

颱風數值模擬之現況與挑戰—2009 年莫拉克颱風

吳俊傑¹ 黃清勇² 楊明仁² 簡芳菁³ 洪景山⁴ 顏自雄¹

¹ 國立台灣大學大氣科學系

² 國立中央大學大氣科學系

³ 國立台灣師範大學地球科學系

⁴ 中央氣象局

(中華民國九十九年五月六日收稿；中華民國九十九年七月十日定稿)

摘 要

過去 30 年來，隨著電腦計算速度與資源的進步，數值天氣預報呈現突飛猛進的發展，在颱風預報方面，透過資料同化及渦旋植入等技術，改進了模式初始分析場中的颱風結構，並配合大量非傳統（如衛星、飛機、雷達）觀測資料的運用，使得颱風路徑預報的準確度有大幅的進步。

然而，除移動路徑外，對於其他颱風相關預報，如強度、結構、降水等，在多種大氣尺度與物理因素的交錯影響下，仍具有一定的困難度。莫拉克颱風(2009)於侵台期間帶來將近 3000 公釐的豪雨，造成高屏地區的洪水氾濫以及土石流，導致超過 700 人的死亡，台灣南部居民之生命及財產損失十分慘重。莫拉克颱風降水預報低估的原因包括：模式無法確切掌握颱風移速，導致模擬颱風迅速通過台灣而造成預報的雨量不足、加上地形因素及廣大洋面上資料缺乏，造成環境流場的模擬與實際有很大差異等。

颱風數值預報的重點，包括路徑、強度與結構及降水和風雨分布等。颱風模式之選取則依研究目的而定，但不論是何種模式，颱風渦旋初始化及資料同化之發展都是非常重要的一環。此外，系集預報之發展、解析度之選取、改善模式的物理參數化方案、藉由不同模式之比較以改進現有之颱風模式、及進一步瞭解地形影響及海氣交互作用效應等，皆是值得繼續深入研究之重點議題。

關鍵字：颱風數值模擬、莫拉克颱風、渦旋初始化、資料同化、系集預報

一、前言

颱風是自然界最具破壞力的天氣系統，也是台灣最重要的災變天氣，而其所帶來的雨量亦是台灣地區最重要的水資源。以民國 98 年為例，春雨、梅雨及夏季午後對流系統均未為台灣帶來足夠的降水，全省水庫貯水量因而持續下降，使得政府相關單位與社會大眾開始擔心限水及農耕等經濟民生問題。但 8 月的莫拉克颱風一來，就為台灣帶來空前超大豪雨，雖然短暫解決各水庫缺水的問題，但超大雨勢卻造成嚴重土石坍方及土石流，也使台灣承受巨大天然災害的經濟損失及人員傷亡。想要將颱風對台灣的傷害減到最低，「颱風的預報」可以說是最根本的一環。預報所能掌握的颱風動態細節越多，越能使政府權責單位提供越有效的對策加以因應，而且對預報而言，所要求的準確性不僅僅是針對颱風的路徑，還需要清楚颱風的結構及其風雨分布，否則對於台灣的影響可謂失之毫釐、差之千里。例如：因預報失誤而多放一天颱風假，台灣的經濟生產損失可能高達數十億或數百億新台幣；但相反地，颱風來襲時若沒有適時放假或進行人員撤離疏散，所造成的傷害則將難以估算。

颱風降水模擬的正確性包含對颱風路徑、移速、颱風結構、地形作用及其與環境場（包括海洋）的交互作用等均須正確掌握。颱風降水過程的模擬包含許多非線性過程，因此降水量的模擬是個相當複雜的科學議題。數值模式必須具有相當高的解析度才能將地形及颱風結構合理掌握、另外準確分析的大尺度環境場、初始渦旋的合理強度與結構及正確的水文循環模擬或參數化方法都是模式準確模擬降水量的重要因子。其中颱風初始化過程對模式的路徑和定量降水預報能力均

有相當重要的影響。Wu (2001)研究葛拉絲颱風個案，發現台灣地形會影響葛拉絲颱風（1994）的移速，另外颱風初始化過程對颱風路徑、結構及颱風過山時所產生的許多中小尺度現象模擬都是相當重要的影響因子。另外根據氣象局的模式經驗，目前 WRF 模式（The Weather Research and Forecasting model）植入颱風後因為模式平衡問題而容易導致颱風路徑擺盪的現象，因此強化颱風初始化過程的研發，包括颱風重置技術、颱風渦旋植入技術與搭配資料同化流程設計適當的渦旋植入策略，都是改善模式颱風定量降水預報的重要關鍵。

二、颱風預報的問題

台灣地區地狹人稠，對於颱風是否侵襲非常敏感且脆弱。無論是颱風入侵或者是過度預警都會造成社會成本之損失。颱風預報的改進是台灣地區目前氣象科技發展最實際也是最大的挑戰之一。颱風預報技術的再提昇是必要的，但無法一蹴可幾，氣象研究專家與預報作業人員仍有一段漫長的路要走。

就學術觀點而言，颱風是地球物理流體力學在大自然界所展現的絕妙現象。颱風系統包括旋轉渦旋、位流、層化流體、濕對流、大氣與海洋之交互作用等。此涉及多重時間與空間尺度的物理過程，一直是全球大氣科學界深感興趣的研究題材。除了台灣之外，日本、美國、中國、澳洲、印度、菲律賓等國家亦常遭受颱風（或稱颶風、旋風）之侵襲，因此有關颱風之研究及預報改進也受到這許多國家特別重視。

由於颱風之生命期中，絕大部分時間皆於海面上渡過，在太平洋地區島嶼測站稀少，尤其是

在台灣之東—東南方數千公里以上之太平洋區域，幾乎無任何觀測站。即使當颱風位於台灣附近時，台灣本島陸地雖有地面與探空觀測資料，但測站密度仍嫌不足，而台灣周圍海域除氣象衛星和氣象雷達等遙測觀測資料外，則幾乎無任何其他傳統觀測資料。在資料極度缺乏下，導致颱風基礎研究和路徑預報的應用受到極大限制。與其它類別的氣象領域研究相比較，資料缺乏是影響颱風研究進步最大的障礙之一。

此外，對台灣來說地形對颱風的影響是個相當獨特、有趣而且重要的科學問題。因為台灣的陸地面積中有三分之二的範圍被中央山脈所涵蓋。中央山脈的平均高度約 3000 公尺，對颱風的路徑（包含移動速率和方向）、強度、結構與登陸後風雨分布的狀況產生明顯影響(Chang 1982; Bender et al. 1987; Yeh and Elsberry. 1993a、b)；但當颱風環流與地形接觸後，台灣特殊的島嶼地形（四面環海及小區域的陸地面積）又不足以使颱風立即消散，使得颱風受台灣地形影響的問題變得有趣而且複雜，不像美國或中國，颱風一登陸，陸地阻斷水汽供應，颱風通常很快就會消散。因此台灣地形作用對颱風路徑、強度變化等問題上而言，是個相當獨特的研究議題。

由過去研究可知熱帶氣旋能量主要來自海洋，但在早期的氣象數值模擬模式中，卻僅將海洋問題的處理視為一個邊界條件，而忽略大氣—海洋間之交互作用。目前已有許多氣象數值模式考慮大氣、海洋耦合的物理過程，進一步的研究結果發現大氣—海洋的交互作用過程，不論是對颱風或是海洋都扮演了重要角色，比如說颱風的快速增強，颱風環流所引起的海表溫冷卻，以及此冷卻對颱風發展的可能限制等，但此部份的完整了解仍有待深入研究。

人為颱風預報的主觀性，也是影響颱風預報成效的因素之一。颱風預報最後之發佈，需要主觀人為的判斷。通常預報人員會參考自己及其他預報中心先前所發佈的預報結果和不同模式所產生的最新預報結果，依其預報經驗做修正，以做出最後的颱風預報。這個主觀性足以影響颱風預報成果的優劣。

除了上述觀測資料缺乏、複雜地形、海氣交互作用及人為主觀等因素之外，颱風之學術原理不完整亦是造成颱風預報困難的原因之一。就大氣之學術研究而言，我們對於較大範圍的天氣現象已經有較充份的理論基礎及認知；但對於中小尺度的現象，例如颱風或局部地區豪雨，學術的基礎研究則顯得較為欠缺。以颱風路徑預報為例，我們知道颱風的移動主要是受大環境的流場所驅使，也就是大家所熟悉的太平洋高壓或大陸地區的局部高壓位置及強弱可以影響颱風移動的概念。但實際颱風的移動還受到其他複雜環境因素的影響，例如颱風與其周遭環境具有交互作用時，將造成其環境氣象場很大的改變，這個改變亦可回饋而影響颱風的移動。

由於上述各種原因的交錯影響，目前颱風預報的能力是有其侷限性。統計而言，目前世界各先進國家的二十四小時颱風中心位置平均預報誤差約為 100 公里。一個颱風預報中心對颱風預報的表現良窳，基本上取決於該中心長時期在眾多颱風預報的平均誤差大小及所有預報間的一致性和穩定性。但一般社會大眾對颱風預報良否的感覺，卻往往自然地僅受到某幾個颱風預報結果所影響。

目前颱風研究人員正在努力發展更經濟且更有效的颱風觀測技術以獲取更多寶貴的颱風資

料；颱風學術原理之研究也在進展之中；而颱風數值預報模式亦不斷地在改良。預期上述這些成果除了在颱風路徑預報將獲得可觀的改善之外，並可在關鍵的雨量及風速大小分布的預測得到長足的進步。以下即針對颱風數值模式的改進部份加以詳細介紹。

三、颱風模式的改進

使用數值模式來預測颱風具有許多優點，包括颱風模式可模擬颱風路徑、強度、結構、降雨等現象，並可透過各種敏感度測試及物理過程、參數化設定之改變，簡化颱風問題本質，而深入探討各物理機制。除此之外，以颱風模式進行即時(real time)預報亦為實際作業時人為預報之重要參考依據。

數值模擬之改進，除了模式本身之改進外，觀測資料的改善、系集預報系統的開發、模式解析度的增加，及颱風渦旋初始化技術等因子的改善都可提升模擬及預報的能力。以下即針對上述各種因子分別予以說明。

(一) 數值模式之改進

數值模式是颱風預報的重要工具，因此改進模式本身，對於增進預報能力是絕對相關的。模式改進應著力於改進數值模式的動力架構、物理過程與解析度，使模式更適合於颱風之模擬。

1. 模式之動力架構

流體的動力過程與其搭配之網格點計算配置、靜力及非靜力模式之選取及其優缺點之考量、熱力過程及海洋模式與颱風模式之耦合等皆為現今數值預報模式改進及評估的方向。

2. 模式中的物理參數化方案

由於至目前為止，對於輻射過程、雲微物理過程及地球表面邊界層的瞭解與觀測資料的取得相當有限，因而在數值模式中必須將它們分別以參數化的方式加以處理。而參數化過程不但會受到電腦計算資源之限制，模式之解析度亦會限制參數化方法之選取，因此如何在各種限制條件下，搭配出一個能夠完善表現預報能力的數值模式；或是深入探討颱風理論與進行觀測，瞭解更接近真實大氣狀態之物理過程以進一步而發展成更完備的模式，都可提升現今之預報水準。

3. 模式解析度

解析度之提高除對地形、地貌有較好之掌控外，亦可較有效率地使用適合的物理參數化過程，對於中小尺度現象之預報有實質的幫助，由於颱風問題包含各尺度之現象，因此應針對不同預報目的而選擇適當及實用之解析度，以達到最大效益。以 Wu et al. (2002) 為例，此研究在不同 MM5 (Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model) 模式解析度下模擬賀伯颱風(1996)，三組實驗結果顯示相似的路徑，但進一步比對 24 小時累積降水量(圖 1) 則發現，較低的模式解析度(20 公里; E20) 雖在西側產生較大的降水，但對降雨量卻有嚴重的低估；此外，由於解析度過粗，亦無法模擬出中尺度降水現象。另一方面，較高解析度的實驗(6.7 及 2.2 公里; E6.7 及 E2.2) 則表現較佳：均模擬出二個降水極大值區(圖 1c 及 1d)。一個極大值 771(955) mm (毫米) 位於北台灣，而另一極大值 826(1199) mm 則位於阿里山測站。另外，E6.7 實驗也在台灣南端南大武山山區產生一降水極大值區(838 mm)，此與觀測值(圖 1a) 接近。但在 E2.2 實驗中，在台灣南端南大武山之降水模擬則為過量(1286 mm)。另外此兩個實驗也掌握東部背風面少雨的現象。

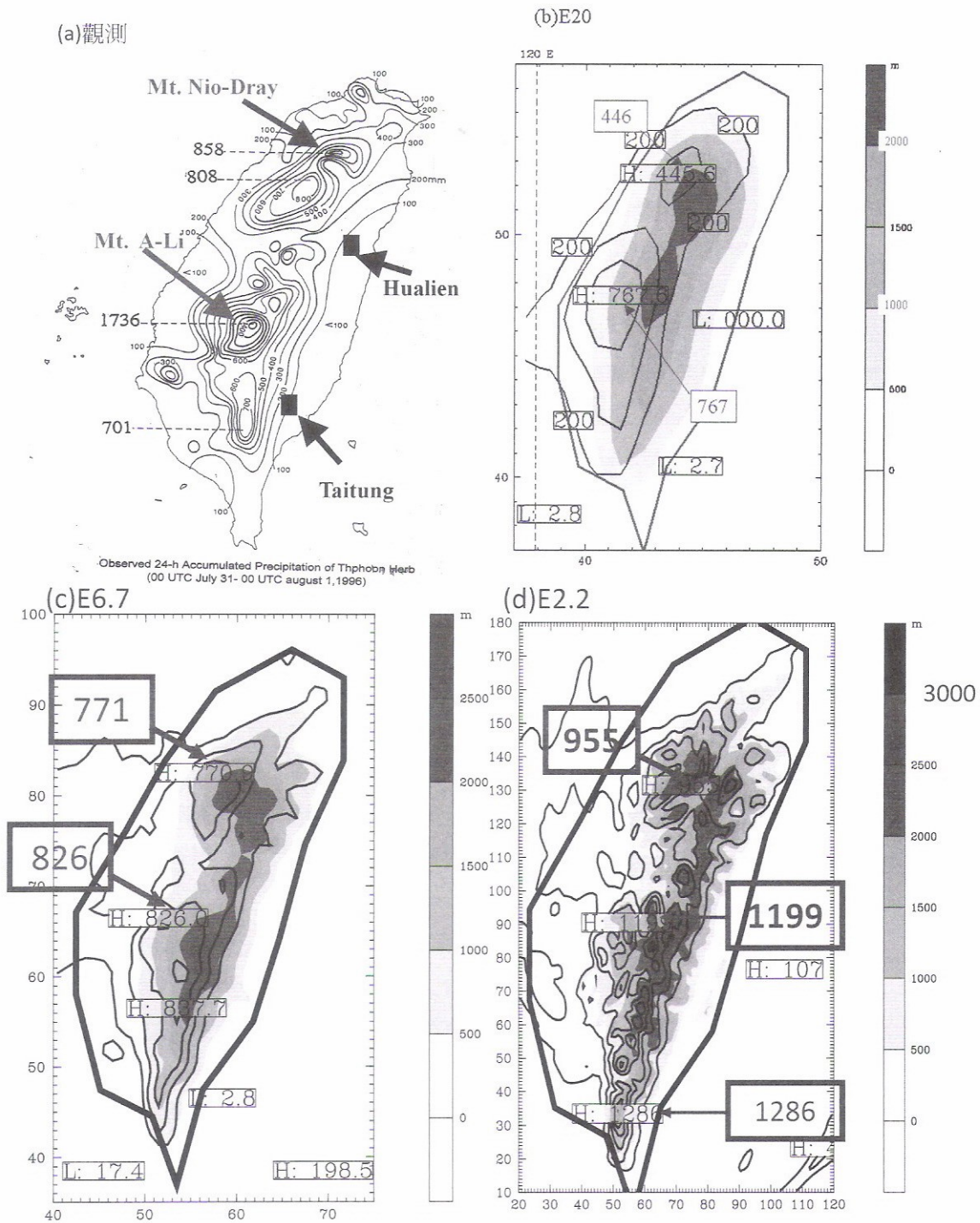


圖 1 不同水平解析度實驗：(a)觀測值（單位：mm；間距：100 mm）；(b) E20；(c) E6.7；(d) E2.2 模擬 24 小時（1996 年 7 月 31 日 0000 UTC 至 8 月 1 日 0000 UTC）累積降水量（等值線；單位：mm；間距：200 mm）與地形高度（陰影區；單位：m；間距：500m）。（摘自 Wu et al. 2002）

Wu et al. (2009a)進行芭比絲颱風(1998)在台灣所造成的秋颱伴隨強降雨數值研究時，亦針對模式解析度進行敏感度實驗。研究結果顯示，當模式解析度由 20 公里提高至 6.67 公里時，可模擬出與觀測更一致的降雨。

黃(2008)對柯羅莎颱風打轉運動的數值模擬研究，其結果顯示模式解析度對模擬柯羅莎登陸前打轉路徑之重要性；3 公里解析度的控制實驗掌握了柯羅莎登陸前顯著的南偏路徑，以及之後大幅度的北轉運動。但略微降低模式解析度，以 9 公里解析度進行模擬，其結果雖能掌握柯羅莎整體的運動情況，但是卻模擬不出登陸前顯著的南偏路徑。

由此可知，模式解析度對颱風降雨和路徑扮演關鍵的角色。而解析度多少才恰當，則需考量所需模擬現象之物理尺度與電腦運算效能間的平衡，並非所有模擬均需使用模式最精細解析度。

(二) 颱風初始化

颱風模式發展其中之一項關鍵即在於初始化問題的改善。雖然透過渦旋植入方法可有效改善初始資料中解析度不足及定位誤差的問題，但植入之渦旋的真實性則取決於觀測資料及渦旋植入法之限制及設定。因此如何利用各種衛星資料如 SSM/I (Special Sensor Microwave Imager)、外逸長波輻射 (outgoing long-wave radiation, OLR)、紅外線/可見光雲圖 (IR/VIS) 等資料經由初始化過程調整出一個合理結構的颱風環流，以及透過觀測結果了解渦旋之熱力、動力結構，改善模式植入渦旋之過程及方式，以增進所植入渦旋之真實性，對颱風路徑及強度之掌握是非常重要的。圖 2 為 Wu et al. (2002) 針對渦旋植入影響之探討，所切橫切面

為賀伯颱風中心 (北緯 21.2 度及東經 127.8 度) 之東西剖面。其中圖 2a,c 未經植入過程，直接以歐洲展期氣象預報中心 (ECMWF) 之 TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere; 2.5 度×2.5 度) 資料進行模擬所產生之颱風結構初始場 (包括位渦、水平風速、垂直速度及相對溼度場)。結果顯示未經初始化過程處理前之颱風模擬渦旋範圍較大且較弱，最強水平風速 (35 ms^{-1}) 位於 800 hPa 高度。而最大位渦值僅 3.4 PVU (位渦單位: $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) 位於 450 hPa 高度 (圖 2a)。而經過初始化過程處理後，由圖 2b 可見結構已完全改變，高位渦值集中於颱風渦旋中心 200 km 範圍內，其最大值 (26 PVU) 約位於 200 hPa 處，且最大切向風速位於 850 hPa 颱風眼牆東側，其值達到 65 ms^{-1} 。雖然在颱風中心並沒有明顯下沉運動，但圖 2d 垂直速度擾動場顯現出一不對稱之強上升氣流，如眼牆結構一般。在颱風中心西側區域，在 450 hPa 層其最大垂直上升速度可達 $202 \mu \text{ bs}^{-1}$ (約 2 ms^{-1})。圖 2d 的相對溼度分布也顯示眼牆區域均為相當潮溼之空氣，相對地在颱風中心則為較乾 (相對溼度值 60%) 之空氣。上述結果顯示初始化過程確能使模擬渦旋在進行模擬之初即更接近真實颱風渦旋特徵。

對任何一個颱風模式而言，初始資料場皆相當之敏感，因此如何求得一接近真實的初始資料場對於預報結果之改善是相當重要的。資料同化技術，常被用於進行颱風渦旋的初始化中，所謂資料同化系統，是結合一段指定時間內 (time window) 所有可得到的大氣狀態訊息，並得出分析時間 (analysis time) 對於真實大氣的最佳估計值。其中大氣狀態的訊息來源包括所有觀測資料、先前的預報結果 (用來當作背景值或初始猜測值)、個別誤差以及物理定律，而以此所得到的

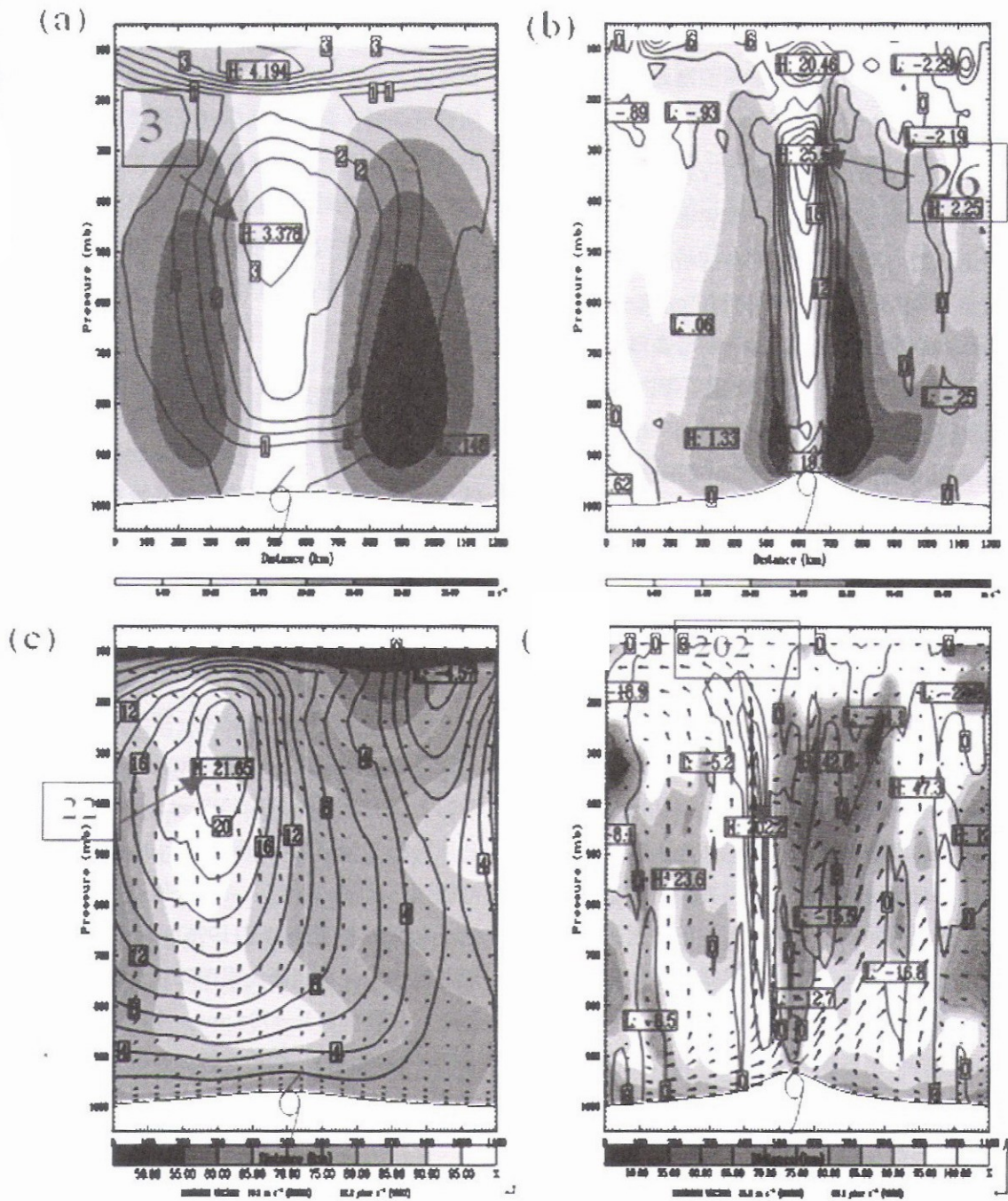


圖 2 初始化過程前後通過颱風中心（北緯 21.2 度，東經 127.8 度）東西剖面之颱風結構。(a)位渦（等值線；單位：PVU；間距：0.5 PVU）及水平風速（陰影區；單位： ms^{-1} ；間距： 5ms^{-1} ）；(c)垂直速度（等值線；單位： $\mu \text{b s}^{-1}$ ；間距： $2 \mu \text{b s}^{-1}$ ）及相對溼度場（陰影區；最小值：50%；間距：5%）。(b)、(d)同(a)、(c)但經初始化過程處理。颱風符號表示颱風中心位置。（摘自 Wu et al. 2002）

分析值可用來當作數值預報模式初始場。因此也就是當擁有較多的觀測資料後，便可利用資料同化系統透過觀測資料修正背景值進而獲得一較佳的模式初始場。

在 Wu and Kuo (1999)提及，若想增進對於颱風動力與颱風預報的掌控，需要進行適當的資料同化研究，將現有資料與高解析度數值模式加以整合。Wu et al. (2006)根據四維變分 (Four-Dimensional VARIational, 4D-VAR) 資料同化技術進行一系列的觀測系統模擬實驗，對於影響颱風初始化與模擬的主要變數有了更進一步的瞭解。而目前利用系集卡曼濾波器 (Ensemble Kalman Filter, EnKF) 進行颱風初始化的方法亦有新的進展 (Wu et al. 2009c)。此方法所產生之颱風初始渦旋具有與模式動力平衡之特性，同時充分使用觀測資料，預計將成為新一代颱風初始化的有效技術。

(三) 系集預報

在颱風研究問題上，預報之改進是最終的目的。而現今之颱風模式，因模式之架構及解析度不同而各有其優缺點且各具相異之不確定性，即便同一個模式而初始場有些微差異，預報結果也會有所不同。因而若就單一模式之預報輸出結果而言，並無法完全準確掌握颱風各種現象之預報。因此如何集各模式之長處，以增進預報成效且消除各模式中之不確定性，乃是發展系集預報之主因。但系集預報之發展則需選定一適當之初始資料場，以此才能有意義地探討各模式之優缺點及預報偏差現象，進而發展出有效的系集預報。

目前颱風預報作業單位系集預報方式可區分為兩大類。第一種方式以單一數值模式、單一初始場為主體，利用改變各種參數化方法的混合搭

配，組合出數十個預報輸出當作系集預報成員。此方法的主要目的，是盡可能將所有會影響數值積分的各類型因子都加以考慮，減少單一參數法組合的缺憾。各家數值模式開發之初都有其特定的目標任務，也就是各種數值模式對於某種天氣現象預報的表現各有其優缺點；另由於各作業預報模式初始場的處理不盡相同。因此，將所有數值預報模式積分輸出結果加以整合，此為第二類型的系集預報方法。

(四) 地形影響與海氣交互作用

颱風引發之中小尺度現象，通常和地形有關；台灣地形陡峭，各種天氣系統接近台灣時，容易受地形的影響而改變其結構與路徑，進而影響風雨分布，因此對於台灣地區來說，地形對颱風影響的研究是個不可忽視的重要議題。

台灣地形如何影響颱風路徑、強度及風雨分布一直是個重要的研究領域，特別是利用觀測分析與數值模擬探討此議題 (Wu and Kuo, 1999; Wu 2001)。圖 1d 與圖 1a 為 Wu et al. (2002) 採用 2.2 公里解析度 MM5 模式模擬 24 小時累積降水與實際觀測之比較。可看出 2.2 公里解析度的模擬相當成功地模擬賀伯颱風 (1996) 的降水分布，而且觀測值中 24 小時最大累積降水量發生於阿里山測站，其觀測值為 1736 mm，模擬之 24 小時降水量 (1199 mm) 約達到觀測最大累積降水量的 70%。

地形的存在不僅影響颱風，也會影響綜觀尺度的天氣系統，進一步造成地形、颱風及綜觀天氣系統之間複雜的交互作用，例如一般熟知的“共伴效應”。Wu et al. (2009a) 以 MM5 針對 1998 年芭比絲颱風所帶來的降雨進行數值研究，研究結果發現芭比絲颱風所造成的兩種降雨

類型：(1)季風類型，(2)地形類型。季風類型的降雨集中在東北部，分析結果顯示此降雨是因為颱風外圍環流與東北季風輻合所造成的，此即為所謂的“共伴效應”；地形類型的降雨則集中在中央山脈東側，為颱風環流受中央山脈舉升所造成。另外值得注意的是，地形不只在地形類型所造成的降雨扮演重要的角色，在季風類型時的影響也不可忽略。移除地形的模擬實驗顯示，當台灣地形不存在時，季風類型和地形類型的降水都顯著減少。進一步的分析則顯示，地形不只提供舉升機制，在季風類型中對颱風外圍環流和東北季風所形成的輻合位置也扮演重要的角色。類似的情況更常發生在西南季風盛行的環境中，只不過最大降雨變成集中在南部及西南部。

Chien et al. (2008)利用 MM5 模擬 2004 年的敏督利颱風，發現台灣南部與中部發生超大降雨的主要原因也是地形、颱風及綜觀天氣系統之間的相互影響，因為當時敏督利中心位於台灣北方海面上，颱風外圍的西北氣流與來自南海北部潮溼的西南氣流在台灣西南海域上輻合之後，造成上升氣流，並形成中尺度對流系統不斷移入台灣陸地，在地形斜坡上這些對流系統又受到抬升，更加強了對流與降雨。從衛星與雷達的觀測顯示，莫拉克颱風造成南部超大豪雨的機制與敏督利颱風在此方面頗為相似，只不過其輻合帶滯留時間更長，對流更為旺盛，而導致破紀錄的雨量與嚴重的災情。

Wu et al. (2009b)對瑞琪兒颱風(1999)在台灣所引發降水進行研究，數值模擬顯示台灣地形對瑞琪兒的路徑、強度和引發的降水皆有顯著影響。當台灣地形存在時，瑞琪兒經過台灣時呈現曲折的路徑；移除台灣地形的實驗，瑞琪兒則是以較筆直的路徑通過台灣。當瑞琪兒通過地形時

強度明顯減弱，分析顯示這除了是受到地表摩擦作用及水氣來源減少之影響外，也與山區乾空氣流入颱風內有密切關係，此與 Bender et al. (1987)及 Wu et al. (2001)的研究結果一致。而降雨方面，受地形影響主要集中於迎風面；而沒有台灣地形時，由於缺乏地形提供的額外舉升機制，降雨量明顯減少且分布較均勻。

另外一個有趣且重要的議題，是地形對颱風路徑所造成的偏轉影響，尤其是地形在颱風登陸前所引起的顯著南偏路徑，或是特殊的打轉運動。Jian and Wu (2008)和 Huang et al. (2010)的數值研究分別探討 2005 年海棠颱風及 2007 年柯羅莎颱風登陸台灣前所產生的特殊打轉運動的物理機制。這些研究結果顯示台灣的地形是海棠和柯羅莎打轉運動的主要因子，此外，分析結果也顯示了颱風與地形作用所引起的狹道效應(channel effect)是造成此兩個颱風登陸前大幅度南偏的重要機制。而 Jian and Wu (2008)的研究也顯示地形所引起的海棠打轉運動，與初始的颱風渦旋結構有密切關係，當模式中颱風略微變強變大時，登陸前的打轉運動就隨之減小或消失。究竟颱風在什麼的條件下下（比如：颱風的結構、強度、移動速度、登陸地點及颱風行進方向與地形間的角度等）會發生怎樣的偏轉或打轉運動，則尚待進一步的研究。

這些探討地形如何影響颱風的數值模擬也顯示，要掌握颱風路徑模擬及成功地模擬降水分布，與模式的水平解析度與地形解析能力及颱風初始化有密切關係。台灣之中央山脈會使得颱風路徑發生偏折，而且會在颱風環流所造成的降水量及降水分布現象上扮演重要角色。

另外，觀測和數值研究皆顯示，海洋的上層

熱力結構對颱風的強度可能有密切關係，因此海洋—颱風間的交互作用也是重要的颱風議題。Wu et al. (2007a)利用一簡單的海洋大氣耦合模式，針對海洋暖渦或冷渦(ocean eddy)對颱風強度的影響進行理想的數值模擬。研究結果顯示颱風在經過海洋暖渦時發生了快速增強，這是因為暖渦的暖水層較厚，可以與颱風所引起的海表溫冷卻相抗衡，因此颱風可以從海洋汲取足夠的能量，而快速增強。Lin et al. (2008)針對 1993~2005 年 30 個第 5 等級 (category-5) 的西北太平洋颱風的觀測資料進行系統性的分析，結果顯示這些 category-5 颱風發生位置的海洋條件有兩個特性，一個是氣候上有深厚的暖水層的區域，另一個則是發生在氣候上較淺的暖水層但伴隨有海洋暖渦的區域；Lin et al. (2009)則針對 2008 年納吉斯 (Nargis) 氣旋的快速增強和海洋暖渦間的關係進行探討，結果也發現了海洋暖渦對颱風增強的重要性。Wu et al. (2007a)進一步定義了 $F_{\text{eddy-s}}$ 和 $F_{\text{eddy-T}}$ 兩個參數，評估海洋冷、暖渦對颱風強度的影響，分析結果顯示伴隨大尺度的海洋渦旋的海洋混合層厚度，為影響颱風強度最重要的因子。然而，真實的大氣和海洋條件更為複雜，颱風的強度除了受海洋影響之外，也與大氣條件(環境渦度、垂直風切等)密不可分。

颱風結構、強度及伴隨而來的降水分布與其路徑有密不可分的關係，颱風結構和強度的變化也可能會造成路徑的改變；而台灣的特殊地形及周遭的海洋條件，對這些颱風因子及環境的大氣條件都可能有的重要的影響，因此造成的複雜的地形-颱風及海氣交互作用。對於地形或海洋和颱風的交互作用，仍有許多尚待深入研究的科學和預報問題，值得注意的是颱風研究的進展也倚賴數值模式、系集預報的發展和颱風初始化的改進。

四、莫拉克 (MORAKOT) 颱風的數值模擬

2009 年第 8 號颱風莫拉克於 8 月 3 日 1800 UTC 在菲律賓東北方海面形成，生命期 7 天，最大強度曾達中度颱風強度。莫拉克颱風形成輕度颱風後不久，以偏北轉西北方向移動，之後於 8 月 4 日 2100 UTC 起轉為偏西行進，朝臺灣東部沿海靠近，5 日 1200 UTC 增強為中度颱風，7 日 1550 UTC 左右在花蓮市附近登陸，於 8 日 0600 UTC 左右在桃園附近出海進入臺灣海峽北部，而後持續向北北西緩慢移動，9 日 1030 UTC 左右由馬祖北方進入大陸福建，強度減弱，最後於 8 月 10 日 1800 UTC 減弱為熱帶性低氣壓。

莫拉克颱風於侵台期間帶來將近 3000 mm 的豪大雨，造成高屏地區的洪水氾濫以及土石流，導致超過 700 人的死亡，台灣南部居民之生命及財產損失十分慘重。對於如此驚人的雨量，目前的颱風數值模式是否有能力可以事先準確地預報出來呢？此一科學議題，值得我們進一步探討。

2009 年 8 月初位於西北太平洋地區的季風槽相當活躍，圖 3 為 2009 年 8 月 6 日 0000 UTC 700 hPa 天氣圖，圖中熱帶氣旋除了莫拉克颱風外，此時第 7 號颱風柯尼 (Goni) 位於南海地區，且在莫拉克颱風東南方有另一新熱帶低壓環流生成，此三者構成一個範圍橫跨超過 4000 km 以上的季風槽，極類似 Lander (1994) 所提出季風環流圈 (monsoon gyre) 的結構。也就是在一個大範圍低壓帶，同時存在多個熱帶氣旋，且新氣旋通常在低壓帶的東南側生成；通常此低壓帶隨著時間逐漸往西移動。2009 年 8 月西北太平洋面上的大氣環流幾乎符合季風環流圈的構成要件，此低壓

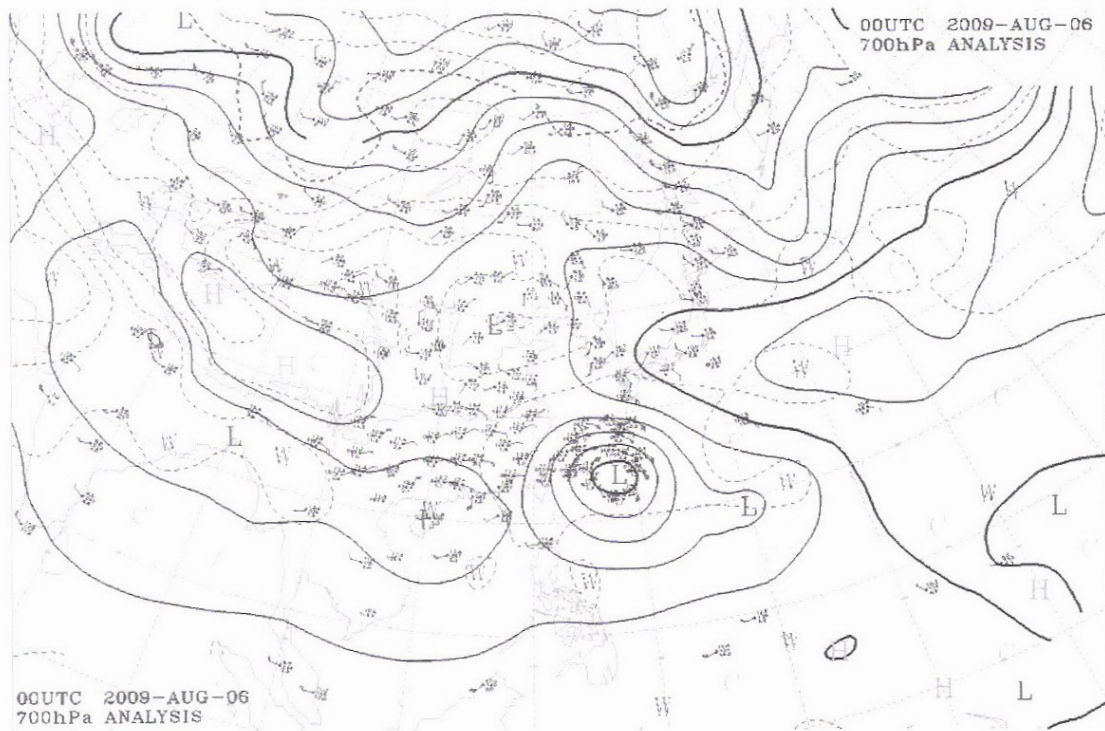


圖3 中央氣象局 2009 年 8 月 6 日 0000 UTC 700 hPa 天氣圖。

帶中心以莫拉克颱風為主體。位於莫拉克颱風西側的柯尼颱風，其運動路徑受到大範圍季風環流的影響，逐漸地往西南西、往南及東南東方向移動，呈現逆時鐘繞圈的現象，若以雙颱風互動的觀點來看，柯尼颱風與莫拉克颱風之間的運動過程似乎存在藤原效應（Fujiwhara effect）；且其強度受到環境垂直風切逐漸增大的影響而逐漸減弱，最後幾乎與以莫拉克颱風為主的環流合併。另位於莫拉克颱風東南側的熱帶擾動，隨時間其運動路徑朝北北西方向移動。

從大尺度的觀點來看，季風環流為提供某一特定地區年度雨量的主要來源。通常季風環流結構屬氣旋式旋轉的環境流場，在季風環流的南側通常存在旺盛的西南氣流，有利於空氣質點對流上升、垂直向上發展，當旺盛暖濕空氣源源不斷

供應之下，此對流發展的熱帶雲簇將永不停歇，在季風環流南側的地區帶來豐富且可觀的雨水。除了空間尺度與時間尺度不及季風環流來得廣與長之外，其實颱風環流亦是尺度季風環流的一份子。當季風環流內存在快速旋轉的熱帶渦旋，將帶給所經之地豐沛的雨量及破壞性的強風；若颱風移動速度受環境流場相互牽絆，導致移動速度減慢，此時伴隨颱風所挾帶大量的雨水，將造成某特定地區嚴重的水患與土石流。

2009 年 8 月 5 日至 8 日的衛星雲圖（圖 4），顯示在柯尼颱風與莫拉克颱風南側旺盛的對流雲帶，當莫拉克颱風暴風圈即將侵襲台灣地區（圖 4c），伴隨柯尼颱風與莫拉克颱風的雲帶幾乎相連成一線；也就是位於莫拉克颱風西南側的柯尼颱風供應旺盛且源源不絕的水氣給予莫拉克颱風，

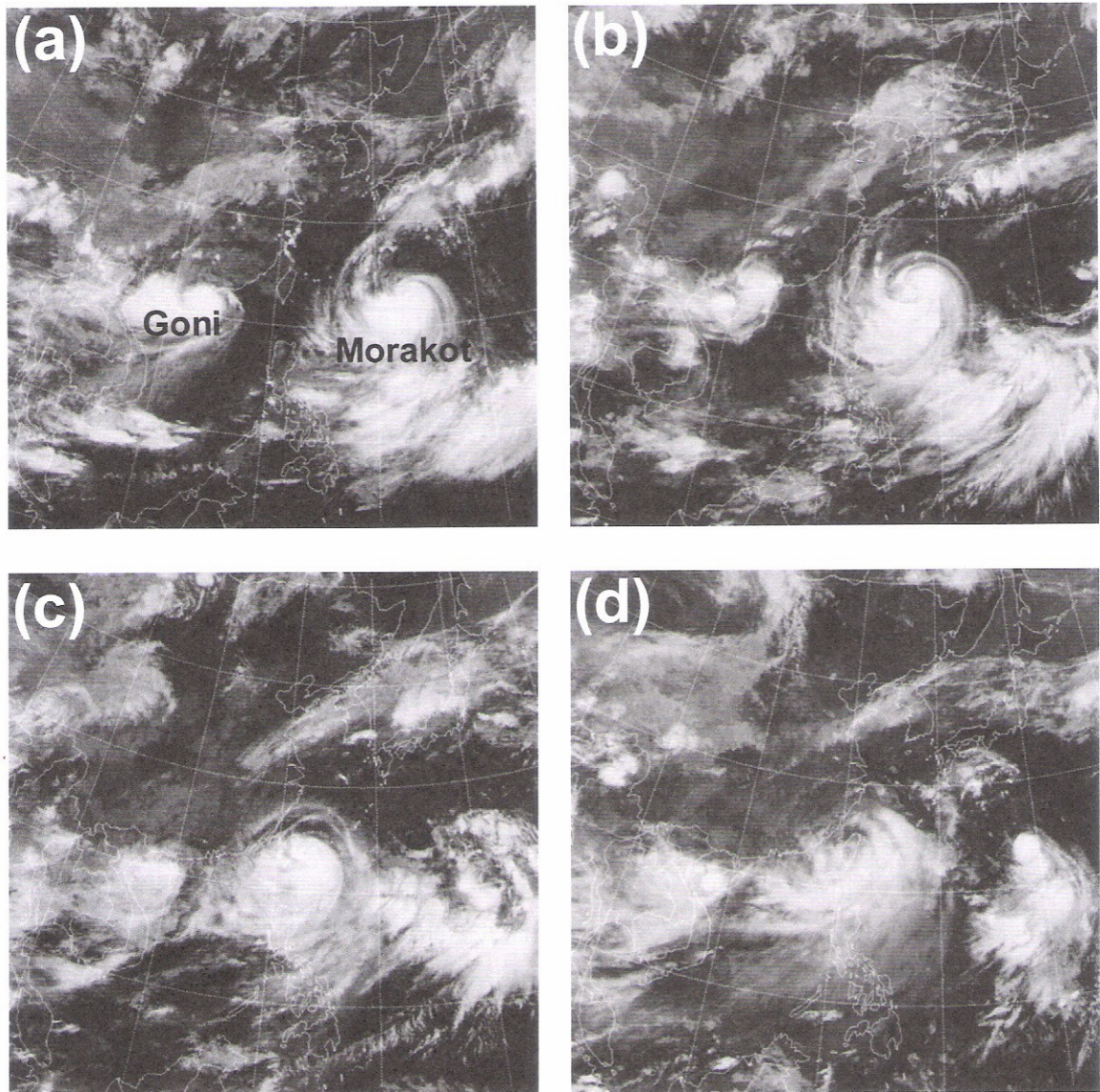


圖 4 (a)~(d)為 2009 年 8 月 5 日 0000 UTC 至 8 日 0000 UTC 間隔 24 小時中央氣象局接收日本 MTSAT 紅外線衛星雲圖。

加上此時莫拉克颱風的環境駛流不明確及台灣地形的阻擋，移動速度異常的緩慢，帶給台灣中南部地區遠遠超出預測範圍之超大豪雨。

圖 5 是 2009 年 8 月 5 日至 10 日台灣地區每日 24 小時的累積總雨量圖。在 8 月 5 日白天受到西南氣流影響各地午後均有零星微量的降水，入

夜之後受到莫拉克颱風外圍環流與竹苗台地舉升作用的影響，在竹苗交界處出現時雨量最大值達 78 mm。8 月 6 日受到颱風外圍環流影響，迎風面降水的現象特別明顯，最大值位於竹苗地區為 297.5 mm，位於背風面的花蓮南部及台東地區降雨不顯著。8 月 7 日受到颱風環流侵襲與籠罩影響全省均有降雨，主要降雨區分別位於宜蘭縣南

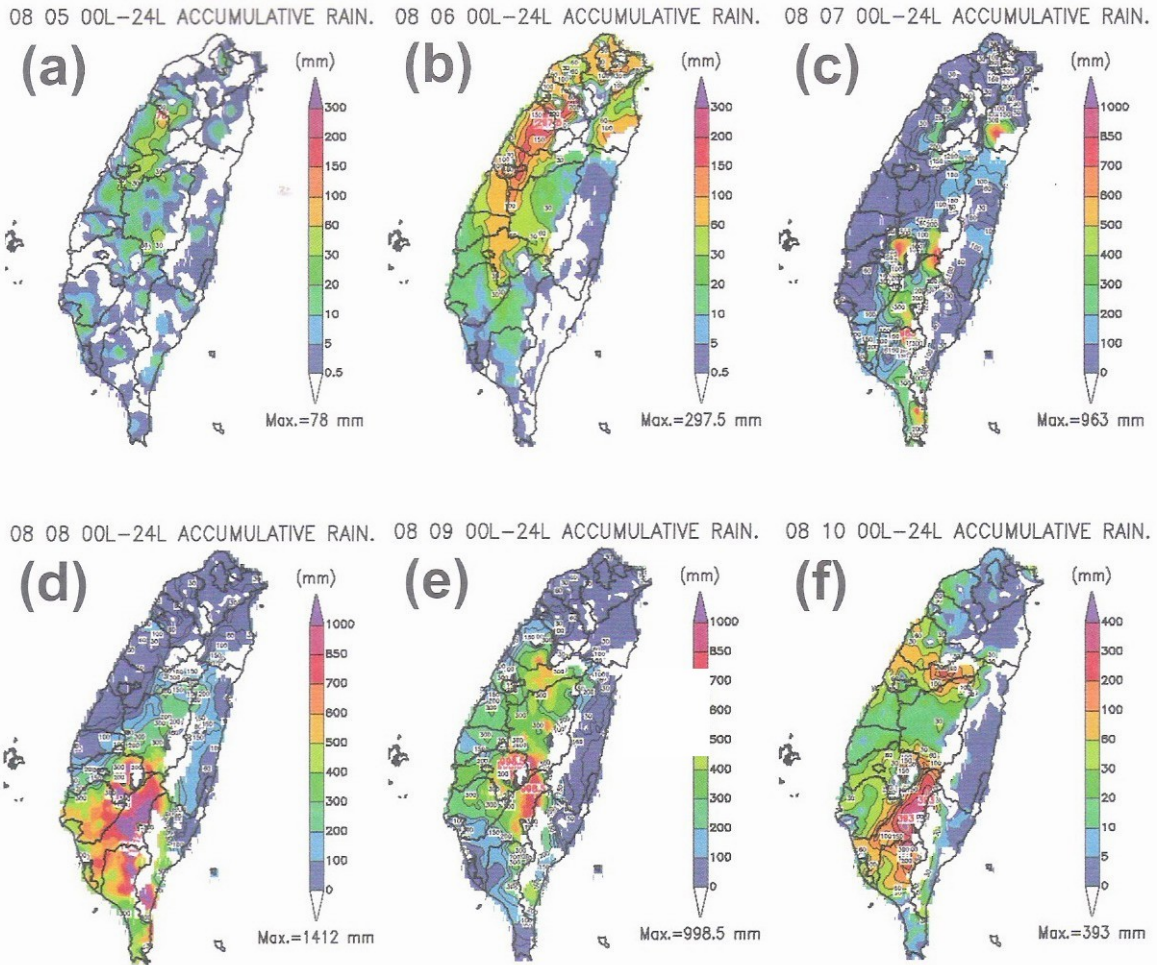


圖 5 (a)-(f)為 2009 年 8 月 5 日至 10 日間隔 24 小時中央氣象局每日 24 小時雨量累積圖。

部山區及中南部山區，降雨最大值为 963 mm。8 月 8 日由于莫拉克颱風中心位於台灣西部且即將出海，中南部地區正好位於颱風東南側西南氣流的區域，加上山區匯集與舉升氣流的作用及莫拉克颱風緩慢移動，使得最大降雨區域出現在中南部山區，且高達 1412 mm。8 月 9 日莫拉克颱風中心仍在台灣海峽北部，受到颱風外圍環流內的對流雲系影響，中南部的大雨現象仍然持續，當日最大雨量為 998.5 mm。8 月 10 日受到颱風逐漸北抬遠離及後續颱風外圍環流內的對流雲系影響，降雨最大值主要分別出現在中部及南部山

區，減為 393 mm。

綜觀莫拉克颱風侵台期間之總累積降雨以中南部山區為最，超過 2500 mm，幾乎是台灣地區一年的年平均雨量值。造成此次八八水災的主要原因如下：活躍的季風槽北抬，使得後續颱風外圍環流內的對流活動明顯；導引颱風的駛流不明確，使得颱風移速緩慢，增長降雨時間；中南部河谷型地形，適合暖濕水氣匯集並舉升，增強降雨強度。

莫拉克颱風重創台灣，中央氣象局成為眾矢

之的，有人責怪氣象局一開始預報的降雨區域不對，也有人拿著雨量數據指稱雨量嚴重低估。氣象局初始的降雨預報確實不夠準確，但是預報不準的原因在於影響降雨天氣的因素非常複雜，儘管氣象學者不斷從軟體與硬體改進電腦模式計算的結果，現有的氣象科技能力對於降水預報仍無法達到很好的準確度。目前的颱風數值模式中有很多因素可以影響其模擬的降水分布及累積雨量，例如數值模式使用不同的物理參數化方案、平流數值方法及動力過程等均會造成不同的降水效果。針對台灣不同地區及不同季節，這些主控數值模式模擬結果的物理及動力過程該如何使用亦是值得深入探究的議題。

莫拉克颱風預報失準的原因，除了上述各項之外，還有一些特別的因素。雖然就其風力強度的預報沒有太大的問題，但是對於雨量的預報卻有低估的現象，儘管各家模式皆宣稱對颱風期間的總雨量可以模擬到接近實際的數值(2000 mm)，但是問題在其預報的前置時間(lead time)不夠長，例如在颱風登陸前 24 小時的模擬，並無法確切掌握颱風接近臺灣前的減速、甚至滯留的現象，導致颱風迅速通過台灣而造成預報的雨量不足，直到登陸前 12 小時的模擬才逐漸反應該減速的現象，降雨量才有增加。這個問題一方面與前面提及的地形因素有關，另一方面也與廣大洋面上資料缺乏，造成環境流場的模擬與實際有很大差異也是可能原因之一。本論文對莫拉克的降雨問題將從兩個部份進行探討：(一)定量降水預報能力之評估，(二)模式平流方案的影響。

(一) 定量降水預報能力之評估

莫拉克颱風侵台期間，國內總計有 11 個模式成員進行準作業預報，包括氣象局 3 個 WRF (The

Weather Research and Forecasting model)作業模式、台大(周仲島)、中大(林沛練)、師大(簡芳菁)、防災科技中心和颱洪中心(3 個成員)之 WRF 模式以及師大雲解析風暴模式(Cloud-Resolving Storm Simulator, CReSS)模式(王重傑)等 11 個模式，本報告將針對其中 8 個成員，進行莫拉克颱風侵台期間模式定量降水預報能力評估。主要探討 2 個面向，第一是評估數值模式颱風定量降水的預報能力，以釐清現階段的模式預報水平，據以規劃未來模式發展的可能研發方向。第二是從預報應用的角度出發，評估現行模式颱風定量降水預報資訊在實際作業時應用的可行性和侷限，提供預報作業單位可行的預報指引建議。

表一為各單位模式成員的主要模式架構，各模式的最高水平解析度均在 4-5km 之間，此已接近模式可以直接解析對流雲的空間尺度，因此本論文將對各個成員之最高水平解析度的模式定量降水預報進行評估。

在有關數值模式颱風定量降水預報能力評估方面，使用莫拉克颱風侵台期間(2009 年 8 月 7 日 0000 UTC 至 8 月 9 日 1200 UTC)的臺灣地區自動雨量站降水資料，用以校驗上述模式成員的 0~72 小時定量降水預報能力。由於近年來模式預報效能顯著提升，因此將針對 6 小時的累積雨量進行校驗，用以突顯出現階段模式的定量降水預報能力。值得一提的是，將模式網格點降水資料內插至自動雨量站位置時，不同的空間內插方式(如 Cressman 方法或是距離平方反比等)將有可能導致誤差，使用不同的資料權重影響半徑亦有可能影響內插結果，進而影響降水預報得分，這些因素於本篇論文中並未討論。

表一 各個模式成員的主要模式架構

	邊界層 參數法	積雲 參數法	微物理 參數法	解析度 (km)	資料同化 架構	初始場	邊界條件
CWB WRF1	YSU	Grell Devenni	Goddard 3-ice	45/15/5	6-hr full update cycle	3DVAR 分析	NCEP GFS
CWB WRF2	YSU	Grell Devenni	Goddard 3-ice	45/15/5	limited 6-hr update cycle	3DVAR 分析	NCEP GFS
CWB WRF3	YSU	Grell Devenni	Goddard 3-ice	45/15/5	6-hr full update cycle	3DVAR 分析	CWB GFS
NTNU-WRF	YSU	Old KF	WSM 5-class	45/15/5	6-hr full update cycle	3DVAR 分析	NCEP GFS
NTNU-CReSS	1.5-order closure (with TKE) ¹	None	Bulk cold cloud (6 class) ²	4	NoDA	由全球模式 內插	NCEP GFS (AVN)
颱洪中心 1	YSU	Grell Devenni	Goddard 3-ice	45/15/5	cold start	全球模式 內插	NCEP GFS
颱洪中心 2	YSU	Grell Devenni	Goddard 3-ice	45/15/5	cold start	3DVAR 分析	NCEP GFS
颱洪中心 3	YSU	Grell Devenni	Goddard 3-ice	45/15/5	cold start	3DVAR 分析 (with bogus)	NCEP GFS

圖 6 是各個模式成員於莫拉克颱風侵台期間 6~12 小時定量降水預報在各個雨量閾值(threshold)的偏離指數 (BIAS) 得分和公正預兆得分 (Equitable Threat Score, ETS; Schaefer 1990)[此兩種校驗得分的定義請見 Chien et al. (2002)、Yang and Tung (2003)、及 Yang et al. (2004)]。BIAS 得分顯示在 150 mm/6-h 閾值以下的預報相當不錯，但在 150 mm/6-h 以上模式降水則有過度預報的現象。一般而言，高解析度模式傾向於預報過多的強降水[例如 Chien et al. (2002)之 Fig. 7 及 Fig. 9 亦有類似現象]，此一系統性偏差在莫拉克颱風之總累積雨量預報中亦呈現類似結果。另

外，需得注意，BIAS 得分是針對特定雨量閾值在台灣地區降水預報面積與觀測降水面積的比值，此和模式颱風定量降水預報的平均誤差是不盡相同的。在 ETS 得分方面，雨量閾值在 50 mm/6-h 以下得分較小，這是因為 ETS 得分設計考慮進去排除隨機猜測得分，而在小雨閾值因全省都降雨，隨機猜測得分較高，因此 ETS 得分無法突顯出模式降水的預報能力。就以 6~12 小時預報而言，模式定量降水預報在 50 mm/6-h 閾值有最好的預報能力，ETS 得分在 0.3 左右，這個得分比梅雨季的降水校驗 (~0.25) 較佳[見 Chien et al. (2002)之 Fig. 6 及 Yang et al. (2004)之 Fig. 7]。雨

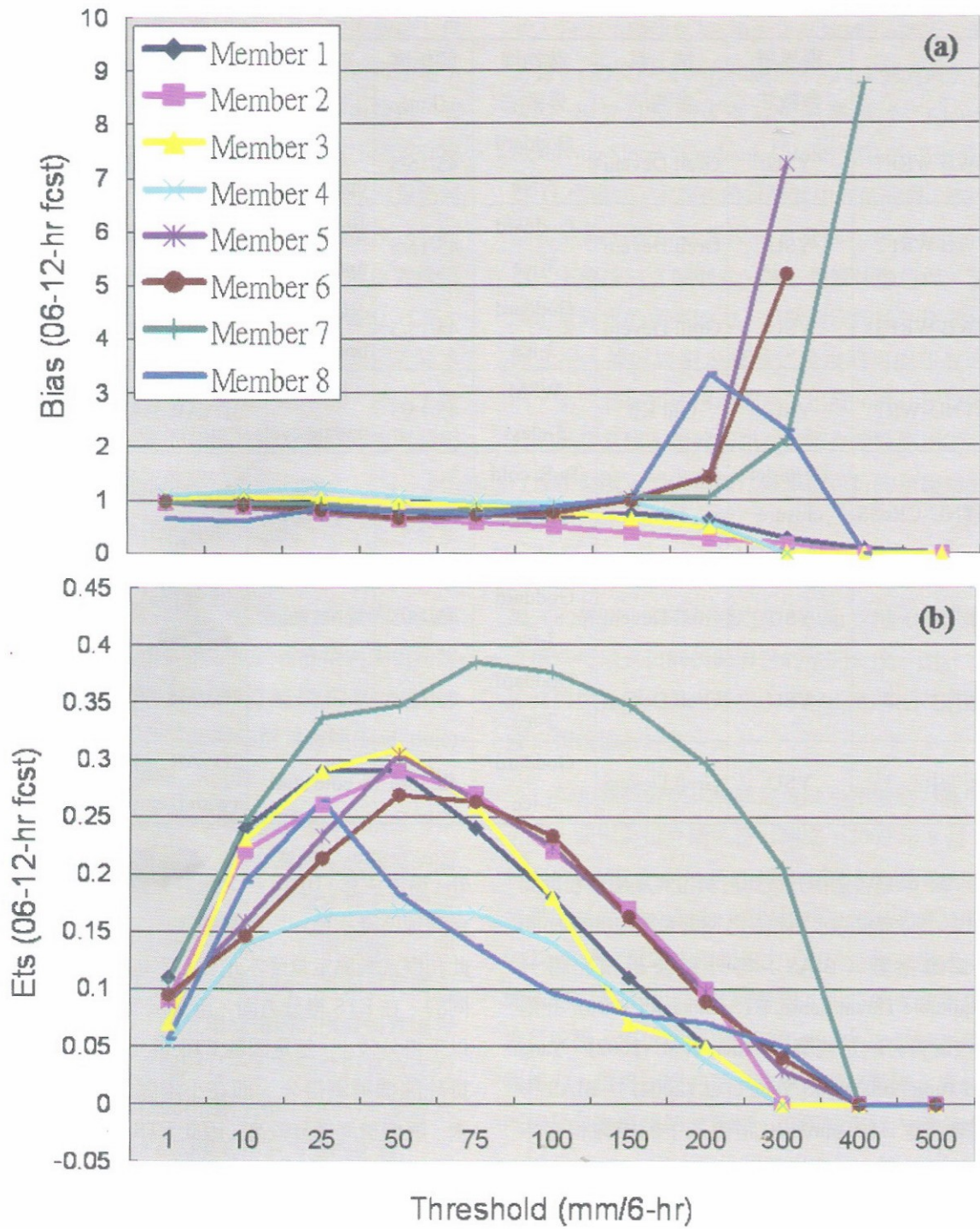


圖 6 各個模式成員於莫拉克颱風侵台期間 6~12 小時定量降水預報在各個雨量閾值的 BIAS 得分(a)和 ETS 得分 (b)，模式成員編號為隨機給定。

量閾值在大於 75 mm/6-h 以上則 ETS 得分快速遞減，在 150 mm/6-h 以上則降到 0.1 以下，預報能力相對較低。值得注意的是，此 ETS 最高得分約為 0.3 左右，僅為針對莫拉克颱風而言，由於數值模式對於其綜觀環境西南氣流水氣通量及颱風路徑的掌握能力還不錯，因此可以得到較佳的 ETS 得分。如果針對較弱綜觀環境強迫的颱風〔如潭美(2001)颱風〕，若是結構屬於非典型的颱風〔如卡玫基(2008)颱風〕，或是路徑較為異常之颱風，模式的 ETS 降水預報得分往往低於 0.3。

在 12~18 小時定量降水預報方面(圖 7)，其結果和 6~12 小時的預報相當，BIAS 得分顯示在 200 mm/6-hr 閾值以上模式降水仍過度預報的現象，在 ETS 得分方面，主要的預報能力表現在 10 mm/6-h 到 150 mm/6-h 之間，但得分較 6~12 小時的預報能力略低。

圖 8、9 是各個模式成員在所有預報時間和所有雨量閾值的定量降水預報校驗，總的來說，各個模式的預報能力相去不遠。BIAS 得分在 150 mm/6-h 閾值以上過度預報的現象普遍存在於各個模式成員，在 ETS 得分方面，50~100 mm/6-h 是預報能力最好的區段，0~36 小時與 48~66 小時則分別有較佳的預報能力。模式在 200 mm/6-hr 的 ETS 預報能力約在 0.15 左右，更高雨量閾值的 ETS 預報能力則快速遞減。其中值得一提的是，成員 4 的定量降水預報能力顯著較低，其原因和該模式成員在颱風初始場中植入渦旋的技術有密切的關係。另外，成員 7 的定量降水預報能力較其他模式成員顯著地好，顯示雖然主要的模式成員均使用 WRF 模式，但因為模式使用之物理參數方案和初始場的差異，個別模式成員之間的降水預報能力差異仍是存在的。

上述之分析結果雖尚未討論路徑預報誤差在模式定量降水預報中扮演的角色，然而，仍可據此指出模式颱風定量降水預報的未來發展重點，茲舉例如下：

1. 颱風初始化過程對模式的路徑和定量降水預報能力均產生重要的影響，根據氣象局的模式經驗，目前 WRF 模式植入颱風後因為模式平衡問題而容易導致颱風路徑擺盪的現象，因此強化颱風初始化過程的研發，包括颱風重置技術、颱風渦旋植入技術與搭配資料同化流程設計適當的渦旋植入策略，此為改善模式颱風定量降水預報的重要關鍵。
2. 以本論文有限的研究樣本顯示模式在大雨區容易有過度預報的現象，然而此一過度預報是否為普遍的現象？如果是，那過度預報的系統性偏差為何？我們需要累積更多的颱風個案並進行系統性的研究，來評估數值模式在台灣地區的定量降水預報能力。另外，此一過度預報現象和模式的降水參數方案有密切的相關，因此有必要針對模式在副熱帶洋面的邊界層參數法方案、積雲參數法方案和微物理參數法方案進行深入的研究與調校，以改善模式的定量降水預報能力。
3. 模式解析度為模式定量降水預報的關鍵，文獻上針對模式解析度對颱風強度與結構模擬的影響已多有論述，然而，模式解析度在颱風環流和臺灣地形作用過程中所扮演的角色，以及其在台灣地區定量降水預報的影響，此為必須被進一步探究的議題。
4. 如何在評估數值模式於台灣地區定量降水預報能力的同時，能清楚排除路徑預報誤差對定量降水預報的影響？換言之，在實務上，如果模

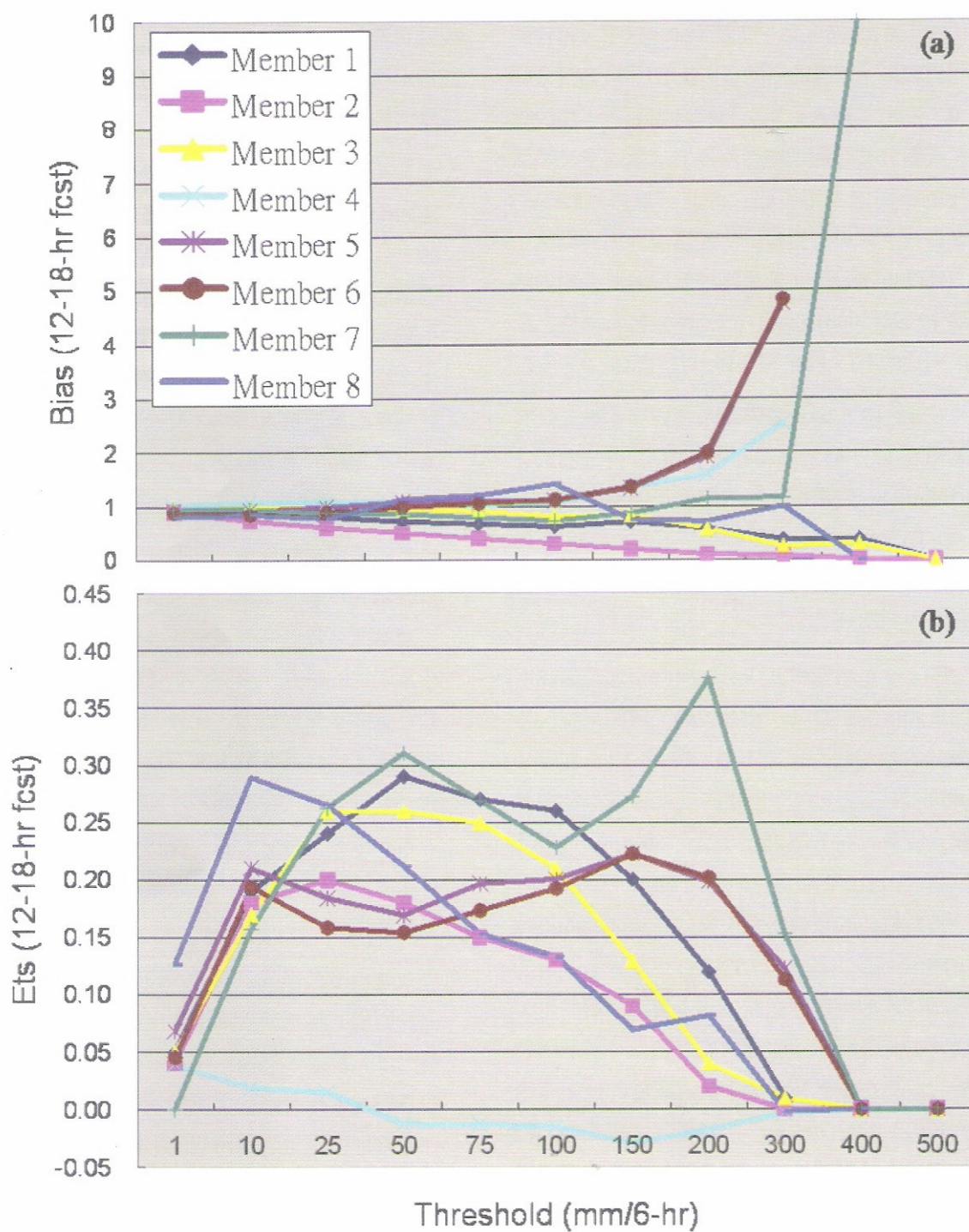


圖7 同圖6，但為12~18小時。

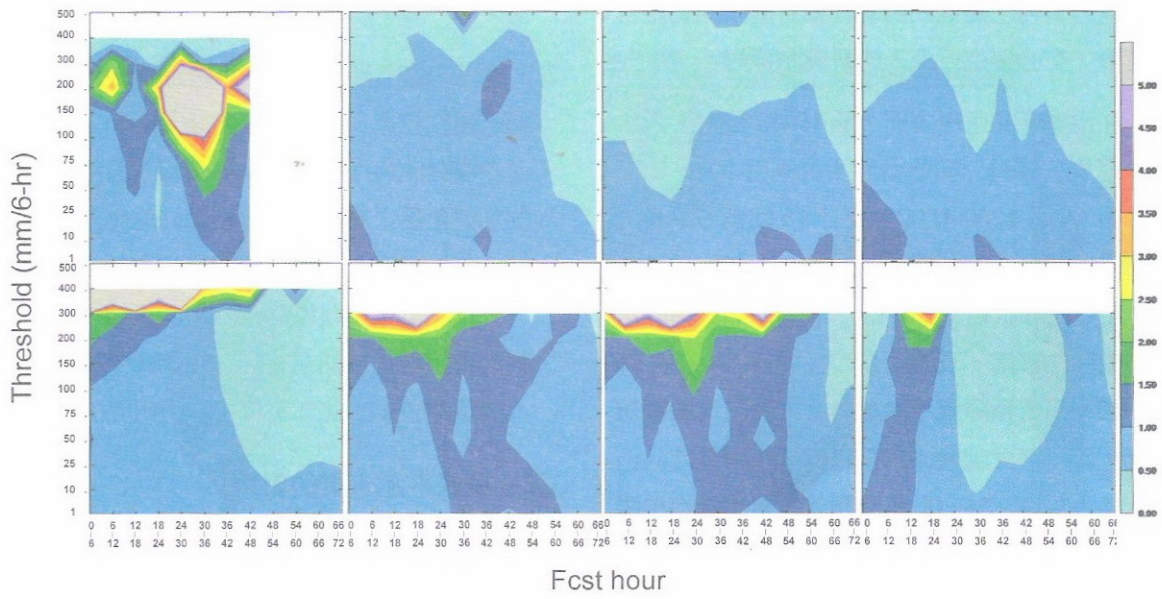


圖 8 各個模式成員於莫拉克颱風侵台期間定量降水預報的 BIAS 得分（縱軸），橫軸為預報時間，模式成員編號為隨機給定。

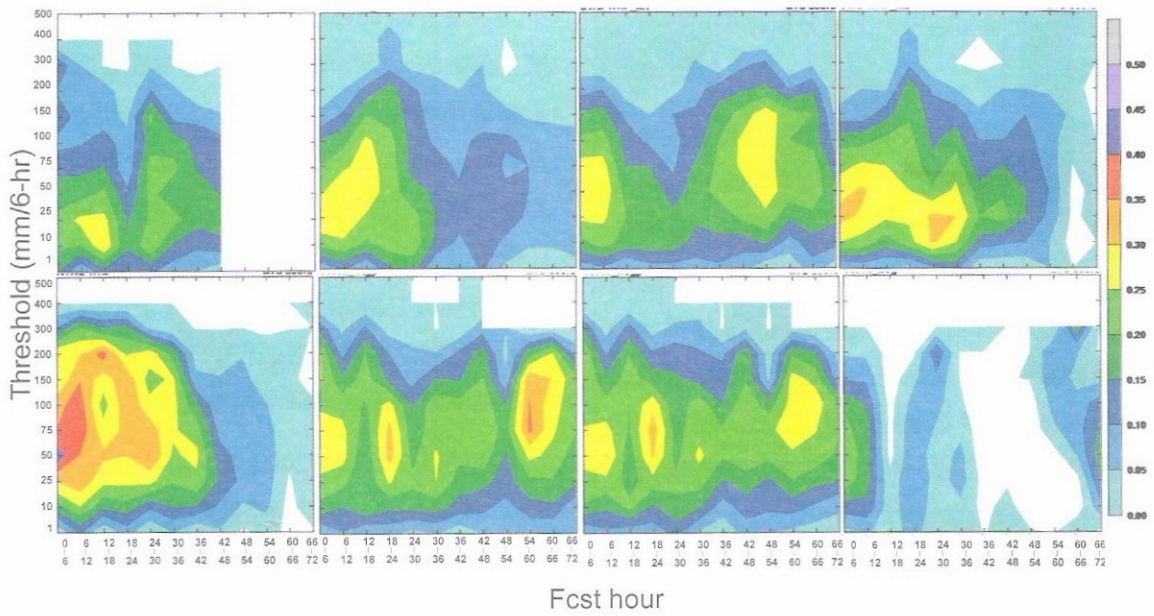


圖 9 同圖 8，但為 ETS 得分。

式路徑預報是可接受的，那麼模式定量降水預報能力為何？這個問題的答案目前所知仍相當有限，有必要進行深入的研究和探討

在預報產品應用方面，圖 10~13 是針對氣象局 3 個模式成員，初始場自 8 月 6 日 0000 UTC 至 8 月 10 日 1200 UTC，共計 18 個預報平均之 0~12、12~24、24~36 與 36~48 小時預報的累積降水。和觀測降水相比，0~12 小時預報的累積降水分布較觀測偏南，且總雨量較小。12~24、24~36 小時預報的累積降水不論是分布或總量均和觀測相近，顯示模式定量降水預報的累積雨量產品仍具有參考價值。36~48 小時預報的累積降水和觀測相比則又減少。圖 14 則是模式預報與觀測之全島總雨量的比較，圖中顯示不論是在雨量歷線或是總量方面，模式的預報產品仍極具參考價值。相似的結果在表二之最大降雨量的比值中可發現，24~36 小時的預報結果最好。表二和圖 15 同時也顯示並沒有一個模式成員在所有的預報時段都得到最好的預報結果，上述分析結果可以有以下之推展：

1. 定量降水預報校驗結果顯示針對莫拉克颱風個案，模式 6 小時累積降水預報之 ETS 得分最高約 0.3 左右，此反映出模式的降水過程和實際比較仍有相當的改善空間，然而在實務應用上，模式在不同預報時段的長時間累積降水仍具有參考價值，這反映出合理的累積雨量未必是經由正確的降水過程所產出。此一結果顯示我們所關心的科學分析結果和實際預報應用之間仍存在顯著的差距，也就是說，科學上尚未完全成熟的研究成果，在實際上仍有相當的應用空間，因此如何在現有的科學能力之下，最大化使用模式產品，包括結合氣候統計法與模式定量降水預報產品，以及引入統計法進行修

正等，以期充分發揮模式預報產品的優勢與效益。

2. 3 個模式的雨量歷線具有相當程度的分歧，觀測雨量則在此一系集分歧的涵蓋範圍之內，顯示多模式成員所組成的系集預報，若經過適當的加值應用，應該可以有相當好的應用價值，就系集預報而言，如何發展系集預報成員產生方式以及系集預報校驗系統，甚至結合系集資料同化技術，以期在有限計算資源下，發揮最大的預報效能，此亦為值得深入研究的議題。

(二) 模式平流方案的影響

目前的颱風數值模式中有很多因素可以影響其模擬的降水分布及累積雨量，例如數值模式使用不同的積雲參數法(Cumulus Parameterization Scheme)、不同的雲物理參數法(Microphysics Parameterization Scheme)、不同的邊界層參數法(PBL Parameterization Scheme)以及數值方法中的不同平流方案(advection scheme)等。關於不同的積雲參數法、雲物理參數法、邊界層參數法如何影響颱風數值模式所模擬之降水分布及累積雨量，Yang and Tung (2003)及 Yang and Ching (2005)的論文中都有詳細討論。但是國內大氣科學界對於數值方法中之不同平流方案如何影響颱風數值模式所模擬之降水分布及累積雨量的討論並不多，在此將討論數值方法中的不同平流方案如何影響颱風數值模式之降水模擬情形。

我們以 3.1 版(2009 年 4 月正式公佈)的 WRF 模式為例，水平網格間距為 2 km，比較 3 種不同的平流方案(Skamarock and Weisman, 2009)對於莫拉克颱風降水預報的影響。這 3 種平流方案分別為傳統非正定(Non-Positive Definite)之 5 階中差法、正定(Positive Definite, PD)方案及單調

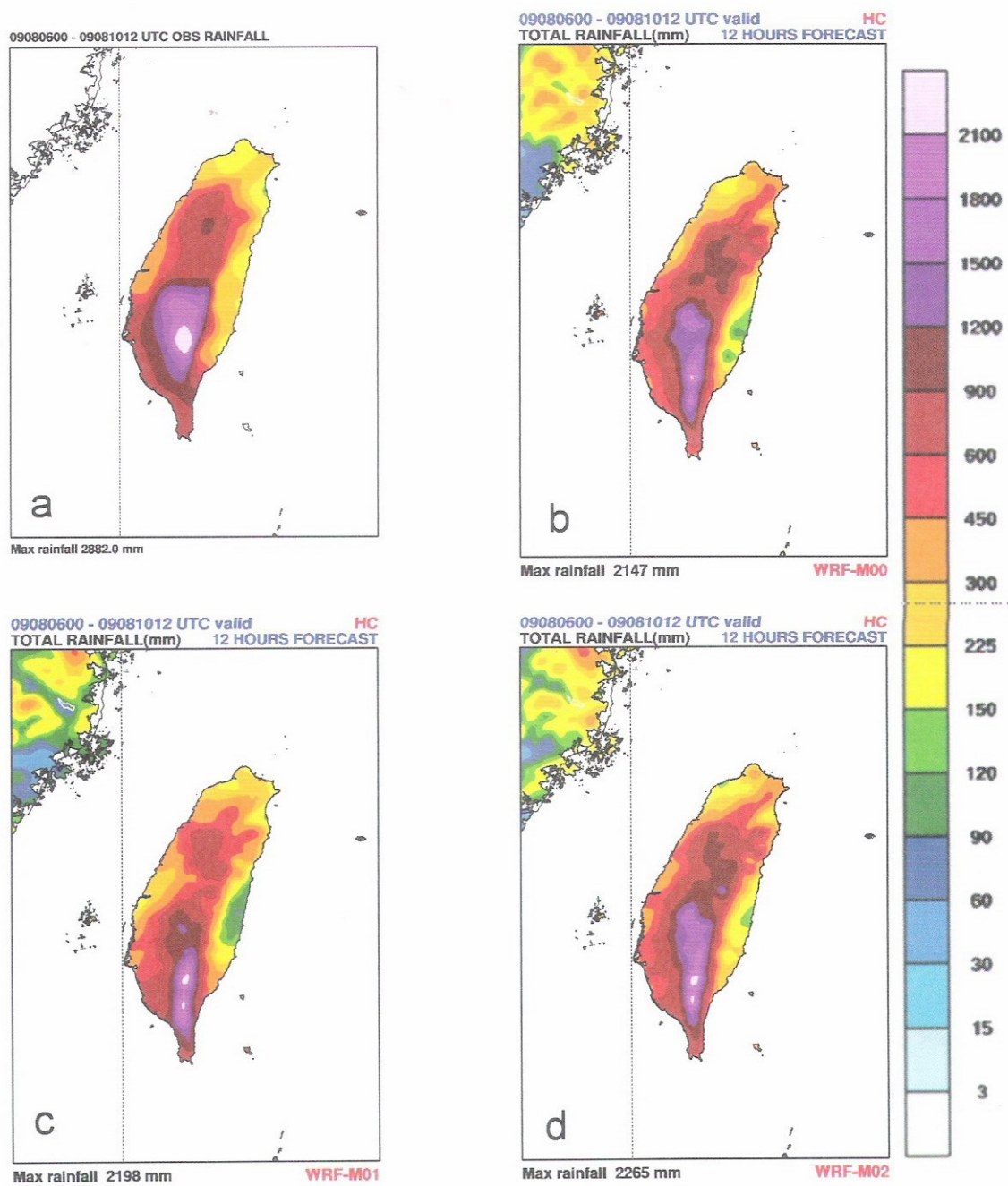


圖 10 針對氣象局 3 個模式成員 (b、c、d)，初始場自 8 月 6 日 0000 UTC 至 8 月 10 日 1200 UTC，共計 18 個預報平均之 0~12 小時預報的累積降水。a 為同一時間之觀測降水。

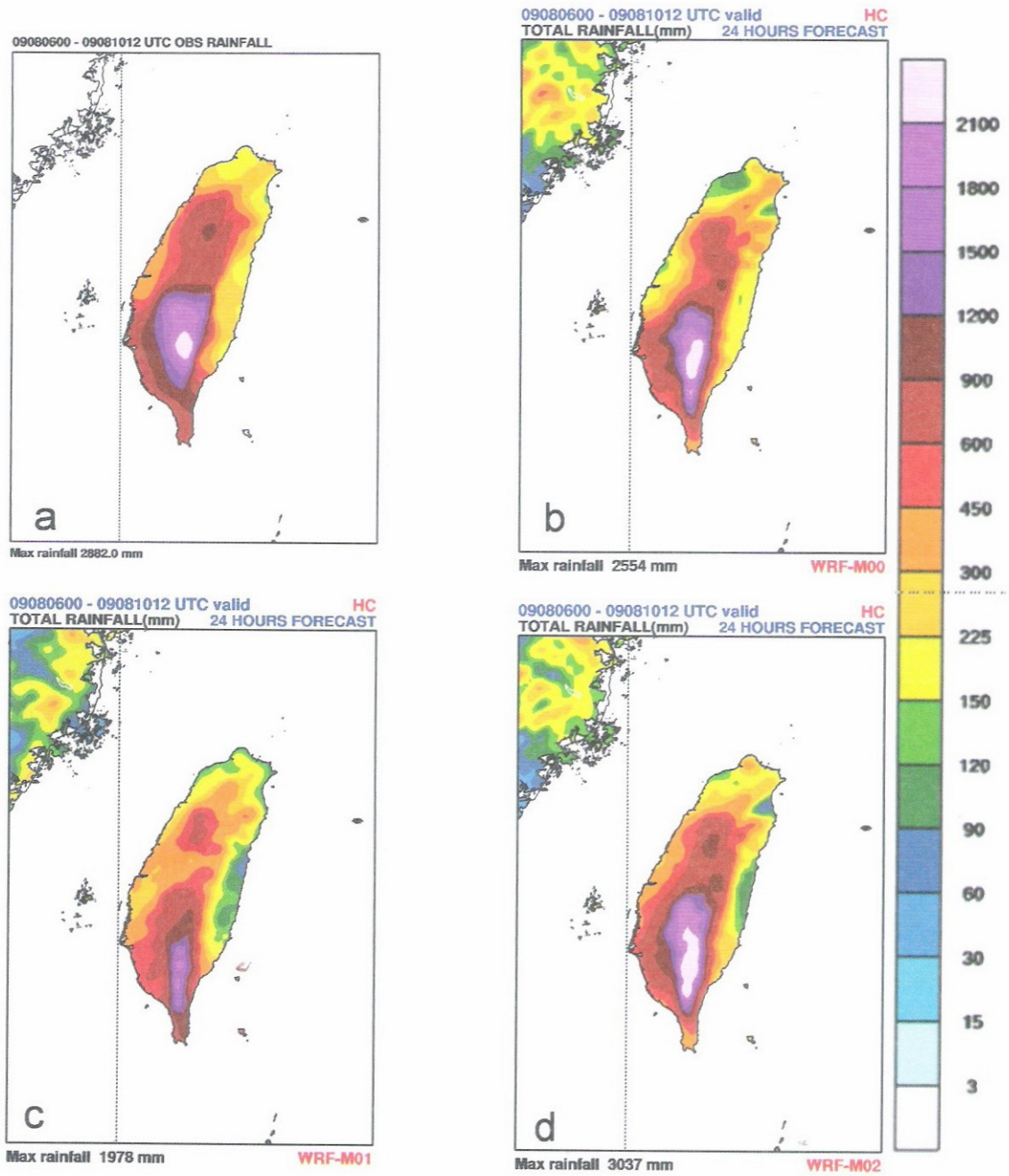


圖 11 同圖 10，但為 12~24 小時預報的累積降水。

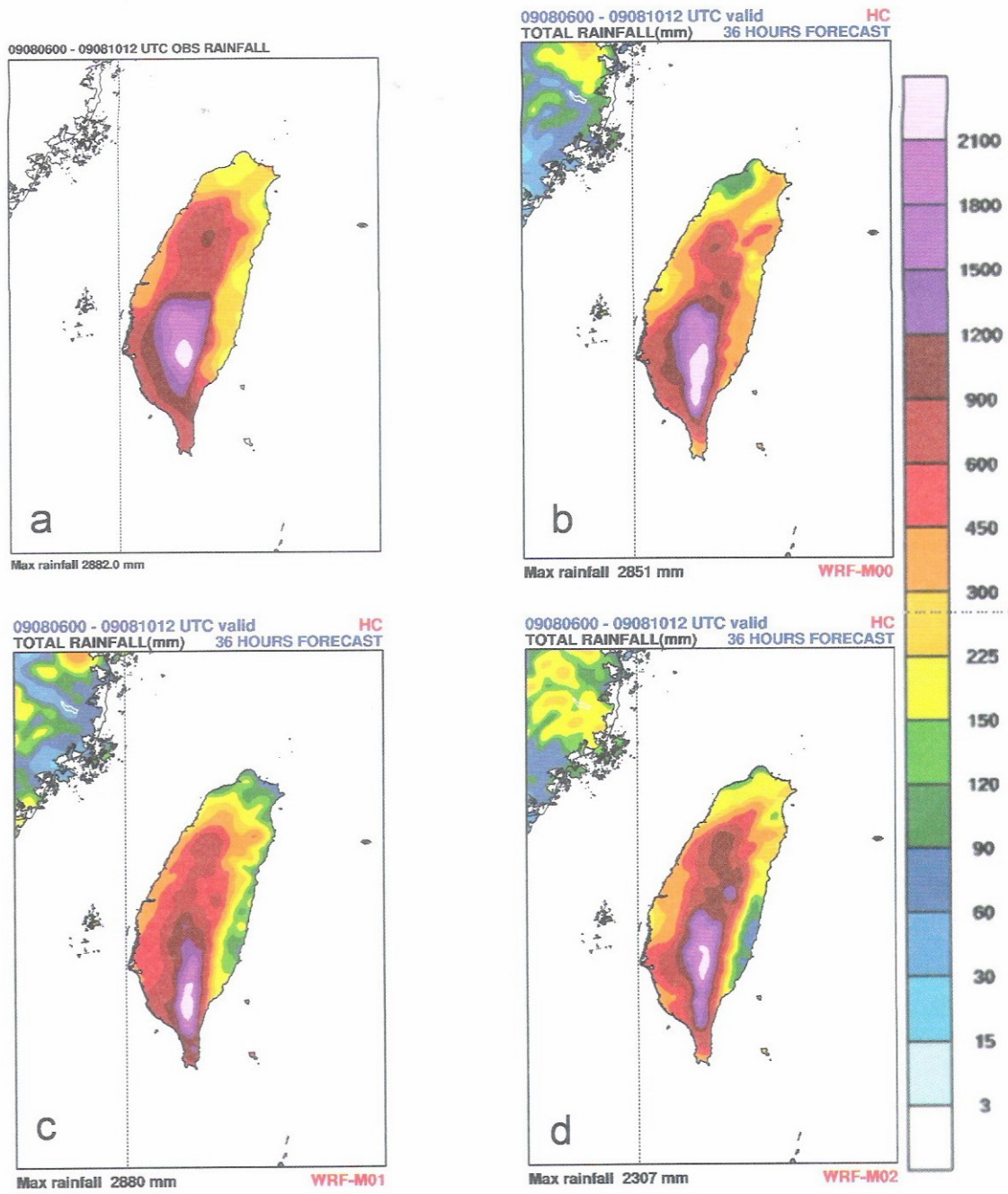


圖 12 同圖 10，但為 24~36 小時預報的累積降水。

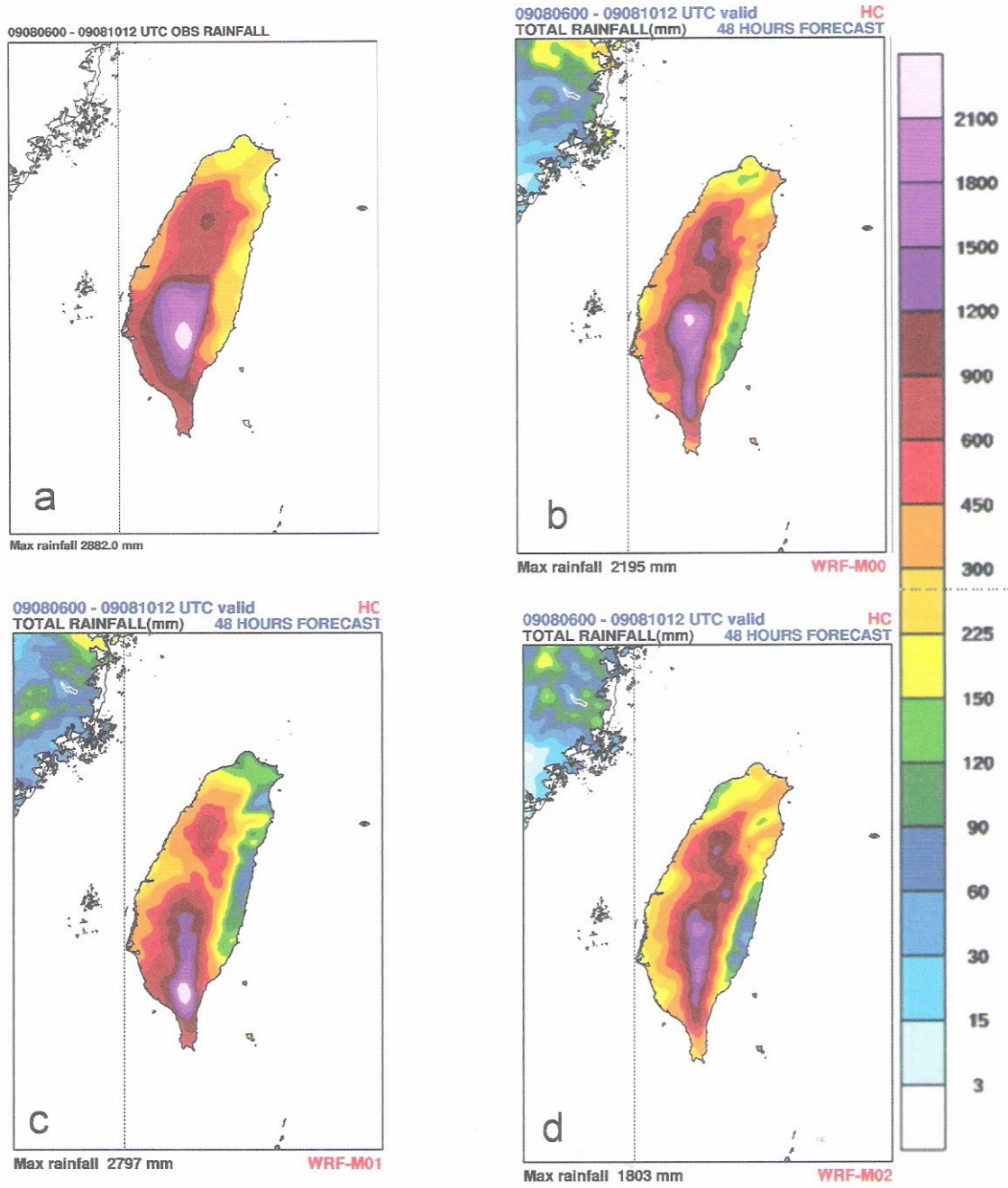


圖 13 同圖 10，但為 36~48 小時預報的累積降水。

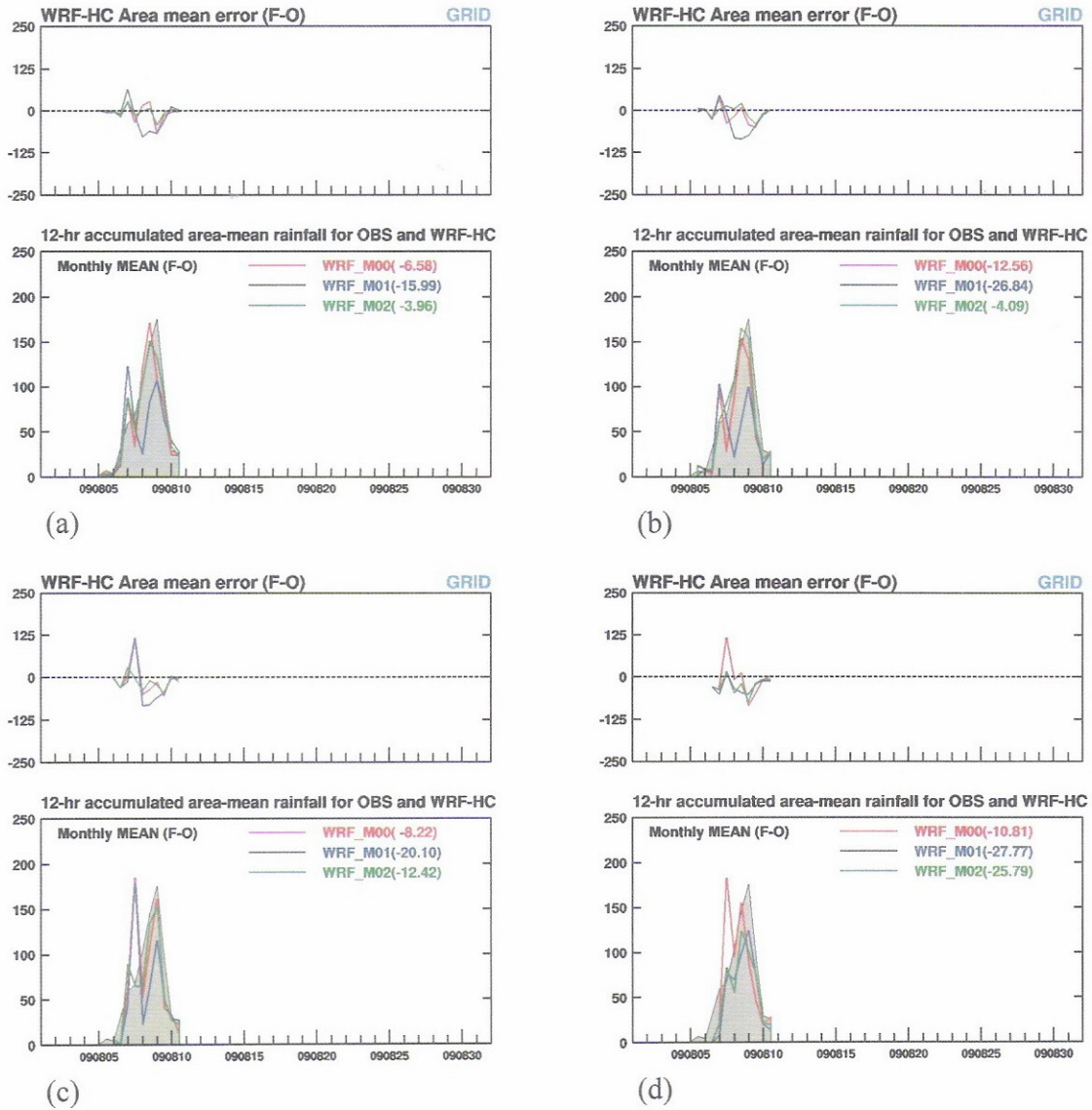


圖 14 針對氣象局 3 個模式成員(分別以 3 條不同顏色的線表示), 初始場自 8 月 6 日 0000 UTC 至 8 月 10 日 1200 UTC, 共計 18 個預報平均之 0~12 (a)、12~24 (b)、24~36 (c)與 36~48 (d)小時預報全島平均的雨量歷線。陰影為觀測降水。上圖則為預報和觀測的差值。

表二 圖 10~13 三個模式成員最大預報降雨量和最大觀測降雨量的比值。

forecast Max_rainfall / obs. Max_rainfall	forecast Max_rainfall / obs. Max_rainfall			
	0-12 hrs	12-24 hrs	24-36 hrs	36-48 hrs
HC-M00	74.50%	88.62%	98.92%	76.16%
HC-M01	76.27%	68.63%	99.93%	97.05%
HC-M02	78.59%	105.38%	80.05%	62.56%

(Monotonic)方案。傳統中差法處理強烈水氣梯度現象的平流作用時，由於數值頻散(computational dispersion)導致有負的水氣產生，導致水氣場非正定(Non-Positive Definite, Non - PD)，造成整個計算區域內的水氣不保守。正定數值計算方案可以去掉不合理的負水氣，將負的水氣設定為零或是正值，以保持正定；但於強烈水氣梯度附近的正水氣區，仍然會有因數值頻散造成的水氣場不合理地上下振盪現象。Monotonic 計算方案除了可以合理去掉負的水氣保持正定外，於強烈水氣梯度區域亦可去除水氣場的不合理上下振盪現象。

圖 15 為莫拉克颱風侵台期間 4 天的觀測累積雨量，圖 16-18 則顯示 WRF 模式使用 3 種不同平流方案的模擬結果。為了單純化數值平流方案的影響，我們不做颱風渦旋植入，初始場使用美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction/ Final Analyses, NCEP/ FNL) 網格點資料，初始時間為 8 月 6 日 0000UTC 時，WRF 積分 96 小時。由這 3 種平流方案可以看出，所模擬之降水分布皆相似，但是 Monotonic 方案 (圖 18) 的模擬累積雨量極值(1364.8 mm)最大，Non-PD 方案 (圖 16) 之累積雨量極值(1332.9 mm)次之，PD 方案 (圖 17) 的模擬雨量極值(1083.6 mm)最小，但皆低於觀測之累積雨量極值(2874.5 mm)。雖然這 3 組實驗都低估降水，但是我們這組比較的目的在于瞭解數值平流方案對於定量降水預報的影響，因此重點在於彼此間的差異情況，而非與其實際降水的接近程度。這 3 種平流方案中最大極值與最小極值相差高達 25%，顯示使用不同平流方案仍有可能導致模擬累積雨量極值之差異。

接著看表三比較這 3 種平流方案所模擬的全台平均雨量及觀測平均雨量的比較。由表三得

知，Non-PD 方案的模擬全台平均累積雨量極值(301.7 mm)最大，Monotonic 方案(269.3 mm)次

表三 3 種平流方案所模擬莫拉克颱風侵台期間 4 天 (2009 年 8 月 6 日 0000 UTC 時到 8 月 10 日 0000 UTC 時) 之全台平均雨量。

平流選項法	網格點雨量平均
Non Positive Definite	301.662 (mm)
Positive Definite	261.424 (mm)
Monotonic	269.302 (mm)
觀測平均雨量(410 站)	662.629 (mm)

之，PD 方案的模擬雨量極值(261.4 mm)最小。此計算結果與 Skamarock and Weisman (2009)之結果相同，但皆低於觀測之全台平均雨量(662.6 mm)，這可能與未做颱風渦旋植入、颱風強度偏弱、及模擬颱風路徑偏北誤差等因素有關。3 種平流方案中最大平均雨量與最小平均雨量相差高達 15%，此誤差雖然不大，但是我們檢討降水預報可能誤差時，卻往往忽略了平流方案計算誤差可能的影響。顯示不同方案間仍會造成相當程度的影響。

研究顯示只要颱風路徑預報正確，風雨分布主要型態大致已被地形鎖定(Wu and Kuo 1999)。因此利用資料庫歸類出各類侵台颱風路徑、登陸地點與風雨分布之統計相關，並配合類比法進行風雨預報應可扮演重要之角色。而利用衛星 (圖 19)、雷達、高解析度模擬結果等進行颱風風雨預報，以及藉由觀測及模式增進台灣地形對颱風影響之瞭解亦是應當努力之方向。

(三) 柯尼颱風所扮演的角色

另外利用 MM5 v3.7 模式進行莫拉克颱風模擬研究，使用 bogus data Assimilation (BDA) (Wu

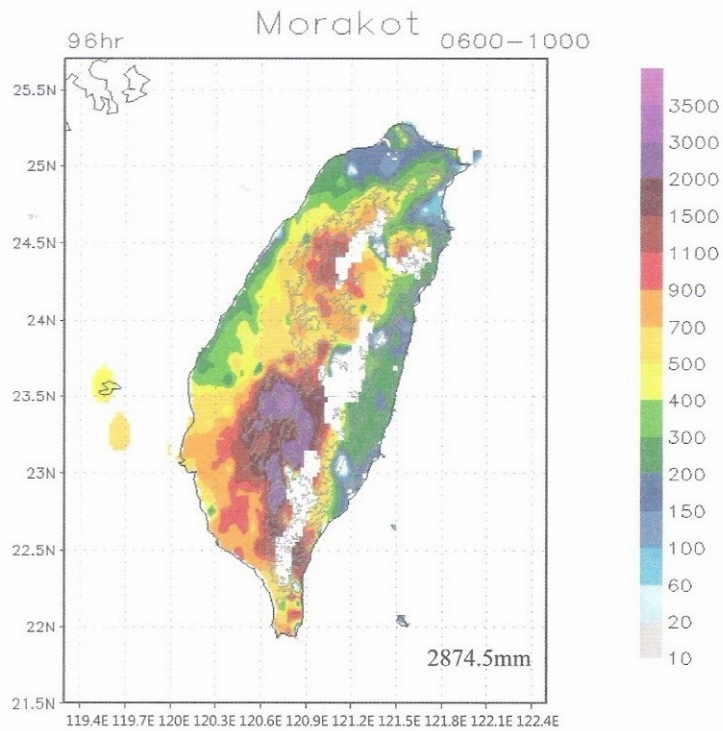


圖 15 莫拉克颱風侵台期間 4 天(2009 年 8 月 6 日 0000 UTC 時到 8 月 10 日 0000 UTC 時)的觀測累積雨量，單位為毫米(mm)，圖右下方之數字為最大觀測累積雨量。

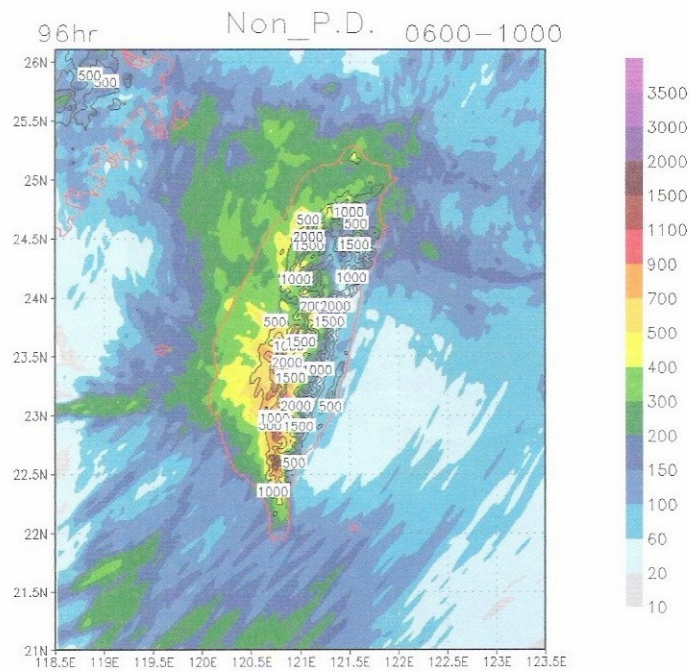


圖 16 WRF 模式使用傳統非正定(Non-PD)方案，模擬莫拉克颱風侵台期間 4 天(2009 年 8 月 6 日 0000 UTC 時到 8 月 10 日 0000 UTC 時)的累積雨量，單位為毫米(mm)，圖右下方之數字為最大模擬累積雨量。

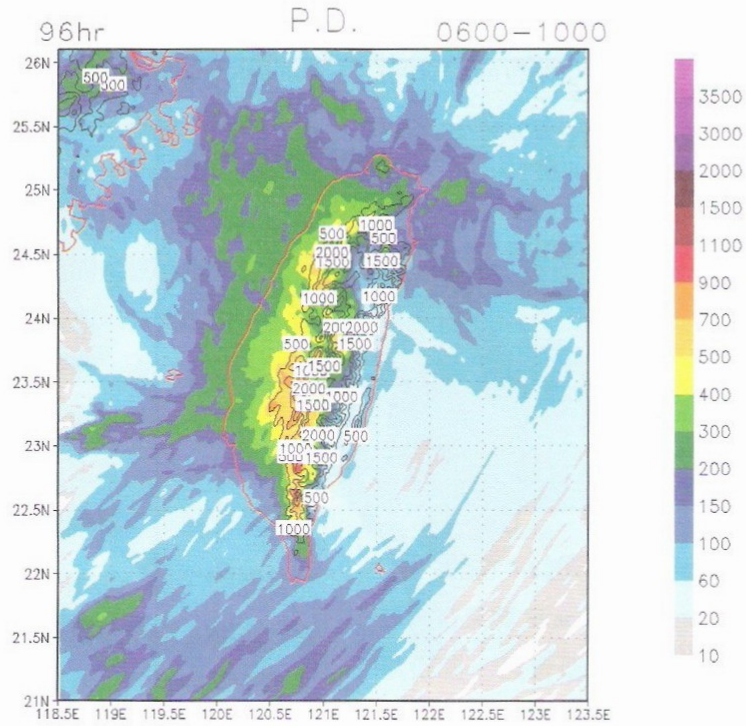


圖 17 WRF 模式使用正定(PD)方案，模擬莫拉克颱風侵台期間 4 天（2009 年 8 月 6 日 0000 UTC 時到 8 月 10 日 0000 UTC 時）的累積雨量，單位為毫米(mm)，圖右下方之數字為最大模擬累積雨量。

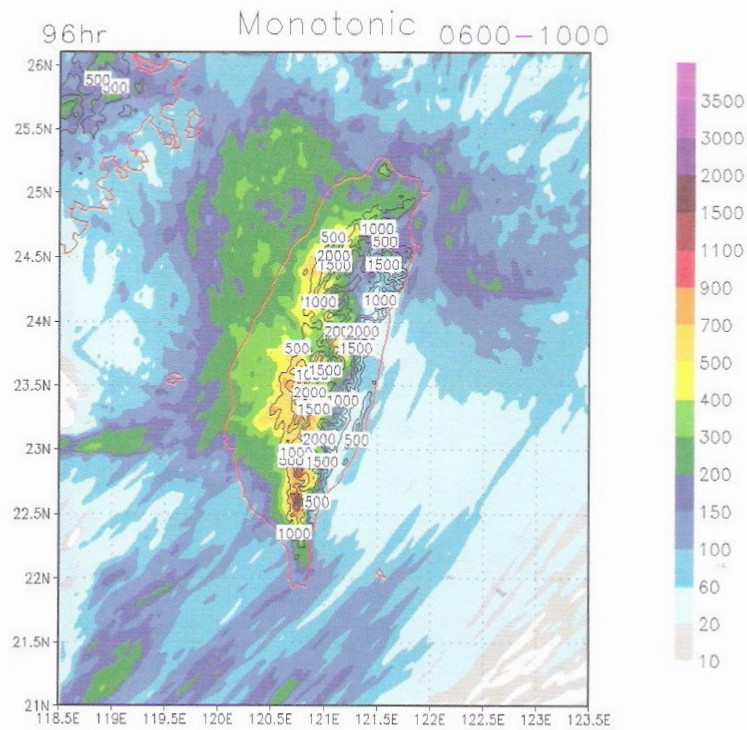


圖 18 WRF 模式使用單調(Monotonic)計算方案，模擬莫拉克颱風侵台期間 4 天（2009 年 8 月 6 日 0000 UTC 時到 8 月 10 日 0000 UTC 時）的累積雨量，單位為毫米(mm)，圖右下方之數字為最大模擬累積雨量。

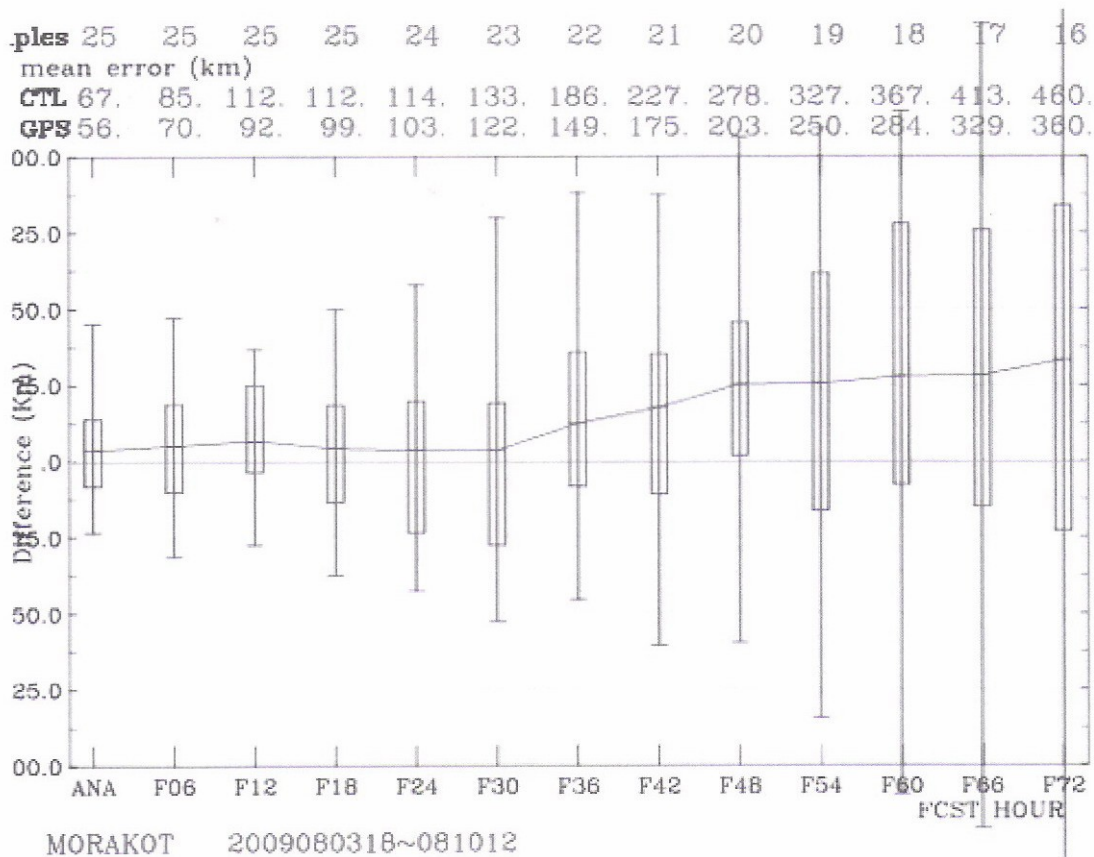


圖 19 福衛三號 GPSRO 資料改善莫拉克颱風路徑數值預報誤差圖。

et al. 2006) 的技術來減弱與莫拉克颱風同時存在的柯尼 (Goni) 颱風，檢視柯尼颱風在此次豪雨中所扮演的角色。

圖 20a、c 為 MM5 原先模擬之第三天降水量及三天累積降水量，圖 b、d 則顯示當柯尼颱風減弱後，南台灣的西南氣流也跟著明顯減弱，導致台灣地區最大總累積降水大幅減少至原本的三分之二約 1734 mm 左右。另外一個實驗則去除台灣的中央山脈，發現南台灣的降水亦明顯減少 (圖未示)，此結果指出柯尼颱風與中央山脈在此次莫拉克颱風所造成南部地區豪雨的事件中扮演重要角色。

圖 21 則為莫拉克颱風侵台時(8月8日 0000

UTC) 與離台後 (8月9日 0000 UTC) 中、低層各 6 個空氣塊的軌跡圖。明顯可見 8 日時空氣軌跡還是明顯的氣旋環流，但當颱風離開台灣陸地進入台灣海峽後，空氣軌跡明顯改為西南氣流型態。因此柯尼颱風所供應的水氣及中央山脈所造成的迎風面效應，都隨著西南氣流造成台灣中南部地區數日的超級豪雨。

有鑑於此，有關颱風的數值預報重點，依次包括路徑、強度與結構及降水和風力分布。颱風模式之選取則依研究目的而定，但不論是何種模式，四維資料同化及颱風初始化之發展都是非常重要之一環。此外，系集預報之發展、解析度之選取、改善模式的物理參數方案及數值平流方

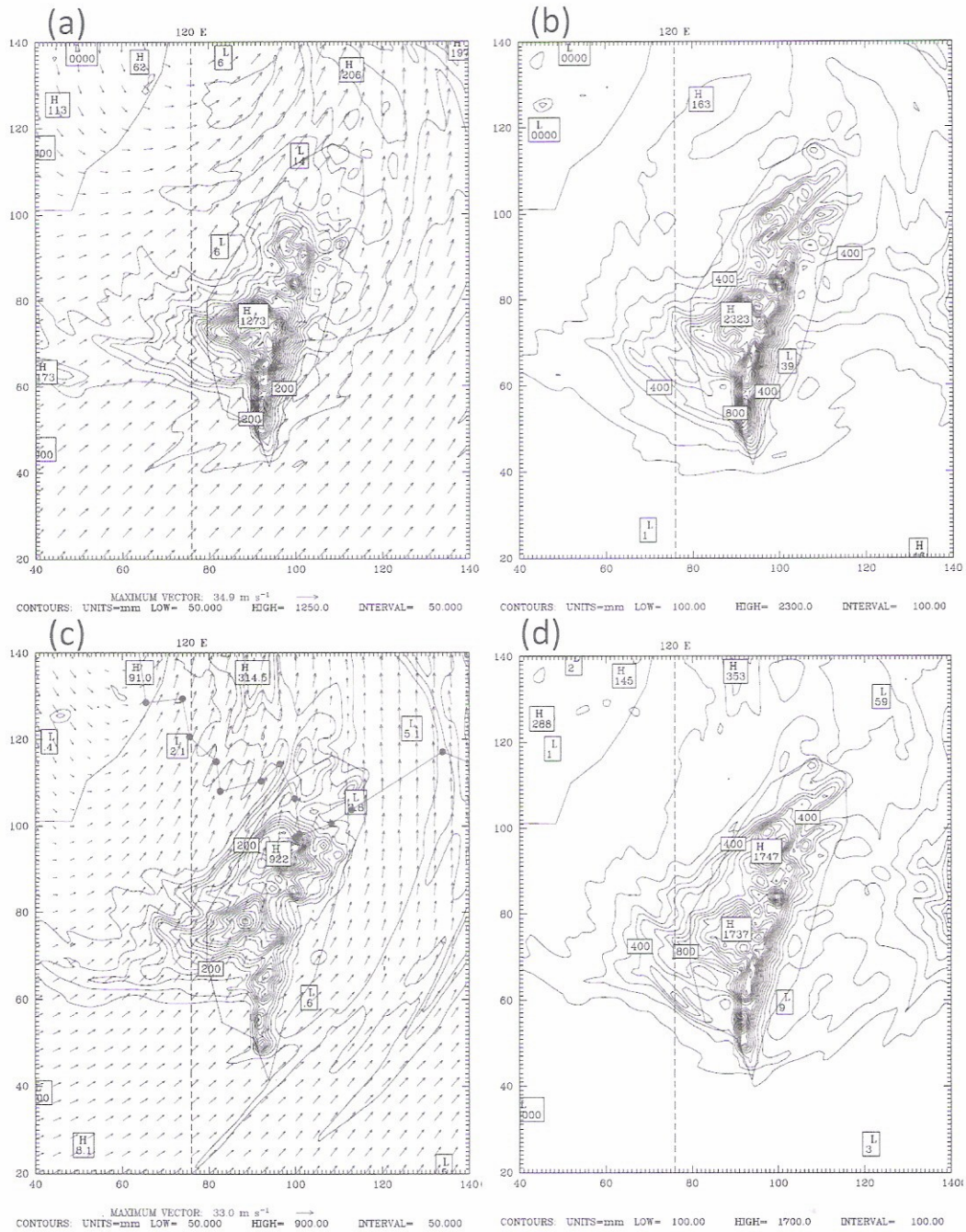


圖 20 MM5 模擬之(a)第三天, 及(b)三天雨量總和 (mm) 及當減弱 Goni 颱風後, MM5 模擬之(c)第三天, 及(d)三天雨量總和(mm); 另外圖(c)圓點實線為莫拉克颱風的路徑及在第 72 小時的近地表風場也疊加在圖(a)、(c)上。雨量間距為 50 mm。

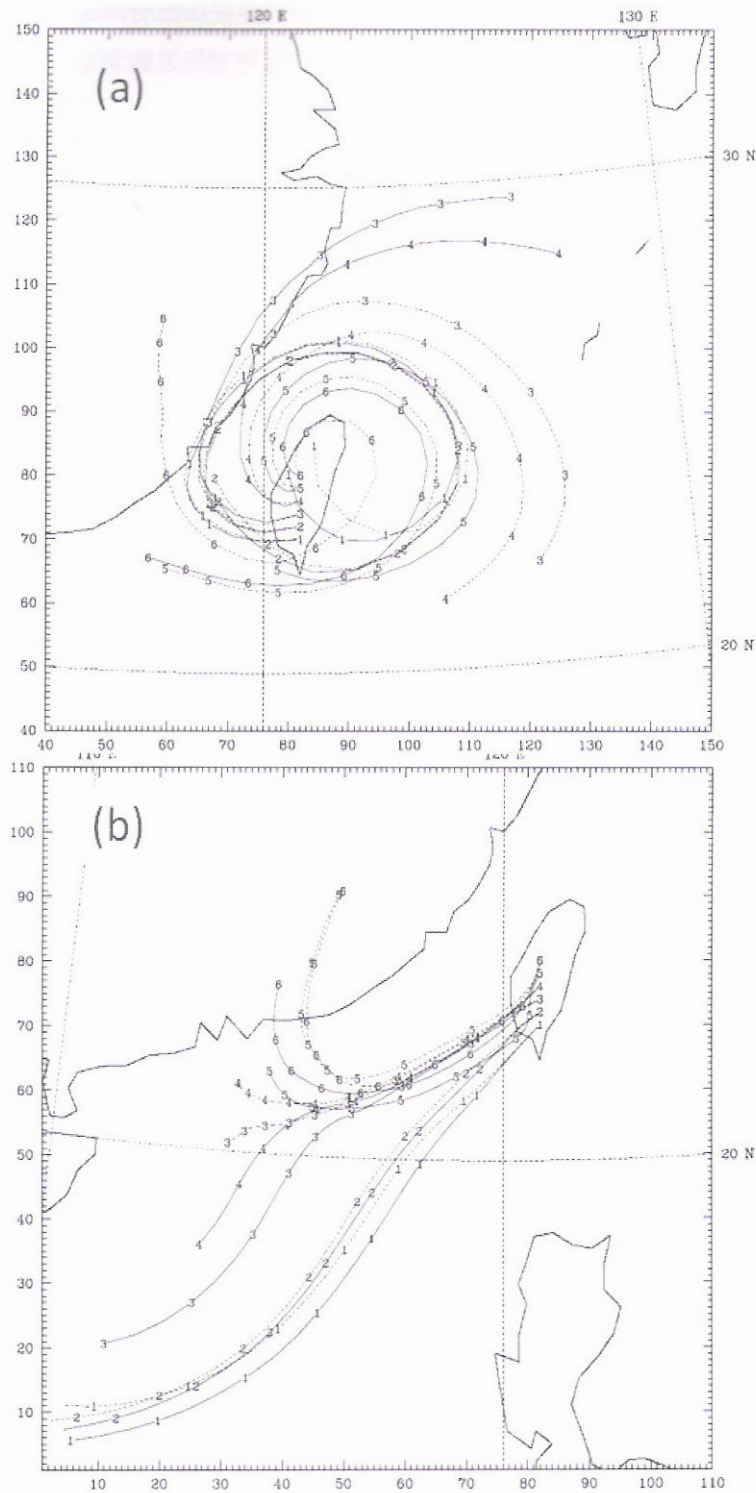


圖 21 (a)模式反推 2009 年 8 月 8 日 0000 UTC 最低層高度 (約 160 m) 六空氣塊的軌跡 (實線) 及距地表約 1 公里高度的另六空氣塊的軌跡 (虛線); (b)同(a)但時間為 2009 年 8 月 9 日 0000 UTC。

法、藉由不同模式之比較以改進現有之颱風模式等，亦是值得繼續深入研究之重點。

結語

在颱風之數值模擬預報研究中，透過數值模式之改進、資料同化及渦旋植入等技術的發展，配合衛星(Chou et al., 2008; Huang et al. 2010)、飛機(Wu et al. 2005, 2007b; Yamaguchi et al. 2009)與雷達(Liou et al. 2006)觀測資料的運用，可以提升颱風路徑預報的準確度。然而，其他颱風相關預報，如強度、結構、降水等，在多種大氣尺度與物理因素的交錯影響下，仍具有一定的困難度。

莫拉克颱風(2009)於侵台期間帶來將近 3000 公釐的豪大雨，造成高屏地區的洪水氾濫以及土石流，導致超過 700 人的死亡，台灣南部居民之生命及財產損失十分慘重。對於莫拉克颱風登陸期間降水預報低估的原因很多，舉其要者包括有模式在颱風登陸前無法確切掌握颱風移速，導致颱風迅速通過台灣而造成模式預報的雨量不足、地形因素、模式水氣含量低估、廣大洋面上資料缺乏，造成環境流場的模擬與實際有很大差異等。

有關颱風的數值預報重點，包括路徑，強度與結構，及降水和風力分布等項目。颱風模式之選取則依研究目的而定，但不論是何種模式，資料同化及颱風初始化之發展都是非常重要之一環。此外，系集預報之發展、解析度之選取、改善模式的物理參數化方案及數值平流方法、藉由不同模式之比較以改進現有之颱風模式等，亦是值得吾人繼續深入研究之重點項目。

現今研究颱風的科學家正努力發展更經濟且有效的颱風觀測技術，在現有觀測系統中，除傳統觀測資料外，衛星、雷達、加密之探空、ISS

整合探空系統(Integrating Sounding System)等都是目前已建置好之觀測系統。在未來幾年內台灣應加強更完善的颱風觀測站網，這些站網應包括都卜勒雷達網、探空及地面站網以及整合探空系統及甚高頻雷達網(Very High Frequency, VHF)等。由於颱風生命期主要在海面，但海面上之觀測資料稀少且獲得不易，因此在未來台灣應研究及開發如何進一步使用低軌衛星 Scatterometer 的海面風場觀測、SSM/I 資料、IR/VIS 資料、AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)資料等，以應用於颱風中心定位及颱風強度與結構的判定。而雷達部份除了雷達觀測網之架設外，如何利用雷達資料反演風場、估計降雨等，都是有待開發及評估之技術。同時，探空資料及 ISS 風場資料之整合對於特殊現象之瞭解亦都有實質之幫助。此外，如何利用觀測資料改善模式初始場也是非常重要的議題，此即為資料同化的技術，與動力過程和數學方法有密切關係。未來，我們期望透過更多寶貴的颱風資料，增加對於颱風內部結構的瞭解，並發展資料同化方法及系集預報技術，以進一步改善颱風數值模式的預報能力；另外針對颱風基本學術原理之研究也正在進展中，並加強與國外研究機構之合作，交換颱風模式系統發展經驗以改善國內現有之颱風預報系統，以不斷地嘗試改良颱風數值預報模式為著眼，期望能使颱風的預報技術得以達到更完善的境地。

總之，目前有關颱風數值模式之模擬與預報仍受限於：颱風動力及物理原理不完整、多重時間與空間尺度交互作用、觀測資料不完整及不易同化、台灣複雜地形的影響、海洋與颱風交互作用等問題，無論是路徑、強度/結構、以致於風雨分布之預報皆有其誤差與極限。我們認為未來颱風

風數值模式仍有許多需要積極改進與突破重點方向，特別是特殊觀測的強化（風場、水氣、雨滴特性）、颱風模式的改進：包含動力架構、物理參數化方案、以及有效模式解析度等部份、颱風初始化及資料同化、系集預報的發展、及地形影響與海氣交互作用的回饋。相信這些議題的開拓，可為颱風數值模式之模擬與預報的進展帶來更多突破。

致謝

感謝國科會 NSC98-2111-M-002-008-MY3 之支持。另特別感謝本文系集預報實驗中許多成員（包括台大周仲島教授、中大林沛練教授、及防災科技中心和颱風洪水研究中心）所提供相關模擬成果，以及中央氣象局張美玉小姐協助部份資料分析與繪圖。

參考文獻

- 黃怡瑄，2008：島嶼地形影響颱風偏轉及打轉之機制研究。國立台灣大學，大氣科學研究所，碩士論文，共 76 頁。
- Bender, M. A., R. E. Tuleya, and Y. Kurihara, 1987: A numerical study of the effect of island terrain on tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 130-155.
- Chang, S. W., 1982: The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 115-122.
- Chien, F.-C., Y.-H. Kuo, and M.-J. Yang, 2002: Precipitation forecast of the MM5 in Taiwan area during the 1998 Mei-Yu season. *Wea. Forecasting*, **17**, 739-754.
- Chien, F.-C., Y.-C. Liu, and C.-S. Lee, 2008: Heavy rainfall and southwesterly flow after the leaving of Typhoon Mindulle (2004) from Taiwan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 17-41.
- Chou, K.-H., C.-C. Wu, P.-H. Lin, and S. Majumdar, 2009: Validation of QuikSCAT wind vectors by dropwindsonde data from DOTSTAR. *J. Geophys. Res.*, **115**, D02109, doi:10.1029/2009JD012131.
- Huang, C.-Y., Y.-H. Kuo, S.-Y. Chen, C.-T. Terng, F.-C. Chien, P.-L. Lin, M.-T. Kueh, S.-H. Chen, M.-J. Yang, C.-J. Wang, Anisetty S. K. A. V. Prasad Rao, 2010: Impact of GPS radio occultation data assimilation on regional weather predictions. *GPS Solutions*, **14**, 35-49.
- Jian, G.-J., and C.-C. Wu, 2008: A numerical study of the track deflection of supertyphoon Haitang (2005) prior to its landfall in Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 598-615.
- Lander, M. A., 1994: Description of a monsoon gyre and its effects on the tropical cyclones in the Western North Pacific during August. *Wea. and Forecasting*, **9**, 640-654.
- Lin, I.-I., C.-C. Wu, F. Pam, and D.-S. Ko, 2008: Upper ocean thermal structure and the western North Pacific category-5 typhoons. Part I: Ocean features and category-5 typhoon's intensification. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3288-3306.

- _____, C.-H. Chen, I.-F. Pun, W. T. Liu., and C.-C. Wu, 2009: Warm ocean anomaly, air sea fluxes, and the rapid intensification of tropical cyclone Nargis. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L03817, doi : 10.1029/2008GL035815.
- Liou, Y.-C., T.-C. Chen Wang, W.-C. Lee, and Y.-J. Chang, 2006: The retrieval of asymmetric tropical cyclone structures using Doppler radar simulations and observations with the extended GBVTD technique, *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1140-1160.
- Schaefer, J. T., 1990 : The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570-575.
- Skamarock, W. C., and M. L. Weisman, 2009: The impact of positive-definite moisture transport on NWP precipitation forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 488-494.
- Wu, C.-C., and Y.-H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan: current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67-80.
- _____, 2001: Numerical simulation of Typhoon Gladys (1994) and its interaction with Taiwan terrain using the GFDL hurricane model. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1533-1549.
- _____, T.-H. Yen, Y.-H. Kuo, and W. Wang, 2002: Rainfall simulation associated with typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: the topographic effect. *Wea. and Forecasting*, **17**, 1001-1015.
- _____, P.-H. Lin, S. Aberson, T.-C. Yeh, W.-P. Huang, K.-H. Chou, J.-S. Hong, G.-C. Lu, C.-T. Fong, K.-C. Hsu, I.-I. Lin, P.-L. Lin, C.-H. Liu, 2005: Dropsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR): An overview. *Bulletin of Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 787-790.
- _____, K.-H. Chou, Y. Wang, and Y.-H. Kuo, 2006: Tropical cyclone initialization and prediction based on four-dimensional variational data assimilation, *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2383-2395.
- _____, C.-Y. Lee, and I.-I. Lin, 2007a: The effect of the ocean eddy on tropical cyclone intensity. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 3562-3578.
- _____, K.-H. Chou, P.-H. Lin, S. Aberson, M. S. Peng, and T. Nakazawa, 2007b: The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasting in DOTSTAR. *Wea. and Forecasting*, **22**, 1157-1176.
- _____, K. K. -W. Cheung and Y.-Y. Lo, 2009a: Numerical study of the rainfall event due to interaction of typhoon Babs (1998) and the northeasterly monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2049-2064.
- _____, K. K.-W. Cheung, J.-H. Chen, and C. C. Chang, 2009b: The impact of tropical storm Paul (1999) on the motion and rainfall associated with tropical storm Rachel (1999) near Taiwan. *Mon. Wea. Rev.* (in press)
- _____, Guo-Yuan Lien, Jan-Huey Chen, and Fuqing Zhang, 2009c: Assimilation of tropical cyclone track and structure based on the Ensemble

- Kalman Filter (EnKF). *J. of Atmos. Sci. (in revision)*
- Yamaguchi, M., T. Iriguchi, T. Nakazawa, C.-C. Wu, 2009: An observing system experiment for Typhoon Conson (2004) using a singular vector method and DOTSTAR data. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2801-2816.
- Yang, M.-J., and Q.-C. Tung, 2003: Evaluation of rainfall forecasts over Taiwan by four cumulus parameterization schemes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 1163-1183.
- _____, Ben J.-D. Jou, S.-C. Wang, J.-S. Hong, P.-L. Lin, J.-H. Teng, and H.-C. Lin, 2004: Ensemble prediction of rainfall during the 2000-2002 Mei-Yu seasons: Evaluation over the Taiwan area. *J. Geophys. Res.*, **109**, D18203. doi:10.1029/2003JD004368.
- _____, and L. Ching, 2005: A modeling study of Typhoon Toraji (2001): Physical parameterization sensitivity and topographic effect. *Terr., Atmos., and Oceanic Sci.*, **16**, 177-213.
- Yeh, T.-C., and R. L. Elsberry, 1993a: Interaction of typhoons with the Taiwan orography. Part I: Upstream track deflections. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3193-3212.
- _____, and R. L. Elsberry, 1993b: Interaction of typhoons with the Taiwan orography. Part II: Continuous and discontinuous tracks across the island. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3213-3233.

Typhoon Morakot (2009) and a Special Review on the Current Status and Future Challenge of Tropical Cyclone Simulation

Chun-Chieh Wu¹ Ching-Yuang Huang² Ming-Jen Yang²
Fang-Ching Chien³ Jing-Shan Hong⁴ Tzu-Hsiung Yen¹

¹ National Taiwan University

² National Central University

³ National Taiwan Normal University

⁴ Central Weather Bureau

(manuscript received 6 May 2009 ; in final form 10 July 2009)

ABSTRACT

In the past 30 years, with the progress in computational power, the numerical weather forecast has developed rapidly. The advancement in data assimilation and bogusing has tremendously improved the model initialization of tropical cyclone (TC) structures and together with the extensive application of remote sensing (satellite, airplane observation, and radar), the accuracy of the forecast of TC tracks has steadily improved.

Nevertheless, except for TC motion, the complex multiple-scale physical processes essentially limit the predictability of TC intensity, structure and precipitation. In 2009, Typhoon Morakot devastated Taiwan with torrential rain of nearly 3,000 mm which led to the flooding and mudslides in southern Taiwan (Kaohsiung and Pingtung County) and caused over 700 dead and the significant loss of properties. The underestimation of precipitation of Typhoon Morakot could be attributed in several factors. First, the incorrect forecast of translation speed before making landfall and an underestimation of rainfall related to topographic effect. Second, poor moisture content prediction in the forecast model may have taken another role. Third, sparse observation data over the ocean degraded the simulated environmental flow and contributed to a biased simulation.

It is recommended that the numerical forecast of TCs should focus on tracks, intensity and structure and the distribution of precipitation and gale force wind. Although the TC models chosen depends on the purpose of the research, the development of vortex initialization and data assimilation is an important step in every model. In addition, the advance in ensemble prediction, the selection of resolution and parameterization of physical processes are issues worth of further investigation. Systematic comparison of different models, better understanding of the effect of topography and the air-sea interaction could improve the present models and are subjects of primary research interest.

Key Words: Numerical simulation, Typhoon Morakot(2009), Vortex initialization, Data assimilation, Ensemble forecast