

洞燭機先—— 從天氣到短期氣候預測

經過全球科學家百餘年的努力，近年來終於出現突破天氣預報理論上限的新契機，這要感謝改變天氣預測思維的「氣候系統」概念。

■ 盧孟明

氣象災害何其多

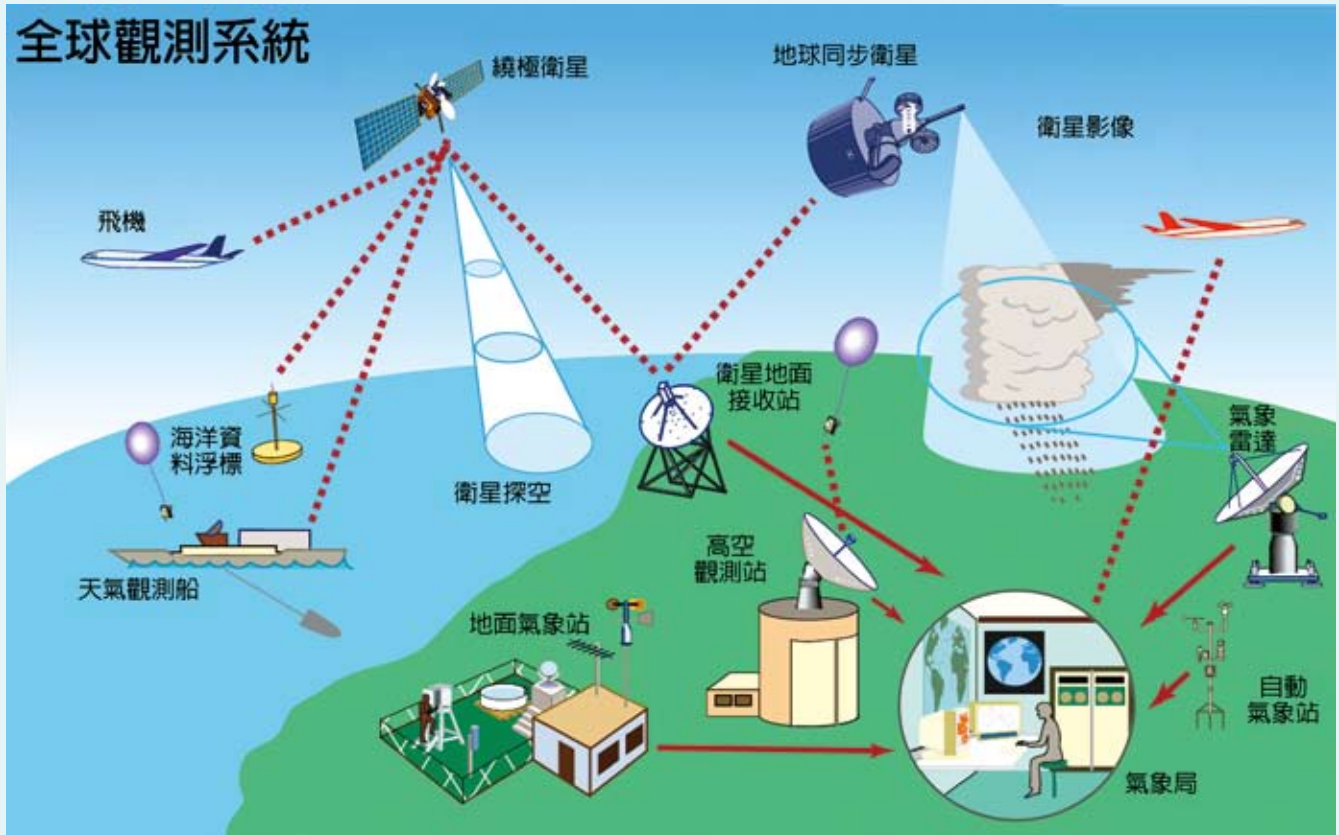
2009年1月，聯合國降低災難國際策略小組公布了2008年全年天然災害統計資料，死亡人數最多的前10大天然災害中，有9件是天氣或氣候因素引發的。2008年5月侵襲緬甸的那耳吉斯颱風排名第1，死亡人數高達138,366人，比排名第2的四川汶川大地震還多了五萬餘人。全球全年死於天然災害的總人數超過23萬人，受到影響的人數至少有2億，若不列入汶川地震，估計的經濟損失仍高於960億美元。

在2008年，台灣的天然災害也不少。2月出現罕見的寒害，在澎湖有1,660公噸養殖魚類死亡，海岸上的魚屍高達137公噸，7至9月有卡玫基、鳳凰及薔蜜颱風陸續侵台，造成新台幣34億元以上的農業損失，2009年的八八水災災情更是慘重。這些慘重的災情告訴我們，對於氣候的了解和氣候知識的運用，還有許多有待解決的問題，其中最重要的就是災害性天氣和氣候的預測。

就怕規律不規律

遠在春秋時代，中國人就已發明了一年8個節氣的曆法。現今仍使用的24節氣，也在兩漢時期就齊備了。簡單地說，24節氣就是地球繞日公轉軌道上的24個點，每個節氣有固定的陽曆日期，節氣的名稱分別是立春、雨水、驚蟄、春分、清明、穀雨、立夏、小滿、芒種、夏至、小暑、大暑、立秋、處暑、白露、秋分、寒露、霜降、立冬、小雪、大雪、冬至、小寒及大寒。從這些名稱可以看出，節氣不只是一種曆法，也透露出農業操作依賴著雨、暑、露、霜、雪等氣候因素的規律性。

對於氣候的了解和氣候知識的運用，還有許多等待解決的問題，其中最重要的就是災害性天氣和氣候的預測。



● 全球觀測系統包含了位於陸地上、海上、空中和大氣層以外的太空中的各種觀測設備。
(圖片來源：世界氣象組織全球觀測系統網頁<http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html>)

印度也是一個古老的農業大國，每年5月準時報到的印度夏季季風，為印度帶來豐沛的雨水，季風開始的早晚和強弱牽動著當年收成的豐裕或貧乏。1899年，印度出現一次大乾旱，農產歉收，那年又適逢英國殖民當局開始施行新改革的賦稅制度，增

加印資流轉的難度，最後造成異常嚴重的饑荒，社會動亂，民不聊生。

1903年，英國當局任命在劍橋大學任教的數學家吉爾伯特·沃克（Gilbert Walker）出任印度氣象局長，希望他帶動印度季風預測方法的發展。沃克上任後就

著手蒐集全球資料進行研究，一直到1924年他返回英國任教於帝國理工學院，從沒有中斷對季風預測的研究。

沃克發現印度季風強度和全球天氣形勢有某種關係，在他提交英國皇家氣象局的1928年研究報告中，提出了一個嶄新的

「南方振盪」指數（Southern Oscillation Index），也就是用位於南太平洋的大溪地和位於澳洲西北部之達爾文兩個測站的氣壓差，做為反映熱帶對流活動在東、西太平洋強弱變化的指標。大溪地氣壓偏高且達爾文氣壓偏低的年分，印度季

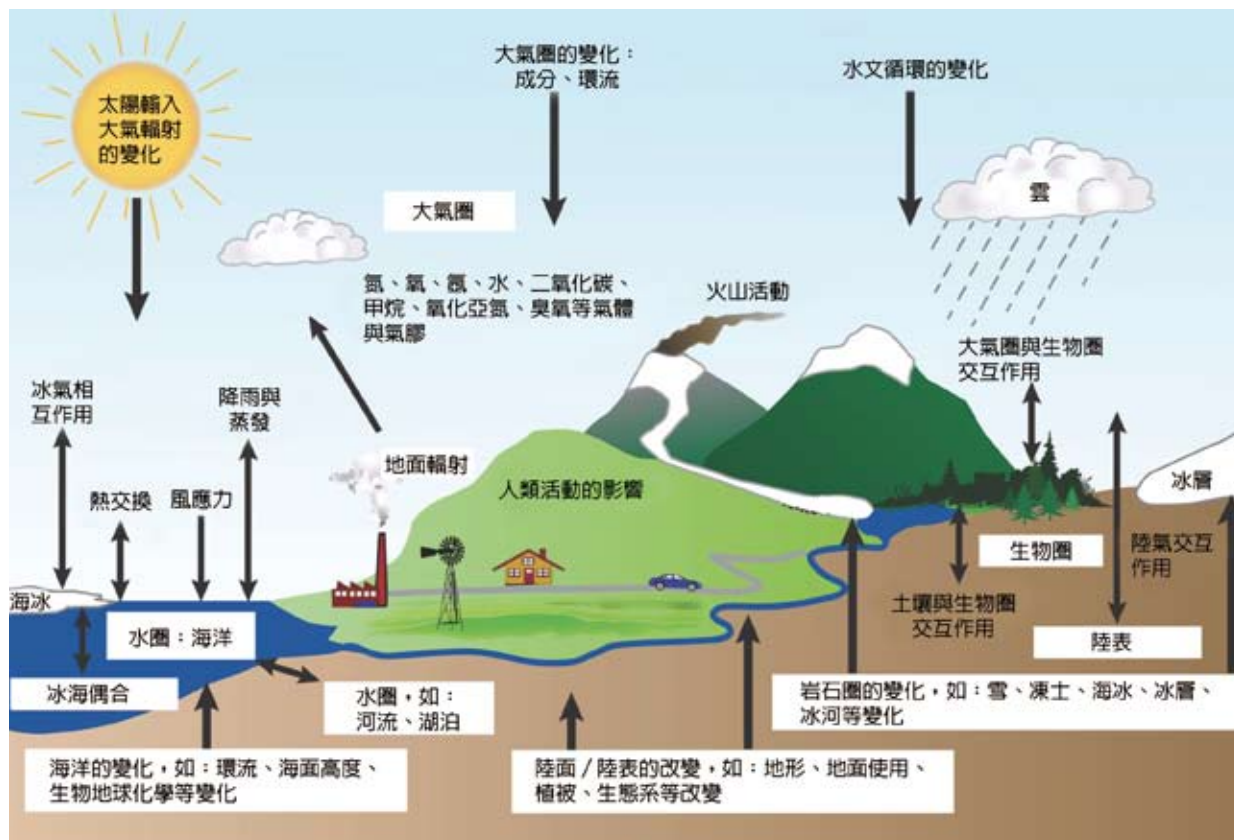
風比較強；反之則印度季風較弱。他還發現在弱季風的年分，不是只有印度有少雨的現象，澳洲、印尼、非洲撒哈拉沙漠都普遍地偏乾，加拿大還會出現暖冬。

雖然沃克的發現並沒有為他帶來預測的成功，但是「南

方振盪」以及印度季風和其他地區天氣形勢關係的研究，是氣候預測發展史上的重要里程碑。

天氣預報不簡單

在沃克鑽研印度季風預測的同時，氣象觀測和預測技



● 地球氣候系統及造成氣候變化的影響因子示意圖

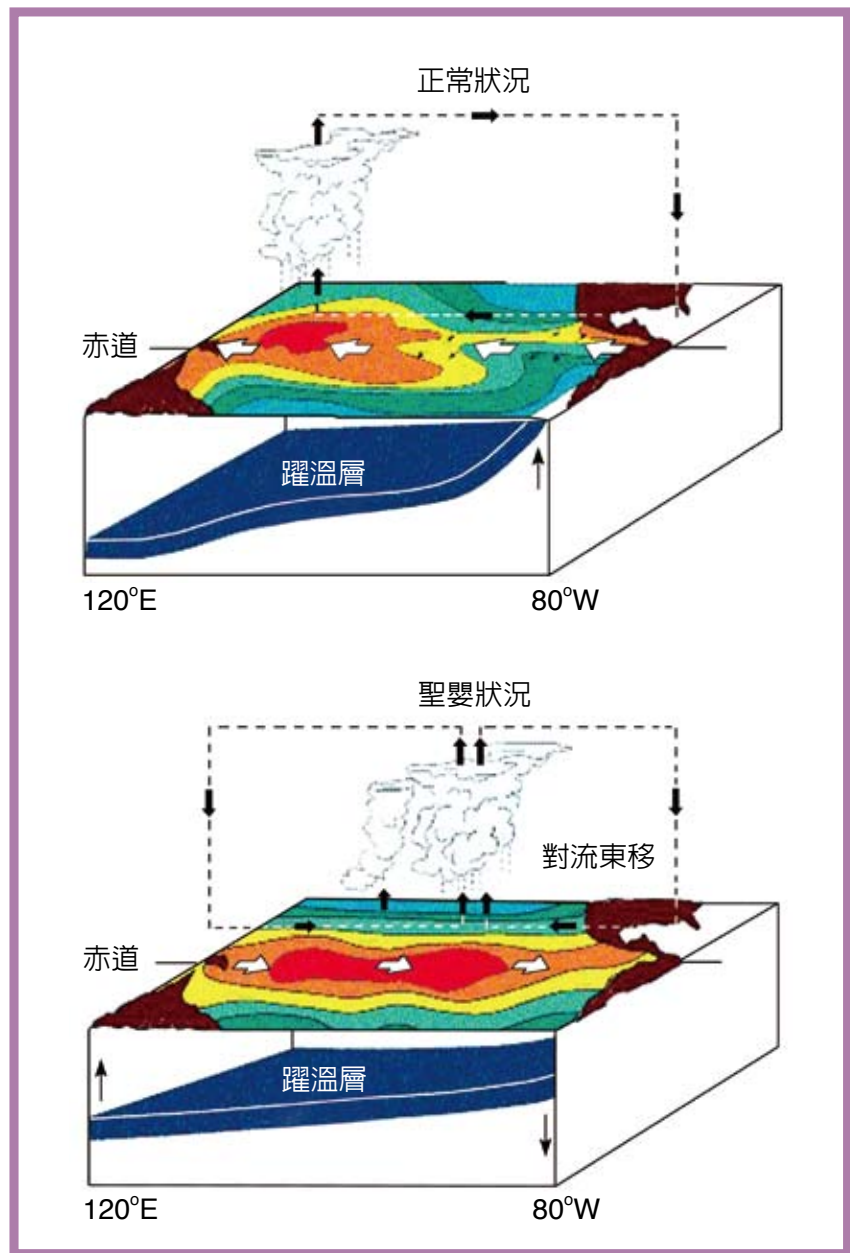
（圖片來源：政府間氣候變遷小組第1工作組第4次評估報告常見問題第1.2題圖1.2）

術正大步向前邁進。1896年，在德國科學家的發動下，德、法、俄等國同時進行了一次聯合高空探測氣球的觀測實驗，這是高空氣象觀測站網的第1個雛型。第二次世界大戰以前，氣象高空探測氣球是唯一可到達地面上30公里的探測工具。

在預測方面，英國科學家路易斯·理查森（Lewis Fry Richardson）開始嘗試用數值方法預測天氣，也就是根據流體的運動、熱力及狀態方程組，用觀測資料做為起始和邊界條件，通過數值計算求解未來的天氣。1922年，理查森進行了第1次對歐洲的6小時天氣預測，結果十分不理想。28年後，他的夢想才由一組美國研究團隊實現。他們利用適當簡化的方程組，成功地預測了24小時以後的天氣，證明數值天氣預測的可行。

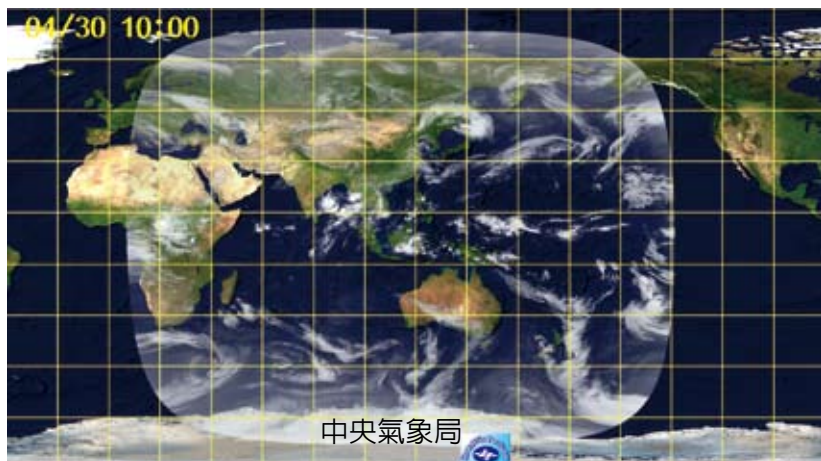
第二次世界大戰結束以後，出現人類歷史上的第3波工業革命，電腦、電信及太空技術突飛猛進，人類生活完全改觀，氣象的觀測和預測技術也進入了一個前所未有的新時代。

有感於全球觀測網對天氣

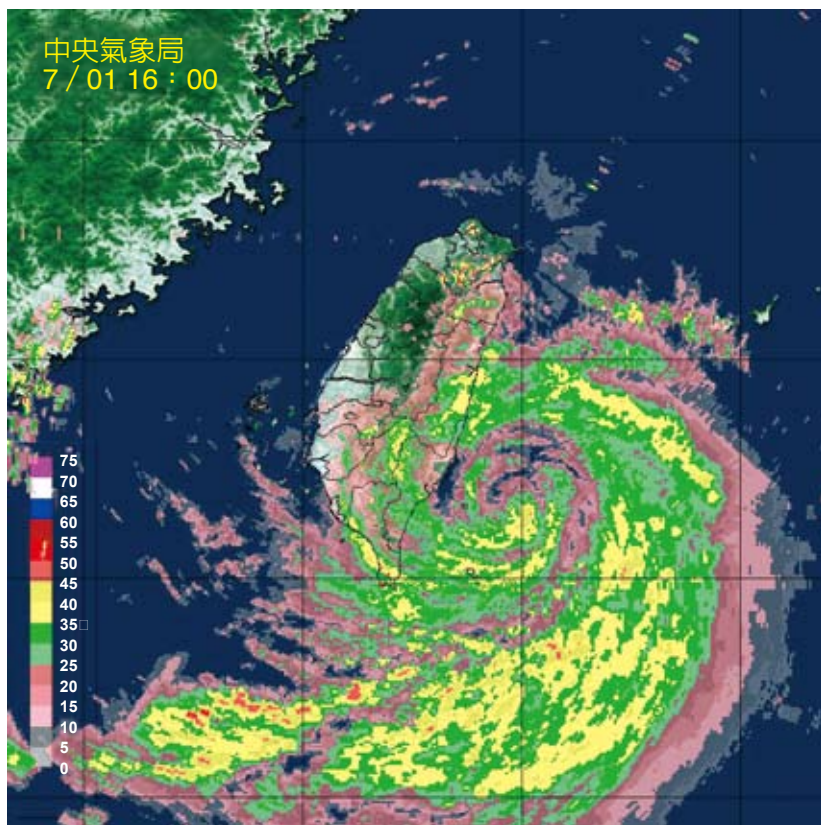


● 沃克環流—正常年vs聖嬰年（圖片來源：北一女地科站聖嬰與反聖嬰現象網頁 <http://earth.fg.tp.edu.tw/learn/elnino/enso.htm>）

從氣象預報業務特性的角度來看，10天以上和10天以內的預測做法確實不同，10天以上屬於氣候預測，和天氣預測有所區隔。



● 2008年4月30日的全球衛星雲圖

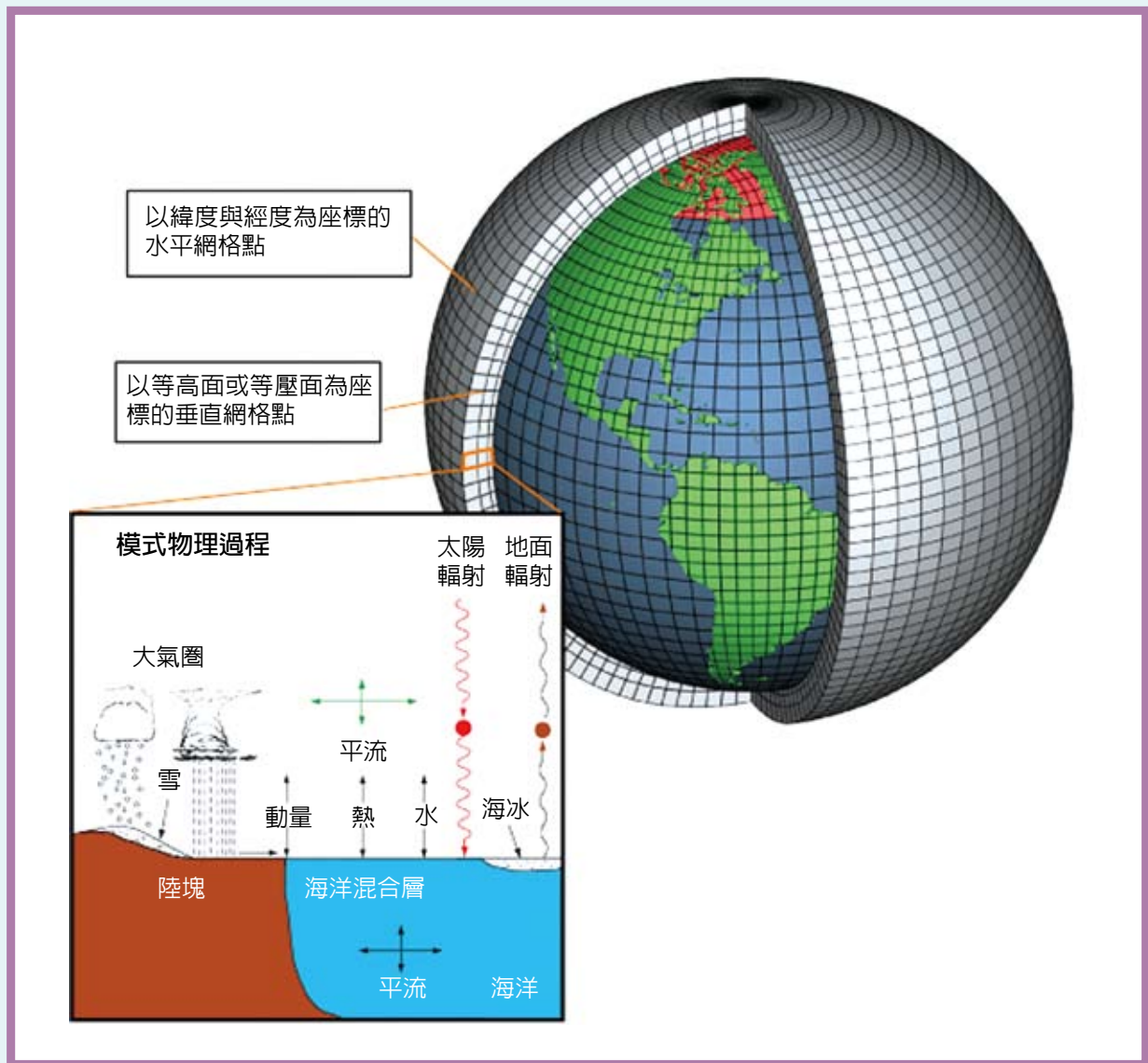


● 敏督利颱風的雷達回波圖

預測的重要，聯合國世界氣象組織決定以1957年為國際地球物理年，組織了67個國家建立氣象觀測網，蒐集全球同步觀測的資料。這一年恰巧是一個強聖嬰年，彷彿是上天送給科學家的一個大禮。以往人們以為聖嬰現象只是出現在南美附近的區域性現象，有了全球觀測資料以後，才赫然發現聖嬰現象完全不是小範圍的區域現象，而是從祕魯西岸向西延伸到中太平洋的大範圍都出現了異常溫暖的海水。

美國傑克博·畢雅克尼斯（Jacob Bjerknes）教授深深被這片廣大的異常溫暖的海水所震撼，驚覺到氣象研究不能不考慮海洋和大氣的交互影響。

他發掘出沉寂了將近40年的南方振盪指數，說明這是反映聖嬰現象的異常海溫影響大氣的結果。異常溫暖的海面加強了氣流的上升運動，旺盛的對流活動使位於赤道東太平洋的大溪地群島附近氣壓偏低。氣流上升到高空後必須向外擴散，向西最遠可發展到西太平洋、印尼和澳洲附近。然後，空氣便開始下降，造成位於澳洲的達爾文測站氣壓升高，使達爾文和大溪地之間的氣壓差加大。



- 預測氣候的數值模式是由描述流體基本物理、運動、化學特性等的基本方程式所構成。客觀數值預測必須把地球氣候系統在空間上用三維網格點表示，才能用基本方程式計算每一格點上如風、熱能、輻射能、溼度等氣候變量，並且以觀測資料做為氣候模擬或預測的初始條件，也可做為診斷與修正模式誤差的參考值，以期使模式運算結果儘量接近真實地球氣候系統的表現。
(圖片來源：美國大氣與海洋總署200周年紀念網頁http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/welcome.html)

要證明畢雅克尼斯的推論正確並不容易，這需要太平洋上的對流和風場觀測資料。然而在海上觀測並不像在陸地上那麼方

便，氣象人造衛星出現以後，海上氣象觀測資料才豐富起來。

1960年4月1日，美國成功地發射了歷史上第1顆氣象衛星泰

洛斯1號（TIROS-1）。雖然泰洛斯1號僅在軌道中運行了78天，但傳回22,500張影像，令科學家大為振奮。70年代後期，數值天

氣預測技術開始獲得成功，衛星資料功不可沒。

1979年，世界氣象組織藉全球大氣研究計畫的動員，進行了大規模的第1次全球性觀測實驗。這一次觀測實驗以及後續15年的研究工作，再加上計算、通訊及觀測能力不斷快速進步，使數值天氣預報技術發

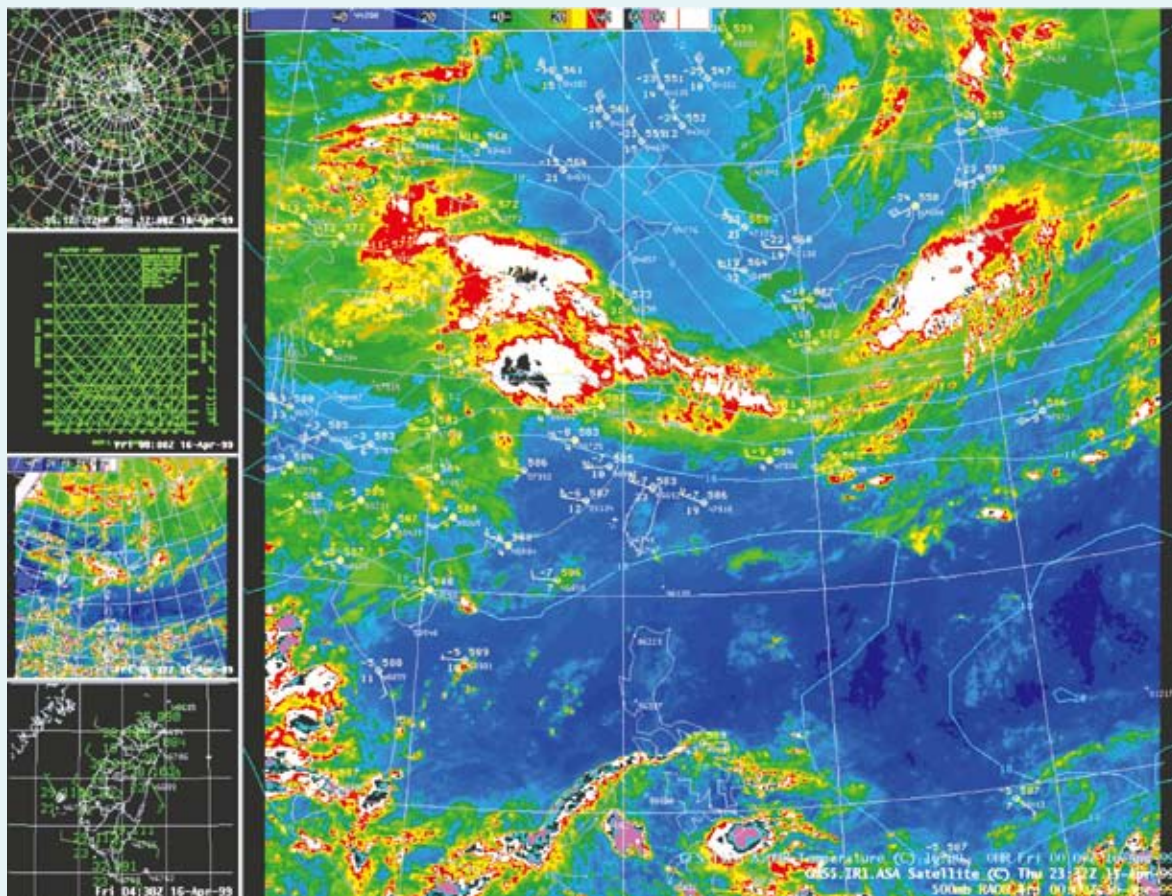
展茁壯以致成熟，大大提升了氣象預測的精度和準度。

挑戰預測的極限

天氣系統的可預測時間長度有沒有極限呢？美國氣象學家愛德華·勞倫茲（Edward Lorenz）在60年代回答了這個問題，指出天氣預報的上限大

約在10天左右。從氣象預報業務特性的角度來看，10天以上和10天以內的預測做法確實不同，10天以上屬於氣候預測，和天氣預測有所區隔。

在進一步說明之前，必須在定義上釐清天氣和氣候的差別。天氣是可實際感受到的氣象狀態，氣候是一段時間的天



● 觀測資料與天氣圖顯示畫面

雖然氣候是發生在大氣中的現象，但是氣候的特性和變化，除了受到大氣本身因素的影響之外，也會被大氣以外的因素控制。

氣統計狀態。人們出門要穿什麼衣服由天氣決定，但是冬季和夏季分別要預備什麼衣服，則由當地氣候決定。每天媒體的氣象報導提到的高壓、低壓、鋒面、午後雷陣雨等都屬於天氣系統，它們帶來的影響表現在每天的氣溫、雨量、強風、閃電、雷暴、濃霧上。媒體報導的暖冬、冷冬、乾旱、多颱、空梅等現象，則屬於氣候分類的範疇，因為它們指的是一段時間內天氣出現的特別傾向。

氣候的另一個分類，是依一個地方的長時間平均氣象狀態來分，如溫帶氣候、熱帶氣候、沙漠氣候等，這是最慣用的一種區分不同區域氣候特性的分法。這個分類和前述的幾種分類在時間的意義上差別很大，若稱後者為長期氣候，前者就是短期氣候。相對於短期氣候而言，長期氣候可視為不變。「短期氣候」變化較快，和社會經濟與天然災害的關係也比較直接，是氣象服務的一個重點項目。

氣候系統新概念

短期氣候變化開始受到國際間的廣泛重視，和1972～1973年的氣候異常有關。1972～1973年是一個聖嬰年，美國冬季異常

寒冷，雨量稀少，但是在冬季之前，美國卻飽受熱浪侵襲。蘇聯也出現罕見的乾旱，農產的歉收迫使蘇聯向外收購糧食，全球籠罩在糧荒的陰影中。同期，祕魯漁獲量銳減。在各種經濟和政治因素的交互影響下，爆發了第1次能源危機（1973～1974年）和第4次中東戰爭。

1974年，日裔美籍科學家真鍋淑郎（Syukuro Manabe）在斯德哥爾摩舉行的第1次國際氣候學術研討會上，發表了普林斯頓大學氣候數值模式的模擬結果，動力氣候研究領域儼然成形。同年，世界氣象組織和國際科學理事會提出「氣候系統」概念。也就是說，雖然氣候是發生在大氣中的現象，但是氣候的特性和變化，除了受到大氣本身因素的影響之外，也會被大氣以外的因素控制，因此氣候系統不能只考慮大氣卻忽略其他的部分。「氣候系統」的概念在1979年的第1次世界氣候大會上正式確定。

「氣候系統」是由大氣圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈5大部分構成。「氣候系統」概念徹底改變了氣候研究的內涵。過去氣候研究偏向於靜態、片面的氣候資料的蒐集和分析，1979年之後的氣候研究，則漸漸轉為



● 海象觀測浮標

用「系統」和數值模擬的架構，探討動態氣候的控制因素。

「氣候系統」的提出也改變了天氣預測的觀念。「短期氣候預測」是指預測10天以後、2年以內天氣要素的統計特徵。回想沃克爵士當年苦苦蒐集地面測站資料，研究印度季風強弱變化的規律，希望在一年或半年之前預測印度季風雨量會偏多或偏少。這種偏多或偏少的趨勢就是降雨的一種統計特徵，和天氣預測以



● 花蓮氣象站觀測坪

預測特定日期、地點的雨量為目標，有非常不同的意義。經過了將近90年，印度季風雨量多寡仍然在挑戰全世界氣候預測專家的智慧，但是現在的預報工具和沃克爵士當年相比，豈止是天壤之別。

以英國氣象局的預報工具為例，是按照「氣候系統」概念設計的季節預報數值模式，雖然簡化了許多，但仍有「氣候系統」五大圈的架構。以大氣圈而言，它的水平格點解析度是40公里，從海平面往上30公里區隔成50層。每一次模式開始預測之前，必須先輸入的觀測資料約有11萬8千筆之多，

模式的複雜程度大概是沃克當年無法想像的。

預測氣候看短期

短期氣候預測的信心，來自於科學家對聖嬰現象的了解和預測的成功。歷史上第1次對聖嬰現象的成功預測是在1986年初發表的，美國哥倫比亞大學的馬克·凱恩（Mark Cane）和史蒂夫·茲比亞克（Steve Zebiak）利用一簡化的大氣海洋耦合模式，在6個月以前預測到在1986年下半年出現的聖嬰現象，可謂是利用數值模式預測短期氣候變異的濫觴。

氣候系統中任何一個部分

的變化都會影響到大氣圈，聖嬰現象的海溫異常自然會造成氣候的變化。根據海溫的變化和變化過程來預測天氣系統的統計特徵，是短期氣候預測的精神。

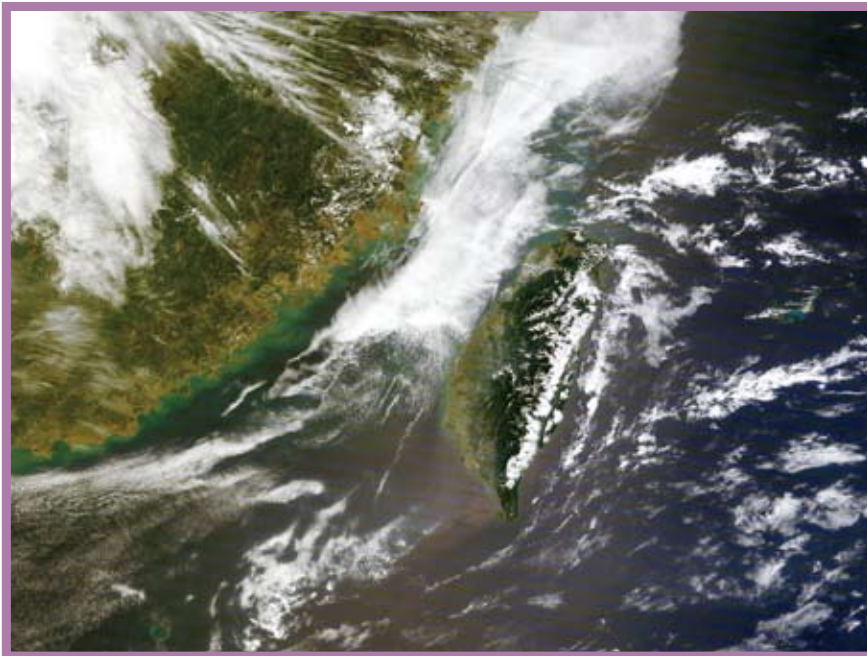
海洋的熱容量比大氣大，能夠吸收大部分到達海洋表面的太陽輻射。海水的密度也比較大，運動緩慢。大氣的天氣系統變動較快、記憶短，海洋的變動較慢、記憶長。一個對海洋有影響的天氣系統，維持了幾天以後就會完全改變，也就是說，過了幾天，大氣會完全忘記先前發生的天氣。但先前天氣對海洋的影響，卻有可

「氣候系統」的概念正領導科學往前，突破數值天氣預測的緊箍咒。

能還在海洋中持續作用，表示海洋對過去的天氣忘得比較慢。

因此，先前天氣系統對往後天氣系統的影響可透過海洋傳遞，海洋的這種「記憶」是突破勞倫茲天氣預報理論上限的憑據，勞倫茲過去的研究並沒有考慮這個層面。勞倫茲指出的預測上限，是根據初始條件對大氣圈求解的上限，「短期氣候預測」的預測則依賴大氣圈以外控制條件的加持。前者的預測對象是特定時間、地點的天氣事件，後者的預測對象則是受到控制條件影響的地點，在被影響的時間和事件上，可能出現的天氣統計特性的變化。

台灣現代化氣象預測技術的發展始於1983年，交通部中央氣象局開始建立數值天氣預報系統，1988年正式作業提供預報指引。在2002年，中央氣象局開始發展短期氣候預報，從2009年起，每月提供未來兩季的全球與台灣氣溫和雨量變異預測趨勢。這個短期氣候預測系統雖然符合「氣候系統」的概念，但是水圈是採取相當簡化的方式處理，並沒有完整的海洋數值模式。建立



● 2009年4月11日的台灣衛星照片

海氣耦合氣候數值預測模式，也就是有較完整的大氣圈和水圈的模式，是接下來的發展方向。

「氣候系統」的概念正領導科學往前，突破數值天氣預測的緊箍咒。今天我們對相當準確的24小時天氣預測已習以為常，豈知它得來不易，這條進步的路是由多少智慧和資源前仆後繼鏗而不捨地投入才鋪陳出來的。不可諱言，因缺乏觀測資料，所以現今科學界對「氣候系統」的了

解，其實還停留在相當混沌的模糊階段。缺乏觀測資料就不能對氣候系統的現況有把握，也失去了一個適當的、能預測未來的起點。「短期氣候預測」是一個新契機，它已激發了全球對觀測海洋的迫切需求，將帶動氣象預測科學繼續向前。

盧孟明

交通部中央氣象局