例，此兩參數呈現強烈的負相關性，及風速較高的區域通常中心氣壓較低，兩種參數皆反映出該區域的熱帶氣旋有較高的強度，而強度較強的區域主要分布於台灣東部沿海及遠洋地區。

近中心最大風速與七級風半徑之間存在普遍的正相關性，高風速區域通常對應到較大的颱風，但這種關聯性並不如風速與氣壓間關係明確。颱風中心氣壓與七級風半徑的關係也有類似的情況，雖然大部分情況下有較低中心氣壓的區域會有較大的七級風半徑，但可能有其他因素會影響到熱帶氣旋的大小。

觀察三種參數於空間分布的情況可以看到，台灣東部沿海延伸至西北太平洋遠洋地區，尤其是北緯 20 至 25 度的熱帶氣旋往往有更高的強度以及更大的規模，且當其向西或向北移動時，強度通常都會減弱，七級風半徑則可能變小，顯示台灣、菲律賓地區的東海岸通常較其西部地區面臨更強、更大的颱風。

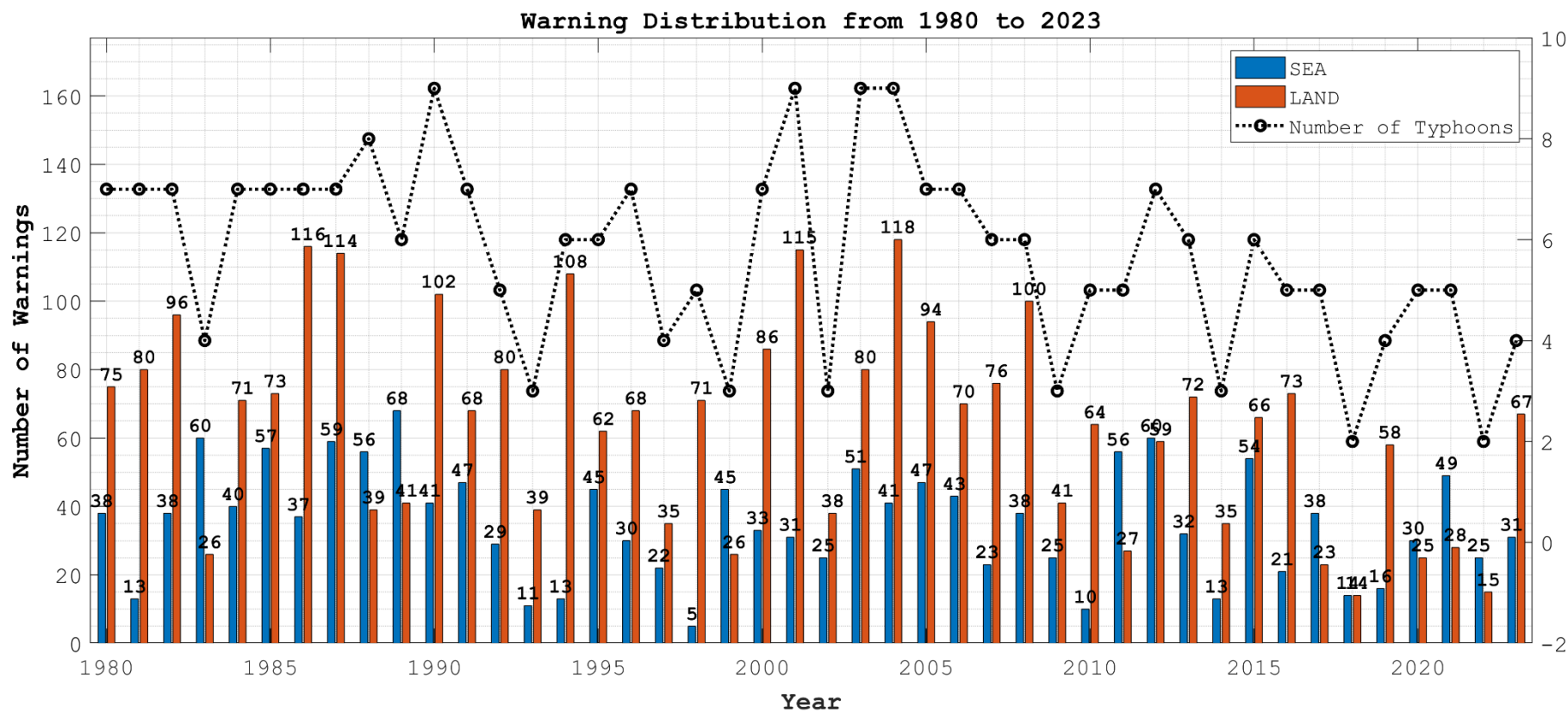


圖 4—1、1980 年代以來侵襲台灣之颱風個數及颱風警報單發布數量。  
 黑色圓圈表示侵襲台灣之颱風個數，長條圖表示颱風警報單發布數量，其中藍色為海警，紅色為陸警。

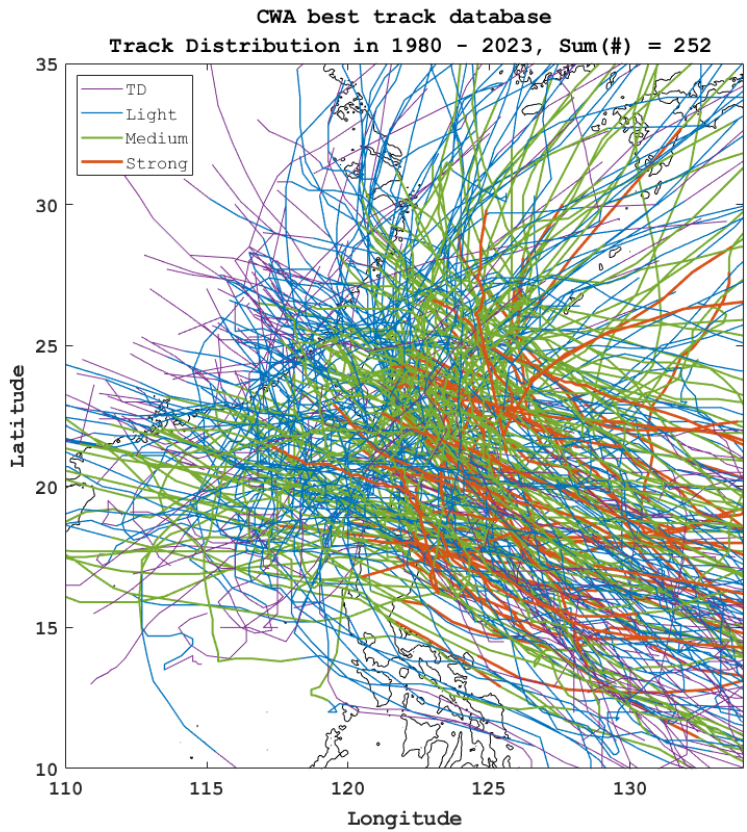


圖 4—2、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風路徑分布圖。

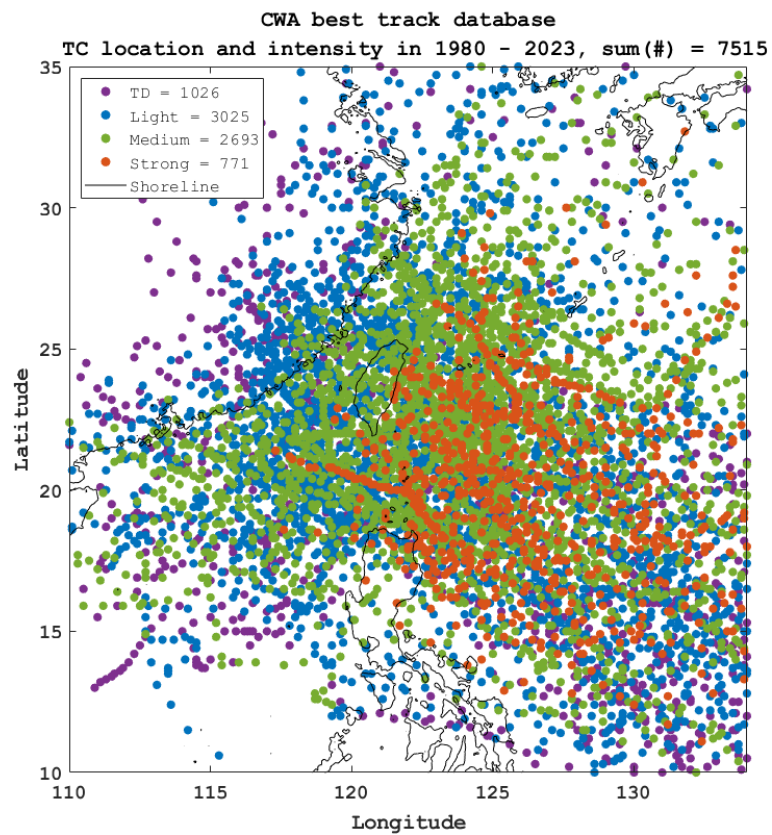


圖 4—3、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風強度分布圖。

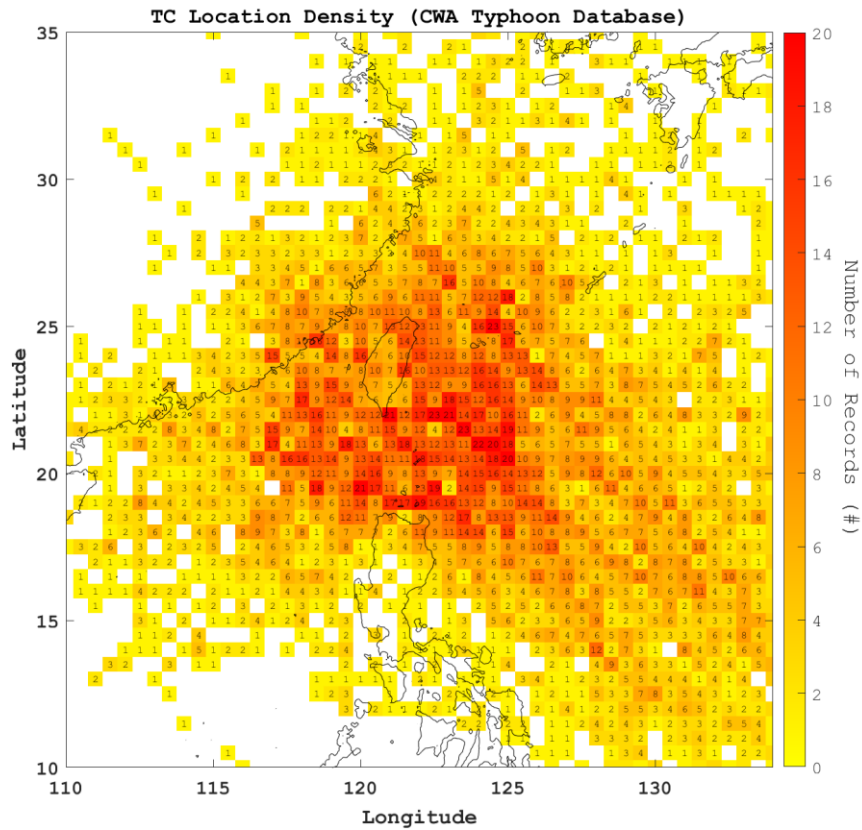


圖 4—4、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風中心資料密度分布圖。

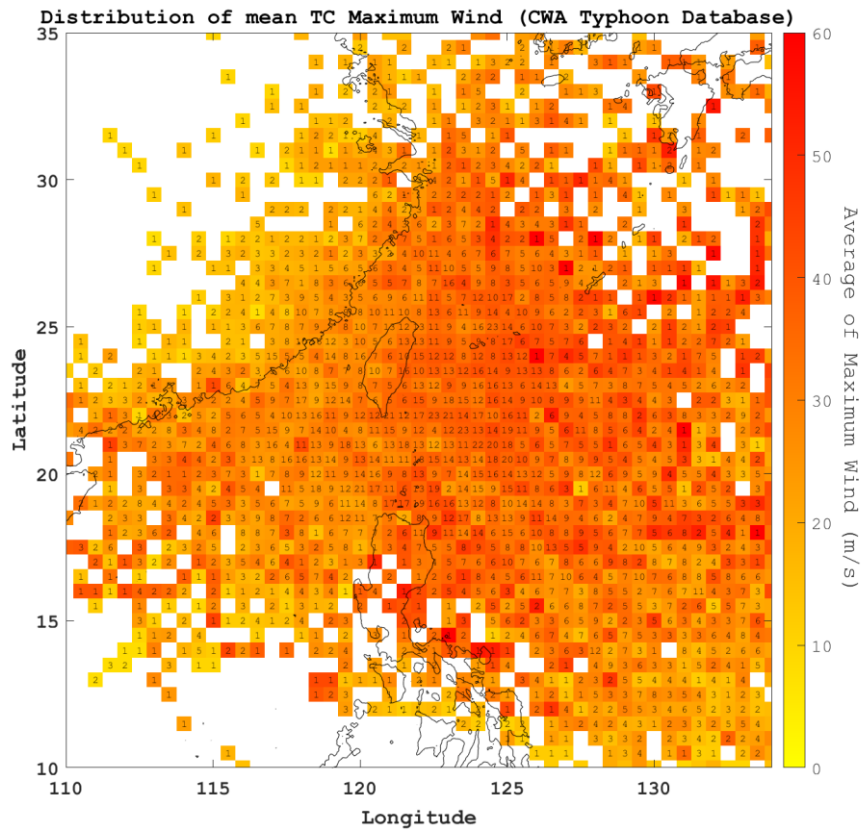


圖 4—5、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風中心平均近中心最大風速分布圖。

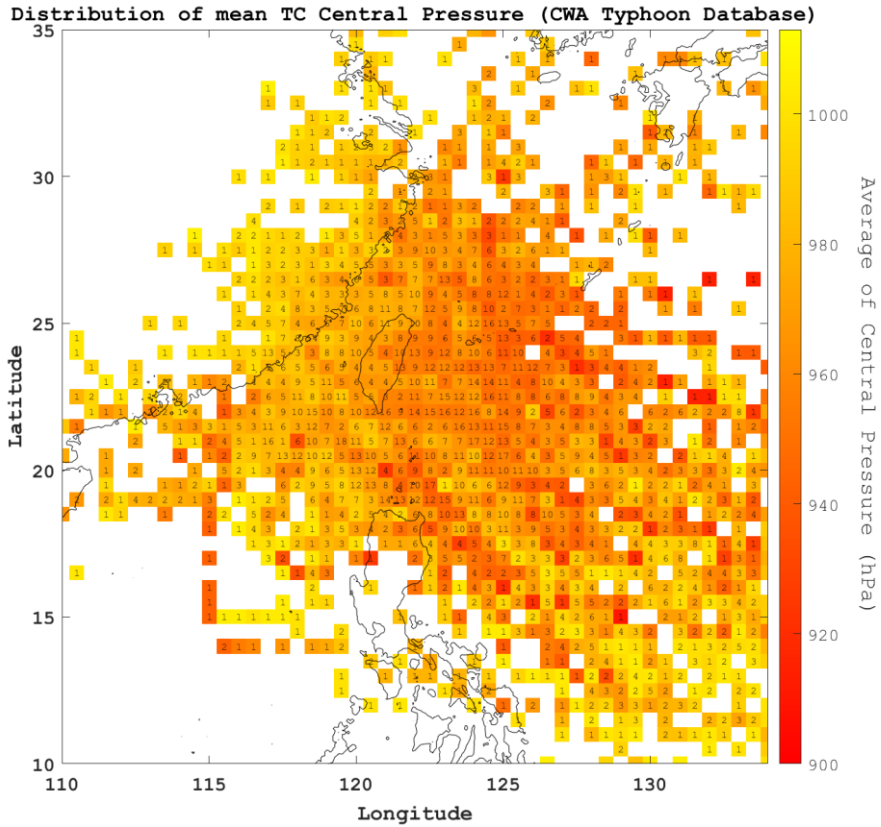


圖 4—6、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風平均中心氣壓分布圖。

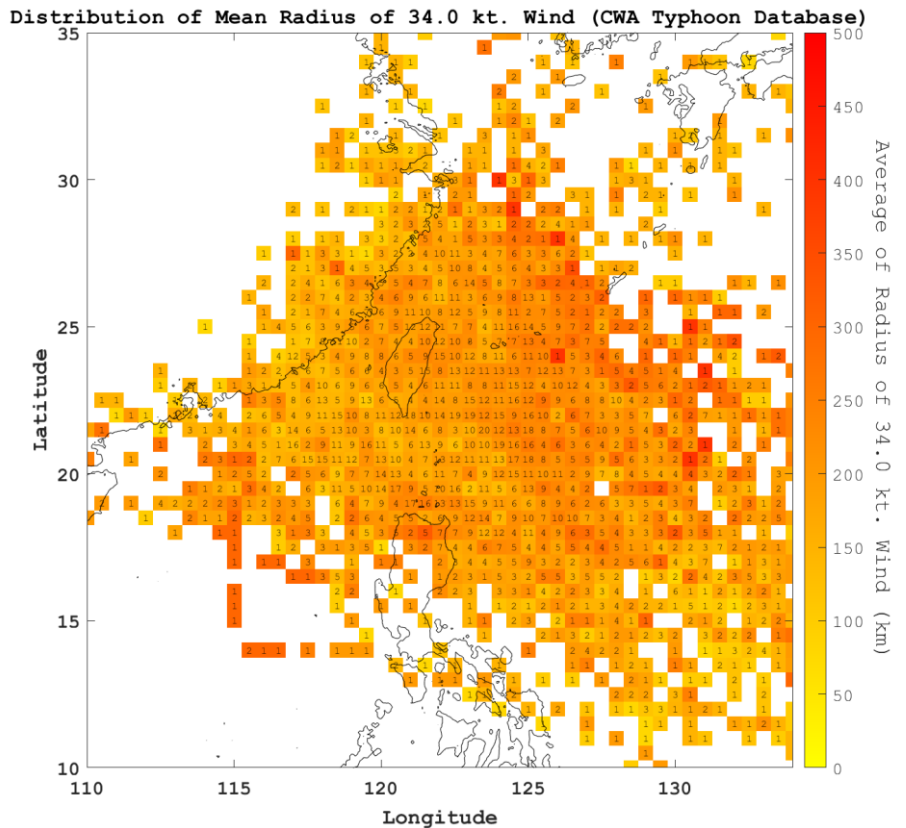


圖 4—7、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風平均七級風半徑分布圖。

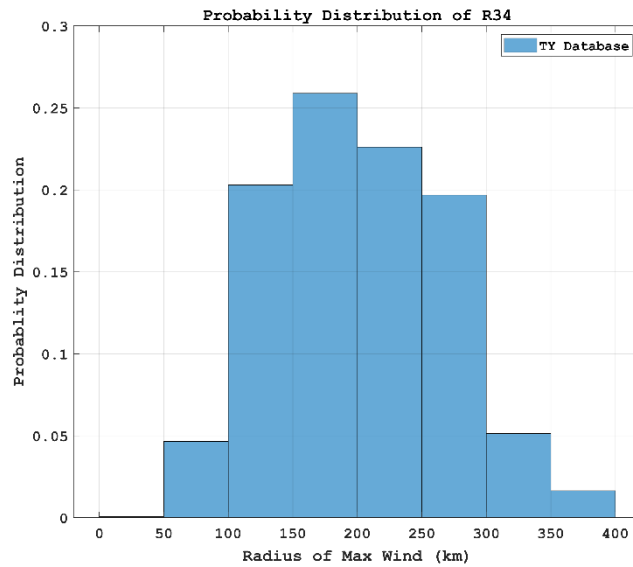
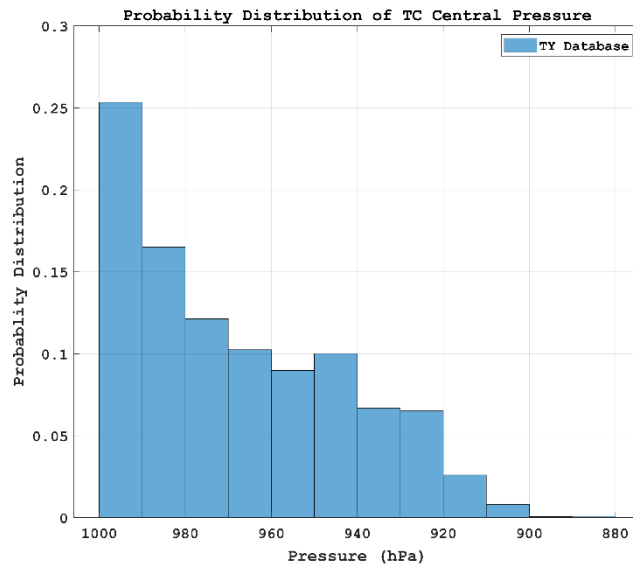
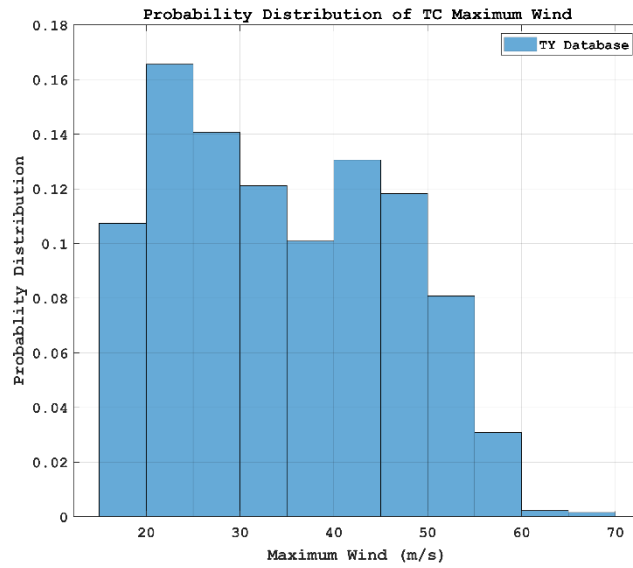


圖 4—8、中央氣象署最佳路徑紀錄之颱風參數資料密度分布圖。  
 (上) 近中心最大風速、(中) 颱風中心氣壓、(下) 七級風半徑。

## 4-2 取得 ECMWF-ERA5 之重點颱風參數

ECMWF ERA5 是歐洲中期天氣預報中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 由哥白尼氣候變遷服務(Copernicus Climate Change Service, C3S)產生的全球大氣重分析(Reanalysis)資料集。ERA5 於 2018 年推出,取代了先前 ERA-Interim 重分析,提供了跨越數十年的地球大氣狀況的高解析度、全面的表示。

它使用先進的 4D-var 資料同化技術和數值天氣預報模型,結合了來自氣象站、衛星、海洋浮標和飛機等眾多來源的觀測資料,創建了天氣和氣候條件的詳細歷史記錄。該模型從 1940 年開始以 0.25 度(約 31 公里)水平解析度在全球範圍內提供每小時輸出,相較之前的 79 公里解析度有了顯著改進。模式產品中涵蓋廣泛的大氣變量,如溫度、風速、濕度和降水等,垂直解析度有 137 層,最高海拔 80 公里。

ECMWF-ERA5 資料集提供了颱風暴潮主要驅動力的氣象變量,即平均海表面氣壓與 10 米風速,目前可以提供的空間解析度為 0.25 度(約 30 公里),時間解析度為 1 小時,被廣泛應用於各類天氣氣候研究領域,也是發展和驗證新一代地球系統模式的重要資料來源。作為標準參考資料集,它對提高預報能力、應對極端事件至關重要,對於理解和預測颱風和風暴潮等極端事件具有不可估量的價值。圖 4—9 為 ECMWF ERA5 全球海表面氣壓與 10 米風速資料。展示時間為 2023 年 09 月 02 日 18 時(UTC)。圖中可以看到颱風海葵(Haikui)正在接近台灣,10 米風速高於 20 公尺/秒,中心氣壓介於 970 至 980 百帕之間。

由於 ECMWF-ERA5 資料集中並未提供颱風最佳路徑中心位置以供比對,因此需要研究團隊額外利用以之最佳路徑參數做為參考,將關鍵颱風參數自二為氣象場資料中取出。其中,模式內颱風中心位置以最佳路徑位置為參考基準點,選取半徑 1000 公里內之最低氣壓中心;近中心最大風速值則依據模式最低氣壓中心為圓心,向外選取半徑 1000 公里內之最大風速值作為近颱風中心最大風速。

颱風中心位置與近中心最大風速之距離即為最大風速半徑。七級風半徑的計算方式則依據颱風中心位置向外選取一至五倍最大風速半徑內之風速資料，篩選出符合七級風門檻之資料位置，過濾前 10%及後 10%的極端值後將剩下的七級風半徑值取平均。

圖 4—10 為 ECMWF ERA5 搭配最佳路徑資料擷取之模式內颱風路徑分布圖，二維模式產品資料來源為哥白尼氣候變遷服務(Copernicus Climate Change Service, C3S)氣候資料儲存系統(Climat Data Store, CDS)，最佳路徑資料來源為中央氣象署颱風資料庫。資料擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，圖片展示範圍與作業中暴潮預報系統第一層計算域相同，介於東經 110 度到東經 134 度及北緯 10 度到北緯 35 度。標題顯示圖中展示颱風路徑總數，合計為 252 條，與颱風資料庫紀錄對台灣造成影響之颱風事件數相同。圖中黑線表示海岸線，著色色線表示路徑期間之颱風強度分類。紫色、藍色、綠色依序代表熱帶性低氣壓、輕度颱風、中度颱風。

從圖中可以看出，ECMWF 與最佳路徑資料合併產出的路徑分布較為雜亂或不連續，尤其是在颱風強度為熱帶性低氣壓時，颱風中心位置可能會有不連續跳動的情形，該現象反映出若僅靠海平面氣壓搭配 10 米風速二維資料分布，利用系統性的判讀標準流程可能無法準確定位颱風中心，勢必需要人為協助判斷。

除了路徑不連續的部分，颱風主要自計算域東南區塊生成或進入展示範圍後往西北方向進入計算域，在菲律賓北部、台灣沿海地區及中國沿岸分布較為密集。儘管有主要趨勢，但仍可見到各種不同方向和形狀的路徑，展現了颱風行為的複雜性。此外，從著色路徑分布的範圍來看，中度颱風記錄較為稀少，而輕度颱風主要分布在展示範圍中間、東部及東北部海域，熱帶低氣壓則涵蓋大部分展示區域。圖中亦顯示有大量的路徑直接穿越台灣，顯示台灣經常受到颱風直接侵襲。有許多路徑雖未直接穿越台灣，但在台灣周圍海域經過，這些颱風也可能對台灣造成間接影響，這樣的路徑分布凸顯了台灣需要重視颱風防災工作的必要性。

圖 4—11 為 ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內強

度分布圖。二維模式產品資料來源為哥白尼氣候變遷服務(Copernicus Climate Change Service, C3S)氣候資料儲存系統(Climate Data Store, CDS)，最佳路徑資料來源為中央氣象署颱風資料庫，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，展示範圍與作業中暴潮預報系統相同，介於東經 110 度到東經 134 度及北緯 10 度到北緯 35 度。圖中黑線表示海岸線，著色點表示該點紀錄位置之颱風強度分類。紫色、藍色、綠色、橘色依序代表熱帶性低氣壓、輕度颱風、中度颱風及強烈颱風。

圖中展示資料點數依據颱風資料庫儲存之歷史颱風位置，各事件資料點間隔依據觀測技術進步及警報發布階段不同，有 1 小時至 6 小時不等。颱風強度依據該紀錄點之近中心最大風速進行分類，分別為熱帶性低氣壓 (<17.2 公尺/秒)、輕度颱風 (介於 17.2 至 32.6 公尺/秒)、中度颱風 (介於 32.7 至 50.9 公尺/秒) 及強烈颱風 (51.0 公尺/秒以上)。其中輕颱紀錄為 4983 筆，佔所有資料中多數，其次為熱帶性低氣壓 (2405 筆)、中颱 (155 筆)，在此資料庫中沒有達到強颱等級的資料。

颱風強度資料分布情形視覺上看起來相當整齊，主要因為 ECMWF ERA5 之模式解析度為 0.25 度。台灣周圍資料點密集，但陸地區域沒有颱風中心紀錄，主要原因可能為颱風接近登陸期間結構受到周圍地形破壞，模式在台灣陸地區域以外區域偵測到相對低壓之位置並將其作為颱風中心，因此可以預期在靠近台灣區域時，利用 ECMWF ERA5 之二維資料進行颱風中心定位可能會有較大的誤差。資料於台灣周圍海域相當密集，以輕颱資料為主。其中中颱資料多位於台灣東部、菲律賓東部及台灣東北部海域地區。輕颱強度資料則覆蓋大部分圖片展示範圍，熱帶性低氣壓資料多位於中國陸地區域或圖片展示範圍東南部區域，在南中國海盆地區域，影響台灣之颱風事件強度並未達到中度颱風以上標準。

由於圖 4—10 及圖 4—11 無法清楚展示颱風資料點的重疊分布情形。圖 4—12 展示最佳路徑資料庫中紀錄之颱風中心紀錄密度分布，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年。圖中黑線表示海岸線，色階表示該點紀錄之計數，白色區域則顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的颱風中心記錄密

集程度越高，但與颱風強度無直接相關。

圖片中顯示颱風中心記錄的分佈最高密度主要集中在菲律賓東北方、台灣周圍沿海地區及日本琉球地區的海域。整體來看，颱風中心位置密度分布沿著展示範圍東南部海域往西北方向逐漸增加，在台灣東南部、琉球群島地區及東海地區達到密度最高值後持續往西北方向遞減，以此主要密度高趨向兩側也有遞減的情形，延伸至南中國海及東海區域，反映了許多颱風通過或影響臺灣的情況。

圖 4—13 為網格化之颱風事件近中心最大風速平均值分布，單位為公尺/秒，資料來源為 ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式結果，時間區段為 1980 年至 2023 年。網格色階表示該網格內所有資料點之近中心最大風速平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的近中心最大風速平均值越高。

途中展示範圍大部分區域顯示橙色。風速介於 20 至 50 公尺/秒之間。較高的數字（10+）在台灣沿海區域更為常見，顯示這些地區颱風發生的頻率較高。

參考圖 4—10 之路徑分布，可以知道大部分颱風路徑自展示範圍東南區域往西北方向前進，當我們從圖 4—13 上的東南角向西北移動時，風速強度和颱風頻率都明顯增加，且雖然差距不大，但較高風速似乎集中在菲律賓和台灣以東的公海地區。

圖 4—14 展示網格化之颱風事件中心氣壓平均值分布，單位為毫巴（百帕），資料來源為 ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式結果，時間區段為 1980 年至 2023 年。網格色階表示該網格內所有資料點之氣壓平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的颱風中心氣壓平均值越高。

從圖片展示範圍中可以看到，東南部的颱風中心氣壓明顯較高，往西北方向移動則有降低的趨勢。台灣東部海域的氣壓值約在 960 百帕，而中心氣壓值較低

的資料點集中在台灣東北部往日本方向，此區域網格內平均資料點相對稀少，但氣壓值可以低至 940 百帕。此外，台灣東部、東南部的有效氣壓紀錄數量普遍多於台灣西部地區，且台灣東部平均氣壓值也普遍低於西部，顯示颱風強度在東部地區之記錄普遍高於西部地區紀錄。圖中呈現之氣壓分布與圖 4—13 之風速分布有明顯的負相關，這樣的現象符合氣象原理：熱帶氣旋中較低的中心氣壓通常有較強的氣壓梯度可以產生較高的風速變化。

圖 4—14 展示網格化之颱風事件七級風半徑平均值分布，單位為公里，資料來源為 ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式結果，時間區段為 1980 年至 2023 年。圖中黑線表示海岸線，網格色階表示該網格內所有資料點之七級風半徑平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的七級風半徑平均值越高。

以資料空間分布特性而言，七級風半徑值在展示範圍中有從東南向西北增加的趨勢，自 150 公里增長至 350 公里以上，在台灣西部台灣海峽、東北部往日本方向海域之七級風半徑可以增加至 400 公里以上。相較之下，台灣西南部與菲律賓北部之七級風半徑平均值較低，約為 250 至 300 公里。值得注意的部分是，有些七級風半徑的極值分布在陸地沿海地區，很有可能是颱風結構受陸地破壞後無法精確捕捉最大風速值及七級風半徑所導致之結果。而往地圖東北方向較大規模之颱風，可能由於在海上停留時間較長，或正在過渡為溫帶氣旋等因素所造成。

由圖 4—13 至圖 4—15 中顯示，颱風資料庫所紀錄之三種參數間互有關連。

以近中心最大風速與中心氣壓為例，此兩參數呈現強烈的負相關性，風速較高的區域通常對應於中心氣壓較低的區域，這與更強、更有組織的熱帶氣旋是一致的。近中心最大風速與七級風半徑之間存在普遍的正相關性，最大風速較高的地區往往具有較大的七級風半徑，這表明較強的風暴往往具有較大的強風面積。較低的中心氣壓通常對應於較大的七級風半徑，這再次表明較強的風暴(氣壓較低)往往規模較大。此外，所有參數均顯示，與較低緯度地區相比，北緯 20 度至 30

度開放海域處之氣旋風暴有強度更強、尺寸更大的總體趨勢。這可能與海面溫度、大氣條件或該地區風暴的典型生命週期和軌跡等因素有關。

觀察三種參數於空間分布的情況可以看到，台灣東部沿海延伸至西北太平洋遠洋地區，尤其是北緯 20 至 25 度的熱帶氣旋往往有更高的強度以及更大的規模，且當其向西或向北移動時，強度通常都會減弱，七級風半徑則可能變小，顯示台灣、菲律賓地區的東海岸通常較其西部地區面臨更強、更大的颱風。

圖 4—16 為 ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫之颱風參數資料密度分布圖。上、中、下圖依序展示近中心最大風速、颱風中心氣壓及七級風半徑之機率密度分布，依長條圖繪製。

其中近中心最大風速機率密度分度圖之分帶為 5 公尺/秒，資料區間分布於 15 至 40 公尺/秒之間。分佈呈現左偏，其中最高峰在 20 至 25 公尺/秒之間，在風速高於 25 公尺/秒區間後，機率密度顯著降低，很少有颱風的最大風速超過 35 公尺/秒。

颱風中心氣壓機率密度分度圖之分帶為 10 百帕，資料區間分布於 930 至 1000 百帕之間。氣壓值從左到右減小，因此颱風強度由左至右增強，以方便與近中心最大風速分布趨勢互相比較。氣壓分布之趨勢嚴重偏向左側，亦即多數颱風之中心氣壓值較高，且熱帶氣旋最常見的中心氣壓在 980 至 990 百帕之範圍內，990 至 1000 百帕區間內的機率也很高隨著氣壓值降低，機率密度呈現穩定下降的趨勢，而氣壓值低於 950 百帕之機率密度顯著降低，低於 940 百帕之資料數量十分稀少。

七級風半徑機率密度圖之分帶為 50 公里，資料區間分布介於 0 至 1500 公里之間。資料分布型態呈現常態分佈，但有輕微的右偏，峰值機率介於 100 至 200 公里範圍內。圖中顯示，熱帶氣旋之尺寸於颱風資料庫之紀錄中通常有一定的範圍，分佈看起來大致呈常態（鐘形），略為右偏，且峰值集中在 150 至 300 公里之間，而七級風半徑大於 400 公里或小於 100 公里的資料密度相對較少，很少有七級風半徑超過 700 公里。

圖 4—16 中的近中心最大風速分佈顯示，本資料集中的熱帶氣旋大部分屬於輕颱至熱帶低氣壓強度，達到極端風速的相對較少。颱風中心氣壓分佈與近中心最大風速分佈型態較為吻合，皆為左偏，大部分中心氣壓直接在 970 百帕以上。而七級風半徑資料分布型態則顯示，大多數熱帶氣旋風場之半徑在 100 至 300 公里之間，三種分佈均表現出一定的偏度。

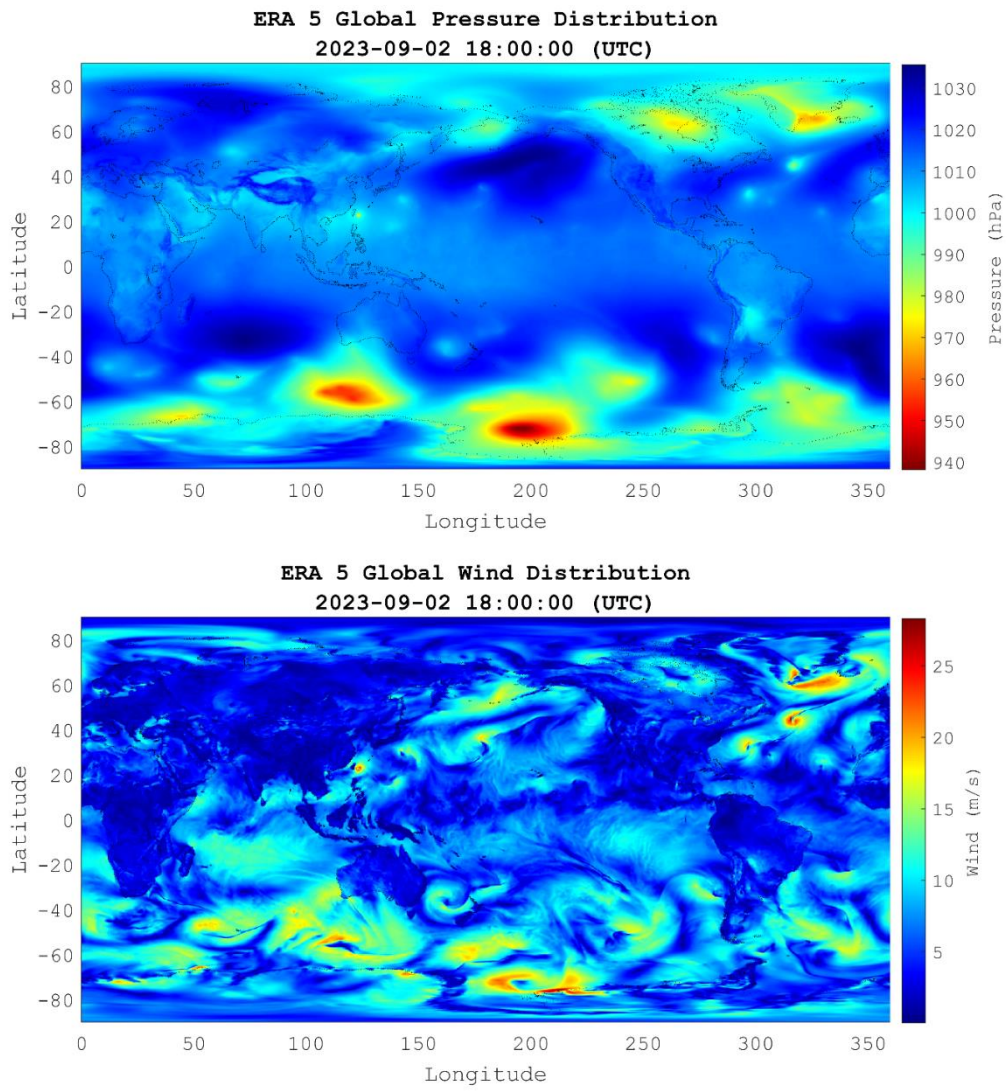


圖 4—9、ECMWF ERA5 全球（上）海表面氣壓與（下）10 米風速資料。

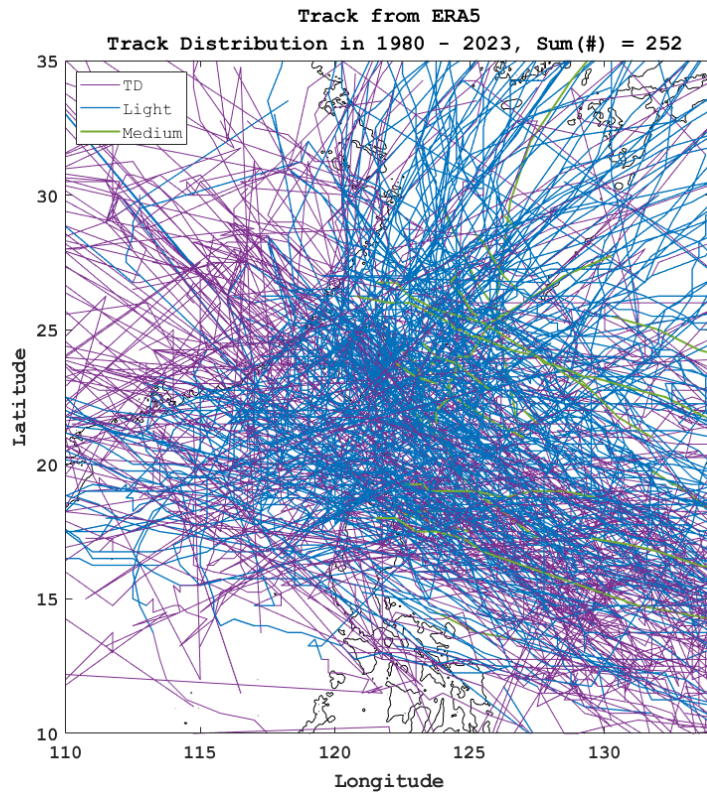


圖 4—10、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風路徑分布圖。

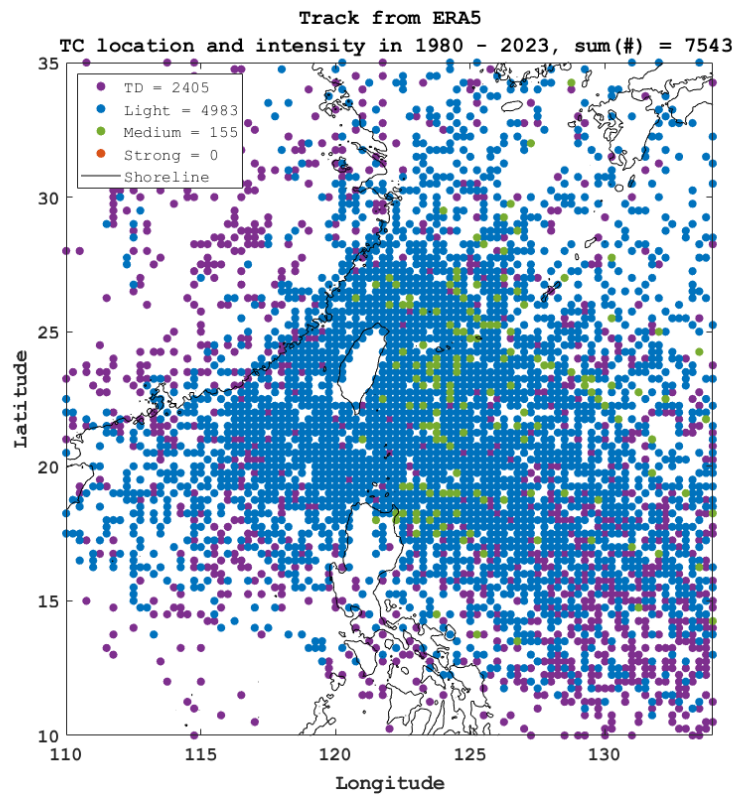


圖 4—11、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風強度分布圖。

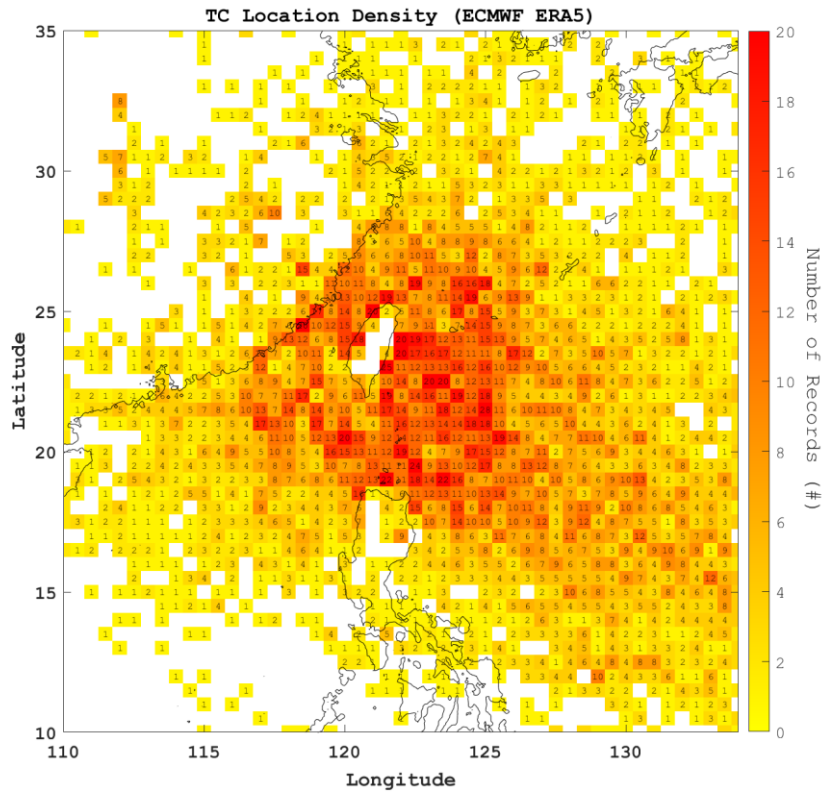


圖 4—12、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風中心資料密度分布圖。

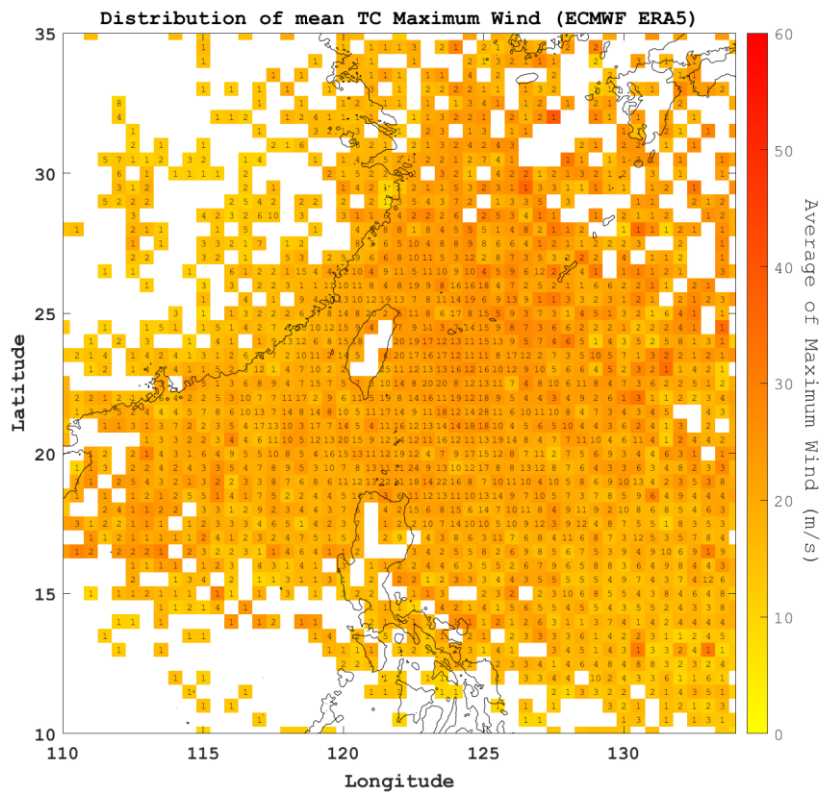


圖 4—13、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風中心平均近中心最大風速分布圖。

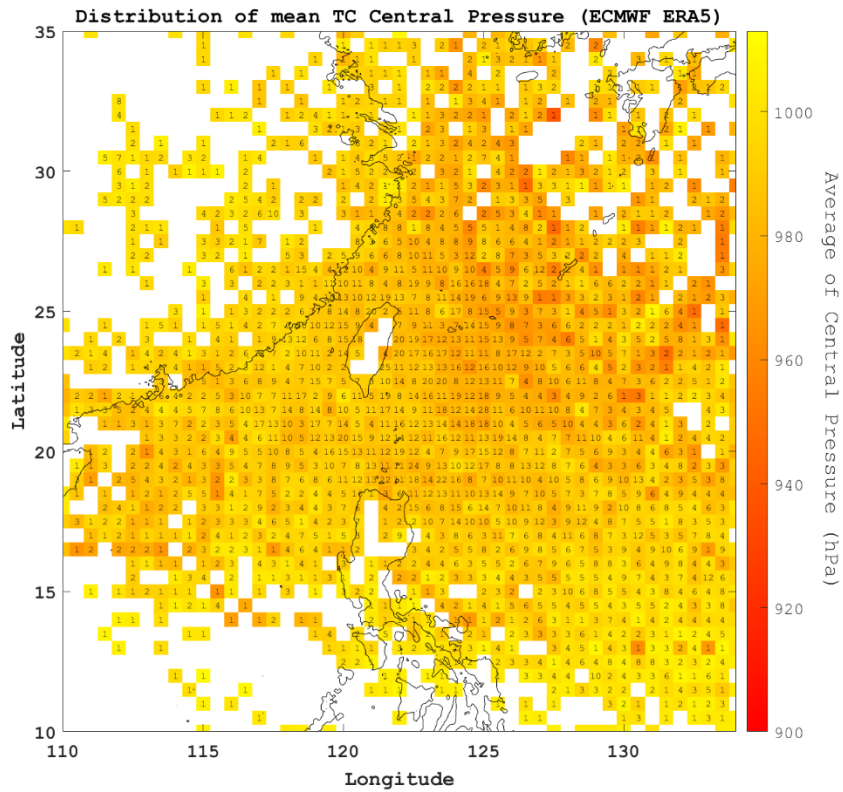


圖 4—14、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風平均中心氣壓分布圖。

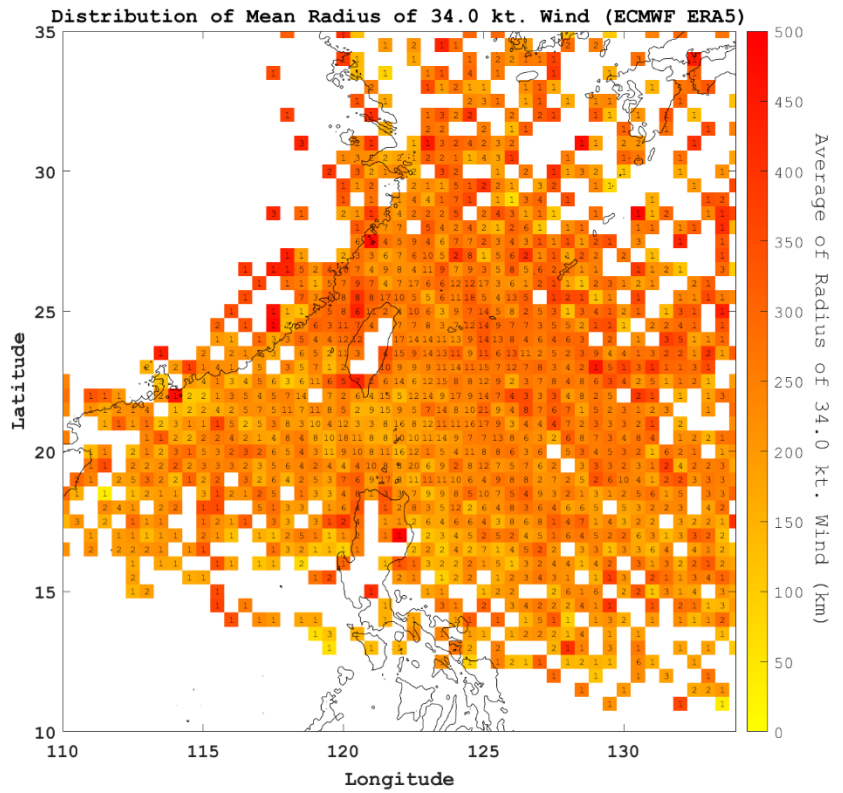


圖 4—15、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫擷取之模式內颱風平均七級風半徑分布圖。

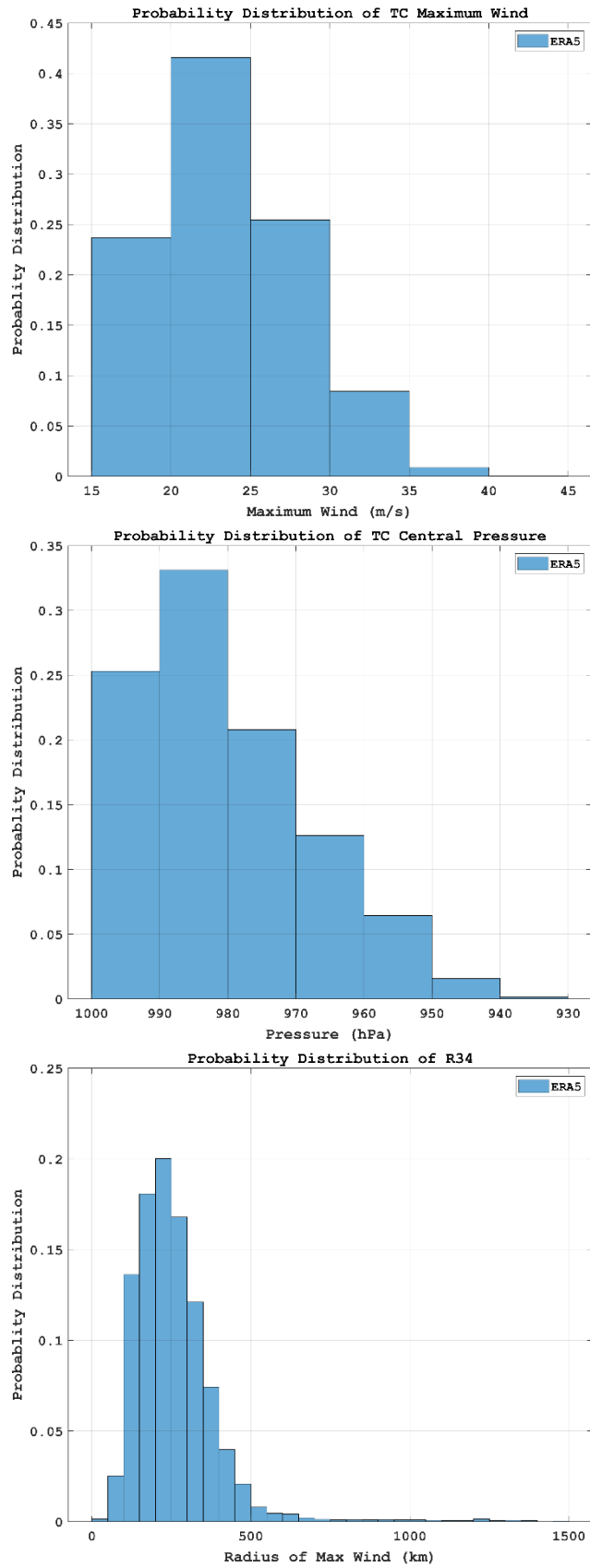


圖 4—16、ECMWF ERA5 搭配中央氣象數最佳路徑資料庫之颱風參數資料密度分布圖。(上) 近中心最大風速 (中) 颱風中心氣壓 (下) 七級風半徑。

### 4-3 取得 TWRF 二維大氣風場之重點颱風參數

作業單位提供之二維氣象場資料集源於「智慧海象環境災防服務」計畫工作項目之一：「臺灣地區強風地圖建置」之相關模式產品，該研究計畫中，應用 WRF (Weather Research and Forecasting model) 模式模擬並收集歷史侵臺颱風之風速資料，針對臺灣區域極限風速進行評估。

WRF 模式是美國國家大氣研究中心(NCAR, National Center for Atmospheric Research) 所發展之新一代中尺度數值天氣預報模式。主要用以模擬或預報如局部天氣系統(山谷風、海陸風等)、中尺度天氣系統(鋒面、對流系統等)，以及颱風等。WRF 模式透過模式程式碼高度模組化及平行化，以達到作業預報時限的需求。

中央氣象署所開發的颱風數值預報系統(Typhoon WRF, TWRF)，自約 2010 年起由氣象署 TWRF 小組致力發展，為基於 WRF 系統架構開發之颱風作業預報模式，主要負責進行東亞地區區域之颱風預報。模式藉由初始時間前 12 小時開始之冷啟動(cold start)部分循環(Partial cycling)及連續兩次之全循環(full cycling)更新資料方法，加上混合式三維變分資料同化，減少模式於第一時間步進行模擬時尚未進入到合理狀態的情形，同時也透過 WRF 渦旋初始化技術(TC Bogus and Relocation scheme)，降低颱風初始強度與中心位置誤差。另一方面，在每一次資料同化時均使用分析場擬合技術(analysis blending)技術，降低大尺度環流誤差。

「臺灣地區強風地圖建置」研究團隊重建 1990 至 2021 年間有發布警報之颱風案例，利用 TWRF 模式重新模擬以建置臺灣地區長期年度最大風速資料，進而計算 50 年重現期極限風速。

針對有發警報之颱風個案，執行 TWRF 模式之第一組模擬初始時間設定在該個案發布海上警報前 0-12 小時，最後一組模擬初始時間設定在所有警報解除前 0-12 小時。每一組模擬包含自初始時間前 12 小時開始模擬 6 小時的冷啟動(cold-start)模擬、及自初始時間前 6 小時開始模擬 6 小時的更新循環(updated-cycle)

模擬及自初始時間開始模擬 30 小時的更新循環(updated-cycle)主模擬。每組模擬主模擬積分時間均為 30 小時，並自每個颱風個案的第一組模擬開始至最後一組，每組初始時間間隔 6 小時。

現行的中央氣象署 TWRP 作業模式使用 NCEP 全球模式資料作為輸入之初始條件與邊界條件，但研究所選用之部分歷史颱風個案發生時間遠早於 NCEP-GFS 或 NCEP-FV3 公開資料集之時間區段，因此需使用模式長期再分析資料(研究中選用 ECMWF-ERA5)，受影響之颱風事件時間介於 1990 至 2008 年。以 ECMWF ERA5 再分析資料作為輸入資料之 TWRP 系統中，由於缺乏資料同化所需之觀測資料，故模式執行時僅保留颱風渦旋初始化(TC Relocation)的步驟。

對於不同時期的颱風模擬，該研究團隊已完成成功利用適當的模式預報初始場資料及再分析資料，搭配模式設定，評估最佳模擬方式，並利用觀測資料進行校驗，包含颱風路徑誤差、強度誤差校驗以及地面風速校驗等。

目前透過作業單位取得之氣象場資料來源主要產出自 TWRP2.4 版 (WRF3.8)，模式網格為巢狀網格，水平最佳解析度為 3 公里，地圖投影法採蘭伯特正軸等角圓錐投影 (Lambert conformal conic projection)。

除了二維氣象場如海表面氣壓、水平方向 10 米風速之沿經度、沿緯度分量外，還包含模式模擬結果之颱風中心定位資料，包含颱風中心位置 (經、緯度) 及颱風中心氣壓值。

模式颱風中心定位方面，根據氣象署預報中心及颱風資料庫所提供之中心定位、中心氣壓及近中心最大風速，計算個案於模擬期間之路徑誤差與強度誤差，主要依據以下參數作為定位依據：

1. 近地面風(10 米風)氣旋式環流中心。
2. 海平面氣壓最低值。
3. 當系統較弱、為大環流系統或中心不明顯時，以大範圍之系統環流中心為主。
4. 當環流為多渦旋中心時，以各渦旋互繞之中心為主。

目前合作團隊可提供之颱風個案及模擬組數細節展示，如表 4—1 至表 4—

3。其中，表 4—1 展示採用 NCEP-FV3 作為 TWRf 邊界條件執行重新模擬之颱風個案，合計有 9 個颱風事件，模擬組數為 124 組；表 4—2 展示採用 NCEP-GFS 作為 TWRf 邊界條件執行重新模擬之颱風個案，合計有 59 個颱風，其中有三個時間區段同時存在兩個颱風，故合併為同一個案執行，合計 56 個案例，總模擬組數為 642 組。表 4—3 展示團隊預計採用 ECMWF ERA5 作為 TWRf 邊界條件執行重新模擬之颱風個案，合計有 122 個颱風，其中有三個時間區段同時存在兩個颱風，故合併為同一個案執行，總模擬組數為 1395 組。作業單位與合作團隊可提供之個案以紅字標註，合計有 21 個颱風個案，模擬組數為 282 組。

研究過程中為避免執行案例中有複數颱風之風場結構彼此干擾造成後續資料分析困難，因此在颱風參數擷取過程中會將存在複數颱風個案的模擬實驗進行排除。

圖 4—17 為自 TWRf 模式 Re-run 分析場資料擷取之模式內颱風路徑分布圖，資料來源為作業單位提供，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年。圖片展示範圍與作業中暴潮預報系統相同，介於東經 110 度到東經 134 度及北緯 10 度到北緯 35 度。標題顯示圖中展示颱風路徑總數，合計為 84 條。圖中黑線表示海岸線，著色色線表示路徑期間之颱風強度分類。紫色、藍色、綠色、橘色依序代表熱帶性低氣壓、輕度颱風、中度颱風及強烈颱風。

圖中颱風路徑集中在台灣沿海區域、菲律賓東部海域到台灣東部之間的區域，大約在東經 120 度到 125 度、北緯 15 度到 25 度之間，且路徑似乎更傾向於向北和向東移動，符合西太平洋颱風的典型移動模式。

雖然主要趨勢是西北向，但仍可見一些特殊路徑，其中向北轉向的路徑，可能是受到副熱帶高壓影響。少數向西南方向移動的路徑，可能是受到季風或其他天氣系統影響。此外，台灣島和呂宋島的存在似乎對部分颱風路徑造成偏轉或分叉效應。

由於 TWRf 模式重新模擬之初始時間以颱風事件發布第一次警報時為基準，並以中止發布警報時間做為最後一次事件重新模擬時間，因此圖內展示之颱風路

徑並未包含颱風事件之完整生命週期，因此颱風路徑起點之強度通常非熱帶性低氣壓，且圖中展示之路徑密集圍繞台灣周圍。從著色路徑分布的範圍來看，強烈颱風記錄主要分布在台灣東南部南部海域，且有兩個颱風事件較為明顯。大部分颱風在台灣與菲律賓東部時強度較其位於台灣西部及中國沿海地區時強，並且在經過台灣陸地後強度會降至輕颱或熱帶性低氣壓，可能由於颱風途經陸地及相對淺水區域時受地形影響導致強度減弱。

圖4—18為自TWRP模式Re-run分析場資料擷取之模式內颱風強度分布圖，資料來源為作業單位提供，擷取時間區段為1980年至2023年，有效颱風個案最早時間為1990年。展示範圍與作業中暴潮預報系統相同，介於東經110度到東經134度及北緯10度到北緯35度。圖中黑線表示海岸線，著色點表示該點紀錄位置之颱風強度分類。紫色、藍色、綠色、橘色依序代表熱帶性低氣壓、輕度颱風、中度颱風及強烈颱風。

圖中展示資料點數依據TWRP模式重新模擬預報之時間間隔，在同一事件中為6小時一筆資料，總資料比數為1006筆。颱風強度依據該紀錄點之近中心最大風速進行分類，分別為熱帶性低氣壓(<17.2公尺/秒)、輕度颱風(介於17.2至32.6公尺/秒)、中度颱風(介於32.7至50.9公尺/秒)及強烈颱風(51.0公尺/秒以上)。其中輕颱紀錄為494筆，占有資料中最多數，而中颱資料筆數與其相當(483筆)，強颱及熱帶性低氣壓資料數則相對稀少，分別為18筆及11筆。

資料點主要集中在菲律賓東部海域到台灣東部之間的區域，北緯15度到30度之間、東經120度到130度之間最為密集，資料點在東南-西北方向上呈現一定的延伸趨勢，反映了典型的颱風移動路徑。其中強烈颱風資料多出現在台灣東南部的開闊海域，而靠近陸地(如台灣、菲律賓)的區域，輕度和中度颱風的比例明顯增加。靠近中國東南沿海的區域，強度普遍較弱，多為輕度或中度颱風。熱帶性低氣壓的資料點分布較為分散，可能代表颱風的形成初期或消散末期。在北緯30度以上的區域有少量孤立的數據點，可能代表一些不尋常的颱風路徑。

由於圖4—17及圖4—18無法清楚展示颱風資料點的重疊分布情形，因此利

用圖 4—19 展示 TWRP 模式 Re-run 分析場資料擷取之模式內颱風中心紀錄密度分布。資料來源為作業單位提供，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年。圖中黑線表示海岸線，色階表示該點紀錄之計數，白色區域則顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的颱風中心記錄密集程度越高，但與颱風強度無直接相關。

圖片中顯示颱風中心記錄的分佈範圍並不均勻，大多數有颱風活動的區域密度值在 1 至 4 之間，最高密度區域的值接近 7，但沒有達到圖例顯示的最高值 20。最高密度集中在颱風活動主要集中在北緯 15 度到 30 度之間，東經 120 度到 130 度之間的區域，最高密度區域位於台灣東部海域，菲律賓呂宋島東北部海域也顯示較高的密度，呈現深黃色到淺橙色，表明這裡是颱風中心最常經過的地方。颱風中心資料量從台灣東部為中心向四周擴散，密度逐漸降低，而資料量往西北和東南方向密度降低的趨勢較為緩慢，暗示了颱風的主要移動方向，大致呈東南—西北走向。台灣島周圍的密度分布顯示出明顯的地形效應，島嶼西側的密度明顯低於東側。在研究區域的邊緣，如北緯 30 度以上和東經 130 度以東的區域，以及靠近中國大陸沿海的區域，颱風活動明顯減少。

圖 4—20 展示網格化之颱風事件近中心最大風速平均值分布，單位為公尺/秒，資料來源為作業單位提供之 TWRP 模式 Re-run 分析場，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年。圖中黑線表示海岸線，網格色階表示該網格內所有資料點之近中心最大風速平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的近中心最大風速平均值越高。

圖中顯示，颱風活動主要集中在北緯 15 度到 30 度之間，東經 115 度到 130 度之間的區域，與之前的密度分布圖相符，大多數區域的颱風資料頻率在 1 至 4 之間，台灣東部海域和菲律賓東北部海域的颱風資料頻率相對較高，有些網格達到 6 次以上。

最高風速區域主要位於菲律賓東部海域，呈現深橙色到紅色，表明這裡是颱

風強度最強的區域，最高風速值可能超過 50 公尺/秒。台灣東部海域也顯示較高的風速值，但整體略低於菲律賓東部海域，介於 40 至 50 公尺/秒之間。台灣島周圍的風速分布顯示出地形效應，島嶼西側的風速明顯低於東側。菲律賓群島周圍也可以觀察到類似的效應，顯示陸地對颱風強度有減弱作用。

從菲律賓東部向西北方向，風速逐漸降低，形成一個明顯的梯度，而向東北方向（日本南部海域），風速降低的趨勢較為緩慢。靠近中國大陸沿海的區域，風速值明顯較低，大多在 20 至 30 公尺/秒之間，北緯 30 度以上之資料平均風速值也較低。

圖 4—21 展示網格化之颱風事件中心氣壓平均值分布，單位為毫巴(百帕)，資料來源為作業單位提供之 TWRP 模式 Re-run 分析場，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年。圖中黑線表示海岸線，網格色階表示該網格內所有資料點之氣壓平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的颱風中心氣壓平均值越高。

圖中顯示，颱風活動主要集中在北緯 15 度到 30 度之間，東經 120 度到 130 度之間的區域，與先前的風速分佈圖相符。最低氣壓區域（深橙色到紅色）主要位於菲律賓東部海域，顯示這裡是颱風強度最強的區域，最低值可低至可能低於 920 百帕。台灣東部海域也顯示較低的氣壓值，但整體略高於菲律賓東部海域，介於 920 至 940 百帕之間。從菲律賓東部向西北方向，氣壓逐漸升高，形成明顯的梯度，而向東北方向（日本南部海域），氣壓升高的趨勢較為緩慢。台灣島周圍的氣壓分佈顯示出地形效應，島嶼西側的氣壓明顯高於東側，菲律賓群島周圍也可以觀察到類似的效應，顯示陸地對颱風強度有減弱作用。靠近中國大陸沿海的區域，氣壓值明顯較高，大多在 960 至 980 百帕之間。與圖 4—20 相比，颱風中心氣壓分佈與先前的最大風速分佈圖呈現高度的一致性，低氣壓區域對應高風速區域，互相印證了颱風的強度特徵。

圖 4—22 展示網格化之颱風事件七級風半徑平均值分布，單位為公里，資料

來源為作業單位提供之 TWRf 模式 Re-run 分析場，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年。圖中黑線表示海岸線，網格色階表示該網格內所有資料點之七級風半徑平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的七級風半徑平均值越高。

圖中顯示，資料點主要集中在台灣周邊海域，大致呈現橢圓形分布，覆蓋範圍約為北緯 15 至 30 度，東經 115 至 130 度，且台灣本島及其周邊海域的資料密度最高。台灣島嶼的存在明顯影響了分布模式，在台灣西側可見資料密度較低但七級風半徑值較大的區域。菲律賓呂宋島北部也可見類似效應，但程度較輕。

圖 4—20 至圖 4—22 展示了自 TWRf 模式 Re-run 分析場資料擷取出之關鍵熱帶氣旋參數的空間分佈，各圖間顯示三種參數間互有關連。其中，最大風速和中心氣壓之間有明顯的負相關，風速最高的區域與中心氣壓最低的區域密切對應，這與熱帶氣旋的物理性質一致，其中較低的中心氣壓與較強的風速有關。然而，熱帶氣旋的強度（最大風速和中心氣壓）和大小（七級風的半徑）之間的關係較為複雜。一般來說，風速較高、氣壓較低的地區往往有較大的七級風半徑，但這在整個地區並不均勻。各圖中展示強度較高的熱帶氣旋（即風力較高、氣壓較低、半徑較大）主要集中在台灣沿海區域及東南部海面，這可能表明這些地區有利於氣旋增強的條件，可能是由於海面溫度升高或其他環境因素所致。即使如此，熱帶氣旋平均強度最強的地區相對靠近陸地，例如菲律賓、台灣、日本南部等地，凸顯了高強度熱帶氣旋對沿海地區產生重大影響的可能性。

圖 4—23 為 TWRf 初始場之颱風參數資料密度分布圖。上、中、下圖依序展示近中心最大風速、颱風中心氣壓及七級風半徑之機率密度分布，依長條圖繪製。其中近中心最大風速機率密度分度圖之分帶為 10 公尺/秒，資料區間分布於 15 至 60 公尺/秒之間。分佈大致呈現略為右偏的常態分佈，其中最高峰在 30 至 35 公尺/秒之間，次要的峰值位於 25 至 30 公尺/秒之間，大多數熱帶氣旋的最大風速在 25 至 40 公尺/秒之間，在風速高於 55 公尺/秒與低於 20 公尺/秒的區間，

機率密度顯著降低。

颱風中心氣壓機率密度分度圖之分帶為 10 百帕，範圍從 900 至 1000 百帕。氣壓值從左到右減小，因此颱風強度由左至右增強，以方便與近中心最大風速分布趨勢互相比較。氣壓分布之趨勢偏向左側，亦即多數颱風之中心氣壓值較高，且熱帶氣旋最常見的中心氣壓在 970 至 980 百帕之範圍內，大多數熱帶氣旋的中心氣壓在 950 至 990 百帕之間。隨著氣壓值降低，機率密度呈現穩定下降的趨勢，而氣壓值低於 940 百帕之機率密度顯著降低。

七級風半徑機率密度圖之分帶為 50 公里，資料區間分布介於 0 至 1100 公里之間。圖中顯示，熱帶氣旋之尺寸於颱風資料庫之紀錄中通常有一定的範圍，機率密度分佈呈現長尾、左偏，且峰值集中在 100 至 150 公里之間，大於 600 公里之極值分布相對較少，多數資料介於 50 至 400 公里之間。

圖 4—24 為自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風預報路徑分布圖，資料來源為作業單位提供，包含初始場及預報場，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年，合計 84 個颱風事件，1008 次重新模擬之颱風預報。展示範圍與作業中暴潮預報系統相同，介於東經 110 度到東經 134 度及北緯 10 度到北緯 35 度。標題顯示圖中展示颱風路徑預報總數，合計為 1008 條。圖中黑線表示海岸線，著色色線表示路徑期間之颱風強度分類。紫色、藍色、綠色、橘色依序代表熱帶性低氣壓、輕度颱風、中度颱風及強烈颱風。

圖中顯示，所蒐集之颱風預報路徑主要活動區域位於菲律賓東部海域、台灣周邊、南中國海北部，且在台灣東部和菲律賓呂宋島東北部之間的海域，路徑密度最高。路徑大多數自東南方向往西北或北向移動，部分向西移動。路徑展現出高度的多樣性，反映了影響該地區颱風路徑的複雜因素。許多路徑在接近陸地時，顯示出明顯的轉向現象。

路徑顏色的變化表明颱風強度在移動過程中會發生變化，通常在接近陸地時減弱。其中，熱帶性低氣壓主要在台灣海峽往中國沿海方向，輕度颱風及中度颱風則呈現廣泛的分布，但中國東南沿海與台灣海峽附近以輕颱為主，中度颱風則

集中在菲律賓東部到台灣東部的海域。強烈颱風之預報路徑分布主要出現在菲律賓東部外海，部分延伸至台灣東部。

圖 4—25 為自 TWRf 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風強度分布圖。資料來源為作業單位提供，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，包含初始場及預報場，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年。展示範圍與作業中暴潮預報系統相同，介於東經 110 度到東經 134 度及北緯 10 度到北緯 35 度。圖中黑線表示海岸線，著色點表示該點紀錄位置之颱風強度分類。紫色、藍色、綠色、橘色依序代表熱帶性低氣壓、輕度颱風、中度颱風及強烈颱風。

圖中展示資料點數依據 TWRf 模式重新模擬之模式產品輸出時間間隔，為 1 小時 1 筆資料。其中有部分重新模擬於預報期間，颱風事件處於消散期，導致颱風結構不佳不利於定位颱風中心，因此無法提供定位資訊，刪減無法定位颱風中心之預報資料後，有效資料點數為 26750 筆。颱風強度依據該紀錄點之近中心最大風速進行分類，分別為熱帶性低氣壓 (<17.2 公尺/秒)、輕度颱風 (介於 17.2 至 32.6 公尺/秒)、中度颱風 (介於 32.7 至 50.9 公尺/秒) 及強烈颱風 (51.0 公尺/秒以上)。其中中度颱風紀錄為 14672 筆，佔所有資料中多數，其次為輕度颱風 (10240 筆)、強烈颱風 (1565 筆) 及熱帶性低氣壓 (273 筆)。

資料點主要集中在菲律賓東部至台灣東部的海域，向東北延伸至日本南部，且台灣東部和菲律賓呂宋島東北部之間的海域資料點最為密集。熱帶性低氣壓資料主要分布在中國陸地區域，這可能反映了颱風在登陸後消亡的過程。輕度颱風則呈現廣泛分布，在中國東南沿海、台灣海峽、日本南部及菲律賓東部外海較為集中。中度颱風從菲律賓東部延伸至台灣周邊和日本南部，幾乎覆蓋了整個展示範圍的中心部分。強烈颱風主要集中在菲律賓東部外海至台灣東南部海域，南中國海近菲律賓西北部及台灣西南部海域也有形成明顯的集中區域。資料點的強度變化可以觀察到明顯從東南向西北逐漸減弱的趨勢，且在靠近陸地的區域，強烈颱風和中度颱風的比例有明顯降低的情形。

由於圖 4—24 至圖 4—25 無法清楚展示颱風資料點的重疊分布情形。圖 4—

26 展示自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風中心紀錄密度分布。資料包含初始場及預報場，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年。圖中黑線表示海岸線，色階表示該點紀錄之計數，白色區域則顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的颱風中心記錄密集程度越高，但與颱風強度無直接相關。

圖中資料覆蓋了大約東經 110 度至 135 度，北緯 10 度至 35 度的區域，範圍包括了台灣、中國東南沿海、日本南部、菲律賓群島及其周邊海域。其中最高密度區域集中在台灣東部海域，大約位於北緯 21 度至 25 度、東經 123 度至 126 度之間，另一個高密度區域出現在呂宋島東部海域，呈現從台灣東部海域向外，由高到低的漸變趨勢。資料點分布密度自台灣區域向西北方向（中國）和向東南方向（菲律賓以東）的密度較往東北方向（日本南方）降低較快。觀察台灣周圍之資料密度分布情形，台灣北部和東北部海域的密度高於南部海域，台灣西部、中國東南沿海地區及菲律賓群島南部的密度相對較低。

圖 4—27 展示網格化之颱風事件近中心最大風速平均值分布，單位為公尺/秒，資料來源為作業單位提供之 TWRP 模式所有 Re-run 資料（含預報場及分析場），擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年。圖中黑線表示海岸線，網格色階表示該網格內所有資料點之近中心最大風速平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的近中心最大風速平均值越高。

圖中展示平均最高強度區域主要集中在台灣東部海域向西北方向延伸至日本南海、向東南延伸至菲律賓東部海域，約在東經 120 度至 130 度，北緯 15 至 30 度之間，平均風速可以超過 50 公尺/秒。從菲律賓東部海域向外，風速強度逐漸降低，但向北方（台灣方向）和西北方向（中國大陸）的強度降低較為明顯，這可能反映了颱風在登陸後強度迅速減弱的趨勢。中國東南沿海和台灣北部的平均風速約為 20 至 30 公尺/秒，表示颱風近中心最大風速平均值較低。值得注意

的是，在台灣東部海域可以觀察到一個近中心最大風速相對高的區域，這可能反映了颱風在接近台灣時仍保持較高強度，但比最初形成時略有減弱。

圖 4—28 展示網格化之颱風事件中心氣壓平均值分布，單位為毫巴(百帕)，資料來源為作業單位提供之 TWRf 模式所有 Re-run 資料(含預報場及分析場)，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年。圖中黑線表示海岸線，網格色階表示該網格內所有資料點之氣壓平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的颱風中心氣壓平均值越高。

圖中顯示，資料覆蓋了大約東經 110 度至 135 度，北緯 15 度至 35 度的區域，即台灣、中國東南沿海、日本南部、菲律賓及其周邊海域，律賓東部海域和台灣東部海域的數據點較多，通常在 40-70 之間。最低氣壓區域主要集中在菲律賓東部海域及台灣東部海域，約在東經 120 度至 130 度，北緯 15 度至 25 度之間，颱風中心氣壓平均值最低，可能低於 920 百帕。從台灣東部海域向外，氣壓逐漸升高，普遍向西北方中國沿岸和西南方向(南中國海)的氣壓升高較為明顯，氣壓高值可能接近 1000 百帕。陸地區域的資料點普遍較少，且平均氣壓值通常較高，這可能反映了颱風在登陸後中心氣壓迅速上升的趨勢。此外，低氣壓區域大致對應於之前於圖 4—27 看到的高風速區域，這符合颱風結構的基本特徵。

圖 4—29 展示網格化之颱風事件七級風半徑平均值分布，單位為公里，資料來源為作業單位提供之 TWRf 模式所有 Re-run 資料(含預報場及分析場)，擷取時間區段為 1980 年至 2023 年，有效颱風個案最早時間為 1990 年。圖中黑線表示海岸線，網格色階表示該網格內所有資料點之七級風半徑平均值，網格內數字則表示有效計數之颱風資料點，網格解析度為 0.5 度經緯。白色區域顯示時間區段內無颱風事件紀錄，顏色越深紅，表示該地區經歷的七級風半徑平均值越高。

圖片顯示，最大的七級風半徑區域主要集中在中國東南沿海和台灣海峽附近，約在東經 115 度至 120 度，北緯 20 度至 30 度的區域，最大的七級風半徑可能超過 450 公里。從中國東南沿海向東和向南，七級風半徑逐漸減小，而往律賓東部

海域方向，半徑明顯減小。在菲律賓東部海域（東經 125 度至 130 度，北緯 15 度至 20 度）呈現黃色到橙色，表示七級風半徑平均值較小，可能在 100-250 公里之間，這與之前看到的高風速和低氣壓核心區域大致吻合。此外，在台灣東部海域可以觀察到一個相對較小的七級風半徑區域，這可能反映了颱風在接近台灣前，結構可能變得更加緊湊。而在陸地上（如台灣和菲律賓）的數據點較少，靠近陸地的區域七級風半徑往往較大，這可能反映了颱風在接近陸地時結構的擴展。

有趣的是，七級風半徑的分布與之前看到的最大風速和最低氣壓分布呈現某種程度的負相關。高強度區域（菲律賓東部海域）的七級風半徑較小，而較弱的颱風（靠近中國沿海）反而有較大的七級風半徑。

由圖 4—27 至圖 4—29 中顯示，颱風資料庫所紀錄之三種參數間互有關連。

以近中心最大風速與中心氣壓為例，此兩參數呈現強烈的負相關性，及風速較高的區域通常中心氣壓較低，這是可被預期的，因為更強烈的風暴具有更低的氣壓和更高的風速。有趣的是，最大風速最高的區域並不直接對應於最大的七級風半徑。太平洋開放海域中，較低的中心氣壓通常對應於較小的七級風半徑，但當熱帶氣旋向北移動時，它們通常會減弱（壓力增加），但規模會擴大（七級風半徑更大）。模式預報資料中的颱風，在公海地區與沿海地區表現的特徵並不相同，可能是由於颱風與陸地互動的影響。

圖 4—30 為自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風參數資料機率密度分布圖。上、中、下圖依序展示近中心最大風速、颱風中心氣壓及七級風半徑之機率密度分布，依長條圖繪製。其中近中心最大風速機率密度分度圖之分帶為 5 公尺/秒，資料區間分布於 10 至 70 公尺/秒之間。分佈似乎大致呈現略為偏右的鐘形分布，其中最高峰在 35 至 40 公尺/秒之間，極端情況（20 公尺/秒和 70 公尺/秒）的機率密度顯數降低，而大多數熱帶氣旋的最大風速在 25 至 45 公尺/秒之間。

颱風中心氣壓機率密度分度圖之分帶為 20 百帕，範圍從 900 至 1000 百帕，氣壓值從左到右減小，因此颱風強度由左至右增強，以方便與近中心最大風速分

布趨勢互相比較。氣壓分布之趨勢呈現相對平坦的分布,略偏向高氣壓側,且熱帶氣旋最常見的中心氣壓在 970 至 990 百帕之範圍內。950 至 1000 百帕範圍內分布較為均勻,而氣壓值低於 940 百帕之機率密度顯著降低。

七級風半徑機率密度圖之分帶為 50 公里,資料區間分布介於 0 至 1600 公里之間。圖中顯示,熱帶氣旋之尺寸於颱風資料庫之紀錄中通常有一定的範圍,大致呈長尾、左偏的分布情形,且峰值集中在 100 至 150 公里之間,極值分布相對較少,多數資料介於 50 至 300 公里之間。半徑超過 300 公里的機率迅速下降,少數情況下延伸範圍超過 1000 公里。

與分析場資料相比,利用 TWRF 重新模擬所取得之所有模式資料在最大風速分佈與上圖相比更對稱,中心壓力分佈較為廣泛,顯示了熱帶氣旋強度於模式預報中的多樣性。而七級風半徑之分布情形雖維持相似的分布情形,但資料分布範圍延伸到更大的半徑值。

表 4—1、TWRP (NCEPFV3) 模擬 2019 至 2023 年有發布警報颱風個案之模擬期間及總模擬組數。(初始時間格式為 yymmddhh，時間為 UTC)

颱風編號	颱風名稱	第一組模擬 初始時間	最終組模擬 初始時間	總模擬組數
202314	小犬(KOINU)	23100200	23100606	18
202311	海葵(HAIKUI)	23090100	23090500	17
202309	蘇拉(SAOLA)	23082800	23083106	14
202306	卡努(KHANUN)	23080100	23080406	14
202305	杜蘇芮(DOKSURI)	23072400	23072812	19
202302	瑪娃(MAWAR)	23052900	23053106	10
202220	尼莎(NESAT)	22101500	22101612	7
202212	梅花(MUIFA)	22091012	22091306	12
202211	軒嵐諾(HINNAMNOR)	22090112	22090412	13
202118	圓規(KOMPASU)	21101000	21101200	9
202114	璨樹(CHANTHU)	21090912	21091218	14
202109	盧碧(LUPIT)	21080400	21080706	14
202106	烟花(IN-FA)	21072100	21072406	14
202103	彩雲(CHOI-WAN)	21060300	21060412	7
202020	閃電(ATSANI)	20110412	20110706	12
202008	巴威(BAVI)	20082112	20082212	5
202006	米克拉(MEKKHALA)	20080912	20081106	8
202004	哈格比(HAGUPIT)	20080112	20080312	9
202001	黃蜂(VONGFONG)	20051518	20051700	6
201918	米塔(MITAG)	19092900	19100106	10
201911	白鹿(BAILU)	19082300	19082500	9
201909	利奇馬(LEKIMA)	19080700	19081000	13
201905	丹娜絲(DANAS)	19071612	19071818	10

表 4—2、TWRP (NCEPGFS) 模擬 2009 至 2018 年有發布警報颱風個案之模擬期間及總模擬組數。(初始時間格式為 yymmddhh，時間為 UTC)

颱風編號	颱風名稱	第一組模擬 初始時間	最終組模擬 初始時間	總模擬組數
201822	山竹(MANGKHUT)	18091312	18091600	11
201808	瑪莉亞(MARIA)	18070900	18071100	9
201718	泰利(TALIM)	17091112	17091600	19
201717	谷超(GUCHOL)	17090512	17090700	7
201713	天鴿(HATO)	17082100	17082300	9
201710	海棠(HAITANG)	17072712	17073100	15
201709	尼莎(NESAT)			
201619	艾利(AERE)	16100500	16101000	21
201617	梅姬(MEGI)	16092512	16092800	11
201616	馬勒卡(MALAKAS)	16091500	16091812	15
201614	莫蘭蒂(MERANTI)	16091212	16091418	10

201601	尼伯特(NEPARTAK)	16070600	16070900	13
201521	杜鵑(DUJUAN)	15092618	15092900	10
201515	天鵝(GONI)	15082012	15082318	14
201513	蘇迪勒(SOUDELOR)	15080600	15080818	12
201515	蓮花(LINFA)	15070512	15071100	23
201509	昌鴻(CHANHOM)			
201506	紅霞(NOUL)	15050912	15051112	9
201416	鳳凰(FUNGWONG)	14091818	14092200	14
201410	麥德姆(MATMO)	14072100	14072312	11
201407	哈吉貝(HAGIBIS)	14061406	14061700	12
201323	菲特(FITOW)	13100412	13100618	10
201319	天兔(USAGI)	13091912	13092206	12
201315	康芮(KONGREY)	13082700	13090100	21
201312	潭美(TRAMI)	13082000	13082118	8
201308	西馬隆(CIMARON)	13071700	13071818	8
201307	蘇力(SOULIK)	13071100	13071312	11
201217	杰拉華(JELAWAT)	12092618	12092812	8
201214	天秤(TEMBIN)	12082100	12082812	31
201213	啟德(KAITAK)	12081400	12081518	8
201211	海葵(HAIKUI)	12080600	12080718	8
201209	蘇拉(SAOLA)	12073012	12080300	15
201206	杜蘇芮(DOKSURI)	12062718	12062900	6
201205	泰利(TALIM)	12061818	12062018	9
201111	南瑪都(NANMADOL)	11082618	11083100	18
201109	梅花(MUIFA)	11080400	11080600	9
201105	米雷(MEARI)	11062312	11062506	8
201102	桑達(SONGDA)	11052618	11052806	7
201101	艾利(AERE)	11050900	11051012	7
201013	梅姬(MEGI)	10101700	10102300	25
201011	凡那比(FANAPI)	10091712	10092006	12
201010	莫蘭蒂(MERANTI)	10090900	10091000	5
201008	南修(NAMTHEUN)	10083012	10090200	11
201006	萊羅克(LIONROCK)			
200908	莫拉克(MORAKOT)	09080600	09080912	15

表 4—3、TWRP (ECMWF ERA5) 模擬 1990 至 2009 年有發布警報颱風個案之模擬期間及總模擬組數。紅字為合作團隊已完成分析且可提供之個案。

颱風編號	颱風名稱	第一組模擬 初始時間	最終組模擬 初始時間	總模擬組數
200917	芭瑪(PARMA)	09100212	09100612	17
<b>200908</b>	<b>莫拉克(MORAKOT)</b>	<b>09080600</b>	<b>09080912</b>	<b>15</b>
200906	莫拉菲(MOLAVE)	09071612	09071800	7
200903	蓮花(LINFA)	09061912	09062200	11
<b>200815</b>	<b>薈蜜(JANGMI)</b>	<b>08092612</b>	<b>08092912</b>	<b>13</b>
200814	哈格比(HAGUPIT)	08092106	08092300	8
<b>200813</b>	<b>辛樂克(SINLAKU)</b>	<b>08091100</b>	<b>08091606</b>	<b>22</b>
200812	如麗(NURI)	08081900	08082100	9
200808	鳳凰(FUNG-WONG)	08072600	08072900	13
200807	卡玫基(KALMAEGI)	08071606	08071812	10
200723	米塔(MITAG)	07112518	07112700	6
<b>200715</b>	<b>柯羅莎(KROSA)</b>	<b>07100406</b>	<b>07100712</b>	<b>14</b>
200712	韋帕(WIPHA)	07091618	07091900	10
<b>200708</b>	<b>聖帕(SEPAT)</b>	<b>07081600</b>	<b>07081906</b>	<b>14</b>
200707	梧提(WUTIP)	07080612	07080900	11
200706	帕布(PABUK)			
200613	珊珊(SHANSHAN)	06091406	06091606	9
200609	寶發(BOPHA)	06080712	06081012	13
200608	桑美(SAOMAI)			
200605	凱米(KAEMI)	06072300	06072518	12
200604	碧利斯(BILIS)	06071112	06071418	14
200603	艾維尼(EWINIAR)	06070712	06070818	6
200601	珍珠(CHANCHU)	06051606	06051806	9
<b>200519</b>	<b>龍王(LONGWANG)</b>	<b>05093006</b>	<b>05100300</b>	<b>12</b>
200518	丹瑞(DAMREY)	05092100	05092300	13
200515	卡努(KHANUN)	05090906	05091100	8
<b>200513</b>	<b>泰利(TALIM)</b>	<b>05082918</b>	<b>05090112</b>	<b>12</b>
200510	珊瑚(SANVU)	05081106	05081312	10
200509	馬莎(MATSA)	05080300	05080600	13
<b>200505</b>	<b>海棠(HAITANG)</b>	<b>05071600</b>	<b>05071918</b>	<b>16</b>
200427	南瑪都(NANMADOL)	04120212	04120406	8
200424	納坦(NOCK-TEN)	04102306	04102518	11
200421	米雷(MEARI)	04092600	04092706	6
200420	海馬(HAIMA)	04091012	04091300	11
<b>200417</b>	<b>艾利(AERE)</b>	<b>04082212</b>	<b>04082600</b>	<b>15</b>
200413	蘭寧(RANANIM)	04081012	04081218	11
200409	康柏斯(KOMPASU)	04071400	04071500	5

颱風編號	颱風名稱	第一組模擬 初始時間	最終組模擬 初始時間	總模擬組數
200407	敏督利(MINDULLE)	04062800	04070312	23
200404	康森(CONSON)	04060706	04060912	10
200319	米勒(MELOR)	03110118	03110312	8
200313	杜鵑(DUJUAN)	03083100	03090206	10
200312	科羅旺(KROVANH)	03082200	03082306	6
200311	梵高(VAMCO)	03081900	03082000	5
200309	莫拉克(MORAKOT)	03080206	03080412	10
200307	尹布都(IMBUDO)	03072112	03072306	8
200306	蘇迪勒(SOUDELOR)	03061606	03061806	9
200305	南卡(NANGKA)	03060112	03060218	6
200302	柯吉拉(KUJIRA)	03042018	03042412	16
200216	辛樂克(SINLAKU)	02090318	02090718	17
200208	娜克莉(NAKRI)	02070812	02071012	9
200205	雷馬遜(RAMMASUN)	02070200	02070406	10
200121	海燕(HAIYAN)	01101500	01101612	7
200119	利奇馬(LEKIMA)	01092312	01092806	20
200116	納莉(NARI)	01090800	01092000	49
200108	桃芝(TORAJI)	01072712	01073106	16
200107	玉兔(YUTU)	01072306	01072406	5
200105	潭美(TRAMI)	01071000	01071118	8
200104	尤特(UTOR)	01070306	01070512	10
<b>200102</b>	<b>奇比(CHEBI)</b>	<b>01062112</b>	<b>01062400</b>	<b>11</b>
200101	西馬隆(CIMARON)	01051100	01051312	11
200021	貝碧佳(BEBINCA)	00110600	00110700	5
<b>200020</b>	<b>象神(XANGSANE)</b>	<b>00103000</b>	<b>00110112</b>	<b>11</b>
200019	雅吉(YAGI)	00102312	00102600	11
200015	寶發(BOPHA)	00090806	00091006	9
200012	巴比侖(PRAPIROON)	00082712	00083006	12
<b>200010</b>	<b>碧利斯(BILIS)</b>	<b>00082100</b>	<b>00082312</b>	<b>11</b>
200004	啟德(KAI-TAK)	00070600	00070918	16
199920	丹恩(DAN)	99100400	99100912	23
199911	山姆(SAM)	99081912	99082112	9
199906	瑪姬(MAGGIE)	99060400	99060612	11
199812	芭比絲(BABS)	98102400	98102712	15
<b>199810</b>	<b>瑞伯(ZEB)</b>	<b>98101300</b>	<b>98101700</b>	<b>17</b>
199809	楊妮(YANNI)	98092712	98092900	7
199802	奧托(OTTO)	98080300	98080500	9
199801	妮蔻兒(NICHOLE)	98070818	98071000	6
199726	艾文 (IVAN)	97101900	97102106	10
199719	卡絲(CASS)	97082912	97083012	5

颱風編號	颱風名稱	第一組模擬 初始時間	最終組模擬 初始時間	總模擬組數
199717	安珀(AMBER)	97082700	97082912	11
199714	溫妮(WINNIE)	97081606	97081818	11
199623	薩恩(ZANE)	96092700	96092812	7
199620	魏萊特(VIOLET)	96091512	96091612	5
199618	莎莉(SALLY)	96090700	96090812	7
199612	麗莎(LISA)	96080600	96080618	4
199608	賀伯(HERB)	96072900	96080112	15
199607	葛樂禮(GLORIA)	96072400	96072700	13
199603	凱姆(CAM)	96052012	96052306	12
199515	賴恩(RYAN)	95092006	95092300	12
199509	肯特(KENT)	95082712	95083106	16
199508	珍妮絲(JANIS)	95082306	95082412	6
199506	海倫(HELEN)	95080900	95081100	9
199505	蓋瑞(GARY)	95073000	95073106	6
199502	荻安娜(DEANNA)	95060406	95060900	20
199427	席斯(SETH)	94100706	94101018	15
199416	葛拉絲(GLADYS)	94083012	94090112	9
199415	弗雷特(FRED)	94081812	94082112	13
199413	道格(DOUG)	94080600	94080900	13
199412	凱特琳(CAITLIN)	94080212	94080400	7
199405	提姆(TIM)	94070900	94071100	9
199316	亞伯(ABE)	93091012	93091400	15
199314	楊希(YANCY)	93083112	93090200	7
199311	塔莎(TASHA)	93081700	93081900	9
199219	泰德(TED)	92092000	92092300	13
199216	寶莉(POLLY)	92082700	92083100	17
199215	歐馬(OMAR)	92090212	92090506	12
199213	馬克(MARK)	92081600	92081900	13
199202	芭比(BOBBIE)	92062600	92062812	11
199124	席斯(SETH)	91111200	91111406	10
199123	露絲(RUTH)	91102600	91103000	17
199120	耐特(NAT)	91091500	91100112	67
199119	密瑞兒(MIREILLE)			
199111	愛麗(ELLIE)	91081600	91081800	9
199108	布籃登(BRENDAN)	91072112	91072306	8
199107	艾美(AMY)	91071700	91071906	10
199018	艾德(ED)	90091312	90091500	7
199017	黛特(DOT)	90090600	90090806	10
199015	蓓琪(BECKY)	90082512	90082700	7
199014	亞伯(ABE)	90082900	90083100	9

颱風 編號	颱風名稱	第一組模擬 初始時間	最終組模擬 初始時間	總模擬組數
199012	楊希(YANCY)	90081700	90082100	17
199007	蘿賓(ROBYN)	90070812	90071012	9
199006	波西(PERCY)	90062600	90063000	17
199005	歐菲莉(OFELIA)	90062100	90062406	14
199003	瑪麗安(MARIAN)	90051712	90051906	8

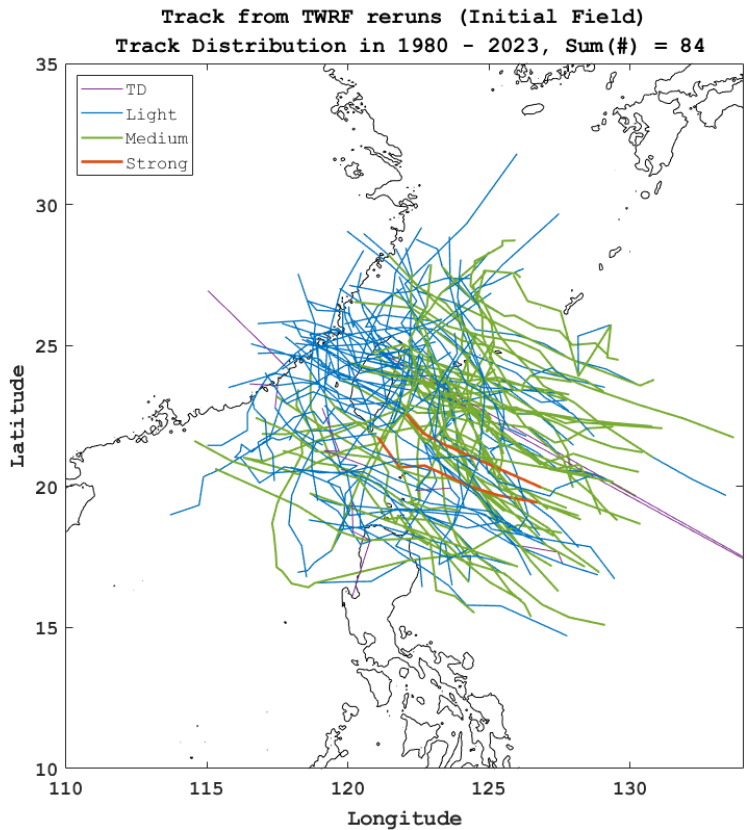


圖 4—17、自 TWRf 模式 Re-run 分析場資料擷取之模式內颱風路徑分布圖。

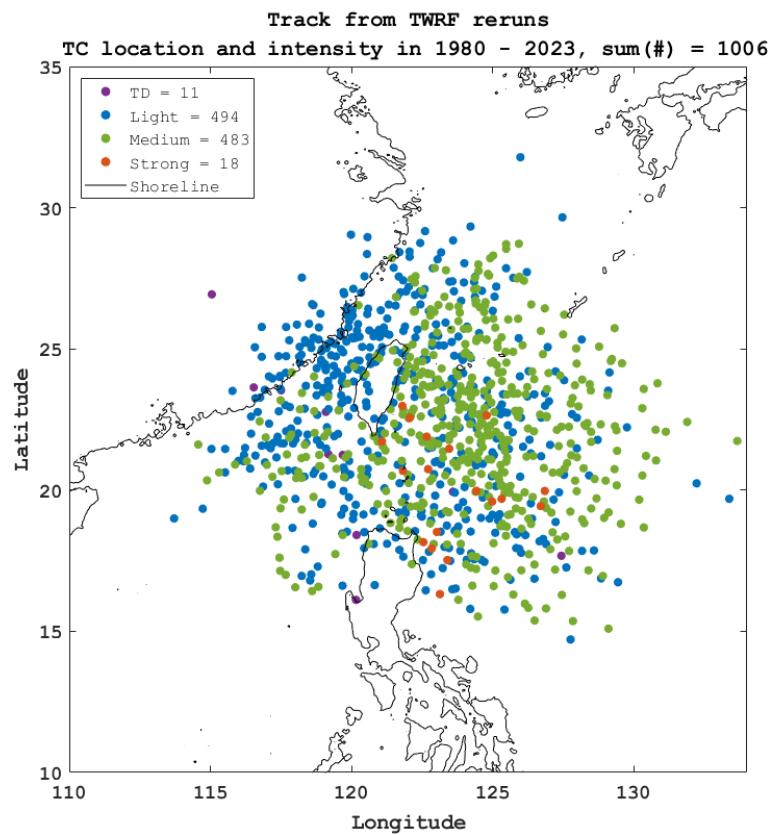


圖 4—18、自 TWRf 模式 Re-run 分析場資料擷取之模式內颱風強度分布圖。

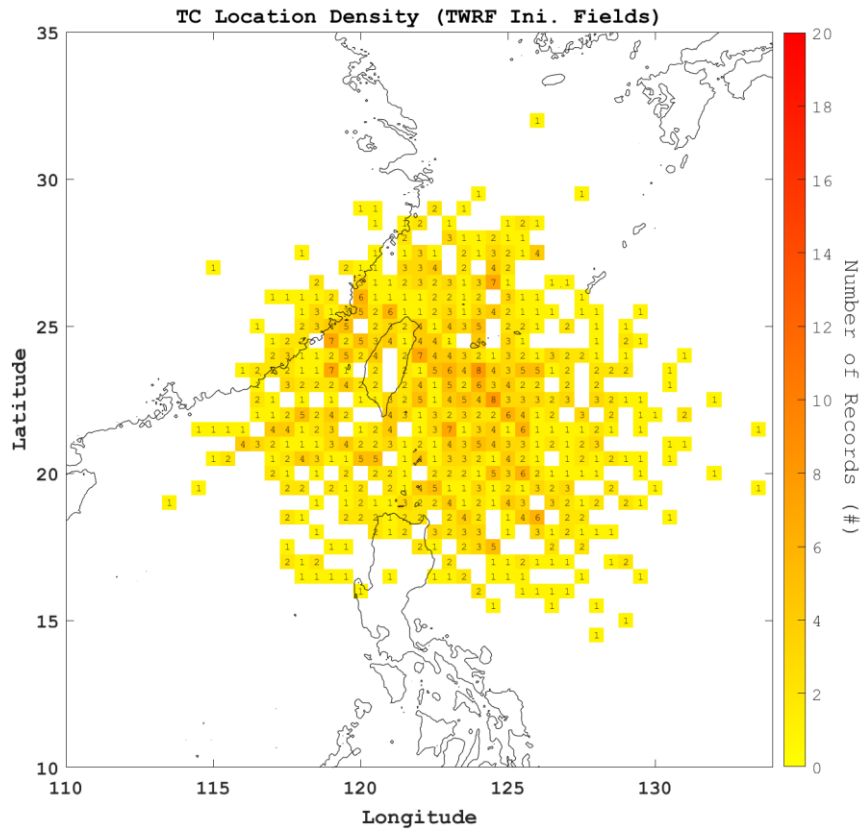


圖 4—19、自 TWRf 模式 Re-run 分析場擷取之颱風中心資料密度分布圖。

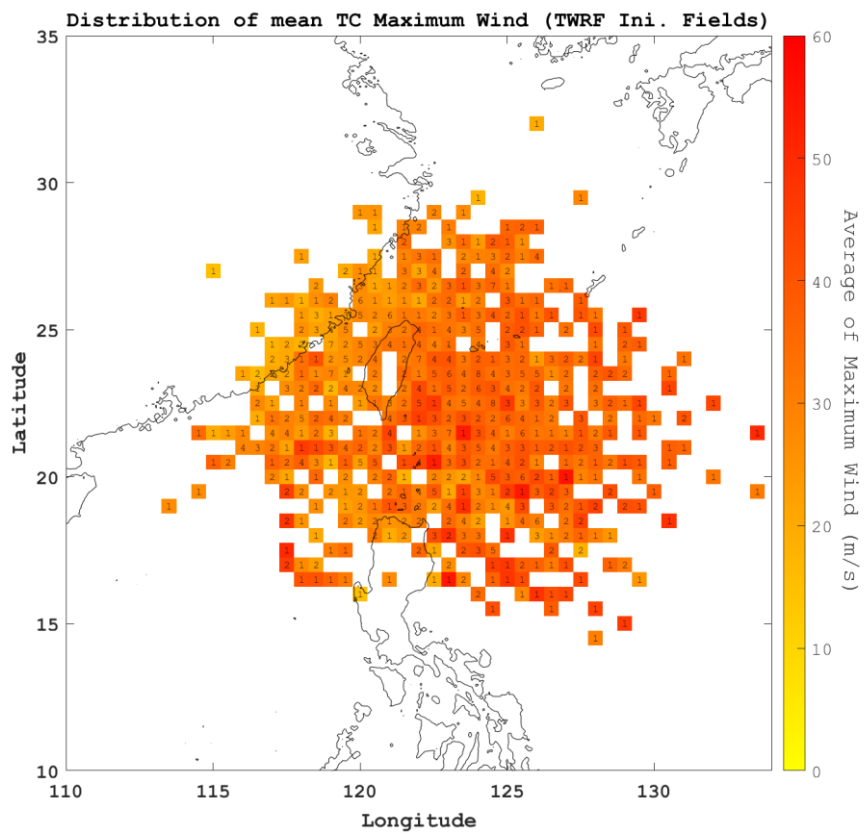


圖 4—20、自 TWRf 模式 Re-run 分析場擷取之平均近中心最大風速分布圖。

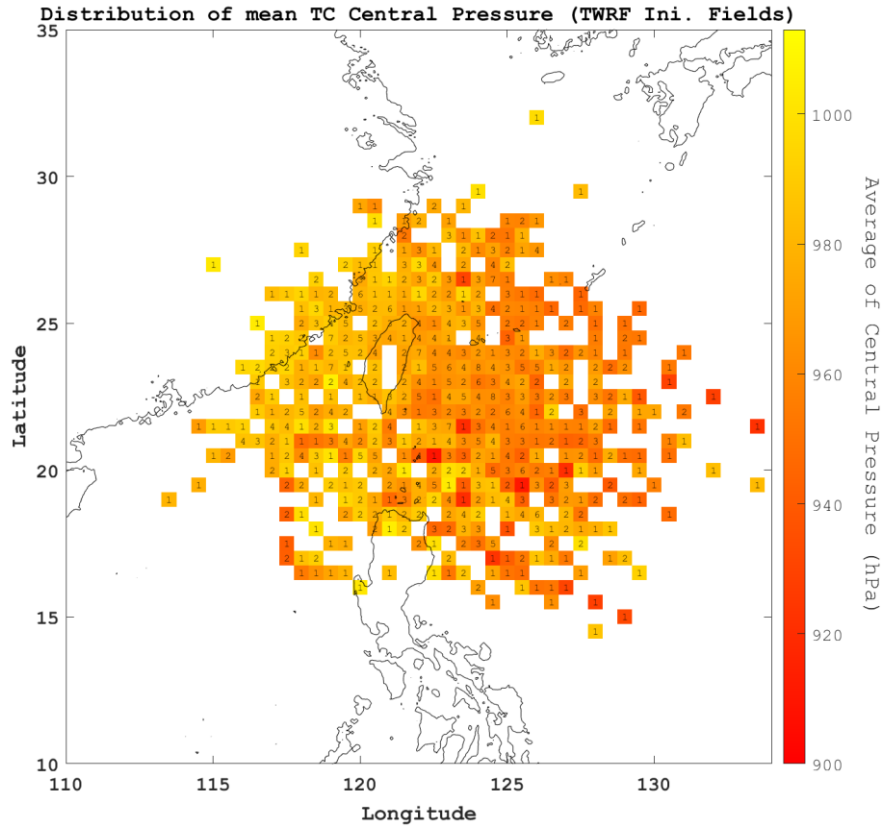


圖 4—21、自 TWRf 模式 Re-run 分析場擷取之平均中心氣壓分布圖。

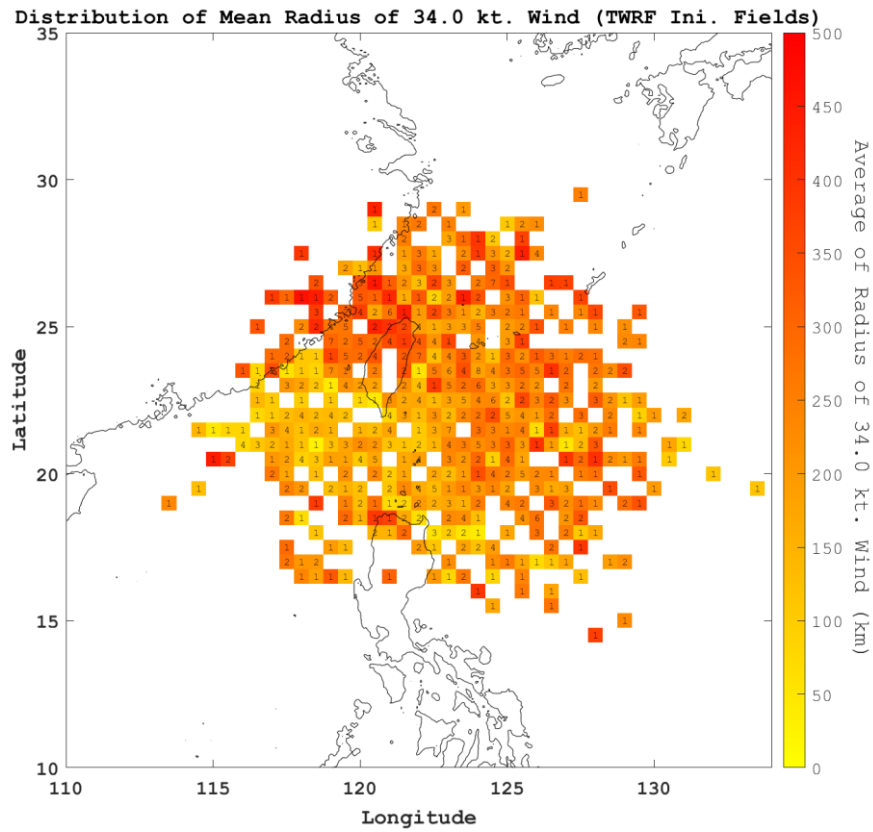


圖 4—22、自 TWRf 模式 Re-run 分析場擷取之颱風平均七級風半徑分布圖。

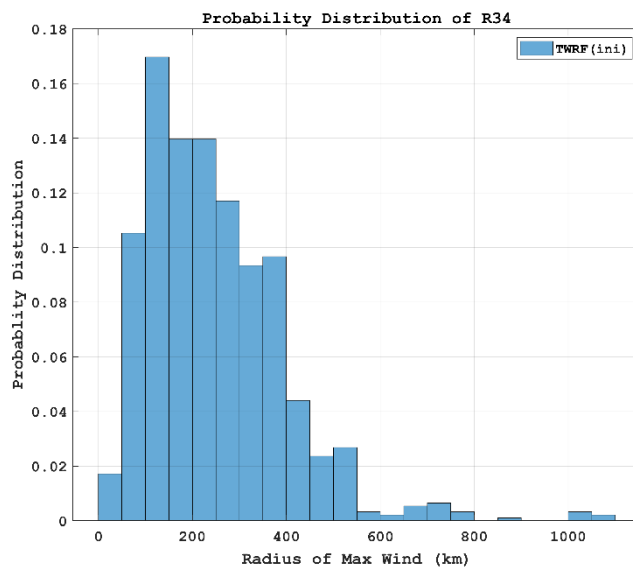
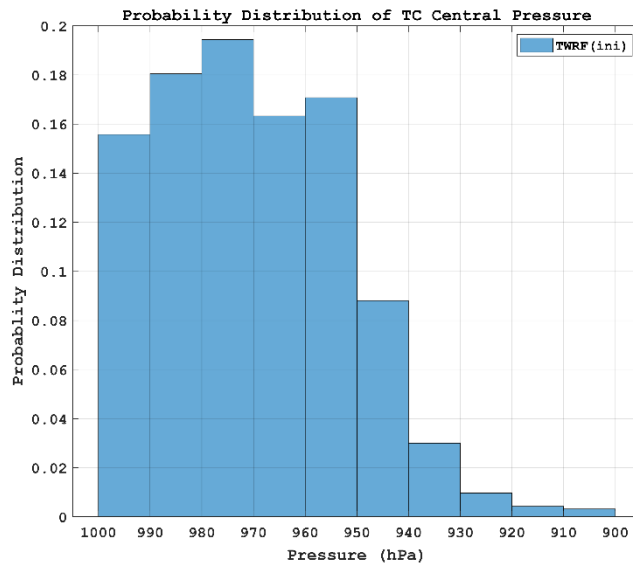
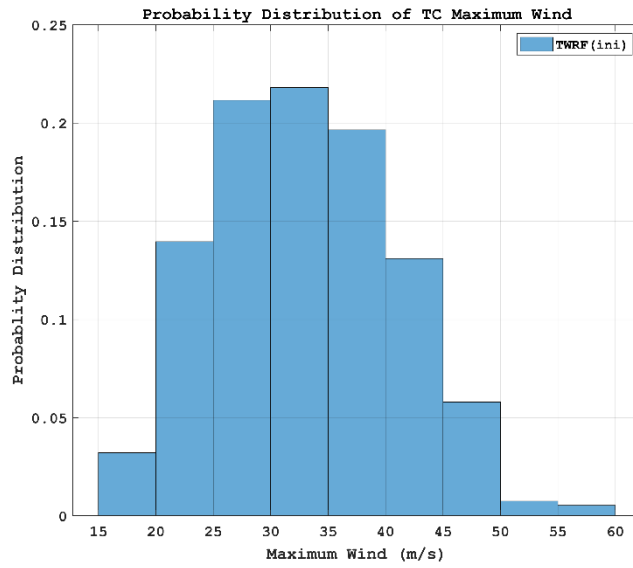


圖 4—23、TWRP 初始場之颱風參數資料密度分布圖。  
 (上) 近中心最大風速、(中) 颱風中心氣壓、(下) 七級風半徑。

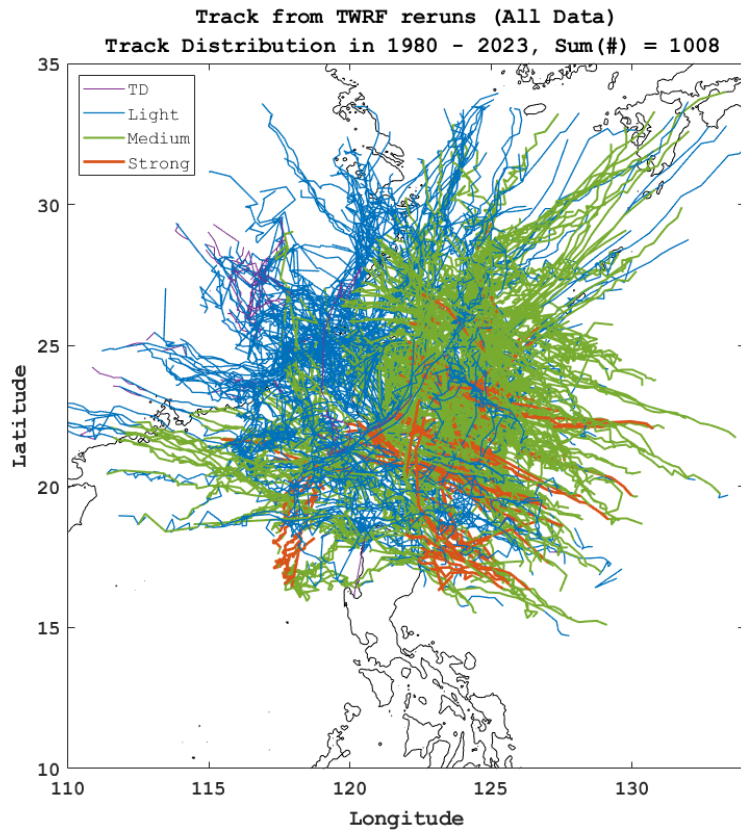


圖 4—24、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風預報路徑分布圖。

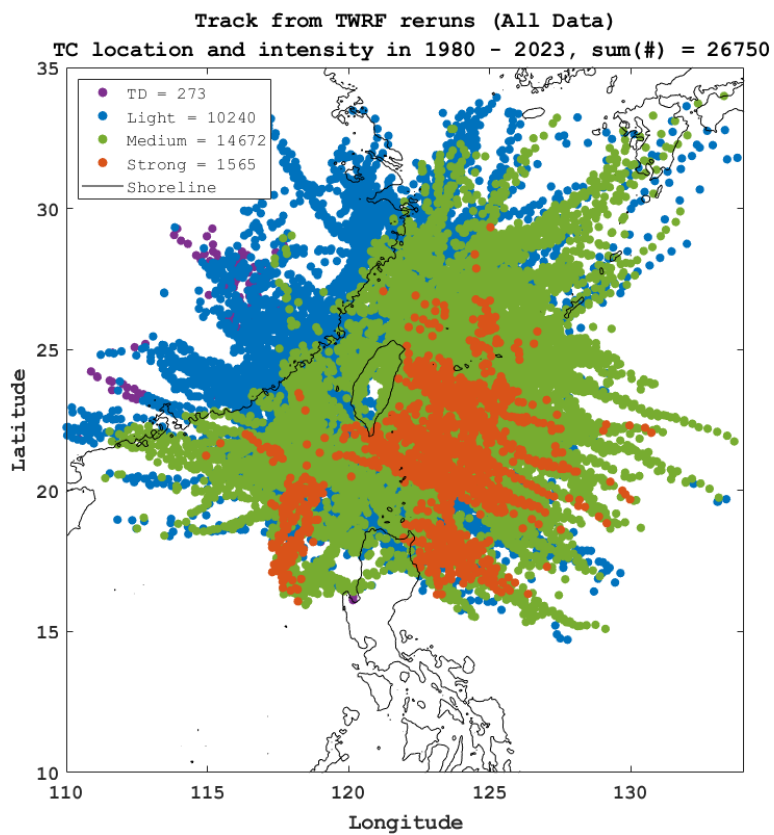


圖 4—25、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風強度分布圖。

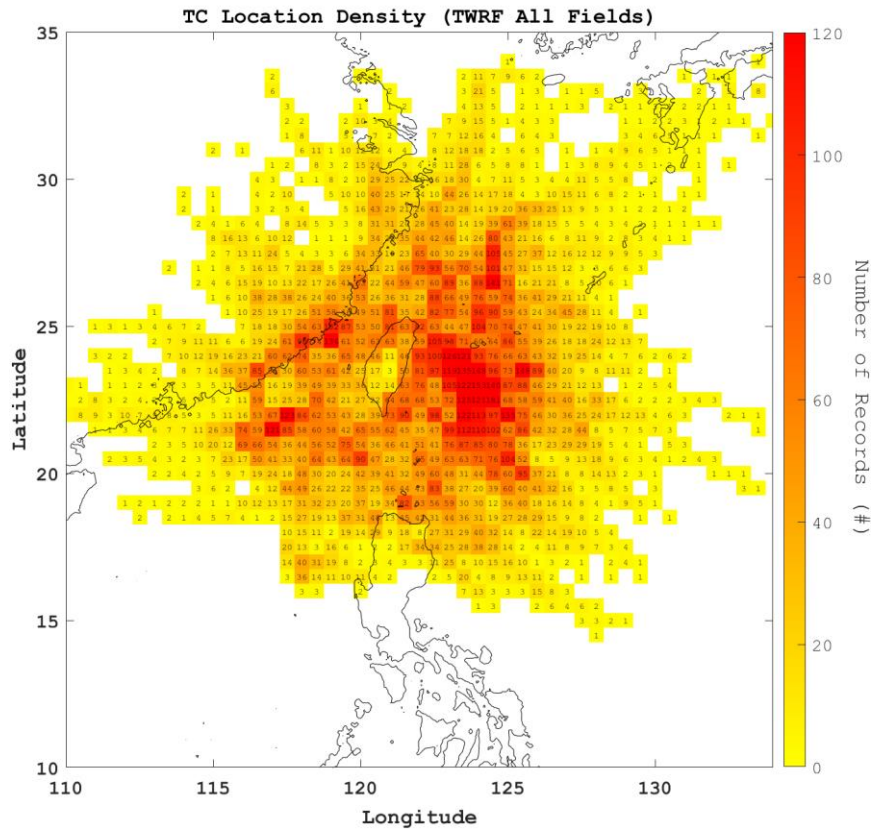


圖 4—26、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風中心資料密度分布圖。

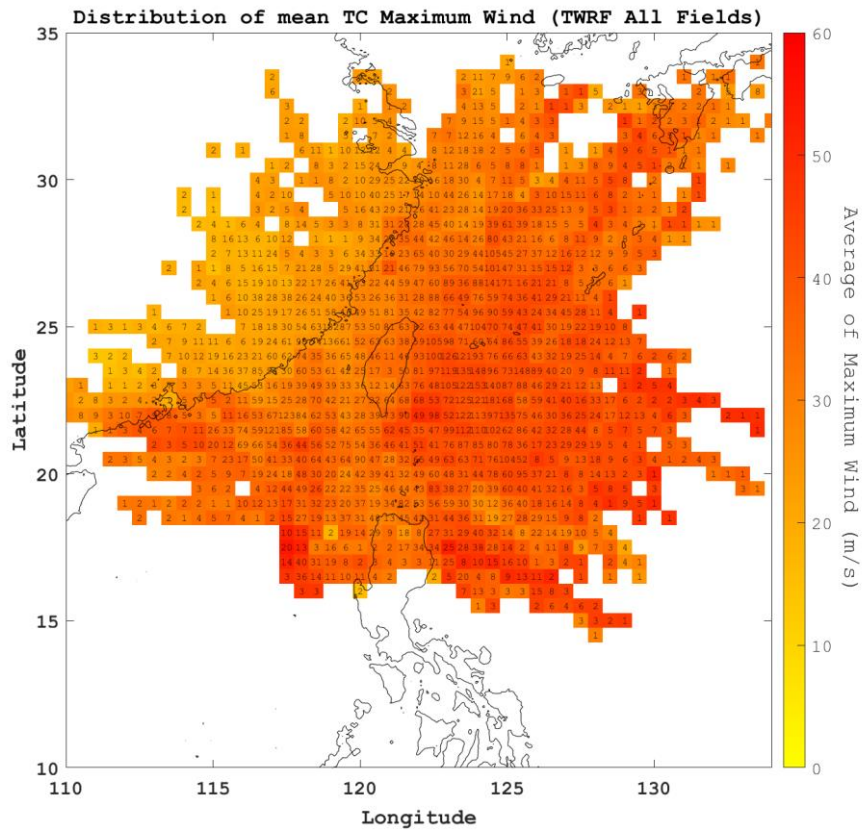


圖 4—27、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之平均近中心最大風速分布圖。

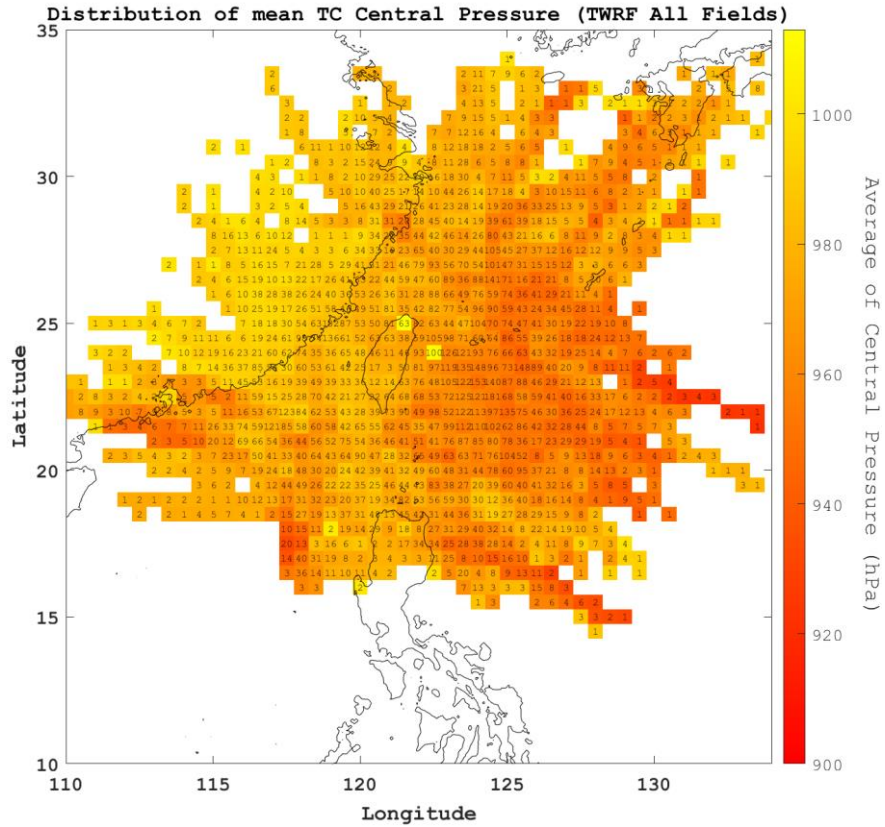


圖 4—28、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風平均中心氣壓分布圖。

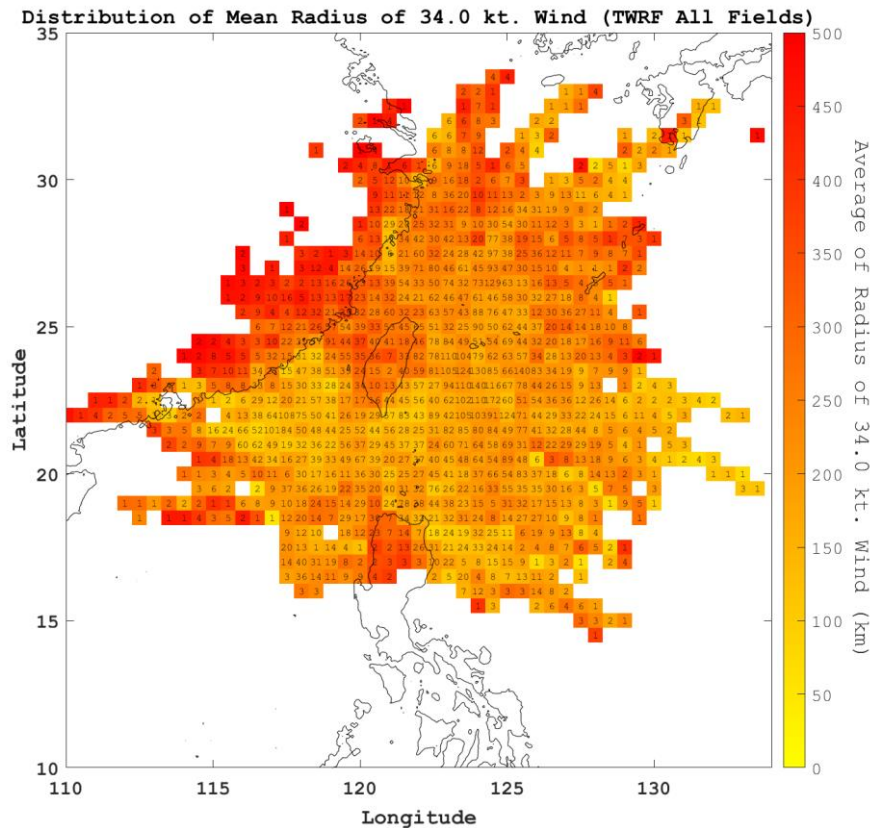


圖 4—29、自 TWRP 模式所有 Re-run 資料擷取之颱風平均七級風半徑分布圖。

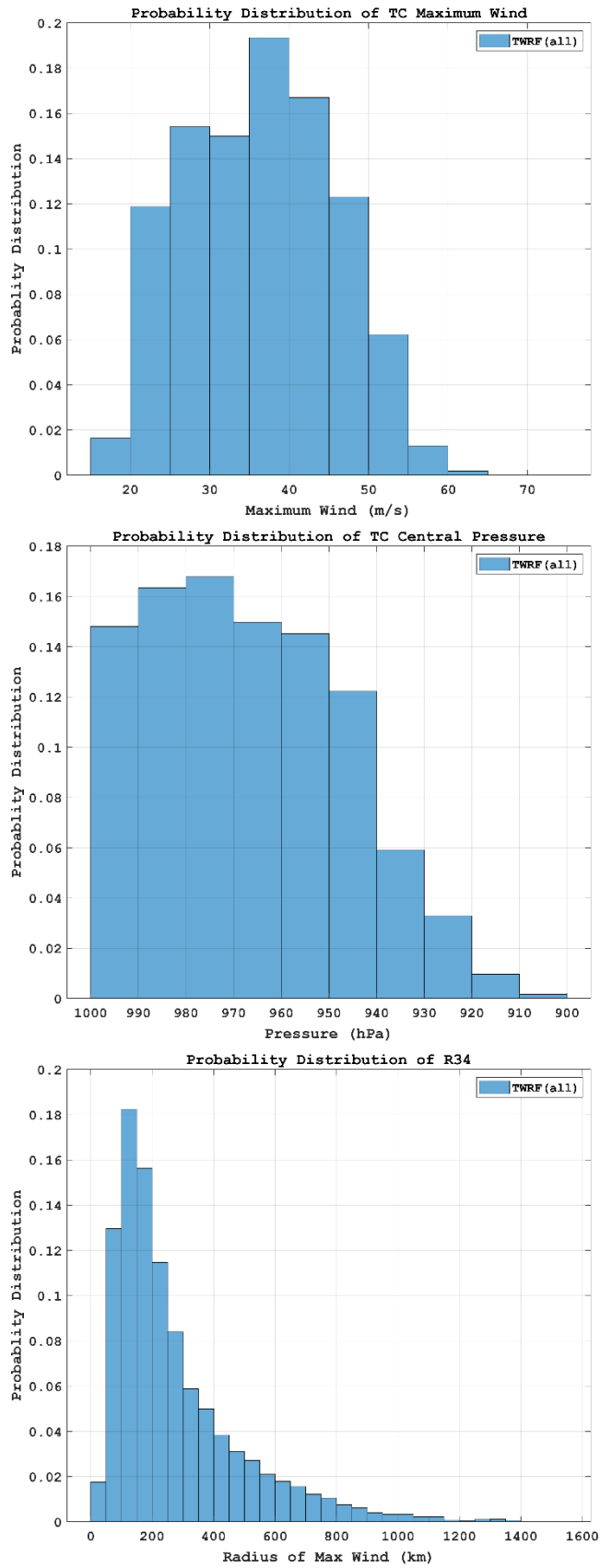


圖 4—30、TWRP 分析場及預報場之颱風參數資料密度分布圖。  
 (上) 近中心最大風速、(中) 颱風中心氣壓、(下) 七級風半徑。

#### 4-4 視覺化最佳路徑參數與 TWRF 參數差異

本章節在整理出各資料庫中參數分布之特性後，將額外對上述關鍵參數進行視覺化比對，以詳細檢視各資料庫參數與颱風資料庫最佳路徑分布情形之差異。比對情境區分為兩種，第一種為比對所有有效資料之分布情形，以檢視未來建置 REP 模式時所有有效資料的分布情形。第二種比對方式則將僅採用重分析場資料或預報時初始場資料進行比對，不使用 TWRF 預報場以避免預報誤差影響資料比對結果。兩種比對方式中，最佳路徑資料皆不選用內插後資料，避免資料內插所造成之誤差導致誤判參數比對結果。

圖 4—31 展示不同資料來源所擷取之颱風路徑分布情形，左上來自中央氣象署最佳路徑資料庫、右上來自 ECMWF ERA5 搭配最佳路徑資料庫擷取之結果、左下及右下分別為 TWRF 模式之分析場路徑及所有預報路徑資料。最佳路徑資料庫的路徑覆蓋範圍廣泛，可以看到大部分路徑明顯從東南向西北延伸的趨勢，且路徑密集，特別是在台灣附近和向西北方向。此外，路徑強度之顏色分布均勻，表明不同強度的颱風都有涵蓋。ECMWF ERA5 擷取出的路徑整體分布與 CWA 相似，熱帶性低氣壓及輕度颱風在路徑分布上較為突出，尤其在東南部區域。自 TWRF 分析場擷取出來的路徑數量明顯少於前兩者，僅有 84 個颱風事件，覆蓋範圍較小，主要集中在台灣周圍和向東北延伸的區域，但強度分布較為均衡。TWRF 模式所有預報路徑資料中，涵蓋的路徑數量大幅增加（1008 條），且覆蓋範圍廣泛。資料量以輕度和中度颱風較為突出，且和其他資料庫相比，在台灣周圍和向東北方向的路徑密集度較高。以資料量而論，TWRF 重新模擬之預報路徑資料量是最多的，其次為颱風資料庫及 ECMWF ERA5，資料量最少者為 TWRF 重新模擬之初始場。以覆蓋範圍論，颱風資料庫及 ECMWF ERA5 較為廣泛，而 TWRF 初始場為最小。在颱風強度方面，ECMWF ERA5 的颱風強度較其他資料庫偏弱，而其他資料庫強度分布較相對均衡。在路徑分布特徵上，所有資料庫都顯示颱風主要從東南向西北移動的趨勢，但東北向路徑在 TWRF 包含預報場的

資料中顯得較其他資料庫更為突出。這些差異可能反映了不同的追蹤方法、定義標準或數據處理技術的不同。而 TWRP 僅有初始場及包含預報資料時，兩者路徑分布的顯著差異表明，數據處理和分析方法對最終結果有重大影響。

圖 4—32 展示不同資料來源所擷取之颱風強度分類分布情形，左上來自中央氣象署最佳路徑資料庫、右上來自 ECMWF ERA5 搭配最佳路徑資料庫擷取之結果、左下及右下分別為 TWRP 模式之初始場及所有預報資料。最佳路徑資料庫的有效資料為 7515 筆，覆蓋範圍廣泛，從東南到西北均有分布，且強度分布較為均勻，各種強度的颱風都有大量記錄。圖中顯示，颱風資料在台灣周圍和向西北方向的密度較高，而強烈颱風主要集中在台灣東部海域。ECMWF ERA5 的有效資料量為 7543 筆，整體空間分布與最佳路徑資料庫相似，而輕度颱風占絕對優勢，特別是在整個區域的中部和東部。熱帶性低氣壓的資料量在西北部和東南部亦有較多分布，但在該資料庫中沒有強烈颱風資料點。TWRP 模式初始場之有效資料點數明顯少於前兩者，總數為 1006 筆，且資料覆蓋範圍較小，主要集中在台灣周圍和向東南延伸的區域。資料強度分布上，以中度颱風及輕度颱風較為突出，而強烈颱風之資料主要出現在台灣東南方海域。TWRP 模式所有預報資料的有效資料為 26750 筆，資料點數量最多，密度非常高，覆蓋範圍也相當廣泛，完整涵蓋圖片展示範圍中間區域。圖中資料點以輕度颱風及中度颱風為主要多數，形成明顯的放射狀分布。強烈颱風的資料點集中在中心區域，形成一個明顯的核心。以資料量而論，TWRP 重新模擬之預報路徑資料量是最多的，而颱風資料庫及 ECMWF ERA5 資料量相當，資料量最少者為 TWRP 重新模擬之初始場。以覆蓋範圍論，颱風資料庫及 ECMWF ERA5 較為廣泛，而 TWRP 初始場為最小。TWRP 包含預報場的資料雖然點數最多，但集中在特定區域。在颱風強度方面，ECMWF ERA5 的颱風強度較其他資料庫偏弱，而其他資料庫強度分布較相對均衡，TWRP 初始場及 TWRP 包含預報場的資料中，輕度颱風與中度颱風的資料數量最多，而 TWRP 包含預報場的資料中，強烈颱風資料有集中在特定區域的情形。在資料點分布特徵上，颱風資料庫及 ECMWF ERA5 都有顯示從東南向西

北的整體趨勢，而 TWRP 的資料皆集中在台灣周圍，並向東南、東北海域延伸。

圖 4—33 展示不同資料來源所擷取之颱風強度分類分布情形，左上來自中央氣象署最佳路徑資料庫、右上來自 ECMWF ERA5 搭配最佳路徑資料庫擷取之結果、左下及右下分別為 TWRP 模式之初始場及所有預報資料。最佳路徑資料庫的有效資料覆蓋範圍廣泛，從菲律賓北部到日本南部都有數據，整體呈現出從東南向西北遞減的趨勢，最高風速區域主要集中在台灣東部海域及其東南方，且台灣周邊海域普遍呈現較高的風速值。ECMWF ERA5 的資料整體分布趨勢與最佳路徑資料庫相似，但風速值普遍較低，風速分布更加均勻，顏色變化更為漸進。最高風速區域同樣位於台灣東部海域，但範圍較小，且在中國東南沿海、台灣西南部海域的風速值明顯低於最佳路徑資料庫。TWRP 模式初始場的覆蓋範圍明顯小於前兩者，主要集中在台灣周圍和東北部海域，周邊區域資料點較為分散，且整體風速值介於最佳路徑資料庫和 ECMWF ERA5 之間。最高風速區域集中於台灣東部和東南部海域。TWRP 模式所有預報資料的覆蓋範圍相當廣泛，資料密度高，幾乎覆蓋了整個顯示區域，特別是向東北方向延伸較多。整體風速值較高，大部分區域呈現深橙色到紅色，因此顯得最高風速區域分布較為分散，不僅集中在台灣東部，也延伸到東北部海域。

若比較各資料庫的覆蓋範圍大小，ECMWF ERA5 之覆蓋範圍是最大的，其次為颱風資料庫及 TWRP 模式所有資料，覆蓋範圍最小者為 TWRP 初始場。在颱風強度方面，TWRP 重新模擬之預報場看起來整體強度較強，TWRP 模式初始場及最佳路徑資料庫的風速強度則表現相當，ECMWF ERA5 的颱風強度較其他資料庫偏弱。在資料分布特徵上，最佳路徑資料庫 和 ECMWF ERA5 顯示出類似的整體分布趨勢，但最佳路徑資料庫的風速值普遍更高。TWRP 初始場資料量較少，但風速分布模式與其他資料庫表現基本一致。TWRP 模式所有資料的最大風速分布趨勢在所有資料庫中呈現出更廣泛和均勻的高風速分布。所有資料庫都顯示，台灣東部海域有最高之近中心最大風速平均值，且風速分布都有從東南向西北的遞減趨勢。除此之外，TWRP 資料中，尤其是包含所有資料的資料庫，在

往東北方向顯示了更多的高風速分布情形。

圖 4—34 比較了擷取自不同二維氣象資料來源的熱帶氣旋近中心最大風速的機率密度分布，並且與颱風資料庫中的近中心最大風速參數分布進行比較。機率密度圖之分帶為 5 公尺/秒，風速值從左側 15 公尺/秒到右增加至 70 公尺/秒，即颱風強度由左至右增強。從上至下圖中，藍色長條圖皆代表來自颱風資料庫最佳路徑參數的資料，紅色長條圖則依序代表二維氣象資料來自 ECMWF ERA5、TWRf 模式之初始場及所有模式資料。

其中，颱風資料庫的資料區間分布於 15 至 70 公尺/秒之間，風速分佈相對均勻，其中最高峰在 20 至 30 公尺/秒之間，次要的峰值位於 40 至 50 公尺/秒之間，在風速高於 55 公尺/秒的區間，機率密度顯著降低。

ECMWF ERA5 資料區間分布於 15 至 40 公尺/秒之間。分佈呈現左偏，其中最高峰在 20 至 25 公尺/秒之間，在風速高於 30 公尺/秒區間後，機率密度顯著降低，很少有颱風的最大風速超過 35 公尺/秒。

TWRf 模式初始場之資料區間分布於 15 至 60 公尺/秒之間。分佈大致呈現略為右偏的常態分佈，其中最高峰在 30 至 35 公尺/秒之間，次要的峰值位於 25 至 30 公尺/秒之間，大多數資料點在 25 至 40 公尺/秒之間，在風速高於 50 公尺/秒與低於 20 公尺/秒的區間，機率密度顯著降低。

TWRf 所有資料的區間介於 10 至 70 公尺/秒之間。分佈大致呈現略為偏右的鐘形分布，其中最高峰在 35 至 40 公尺/秒之間，極端情況（20 公尺/秒和 55 公尺/秒）的機率密度顯著降低，而大多數熱帶氣旋的最大風速在 25 至 45 公尺/秒之間。

與颱風資料庫相比，ECMWF ERA5 明顯低估了較高風速發生的頻率。TWRf 模式初始場顯示的分佈與颱風資料庫較相似，且比 ECMWF ERA5 捕獲更多高風速事件，但在一定程度上仍有低估的情形。TWRf 所有資料則顯示與颱風資料庫有非常相似的分佈，很好地捕捉到了高風速事件發生的頻率。

由於各資料庫中之有效資料點數不一定相同，圖 4—35 更進一步比對了相同

颱風事件紀錄時間點下，自不同二維資料來源中擷取之近中心最大風速的機率密度分布情形。圖中分帶皆為 5 公尺/秒，風速值從左側到右增加，即颱風強度由左至右增強。上圖及中圖之藍色長條圖代表來自颱風資料庫最佳路徑參數的資料，紅色長條圖則依序代表二維氣象資料來自 ECMWF ERA5 及 TWRP 模式之初始場，下圖之藍色長條圖則為 ECMWF ERA5、紅色長條圖代表 TWRP 模式初始場。

上圖可以看到在擷取相同颱風事件點的情況下，颱風資料庫風速分佈相對均勻，風速在 40 至 60 公尺/秒之間的機率略高。ECMWF ERA5 則在 20 至 30 公尺/秒附近有峰值，超過 30 公尺/秒後風速較高的可能性迅速降低。與颱風資料庫相比，ECMWF ERA5 明顯低估了高風速的頻率。中圖 TWRP 模式初始場顯示的分佈與颱風資料庫較相似，但偏向較低風速，峰值約為 25 至 40 公尺/秒，但比 ECMWF ERA5 捕獲更多高風速事件。

在兩個比較的資料集中，TWRP 模式初始場展示出更均勻的風速分佈，代表更廣泛的風暴強度，而 ECMWF ERA5 則在較低風速下保持其尖銳峰值，顯示 TWRP 模式初始場似乎與颱風資料庫分佈更相似。雖然它並不完全符合颱風資料庫的分布特性，但它捕獲了更廣泛的強度範圍，並且更好地表示了較高風速的颱風事件。另一方面，ECMWF ERA5 顯示出偏低的風速，無法代表颱風資料庫中看到更高強度颱風的分佈。這表明，根據颱風資料庫中的近中心最大風速進行評估時，儘管 TWRP 模式初始場低估了最高風速發生的頻率，它還是能比 ECMWF ERA5 更好地與颱風資料庫的整體分佈保持一致。

圖 4—36 展示不同資料來源所擷取之颱風中心氣壓分布情形，左上來自中央氣象署最佳路徑資料庫、右上來自 ECMWF ERA5 搭配最佳路徑資料庫擷取之結果、左下及右下分別為 TWRP 模式之初始場及所有預報資料。最佳路徑資料庫中，資料覆蓋範圍廣泛，從菲律賓北部到日本南部都有數據，且整體呈現從東南向西北氣壓遞增的趨勢，最低氣壓區域（深紅色）主要集中在台灣東部海域及其東南方，而氣壓值變化較為平緩，顏色過渡較為柔和。ECMWF ERA5 體分布趨

勢與最佳路徑資料庫相似，但氣壓值普遍較高（顏色較淺），氣壓分布更加均勻，顏色變化更為漸進。最低氣壓區域同樣位於台灣東部海域，但範圍較小，且中國東南沿海的氣壓值明顯高於最佳路徑資料庫資料。TWRf 模式之初始場覆蓋範圍明顯小於前兩者，主要集中在台灣周圍和東南部海域，周邊區域的資料點較為分散。整體氣壓值分布介於最佳路徑資料庫資料和 ECMWF ERA5 之間，最低氣壓區域位於台灣東部和東南部海域。TWRf 模式整體資料的覆蓋範圍較其他資料庫廣泛，特別是向東北方向延伸較多，資料密度也較高，覆蓋展示範圍的中間區域。整體氣壓值分布較為均勻，大部分區域呈現橘黃色至橘色，而最低氣壓的區域分布不僅集中在台灣東部，也延伸到東北部海域。

若比較各資料庫的覆蓋範圍大小，ECMWF ERA5 之覆蓋範圍是最大的，其次為颱風資料庫及 TWRf 模式所有資料，覆蓋範圍最小者為 TWRf 初始場。在颱風平均中心氣壓方面，TWRf 重新模擬之預報場看起來整體強度較強，TWRf 模式初始場及最佳路徑資料庫的風速強度則表現相當，ECMWF ERA5 的颱風強度較其他資料庫偏弱。在資料分布特徵上，最佳路徑資料庫和 ECMWF ERA5 顯示出類似的整體分布趨勢，但最佳路徑資料庫的低氣壓區域更為廣泛。TWRf 初始場資料量較少，但中心氣壓分布模式與其他資料庫表現基本一致。TWRf 模式所有資料的中心氣壓分布趨勢在所有資料庫中呈現出更廣泛和均勻的分布。所有資料庫都顯示，台灣東部海域是颱風中心氣壓的低值區，且最佳路徑資料庫和 ECMWF ERA5 清晰地展示了從東南向西北的氣壓遞增趨勢。除此之外，TWRf 包含所有資料的資料庫，在往東北方向顯示了更多的低氣壓區域。

圖 4—37 比較了擷取自不同二維氣象資料來源的熱帶氣旋中心氣壓參數的機率密度分布，並且與颱風資料庫中的中心氣壓參數分布進行比較。機率密度圖之分帶為 5 百帕，氣壓值從左側 1000 百帕到右減小至 880 百帕，因此颱風強度由左至右增強，以方便與近中心最大風速分布趨勢互相比較。從上至下圖中，藍色長條圖皆代表來自颱風資料庫最佳路徑參數的資料，紅色長條圖則依序代表二維氣象資料來自 ECMWF ERA5、TWRf 模式之初始場及所有模式資料。

颱風資料庫最佳路徑中所紀錄之中心氣壓值分布之趨勢偏向左側，顯示多數颱風之中心氣壓值較高，且熱帶氣旋最常見的中心氣壓在 980 至 1000 百帕之範圍內。隨著氣壓值降低，機率密度呈現穩定下降的趨勢，而氣壓值低於 920 百帕之機率密度顯著降低，低於 900 百帕之資料數量十分稀少。

自 ECMWF ERA5 中擷取之氣壓資料，區間分布於 930 至 1000 百帕之間。氣壓分布之趨勢與颱風資料庫相比更嚴重偏向左側，亦即多數颱風之中心氣壓值較高，且熱帶氣旋最常見的中心氣壓在 980 至 990 百帕之範圍內。隨著氣壓值降低，機率密度呈現穩定下降的趨勢，而氣壓值低於 950 百帕之機率密度顯著降低。

自 TWRf 模式初始場中擷取之氣壓資料，資料分布範圍介於 900 至 1000 百帕。氣壓分布之趨勢偏向左側，亦即多數颱風之中心氣壓值較高，且大多數熱帶氣旋的中心氣壓在 950 至 990 百帕之間。

自 TWRf 模式所有產出資料擷取之氣壓資料，資料分布範圍介於 900 至 1000 百帕，分布趨勢與 TWRf 模式初始場之資料分布情況相似，大多數熱帶氣旋的中心氣壓在 950 至 990 百帕之間，但氣壓值低於 940 百帕之機率密度下降的趨勢較前者平緩。

與颱風資料庫最佳路徑相比，ECMWF ERA5 具有更高中心氣壓值的機率分布，顯示模式中有低估颱風強度的情形。TWRf 模式初始場在整個中心氣壓範圍內顯示出較均勻的分佈情形，可以捕捉更廣泛的熱帶氣旋強度。TWRf 模式所有產出資料顯示的氣壓分布更為均勻，且在 940 百帕之機率密度分布情形是三者中與颱風資料庫最接近的。在三種二維資料比較中，包含預報資料的 TWRf 模式結果似乎與颱風資料庫分布情形最為相似。雖然它並不完全符合颱風資料庫的分布性質，但與 ECMWF ERA5 相比，他的氣壓紀錄分布更為廣泛，與 TWRf 模式初始場相比，在較低氣壓值方面的分布也更符合颱風資料庫的分布特性。

由於各資料庫中之有效資料點數不一定相同，圖 4—38 更進一步比對了相同颱風事件紀錄時間點下，自不同二維資料來源中擷取之氣壓參數的機率密度分布情形。途中分帶皆為 5 百帕，氣壓值從左側向右減小，因此颱風強度由左至右增

強，以方便與近中心最大風速分布趨勢互相比較。上圖及中圖之藍色長條圖依序代表來自颱風資料庫最佳路徑參數的資料，紅色長條圖則依序代表二維氣象資料來自 ECMWF ERA5 及 TWRP 模式之初始場，下圖之藍色長條圖則為 ECMWF ERA5、紅色長條圖代表 TWRP 模式初始場。

上圖可以看到在擷取相同颱風事件點的情況下，颱風資料庫的機率密度分布呈現左偏的平坦分布，自 930 百帕後機率密度急遽衰減；ECMWF ERA5 顯示為左偏之單峰分佈，且在 980 至 990 百帕中出現峰值。顯示與颱風資料庫相比，ECMWF ERA5 明顯高估了較高中心氣壓出現的頻率。TWRP 模式初始場與颱風資料庫的比對結果如中圖，可見其為左偏之單峰分佈，但在氣壓低值區域中顯示出更貼近颱風資料庫的分佈，顯示其能捕捉更多低壓事件，並且有更廣泛的熱帶氣旋強度。

在兩個比較的資料集中，TWRP 模式初始場似乎與颱風資料庫分佈更相似。雖然它並不完全符合颱風資料庫的分布特性，但它捕獲了更廣泛的強度範圍，並且更好地表示了更強烈的熱帶氣旋。另一方面，ECMWF ERA5 顯示出明顯偏向更高的中心氣壓，並且無法代表颱風資料庫中看到的更強烈風暴的分佈。這表明，根據颱風資料庫中的氣壓參數進行評估時，與 ECMWF ERA5 相比，TWRP 模式初始場更好地與颱風資料庫的整體分佈保持一致。

圖 4—39 展示不同資料來源所擷取之颱風中心氣壓分布情形，左上來自中央氣象署最佳路徑資料庫、右上來自 ECMWF ERA5 搭配最佳路徑資料庫擷取之結果、左下及右下分別為 TWRP 模式之初始場及所有預報資料。最佳路徑資料庫資料覆蓋範圍相對廣泛，從約東經 110 度到 135 度，北緯 10 度到 35 度。七級風半徑最高值主要集中在北緯 20 度至 25 度、東經 120 度至 125 度之間。資料分布呈現南北梯度，且北部地區的七級風半徑值較高。ECMWF ERA5 的資料覆蓋範圍與最佳路徑資料庫相似，但整體上高值區域比最佳路徑資料庫更加靠近北邊展示範圍，且高值區域更加分散，有多個高值中心分散在北緯 20 度至 30 度。TWRP 模式初始場的覆蓋範圍主要集中在東經 115 度到 130 度，北緯 15 度到 30 度，除

此之外的地區資料點較為稀疏，特別是在展示區域南部地區。七級風半徑值較高的區域主要位於北緯 20 度到 25 度，但分布不如前兩個資料庫均勻。TWRf 模式所有預報資料的覆蓋範圍介於 TWRf 模式初始場與最佳路徑資料庫之間，但是資料密度最高。七級風半徑較高值的區域主要集中在中國沿岸地區，以及往東北方向延伸的海域。

若比較各資料庫的覆蓋範圍大小，ECMWF ERA5 之覆蓋範圍是最大的，其次為颱風資料庫及 TWRf 模式所有資料，覆蓋範圍最小者為 TWRf 初始場。若以資料密度論，則 TWRf 模式所有資料所呈現的資料密度最高，TWRf 初始場最低，颱風資料庫與 ECMWF ERA5 資料量相當。在七級風半徑高值區域比較上，可以看到颱風資料庫與 TWRf 初始場的高值區域主要位於北緯 20 度到 25 度，而 ECMWF ERA5 與 TWRf 模式所有資料所呈現的高值區更靠北，TWRf 模式所有資料在中國沿岸資料也有明顯的高值分布。

圖 4—40 比較了擷取自不同二維氣象資料來源的熱帶氣旋七級風半徑的機率密度分布，並且與颱風資料庫中的七級風半徑分布進行比較。機率密度圖之分帶為 50 公里，七級風半徑值從左側到右增加。從上至下圖中，藍色長條圖皆代表來自颱風資料庫最佳路徑參數的資料，紅色長條圖則依序代表二維氣象資料來自 ECMWF ERA5、TWRf 模式之初始場及所有模式資料。

颱風資料庫最佳路徑中所紀錄之七級風半徑分布趨勢大致呈常態（鐘形），略為右偏，且峰值集中在 150 至 200 公里之間，極值分布相對較少，多數資料介於 100 至 300 公里之間。

ECMWF ERA5 資料區間分布介於 0 至 1500 公里之間。資料分布型態呈現常態分佈，但有輕微的左偏，且峰值集中在 150 至 300 公里之間，與颱風資料庫顯示類似的峰值，但稍微偏移到更大的半徑。而七級風半徑大於 400 公里或小於 100 公里的資料密度相對較少，很少有七級風半徑超過 500 公里。

TWRf 模式初始場資料區間分布介於 0 至 1100 公里之間。機率密度分佈呈現長尾、左偏，且峰值集中在 100 至 150 公里之間，大於 600 公里之極值分布相

對較少，多數資料介於 50 至 400 公里之間。

TWRF 模式所有資料所得的資料區間分布介於 0 至 1600 公里之間。大致呈長尾、左偏的分布情形，且峰值集中在 100 至 150 公里之間，極值分布相對較少，多數資料介於 50 至 300 公里之間。半徑超過 300 公里的機率迅速下降，少數情況下延伸範圍超過 1000 公里。

所有資料庫都成功捕捉了七級風半徑分布的一般形狀，但與颱風資料庫都有尾部較大/較大半徑發生機率較高的情形。其中，TWRF 模式均與颱風資料庫表現出非常接近的一致性，而其中 TWRF 模式所有資料所得的資料區間似乎是與颱風資料庫最接近的。

由於各資料庫中之有效資料點數不一定相同，圖 4—41 更進一步比對了相同颱風事件紀錄時間點下，自不同二維資料來源中擷取之七級風半徑的機率密度分布情形。圖中分帶皆為 50 公里，七級風半徑值從左側到右增加。上圖及中圖之藍色長條圖代表來自颱風資料庫最佳路徑參數的資料，紅色長條圖則依序代表二維氣象資料來自 ECMWF ERA5 及 TWRF 模式之初始場，下圖之藍色長條圖則為 ECMWF ERA5、紅色長條圖代表 TWRF 模式初始場。

上圖可以看到在擷取相同颱風事件點的情況下，颱風資料庫顯示高峰在 200 至 300 公里左右，急劇上升，逐漸下降。ECMWF ERA5 具有相似的整體形狀，但具有較低且較寬的峰值，稍微居中於颱風資料庫峰值的右側。顯示颱風資料庫分佈對於較小半徑具有更高的機率，而 ECMWF ERA5 則進一步擴展到更大半徑。TWRF 模式初始場與颱風資料庫的比對結果如中圖，兩種分佈的峰值都在 200 至 300 公里左右，但與 TWRF 模式初始場相比，颱風資料庫具有更高、更窄的峰值，而 TWRF 模式初始場則顯示稍寬的分佈，並延伸到更大的半徑分布。

根據這些圖表，TWRF 模式初始場分佈與颱風資料庫更為相似。這在中間的圖中很明顯，其中兩個分佈具有非常相似的形狀、峰值和範圍。ECMWF ERA5 分佈雖然整體形狀相似，但與颱風資料庫相比傾向於高估七級風半徑，顯示較大半徑的機率較高。另一方面，TWRF 模式初始場似乎更準確地捕捉了颱風資料庫

的特徵，特別是在最常見的 200 至 400 公里範圍內。然而，值得注意的是，所有三個資料庫都顯示出大致相似的分佈，表明熱帶氣旋七級風半徑的典型範圍普遍一致。

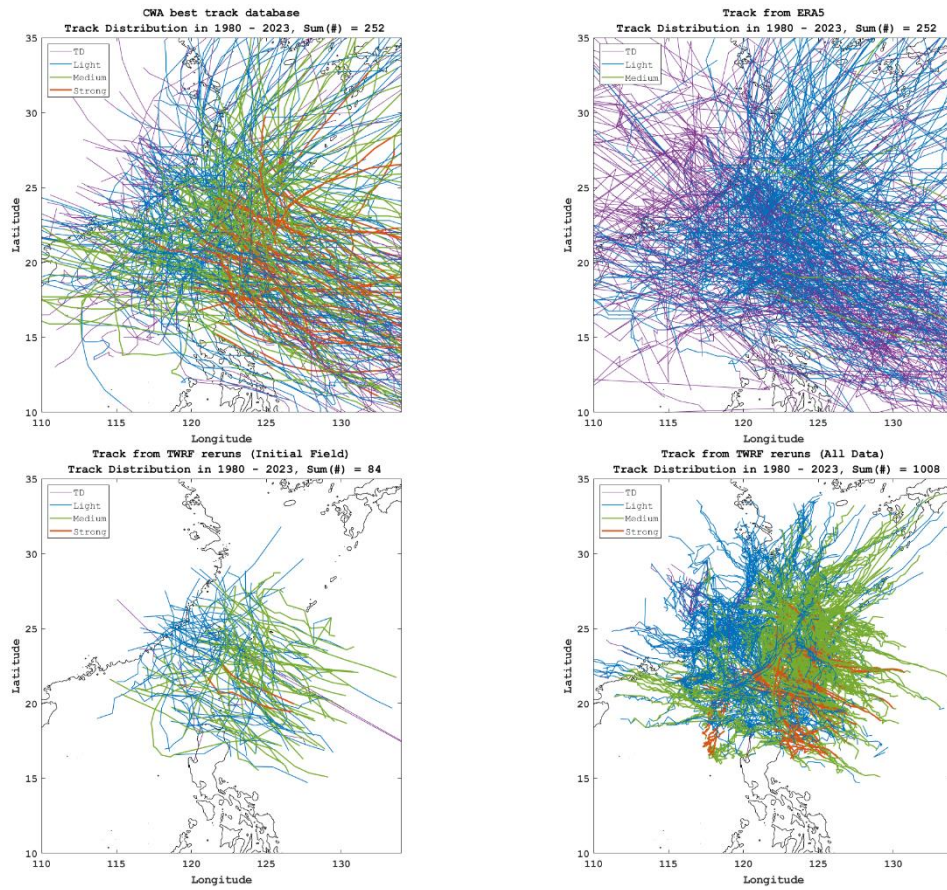


圖 4—31、不同資料來源所擷取之颱風路徑比對情形。

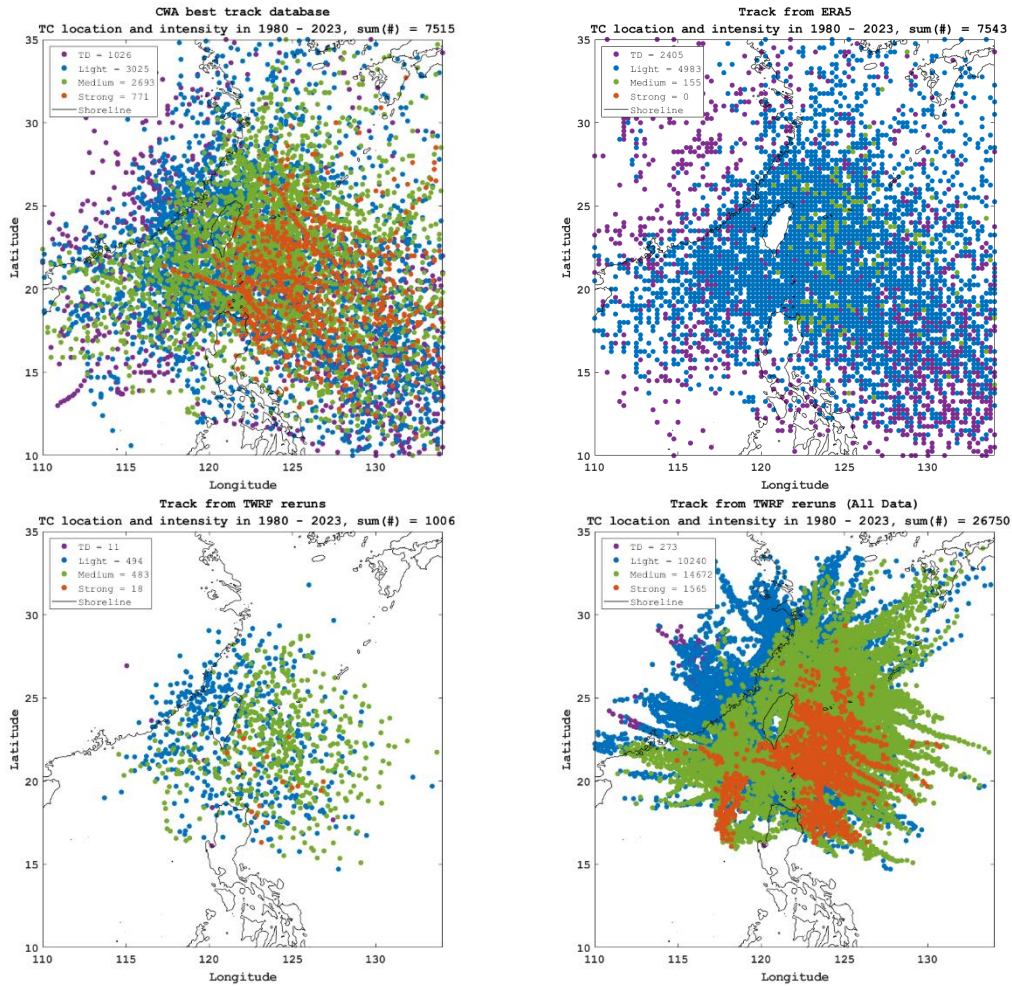


圖 4—32、不同資料來源所擷取之颱風強度分類分布比對情形。

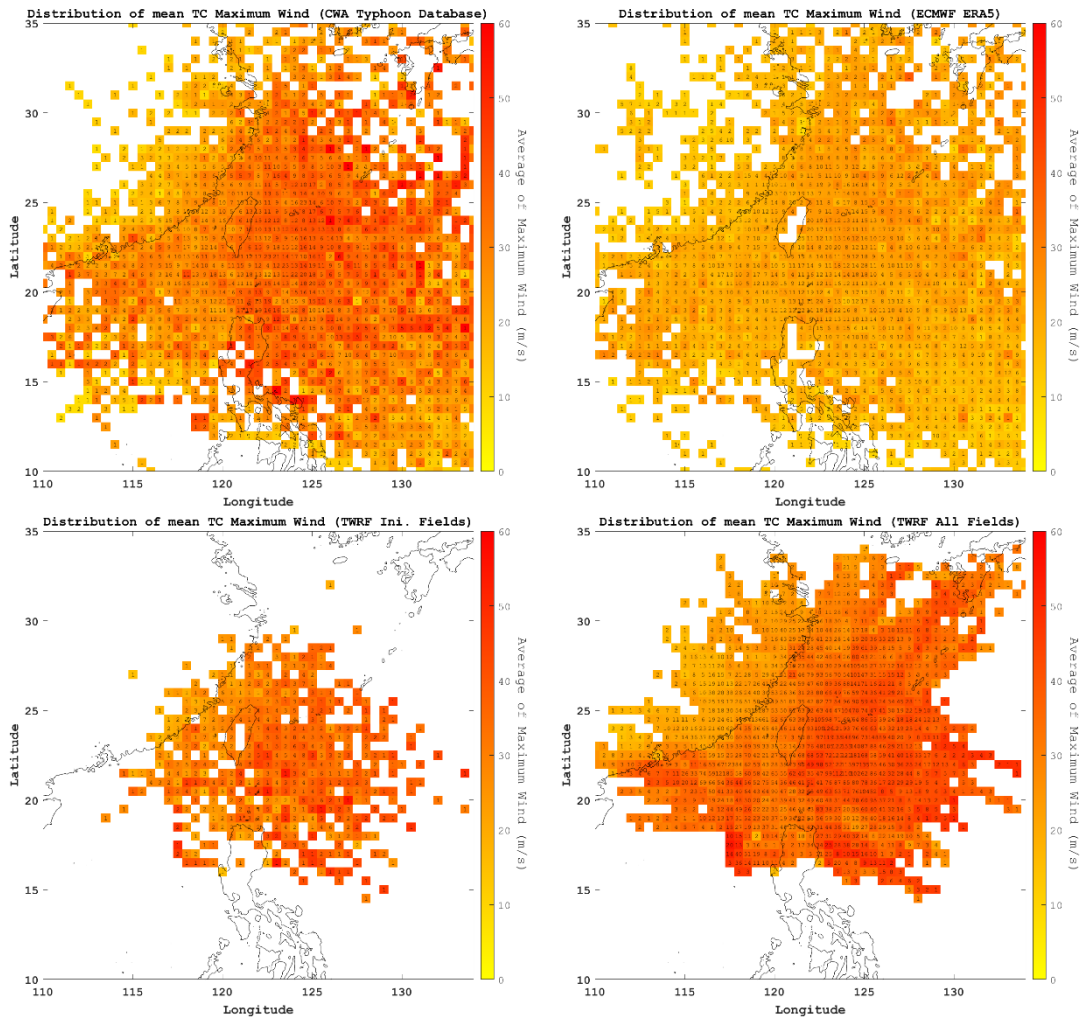


圖 4—33、不同資料來源所擷取之平均近中心最大風速分布情形。

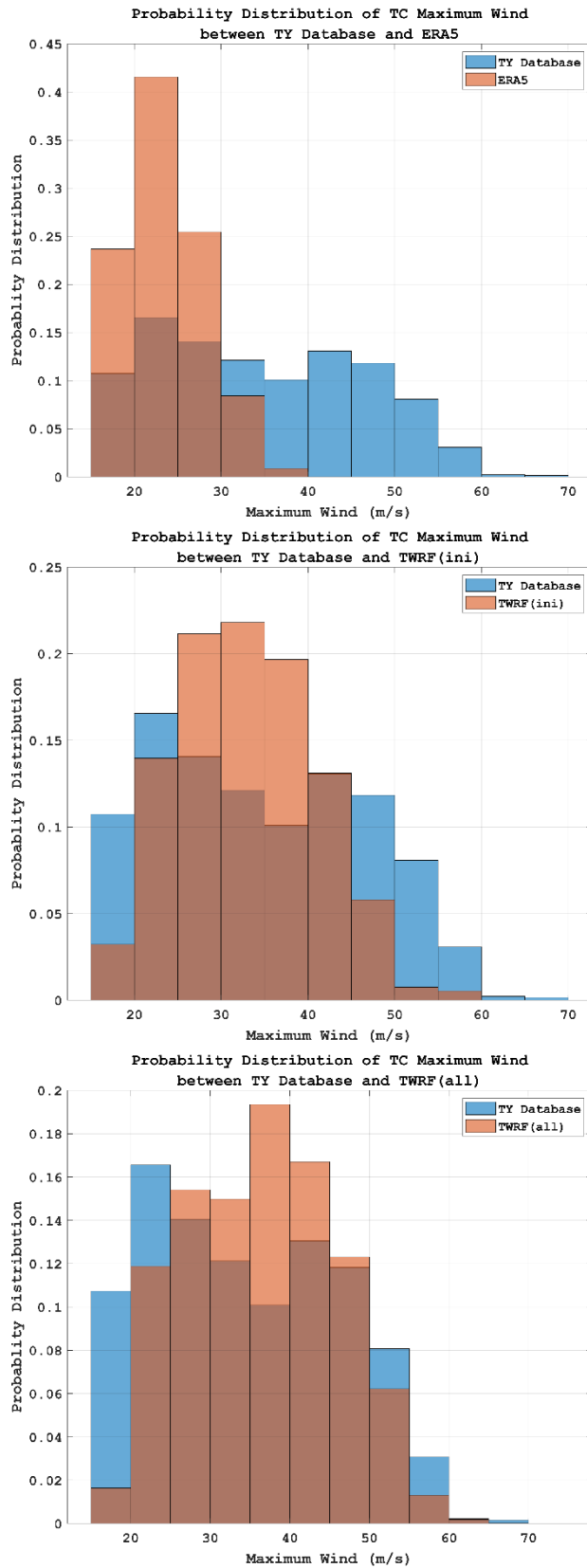


圖 4—34、自二維資料擷取之近中心最大風速與颱風資料庫之機率密度分布圖比對結果。(上) ERA5 (中) TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場及預報場。

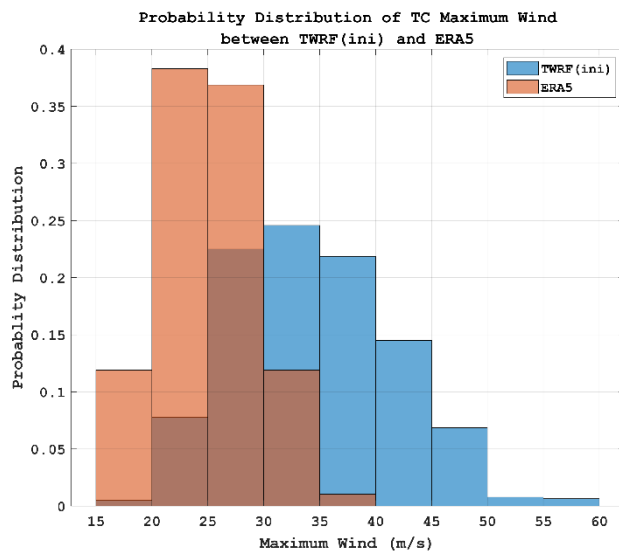
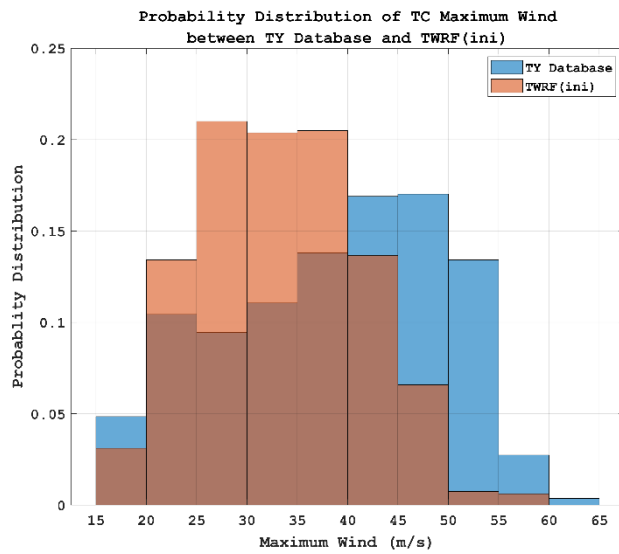
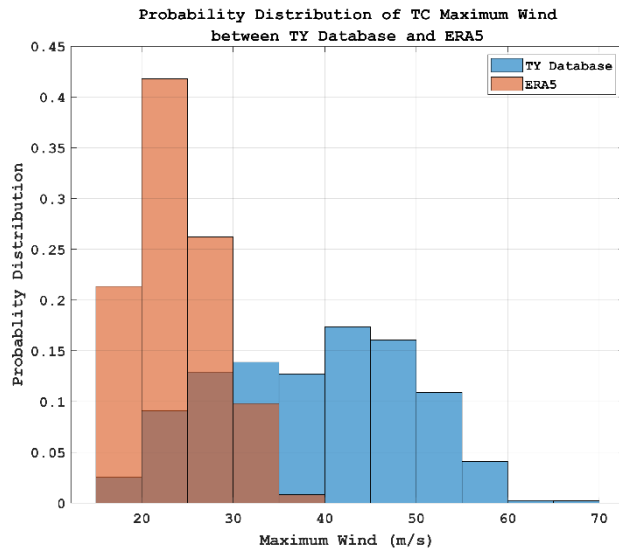


圖 4—35、自各資料庫所擷取之相同颱風記錄點之近中心最大風速機率密度分布圖比對結果。(上) 颱風資料庫與 ERA5 (中) 颱風資料庫與 TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場與 ERA5 之比對結果。

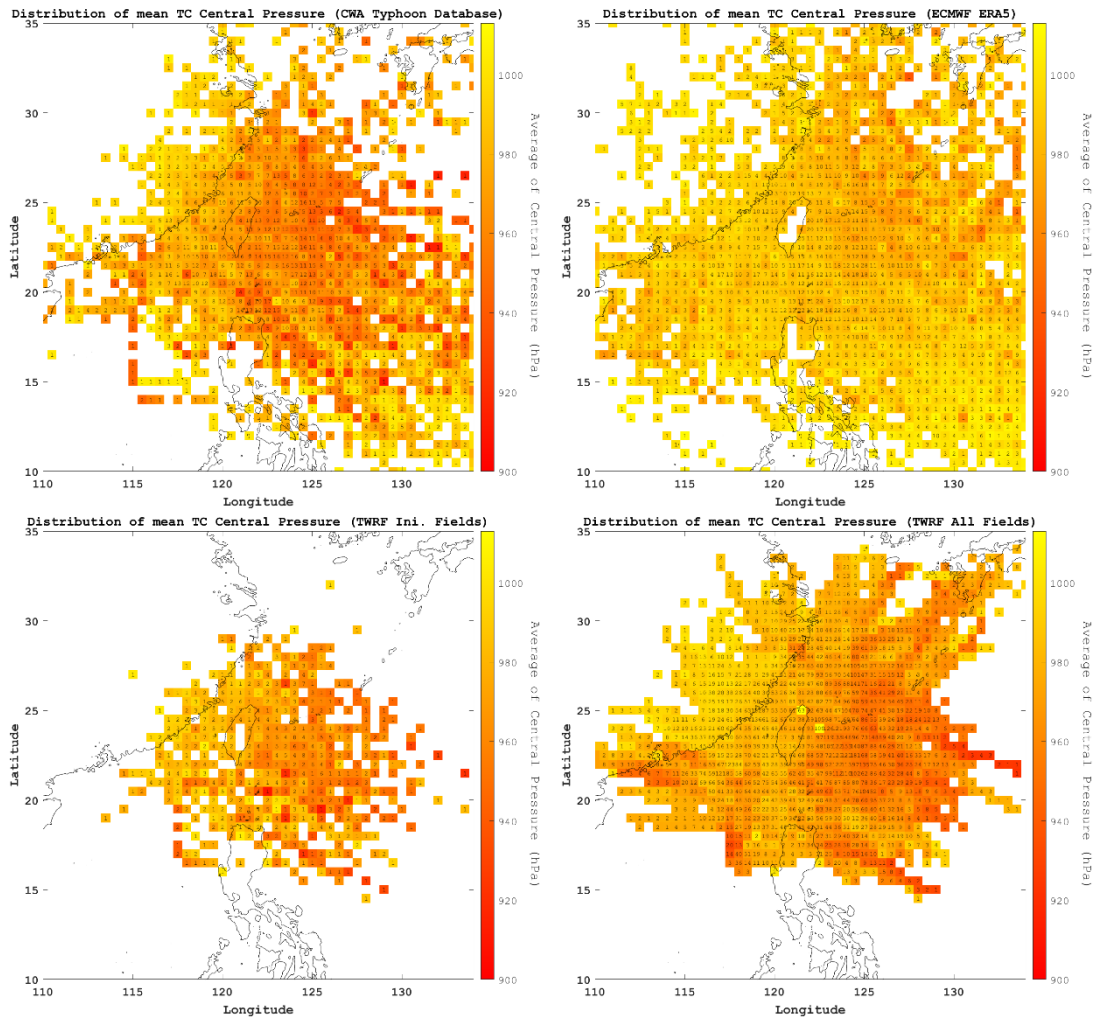


圖 4—36、不同資料來源所擷取之中心氣壓分布比對情形。

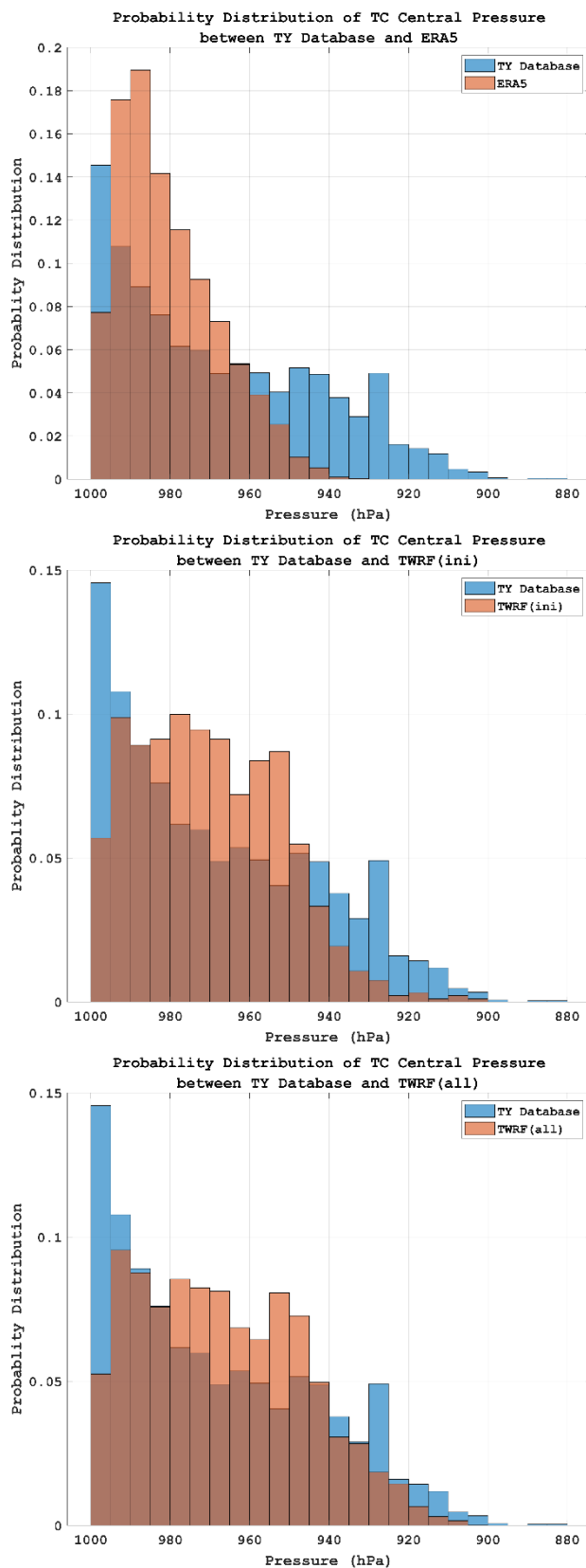


圖 4—37、自二維資料擷取之中心氣壓與颱風資料庫之機率密度分布圖比對結果。(上) ERA5 (中) TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場及預報場。

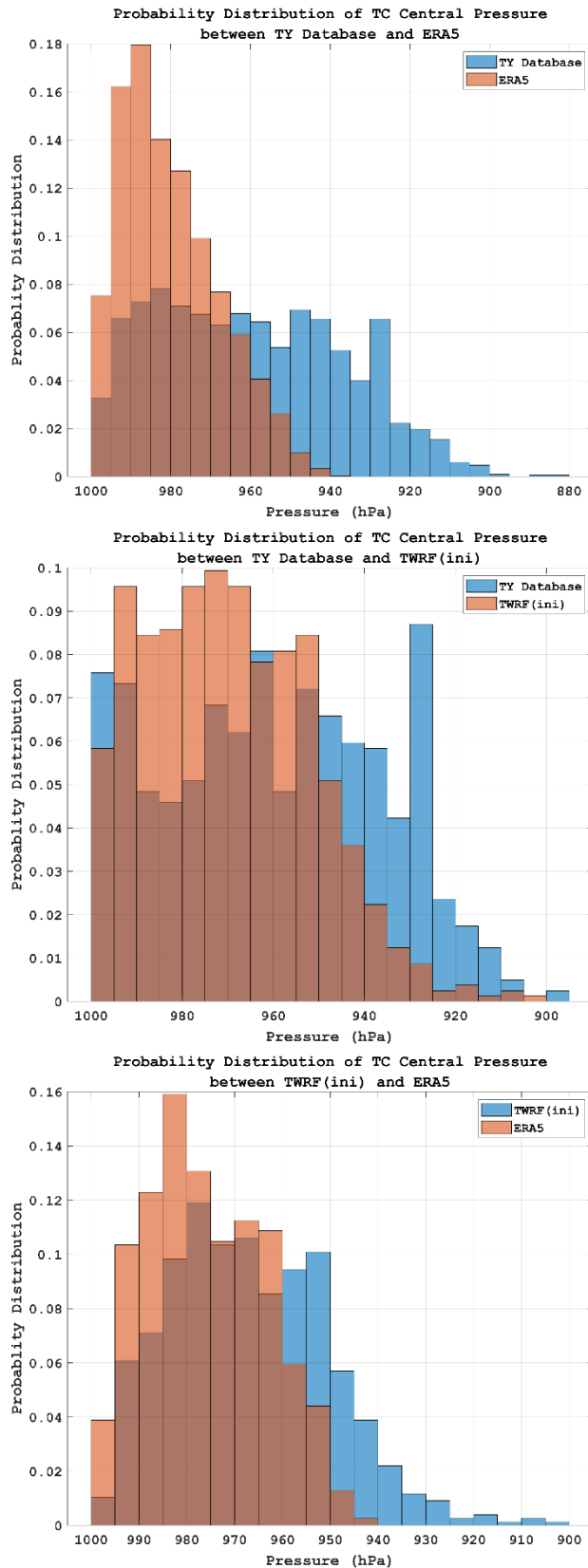


圖 4—38、自各資料庫所擷取之相同颱風記錄點之中心氣壓機率密度分布圖比對結果。(上) 颱風資料庫與 ERA5 (中) 颱風資料庫與 TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場與 ERA5 之比對結果。

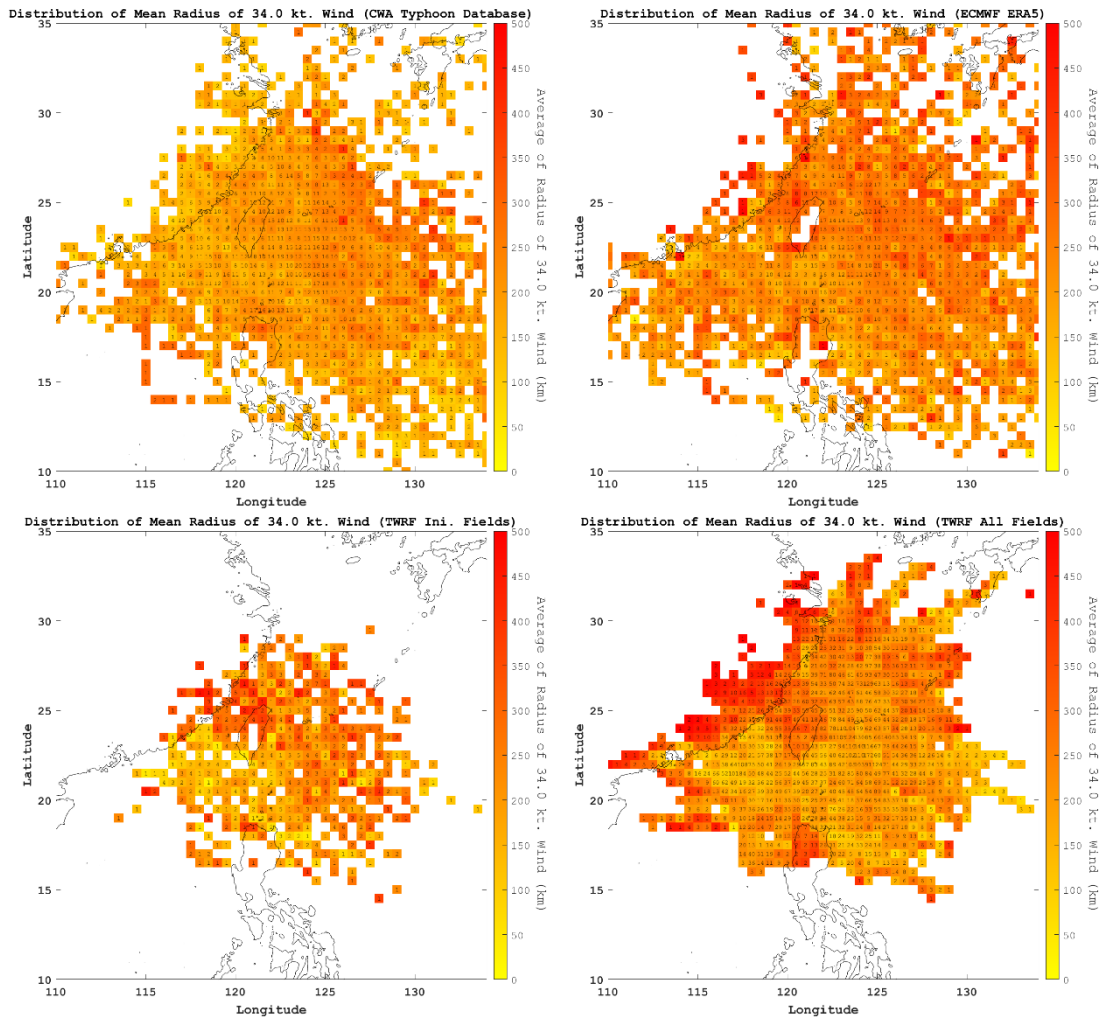


圖 4—39、不同資料來源所擷取之七級風半徑分布比對情形。

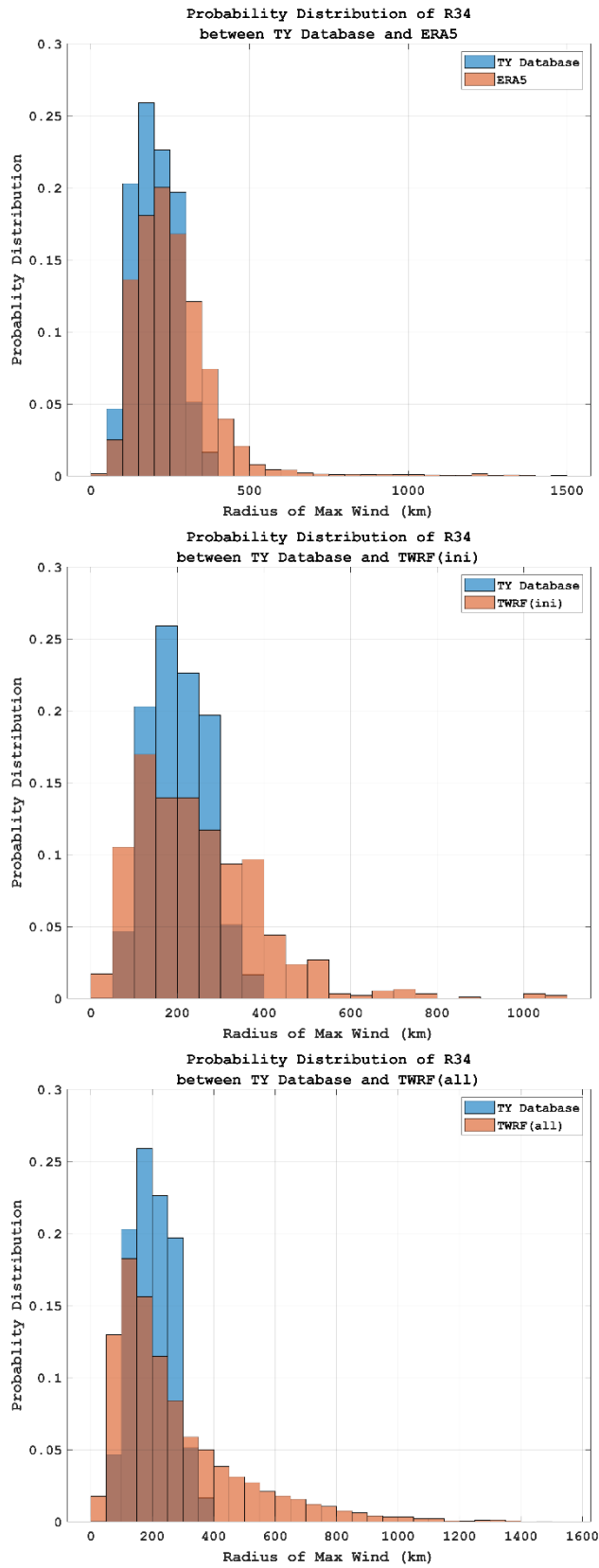


圖 4—40、自二維資料擷取之七級風半徑與颱風資料庫之機率密度分布圖比對結果。(上) ERA5 (中) TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場及預報場。

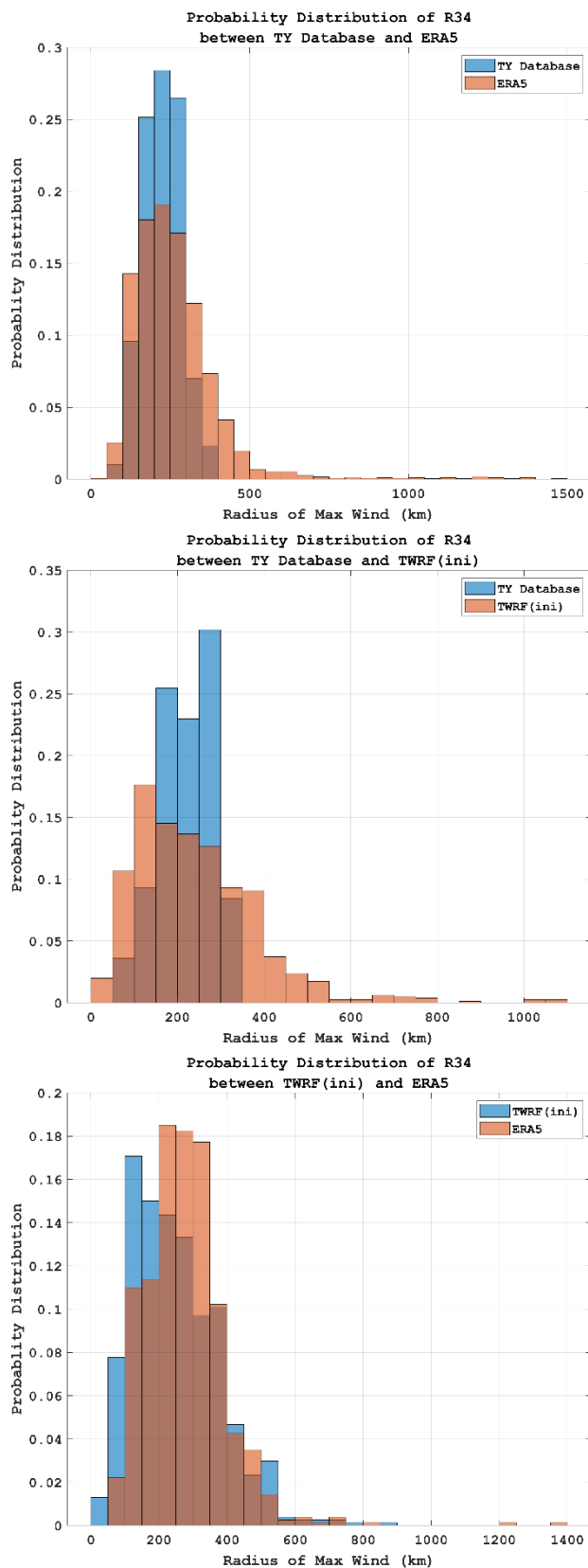


圖 4—41、自各資料庫所擷取之相同颱風記錄點之七級風半徑機率密度分布圖比對結果。(上) 颱風資料庫與 ERA5 (中) 颱風資料庫與 TWRP 初始場 (下) TWRP 初始場與 ERA5 之比對結果。

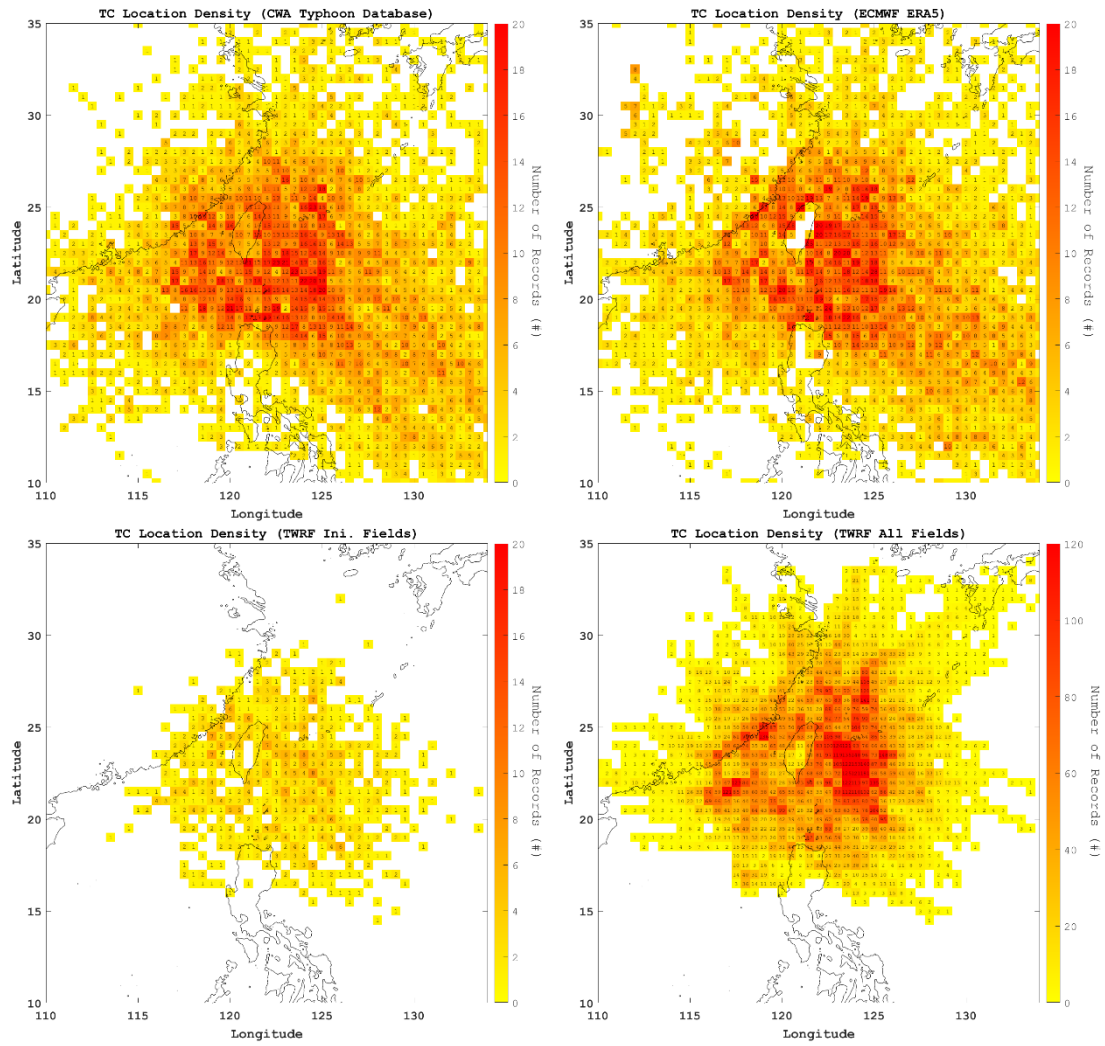


圖 4—42、不同資料來源之有效資料密度分布比對情形。

## 4-5 小結

本研究透過比較不同資料庫對颱風特徵的描述，包括中央氣象署最佳路徑資料庫、ECMWF ERA5、TWRP 模式初始場以及 TWRP 所有預報資料，對各資料庫的特性進行深入分析，獲得各項資料來源於重要參數之分布特性。

在颱風路徑分布方面，各資料庫均呈現出颱風主要從東南向西北移動的共同特徵。其中，最佳路徑資料庫與 ECMWF ERA5 的路徑覆蓋範圍較為廣泛，且路徑分布相似。TWRP 模式資料則在東北向路徑上表現得更為突出，特別是在台灣周邊和向東北延伸的區域有較高的路徑密集度。就覆蓋範圍而言，ECMWF ERA5 最大，其次為颱風資料庫及 TWRP 所有資料，而 TWRP 初始場的覆蓋範圍最小。

在颱風強度特徵分析中，發現 ECMWF ERA5 普遍低估颱風強度，這體現在近中心最大風速和中心氣壓的分析結果上。ECMWF ERA5 的颱風強度分布明顯偏向較弱，且在高風速事件的捕捉上表現不佳。相比之下，TWRP 初始場的強度表現與最佳路徑資料庫較為接近，雖然在某些情況下仍有低估的情形，但整體上能較好地捕捉到高風速事件。TWRP 所有預報資料則展現出較強的颱風強度，其風速分布與最佳路徑資料庫最為接近。而中心氣壓的分析結果中，所有資料庫都指出台灣東部海域是颱風中心氣壓的低值區，且呈現從東南向西北的氣壓遞增趨勢。ECMWF ERA5 的氣壓值普遍較高，再次印證其低估颱風強度的特性。TWRP 模式的表現較為平衡，特別是包含所有預報資料時，其氣壓分布趨勢與最佳路徑資料庫最為接近。

在七級風半徑的分析中，研究發現高值區域主要分布在北緯 20 度至 25 度之間。最佳路徑資料庫的七級風半徑多數分布在 100 至 300 公里之間，呈現出略微左偏的常態分布。ECMWF ERA5 雖然捕捉到類似的分布形態，但峰值略微偏移到更大的半徑範圍。TWRP 模式的表現，無論是初始場還是所有預報資料，都與最佳路徑資料庫展現出較高的一致性，特別是在典型的半徑範圍內。

綜合各項分析結果，可以得出 TWRP 模式整體表現優於 ECMWF ERA5，更

接近最佳路徑資料庫的特徵。雖然各資料庫在不同參數的分布上都存在特定的偏差，但 TWRF 模式，尤其是包含所有預報資料時，通常能夠最好地反映最佳路徑資料庫的分布特性。

這些研究發現對於改進颱風預報模式具有重要的參考價值。首先，它們揭示了不同資料庫在描述颱風特徵時的優勢和限制，有助於在實際應用中更好地選擇和使用這些資料。通過識別各個資料庫的偏差特徵，這些研究成果可以為未來模式的開發與改進提供明確的方向，特別是 ECMWF ERA5 在颱風強度估算方面的系統性低估問題，以及 TWRF 模式在某些方面的優異表現，都為模式的調整和優化提供了重要參考。

## 第5章、暴潮預報系統預報時效精進

中央氣象局現有之 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，並於指定機器運作。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「氣象局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 TWRP (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局理想風場模式，合計有五組，可依據作業或研究需求切換不同選項。

TWRP (Typhoon WRF) V2 為中央氣象局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 TWRP 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 TWRP 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。

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 110 至 112 年度委託研究計畫「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究」期間，轉移至中央氣象署之叢集電腦平台 Intel-Cluster 並完成作業化，利用叢集式電腦強大之運算效能來提升預報效率。於此同時，研究團隊並改良預報系統核心程式執行順序，由串聯執行改為並聯執行，大幅減少預報作業所需時間。

COMCOT-TWRf 暴潮預報系統之作業流程如圖 5—2，圖中直角方形區塊為預報系統於作業期間執行之重要步驟，圓角方形區塊為預報系統執行核心程式之前置步驟，虛線方形圓角區塊為判斷排程分歧路線之步驟，梯形區塊為預報員需要手動執行之步驟，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預報系統核心程式進行模擬之步驟。

COMCOT-TWRf 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。

113 年為配合署內高速運算電腦計算資源分配及相關計畫，由作業單位臨時加開工作項目需求，期望本研究團隊將原作業於叢集電腦平台之 Python 版本暴潮預報系統 (COMCOT-TWRF) 作業模式轉移至指定伺服器，並確認預報作業時效，包含以下工作項目：

1. 將暴潮預報模式移植至指定新伺服器。
2. 新伺服器安裝 DMS 系統並測試抓取 DMS 上的資料。
3. 評估預報模式分段執行之可能性。
4. FTP 上傳資料排程優化，使預報員得以盡早於指定資料庫接收資料。

工作項目「將暴潮預報模式移植至指定新伺服器」中，本團隊搭配預報系統核心程式改良及新伺服器效能，於 113 年度 09 月完成將暴潮預報模式移植至指定新伺服器，更新後之預報系統可以在 40 分鐘內完成 72 小時預報並完成上傳資料。

為計算模式預報時效及檢視模式運行細節，本團隊於預報系統執行期間皆會輸出預報時間紀錄，圖 5—3 與圖 5—4 為暴潮預報系統紀錄檔內執行核心程式步驟標記截圖，圖中展示紀錄主要為五項步驟之執行時間。以本次截圖時間為例，預報系統啟動時間為 2024 年 11 月 15 日 20 時 00 分，模式於 20 時 00 分起讀取氣象場資料並進行轉檔（標記步驟 1），並於 20 時 14 分產出潮汐邊界條件（標記步驟 2），並分別啟動純潮汐及潮汐加氣象力之暴潮模擬（標記步驟 3），於作業系統中之執行程式編號分別為 389825 及 389826，並於 08 時 15 分起等待預報系統核心程式完成模擬。於 20 時 30 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（標記步驟 4）。圖 5—4 中顯示預報系統於 20 時 35 分完成預報模擬後處理，並於 20 時 36 分啟動上傳資料（標記步驟 5）。

表 5—1 為根據過往版本預報系統及本年度暴潮預報系統作業化測試紀錄之時效比較表，依據上述預報系統重點步驟作為節點進行結算。表格內由上至下為歷年於指定伺服器中作業之預報系統版本，欄位由左至右為執行核心程式步驟

所需時間及預報系統執行總時長，單位為分鐘。

透過結算，於 182 機器的多工 (Multi-task) Python 版本中，氣象輸入場的格式轉換平均約為 15.0 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的平均時間約為 15.0 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，最多僅需 5.0 分鐘，因此 35.0 分鐘即可完成模擬。在效能提升方面，與 157 (Multi-task) Python 版本相比，資料轉換快了 2.0 分鐘 (約 11.8%效能提升)、模擬時間快了 22.8 分鐘 (約 60.3%效能提升)，且後處理時間縮短至 4.0 至 5.0 分鐘 (37.5%至 50%提升)，總模擬時間減少 27.8 分鐘，即 44.3%之效能提升。圖 5—5 及圖 5—6 則展示新舊版本預報系統所在之伺服器硬體設備以供參考。

工作項目「新伺服器需安裝 DMS 系統並測試抓取 DMS 上的資料」中，需要作業單位協助於新伺服器安裝 DMS 系統，經作業單位評估後發現該項需求於現階段可透過其他資料傳輸方式替代，研究團隊將待作業單位完成安裝 DMS 系統後測試抓取 DMS 上的資料。

工作項目「評估預報模式分段執行之可能性」中，原計畫方案為評估模式時效是否可以透過分段執行傳輸、讀取氣象場資料的方式使預報系統得以同步執行核心程式及氣象場輸入的步驟，以精省預報系統執行時間。經本研究團隊評估後，發現若要改動現有核心模式主要架構，所需付出時間成本與模式可精省時間恐不成比例。後續若需持續精進暴雨預報系統執行效能，則建議可從預報系統讀取氣象場及格式轉換方面著手。

工作項目「FTP 上傳資料排程優化」中，原預報系統上傳資料的排序依據為伺服器 IP 位址，並將預計傳輸之一維、二維數值資料、圖集產品等上傳完畢後，才接續傳輸資料至下一伺服器。依照作業單位預報時效需求，研究團隊已調整資料上傳之架構，改為優先上傳一維資料至各指定伺服器供預報員盡早檢視。在完成一維資料傳輸後，排程才會依序上傳其他預報產品。圖 5—7 為預報系統紀錄截圖，節錄預報產品上傳至伺服器之順序。其中 r.L 與 ss.L 為測站時序預報水位

資料，132 為作業單位要求指定優先上傳水位預報資料之伺服器位址。

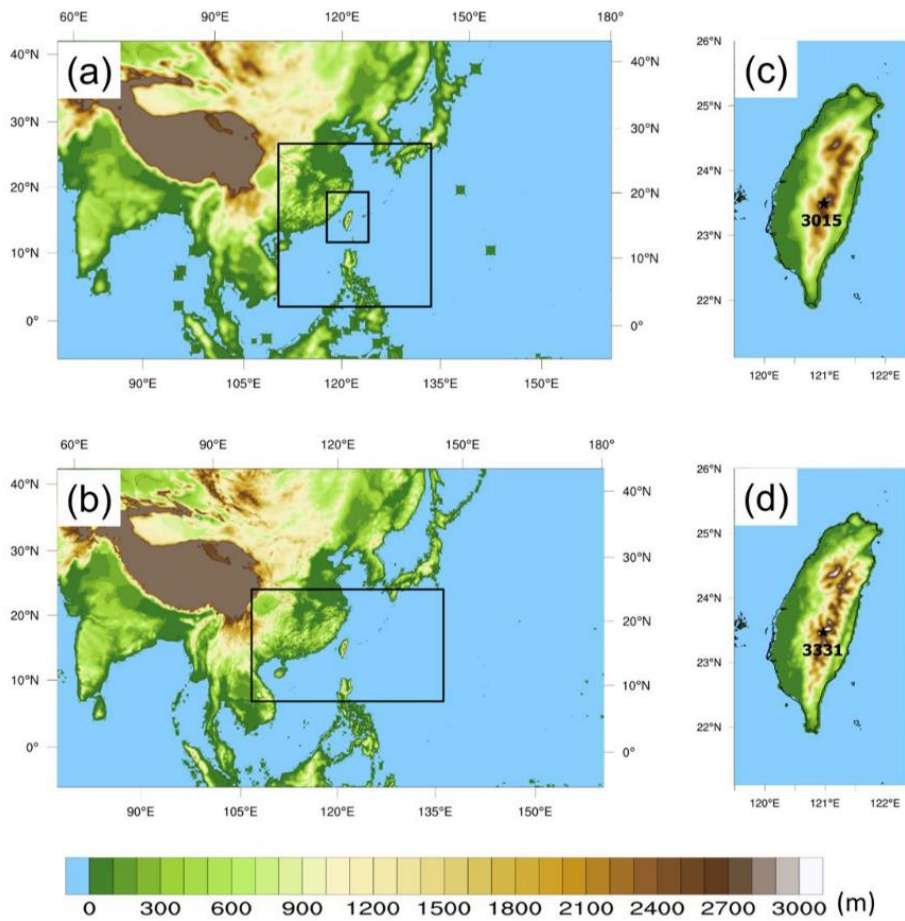


圖 5—1、(a) TWR V1 版本中三層巢狀網格的計算域。解析度依序為 45/15/5 公里；(b) TWR V2 版本中兩層巢狀網格的計算域分布，內外網格解析度分別為 15/3 公里。(c,d) 分別以 V1 和 V2 的最內層計算域的解析度顯示地形高度。數字為出現在標記為星號的位置處的最大地形高度。(Hsiao et al., 2020)

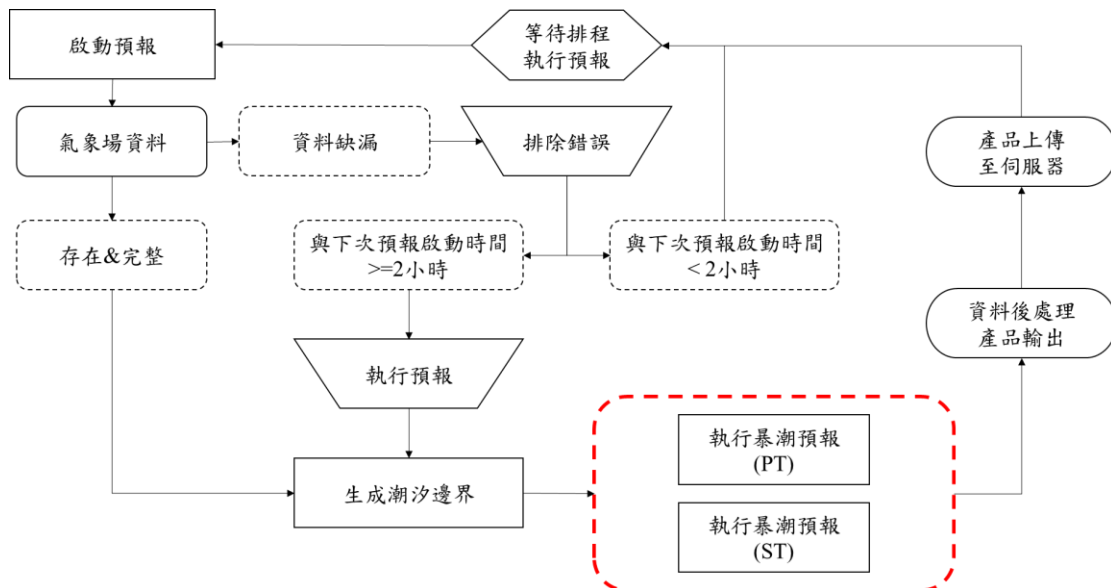


圖 5—2、COMCOT-TWRF 暴潮預報系統作業流程圖

```

192527 Input      : TWRF Typhoon Model\
192528 UTC Time   : 2024-11-05 06:00
192529 CPU Threads: 30
192530 Login Time : 2024-11-05 20:00
192531 Dir        : /home/wishdeen/COMCOT_TWRF_PP_2023
192532 #-----#
192533 2024-11-05 20:00 Loading TWRF file
192534 2024-11-05 20:00 Python: check twrfdata two point zero
192535 2024-11-05 20:00 ptransform twrf2comcot two point zero
192536 2024-11-05 20:05 wxtransform twrf2comcot two point zero
192537 2024-11-05 20:10 wytransform twrf2comcot two point zero
192538 2024-11-05 20:14 Python: tide warmup
192539 2024-11-05 20:14 Python: cal warmtide time
192540 2024-11-05 20:14 Python: tpxo9 run shuchun2
192541 2024-11-05 20:15 Python: generate_ctl
192542 2024-11-05 20:15 process id: 389825
192543 2024-11-05 20:15 Python: run_stormtides
192544 2024-11-05 20:15 Python: generate_ctl
192545 2024-11-05 20:15 process id: 389826
192546 2024-11-05 20:15 Python: Wait for Pure Tide and Storm Tide simulation be finished.
192547 2024-11-05 20:30 Both Simulations are finished.
192548 2024-11-05 20:30 ['Python: transform_gauge: Pure Tide']
192549      2024-11-05 20:30 Pure Tide/ts_record0001.dat
192550      2024-11-05 20:30 Pure Tide/ts_record0002.dat
192551      2024-11-05 20:30 Pure Tide/ts_record0003.dat

```

圖 5—3、暴潮預報系統紀錄檔內執行核心程式步驟截圖 (1)

```

92753 2024-11-05 20:34 095400 ...
92754 2024-11-05 20:34 096300 ...
92755 2024-11-05 20:34 097200 ...
92756 2024-11-05 20:34 098100 ...
92757 2024-11-05 20:34 099000 ...
92758 2024-11-05 20:34 099900 ...
92759 2024-11-05 20:34 100800 ...
92760 2024-11-05 20:34 101700 ...
92761 2024-11-05 20:34 102600 ...
92762 2024-11-05 20:34 103500 ...
92763 2024-11-05 20:34 104400 ...
92764 2024-11-05 20:34 105300 ...
92765 2024-11-05 20:34 106200 ...
92766 2024-11-05 20:34 107100 ...
92767 2024-11-05 20:34 108000 ...
92768 2024-11-05 20:34 Python: create_animation
92769 2024-11-05 20:34 Python: create_animation
92770 2024-11-05 20:34 Python: create_animation
92771 2024-11-05 20:34 Python: create_animation
92772 2024-11-05 20:35 Python: create_animation
92773 2024-11-05 20:35 Python: movedata
92774 2024-11-05 20:35 Bash: zip_data
92775 2024-11-05 20:35 Bash: netcdf bash
92776 2024-11-05 20:36 ftp_data_python twrf
92777 2024-11-05 20:36 Data transfer complete

```

圖 5—4、暴潮預報系統紀錄檔內執行核心程式步驟截圖 (2)

表 5—1、各版本預報系統時效比較表 (單位：分鐘)

	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
182 (Multi-task) Python	15.0	<1	15.0		4.0-5.0	35.0
效能提升百分比 (vs 前一版本)	11.8%	-	60.3%		37.5%-50%	44.3%

```
61.56.11.157
wishdeen@mmc157 ~]$ lscpu
Architecture:          x86_64
CPU op-mode(s):       32-bit, 64-bit
Byte Order:           Little Endian
CPU(s):               12
On-line CPU(s) list: 0-11
Thread(s) per core:   2
Core(s) per socket:   6
Socket(s):            1
NUMA node(s):        1
Vendor ID:            GenuineIntel
CPU family:           6
Model:               62
Model name:           Intel(R) Core(TM) i7-4960X CPU @ 3.60GHz
Stepping:             4
CPU MHz:              1854.711
CPU max MHz:          4000.0000
CPU min MHz:          1200.0000
BogoMIPS:             7203.79
Virtualization:       VT-x
L1d cache:            32K
L1i cache:            32K
```

圖 5—5、157 伺服器之 CPU 硬體規格截圖

```
61.56.11.182
wishdeen@COMCOT-TWRF182 ~]$ lscpu
Architecture:          x86_64
CPU op-mode(s):       32-bit, 64-bit
Address sizes:         46 bits physical, 57 bits virtual
Byte Order:           Little Endian
CPU(s):               64
On-line CPU(s) list: 0-63
Vendor ID:            GenuineIntel
Model name:           Intel(R) Xeon(R) Gold 6326 CPU @ 2.90GHz
CPU family:           6
Model:               106
Thread(s) per core:   2
Core(s) per socket:   16
Socket(s):            2
Stepping:             6
CPU(s) scaling MHz:   39%
CPU max MHz:          3500.0000
CPU min MHz:          800.0000
BogoMIPS:             5800.00
Flags:                fpu vme de pse tsc msr pae mce cx8 apic sep mtrr pge mca cmov
pat pse36 clflush dts acpi mmx fxsr sse sse2 ss ht tm pbe sysc
all nx pdpe1gb rdtscp lm constant tsc art arch perfmon pebs bt
```

圖 5—6、182 伺服器之 CPU 硬體規格截圖

```
res_06_2024110500_60_72hr.dat
move files to directory(2024110500) ...

zip storm tide and pure tide hourly data
convert ASCII format into NetCDF format
2024110500
transfer r.L and ss.L
    .132
    .99
    .136
    .3
[Errno 113] No route to host
[Errno 113] No route to host
transfer zip file
    .48
    .107
transfer figures
    .100
transfer NetCDF file
    .3
[Errno 113] No route to host
```

圖 5—7、COMCOT-TWRF 暴潮預報系統作業紀錄截圖



## 第6章、颱風暴潮與潮汐之非線性效應分析

本研究計畫為建置現實參數化模式（Realistic Parameterization, REP）資料庫，預計利用收集大量暴潮模式與二維大氣模式耦合之模擬結果，建置對應氣象資料的大型暴潮水位資料庫。未來資料庫建置完成，該模型只需要作業單位提供熱帶氣旋的預報路徑和強度資訊，搭配統計方法便足以生成呈現地形阻擋效應的暴潮水位預報成果，以彌補理想風場於颱風暴潮預報上的不足。

建置該模式之基礎假設，建立於颱風的移動速度遠低於自身風速，主要結構中的流場將快速從過渡階段轉變為準穩態，因此可以忽略颱風路徑帶來的瞬態效應。然而，由於颱風與潮汐之間的交互作用十分顯著，因此在建置 REP 資料庫前，首先需要釐清資料庫內儲存之暴潮水位資料，其模擬過程是否應納入潮汐的影響。若將潮汐納入考量，由於需要完整的天文潮資料配合不同颱風情境，建置資料庫所需的氣象資料量將大幅增加，遠超過目前可取得的資料範圍。反之，若資料庫中的水位模擬結果排除潮汐影響，雖然現有的氣象資料量足以支援模擬，但可能因忽略颱風暴潮與潮汐之間的非線性交互作用，而影響後續 REP 模式暴潮水位預報的準確性。

因此本工作項目主要目的為分析暴潮與潮汐在各測站位置之非線性交互作用強度，作為未來預報誤差來源分析之參考。

## 6-1 分析方法與資料

為探討暴潮模式中考量潮汐與否對於水位的影響，本團隊計畫執行以下情境模擬並提供模擬結果進行分析：

1. 模擬暴潮時，同時考量氣象場輸入與潮汐邊界輸入，該模擬結果將與現有作業中暴潮預報系統所得之暴潮水位（Storm Tide）相符。
2. 僅在模式中導入潮汐邊界，不考量氣象場。該模擬結果可以被視為在不受颱風影響的情況下應有的水位，該水位僅受潮汐驅動，因此可被視作純潮汐（Pure Tide）之水位模擬結果。
3. 僅在模式中導入二維氣象場，不在模式中考量潮汐。該模擬結果可以被視為僅受颱風影響的情況下，台灣沿海應有的水位。

以當前作業預報及一般案例研究論，為考量潮汐與暴潮間的非線性動態效應並盡可能提高模擬精確度，通常會將第一號情境模擬之水位扣除第二號情境模擬之水位，以得到水位殘差值（Residual）並將其視為颱風暴潮（Storm Surge）。部分氣候分析或統計分析研究中，在無法得知颱風事件當下之潮汐情形時，會將第三號情境模擬所得之水位直接稱為颱風暴潮（Storm Surge），雖然可以透過後續線性疊加方法疊加調和分析所得之潮汐水位進行初步評估，但在大部分情況下，由於忽略颱風與潮汐之非線性交互作用，暴潮水位及最大暴潮發生時間通常都會與觀測資料有落差。

颱風之路徑與強度與其所造成之暴潮水位高度有高度相關性，研究中利用第五章所收集之颱風案例，將其依據中央氣象署之颱風路徑分類加以區別，檢視過往案例中各測站之水位變化特性。為重現颱風事件，本研究選用 TWRF 重新模擬之初始氣象場執行颱風暴潮案例模擬，目前收集到有效且不重複之歷史事件合計 82 筆，細節列於表 3—1 至表 6—3，欄位依序為颱風編號、颱風名稱、TWRF 重新模擬的第一組模擬初始時間及最終組模擬初始時間（時間格式為「yyddmmhh」）、有效資料時數及該颱風路徑所屬分類。某些颱風的路徑分類標

記為「--(數字)」，表示颱風資料庫內沒有針對該颱風預定義的分類，由研究團隊根據觀察主觀判斷的結果，確保分析過程中的資料完整性。

圖 6—1 為颱風事件路徑分類示意圖，資料來源為中央氣象署颱風資料庫。圖中依據颱風行進方向及位置將颱風路徑分為 9 種主要類型。其中圖左主要顯示颱風西行之路徑 (1-5 類)，係以西行颱風路徑通過 122°E 經線為準，再以所經緯度不同為依據。圖右則顯示北行 (6-7 類)、自太平洋西行而後向東北轉向 (8 類) 及從南海生成移入 (9 類)。其中北行颱風以中央山脈為界分為 6、7 兩類，係以 22°N 為準。第 8 類為來自太平洋的轉向颱風，以 121°E 為分類依據；第 9 類為來自南海颱風，以 120°E 為分類依據。無法被歸類於上述主要類型之颱風，則屬於特殊路徑。

圖 6—2 為颱風事件路徑分類長條圖，圖中展示了不同颱風路徑分類的事件數量分布，橫軸為颱風路徑分類，從 1 至 9，以及特殊分類 (Others)。縱軸表示每個路徑分類出現的次數。從圖中可以看到，第 6 類路徑在歷年事件中發生次數最多，共有 18 次。第 1 類及第 5 類次之，分別有 13 次及 11 次。而第 8 類路徑最少，僅有 2 次。若以颱風行進方向判斷，則歷年颱風事件中，大部分的颱風主要為西行，且在西行的案例中有登陸與否的情況各佔一半。在北行的案例中，多數的颱風會在尚未抵達台灣前便北轉。

圖 6—3 為颱風事件路徑分類分布圖，圖中展示颱風路徑的分類，以及 1990 至 2023 年間在台灣附近的颱風案例。一條線代表一個颱風案例路徑，紅色線強調研究中具有 TWRP 重新模擬預報的時間，灰色線則表示該這段時間沒有 TWRP 重新模擬預報之二維氣象場資料。圖片展示了 9 種主要的颱風路徑分類 (CAT 01-09) 以及一個其他類別 (CAT Others)，圖中標題分別表示路徑分類編號及屬於該路徑分類的颱風案例總數。不同分類的案例數量差異明顯，且路徑的密集程度反映了某些區域更容易受到颱風影響。

## 6-2 依路徑分類之非線性效應分析

為了分析颱風與潮汐之間的非線性交互作用強度，本研究分析各地之潮差大小，並將其做為非線性效應之比較基準。研究中將考量潮汐之情境模擬所得之水位殘差值與僅考慮氣象場所得之水位相減後，審視該變化相較於當地潮差所佔比例，即將其定義為非線性強度，於後續研究中以百分比呈現，並搭配展示潮差水位分布情形以便交互參照。

圖 6—4 至圖 6—25 展示各路徑分類下各測站及沿海地區非線性效應百分比分布與潮差 (tidal range) 分布，分為單點測站與二維空間分布兩個部分。這兩部分的對應資料反映了潮差與非線性效應的空間變化，並且分別在不同的情境下進行展示，包括單點測站的最大、平均、最小值，以及二維空間分布的最大及最小值。圖中潮差值為各颱風事件期間，模式導入潮汐邊界後，所得純天文潮之最大、最小值之差距。

其中，非線性效應百分比顯示了颱風引發的非線性效應對潮位變化的百分比影響，且百分比以潮差作為分母，展示了不同地點的非線性效應相對於潮差的影響程度。若百分比為正值，則表示實際的水位疊加效應大於單純的線性疊加，颱風與潮汐的非線性交互作用較強。反之則表示實際的水位疊加效應小於單純的線性疊加，颱風引發的水位變化可能與潮汐作用相抵消，甚至降低總水位。而數值大小代表這種非線性交互作用相對於當地潮差的重要程度。

潮差分布則顯示了潮差在各個地區的分布情形，因其定義為一個潮汐周期內，最高潮與最低潮水位之間的落差，故可以確保無負值。上半部分展示單點測站資料分布，展示了各測站資料範圍的最大、平均、最小值，依序以藍色、橘紅色、黃色表示。下半部分則為二維空間分布，以顏色區塊展示資料區間之最大及最小值，能比單點測站圖更全面地展示了非線性效應的空間分布特徵，有助於識別某些地區特定的非線性效應趨勢。

圖 6—4 展示第一類路徑分類下各潮位站之非線性效應百分比 (上) 及潮差

分布（下）。左側的非線性效應百分比分布圖與右側的潮差（Tidal Range）分布圖。非線性效應百分比圖中可以看到，大多數測站的效應在 $\pm 20\%$ 範圍內，最大值普遍為正值、最小值普遍為負值、平均值接近零值或負值，表示颱風與潮汐交互作用在大部分情況下對整體水位影響不大，但在離島測站出現較大的極值，顯示這些地區的交互效應較為顯著，而台灣本島的各測站非線性效應分布範圍較為相似。潮差分布圖中顯示，平均潮差大於 2.0 公尺的測站主要位於西部（石門至台西）及離島地區（澎湖、金門、馬祖），而最大潮差則有機會達 4 至 6 公尺，整體呈現較為平滑的空間變化。

以直接關聯性來看，由於第一類路徑之颱風主要自太平洋向東北行經台灣北部且未登陸，因此西部及西南部測站所受影響相對有限。但即使潮差較大的區域（如中部沿海），非線性效應的百分比絕對值也並不一定較大，這表示非線性交互作用的強度與潮差大小並非簡單的正相關。但即使如此，在潮差較大的離島測站，非線性效應的最大百分比通常也較高。這表明潮差較大的地區可能會受到更強的非線性效應影響，其考量潮汐時得到的模式水位有機會高於單純用氣象場模擬所得到的水位，且使得颱風與潮汐之間的相互作用更加顯著。

圖 6—5 展示第一類路徑案例下台灣沿海之（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。圖上半部為最大值分布，下半部為最小值分布。非線性百分比最大值分布圖（左上）中可以看出，圖中整體接近 0%，表示在第一類路徑中，即使在最大非線性效應時，其強度相對於潮差仍然不是很顯著。然而，局部區域（如澎湖附近）出現略微偏紅的區域，顯示有較強的正向非線性效應，且中國沿海地區、東沙島等地的非線性效應也略大於台灣本島地區。非線性百分比最小值分布圖（左下）中可以看出，台灣沿海地區之非線性強度也大多為 0%，但有局部出現淺藍色區域，代表有負向的非線性效應，即導致水位的降低或波動被抵消。

潮差最大值分布圖（右上）中，台灣西北部和澎湖、金門、馬祖的潮差最大值相對較大，顯示這些地區的潮汐波動幅度顯著（紅色區域），最大潮差可達 7-8 公尺。東部、南部及東沙島地區的潮差則相對較小。潮差最大值分布圖（右下）

中，可以看到整體呈現黃色調，表示最小潮差普遍較小。於空間分布趨勢來看，其與潮差最大值分布情形類似，但數值範圍較小，且北部仍然維持較大的潮差。

於空間特徵上看，潮差的空間變化很有規律，並呈顯明顯的地理梯度；非線性效應的空間分布則相對潮差零散，且並不完全跟隨潮差的分布模式。此外，在離島區域往往可以表現出較強的非線性效應，這可能與淺水效應或該地區地形相對複雜有所關聯。

圖 6—6 展示第二類路徑分類下各潮位站之非線性效應百分比（上）及潮差分布（下）。從測站資料分布來看，非線性效應百分比的變化範圍較第一類路徑更為明顯，大部分測站的效應在-30%至+30%之間波動。最大值在北部、西部及離島地區多呈現正值，且部分測站達到 30%以上。而最小值則除了西部地區測站外，普遍為負值，約在-10%至-50%之間，平均值則在 10%至-20%附近微幅波動。各測站於該類路徑之潮差分布圖則顯示，各測站的平均潮差約在 1.0 至 4.0 公尺之間，最大潮差可達 4 至 6 公尺，馬祖測站甚至接近 7 公尺，顯示出明顯的地理差異性。

圖 6—7 呈現第二類路徑案例下台灣沿海之（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。在非線性效應百分比最大值分布圖（左上）中，台灣北部與西北部沿海呈現較明顯的正向非線性效應（淺黃至淺綠色區域），在金門西北部（中國沿岸地區）及澎湖東北部則有強烈的正向非線性效應（深紅色），表示在這些地區颱風與潮汐的交互作用會加強水位的上升。非線性效應最小值分布圖（左下）則顯示北部與西北部沿海維持在接近 0%的水平，但大部分區域出現些許負向效應（淺藍色區域），金門地區及澎湖東北海域則有明顯的負向效應。由於澎湖測站點位於澎湖南部，因此單點測站中無法明顯看出該特徵。

潮差分布圖（右側）中，最大值分布（右上）顯示台灣西北部沿海、澎湖及金門地區的潮差最為顯著（紅色區域），可達 6 至 8 公尺。東部及南部沿海的潮差相對較小（黃色區域），約 2 至 3 公尺。最小值分布圖（右下）則呈現相似的空間分布型態，但數值範圍明顯較小，較大潮差的區域約為 3 至 5 公尺，而較小

潮差的區域則在 2 公尺以下。

從空間特徵來看，第二類路徑颱風（往往自台灣東部靠近並自東北部地區登陸）對東部與北部沿海的非線性效應影響最為顯著，這可能與颱風路徑直接影響這些區域有關。此外，雖然西部沿海擁有較大的潮差，但非線性效應的強度在此類路徑中並未觀察到其隨潮差增加而增強，這再次說明非線性交互作用的強度與潮差大小之間並非簡單的線性關係。從澎湖東北部及金門沿海的非線性強度非常強烈的現象看來，颱風與潮汐之間的交互作用可能還受到局部地形特徵及水深等其他因素的影響。

圖 6—8 展示第三類路徑分類下各潮位站之非線性效應百分比（上）及潮差分布（下）。從測站資料分布來看，非線性效應百分比的變化範圍相當顯著，大部分測站的效應在 -50% 至 +50% 之間波動。最大值在北部、西部至離島測站呈現明顯的正值，部分測站甚至超過 50%，而東部、西南部及部分南部測站的最大值則多為負值。最小值除西部地區接近 0% 外，多數測站則普遍為負值，在 -10% 至 -50% 之間。平均值則在 20% 至 -30% 之間波動，顯示整體而言負向效應略占優勢。各測站的潮差分布圖顯示，平均潮差約在 1.0 至 3.5 公尺之間，最大潮差在中部沿海測站可達 3.5 至 4.0 公尺，離島測站（馬祖、金門）則可達 5 公尺左右。

檢視單點測站非線性百分比與潮差之間的關聯性，北部測站的潮差變化範圍小於 1.0 公尺，非線性效應百分比卻有較大幅度的變化，範圍介於 50% 至 80%。東部、西南部及南部測站的潮差範圍與非線性效應百分比分布範圍表現較為一致，而南部的非線性效應分布範圍略大於東部測站，多為負向效應。從台中港至安平等中西部測站，潮差明顯較大（約 3-4 公尺），同時也出現較大的正向非線性效應變化範圍。於離島測站方面，馬祖和金門等離島測站雖然具有最大的潮差（4-5 公尺），但其非線性效應並未同比例增加。從空間分布上看，相鄰測站間的潮差變化通常是漸進的，但非線性效應的變化則較為劇烈，相鄰測站（如北部）可能出現明顯的跳躍。

圖 6—9 呈現第三類路徑案例下台灣沿海之（左）非線性效應百分比與（右）

潮差二維分布情形。在非線性效應百分比最大值分布圖（左上）中，台灣西北部及澎湖、金門、東沙島周邊海域呈現較強的正向非線性效應（黃色至紅色區域），最大如澎湖東北部可達 80% 以上，而台灣本島東部、西南部沿海則維持在較弱的負向效應（淺綠色）。非線性效應最小值分布圖（左下）則顯示台灣東北、西南部及澎金馬沿海出現顯著的負向效應（淺藍至深藍色），最小可達 -80%，而東部、西北部及澎湖西南部沿海的負向效應相對較弱（淺藍至綠色）。

潮差分布圖（右側）中，最大值分布（右上）顯示台灣西北部沿海及離島地區的潮差最為顯著（紅色區域），可達 5 至 7 公尺。中南部及東部沿海的潮差相對較小（黃色區域），約為 2 公尺。最小值分布圖（右下）則呈現相似的空間分布型態，但數值範圍較小，較大潮差的區域約為 3 至 4 公尺，而較小潮差的區域則在 2 公尺以下。

從空間特徵來看，第三類路徑颱風在台灣西北部及離島沿海地區產生最顯著的非線性效應，且正負向效應的強度都相當明顯。這種分布特徵可能與該類路徑颱風（往往自太平洋向台灣中部海域接近、登陸及出海）的移動路徑有關。此外，雖然中西部沿海地區擁有較大的潮差，但非線性效應的強度反而不如西北部地區，這顯示非線性交互作用的強度可能單純由潮差大小所主導。此外在澎湖周邊海域，水深變化較大的區域（東北部）雖然潮差變化相對平緩，但非線性效應卻出現明顯的空間梯度，暗示地形變化可能是影響非線性效應的重要因素。金門、馬祖等離島周邊的潮差分布相對均勻，但非線性效應卻呈現出複雜的空間變化模式，這可能與複雜的地形效應和局部環流有關。

圖 6—10 展示第四類路徑分類下各潮位站之非線性效應百分比（上）及潮差分布（下）。從測站資料分布來看，非線性效應百分比的變化範圍相對較小，大部分測站的效應在 -30% 至 +30% 之間波動。最大值在北部、西部及離島測站呈現正值，約在 10% 至 30% 之間，其他測站則多維持在負值，約 -10% 以內。最小值除了金門超過 -50% 外，其他測站則普遍落在 10% 至 -30% 之間。平均值則在 10% 至 -20% 之間波動，顯示整體而言負向效應略占優勢。各測站的潮差分布圖顯示，

平均潮差約在 1.0 至 4.0 公尺之間，最大潮差在中部沿海測站可達 4.0 至 4.5 公尺，金門與馬祖測站則超過 6 公尺。

檢視單點測站非線性百分比與潮差之間的關聯性，北部測站的潮差變化範圍約為 1 公尺，非線性效應百分比變化相對較大，範圍約在 40%。東部及西南部測站的潮差範圍較小（約 1.0 至 1.5 公尺），非線性效應變化也相對較小（約 20%）。中西部測站雖具有較大的潮差（3.0 至 4.0 公尺），但非線性效應的變化範圍（約 20%）並未隨潮差增加而明顯增加。金門與馬祖等離島測站雖具有最大潮差（5.0 至 6.0 公尺），但非線性效應的變化範圍非常懸殊。

圖 6—11 呈現第四類路徑案例下台灣沿海之(左)非線性效應百分比與(右)潮差二維分布情形。在非線性效應百分比最大值分布圖(左上)中，台灣西北部、澎湖及東沙島周邊海域呈現較強的正向非線性效應，最大可超過 80%，而台灣本島其他沿海則維持在較弱的負向效應（淺綠色）。非線性效應最小值分布圖（左下）則顯示台灣東部、南部、金門沿海及澎湖周邊海域出現較明顯的負向效應（深藍色），最低超過-80%，而西北部沿海的非線性效應相對較弱（淺藍至綠色）。

潮差分布圖（右側）中，最大值分布（右上）顯示台灣西北部沿海及離島地區的潮差最為顯著（紅色區域），可達 5 至 7 公尺。中南部及東部沿海的潮差相對較小（黃色區域），約為 2 至 3 公尺。最小值分布圖（右下）則呈現相似的空間分布型態，但數值範圍較小，較大潮差的區域約為 3 至 4 公尺，而較小潮差的區域則在 2 公尺以下。

從空間特徵來看，第四類路徑颱風（自台灣東方太平洋海域接近並自台灣東南方登陸）通常會在台灣西北部及澎湖周邊海域產生最顯著的正向非線性效應。在台灣海峽中，此區域呈現出明顯的潮差梯度，然而非線性效應的分布並未跟隨此梯度變化。在澎湖、金門等離島周邊的淺水區域，雖然潮差分布相對均勻，但非線性效應卻出現局部的強化現象（如澎湖東側出現較強的正向效應），這種現象可能反映出淺水效應在特定地形條件下的重要性。

圖 6—12 展示第五類路徑分類下各潮位站之非線性效應百分比（上）及潮差

分布(下)。從測站資料分布來看，非線性效應百分比的變化範圍較為集中，大部分測站的效應在-30%至+30%之間波動。最大值在北部及離島測站呈現較大的正值，約在-10%至 20%之間，而東沙島測站出現顯著極值接近 70%。最小值除了金門測站接近-70%外，其他測站則普遍落在-30%至 10%之間。平均值則除了東沙島及金門外，大部分測站皆在 10%至-10%之間小幅波動，顯示整體非線性效應相對較弱。各測站的潮差分布圖顯示，平均潮差約在 1.0 至 4.0 公尺之間，最大潮差在中部沿海測站及澎湖可達 4.0 至 4.5 公尺，馬祖測站則接近 6 公尺。

檢視單點測站非線性百分比與潮差之間的關聯性，北部及東部測站的潮差變化範圍約 1.0 至 2.0 公尺，非線性效應百分比變化相對穩定，維持在 30%範圍內。中西部測站雖具有較大的潮差(3.0 至 4.5 公尺)，非線性效應的變化範圍仍維持在±15%以內。離島測站的表現相當懸殊，馬祖具有最大潮差(5.0 至 6.0 公尺)，但非線性效應的變化範圍是所有離島中最小的(20%)，而東沙島擁有離島中最小的潮差(2.0 公尺以下)，卻有劇烈的正向非線性效應，最大超過 50%。

圖 6—13 呈現第五類路徑案例下台灣沿海之(左)非線性效應百分比與(右)潮差二維分布情形。在非線性效應百分比最大值分布圖(左上)中，台灣西北部及澎湖海域呈現較強的正向非線性效應，且於澎湖東北部海域最大超過 80%，而台灣本島其他沿海則維持在較弱的正向效應或接近零值。非線性效應最小值分布圖(左下)則顯示澎湖及金門沿海出現較明顯的負向效應(深藍色)，最小可達-80%，而其他區域的負向效應相對較弱(淺藍至綠色)。潮差分布圖(右側)中，最大值分布(右上)顯示台灣西北部沿海及離島地區的潮差最為顯著(紅色區域)，可達 5 至 7 公尺。中南部及東部沿海的潮差相對較小(黃色區域)，約為 2 至 3 公尺。最小值分布圖(右下)則呈現相似的空間分布型態，但數值範圍較小，較大潮差的區域約為 3 至 5 公尺，而較小潮差的區域則在 2 公尺以下。

從空間特徵來看，第五類路徑颱風(自太平洋接近台灣，並自台灣南方海域穿過，但未直接登陸)在澎湖、東沙島及中國沿海產生最顯著的非線性效應。值得注意的地方是，即使颱風中心距離上述地區較遠，但氣象場與潮汐互動所產

生的非線性效應仍與最受颱風影響的南部地區相當，甚至更為顯著。此外，澎湖海域雖具有中等程度的潮差（1.5 至 2.5 公尺），但出現全台最大的非線性效應變化（-80%至+70%），這種極端的非線性效應主要集中在澎湖周邊的淺水區域，說明在特定水深條件下，即使潮差不是最大，仍可能因地形效應而產生強烈的非線性交互作用。東部海域方面，不僅潮差較小（約 1 至 2 公尺），非線性效應也維持在較小且穩定的範圍（約 0%至 10%），這種穩定性可能與當地較深的水深及較簡單的地形有關，顯示在深水區域，潮差與非線性效應可能呈現較一致的相關性。

圖 6—14 展示第六類路徑分類下各潮位站之非線性效應百分比（上）及潮差分布（下）。從測站資料分布來看，大部分測站的效應在-40%至+40%之間波動。最大值在北部、西部及離島測站呈現正值，約在 10%至 20%之間，而東沙島測站出現顯著極值接近 40%。最小值除了金門測站接近-60%外，其他測站則普遍落在 0%至-40%之間。平均值則除了東沙島的非線性效應接近 20%外，大部分測站皆在 0%至-20%之間小幅波動，顯示第六類路徑分類的颱風事件對各潮位站整體非線性效應相對較弱。各測站的潮差分布圖顯示，平均潮差約在 1.0 至 4.5 公尺之間，最大潮差在中部沿海測站及澎湖達 4 至 5 公尺，馬祖測站則超過 6 公尺。

檢視單點測站非線性百分比與潮差之間的關聯性，北部及東部測站的潮差變化範圍約 1.0 至 2.0 公尺，非線性效應百分比變化相對穩定，維持在 0%至 30%範圍內。中西部測站具有較大的潮差分布範圍（2 至 5 公尺），非線性效應的變化範圍卻小於 20%。離島測站的表現則無法看出規律，潮差分布範圍的大小與非線性效應的分布範圍無明顯一致性。

圖 6—15 呈現第六類路徑案例下台灣沿海之(左)非線性效應百分比與(右)潮差二維分布情形。在非線性效應百分比最大值分布圖(左上)中，台灣東北角、澎湖、金門及東沙島海域呈現較強的正向非線性效應（黃色至紅色區域），且於東沙島周邊海域最大超過 50%，而台灣本島其他區域沿海則維持在較弱的正向效應或接近零值。非線性效應最小值分布圖（左下）則顯示金門、澎湖東北部出現較明顯的負向效應，最小可達-80%，而其他區域如台灣本島東北部及西南部沿

海的負向效應相對較弱（淺藍至綠色），約為 30%。

潮差分布圖（右側）中，最大值分布（右上）顯示台灣西北部沿海及離島地區的潮差最為顯著（紅色區域），可達 5 至 7 公尺。中南部及東部沿海的潮差相對較小（黃色區域），約為 2 至 3 公尺。最小值分布圖（右下）則呈現相似的空間分布型態，但數值範圍較小，較大潮差的區域約為 3 至 4 公尺，而較小潮差的區域則在 2 公尺以下。

從空間特徵來看，第六類路徑颱風（颱風北行，並自台灣東方海域通過但未登陸）在離島地區、台灣南部及東部產生最顯著的非線性效應，其中本島的非線性效應主要為負向，且最低可達 30%，可能由於颱風路徑較接近南部及東部海域，非線性效應的分布也較為集中在上述地區。西部海域方面，雖然具有最大的潮差（5 至 7 公尺），非線性效應卻維持在較小且穩定的範圍（約 $\pm 20\%$ ），這種現象反映出在颱風中心較遠的區域，即使具有較大的潮差，非線性交互作用的強度仍可能相對較弱。離島區域如澎湖、金門地區的非線性效應分布範圍極大，皆有極端的正向及負向非線性效應，但颱風路徑並未經過此處，地形效應或颱風外圍環流可能是造成該現象的原因。

圖 6—16 展示第七類路徑分類下各潮位站之非線性效應百分比（上）及潮差分布（下）。從測站資料分布來看，非線性效應百分比的變化範圍較小，大部分測站的效應在 $-20\%$ 至 $+20\%$ 之間波動。最大值在北部、西部及離島測站呈現較小的正值，約在 5%至 20%之間，東部及南部測站接近 0%，而東沙島測站出現顯著極值超過 40%。最小值除了澎湖及金門測站超過 $-80\%$ 外，其他測站則普遍落在 $-10\%$ 至 $-20\%$ 之間。平均值則除了東沙島、澎湖及金門外，大部分測站皆在 5%至 $-10\%$ 之間小幅波動，顯示整體非線性效應相對較弱。各測站的潮差分布圖顯示，平均潮差約在 1.0 至 3.0 公尺之間，最大潮差在中部沿海測站及澎湖可達 4.0 至 5.0 公尺，馬祖測站則超過 6 公尺。

檢視單點測站非線性百分比與潮差之間的關聯性，北部及東部測站的潮差變化範圍約 1.0 至 2.0 公尺，非線性效應百分比變化相對穩定，維持在 20%範圍內。

中西部測站具有較大的潮差（3.0 至 5.0 公尺），非線性效應的變化範圍仍維持在 $\pm 15\%$ 以內。離島測站中，馬祖和金門雖具有較大的潮差（4.0 至 6.0 公尺），非線性效應的變化範圍非常懸殊，分別為 20% 及 100%，而澎湖測站雖潮差較小（2.0 至 3.0 公尺），卻出現最大的非線性效應變化範圍（-100% 至 +15%）。

圖 6—17 呈現第七類路徑案例下台灣沿海之(左)非線性效應百分比與(右)潮差二維分布情形。在非線性效應百分比最大值分布圖（左上）中，澎湖海域、東沙島地區及中國沿岸呈現較強的正向非線性效應（橘色至紅色區域），且於澎湖周邊海域最大超過 80%，而台灣本島其他沿海則維持在較弱的正向效應或接近零值。非線性效應最小值分布圖（左下）則顯示澎湖及金門周邊海域出現最顯著的負向效應（深藍色），強度超過 -80%，而其他區域的負向效應相對較弱（淺藍至綠色）。潮差分布圖（右側）中，最大值分布（右上）顯示台灣西北部沿海及離島地區的潮差最為顯著（紅色區域），可達 5 至 7 公尺。中南部及東部沿海的潮差相對較小（黃色區域），約為 2 至 3 公尺。最小值分布圖（右下）則呈現相似的空間分布型態，但數值範圍較小，較大潮差的區域約為 3 至 4 公尺，而較小潮差的區域則在 2 公尺以下。

從空間特徵來看，第七類路徑颱風（颱風自太平洋向西通過台灣南部海域後北行，並自台灣西方海域通過但未登陸）在離島周邊海域及中國沿海產生最顯著的非線性效應。值得注意的是，第七類路徑同樣經過台灣西南方海域，但在西部沿海並未觀察到如離島地區顯著的非線性效應，顯示在此類路徑下，非線性交互作用的強度並非單純由潮差大小或颱風距離所決定，可能有受到局部地形特徵的影響。

圖 6—18 展示第八類路徑分類下各潮位站之非線性效應百分比（上）及潮差分布（下）。從測站資料分布來看，非線性效應百分比的變化範圍極小，所有測站的效應都集中在 -10% 至 +10% 之間波動，顯示此類路徑下的非線性效應極其微弱。各測站的潮差分布圖顯示，平均潮差約在 0.5 至 2.5 公尺之間，最大潮差在中部沿海測站及馬祖可達 2.5 至 3.0 公尺，整體潮差值明顯小於其他路徑分類。

檢視單點測站非線性百分比與潮差之間的關聯性，北部及東部測站的潮差變化範圍約 0.5 至 1.5 公尺，非線性效應百分比變化極小，維持在 $\pm 5\%$ 範圍內。中西部測站雖然相對具有較大的潮差（1.5 至 2.5 公尺），非線性效應的變化範圍仍維持在 $\pm 5\%$ 以內。離島測站中，即使馬祖具有最大潮差（約 3.0 公尺），其非線性效應的變化範圍仍然相當小（約 $\pm 5\%$ ），其他離島測站也呈現類似的特徵。

圖 6—19 呈現第八類路徑案例下台灣沿海之(左)非線性效應百分比與(右)潮差二維分布情形。在非線性效應百分比最大值分布圖(左上)與最小值分布圖(左下)中，整個台灣周邊海域均呈現淺綠色，表示非線性效應極其微弱(約 $\pm 5\%$ )，整體維持在接近 0%的水平，僅金門測站、中國沿岸地區有較明顯的非線性效應。潮差分布圖(右側)中，最大值分布(右上)顯示即使在潮差最顯著的西北部沿海及離島地區(橘黃色區域)，潮差也僅達 3 至 4 公尺。中南部及東部沿海的潮差更小(淺黃色區域)，僅約 1 至 2 公尺。最小值分布圖(右下)亦呈現相似的空間分布型態。

從空間特徵來看，第八類路徑颱風(自菲律賓西岸向台灣前進，往太平洋方向移動)在整個台灣周邊海域產生的非線性效應都相當微弱。這種特徵反映出當颱風中心距離較遠時，即使存在潮差變化，颱風引起的氣象場強度已不足以與潮汐產生明顯的交互作用。值得注意的是，即使在具有較大潮差的區域(如西北部沿海，潮差達 3 至 4 公尺)，非線性效應仍然維持在極小的範圍內，這進一步證實了在此類路徑下，颱風外圍環流的影響在大部分地區已經微弱到無法與潮汐產生顯著的交互作用。此外，由於非線性效應普遍接近於零，局部地形效應或水深分布的影響在此類路徑下也變得較不明顯。

圖 6—20 展示第九類路徑分類下各潮位站之非線性效應百分比(上)及潮差分布(下)。從測站資料分布來看，非線性效應百分比的變化範圍相對較小，大部分測站的效應在 $-10\%$ 至 $+10\%$ 之間波動。最大值在離島測站呈現較大的正值，約在 20%至 40%之間，而其他測站則維持在 20%以下。最小值除了金門測站超過 $-50\%$ 、東沙島測站介於 0%至 10%外，其他測站則普遍落在 0%至 $-20\%$ 之間。

平均值則除了東沙島約為 10%外，大部分測站皆在 5%至-10%之間小幅波動，顯示整體非線性效應相對較弱。各測站的潮差分布圖顯示，大部分測站平均潮差約在 1 至 3 公尺之間，最大潮差在中部沿海測站可達 4 至 4.5 公尺，馬祖測站則高過 6 公尺。檢視單點測站非線性百分比與潮差之間的關聯性，台灣本島各地測站的潮差變化範圍介於 1 至 3 公尺，非線性效應百分比變化範圍則相對穩定，維持在 20%範圍內，且東部測站變動範圍甚至小於 10%，顯示該類路徑颱風事件對台灣東部之非線性強度影響較弱。離島測站中，馬祖和金門同樣具有相對較大的潮差（3 至 6 公尺），但非線性效應的強度變化範圍非常懸殊：馬祖的變動範圍小於 20%，金門卻在該路徑分類事件中有 40%至-70%的非線性強度分布。

圖 6—21 呈現第九類路徑案例下台灣沿海之(左)非線性效應百分比與(右)潮差二維分布情形。在非線性效應百分比最大值分布圖(左上)中，離島地區如金門、澎湖及東沙島海域呈現較強的正向非線性效應(黃色至紅色區域)，最大可高過 80%，而台灣本島其他沿海則維持在較弱的正向效應或接近零值。非線性效應最小值分布圖(左下)則顯示金門及澎湖沿海出現較明顯的負向效應(深藍色)，最小可達-60%，台灣西南部沿海及其他區域的負向效應相對較弱(淺藍至綠色)。潮差分布圖(右側)中，最大值分布(右上)顯示台灣西北部沿海及離島地區的潮差最為顯著(紅色區域)，可達 5 至 7 公尺。中南部及東部沿海的潮差相對較小(黃色區域)，約為 2 公尺。最小值分布圖(右下)則呈現相似的空間分布型態，但數值範圍較小，較大潮差的區域約為 3 至 4 公尺，而較小潮差的區域則在 2 公尺以下。

從空間特徵來看，第九類路徑颱風(自南海北行向台灣，主要影響區域為中央山脈以西)在離島地區產生較顯著的非線性效應。西北部沿海方面，雖然具有最大的潮差(5 至 7 公尺)，非線性效應卻維持在較小且穩定的範圍(約 $\pm 15\%$ )，這種現象說明在此類路徑下，非線性交互作用的強度可能更多地受到颱風外圍環流與局部地形特徵的影響，而非單純由潮差大小所決定。

圖 6—22 展示其他特殊路徑分類下各潮位站之非線性效應百分比(上)及潮

差分布（下）。從測站資料分布來看，非線性效應百分比的變化範圍相對集中，大部分測站的效應在-30%至+20%之間波動。最大值在北部、西部及離島測站呈現較大的正值，約 20%以內，而東沙島測站出現顯著極值高過 50%。最小值除金門測站接近-40%外，其他測站則普遍落在 0%至-25%之間。平均值則除了東沙島外，大部分測站皆在 10%至-15%之間小幅波動，顯示整體非線性效應相對較弱。各測站的潮差分布圖顯示，平均潮差約在 1.0 至 4.0 公尺之間，最大潮差在中部沿海測站及澎湖可達 4.0 至 5.0 公尺，馬祖測站則接近 6.5 公尺。

檢視單點測站非線性百分比與潮差之間的關聯性，東部及西南部測站的潮差變化範圍約 1 至 2 公尺，非線性效應百分比變化相對穩定，維持在 20%範圍內。中西部測站具有較大的潮差（3.0 至 5.0 公尺），非線性效應的變化範圍亦維持在 20%以內。離島測站中，馬祖和金門具有最大潮差（5.0 至 6.5 公尺），非線性強度卻有所不同，變化範圍分別為 20%及 60%。東沙島雖潮差通常為 2.0 公尺以下，在特殊路徑分類事件中卻出現較大的非線性效應變化範圍，高達 50%。

圖 6—23 呈現其他特殊路徑案例下台灣沿海之（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。在非線性效應百分比最大值分布圖（左上）中，金門—中國沿岸地區、澎湖海域及東沙島海域呈現較強的正向非線性效應（黃色至紅色區域），且於東沙島周邊海域最大超過 60%，而台灣本島其他沿海則維持在較弱的正向效應或接近零值。非線性效應最小值分布圖（左下）則顯示金門及澎湖沿海出現較明顯的負向效應（淺藍至深藍色），最小可超過-80%，而其他區域的負向效應相對較弱（淺藍至綠色）。潮差分布圖（右側）中，最大值分布（右上）顯示台灣西北部沿海及離島地區的潮差最為顯著（紅色區域），可達 6 至 8 公尺。本島西南部及東部沿海的潮差相對較小（黃色區域），約為 2 至 3 公尺。最小值分布圖（右下）則呈現相似的空間分布型態，但數值範圍較小，較大潮差的區域約為 3 至 5 公尺，而較小潮差的區域則在 2 公尺以下。

從空間特徵來看，特殊路徑颱風（不屬於前述九類典型路徑）在離島地區產生的非線性效應較顯著。值得注意的是，即使這些颱風路徑較為特殊，非線性效

應的空間分布仍呈現出某種程度的規律性，例如在澎湖東北水域及金門近中國沿岸的強度較大(約 $\pm 80\%$ )，這種現象可能與當地特殊的地形效應及水深分布有關。西北部沿海方面，雖然具有最大的潮差(5至7公尺)，非線性效應卻維持在較小且穩定的範圍(約 $\pm 20\%$ )，這種現象說明即使在特殊路徑下，非線性交互作用的強度仍可能更多地受到局部地形特徵的影響，而非單純由潮差大小所決定。

圖 6—24 展示本次分析的所有颱風事件下，各潮位站之非線性效應百分比(上)及潮差分布(下)。從測站資料分布來看，非線性效應百分比的變化範圍非常顯著，大部分測站的效應在 $-50\%$ 至 $+50\%$ 之間波動。最大值在北部、西部及離島測站呈現較大的正值，約在 $20\%$ 至 $50\%$ 之間，而東沙島測站出現顯著極值超過 $60\%$ 。最小值除了澎湖測站( $-100\%$ )及金門( $-80\%$ )有極端值外，其他測站則普遍落在 $-5\%$ 至 $-50\%$ 之間。平均值則除了東沙島為 $10\%$ 外，大部分測站皆在 $5\%$ 至 $-15\%$ 之間波動。各測站的潮差分布圖顯示，除了馬祖站之平均潮差高達5公尺外，平均潮差約在1至4公尺之間，最大潮差在中部沿海測站及金門可達4.0至5.0公尺，馬祖測站則接近7公尺。

檢視單點測站非線性百分比與潮差之間的關聯性，北部測站的潮差變化範圍約1.5至2公尺，而非線性效應強度隨事件變化顯著，雖然平均起來維持在 $\pm 5\%$ 左右，但極值可達 $-40\%$ 或 $+50\%$ 。東部測站的潮差範圍較小(約0.5至2公尺)，非線性強度表現也相對穩定介於 $0\%$ 至 $-30\%$ ，平均值約為 $-10\%$ 。離島測站中，馬祖和金門具有最大潮差(5.0至7.0公尺)，非線性效應的變化範圍亦相對較大，尤其金門站的非線性效應之正向/負向強度差距可達 $120\%$ 。而澎湖雖潮差不如上述離島測站，但出現相當大的非線性效應變化範圍( $-100\%$ 至 $+20\%$ )。

圖 6—25 呈現所有颱風路徑案例下台灣沿海之(左)非線性效應百分比與(右)潮差二維分布情形。在非線性效應百分比最大值分布圖(左上)中，台灣西北部及澎湖、東沙島海域呈現較強的正向非線性效應(黃色至紅色區域)，且在上述離島周邊海域之正向非線性強度最大超過 $80\%$ ，而台灣本島東部沿海則維持在較弱的正向效應。非線性效應最小值分布圖(左下)則顯示馬祖、金門、

澎湖及台灣東北、西南部沿海出現較明顯的負向效應（淺藍至深藍色），最小可達-80%，而其他區域如東沙島及台灣西北部的負向效應相對較弱（淺藍至綠色）。潮差分布圖（右側）中，最大值分布（右上）顯示台灣西北部沿海及離島地區的潮差最為顯著（紅色區域），可達 6 至 8 公尺。西南部及東部沿海的潮差相對較小（黃色區域），約為 2 公尺。最小值分布圖（右下）則呈現相似的空間分布型態，但數值範圍較小。

從空間特徵來看，目前可研究之所有颱風案例，非線性強度的分布範圍非常廣泛，也有地區分布的特性。在台灣西北部沿海、澎湖、金門及東沙島海域產生最顯著的正向非線性效應。若對應潮差分布，潮差較大地區如西北部沿海、金門、澎湖北部海域等地區非線性正向強度亦較強，但值得注意的是，西北部沿海雖具有最大的潮差（5 至 7 公尺），但非線性效應的強度反而不如澎湖及東沙島海域。特別是東沙島海域，雖具有較小的潮差，正向非線性效應變化卻高達+80%。這種現象顯示，非線性交互作用的強度可能更多地受到局部地形特徵及水深分布的影響，而非單純由潮差大小所決定。此外，台灣西部沿海的非線性效應呈現明顯的南北差異，這可能與該區域的地形特徵及水深分布有關。

圖 6—26 展示台灣周邊海域的水深地形分布（上排左圖）及各路徑分類下非線性效應最大值的空間分布（其餘子圖）。上排左側的地形資料等高線依 10 公尺為單位繪製以呈現淺水地區地形特徵。圖中可見，台灣海峽普遍水深在 100 公尺以下（藍色區域），而東部外海則迅速加深至 500 公尺以上（深藍色區域）。台灣本島中央山脈呈現南北走向（綠色至棕色區域），最高處超過 3000 公尺。

綜觀整體分析結果與各路徑分類的非線性效應最大值分布，可以發現幾個顯著的特徵區域。颱風路徑越接近特定區域，該區域的非線性效應通常越強。離島區域如馬祖，較易受到第一至四類路徑的影響，其他路徑分類對其影響較不顯著。金門地區在第一、二、三、六、七、九及其他路徑分類中，最大非線性效應主要為正向，尤其在第三類路徑中沿海非線性強度最大可高達 60%。澎湖地區的東北海域及西南海域除了第七及第八類路徑外，大部分皆有強烈的非線性效應，尤其

是東北海域，正向強度最大高過 100%。

金門與馬祖區域的水深變化在 50 公尺內，屬於典型的淺水區域，而澎湖地區水深變化相對複雜，水深普遍不超過 100 公尺，且因為澎湖群島分布造就了複雜的地形特徵，可能近一步增加非線性效應的強度。類似的情況亦發生在東沙島，該區域的特殊之處在於水深從環礁淺水區快速過渡到深水區，因此除了第一、二、八類路徑外，大部分路徑分類皆造成東沙島區域周圍有正向的非線性效應，最大可高達 80%，顯示水深的急遽變化可能是影響非線性效應的重要因素。

在非線性效應強度最大值分布中，台灣本島西北部及北部海域在所有路徑分類中通常都會呈現正向的非線性強度，其中第三類路徑所造成之非線性最大值可達 40%。可能原因為西北部區域沿海水深較淺，而東北部海底地形變化較為複雜。而西南部及東部海域因為水深迅速加深至 500 公尺以上，各路徑分類在此區域的正向非線性效應強度普遍較弱，大多呈現淺綠色。

圖 6—27 展示台灣周邊海域的水深地形分布（上排左圖）及各路徑分類下非線性效應平均值的空間分布（其餘子圖）。上排左側的地形資料等高線依 10 公尺為單位繪製以呈現淺水地區地形特徵。圖中可見，台灣海峽普遍水深在 100 公尺以下（藍色區域），而東部外海則迅速加深至 500 公尺以上（深藍色區域）。台灣本島中央山脈呈現南北走向（綠色至棕色區域），最高處超過 3000 公尺。

綜觀整體分析結果與各路徑分類的非線性效應平均值分布，可以發現幾個顯著的特徵區域。相較於最大值分布，平均值的分布範圍明顯較小，大部分區域維持在 $\pm 20\%$ 之間。離島區域如馬祖，除了第三類路徑有較顯著的負向非線性效應外，其餘路徑分類造成的平均非線性強度相對較小，維持在 $\pm 10\%$ 之間。

金門地區在各路徑分類中的平均非線性效應趨於負向，在颱風路徑較為接近時（第四、五、七類路徑）負向非線性強度更為顯著，可達 $-40\%$ 。澎湖地區的東北海域在第三、四、七、九類及特殊路徑中出現較顯著的正向效應，在第二、五、六類則出現顯著的負向非線性效應。

金門與馬祖區域的水深變化在 50 公尺內，屬於典型的淺水區域，平均非線

性效應較不顯著可能與颱風中心距離遠近有關。而澎湖地區水深變化相對複雜，水深普遍不超過 100 公尺，且因為澎湖群島分布造就了複雜的地形特徵，導致該地區沿海潮汐與颱風交互作用之非線性效應隨著颱風路徑分類不同而有增高或減弱水位的作用，且非線性強度明顯。東沙島區域因水深從環礁淺水區快速過渡到深水區的特性，在第三、五類及特殊路徑下出現較明顯的正向平均效應，約為 30% 或以上，其他路徑分類的非線性強度則普遍較弱。

台灣本島西北部及北部海域在所有路徑分類中通常都維持在 $\pm 20\%$ 之間，顯示即使最大值可能較大，但平均而言非線性效應較為穩定。西南部及東部海域因為水深迅速加深至 500 公尺以上，各路徑分類在此區域的非線性效應平均值趨向較弱的負向非線性效應，甚至接近於零。

圖 6—28 展示台灣周邊海域的水深地形分布（上排左圖）及各路徑分類下非線性效應最小值的空間分布（其餘子圖）。上排左側的地形資料等高線依 10 公尺為單位繪製以呈現淺水地區地形特徵。圖中可見，台灣海峽普遍水深在 100 公尺以下（藍色區域），而東部外海則迅速加深至 500 公尺以上（深藍色區域）。台灣本島中央山脈呈現南北走向（綠色至棕色區域），最高處超過 3000 公尺。

綜觀整體分析結果與各路徑分類的非線性效應最小值分布，可以發現幾個顯著的特徵區域。相較於最大值及平均值分布，最小值的分布範圍多為負值，大部分區域維持在 $-20\%$ 至 $-80\%$ 之間。離島區域如馬祖，在第三至七類路徑中出現較顯著的負向非線性效應，最小可達 $-60\%$ ，其餘路徑分類則維持在 $0\%$ 至 $-40\%$ 之間。金門地區除了第 8 類路徑外，在大部分路徑分類中的負向非線性效應強度皆相當顯著，尤其第七類路徑下，金門周邊海域的負向非線性強度可達 $-80\%$ 。澎湖地區的東北海域在第一類至第六類中有較顯著的負向非線性效應，可達 $-100\%$ ，而值得注意的地方是，澎湖東北海域水深變化較大的區域（澎湖計算域東北角落）在第四、七、九類及特殊路徑中，非線性效應的最小值皆為正值，該特徵在非線性最大值/平均值分布圖中較不顯著，可能因為澎湖群島分布造就了複雜的地形特徵，使得特定路徑下出現極端的非線性效應分布情形。東沙島區域的非線性強度

最小值趨近於 0%，若綜合最大值/平均值分布圖進行評估，則可知道東沙島區域之非線性效應普遍趨於正向，且幾乎無負向非線性作用的情形。

台灣本島西北部及北部海域在所有路徑分類中通常介於 0%至-20%之間，西南部及東部海域則大部分為負向非線性效應，如第二至六類路徑之強度較為顯著，高達-50%，其他各路徑分類在此區域的非線性效應最小值約為 0%至-20%，呈現淺綠色至淺藍色。

整體而言，負向非線性效應強度高的地區主要集中在淺水區域，且在颱風路徑接近時表現得更為顯著，這種現象可能反映出在特定條件下，潮汐與颱風引起的水位變化會相互抵消，導致實際水位低於純潮汐或純暴潮的疊加。

圖 6—29 展示台灣周邊海域的水深地形分布（上排左圖）及各路徑分類下潮差最大值的空間分布（其餘子圖）。上排左側的地形資料等高線依 10 公尺為單位繪製以呈現淺水地區地形特徵。圖中可見，台灣海峽普遍水深在 100 公尺以下（藍色區域），而東部外海則迅速加深至 500 公尺以上（深藍色區域）。台灣本島中央山脈呈現南北走向（綠色至棕色區域），最高處超過 3000 公尺。

綜觀整體分析結果與各路徑分類的潮差最大值分布，可以發現幾個顯著的特徵區域。相較於其他分析項目，潮差分布的空間特徵較為一致，主要呈現南北差異。離島區域如馬祖，在所有路徑分類中都呈現最大的潮差值，可達 6 至 8 公尺。金門地區的潮差同樣明顯，約為 5 至 7 公尺。澎湖地區的潮差普遍則介於 4 至 5 公尺之間，且在不同路徑分類下的變化不大。

金門與馬祖區域雖水深變化在 50 公尺內，屬於典型的淺水區域，但因位處中國東南沿海，受到大陸架效應影響，使得潮差特別顯著。而澎湖地區水深變化相對複雜，水深普遍不超過 100 公尺，且因為澎湖群島分布造就了複雜的地形特徵，使得潮差值略小於其他離島區域。東沙島區域因位處南海北部，水深從環礁淺水區快速過渡到深水區，潮差相對較小，約為 2 至 3 公尺。

在潮差分布中，台灣本島西北部沿海的潮差約為 4 至 7 公尺，向南遞減至台灣海峽中部的 3 至 4 公尺。西南部及東部海域因為水深迅速加深至 500 公尺以

上，潮差明顯較小，約為 1 至 2 公尺。整體而言，潮差的空間分布主要受到水深、地形以及大陸架效應的影響，且在各路徑分類下都呈現相似的分佈型態，這表明颱風路徑對潮差的直接影響相對較小。特別是在淺水區域，潮差主要由天文潮所主導，而深水區域的潮差則普遍較小且變化較為穩定。

圖 6—30 展示台灣周邊海域的水深地形分布（上排左圖）及各路徑分類下潮差平均值的空間分布（其餘子圖）。上排左側的地形資料等高線依 10 公尺為單位繪製以呈現淺水地區地形特徵。圖中可見，台灣海峽普遍水深在 100 公尺以下（藍色區域），而東部外海則迅速加深至 500 公尺以上（深藍色區域）。台灣本島中央山脈呈現南北走向（綠色至棕色區域），最高處超過 3000 公尺。

綜觀整體分析結果與各路徑分類的潮差平均值分布，可以發現幾個顯著的特徵區域。相較於最大值分布，平均值的空間分布型態相似但數值較小。離島區域如馬祖，在所有路徑分類中都呈現較大的平均潮差，約為 4 至 6 公尺。金門地區的平均潮差約為 3 至 5 公尺。澎湖地區的平均潮差則介於 2 至 4 公尺之間。東沙島區域因位處南海北部，水深從環礁淺水區快速過渡到深水區，平均潮差相對較小，約為 1 至 2 公尺。

在潮差平均值分布中，台灣本島西北部沿海的平均潮差約為 3 至 5 公尺，向南遞減至台灣海峽中部的 2 至 3 公尺。西南部及東部海域因為水深迅速加深至 500 公尺以上，平均潮差更小，約為 1 公尺甚至以下。整體而言，平均潮差的空間分布在各路徑分類下都呈現相似的型態，主要呈現由北向南遞減的趨勢，且深水區域的平均潮差普遍較小。

圖 6—31 展示台灣周邊海域的水深地形分布（上排左圖）及各路徑分類下潮差最小值的空間分布（其餘子圖）。上排左側的地形資料等高線依 10 公尺為單位繪製以呈現淺水地區地形特徵。圖中可見，台灣海峽普遍水深在 100 公尺以下（藍色區域），而東部外海則迅速加深至 500 公尺以上（深藍色區域）。台灣本島中央山脈呈現南北走向（綠色至棕色區域），最高處超過 3000 公尺。

綜觀整體分析結果與各路徑分類的潮差最小值分布，可以發現幾個顯著的特

徵區域。相較於最大值及平均值分布，最小值的空間分布型態相似但數值更小。離島區域如馬祖，在所有路徑分類中的最小潮差約為 2 至 3 公尺。金門地區的最小潮差約為 1.5 至 2 公尺。澎湖地區的最小潮差則介於 1 至 1.5 公尺之間。

金門與馬祖區域雖水深變化在 50 公尺內，屬於典型的淺水區域，但最小潮差值仍維持在相對較高的水平，顯示即使在較小潮差的天文潮條件下，此區域仍保持明顯的潮汐變化。而澎湖地區水深變化相對複雜，水深普遍不超過 100 公尺，且因為澎湖群島分布造就了複雜的地形特徵，使得最小潮差較金門、馬祖為小。

在潮差最小值分布中，台灣本島西北部沿海的最小潮差約為 1.5 至 2 公尺，向南遞減至台灣海峽中部的 1 至 1.5 公尺。西南部及東部海域因為水深迅速加深至 500 公尺以上，最小潮差更小，約為 0.5 至 1 公尺。整體而言，最小潮差的空間分布在各路徑分類下都呈現相似的型態，主要呈現由北向南遞減的趨勢，且深水區域的最小潮差普遍較小。

### 6-3 小結

由本次工作項目成果可知，不同路徑分類的颱風影響台灣周邊海域的方式會有很大差異。在大部分情況下，颱風路徑直接決定了風場和氣壓場的空間分布特徵，並識別特定區域的風險程度。而利用路徑分類可以幫助我們針對同類型路徑分布的案例更好的理解地形效應對各地區的影響，並有機會更清楚的看到非線性效應的空間分布模式。

本研究通過對台灣周邊海域的深入分析，我們可以觀察到水深地形特徵、颱風路徑、潮汐與颱風非線性效應之間存在密切的關聯。

在水深地形方面，台灣海峽以淺水特徵為主，水深普遍不超過 100 公尺，而東部外海則呈現急遽加深的特徵。在潮汐特徵方面，我們發現其分布呈現明顯的南北差異，潮差主要受到水深和地形的影響。北部離島區域如馬祖和金門的潮差最大，可達 6 至 8 公尺，這種現象主要受到大陸棚淺水效應的影響。隨著位置向南移動，潮差逐漸減小，到達東部深水區域時，潮差降至 1 至 2 公尺。

透過分析颱風與潮汐之間的非線性交互作用，顯示幾個重要發現。首先，研究結果顯示非線性效應的強度與潮差大小之間並非存在簡單的正相關關係。特別是在台灣西部沿海等潮差較大的區域，非線性效應的強度並不一定較強；相反地，某些潮差較小的區域（如東沙島）反而可能出現顯著的非線性效應。

從地理空間分布來看，在淺水區域中，非線性效應表現得更為顯著。水深在 50 公尺內的離島地區包括澎湖、金門、馬祖及東沙島往往出現較強的非線性效應。這種現象可能是由於淺水區域中，水體運動受到地形限制，導致潮汐與颱風引起的水位變化產生更強烈的相互作用。澎湖群島區域則因其複雜的地形特徵，呈現出更為多樣的非線性效應，這反映了地形複雜度對非線性效應的調節作用。台灣西部沿海的非線性效應呈現明顯的南北差異，而東部海域則通常表現出較小且穩定的非線性效應範圍。這種空間分布特徵暗示著影響非線性效應的因素相當複雜。

在一般情況下，大多數測站的非線性效應維持在正負 50% 範圍內，而平均值通常在正負 15% 之間波動。這意味著如果完全忽略非線性交互作用，暴潮預報的誤差可能至少會有 15% 左右。然而在某些特定案例下，這個誤差可能大幅增加，極端情況下可能會達到 100% 當地潮差的誤差（如澎湖測站）。這種差異顯示出非線性效應具有相當大的變異性，且可能受到多重環境因素的影響。

更重要的是，這種誤差並非固定的，而是會隨著颱風路徑、地形特徵和水深分布等因素而變化。例如，在台灣本島海岸沿線地形變化較為單純，忽略非線性效應造成的誤差相對較小且穩定。相比之下，在淺水區域（離島）或複雜地形區域（台灣北部），這種誤差不僅較大，而且變化也更加劇烈。

本研究團隊亦發現，不同路徑的颱風會在不同區域產生顯著的非線性效應，但不論是哪一類路徑，離島地區往往非線性效應都會較台灣本島地區顯著，顯示颱風路徑與距離雖然會影響非線性效應的空間分布，但其影響方式並非直接。由於非線性強度顯著的地區在本次研究中主要為離島及其周邊海域，研究團隊相信局部地形特徵和水深分布可能是決定當地非線性效應強度的關鍵因素。

表 6—1、研究採用之颱風事件模擬資訊列表 (2017—2023)

颱風編號	颱風名稱	第一組模擬 初始時間	最終組模擬 初始時間	有效資料 時數 (小時)	路徑 分類
202314	小犬(KOINU)	23100200	23100606	102	4
202311	海葵(HAIKUI)	23090100	23090500	96	4
202309	蘇拉(SAOLA)	23082800	23083106	78	--(5)
202306	卡努(KHANUN)	23080100	23080406	78	特
202305	杜蘇芮(DOKSURI)	23072400	23072812	108	7
202302	瑪娃(MAWAR)	23052900	23053106	54	--(6)
202220	尼莎(NESAT)	22101500	22101612	36	--(5)
202212	梅花(MUIFA)	22091012	22091306	66	--(1)
202211	軒嵐諾(HINNAMNOR)	22090112	22090412	72	6
202118	圓規(KOMPASU)	21101000	21101200	48	--(5)
202114	璨樹(CHANTHU)	21090912	21091218	78	6
202109	盧碧(LUPIT)	21080400	21080706	78	--(9)
202106	烟花(IN-FA)	21072100	21072406	78	--(1)
202103	彩雲(CHOI-WAN)	21060300	21060412	36	--(8)
202020	閃電(ATSANI)	20110412	20110706	66	5
202008	巴威(BAVI)	20082112	20082212	24	--(1)
202006	米克拉(MEKKHALA)	20080912	20081106	42	--(9)
202004	哈格比(HAGUPIT)	20080112	20080312	48	--(1)
202001	黃蜂(VONGFONG)	20051518	20051700	30	--(8)
201918	米塔(MITAG)	19092900	19100106	54	6
201911	白鹿(BAILU)	19082300	19082500	48	4
201909	利奇馬(LEKIMA)	19080700	19081000	72	1
201905	丹娜絲(DANAS)	19071612	19071818	54	--(1)
201822	山竹(MANGKHUT)	18091312	18091600	60	--(5)
201808	瑪莉亞(MARIA)	18070900	18071100	48	1
201718	泰利(TALIM)	17091112	17091600	108	--(6)
201717	谷超(GUCHOL)	17090512	17090700	36	--(7)
201713	天鴿(HATO)	17082100	17082300	48	--(5)

表 6—2、研究採用之颱風事件模擬資訊列表 (2011—2016)

颱風 編號	颱風名稱	第一組模擬 初始時間	最終組模擬 初始時間	有效資料 時數 (小時)	路徑 分類
201619	艾利(AERE)	16100500	16101000	120	--(5)
201617	梅姬(MEGI)	16092512	16092800	60	3
201616	馬勒卡(MALAKAS)	16091500	16091812	84	--(6)
201614	莫蘭蒂(MERANTI)	16091212	16091418	54	7
201601	尼伯特(NEPARTAK)	16070600	16070900	72	4
201521	杜鵑(DUJUAN)	15092618	15092900	54	2
201515	天鵝(GONI)	15082012	15082318	78	--(6)
201513	蘇迪勒(SOUDELOR)	15080600	15080818	66	3
201506	紅霞(NOUL)	15050912	15051112	48	--(6)
201416	鳳凰(FUNGWONG)	14091818	14092200	78	特
201410	麥德姆(MATMO)	14072100	14072312	60	3
201407	哈吉貝(HAGIBIS)	14061406	14061700	66	--(9)
201323	菲特(FITOW)	13100412	13100618	54	1
201319	天兔(USAGI)	13091912	13092206	66	5
201315	康芮(KONGREY)	13082700	13090100	120	6
201312	潭美(TRAMI)	13082000	13082118	42	1
201308	西馬隆(CIMARON)	13071700	13071818	42	--(7)
201307	蘇力(SOULIK)	13071100	13071312	60	2
201217	杰拉華(JELAWAT)	12092618	12092812	42	--(6)
201214	天秤(TEMBIN)	12082100	12082812	180	特
201213	啟德(KAITAK)	12081400	12081518	42	--(5)
201211	海葵(HAIKUI)	12080600	12080718	42	--(1)
201209	蘇拉(SAOLA)	12073012	12080300	84	2
201206	杜蘇芮(DOKSURI)	12062718	12062900	30	--(5)
201205	泰利(TALIM)	12061818	12062018	48	9
201111	南瑪都(NANMADOL)	11082618	11083100	102	4
201109	梅花(MUIFA)	11080400	11080600	48	--(6)
201105	米雷(MEARI)	11062312	11062506	42	--(6)
201102	桑達(SONGDA)	11052618	11052806	36	--(6)
201101	艾利(AERE)	11050900	11051012	36	--(6)

表 6—3、研究採用之颱風事件模擬資訊列表 (1990—2010)

颱風編號	颱風名稱	第一組模擬 初始時間	最終組模擬 初始時間	有效資料 時數 (小時)	路徑分類
201013	梅姬(MEGI)	10101700	10102300	144	9
201011	凡那比(FANAPI)	10091712	10092006	66	4
201010	莫蘭蒂(MERANTI)	10090900	10091000	24	--(7)
200908	莫拉克(MORAKOT)	09080600	09080912	84	3
200815	薔蜜(JANGMI)	08092612	08092912	84	2
200813	辛樂克(SINLAKU)	08091100	08091606	72	2
200715	柯羅莎(KROSA)	07100406	07100712	126	2
200708	聖帕(SEPAT)	07081600	07081906	78	3
200519	龍王(LONGWANG)	05093006	05100300	78	3
200513	泰利(TALIM)	05082918	05090112	66	3
200505	海棠(HAITANG)	05071600	05071918	66	3
200417	艾利 (AERE)	04082212	04082600	90	1
200102	奇比(CHEBI)	01062112	01062400	84	7
200020	象神(XANGSANE)	00103000	00110112	60	6
200010	碧利斯(BILIS)	00082100	00082312	60	3
199810	瑞伯(ZEB)	98101300	98101700	60	6
199714	溫妮(WINNIE)	97081606	97081818	96	1
199608	賀伯(HERB)	96072900	96080112	60	2
199427	席斯(SETH)	94100706	94101018	84	6
199413	道格(DOUG)	94080600	94080900	84	6
199405	提姆(TIM)	94070900	94071100	72	3
199107	艾美(AMY)	91071700	91071906	48	5
199014	亞伯(ABE)	90082900	90083100	54	1
199012	楊希(YANCY)	90081700	90082100	48	2

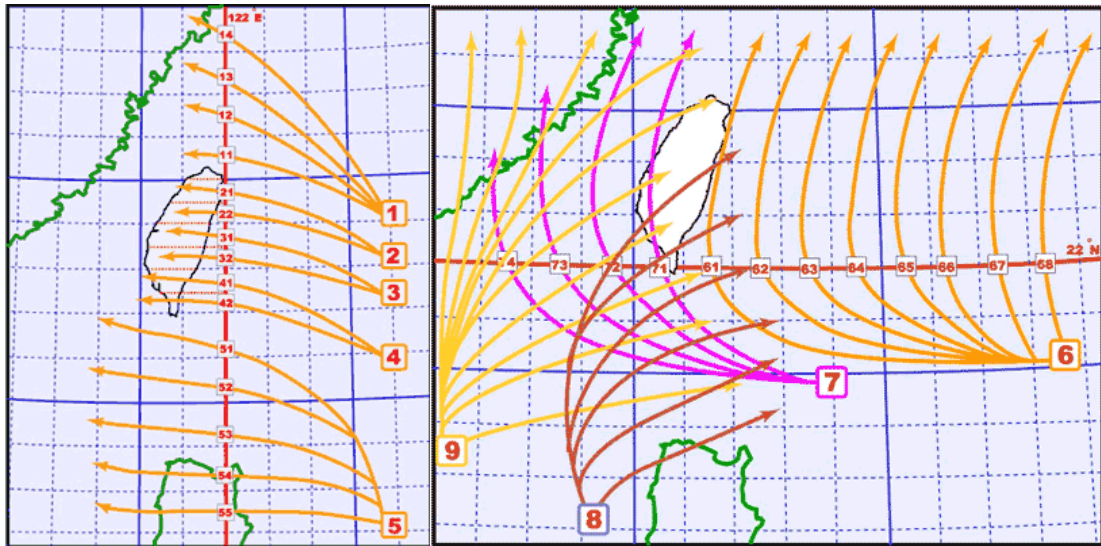


圖 6—1、颱風事件路徑分類示意圖

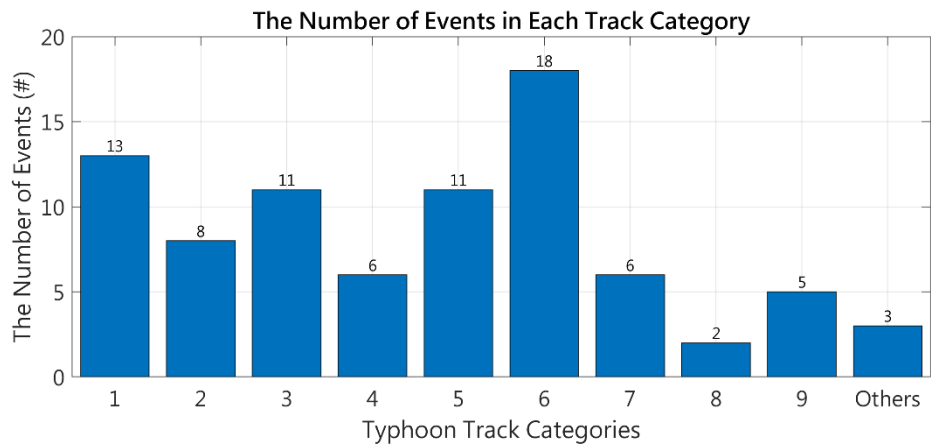


圖 6—2、颱風事件路徑分類統計圖

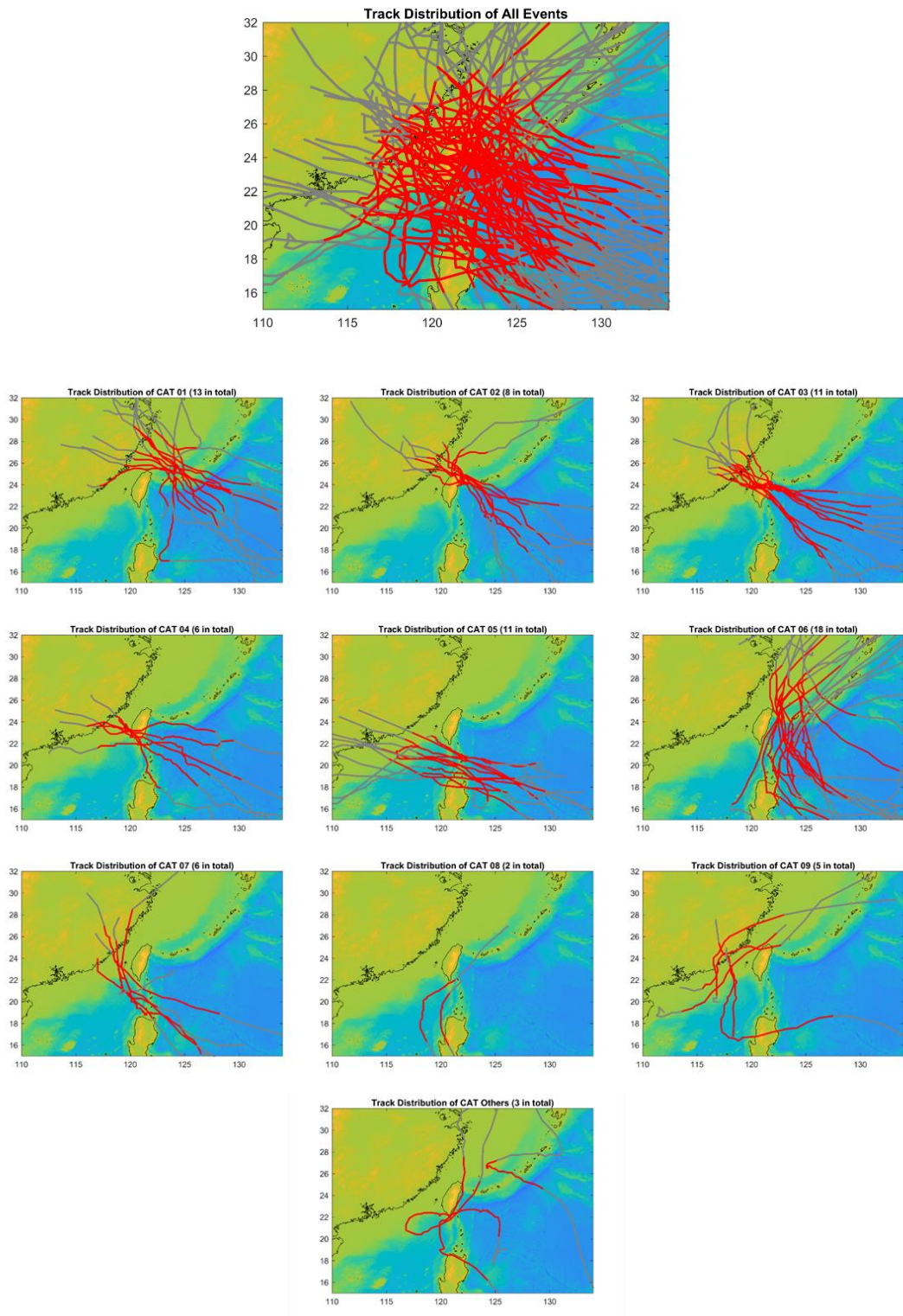


圖 6—3、颱風事件路徑分類分布圖

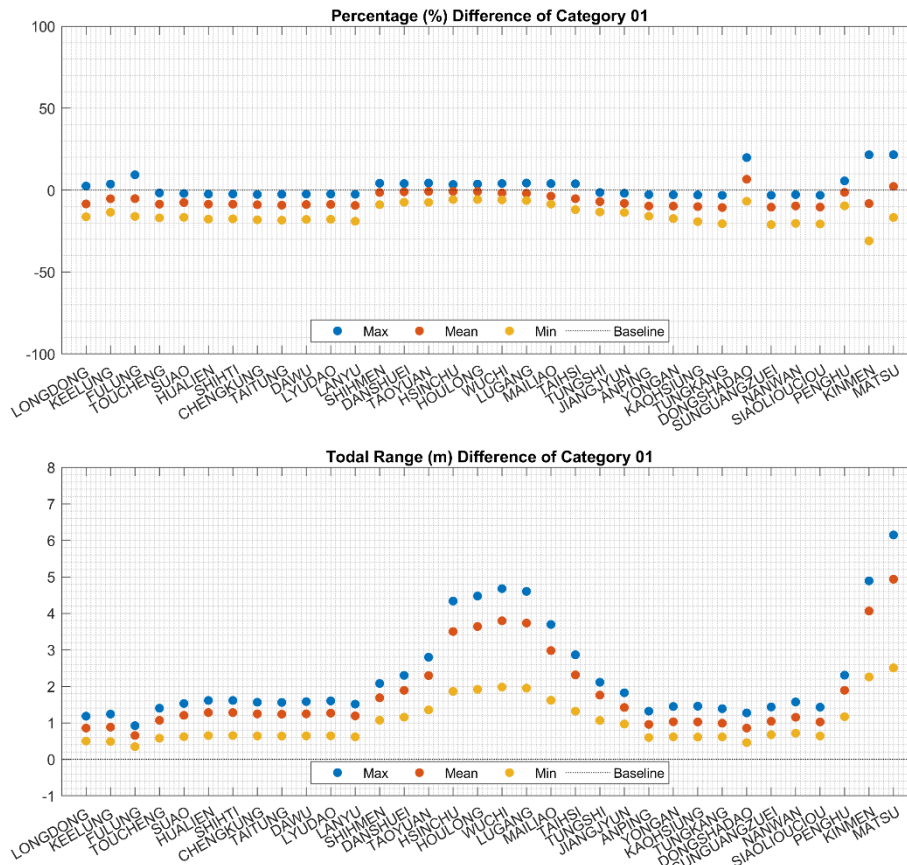


圖 6—4、第一類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。

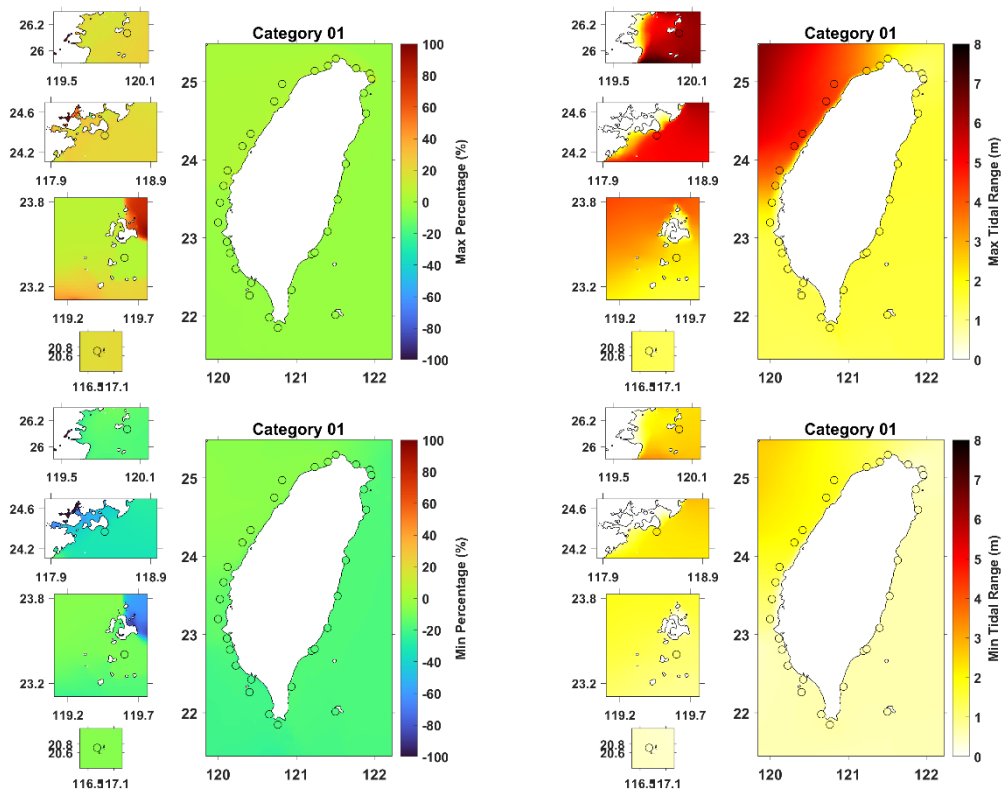


圖 6—5、第一類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。

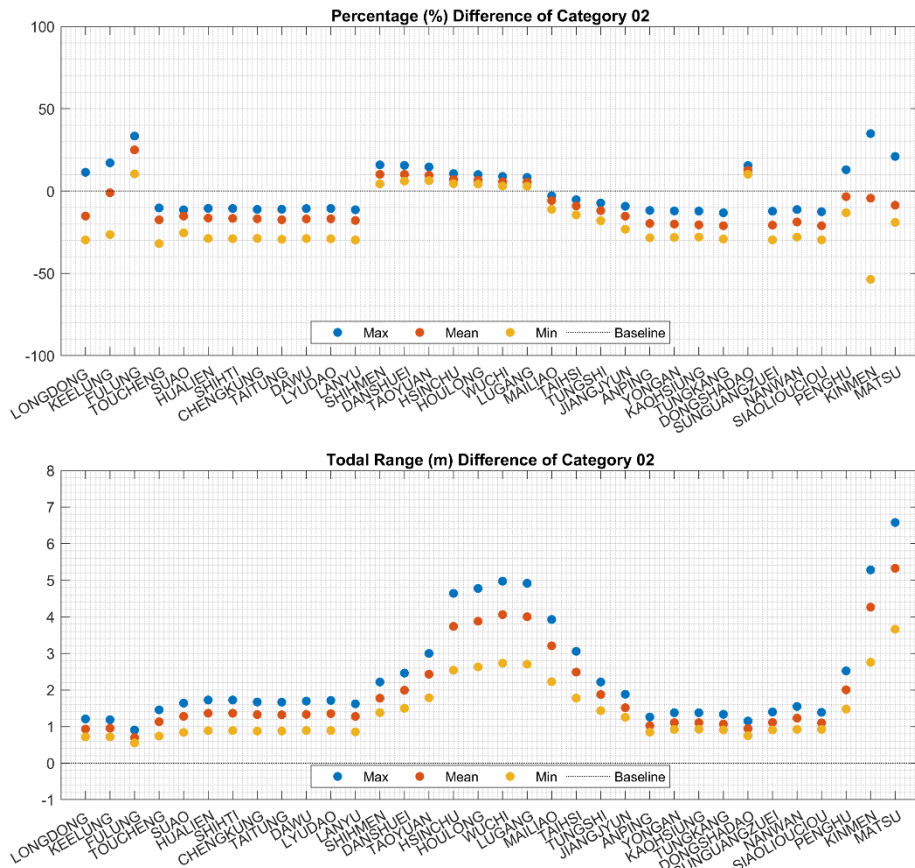


圖 6—6、第二類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。

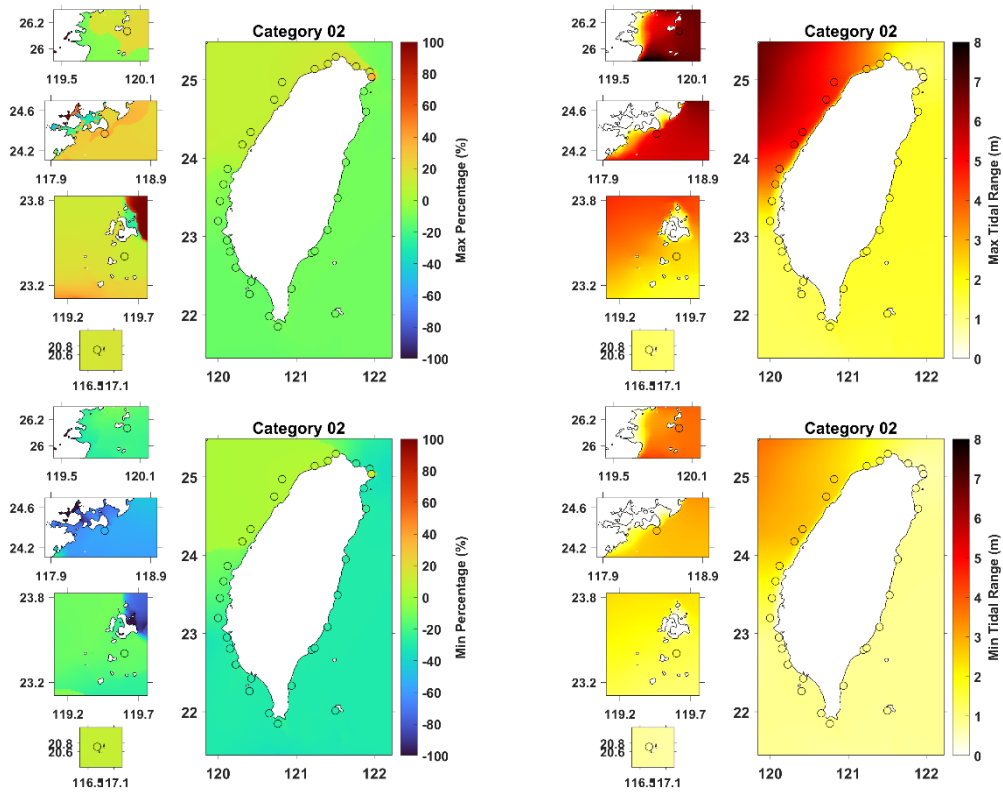


圖 6—7、第二類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。

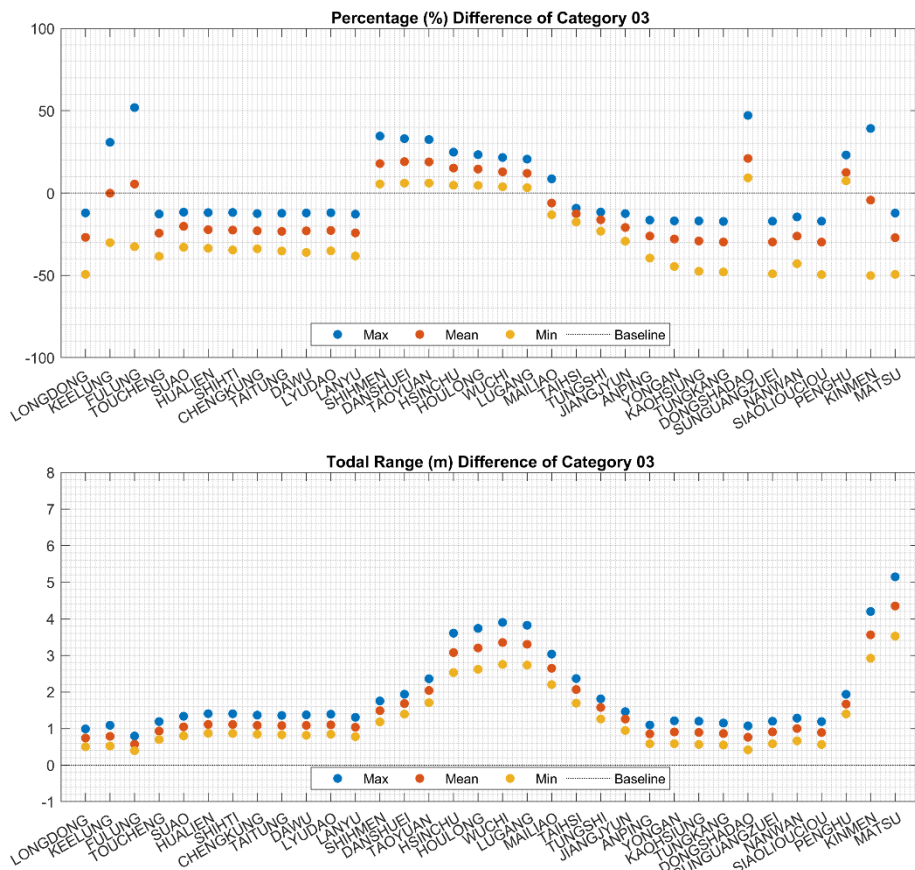


圖 6—8、第三類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。

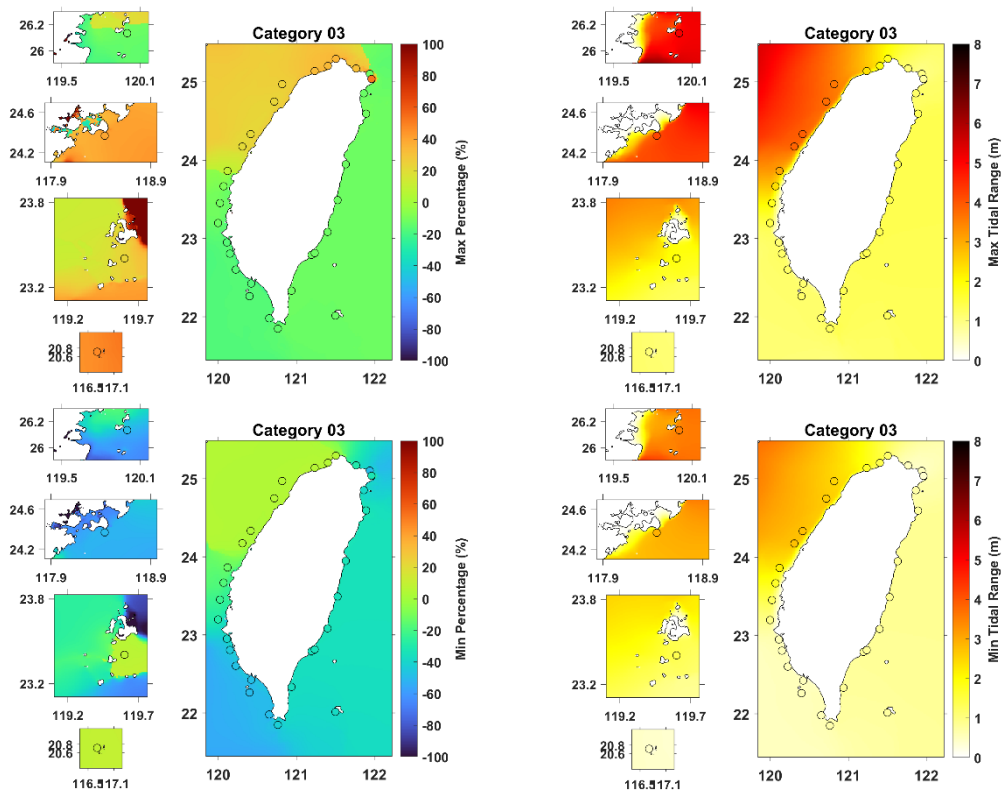


圖 6—9、第三類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。

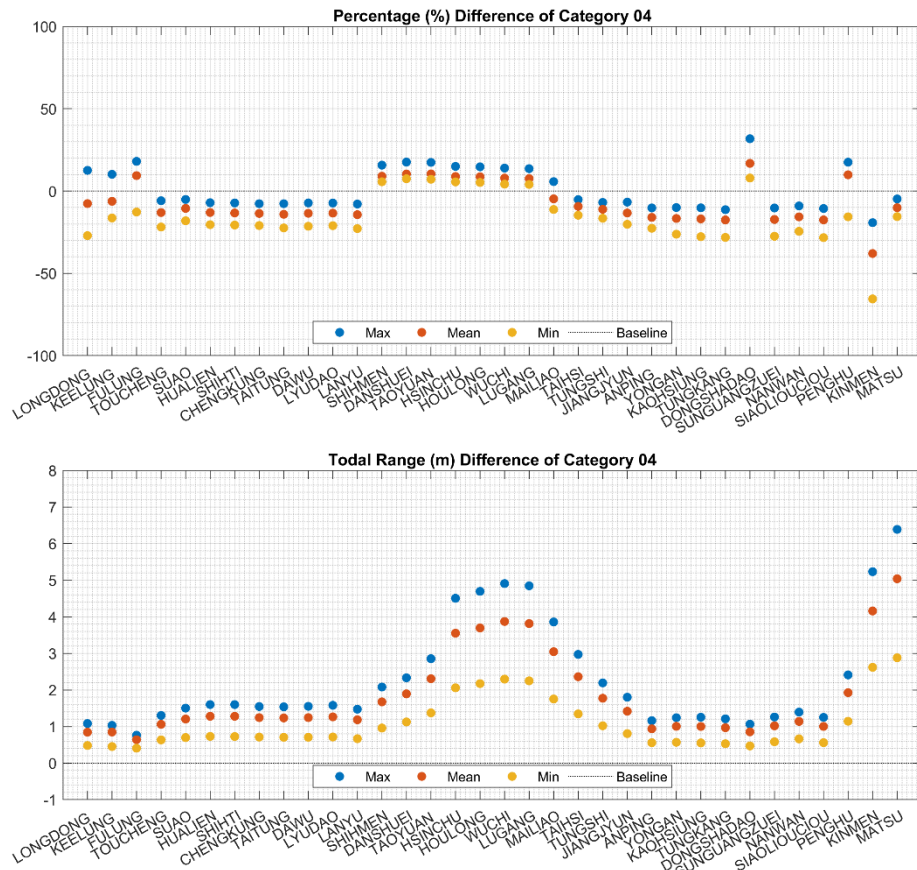


圖 6—10、第四類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。

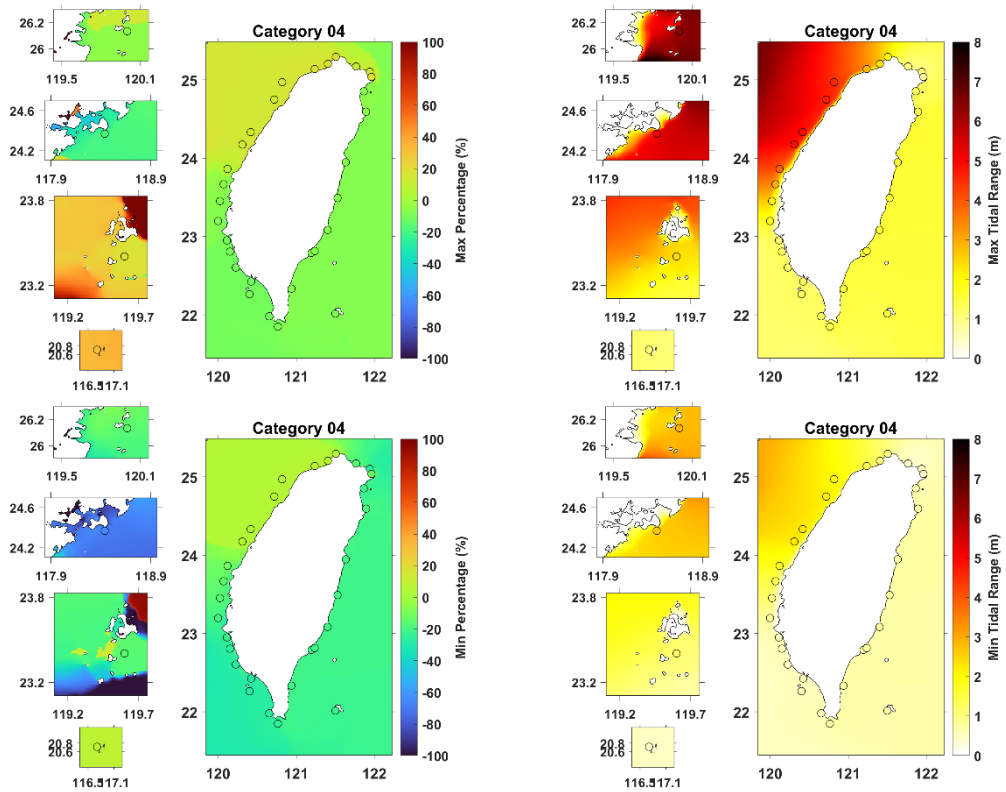


圖 6—11、第四類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。

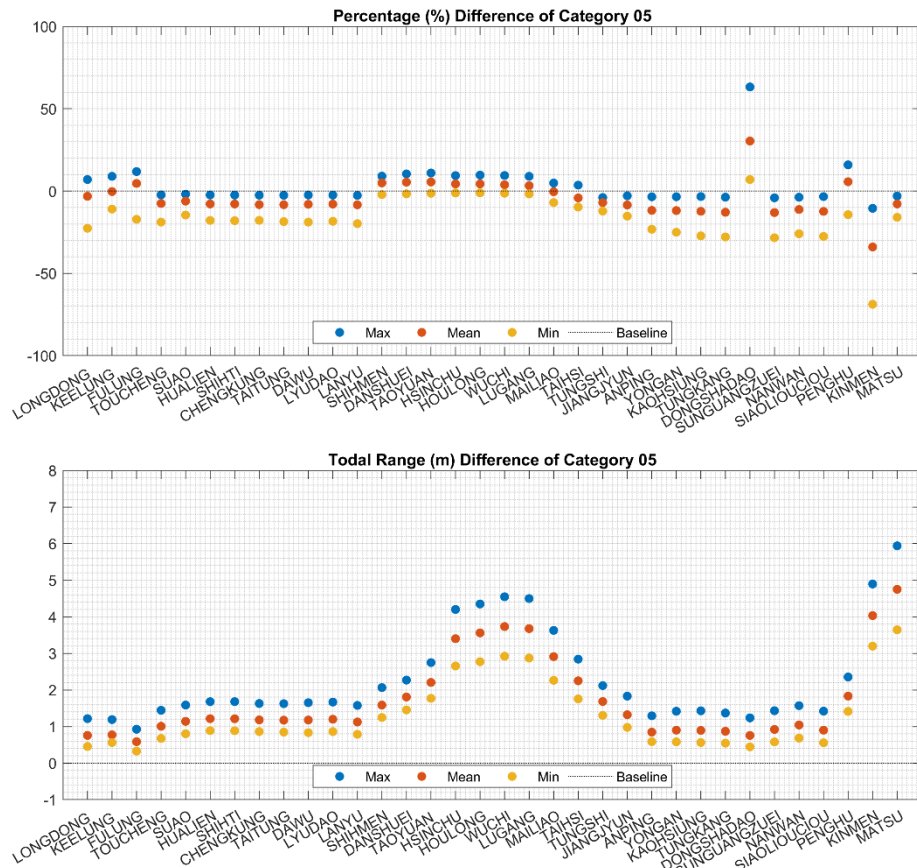


圖 6—12、第五類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。

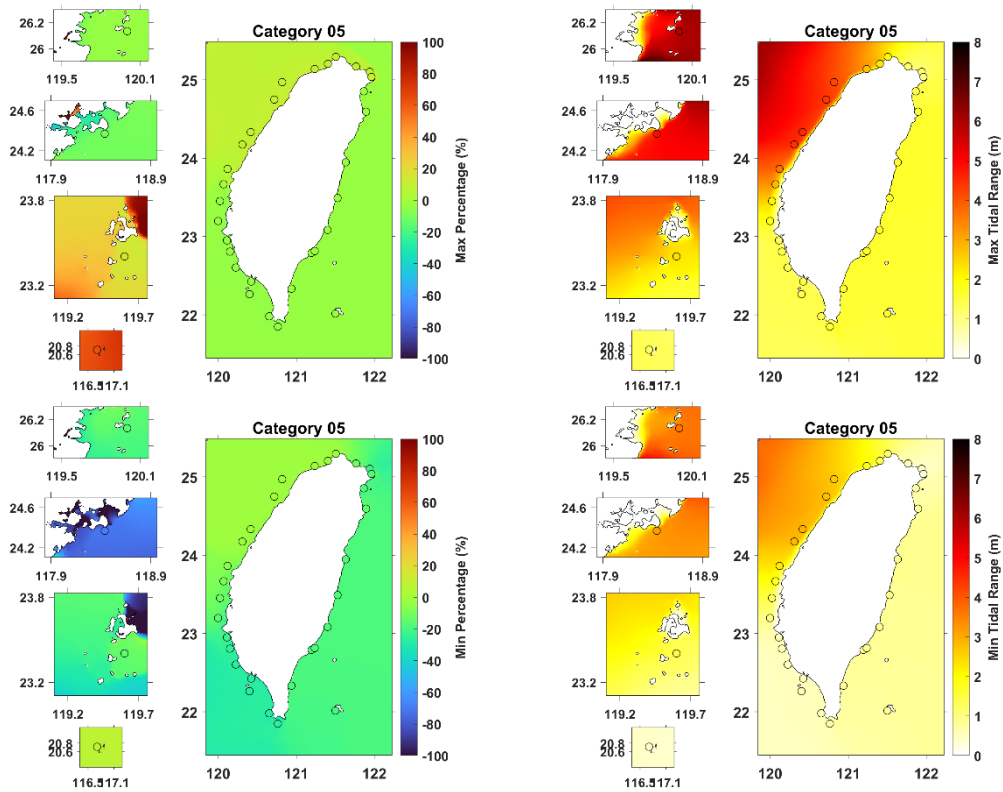


圖 6—13、第五類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。

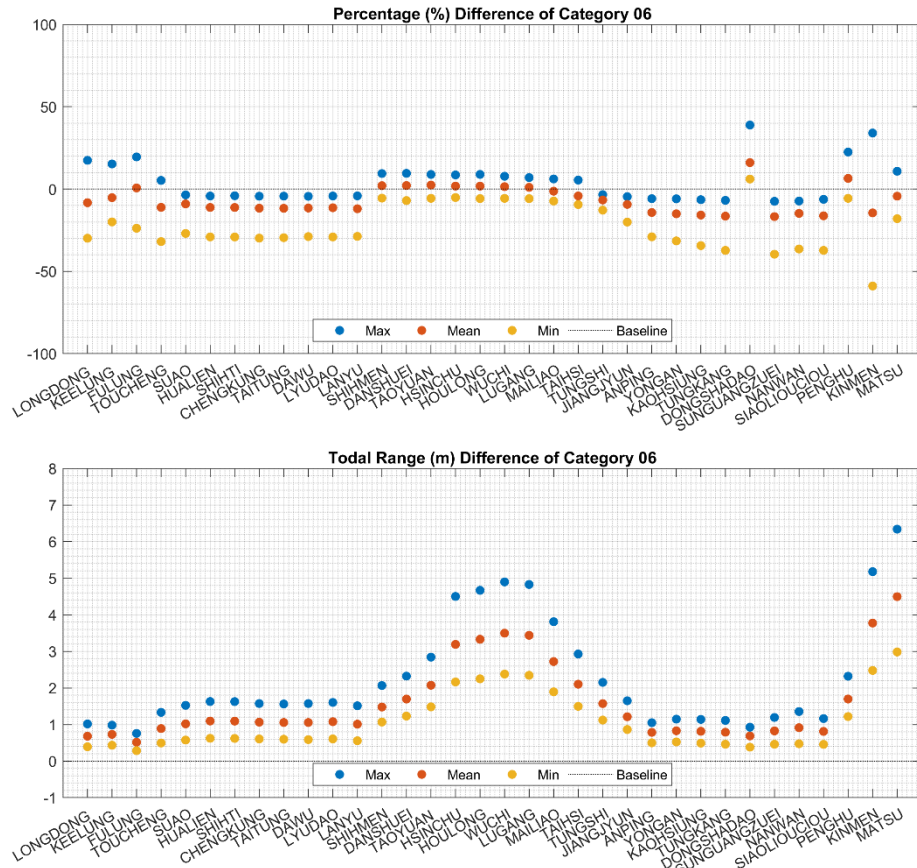


圖 6—14、第六類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。

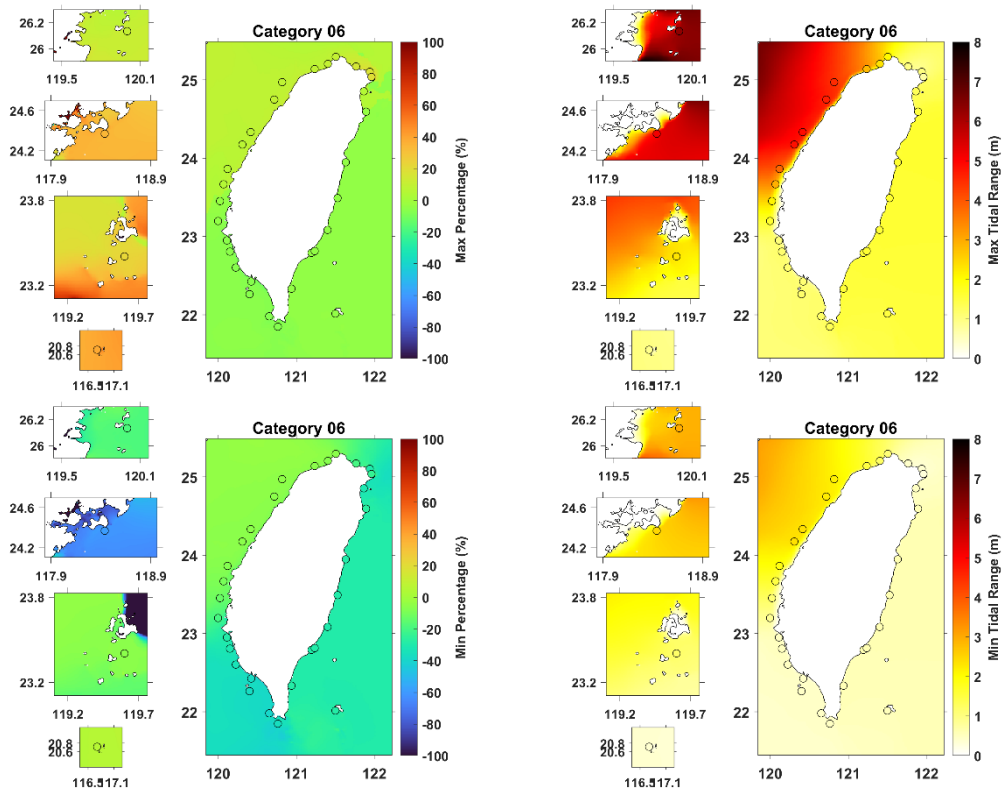


圖 6—15、第六類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。

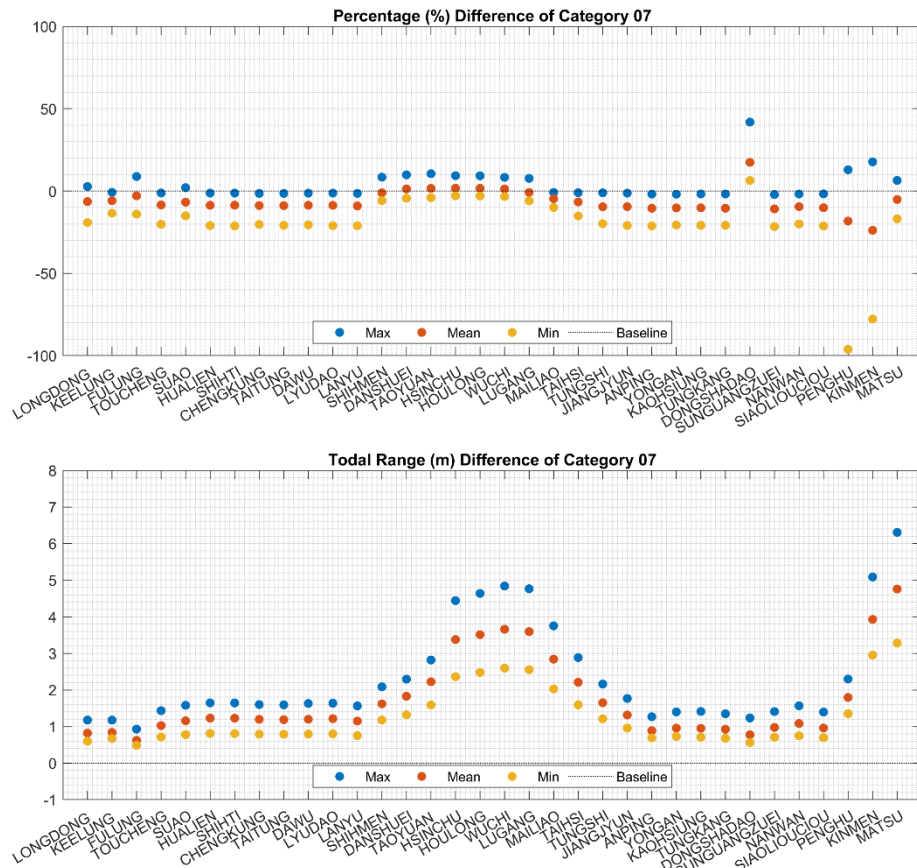


圖 6—16、第七類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。

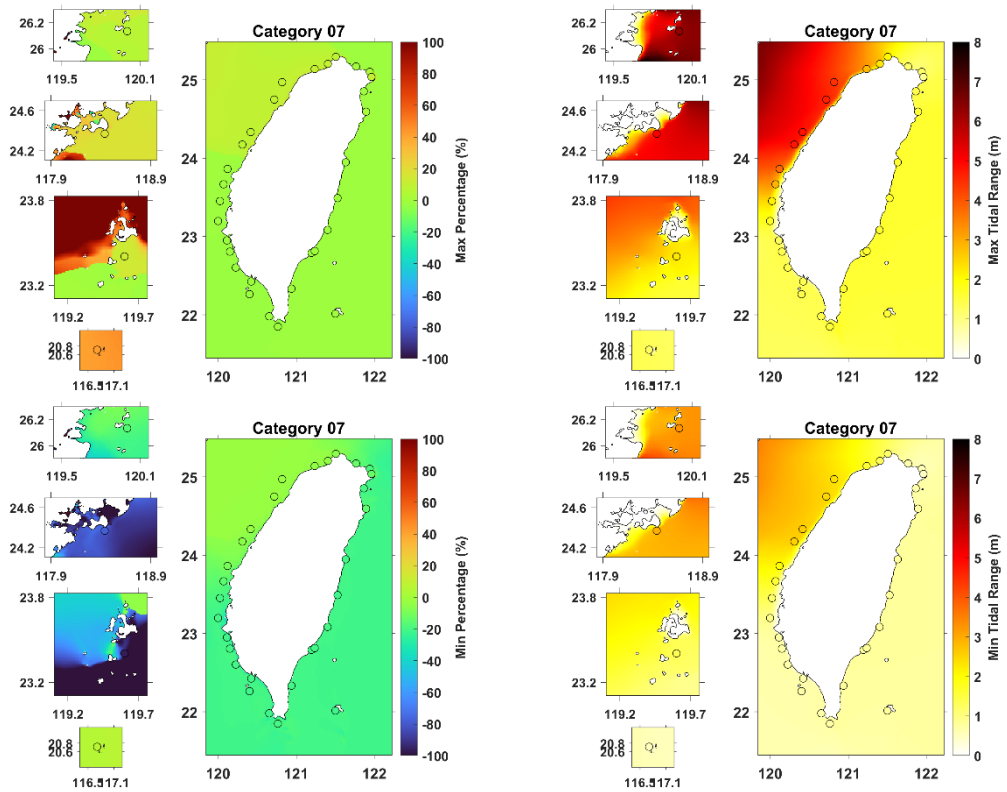


圖 6—17、第七類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。

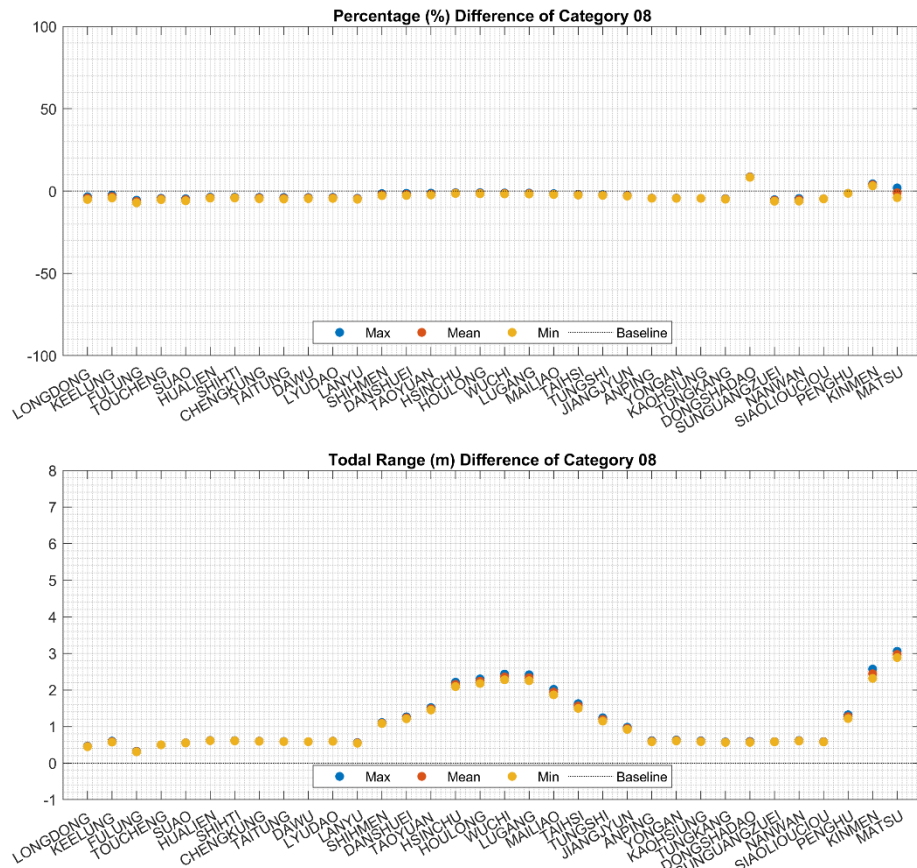


圖 6—18、第八類路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。

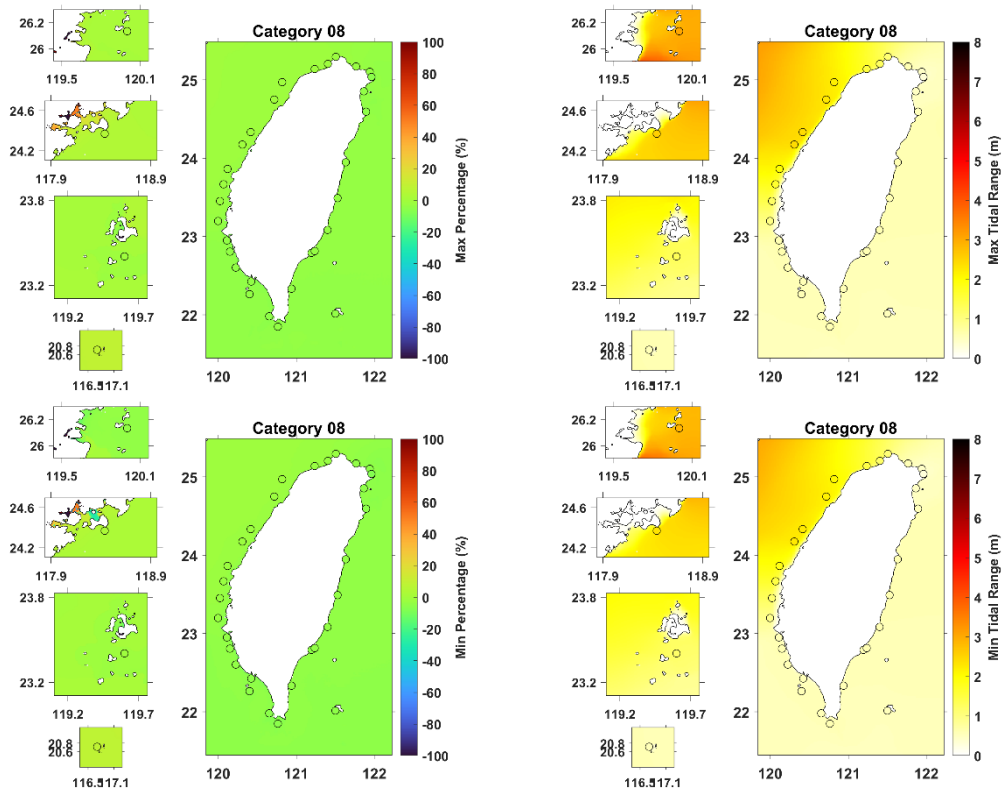


圖 6—19、第八類路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。



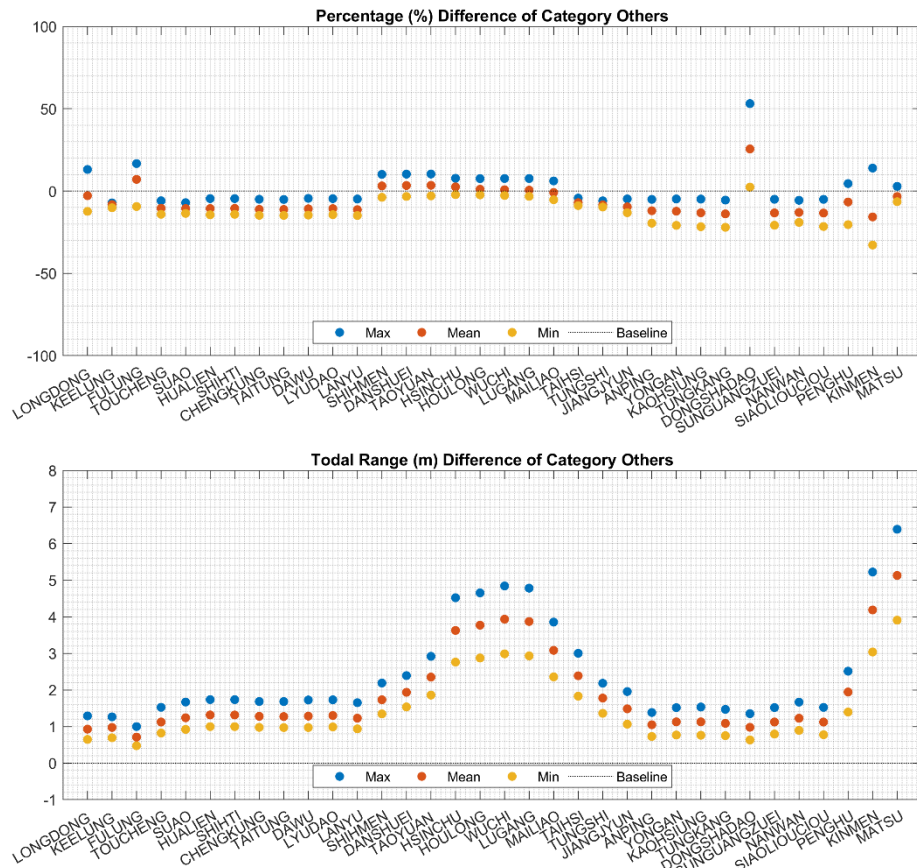


圖 6—22、其他特殊路徑（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。

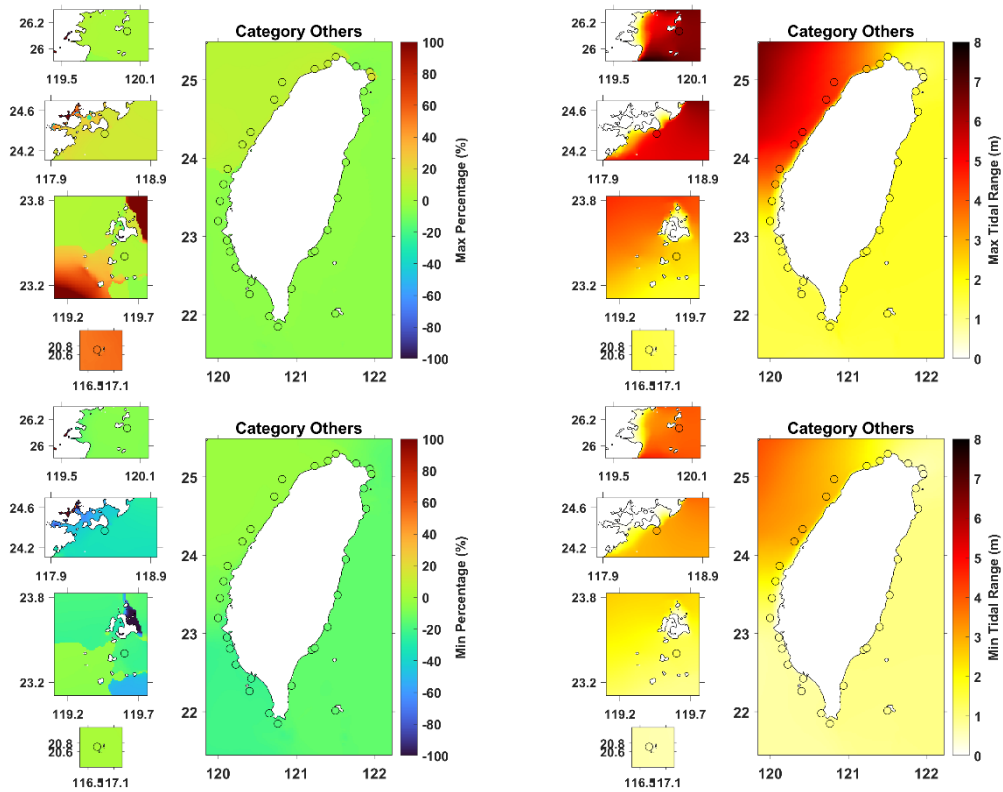


圖 6—23、其他特殊路徑（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。

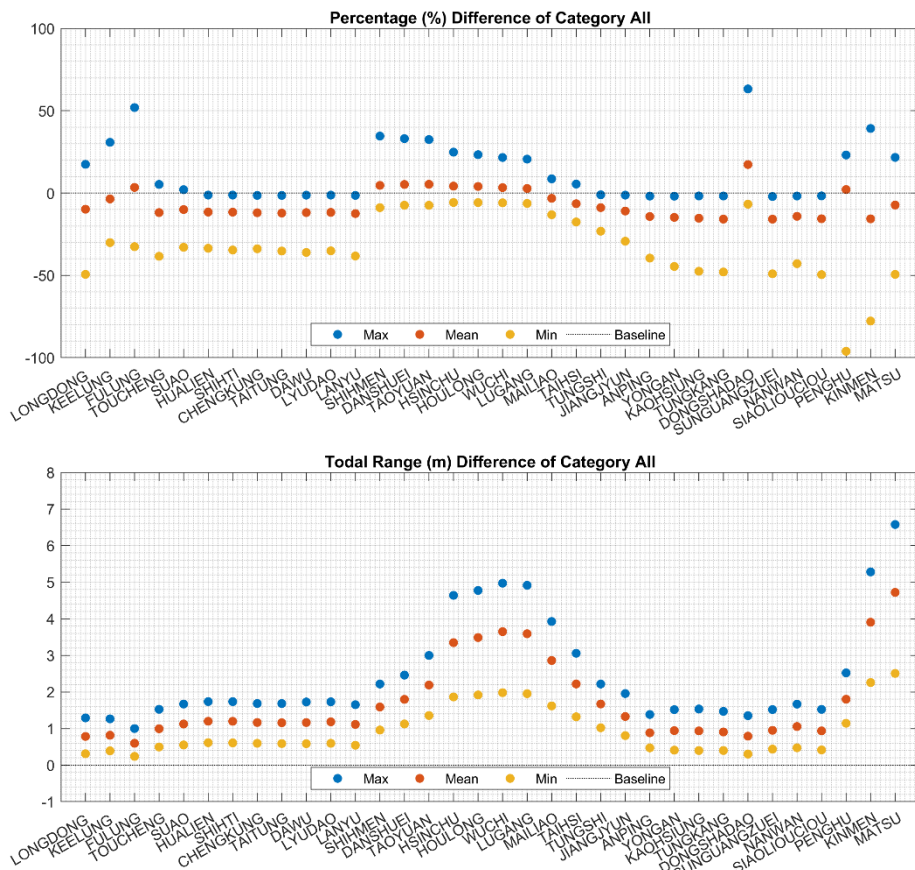


圖 6—24、所有颱風（上）非線性效應百分比與（下）各測站潮差分布。

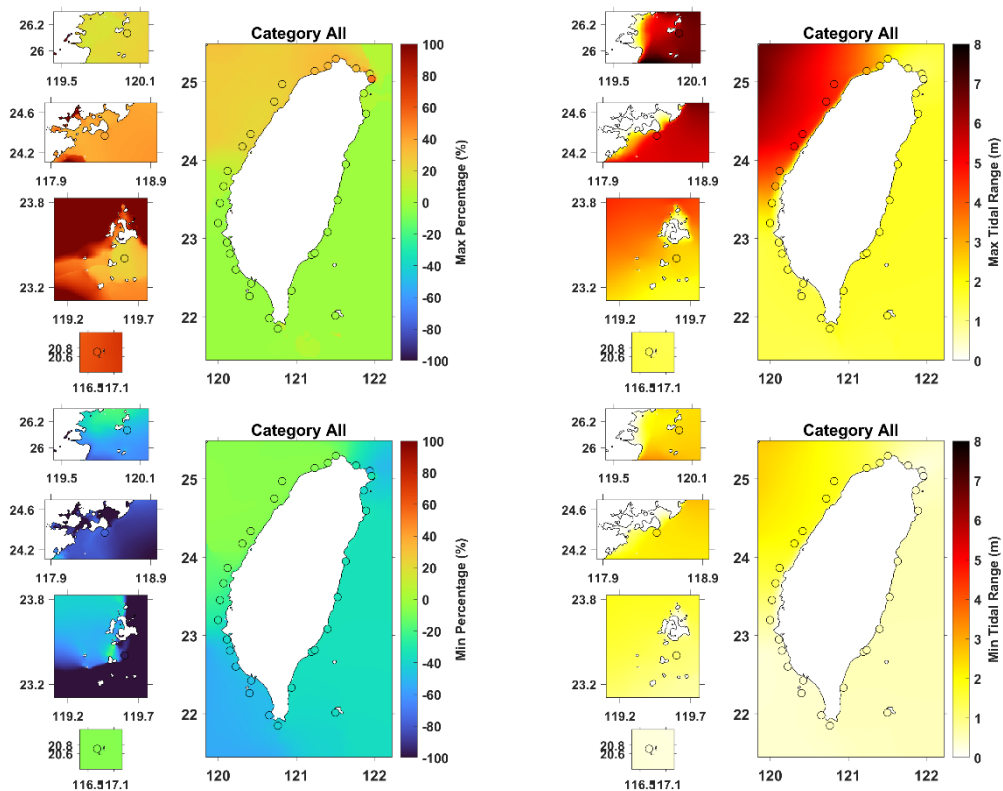


圖 6—25、所有颱風（左）非線性效應百分比與（右）潮差二維分布情形。

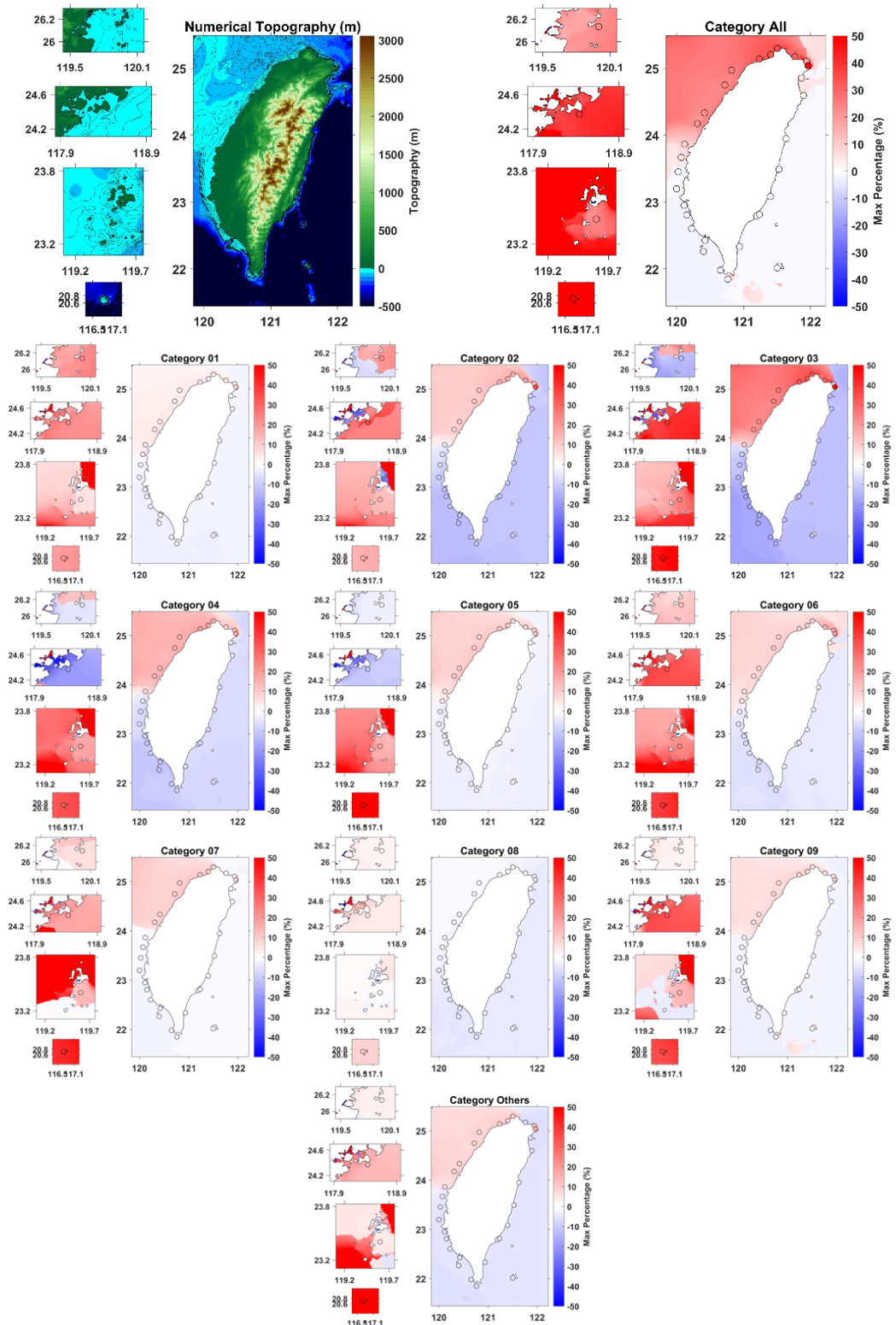


圖 6—26、各分類颱風期間潮汐/暴潮作用之非線性效應強度（最大值）

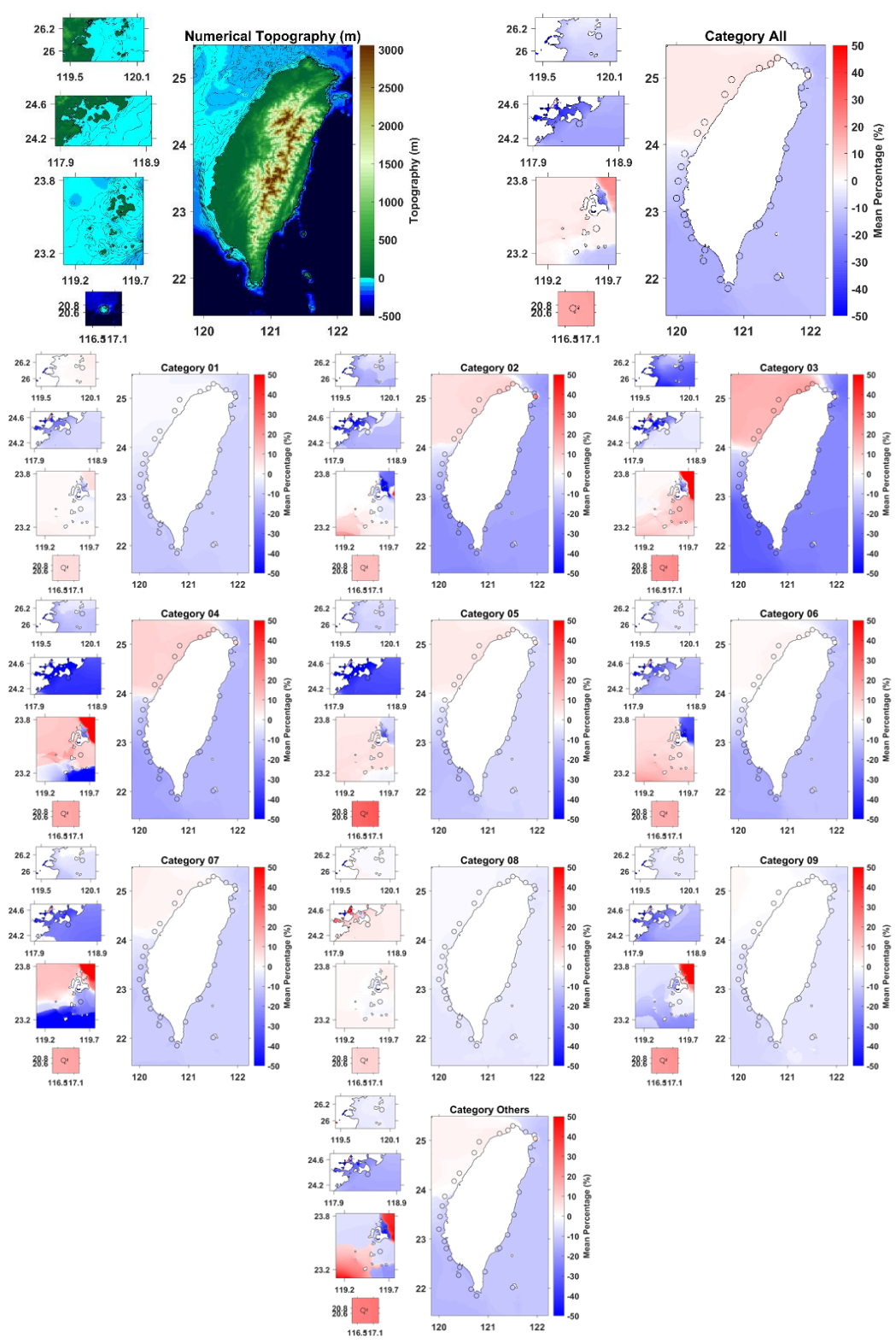


圖 6—27、各分類颱風期間潮汐/暴潮作用之非線性效應強度（平均值）

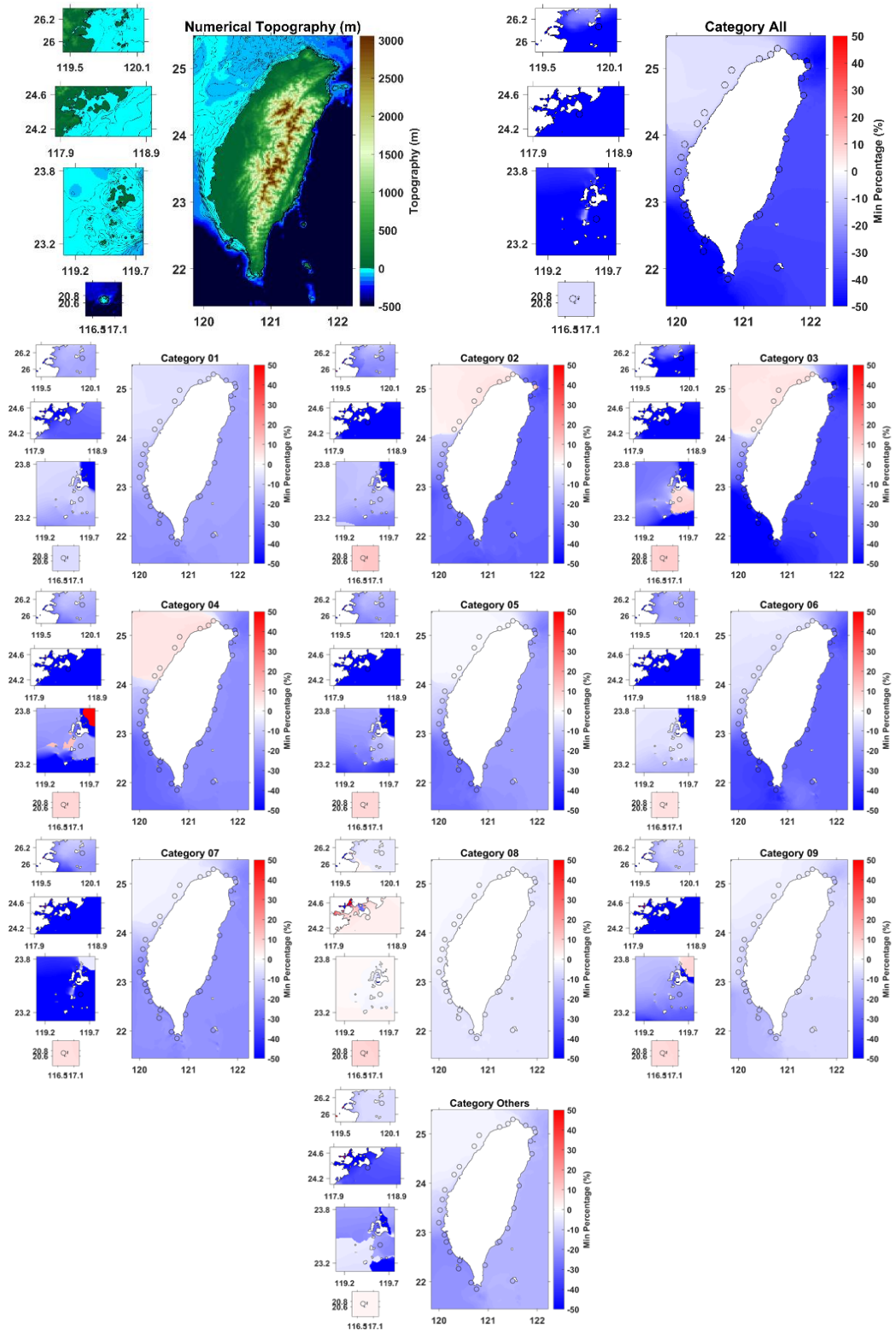


圖 6—28、各分類颱風期間潮汐/暴潮作用之非線性效應強度（最小值）

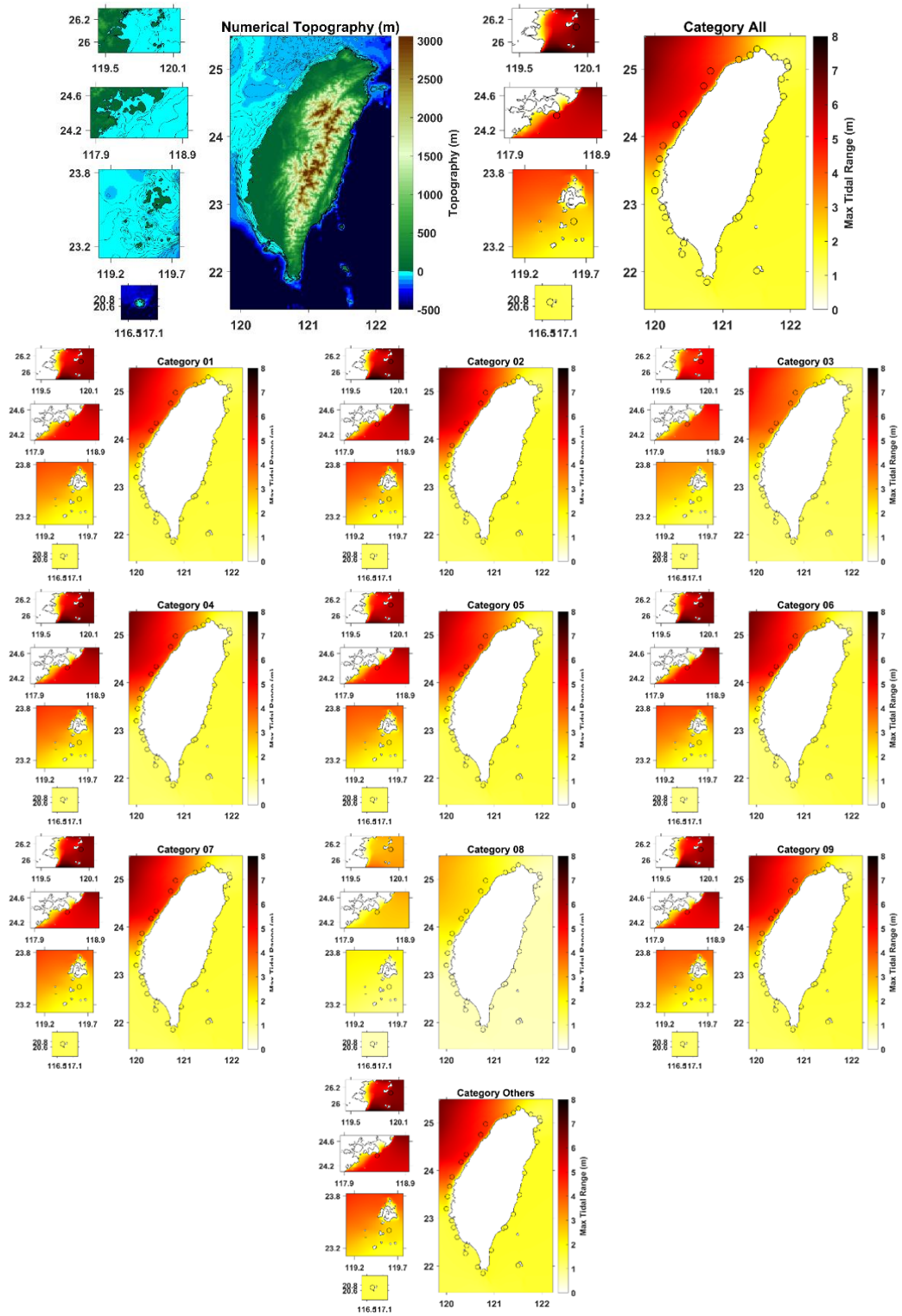


圖 6—29、依路徑分類颱風事件期間潮差分布圖（最大值）

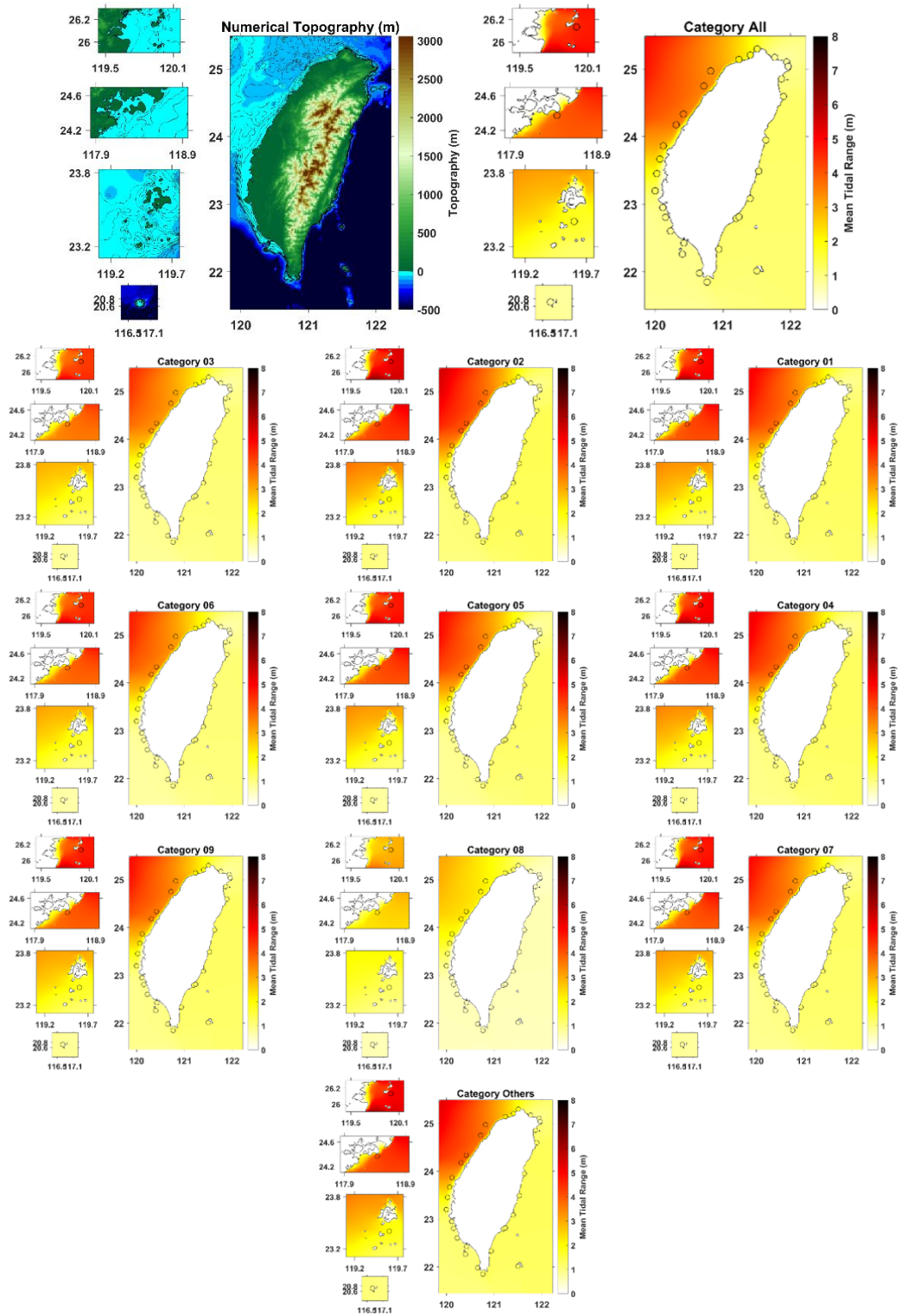


圖 6—30、依路徑分類颱風事件期間潮差分布圖（平均值）

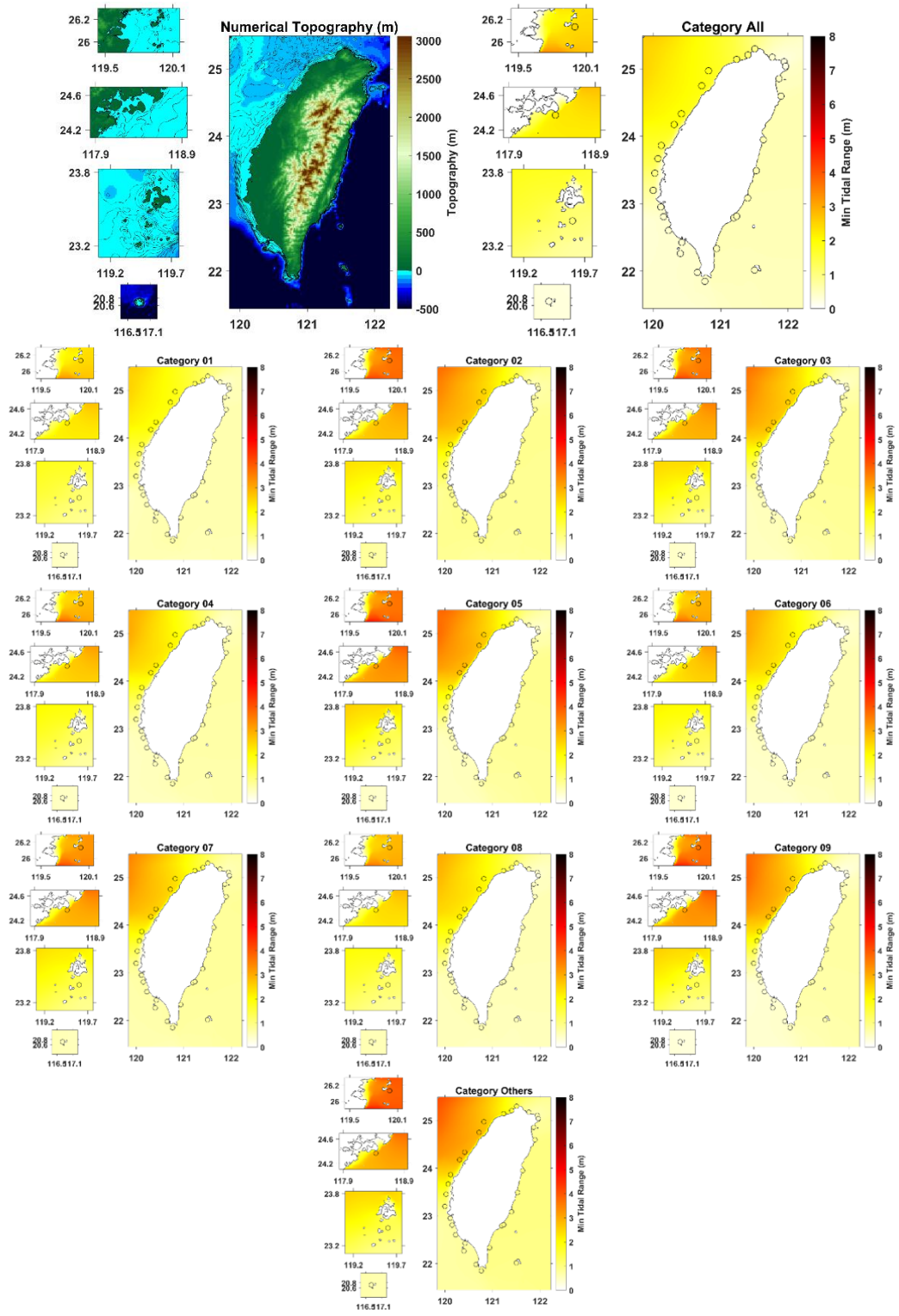


圖 6—31、依路徑分類颱風事件期間潮差分布圖（最小值）



## 第7章、結論

本研究計畫旨在開發創新的暴潮預報模型，即現實參數化模型（Realistic Parameterization, REP），目標為改善現有的颱風暴潮預報系統。這個模型的理念是透過建立大型暴潮模式與二維大氣模式耦合的模式資料庫，來取代傳統的理想風場模式預報作業。REP 模型的優勢在於其僅需作業單位提供熱帶氣旋的預報路徑和強度資訊，便能結合統計方法生成呈現地形阻擋效應的暴潮水位預報結果，從而彌補理想風場在颱風暴潮預報上的不足。

REP 模型的開發主要分為三個關鍵階段。本年度上半年之重點工作項目為收集颱風二維模式資料及對應的重點颱風參數。這一階段將利用 ECMWF ERA5 近 40 年的再分析資料以及作業單位提供的過往大氣模式預報結果，擷取台灣沿海及西北太平洋中的歷史颱風案例及其關鍵參數。這些參數包括最低中心氣壓、最大風速等，用於分析歷史颱風的統計特性並建立資料庫。與傳統的理想參數模型不同，REP 模型使用再分析場或大氣模式預報風場作為資料來源，這使得模型能夠考慮到地形效應，從而獲得更為逼真的氣象場結構。

颱風資料庫分析顯示，影響台灣的颱風路徑主要從西北太平洋向西北方向移動，在台灣東南部海域路徑較為密集。颱風強度在台灣東部海域通常較強，往西移動經過台灣或進入中國內陸後強度普遍減弱。資料紀錄顯示，大多數颱風的近中心最大風速在 20 至 50 公尺/秒之間，中心氣壓在 980 至 1000 百帕之間，七級風半徑在 100 至 300 公里之間。值得注意的是，台灣東部沿海延伸至西北太平洋遠洋地區（特別是北緯 20 至 25 度）的颱風通常強度更強、規模更大，這表明台灣東部地區比西部地區更容易面臨強烈颱風的威脅。

ECMWF ERA5 再分析資料為研究提供了高解析度的全球大氣狀況資訊，對研究颱風和風暴潮等極端事件非常有價值。結合 ERA5 資料和最佳路徑資料可以擷取關鍵颱風參數，但在某些情況下（如颱風接近陸地時）可能存在定位誤差。ERA5 資料同樣顯示颱風路徑主要從西北太平洋向西北方向移動，在菲律賓北部、

台灣沿海及中國沿岸地區分佈較為密集。颱風強度通常在台灣東部海域較強，向西移動時逐漸減弱。七級風半徑從東南向西北方向有增大趨勢，在台灣海峽和東北部海域可達 400 公里以上。在 ERA5 資料集中，大多數影響台灣的熱帶氣旋屬於輕度颱風級別，最大風速通常在 20 至 25 公尺/秒之間，中心氣壓在 980 至 990 百帕之間，七級風半徑在 50 至 400 公里間。然而，與最佳路徑資料相比，ERA5 資料顯示較少的中度和強烈颱風，這可能是由於模式解析度或資料同化方法的限制。

TWRF (Typhoon WRF) 模式是由中央氣象署開發的颱風作業預報模式，基於 WRF 系統架構。研究使用 TWRF 模式重新模擬了 1990-2021 年間有發布警報的颱風案例。TWRF 資料顯示，颱風活動主要集中在菲律賓東部至台灣東部的海域，向東北延伸至日本南部。颱風路徑通常從東南向西北或北向移動，部分向西移動。最強烈的颱風主要出現在菲律賓東部外海至台灣東南部海域，颱風強度從海洋向陸地逐漸減弱，特別是在接近或登陸後。

TWRF 模型還展示七級風半徑的特殊分佈特徵，最大的七級風半徑區域主要集中在中國東南沿海和台灣海峽附近。有趣的是，七級風半徑與颱風強度呈現某種程度的負相關，強度高的颱風反而七級風半徑較小。此外，台灣島和菲律賓群島等陸地對颱風路徑和強度有明顯影響，颱風在接近陸地時通常會出現轉向現象，登陸後強度迅速減弱。

比較三種資料來源，我們發現 ECMWF ERA5 通常具有最大的覆蓋範圍，而 TWRF 模式所有資料（包括初始場及預報資料）雖然涵蓋的颱風事件較少，卻因為具備預報場而擁有最高的資料密度。在颱風強度參數比較中，TWRF 模式資料與颱風資料庫最為接近，而 ECMWF ERA5 則傾向於低估高風速事件和颱風強度。在空間分布特徵方面，所有資料庫都顯示颱風從東南向西北移動的總體趨勢，但 TWRF 模式資料中，尤其是包含預報資料的版本，在東北方向顯示了更多的高強度颱風分布。

在整體表現上，TWRF 模式資料在多個方面都與颱風資料庫最為一致，顯示

出良好的性能。而 ECMWF ERA5 雖然提供了廣泛的覆蓋範圍，但在捕捉極端事件方面可能需要進一步改進，這些差異可能反映了不同機構的數據收集方法、分析技術和數據處理方法的不同。研究中所提供的這些圖表為研究颱風活動頻率和分布提供了重要的視覺化資訊，同時也突顯了使用多個資料來源進行交叉驗證的重要性，以及理解不同數據處理方法可能帶來的影響。

於下半年度中，工作項目主要著重於「精進預報系統時效」及「非線性效應分析」兩大部分。

「非線性效應分析」中，主要探討台灣周邊海域颱風暴潮與潮汐間的非線性交互作用，研究中釐清非線性效應的強度與潮差大小並非呈現簡單的正相關關係。即便台灣西部沿海等區域具有較大潮差，非線性效應的強度並不一定較強；反之，某些潮差較小的區域（如東沙島）反而可能出現顯著的非線性效應，這個發現推翻了過去認為潮差越大非線性效應就越強的假設。

研究中成功建立非線性效應的空間分布特徵圖。從空間分布來看，非線性效應在淺水區域表現得更為顯著，而台灣本島東部及西南部深水區的非線性效應強度較為穩定。水深在 50 公尺內的離島地區（澎湖、金門、馬祖及東沙島）往往出現較強的非線性效應，這可能是因為淺水區域中，水體運動受到地形限制，導致潮汐與颱風引起的水位變化產生更強烈的相互作用。特別是在澎湖群島等複雜地形區域，呈現出更為多樣的非線性效應。

本研究量化出非線性效應的強度範圍，發現大多數測站的效應在歷史事件中在正負 50% 之間波動，歷年非線性強度平均值在正負 15% 之間。這個發現直接指出若忽略非線性交互作用，暴潮預報可能產生至少 15% 的系統性誤差，極端情況下甚至可達當地潮差的 100%。

不同路徑的颱風雖然會在不同區域產生顯著的非線性效應，但離島地區的非線性效應普遍較台灣本島顯著。這表明颱風路徑與距離雖然會影響非線性效應的空間分布，但影響方式並非直接。此外，由於非線性強度顯著的地區主要集中在離島及其周邊海域，局部地形特徵和水深分布可能是決定當地非線性效應強度的

關鍵因素。

這些量化的研究成果為未來改進暴潮預報模式提供了具體的科學依據，不僅為台灣地區颱風活動特徵提供了全面的認識，對於改進颱風預報和防災工作也具有重要的參考價值。同時，這項研究也突顯了結合不同資料來源進行颱風研究的重要性和潛在挑戰，為未來的颱風模擬和預報工作指明了方向。

## 參考文獻

1. Arns, A., Wahl, T., Wolff, C., Vafeidis, A. T., Haigh, I. D., Woodworth, P., Niehüser, S., & Jensen, J. (2020). Non-linear interaction modulates global extreme sea levels, coastal flood exposure, and impacts. *Nature Communications*, *11*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15752-5>
2. Bernier, N. B., & Thompson, K. R. (2007). Tide-surge interaction off the east coast of Canada and northeastern United States. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *112*(C6). <https://doi.org/10.1029/2006jc003793>
3. Brand, S., & Bletloch, J. W. (1974). Changes in the Characteristics of Typhoons Crossing the Island of Taiwan. *Monthly Weather Review*, *102*(10), 708-713. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1974\)102<0708:CITCOT>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1974)102<0708:CITCOT>2.0.CO;2)
4. Chang, S. W.-J. (1982). The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, *110*(9), 1255-1270.
5. Chu, K., Wang, S., & Pao, H. (1977). Surface wind fields and moving tracks of typhoons when encountering the island of Taiwan. Preprints, 11th Tech. Conf. Hurricane and Tropical Meteorology, Miami Beach, FL, Amer. Meteor. Soc,
6. Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists* (Vol. 2). world scientific publishing company.
7. Fang, X., Kuo, Y.-H., & Wang, A. (2011). The impacts of Taiwan topography on the predictability of Typhoon Morakot's record-breaking rainfall: A high-resolution ensemble simulation. *Weather and Forecasting*, *26*(5), 613-633.
8. Fernández-Montblanc, T., Vourdoukas, M. I., Ciavola, P., Voukouvalas, E., Mentaschi, L., Breyiannis, G., Feyen, L., & Salamon, P. (2019). Towards robust pan-European storm surge forecasting. *Ocean Modelling*, *133*, 129-144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.12.001>
9. Harper, B., & Holland, G. (1999). An updated parametric model of the tropical cyclone. Proc. 23rd Conf. Hurricanes and Tropical Meteorology,
10. Holland, G. J. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes.
11. Horsburgh, K. J., & Wilson, C. (2007). Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *112*(C8). <https://doi.org/10.1029/2006jc004033>
12. Hsiao, L.-F., Huang, X.-Y., Kuo, Y.-H., Chen, D.-S., Wang, H., Tsai, C.-C., Yeh, T.-C., Hong, J.-S., Fong, C.-T., & Lee, C.-S. (2015). Blending of global and regional analyses with a spatial filter: Application to typhoon prediction over the western North Pacific Ocean. *Weather and Forecasting*, *30*(3), 754-770.
13. HU, S., LI, Y., & XU, Y.-I. (2012). A Statistical Analysis on Intensity and Structure Change of Tropical Cyclone making Landfall on Taiwan Island [J]. *J Trop Meteor*, *28*(3), 300-310.
14. Idier, D., Dumas, F., & Muller, H. (2012). Tide-surge interaction in the English Channel. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *12*(12), 3709-3718. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3709->

## 2012

15. Jelesnianski, C. P. (1992). *SLOSH: Sea, lake, and overland surges from hurricanes* (Vol. 48). US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration . . .
16. Jian, G.-J., Teng, J.-H., Wang, S.-T., Cheng, M.-D., Cheng, C.-P., Chen, J.-H., & Chu, Y.-J. (2022). An overview of the tropical cyclone database at the Central Weather Bureau of Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 33(1), 26. <https://doi.org/10.1007/s44195-022-00023-1>
17. Jian, G.-J., & Wu, C.-C. (2008). A numerical study of the track deflection of Supertyphoon Haitang (2005) prior to its landfall in Taiwan. *Monthly Weather Review*, 136(2), 598-615.
18. Large, W., & Pond, S. (1981). Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of physical oceanography*, 11(3), 324-336.
19. Lin, M.-Y., Sun, W.-Y., Chiou, M.-D., Chen, C.-Y., Cheng, H.-Y., & Chen, C.-H. (2018). Development and evaluation of a storm surge warning system in Taiwan. *Ocean Dynamics*, 68, 1025-1049.
20. Lin, Y.-L., Witcraft, N. C., & Chen, S.-Y. (2002). MODELING TRACK DEFLECTION FOR TROPICAL CYCLONES PASSING OVER A MESOSCALE MOUNTAIN AND ITS POTENTIAL APPLICATION TO TRACK PREDICTION. 25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, San Diego, CA,
21. Lin, Y.-L., Witcraft, N. C., & Kuo, Y.-H. (2006). Dynamics of Track Deflection Associated with the Passage of Tropical Cyclones over a Mesoscale Mountain. *Monthly Weather Review*, 134(12), 3509-3538. <https://doi.org/10.1175/MWR3263.1>
22. Liu, W.-C., & Huang, W.-C. (2019). Influences of sea level rise on tides and storm surges around the Taiwan coast. *Continental Shelf Research*, 173, 56-72.
23. Liu, W.-C., & Huang, W.-C. (2020). Investigating typhoon-induced storm surge and waves in the coast of Taiwan using an integrally-coupled tide-surge-wave model. *Ocean Engineering*, 212, 107571. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107571>
24. Meng, Z.-y., Xu, X., & Chen, L. (1998). Mechanism of the impact of the cyclone system induced by the Taiwan Island topography on tropical cyclone unusual motion. *Scientia Atmospherica Sinica*, 22, 156-168.
25. Powell, M. D., Vickery, P. J., & Reinhold, T. A. (2003). Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, 422(6929), 279-283.
26. Rossiter, J. R. (1961). Interaction Between Tide and Surge in the Thames. *Geophysical Journal International*, 6(1), 29-53. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1961.tb02960.x>
27. Sheng, Y. P., Paramygin, V. A., Terng, C.-T., & Chi-Hao, C. (2016). Simulating storm surge and inundation along the Taiwan coast during typhoons Fanapi in 2010 and Soulik in 2013. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27(6), 9.
28. Smith, S., & Banke, E. (1975). Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101(429), 665-673.
29. Soria, J. L. A., Switzer, A. D., Villanoy, C. L., Fritz, H. M., Bilgera, P. H. T., Cabrera, O. C.,

- Siringan, F. P., Maria, Y. Y.-S., Ramos, R. D., & Fernandez, I. Q. (2016). Repeat storm surge disasters of Typhoon Haiyan and its 1897 predecessor in the Philippines. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(1), 31-48.
30. Sun, Z., Zhang, B., & Tang, J. (2021). Estimating the Key Parameter of a Tropical Cyclone Wind Field Model over the Northwest Pacific Ocean: A Comparison between Neural Networks and Statistical Models. *Remote Sensing*, 13(14), 2653. <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/14/2653>
  31. Wang, S. (1980). Prediction of the movement and strength of typhoons in Taiwan and its vicinity. *National Science Council Research Rep*, 108, 100.
  32. Wankang, Y., Baoshu, Y., Xingru, F., Dezhou, Y., Guandong, G., & Haiying, C. (2019). The effect of nonlinear factors on tide-surge interaction: A case study of Typhoon Rammasun in Tieshan Bay, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, 420-428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.01.024>
  33. Wei, C.-C., Peng, P.-C., Tsai, C.-H., & Huang, C.-L. (2018). Regional Forecasting of Wind Speeds during Typhoon Landfall in Taiwan: A Case Study of Westward-Moving Typhoons. *Atmosphere*, 9(4), 141. <https://www.mdpi.com/2073-4433/9/4/141>
  34. Wu, C.-C. (2001). Numerical simulation of Typhoon Gladys (1994) and its interaction with Taiwan terrain using the GFDL hurricane model. *Monthly Weather Review*, 129(6), 1533-1549.
  35. Wu, C.-C., & Kuo, Y.-H. (1999). Typhoons Affecting Taiwan: Current Understanding and Future Challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(1), 67-80. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0067:TATCUA>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0067:TATCUA>2.0.CO;2)
  36. Wu, Y.-C., Yang, M.-J., & Rogers, R. F. (2022). Examining Terrain Effects on the Evolution of Precipitation and Vorticity of Typhoon Fanapi (2010) after Departing the Central Mountain Range of Taiwan. *Monthly Weather Review*, 150(6), 1517-1540. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0205.1>
  37. Xie, B., & Zhang, F. (2012). Impacts of typhoon track and island topography on the heavy rainfalls in Taiwan associated with Morakot (2009). *Monthly Weather Review*, 140(10), 3379-3394.
  38. Xie, L., Bao, S., Pietrafesa, L. J., Foley, K., & Fuentes, M. (2006). A real-time hurricane surface wind forecasting model: Formulation and verification. *Monthly Weather Review*, 134(5), 1355-1370.
  39. Yang, J., Lin, C.-y., Liu, H., Li, L., Wu, T.-r., Wang, P., Li, B., & Liu, P. L.-F. (2021). Effects of island topography on storm surge in Taiwan strait during Typhoon Maria. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 147(2), 04020057.
  40. Yang, M.-J., Zhang, D.-L., & Huang, H.-L. (2008). A modeling study of Typhoon Nari (2001) at landfall. Part I: Topographic effects. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(10), 3095-3115.
  41. Yang, M. J., Zhang, D. L., Tang, X. D., & Zhang, Y. (2011). A modeling study of Typhoon Nari (2001) at landfall: 2. Structural changes and terrain-induced asymmetries. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D9).

42. Yu, H.-C., Zhang, Y. J., Jason, C., Terng, C., Sun, W., Ye, F., Wang, H. V., Wang, Z., & Huang, H. (2017). Simulating multi-scale oceanic processes around Taiwan on unstructured grids. *Ocean Modelling*, 119, 72-93.
43. Zhang, W. Z., Shi, F., Hong, H. S., Shang, S. P., & Kirby, J. T. (2010). Tide-surge Interaction Intensified by the Taiwan Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C6). <https://doi.org/10.1029/2009jc005762>
44. Zijl, F., Verlaan, M., & Gerritsen, H. (2013). Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. *Ocean Dynamics*, 63(7), 823-847. <https://doi.org/10.1007/s10236-013-0624-2>

# 會議記錄

## 「以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)」計畫案 【113 年 5 月工作會議紀錄】

時間：113 年 5 月 22 日(三) 9 時 30 分

地點：視訊會議

主席：呂理弘簡正

出席人員：海象氣候組：呂理弘簡正、朱啟豪科長、陳維翔、楊天璋

國立中央大學：吳祚任教授、林君蔚、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. 本案原使用 ERA5 氣象場資料利用 Realistic 統計分析方法合成 REP 氣象場，改成先分析 TWRP 二維大氣動力模式之颱風重要參數，本年度驗收項目預計調整如附件紅字處。驗收時間維持契約簽定之時程。
2. 本組於 5/27-5/31 間請 TWRP 業務承辦人提供 54 run 之颱風案例資料與詳細說明。並在 6/30 前完成資料傳輸予廠商，或優先取得所有案例分析場及 1 個完整颱風案例，以供廠商撰寫後續系統性輸出產品之程式。

### 參、散會：10 時 10 分

陳閱長言

楊天璋 0527/1500

技士陳維翔

0527/1500

科長朱啟豪

0527/1500

技正呂理弘

0528/0935

組長洪景山

0531/1700

	交付項目	初稿日期	完成日期	驗收標準
	1. 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	2. 配合本署不定期之查訪	113/07/01 (含)前	113/07/31 (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 113 年 5 月、7 月各進行 1 次工作進度報告(簡報或會議型式)。
	3. 颱風資料庫最佳參數資料收集			收集近 20 年登陸臺灣或造成影響的颱風之再分析風場以及 Best Track 之參數，包含路徑、中心氣壓、最大風速、七級風半徑等。
	4. 取得 TWRP 二維大氣風場之重點颱風參數			自二維氣象場中篩檢颱風關鍵參數，包括颱風中心位置、中心氣壓、最大風速、七級風暴風半徑、移動速度等。
	5. 視覺化最佳路徑參數與 TWRP 參數差異			繪製颱風資料庫最佳路徑參數與 TWRP 颱風參數資料間的比較圖。
	6. 期中報告初稿、修正版			繳交期中報告，內容應含上述工項及委託研究計劃執行聲明書。
期末	7. 配合本署不定期之查訪	113/11/29 (含)前	113/12/31 (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 113 年 9 月、11 月各進行 1 次工作進度報告(簡報或會議型式)。
	8. 颱風暴潮與潮汐的非線性效應分析			提供在模擬過程中考量潮汐與否所得之暴潮模擬水位差異比較。
	9. 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)。
	10. 期末報告初稿、修正版			繳交期末報告，內容應含全年工項及委託研究計劃執行聲明書。
	1. 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。			

山景共事

交通部中央氣象署

「以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)」



期中報告審查會議紀錄

- 一、標案名稱：「以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)」
- 二、廠商名稱：中華民國地球物理學會
- 三、審查日期：113 年 7 月 18 日（星期四）10 時 30 分
- 四、地點：615 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
	簡仲環	
中央氣象署 大氣觀測組	齊祿祥	
中央氣象署 預報中心	徐仲毅	

業務單位：



廠商： 

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) 簡委員仲璟	
<p>1. 本研究目前已針對不同來源的颱風參數資料進行分析比較，以瞭解不同來源間之差異，此對後續 REP model 的建置有幫助。</p> <p>2. 後續在 REP 建置時參數及水位資料之準確性宜注意。</p>	<p>3. 感謝委員認可。</p> <p>4. 謝謝委員提醒，後續將多加留意。</p>
(二) 徐委員仲毅	
<p>5. 報告詳細說明颱風資料庫與 ECMWF、TWRP 資料之空間分佈、強度、中心氣壓、七級風半徑等資料特徵分佈及差異，讓預報人員更能掌握模式特性，建議未來可與預報中心建立交流管道，相互交換意見。</p> <p>6. 報告之層次及條理分明，理論與階段目標連結清楚。</p> <p>7. 關於位陸地附近時七級風半徑說明有三：  P.51.....直到位於中國陸地區域之颱風記錄，七級風才有明顯子下降情形。(此處亦有多餘字)。  P.62.....有些七級風半徑的極值分佈在陸地沿海地區，很有可能是颱風結構受陸地破壞後無法精確捕捉最大風速極值及七級風暴風半徑所導致之結果。  P.81.....靠近陸地的區域七級風半徑往往較大，這可能反映了颱風在接近陸地時結構的擴展。  以上三處 P.61.與 P.81結果類似，說明陸地處有較大七級風半徑，但推測原因不同，二者與 P.51結果亦不同，建議加強說明。</p> <p>8. 以下應有誤，請修正：  p.50 圖 5-6.....顏色越紅，表示.....氣壓平均值越高。  p.58 由於 ECMWF-ERA5.....其中，模式內颱風中心位置以最佳路徑位置維參考基準點.....  p.77 七級風半徑.....呈現長尾、右偏，.....  p.81圖5-30為自 TWRP.....，其中最高峰值在40至45公尺/秒之間.....  p.104 圖 5-39展不同資料來源所擷取之颱風中心氣壓分佈情形.....</p>	<p>9. 感謝委員肯定，非常樂意與預報中心同仁交流學習。</p> <p>10. 感謝委認可。</p> <p>11. 已補正語意不清之處，謝謝委員。</p> <p>12. 感謝委員，文字與內容之錯誤已修正於完稿。</p>
(三) 齊委員祿祥	
<p>13. 報告內文中未適當插入圖表、序號煩請再檢視內容予以修正。</p> <p>14. 執行單位均依業務單位要求，完成各項工作，審查通過</p>	<p>15. 感謝委員提點，已更正於完稿。</p> <p>16. 謝謝委員肯定。</p>

九、審查結果：

審查通過。

十、散會。(12時0分)

「以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)」計畫案  
【113 年 7 月工作會議紀錄】

時 間：113 年 7 月 29 日(一)10 時 00 分

地 點：視訊會議

主 席：呂理弘簡正

出席人員：海象氣候組：呂理弘簡正、朱啟豪科長、楊天璋

國立中央大學：林君蔚博士、莊美惠

記 錄：林君蔚

壹、工作進度簡報：

計畫執行進度報告。

貳、討論及決議事項：

新增工作項目精進 TWRF 作業模式

1. 將預報模式移植至指定新伺服器
2. 新伺服器需安裝 DMS 系統並測試抓取 DMS 上的資料
3. 評估模式分段執行之可能性
4. FTP 上傳資料優化，排成以 61.56.11.132 優先

參、散會：10 時 30 分

楊天璋 0805 / 1630

科長朱啟豪  
0805/1640

技正呂理弘  
0806/107

「以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)」計畫案  
【113 年 8 月工作會議紀錄】

時 間：113 年 8 月 20 日(二)10 時 00 分

地 點：視訊會議

主 席：呂理弘簡正

出席人員：海象氣候組：呂理弘簡正、朱啟豪科長、楊天璋

國立中央大學：吳祚任教授、林君蔚博士、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. 暴潮預報模式已經移植至指定新伺服器，並有效提升計算效率
2. 經研究團隊評估後，固有模式核心架構若須調整為分段執行需要徹底改寫，因此建議若本次調整後仍未達作業單位時效需求可從其他方面著手。
3. FTP 上傳資料已設定 61.56.11.132 為優先。
4. 考慮新增工作項目導致後續非線性效應分析工作項目執行時間有限，因此將限縮該項目工作至分析 84 組有效颱風重模擬之氣象分析場資料。
5. 新伺服器待安裝 DMS 後即可測試抓取資料，於此之前將會以固有資料傳遞方式執行新伺服器之作業化測試。

參、散會：10 時 40 分

楊天璋 0823/0905

科長朱啟豪

0823/0910

技正呂理弘

0823/1110

「以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)」計畫案  
【113 年 10 月工作會議紀錄】

時 間：113 年 10 月 29 日(二)14 時 00 分

地 點：502 會議室

主 席：洪景山組長

出席人員：海象氣候組：洪景山組長、朱啟豪科長、楊天璋

國立中央大學：吳祚任教授、林君蔚博士、莊美惠、李薇

記 錄：李薇

壹、工作進度簡報：

計畫執行進度報告。

貳、討論及決議事項：

1. 經執行團隊模擬近年 84 組 TWRF 颱風案例，發現在沒有輸入潮汐的模擬中，風暴潮模擬結果與預期結果相差甚遠，尤其在離島測站其結果無法以線性方式回歸。目前結果顯示潮汐力之輸入，為風暴潮預報模擬提供穩定流場的作用，未來將再繼續深入研究。
2. 暴潮預報模式已移植至指定伺服器執行並達預期時效，暫無模式分段執行之需求。

參、散會：15 時 40 分

楊天璋 1101/1630

副長朱啟豪  
1104/1000

副組長潘琦  
1104/1100

組長洪景山  
1104/1100

交通部中央氣象署

「以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)」

報告審查會議紀錄

一、標案名稱：「以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)」

二、廠商名稱：中華民國地球物理學會

三、審查日期：113 年 12 月 18 日（星期三）15 時 0 分

四、地點：617 會議室

五、主持人：蔡委員立夫

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
中央氣象署 大氣觀測組	蔡立夫	蔡立夫
中央氣象署 海象氣候組	朱啟豪	朱啟豪

業務單位：

陳維翔

廠商：

吳作仁

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) 蔡委員立夫	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本案將原使用的 ECMWF ERA5 的資料分析改為增加 TWRP 模式資料，在原人力及時程或方法的規劃上都需要調整，請問本案的調整在人力及時程上是否能滿足計畫預定的成果？</li> <li>2. 在颱風資料庫最佳參數化中選了三個資料庫分析並儲存，但各資料庫呈現的結果各有不同的特性，請問未來要如何利用及提取最佳的資料參數在作業上？</li> <li>3. 非線性效益分析的結果中顯示在不同的颱風路徑、地形及區域的特性中，有不同的非線性效應，互有差異及落差，如在中部潮差較大及離島的部分結果有落差，請問後續該怎麼使用這些結果來強化暴潮水位預報的結果？後續有什麼方向研究改進？</li> <li>4. 在 P.118 頁 06 時 14 分應為筆誤，正確是否為 20 時 14 分</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 由於資料庫來源更換，資料處理量大幅提升，在人力以及時程上確實有壓力，故本團隊與業務單位保持緊密聯繫與討論，盡力完成計畫預定成果。</li> <li>2. 本研究將從三個資料庫擇一選取最佳資料，不會全部儲存在一起，便利作業員能迅速操作。</li> <li>3. 誤差大小的情況會在未來繼續評估討論，以及評估是否增加資料的複雜度。目前則是可將各地的系統性的誤差數值一併附上給予預報員參考。</li> <li>4. 感謝委員，文字與內容之錯誤已修正於完稿。</li> </ol>
(二) 陳委員俊成	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 建議第四章增一小節，簡要歸納颱風案例統計的結果。</li> <li>2. 第四章的統計圖最大風速、氣壓及颱風半徑未來是否能無因次化，以利各圖將來的應用。</li> <li>3. 第六章不同分類颱風的非線性百分比的圖中，最大百分比的比例尺也許可考慮以縮小比例尺範圍，取代 0-100% 以增加解析度。</li> <li>4. 風暴潮加上潮汐是否考量風暴靠近台灣時的漲退時段因素。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議，已於報告中補充。</li> <li>2. 本年度為計畫第一年期，目前先進行研究前置作業，探討地形鎖定效應與颱風暴潮之關係，無因次分析可視業務單位需求評估是否納入執考量。</li> <li>3. 謝謝委員的建議，後續將調整繪圖方式以明顯區分非線性特徵分布情形。</li> <li>4. 潮汐的線性疊加所造成誤差大小仍莫衷一是，將會與業務單位持續討論並改善。</li> </ol>
(三) 朱委員啟豪	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 颱風事件分析期間，潮差最大、最小值是否和天文潮潮差最大值一樣</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 由於颱風事件造成之風暴潮水位最大或最大值不一定出現在天文潮潮差極值時刻，故颱風期間之潮差最大、最小值未必會和天文潮潮差相同。</li> </ol>
(四) 業務單位	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 暴潮參數化模式於今年康芮及天兔颱風在 02 run 的時候都有意外</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝業務單位提醒，本團隊會詳加檢測。</li> </ol>

的中斷，請在非颱風季期間測試並檢查其運作狀況。	
2. 請定時檢視主機狀況，確保主機硬碟空間容量充足。	2. 遵照辦理。

九、審查結果：

審查通過。

十、散會。(16時0分)



























# 113 年度政府科技發展計畫 績效報告書 (D006)

計畫名稱：以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)

執行期間：

全程：自 113 年 5 月 2 日 至 115 年 12 月 31 日止

本期：自 113 年 5 月 2 日 至 113 年 12 月 31 日止

主管機關：交通部中央氣象署

執行機關：中華民國地球物理學會

## 壹、 目標與架構 (系統填寫)

(計畫目標與架構之呈現方式應與原科技計畫書一致，如實際執行與原規劃有差異或變更，應予說明；另績效報告著重實際執行與達成效益，請避免重複計畫書內容。)

### 一、 總目標及其達成情形

1. 分年目標與達成情形：請填寫為達成上述計畫總目標，各年度計畫分年目標及其達成情形。

年度 <sup>1</sup>	目標	達成情形 <sup>3</sup>
113	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 二維大氣動力模式資料蒐集分析與資料庫建置</li> <li>2. 預報系統效能精進</li> <li>3. 評估台灣沿海地區颱風暴潮之非線性效應強度</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 研究團隊比較了ECMWF ERA5、颱風資料庫和TWRP模式三種資料來源的特點和優缺點。比較結果顯示，ECMWF ERA5具有最大的覆蓋範圍，TWRP模式資料具有最高的資料密度，而在颱風強度參數方面，TWRP模式資料與颱風資料庫最為接近。研究中整理揭示了影響台灣的颱風路徑和強度特徵。分析結果顯示，颱風主要從西北太平洋向西北方向移動，在台灣東南部海域路徑較為密集。大多數颱風的近中心最大風速在20至50公尺/秒之間，中心氣壓在980至1000百帕之間，七級風半徑在100至300公里之間。TWRP模型還揭示了七級風半</li> </ol>

		<p>徑的特殊分佈特徵，以及颱風強度與七級風半徑之間的負相關關係。</p> <p>2. 研究團隊成功將原作業於叢集電腦平台的 Python 版本暴潮預報系統轉移至新伺服器。轉移後的預報系統可以在 40 分鐘內完成 72 小時預報並完成上傳資料，且系統效能較前版本提升 44.3%。</p> <p>3. 研究團隊分析了近 40 年颱風事件中潮汐與氣象場對水位的影響，並發現潮汐與暴潮交互作用的非線性強度與潮差大小並非呈現簡單的正相關關係。非線性效應在淺水區域(如離島地區)或複雜地形區域表現得更為顯著，顯示這兩點可能為決定當地非線性效應強度的關鍵因素。若忽略非線性交互作用，暴潮預報可能產生至少 15% 的系統性誤差，歷史事件中大多數測站的非線性效應在正負 50% 之間波動。</p>
114	<p>1. 建置現實參數化 (Realistic Parameterization, REP) 模式資料庫</p> <p>2. 建置暴潮預報即時校</p>	-

	驗模式	
115	3. 發展機器學習精進 REP 預報模式	-

備註：

- 1.年度：請依計畫書期程撰寫，須填寫全程，第一年度請置於最上。單年計畫僅填寫該年度即可。
- 2.目標：請依計畫書規劃撰寫，質量化皆可。
- 3.達成情形請依目標簡要說明進展或重要成果，未來年度可填「-」。若有未達成、未完全達成或其他需要說明或圖示之處，請於下方填寫。

說明：

## 二、架構 (系統產出，不另行填寫)

細部計畫		主持人	執行機關	計畫目標	本年度效益、影響、重大突破
名稱	預算數/ (決算數) (千元)				
範例細部計畫 A					<p>本研究計畫在本年度取得了多項顯著的效益與突破。</p> <p>在學術方面，研究團隊完成了對近40年颱風資料的系統性分析，更首次量化了台灣沿海潮位站於颱風歷史事件中暴潮與潮汐間的非線性交互作用強度。研究發現非線性效應與潮差大小並非呈現簡單的正相關關係，並證實了淺水區域和複雜地形是影響非線性效應強度的關鍵因素，這些發現為後續發展暴潮預報模式提供重要的理論基礎。</p> <p>在技術層面上，本計畫完成了預報系統的重大改進。研究團隊成功將原本在叢集運算平台上的暴潮預報系統移植至指定伺服器，並透過優化將預報時效提升了44.3%，大幅提升了預報效率。此外，團隊還開發了改良的資料上傳排程機制，使預報員能更快取得關鍵預報資訊，優化了整體預報作業流程。</p>

					<p>本計畫的研究成果對防災工作產生了深遠影響。研究發現若忽略暴潮與潮汐非線性作用效應，將可能導致未來的 REP 預報模式存在 15% 的系統性誤差，這促使未來預報修正機制的改進，並將推動後續針對不同區域的差異化預報策略的建立。特別是對於離島和複雜地形區域，研究結果提供了更精確的風險評估基礎，有助於防災資源的優化配置。</p> <p>在研究突破方面，本研究成功識別出影響暴潮預報準確度的關鍵因素。除了發現非線性效應與潮差的複雜關係外，研究也確認了台灣沿海地形特徵和水深分布對潮汐-暴潮非線性效應的重要影響。這些認知突破將協助改良了未來預報模式的預報誤差及預報產品展示方式，也為未來的研究方向提供了重要指引。</p>
--	--	--	--	--	--

### 三、細部計畫與執行摘要

本段落資料由系統自動帶入，部分項目請依執行進度更新，完整執行內容請以附件上傳方式提供。

細部計畫 1		計畫性質	
主持人		執行機關	
<b>計畫規劃內容</b>			
計畫目標			
重點描述			
預期成果			
<b>計畫投入</b>			
預算數(千元) / 決算數(千元) / 執行率		總人力(人年) 實際 / (規劃)	
其他資源投入			
<b>主要工作項目</b>	<b>本年度重要成果</b>	<b>主要成果使用者/服務對象/合作對象</b>	
	<p>請以條列方式填寫重要成果，質量化的產出與效益、重大突破皆可，並請依是否屬於預期成果，分類說明</p> <p>■ 預期成果部分</p> <p>1. 建立颱風資料庫並分析颱風特性： 研究團隊成功收集並分析近 40 年的颱風資料，包括 ECMWF ERA5 再分析資料、颱風資料庫最佳路徑資</p>	<p>請依實際發生撰寫(勿寫預期，除非非常確定)，若有特定對象，如媒合成功廠商、補助廠商等，請挑具代表性者列出名稱；若無特定對象，請以群體方式描述，例如設計界、一般消費者等</p> <p><b>使用者：本署海象氣候組及預報中心</b></p>	

料，TWRP (Typhoon WRF) 模式重新模擬了 1990-2021 年間有發布警報的颱風案例。研究中整理揭示了影響台灣的颱風路徑和強度特徵。分析結果顯示，颱風主要從西北太平洋向西北方向移動，在台灣東南部海域路徑較為密集。大多數颱風的近中心最大風速在 20 至 50 公尺/秒之間，中心氣壓在 980 至 1000 百帕之間，七級風半徑在 100 至 300 公里之間。TWRP 模型還揭示了七級風半徑的特殊分佈特徵，以及颱風強度與七級風半徑之間的負相關關係。

#### 2. 多源資料比較分析：

研究團隊比較了 ECMWF ERA5、颱風資料庫和 TWRP 模式三種資料來源的特點和優缺點。比較結果顯示，ECMWF ERA5 具有最大的覆蓋範圍，TWRP 模式資料具有最高的資料密度，而在颱風強度參數方面，TWRP 模式資料與颱風資料庫最為接近。

#### 3. 暴潮預報系統時效精進：

研究團隊成功將原作業於叢集電腦平台的 Python 版本暴潮預報系統轉移至新伺服器。轉移後的預報系統可以在 40 分鐘內完成 72 小時預報並完成上傳資料，且系統效能較前版本提升 44.3%。

#### 4. 潮汐-暴潮非線性效應分析：

研究團隊分析了近 40 年颱風事件中潮汐與氣象場對水位的影響，並發現潮汐與暴潮交互作用的非線性強度與潮差大小並非呈現簡單的正相關關係。非線性效應

	<p>在淺水區域(如離島地區)或複雜地形區域表現得更為顯著，顯示這兩點可能為決定當地非線性效應強度的關鍵因素。若忽略非線性交互作用，暴潮預報可能產生至少 15%的系統性誤差，歷史事件中大多數測站的非線性效應在正負 50%之間波動。</p> <p>■ 非預期成果部分</p> <p>無</p>	

**本年度效益、影響、重大突破**

本研究計畫在本年度取得了多項顯著的效益與突破。在學術方面，研究團隊完成了對近 40 年颱風資料的系統性分析，更首次量化了台灣沿海潮位站於颱風歷史事件中暴潮與潮汐間的非線性交互作用強度。研究發現非線性效應與潮差大小並非呈現簡單的正相關關係，並證實了淺水區域和複雜地形是影響非線性效應強度的關鍵因素，這些發現為後續發展暴潮預報模式提供重要的理論基礎。

在技術層面上，本計畫完成了預報系統的重大改進。研究團隊成功將原本在叢集運算平台上的暴潮預報系統移植至指定伺服器，並透過優化將預報時效提升了 44.3%，大幅提升了預報效率。此外，團隊還開發了改良的資料上傳排程機制，使預報員能更快取得關鍵預報資訊，優化了整體預報作業流程。

本計畫的研究成果對防災工作產生了深遠影響。研究發現若忽略暴潮與潮汐非線性作用效應，將可能導致未來的 REP 預報模式存在 15%的系統性誤差，這促使未來預報修正機制的改進，並將推動後續針對不同區域的差異化預報策略的建立。特別是對於離島和複雜地形區域，研究結果提供了更精確的風險評估基礎，有助於防災資源的優化配置。

在研究突破方面，本研究成功識別出影響暴潮預報準確度的關鍵因素。除了發現非線性效應與潮差的複雜關係外，研究也確認了台灣沿海地形特徵和水深分布對潮汐-暴潮非線性效應的重要影響。這些認知突破將協助改良了未來預報模式的預報誤差及預報產品展示方式，也為未來的研究方向提供了重要指引。

#### 遭遇困難與因應對策

執行計畫過程中所遭遇困難、執行落後或與原規劃不符之因應措施及建議，如無遭遇困難或落後情形者，請填寫「無」即可。

無。

## 第二部分

### 壹、成果之價值與貢獻度

#### 一、學術成就(科技基礎研究)

##### (一) 學術發表

###### 【B 國外期刊】

題名	作者	期刊名稱
Storm surge induced by Tropical Storm Pabuk (2019) and its impact by track variation scenarios on the Thailand coast	Tsai, Yu-Lin, Tso-Ren Wu, Eric Yen, Veerachai Tanpipat, Chuao-Yao Lin	Natural Hazards
A numerical study of plunging breakers in the nearshore area under the influence of wind	Truong, Nhat-Minh, Tso-Ren Wu*, Chia-Ren Chu, Chung-Yue Wang	Ocean Engineering

###### 【C 國內研討會】

題名	作者	研討會名稱
An Approach to Realistic Parameterization (REP) Model of Typhoon Pressure and Wind Fields Around Taiwan	Roguna, Satriana, Tso-Ren Wu	International Symposium on Grids & Clouds (ISGC) 2024
發展反映台灣週邊地形效應之全新風暴潮參數化模型	吳祚任、羅古納	2024 年海洋科學年會暨國科會海洋學門成果發表
利用現實參數模型提升台灣風暴潮預報準確度	吳祚任、羅古納、林君蔚	113 年天氣分析與預報研討會

###### 【D 國外研討會】

題名	作者	研討會名稱
An Approach to Realistic Parameterization (REP) Model of Typhoon Pressure and Wind Fields Around Taiwan	Wu, Tso-Ren and Satriana Roguna	OMAE2024

## 二、技術創新(科技技術創新)

本研究最重要的技術突破在於設計並開發創新的現實參數化(REP)暴潮預報模式。這個模式突破了傳統理想風場模式的限制，透過建立大型暴潮模式與二維大氣模式耦合的資料庫，將能描述受中央山脈所破壞的颱風結構對沿海水位造成的影響，並比傳統理想風場更準確地預測颱風暴潮。與大氣動力模式所驅動的暴潮預報模式不同，REP 模型的獨特之處在於它只需要基本的颱風預報路徑和強度資訊，就能生成考慮地形阻擋效應的暴潮水位預報結果。這項創新若發展完成，將有望大幅簡化了預報流程，同時提升了預報準確度。

在資料處理方面，研究團隊創新性地整合了三種不同來源的資料：ECMWF ERA5 再分析資料、TWRP 模式資料，以及中央氣象署颱風資料庫。透過比較分析發現，TWRP 模式資料在多個方面都與實際觀測最為接近，尤其是在捕捉颱風強度參數方面表現優異。這種多源資料的整合與分析方法，為未來颱風預報模型的發展提供了重要參考。

在系統效能方面，研究團隊成功將原本需要 62.8 分鐘的預報時間縮短至 35 分鐘，效能提升達 44.3%。這項改進是通過優化程式架構和改良預報系統核心程式執行順序實現的。團隊將串聯執行改為並聯執行，大幅減少了預報作業所需時間。同時，本研究計畫也優化了資料上傳排程，確保預報員能更快取得關鍵預報資訊。

在預報系統架構方面，受惠於研究團隊採用開源的 Python 程式語言重新撰寫暴潮預報系統，取代原有的商業軟體 Matlab 版本，這項改變不僅降低了系統維護成本，更提高了系統的可移植性和擴展性。新系統可以靈活地在不同作業平台間轉移，且能更容易地整合社群開發的新功能，這為未來系統的持續改進創造了有利條件。

在非線性效應研究方面，團隊首次系統性地量化了台灣周邊海域颱風暴潮與潮汐間的非線性交互作用。研究發現非線性效應的強度與潮差大小並非呈現簡單的正相關關係，這個發現推翻了過去的傳統認知。研究結果顯示，目前所收集之近 40 年間的颱風歷史事件中，大多數測站的暴潮—潮汐非線性效應強度在正負 50%之間波動，平均值在正負 15%之間，這種精確的量化為未來預報系統的改進提供了重要依據。

這些技術創新不僅提升了預報系統的性能，更為未來颱風暴潮預報的發展開創了新方向。研究成果展現了如何透過創新的資料處理方法和系統架構，來解決複雜的暴潮預報問題。

### 三、經濟效益(經濟產業促進)

本研究開發的現實參數化模型(REP)及其相關技術突破，預期將為台灣帶來顯著的經濟效益，主要體現在減災、產業保護及資源優化三個層面。

首先，在減災效益方面，研究成果已經成功量化發展中之現實參數化模型(REP)暴潮預報模式可能產生的預報誤差。研究發現，若在建置模式時忽略潮汐與暴潮間的非線性交互作用，將可能產生至少 15%的系統性誤差，極端情況下甚至可達當地潮差的 100%。通過本研究於開發模式中所進行的研究與分析，這些誤差可以得到有效控制，並在未來發展預報產品時將該誤差來源一同納入展示供使用者參考，預期在提高預報效率的同時亦能有效降低因預報不準確所導致的經濟損失。

其次，在產業保護方面，更準確的暴潮預報系統能夠為沿海地區的各類產業提供更可靠的預警資訊。特別是對於漁業、航運、港口營運等高度依賴海況預報的產業，精確的暴潮預報能協助其提前做好防護措施，降低營運損失。研究中發現的非線性效應空間分布特徵，對於台灣西部沿海及離島地區的產業防護特別有幫助，因為這些地區往往出現較強的非線性效應，需要更精確的預報支援。

第三，在資源優化方面，本研究的成果有助於提升防災資源的配置效率。研究發現，不同路徑的颱風在不同區域產生的非線性效應強度各異，這種精細的分區預報能力有助於政府部門根據實際風險程度進行更有針對性的防災部署，避免資源的過度投入或配置不足。

以計算資源與效能經濟方面，預報系統在今年度研究計畫精進後，執行時間從 62.8 分鐘縮短至 35 分鐘的效能提升，也能降低運算資源的使用成本。更重要的是，本研究採用開源的 Python 程式語言重新撰寫預報系統，取代原有的商業軟體 Matlab 版本，這項改變直接降低了系統的維護成本。新系統不需支付高額的軟體授權費用，且具有較高的可移植性，可以更靈活地在不同作業平台間轉移，這些都能為暴潮預報作業帶來長期的成本節約效益。

最後，本研究的技術創新還可能催生新的商業應用。透過建立的颱風暴潮預報技術，可

以開發更多元的氣象資訊服務產品，特別是在氣候變遷加劇、極端天氣事件頻繁的背景下，精準的暴潮預報服務將具有更大的市場價值。

#### **四、社會影響(社會福祉提升、環境保護安全)**

在防災預警方面，本研究最重要的社會貢獻在於提升了台灣的暴潮預報能力，直接強化了沿海地區的防災韌性。本年度的研究成果中，改良後的預報系統不僅提升了預報時效，將預報時間從 62.8 分鐘縮短至 35 分鐘，這種效能的提升意味著民眾和防災單位能夠提前獲得精確的預警資訊，爭取寶貴的防災準備時間。

在社會安全網絡建構方面，研究發現的非線性效應空間分布特徵，為台灣的防災體系提供了重要的科學依據。研究結果顯示，不同路徑的颱風在不同區域產生的影響強度各異，這種精細的分區資訊能夠協助政府在未來颱風侵台期間建立更有效的分區防災機制。本研究建立的預報技術為台灣面對氣候變遷的挑戰提供了重要工具。在全球暖化和極端天氣事件頻發的背景下，精確的暴潮預報系統能夠協助社會適應和因應氣候變遷帶來的風險，提升整體社會的調適能力。

在環境保護層面，本研究對於沿海生態系統的保護具有重要意義。研究中發現的非線性效應特徵，特別是在淺水區域的強烈表現，提醒我們需要特別關注這些環境敏感區域的保護工作，而精確的預報系統能夠協助相關單位及早採取保護措施，降低極端天氣對生態環境的衝擊。

在知識傳播與教育方面，本研究的成果豐富了我們對於颱風暴潮的科學認知。研究首次系統性地量化了台灣周邊海域的非線性效應，這些發現不僅對學術界具有重要價值，更可以轉化為防災教育的教材，提升全民的防災意識和科學素養。研究成果可以協助民眾更加理解颱風暴潮的風險，進而採取更適當的防護措施。

#### **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)**

無

## 貳、檢討與展望

今年度研究團隊完成了建置 REP 暴潮預報模式資料庫的前置作業及相關分析工作。研究團隊成功收集並分析近 40 年的颱風資料，包括 ECMWF ERA5 再分析資料、颱風資料庫最佳路徑資料，TWRF (Typhoon WRF) 模式重新模擬了 1990-2021 年間有發布警報的颱風案例。研究中整理揭示了影響台灣的颱風路徑和強度特徵。分析結果顯示，颱風主要從西北太平洋向西北方向移動，在台灣東南部海域路徑較為密集。大多數颱風的近中心最大風速在 20 至 50 公尺/秒之間，中心氣壓在 980 至 1000 百帕之間，七級風半徑在 100 至 300 公里之間。TWRF 模型還揭示了七級風半徑的特殊分佈特徵，以及颱風強度與七級風半徑之間的負相關關係。在比較建置資料庫可用之氣象模式資料時，研究團隊比較了 ECMWF ERA5、颱風資料庫和 TWRF 模式三種資料來源的特點和優缺點。比較結果顯示，ECMWF ERA5 具有最大的覆蓋範圍，TWRF 模式資料具有最高的資料密度，而在颱風強度參數方面，TWRF 模式資料與颱風資料庫最為接近。

其次，研究成功完成了暴潮預報系統的效能提升。研究團隊成功將原作業於叢集電腦平台的 Python 版本暴潮預報系統轉移至新伺服器。轉移後的預報系統可以在 40 分鐘內完成 72 小時預報並完成上傳資料，且系統效能較前版本提升 44.3%。於精進效能的同時，團隊一併優化了資料上傳排程，使預報員能更快速地接收資料。

第三，本研究完成了台灣周邊海域颱風暴潮與潮汐非線性交互作用的分析。團隊分析了近 40 年颱風事件中潮汐與氣象場對水位的影響，並發現潮汐與暴潮交互作用的非線性強度與潮差大小並非呈現簡單的正相關關係。非線性效應在淺水區域(如離島地區)或複雜地形區域表現得更為顯著，顯示這兩點可能為決定當地非線性效應強度的關鍵因素。若忽略非線性交互作用，暴潮預報可能產生至少 15% 的系統性誤差，歷史事件中大多數測站的非線性效應在正負 50% 之間波動。此發現對於提升暴潮預報的準確度具有重要意義。

本研究在收集颱風資料時發現，不同來源的資料品質和完整度存在差異。特別是在使用 ECMWF ERA5 資料時，研究發現其傾向於低估颱風強度，這可能影響後續分析的準確性。未來在 REP 暴潮預報模式資料庫建置階段，應建立更嚴謹的資料品質控制機制，確保資料的可靠性。

在系統效能提升方面，雖然成功將預報時間縮短，但研究報告指出仍有改進空間。目前的系統在讀取氣象場及格式轉換方面仍有優化餘地。此外，預報系統的分段執行可能性評估結果顯示，改動現有核心模式主要架構所需付出的時間成本與可能獲得的效益不成比例，這提醒我們未來系統改進需要更審慎的成本效益評估。

現實參數化（REP）暴潮預報模式的開發是本計畫工作的核心，因此於 114 年度計畫中，研究團隊計劃透過建立大型暴潮模式與二維大氣模式耦合的資料庫，發展出能夠反映地形阻擋效應的暴潮速算系統，將特別關注如何在維持預報時效的前提下，提升暴潮水位預報的準確性。這項工作將依據第一年度收集之大氣模式資料執行暴潮模擬，並輸出對應氣象場時間之水位資料作為建置暴潮預報模式資料庫的基礎。於模式開發完成後，團隊將進行案例校驗，比較 REP 模式與理想風場模式的表現，並確認其與大氣模式資料的一致性。

另一項重要工作是建置暴潮預報即時校驗模式。研究團隊將著重於開發能夠結合即時觀測資料的校驗機制，並優化預報系統的產品輸出結構。這包括調整預報系統產品輸出結構、系統界接海象氣候組觀測科即時資料庫，以及預報產品的新增和調整。這些改進將使預報系統更能符合作業單位的即時校驗需求。

## 參、其他補充資料

### 一、跨部會協調或與相關計畫之配合

計畫業務屬性可獨立執行。

## 附表、佐證資料表

(請選擇合適之佐證資料表填寫，超過 1 筆請自行插入列繼續填寫，未使用之指標資料表請刪除。)

### 【A 論文表】

題 名	第一作者	發表年(西元年)	文獻類別	成果歸屬
<b>An Approach to Realistic Parameterization (REP) Model of Typhoon Pressure and Wind Fields Around Taiwan</b>	Satriana Roguna	2024	E	以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度 (1/3)
發展反映台灣週邊地形效應之全新風暴潮參數化模型	吳祚任	2024	E	以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度 (1/3)
<b>An Approach to Realistic Parameterization (REP) Model of Typhoon Pressure and Wind Fields Around Taiwan</b>	Tso-Ren Wu	2024	F	以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度 (1/3)
利用現實參數模型提升台灣暴潮預報準確度	吳祚任	2024	E	以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度 (1/3)
<b>A numerical study of plunging breakers in the nearshore area under the influence of wind</b>	Nhat-Minh Truong	2024	D	以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)
<b>Storm surge induced by Tropical Storm Pabuk (2019) and its impact by track variation scenarios on the Thailand coast</b>	Yu-Lin Tsai,	2024	D	以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度 (1/3)

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；成果歸屬請填細部計畫名稱。

**【C 培育及延攬人才表】**

姓名	機構名稱	學歷	性質	成果歸屬
林君蔚	國立中央大學	A	B	以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)

註：學歷分成 A 博士(含博士生)、B 碩士(含碩士生)、C 學士(含大學生)；性質分成 B 學程通過、C 培訓課程通過、D 國際學生/學者交換、E 延攬人才；成果歸屬請填細部計畫名稱。

**【D1 研究報告表】**

報告名稱	作者姓名	出版年(西元年)	是否被採納	成果歸屬
以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)成果報告	吳祚任與林君蔚	2024	D	以 Realistic 與 AI 分析提昇風暴潮模式準確度(1/3)

註：是否被採納分成 A 院級採納、B 部會署級採納、C 單位內採納、D 存參；成果歸屬請填細部計畫名稱。