

渦旋植入對不同降水物理參數法颱風路徑系集預報之影響研究

周昆炫¹ 黃柏智²

¹中國文化大學大氣科學系

²中國文化大學地學研究所大氣科學組

(中華民國九十九年八月十三日收稿；中華民國九十九年十二月三十日定稿)

摘 要

本研究使用 WRF 模式，選用四種不同積雲參數法及微物理參數法組合成 16 種不同降水物理過程產生路徑系集預報，並與世界主要全球預報模式 NCEP、JMA、UK 和 EC 等比較優劣。此外，由於目前全球模式資料所解析之颱風強度仍不足，本研究中額外使用渦旋植入法來加強颱風的初始強度，以期得到較佳的強度模擬，並比較較佳初始強度下所模擬的路徑系集預報有何差異。另外，特別分析不同降水物理過程參數法對於颱風強度、結構與路徑模擬之影響。

在沒有使用渦旋植入實驗中的研究結果顯示，不同降水物理過程參數法組合所得到的路徑系集預報，可產生扇形的路徑分布，可視為颱風未來移動方向的參考依據。此外，當積雲參數法使用 Kain-Fritsch 時的四組參數法組合，可以產生最佳的路徑系集預報；而積雲參數法選擇 Kain-Fritsch 及微物理法選擇 WSM3 時則可以獲得最小平均路徑誤差，為未使用渦旋植入模擬中最佳降水物理參數法之組合。另外，在使用渦旋植入實驗中的研究結果顯示，選用 Grell-Devenyi 積雲參數法及 WSM3 微物理參數法時可以得到最小平均路徑誤差，可作為渦旋植入後最佳之降水物理參數法組合。根據有無渦旋植入的路徑誤差分析顯示，當模式初始場中使用渦旋植入後，可有效縮小系集預報路徑的分布，並對於預報後期之路徑預報可有效改善。

至於在比較不同降水物理參數法所模擬之颱風強度、結構與環境流場分析顯示，當積雲參數法使用 KF 時可有效且快速加強颱風強度與大小，並容易偏北移動且移動速度較快；而當微物理參數法使用 Kessler 時，可能導致預報路徑易偏東移動。此結果主要為降水物理參數法對於太平壓高壓環境流場及颱風本身結構具有影響，進而使颱風路徑出現變化。

關鍵字：WRF、颱風路徑系集預報、積雲參數法、微物理參數法

一、前言

颱風是一個跨尺度且相當複雜的劇烈天氣系統，受限於生命期多位於海上而難以得知颱風的綜觀氣象資訊，對於預報上增加不少難度。目前國內、外對於颱風研究日益先進，但仍無法避免颱風路徑預報難以準確的事實。因此，本研究將使用改變與降水物理過程相關之參數法進行颱風路徑系集預報。

在 WRF 模式發展前，即已有許多使用 MM5 模式來進行颱風模擬研究，如：喬等(1996)使用 MM5 模式以黛特颱風(1990)作為研究個案，結果顯示對於路徑模擬有不錯的掌握。Liu et al. (1997, 1999)也使用 MM5 模式針對 Andrew 颶風(1992)的路徑、強度及結構進行模擬研究。李與林(1999)亦使用 MM5 模式對歐菲莉颱風(1990)進行研究，對其路徑模擬大致與實際觀測相近。周等(2001)則使用 MM5 模式針對瑞伯颱風(1998)來探討地形對颱風移動路徑、颱風強度演變、降雨分佈影響的模擬探討。後續研究，Wu et al. (2003, 2009)則特別針對瑞伯颱風的內部眼牆結構受地形影響下眼牆在登陸前內縮離陸後外擴的數值模擬探討與相關動力診斷分析。

近年來，許多研究使用數值模擬方式，利用降水物理過程相關之參數法對氣象預報進行校驗，例如：青(2003)與 Yang et al. (2005)使用 MM5 模式，以桃芝(2001)颱風為研究個案，針對不同

的積雲參數法、微物理參數法及邊界層參數法對颱風路徑做測試，發現積雲參數法以 Grell 參數法最佳，微物理參數法則是 Goddard Graupel 微物理參數法表現最好，邊界層參數法則以 MRF 參數法對於模擬桃芝颱風之路徑較佳；而在強度模擬中發現微物理參數法 Warm Rain 可獲得最大強度模擬，其原因在於雨滴的終端速度較快且集中於眼牆附近，滿足靜力平衡條件下可產生較小之中心氣壓。簡等(2003)使用 MM5 模式測試發現 Grell 積雲參數法與 Resiner I 微物理過程的物理組合方式對於梅雨季降水有較好表現；簡等(2005)亦使用 MM5 模式研究發現梅雨季數值模擬比較適合使用 GFS 初始場，搭配 Grell 參數法與 Mixed-phase 或 Goddard 微物理方法組合。洪等(2006)以 WRF 模式於東亞地區進行數值天氣預報，發現就探空站上的氣象場校驗而言，邊界層參數法使用 YSU，微物理參數法使用 WSM 5-class，積雲參數法使用 Kain-Fritsch 為最佳的物理參數法組合。而在定量降水預報校驗中，台灣地區應以 Kain-Fritsch 積雲參數法，WSM 5-class 微物理參數法與 YSU 邊界層參數法的物理組合為首選，但台灣地區大雨模擬的物理設定則以 Grell-Devenyi 積雲參數法為首選。

而針對颱風路徑預報誤差也有所研究，如：黃等(2006)使用 EOF 分析可以客觀顯示環境流變化之方向，可用於輔助對颱風路徑預報誤差之了解；黃等(2007)亦使用 WRF 3DVAR 將 CHAM

GFS 掩星觀測折射率資料及傳統觀測資料同化於 WRF 模式，針對敏督利(2004)颱風及海棠(2005)颱風進行模擬，其結果顯示加入多種衛星資料對於預報模擬有正面效應。簡等(2008)透過 WRF 3DVAR 的方法，同化近似三維分佈的投落送資料及二維分佈的 QuikSCAT 資料進行模擬，其結果顯示可以確實掌握颱風及梅雨鋒面的環境訊息，對於颱風路徑預報及梅雨鋒面的水氣掌握有一定程度的影響。

系集預報、季氣候模擬及預報技術的發展亦於近年成為研究及數值天氣預報相當重要的議題。最初是使用增加擾動的方法改變初始條件以提供較多的預報成員進行系集預報，其方法包括：breeding of growing modes (Toth and Kalnay 1993)、特徵向量 (Buizza and Palmer 1995；Molteni et al. 1996)以及 Monte Carlo 近似(Mullen and Baumhefner 1988；Houtekamer and Derome 1995；Du et al. 1997)……等，並使用此概念進行熱帶氣旋相關研究，如 Aberson et al. (1995)以 NCEP 的系集成員作為初始條件，使用 VICBAR 正壓模式對大西洋颶風進行預報；Morison et al. (1996)應用 Monte Carlo 近似的方法於西南太平洋上的熱帶氣旋，關注其登陸的可能性；Vitart et al. (1997)也使用 Monte Carlo 近似的技術於 GCM 中模擬熱帶氣旋之旋生在年際的變化。而近期的研究如：Krishnamurti et al. (1999, 2000a,b, 2001, 2003)進行一系列多模式(multimodel)系集預報，並以超級系集預報方法改善了天氣預報及季氣候模擬；而 Kumar et al. (2003)亦使用超級系集預報的方法，在模式訓練階段系統地移除多模式的偏差並使用於預報階段，對於颱風路徑、強度的預報可有所改善，在此研究中也指出此法對於天氣及季氣候預報有一定貢獻。

Fovell et al. (2007)使用 WRF 模式針對 2005 年襲擊美國南部的 Rita 颶風進行模擬，利用改變積雲參數法及雲微物理參數法得到不同降水物理過程之組合，可得到颶風路徑系集預報，與美國國家颶風中心(National Hurricane Center)所發布之多種模式預報之結果相近，產生颶風可能侵襲的範圍。其研究指出，微物理參數法對於颶風的特徵有直接或間接的影響，如颶風半徑的大小、強度及其移動；積雲參數法對於模擬颶風的維持和發展具有幫助；Fovell et al. (2009)的研究亦指出，不同的降水物理過程會改變雲中粒子的終端速度，對暴風半徑外的風具有影響；而微物理參數法可調節溫度梯度進而得到較大的氣壓梯度，產生引導風暴移動的氣流。Mark et al. (2008)亦利用 2002 及 2003 年東太平洋及大西洋作為熱帶氣旋的 training sets，而後用於 2004 年東太平洋預報中，此超級系集預報結果可有效改善颶風強度及路徑預報。Elsberry et al. (2008)則是依據系集預報路徑與實際颱風路徑比較，決定出權重的方法，發展出權重定位及權重移動向量的技術，可有效增進颶風或颱風的路徑預報。

由上述的文獻回顧中可以發現，MM5 模式對於颱風路徑模擬具有不錯的掌握。在模式中使用與降水物理過程相關的參數法，包括積雲參數法、微物理參數法等，對於氣象預報之提升與颶風路徑預報具有貢獻。而在颱風路徑預報研究中使用 WRF 3DVAR 同化特殊衛星資料亦可有效減少路徑預報誤差。雖然青(2003)利用改變不同參數法可以得到較佳的颱風路徑，但在國內研究中卻未有使用不同降水物理過程相關的參數法組合進行颱風路徑之系集預報。因此，本研究使用 Fovell et al. (2007, 2009)的研究概念，嘗試找出適合台灣地區不同降水物理參數法組合下的颱風路

徑系集預報。此外，本研究亦將使用渦旋植入的程序於模式初始場中，藉以改進初始場中颱風強度明顯低估的現象，並探討此方法造成颱風路徑系集預報的差異。

本研究使用 WRF 模式，選用 16 組不同降水物理過程的參數法組合進行系集預報，並與世界主要的全球預報模式比較，藉以評估不同降水物理過程參數法所產生的系集路徑預報成效。研究中針對 2008 年襲臺的辛樂克颱風與蕃蜜颱風做為模擬個案，由於兩颱風個案皆為亞太區觀測系統研究及預報實驗 (The WMO/WWRP Observation System Research and Predictability Experiment Pacific-Asian Regional Campaign, T-PARC) 的主要觀測研究個案，且國內又有追風計畫[侵台颱風之飛機偵察及投落送觀測實驗 (Wu et al. 2005, 2007)] 進行飛機投落送資料觀測，因此兩個案在數值模擬上的表現值得深入分析與研究。

二、個案介紹

(一) 辛樂克颱風綜觀介紹

圖 1a 為中央氣象局辛樂克颱風路徑圖。2008 年 9 月 8 日 1800 UTC，原位於菲律賓東方海面的熱帶性低氣壓增強為輕度颱風，由東京颱風中心正式命名為 Sinlaku，國際編號 0813，中文譯名為辛樂克。形成後由於位於鞍形場，導引氣流偏弱，因此緩慢穩定地朝北北西移動，移向台灣東部海面。9 日 1800 UTC 增強為中度颱風，近中心最大風速 33 m s^{-1} ，中心氣壓降至 970 hPa 。

11 日 0030 UTC，中央氣象局發布海上颱風警報，颱風近中心最大風速增強至 48 m s^{-1} ，中心氣壓降至 935 hPa ，移動速度仍較緩慢且移動方向

略朝東北方擺動，但大致上朝東部海面移進；11 日 0600 UTC，颱風強度增強為強烈颱風，近中心最大風速達到 51 m s^{-1} ，中心氣壓亦降至 925 hPa ，已達到此颱風之強盛期。11 日 2130 UTC 中央氣象局發布海上陸上颱風警報，颱風中心距花蓮東南東方約 350 公里之海面上，颱風仍受鞍形場影響，導引氣流微弱，移速更為緩慢，甚至出現停滯的現象。13 日 0000 UTC，颱風結構受台灣地形破壞，強度減弱為中度颱風；13 日 1750 UTC 左右，由宜蘭縣蘭陽溪附近登陸，並受到地形影響出現第一次路徑打轉的現象，且強度持續弱。14 日 0200 UTC，颱風中心掠過台灣東北角，沿台灣北部近海移動；14 日 0800 UTC，在北部近海出現第二次路徑打轉現象，並在 14 日 1200 UTC 減弱為輕度颱風且移速近似滯留。15 日 0000 UTC 起，逐漸受到颱風北方槽線牽引，開始轉向東北東方移動並加速離開台灣。15 日 1230 UTC 中央氣象局解除台灣本島之陸上颱風警報，16 日 0630 UTC 發布解除颱風警報，總計 43 報。此後颱風持續移向日本，並沿日本南方近海移動。20 日 1200 UTC 於日本東方海面變性為溫帶氣旋，結束長達近 12 天的生命期。

辛樂克颱風侵襲期間，在台灣上空出現少見的兩次打轉的現象，主要是受到台灣地形影響，加上大部分的生命期都處於鞍形場中，導引氣流不明顯所致。也因為導引氣流不明顯，移動速度緩慢，故影響台灣時間長，所帶來的降水相當豐沛，全台各地皆出現豪雨，局部地區更出現超大豪雨，根據中央氣象局解除颱風警報單上所示各地累積雨量，自 11 日 1600 UTC 起至 16 日 0600 UTC 止，台灣中部以北山區累積雨量有超過一千毫米之記錄，因此造成許多災情。

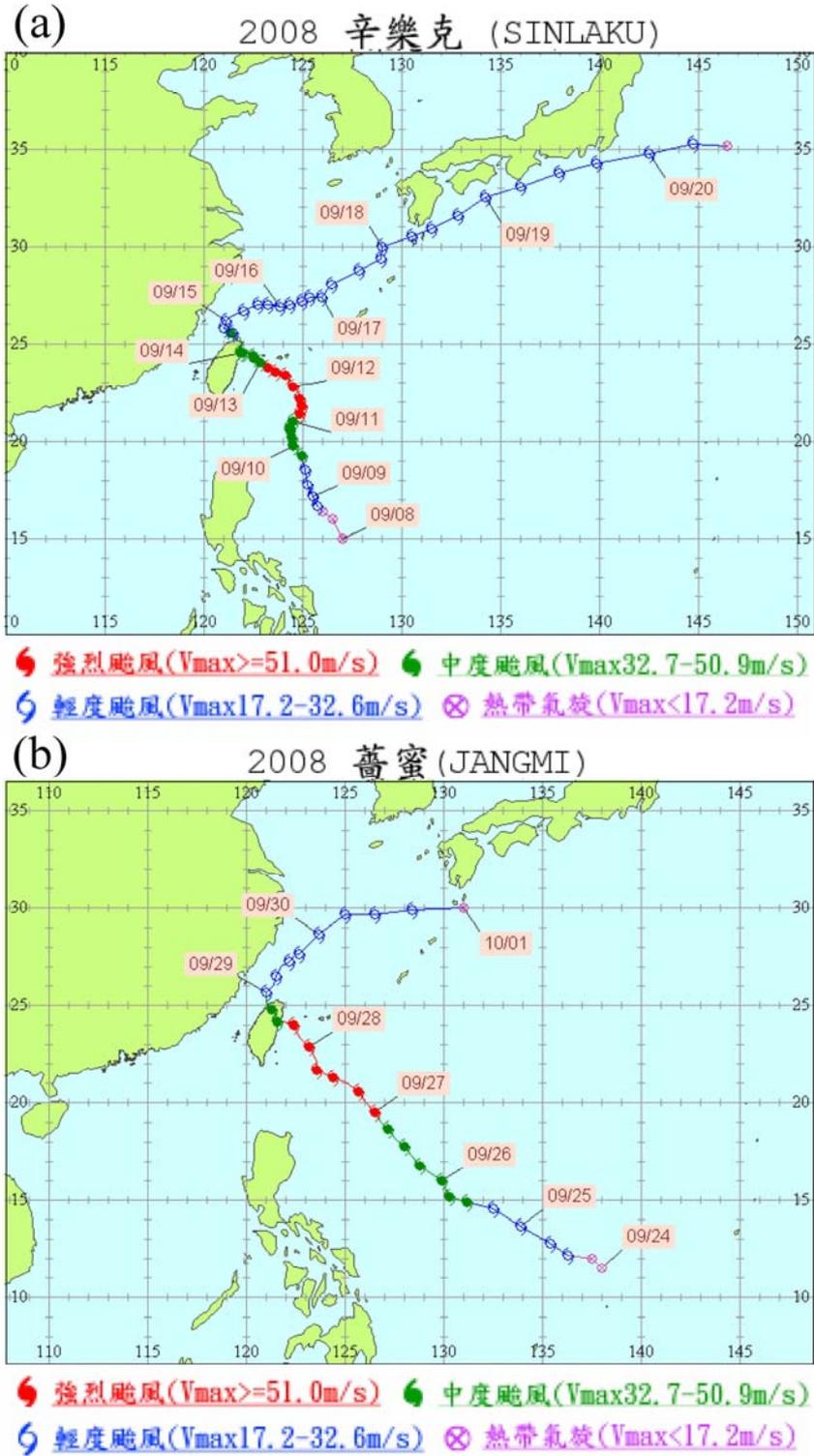


圖 1 中央氣象局分析之颱風路徑圖。(a)2008 年辛樂克颱風；(b)2008 年薔蜜颱風。

(二) 薔蜜颱風綜觀介紹

圖 1b 為中央氣象局薔蜜颱風路徑圖。2008 年 9 月 24 日 1200 UTC，原位於雅浦島 (Yap Islands) 北北西方約 360 公里的熱帶性低氣壓增強為輕度颱風，由東京颱風中心正式命名為 Jangmi，國際編號 0815 號，中文譯名為薔蜜。形成後受到副熱帶高壓的導引，穩定地向西北到西北西方向進行。25 日 1200 UTC 增強為中度颱風，近中心最大風速 33 m s^{-1} ，中心氣壓降至 970 hPa。

26 日 1530 UTC，中央氣象局發布海上颱風警報，此時颱風近中心最大風速 45 m s^{-1} ，中心氣壓降至 940 hPa，持續向台灣東南部近海接近。27 日 0030 UTC，中央氣象局發布海上陸上颱風警報，強度亦增強到強烈颱風，近中心最大風速 51 m s^{-1} ，氣壓再降至 925 hPa；27 日 0300 UTC 達到此颱風之強盛期，近中心最大風速達到了 53 m s^{-1} 。27 日 1200 UTC，薔蜜颱風進入鞍型場中，速度減慢，但仍朝台灣陸地靠近，此後又受到台灣地形影響下，行進方向出現向北北西方向擺動，直指台灣東北部陸地而來，與前一日預測會往台灣南端的看法相異。27 日 2100 UTC 起，薔蜜颱風移速開始加快，向北北西到西北的方向進行，登陸前一刻受到地形作用影響，更以每小時 56 公里的時速於 28 日 0740 UTC 登陸宜蘭南澳附近，蘇澳氣象站測得瞬間最大陣風 62.4 m s^{-1} ，其強度略為減弱，近中心最大風速 51 m s^{-1} ，中心氣壓回升至 930 hPa。28 日 0900 UTC，受地形破壞減弱為中度颱風，近中心最大風速 48 m s^{-1} ，中心氣壓回升至 935 hPa，且移速減慢並出現打轉及短暫停留的現象。此後薔蜜颱風繼續受台灣地形破壞持續減弱。

28 日 1200 UTC 颱風開始向西北到北的方向擺動前進，並於 28 日 2020 UTC 在桃園附近出海，中心停留於陸地的時間超過 12 個小時。29 日 0000 UTC，薔蜜颱風受到北方鋒面牽引，且位於冷水域不利發展下，再減弱為輕度颱風，近中心最大風速 30 m s^{-1} ，中心氣壓回升至 970 hPa，朝向北到東北方向進行，離開台灣。29 日 1530 UTC 中央氣象局解除颱風警報，此時薔蜜颱風強度持續減弱，近中心最大風速為 20 m s^{-1} ，中心氣壓回升至 990 hPa 並繼續向東北方加速移動，移向日本南方海面。9 月 30 日 1800 UTC 於日本九州南方海面變性為溫帶氣旋，結束薔蜜颱風將近 7 天的生命期。

三、資料來源及實驗設計

(一) 資料來源

本研究使用 WRF 模式 (Weather Research and Forecast model) 3.0.1 版針對 2008 年辛樂克颱風與薔蜜颱風進行模擬，並以 2008 年 T-PARC 觀測期間美國國家環境與預報中心 (National Center for Environmental Prediction, NCEP) 之全球預報系統 (Global Forecast System, GFS) 預報場做為模式初始場及邊界場，資料水平解析度為 $1^\circ \times 1^\circ$ ，時間解析度為 6 小時。辛樂克颱風模擬個案的選取為以 2008 年 9 月 9 日 0000 UTC 起，每 12 小時一筆，至 2008 年 9 月 20 日 0000 UTC 止，共進行 21 個不同模式初始時間的模擬，最長預報時間為 120 小時；而薔蜜颱風模擬個案的選取為以 2008 年 9 月 24 日 1200 UTC 起，每 12 小時一筆，至 2008 年 9 月 30 日 1200 UTC 止，共進行 9 個不同模式初始時間的模擬，最長預報時間為 120 小時。

研究中使用美軍聯合颱風警報中心 (JTWC)

所公布之最佳路徑，作為比較颱風路徑預報差異的依據；另外在研究中所使用到之主要全球預報模式 EC、NCEP、UK 及 JMA 等所產生之颱風預報路徑是由中央氣象局提供。

(二) 實驗設計

1. 巢狀網格設計

本研究使用兩層巢狀網格進行數值模擬，外

層解析度為 45 公里、內層則為 15 公里。投影法選用藍伯特投影法，不變形緯度為分別為北緯 10 度及 30 度，投影中心位在北緯 28 度，東經 120 度。外層粗網格範圍主要為參考中央氣象局 NFS 有限區域模式解析度 45 公里的範圍所設計，網格數為 227 x 136；內層細網格則以颱風生命期所經過的區域進行設計，辛樂克颱風模擬中採用的網格點數為 280 x 229，如圖 2a 所示；薔蜜颱風模

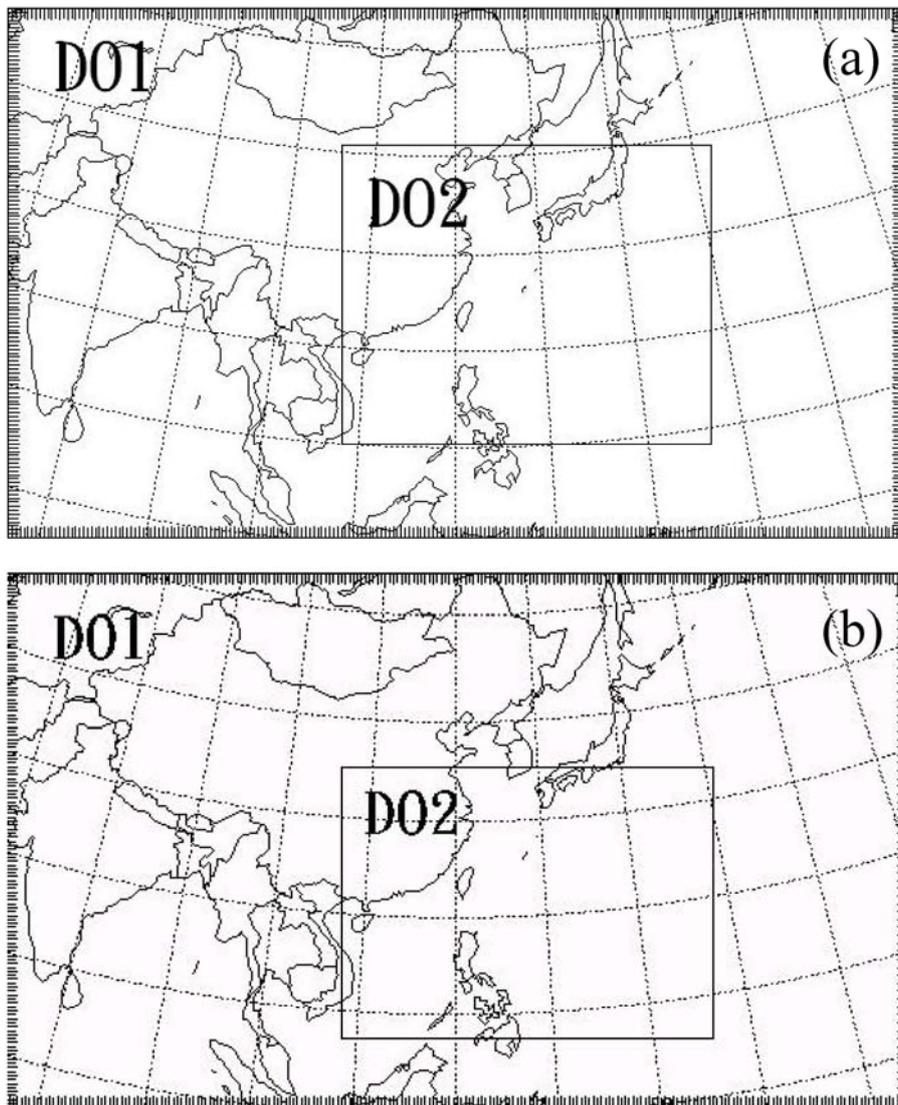


圖 2 WRF 模式巢狀網格設計。(a)辛樂克颱風模擬個案；(b)薔蜜颱風模擬個案。

擬中採用的網格點數為 280 x 208，如圖 2b 所示。模式垂直座標為追隨地勢座標(σ)，共有 28 層，分別為 1.000, 0.990, 0.978, 0.964, 0.946, 0.922, 0.894, 0.860, 0.817, 0.766, 0.707, 0.644, 0.576, 0.507, 0.444, 0.380, 0.324, 0.273, 0.228, 0.188, 0.152, 0.121, 0.093, 0.069, 0.048, 0.029, 0.014, 0.000。

2. 降水物理參數法組合設計

研究中選用 4 種微物理參數法與 4 種積雲參數法組合成 16 種不同降水物理過程參數組合。微物理參數法選用：Kessler、Lin et al. (LFO)、WRF Single moment 3-class (WSM3) 及 WRF Single moment 6-class (WSM6)。Kessler 微物理參數法為包含水蒸氣、雲水及雨水的暖雲降水過程；LFO 為考慮水蒸氣、雲水、雨水、冰、雪及雹的冷雲降水過程；WSM3 則包含水蒸氣、水或冰、雨或雪等 3 種簡易冷雲過程；而 WSM6 則包含水蒸氣、雨水、雪、雲冰、雲水及雹，其中雹產生的過程大部份採用 Lin et al. (1983)，但冰相過程部分採用 Hong et al. (2004) 的方法。另外，積雲參數法選用：Kain-Fritsch (KF)、Betts-Miller-Janjic (BMJ)、Grell-Devenyi (GD) 及 New Grell (NG)。KF 積雲參數法為包含深對流及淺對流的積雲參數法；BMJ 則為一針對深對流發展的積雲參數法；GD 為考慮多個次網格成員的系集平均結果回饋給模式的積雲參數法；而 NG 則與 GD 參數法相似，皆基於系集平均近似，但準平衡近似不再使用於系集成員之中。各實驗之名稱與選用之降水參數法如表 1 所示。

各實驗其他物理過程均維持一致，長波輻射參數使用 RRTM Scheme，短波輻射參數使用 Dudhia Scheme，邊界層物理選用 YSU Scheme。藉由上述各參數法之設計，進行颱風路徑系集預

報。關於 WRF 模式更詳細之動力架構與物理過程介紹可參考 Skamarock et al. (2008)。

表 1 由積雲參數法 (CPs) 與微物理參數法 (MPs) 組成之 16 種降水物理過程參數組合與實驗名稱。另外，實驗名稱後加 b 代表實驗使用渦旋植入於模擬中。

CPs \ MPs	Kessler (1)	LFO (2)	WSM3 (3)	WSM6 (6)
Kain-Fritsch (KF=1)	run11	run12	run13	run16
Betts-Miller-Janjic (BMJ=2)	run21	run22	run23	run26
Grell-Devenyi (GD=3)	run31	run32	run33	run36
New-Grell (NG=5)	run51	run52	run53	run56

3. 渦旋植入法設計

由於 NCEP GFS 預報場解析度仍偏低，模擬出的颱風強度偏弱，不符合國際作業單位分析之強度，因此本研究使用 Chou and Wu (2008) 所提出之概念來進行渦旋植入，以加強初始場之颱風強度，並測試渦旋植入法後對於不同降水物理過程之颱風路徑系集預報的影響。

在渦旋植入過程中，由於初始場中距離颱風中心 600 公里的資料會被取代，因此颱風距離陸地過近時會有無法進行渦旋植入的問題，因此，本研究中只選取兩颱風中心在距離台灣東部海岸線 600 公里以外的時間作為模式的初始時間。辛樂克颱風為 2008 年 9 月 9 日 0000 UTC 起，每 12 小時一筆，至 2008 年 9 月 11 日 1200 UTC 止，共進行 6 個不同模式初始時間模擬，最長預報時間為 120 小時；而薔蜜颱風為 2008 年 9 月 24 日

1200 UTC 起，每 12 小時一筆，至 2008 年 9 月 27 日 0000 UTC 止，共進行 6 個不同模式初始時間的模擬，最長預報時間亦為 120 小時。

由於本研究模式採雙向式網格連結(two-way grid nesting)架構，因此渦旋植入法只使用於解析度較高的第二層網格。本研究中渦旋植入有兩個主要步驟：第一、依照不同時間點的颱風強度植入經驗公式決定的軸對稱渦旋，然後進行 12 小時模式積分，以產生模式 spin up 後滿足模式動力架構之非對稱渦旋結構；第二、將模式初始場之颱風結構由 spin up 之非對稱渦旋結構取代，然後再開始進行模式積分。第一步驟中渦旋植入法所使用的 Rankine vortex 結構，其軸對稱風場依據下列公式定義：

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}, \mathbf{z}) = \mathbf{F}(\mathbf{r})\mathbf{w}(\mathbf{z}) \quad (1)$$

$$F(r) = V_{\max} \frac{r}{R_{\max}}, (r \leq R_{\max}) \quad (2)$$

$$F(r) = V_{\max} \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^\alpha, (r > R_{\max}) \quad (3)$$

式中，以颱風為中心之柱狀座標下的切向風場； $\mathbf{W}(\mathbf{z})$ 為切向風場在垂直壓力層之權重； $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ 為切向風場隨颱風中心距離之變化關係； V_{\max} 為近中心最大風速，實驗中依照颱風強度需求，分別假設 20、30、40、50 及 60 m s⁻¹，並植入原時間點颱風初始場之位置，經過 12 小時模擬使渦旋與環境場平衡後可得到不同強度且與模式平衡之非對稱渦旋結構； R_{\max} 為最大風速之半徑，實驗中設為 80 公里； α 為風速隨半徑遞減指數，實驗中設為 0.7。另外，渦旋植入的第二步驟中，距離中心 300 公里內之資料完全由 spin up 之資料取代，而 300~600 公里則為模式 spin up 資料與初始場資料的簡單線性結合。表 2 為辛樂克及薔蜜颱風渦旋植入前、後颱風中心海平面氣壓表，可與 JTWC 最佳颱風路徑所公布之中心氣壓值比對。

表 2 JTWC 最佳路徑分析與有無使用渦旋植入之颱風中心海平面氣壓（單位：hPa）。

Case	Date	JTWC	Before Bogus	After Bogus
Sinlaku	2008/09/09 0000 UTC	985.0	1004.3	982.3
Sinlaku	2008/09/09 1200 UTC	974.0	999.5	966.8
Sinlaku	2008/09/10 0000 UTC	956.0	995.9	954.1
Sinlaku	2008/09/10 1200 UTC	941.0	992.0	936.6
Sinlaku	2008/09/11 0000 UTC	929.0	988.5	936.7
Sinlaku	2008/09/11 1200 UTC	933.0	983.8	936.6
Jangmi	2008/09/24 1200 UTC	989.0	1004.9	985.8
Jangmi	2008/09/25 0000 UTC	982.0	1001.0	985.8
Jangmi	2008/09/25 1200 UTC	970.0	998.0	968.7
Jangmi	2008/09/26 0000 UTC	956.0	994.7	957.0
Jangmi	2008/09/26 1200 UTC	952.0	991.4	947.2
Jangmi	2008/09/27 0000 UTC	952.0	986.4	940.1

在本實驗中，均選擇渦旋中心之海平面氣壓較接近實際者為植入對象。

四、系集預報路徑分析

(一) 未進行渦旋植入

實驗結果指出，當使用 16 種不同降水物理過程參數法組合可以得到系集預報路徑的分布。此分布所及範圍與中央氣象局所發布之颱風路徑潛勢預測相似，可代表颱風未來可能侵襲的範圍，對於警戒及防災具有參考價值。圖 3a 是以辛樂克颱風 2008 年 9 月 9 日 0000 UTC 為例，可見其系集路徑分布；圖 3b 則為同時間中央氣象局所發布之颱風路徑潛勢預測。圖 3c 是以蕃蜜颱風 2008 年 9 月 24 日 1200 UTC 為例，亦可見其系集路徑分布；圖 3d 則為同時間中央氣象局所發布之颱風路徑潛勢預測。

圖 4 為各實驗在 24、48、72 小時的平均路徑誤差圖，統計個案數總共為 30 個。計算結果顯示當選擇 KF 積雲參數法及 WSM3 微物理參數法作為組合時，即 run13 實驗，可以獲得最小的平均路徑誤差，是為最佳參數法組合；此外，當積雲參數法選用 KF 的各實驗中，可以明顯看出其路徑誤差遠比選用其他積雲參數法之實驗來得理想。本研究中分別計算 ensm16、ensm08 及 ensm04 等系集平均路徑，並與世界主要之全球預報模式 JMA、UK、NCEP、EC 等以及上述四家主要全球預報模式之平均路徑(JUNE)進行比較。系集平均路徑 ensm16 是由所有 16 種不同降水物理過程所產生的預報路徑平均而成；ensm08 則是客觀選取最接近 ensm16 的前 8 個路徑平均結果，而 ensm04 則是將積雲參數法選用 KF 時的 4 個路徑平均結果，藉以獲得較佳的系集預報組合。圖 5 即為各

全球預報模式與 WRF 模式各平均系集路徑之平均路徑誤差。統計結果顯示，ensm04 的平均路徑誤差比 ensm08 與 ensm16 較少，其 24 小時的平均路徑誤差少於 100 公里，此平均路徑誤差與世界主要全球預報模式的平均路徑誤差相當。此外，在本研究中四個主要全球預報模式的系集結果 (JUNE)，具有最少的路徑誤差，顯示其為本研究中最優的預報路徑，再次證實系集預報在颱風路徑預報上的價值。

本研究藉由 T-test 統計檢定來比較任兩組平均路徑誤差是否具有統計上的差異，並定義當 T-test 計算之 P 值 (機率值) 小於 0.1 時，即可視為兩組平均路徑誤差有統計上的差異 (相當於 90% 的統計信心度)，若 P 值遠大於 0.1，則表示兩組路徑誤差沒有統計上的差異。JMA 與 ensm04 兩組路徑誤差在 24、48 及 72 小時 T-test 計算之 P 值分別為 0.411、0.293 及 0.387；UK 與 ensm04 在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.089、0.059 及 0.324；NCEP 與 ensm04 在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.406、0.116 及 0.058；EC 與 ensm04 在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.413、0.497 及 0.370。由圖 5 之平均路徑誤差與 T-test 之 P 值計算結果顯示，系集平均路徑 ensm04 優於全球預報模式 UK，而與 JMA 及 EC 的預報能力相當，雖預報能力遜於 NCEP，但整體而言仍具有相當之預報能力。

(二) 進行渦旋植入

圖 6a 及圖 6b 分別為辛樂克與蕃蜜颱風模式初始場進行渦旋植入後之 16 條預報路徑，圖中顯示渦旋植入後亦可有效提供系集預報路徑之分布。若與未進行渦旋植入之系集預報相比 (圖 3a、圖 3c)，可以發現路徑的分布範圍有縮小的

趨勢，此結果顯示渦旋植入後對於颱風未來可能侵襲之範圍更易於掌握。此外，由於渦旋植入後提供更強的颱風於模式之中，相對增加颱風存在於模擬中的時間，延長颱風路徑的可預報性；又因為植入渦旋之結構符合模式動力及物理平衡，能有效減少積分初期 spin up 的時間，因此在預報

前期有較一致的路徑分布。圖 7 為比較有無渦旋植入各實驗在 24、48、72 小時的平均路徑誤差圖。圖 7a 研究結果顯示，在使用渦旋植入法的模擬中，積雲參數法使用 GD 及微物理參數法選擇 WSM3 時，即 run33b 實驗，可以獲得最少的平均路徑誤差，因此為渦旋植入後的最佳降水過程參

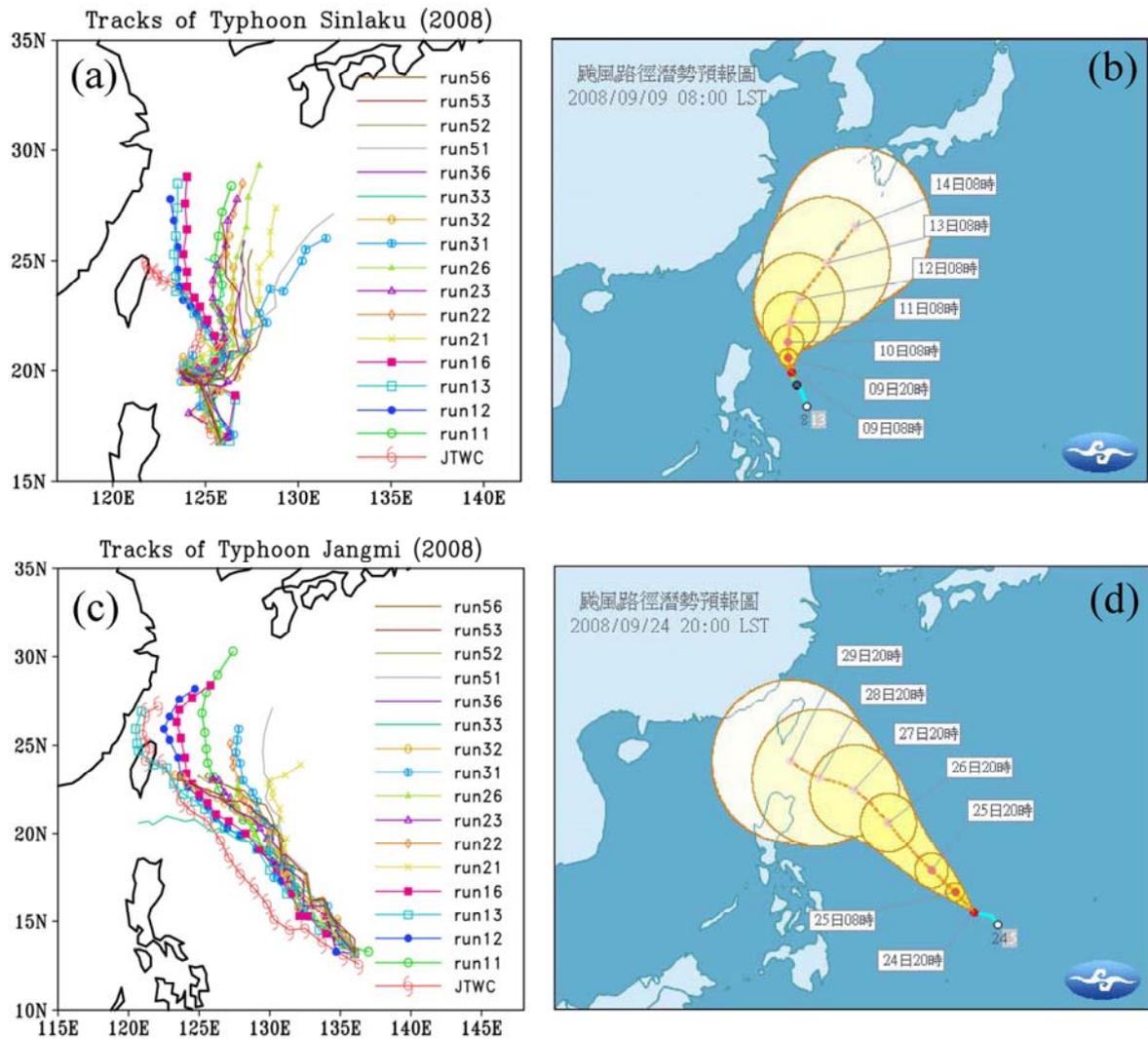


圖 3 (a)辛樂克颱風個案模擬中不同降水物理參數法組合之路徑系集預報，模擬初始時間為 2008 年 9 月 9 日 0000 UTC，路徑間隔每 6 小時一點；(b)中央氣象局於 2008 年 9 月 9 日 0000 UTC 發布之辛樂克颱風路徑潛勢預報圖；(c)為薔蜜颱風個案模擬中不同降水物理參數法組合之路徑系集預報，路徑間隔每 6 小時一點，模擬初始時間為 2008 年 9 月 24 日 1200 UTC；(d)為中央氣象局於 2008 年 9 月 24 日 1200 UTC 發布之薔蜜颱風路徑潛勢預報圖。

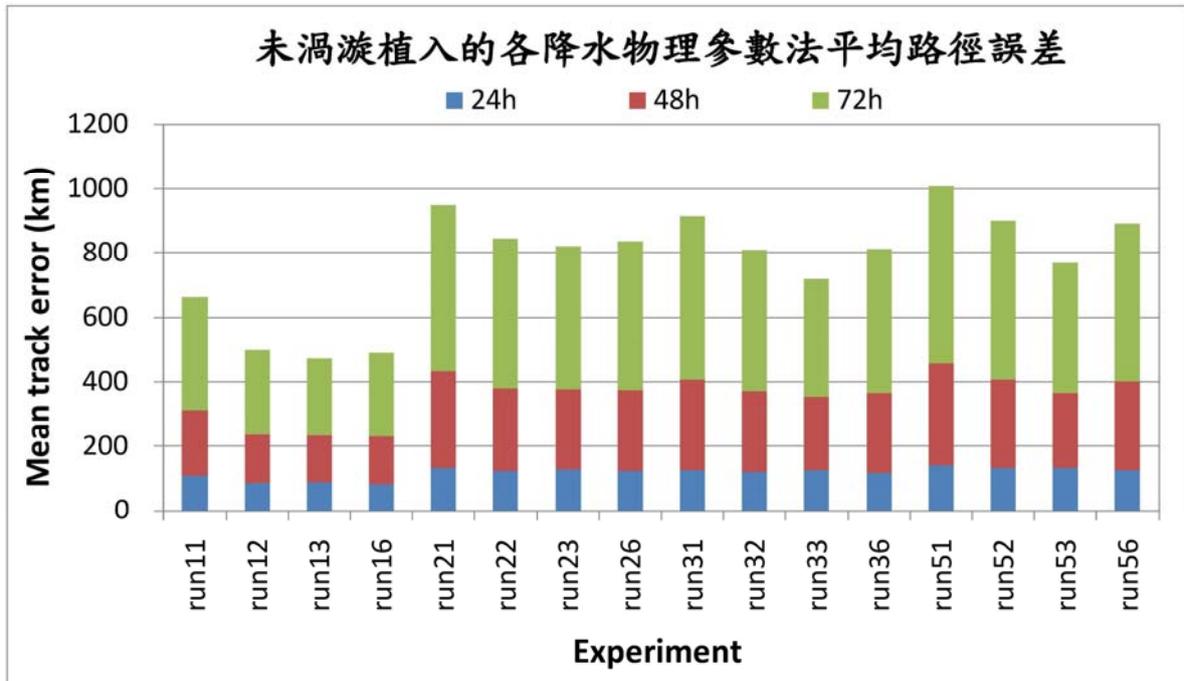


圖 4 未使用渦旋植入的不同降水物理參數法實驗在 24、48、72 小時之平均路徑誤差。統計個案包括辛樂克颱風及薔蜜颱風所有模擬個案，總共為 30 個。

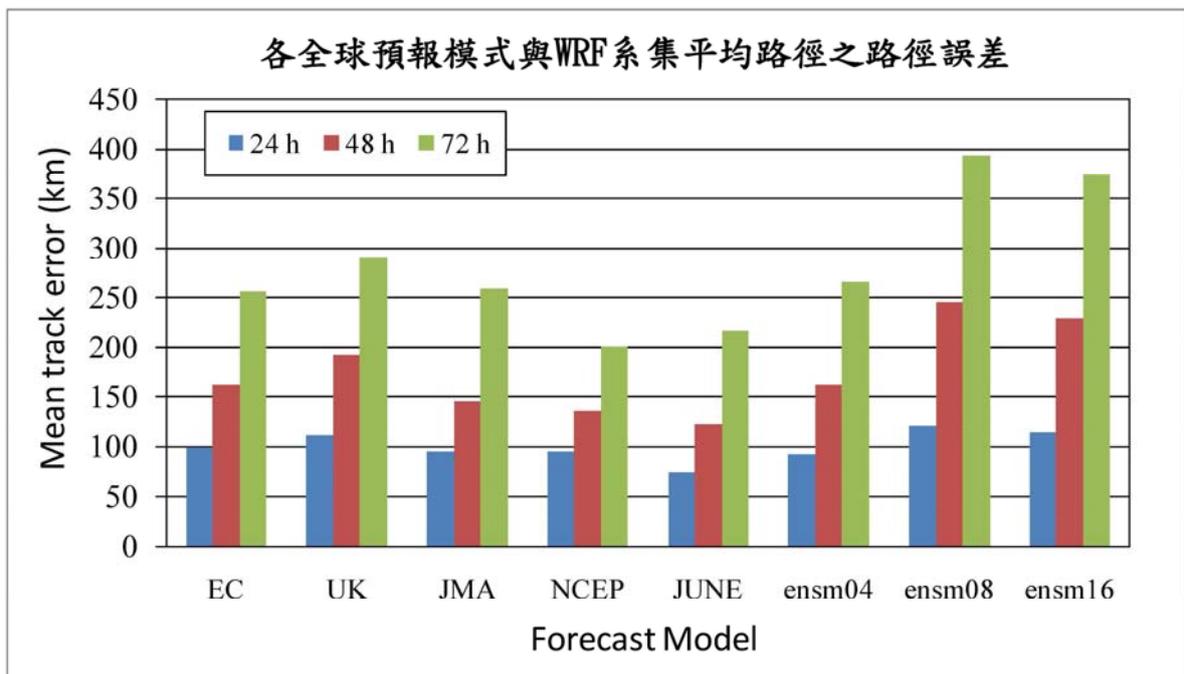


圖 5 各全球預報模式(EC、UK、JMA、NCEP)、全球預報模式平均(JUNE)及 WRF 模式各平均系集路徑(ensm04、ensm08、ensm16)之平均路徑誤差。統計個案包括辛樂克颱風及薔蜜颱風所有未進行渦旋植入之模擬個案，總共為 30 個。

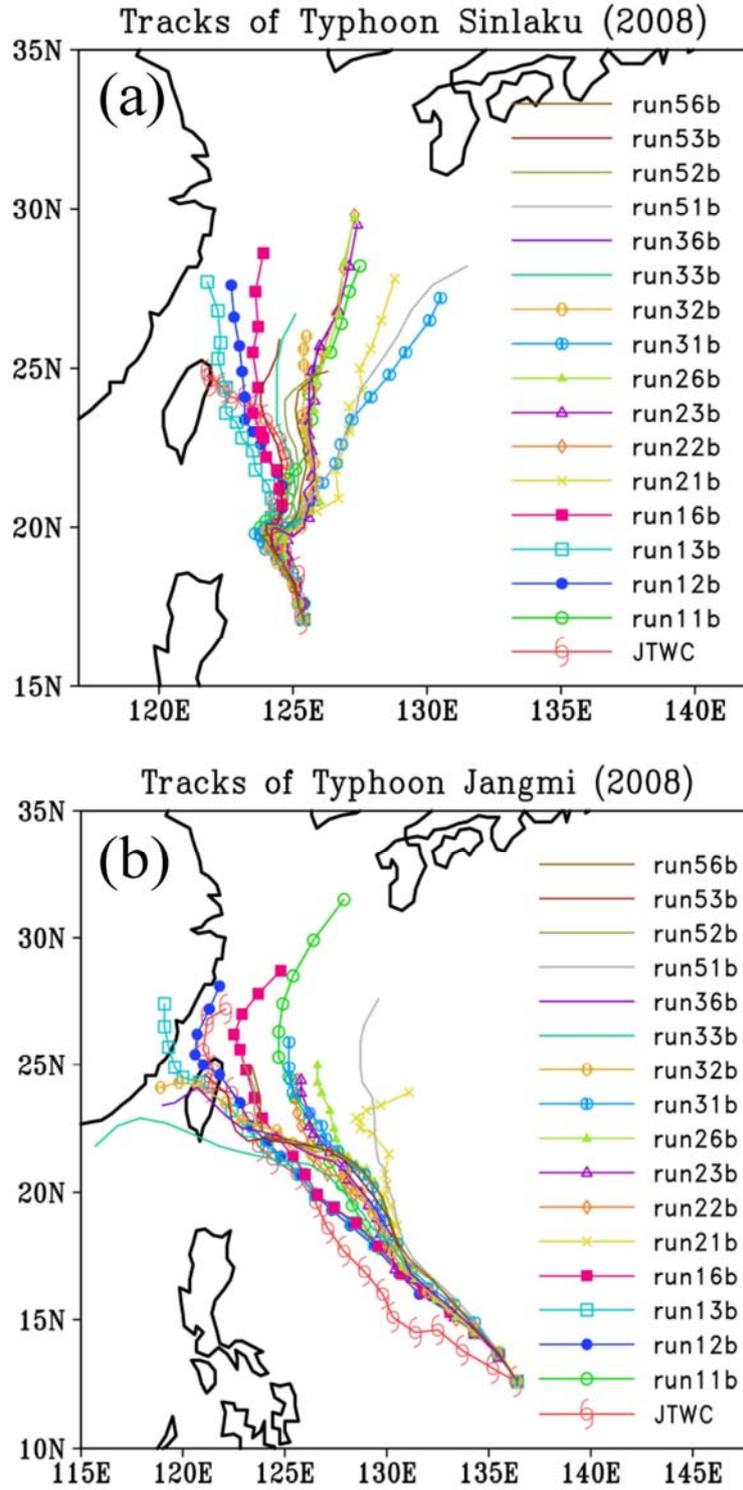


圖 6 (a)同圖 3a，但為使用渦旋植入之系集路徑，路徑間隔每 6 小時一點。(b)同圖 3c，但為使用渦旋植入之系集路徑。

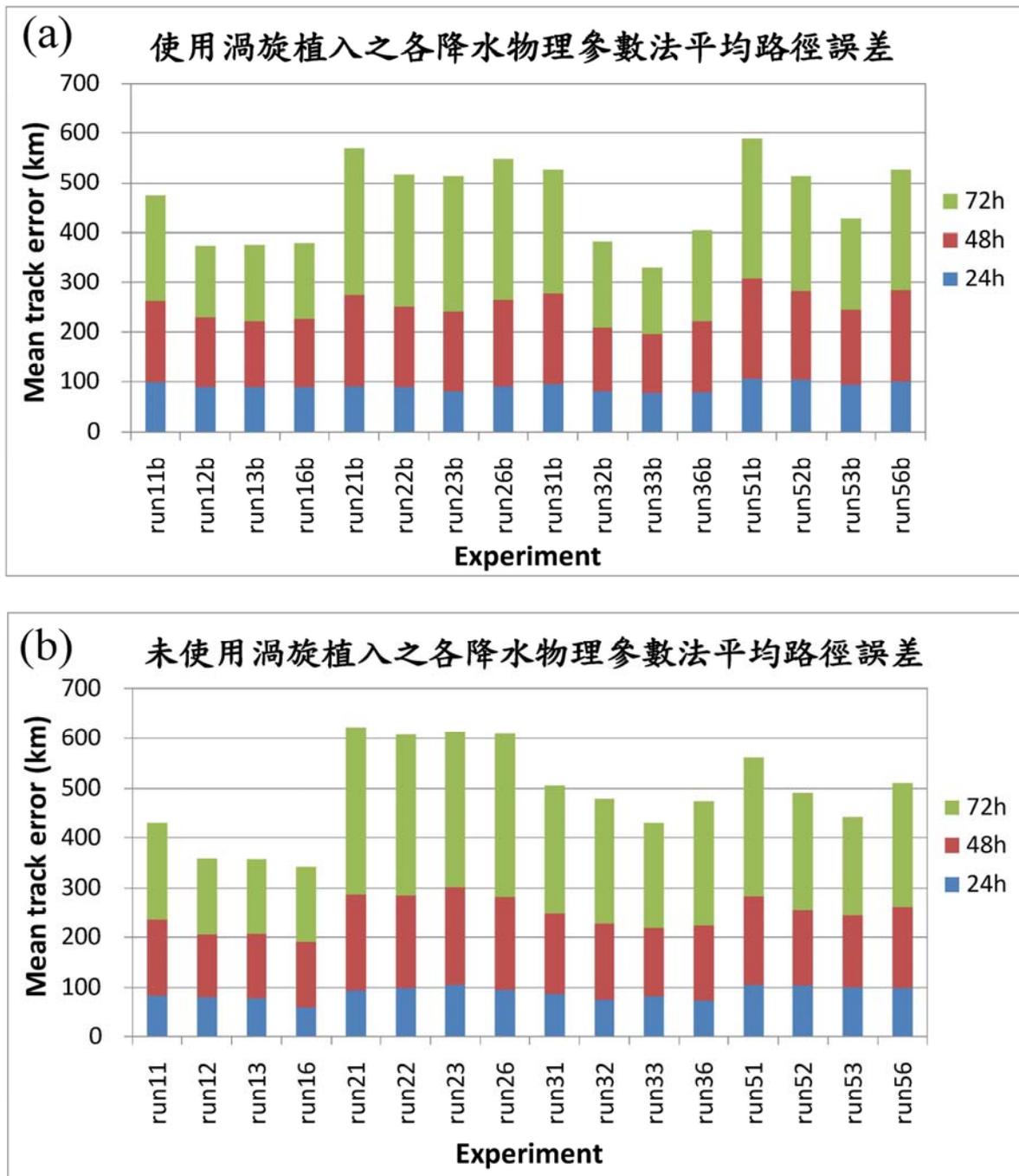


圖 7 (a)使用渦旋植入的不同降水物理參數法實驗在 24、48、72 小時之平均路徑誤差。統計個案包括辛樂克颱風及薔蜜颱風所有使用渦旋植入之模擬個案，總共為 12 個。(b)同(a)之模擬個案，但為未使用渦旋植入之統計結果。

數法組合。另外，若比較相同模擬個案但未進行渦旋植入的平均誤差（圖 7b），可以發現渦旋植入可以有效減少積雲參數法選用 BMJ 與 GD 大部分實驗的路徑誤差，然而卻些微增加積雲參數法選用 KF 大部分實驗的路徑誤差。關於為何進行渦旋植入後會造成選用不同積雲參數法實驗中路徑模擬差異情形，未來尚待更詳細的颱風移動與駛流診斷分析才得以釐清。

圖 8 為各實驗於不同模擬時間有無使用渦旋植入之路徑誤差散佈圖，圖中可以發現於模擬第 24 與 48 小時，路徑誤差散佈點多位於對角線兩側，顯示有無渦旋植入對於路徑誤差的影響差異不大；但於模擬第 72 小時之路徑誤差散佈點明顯位於對角線下方，此結果表示有渦旋植入實驗之路徑誤差明顯少於沒有渦旋植入實驗，且在誤差較大的實驗更明顯。圖 9a 為統計各實驗有無渦旋

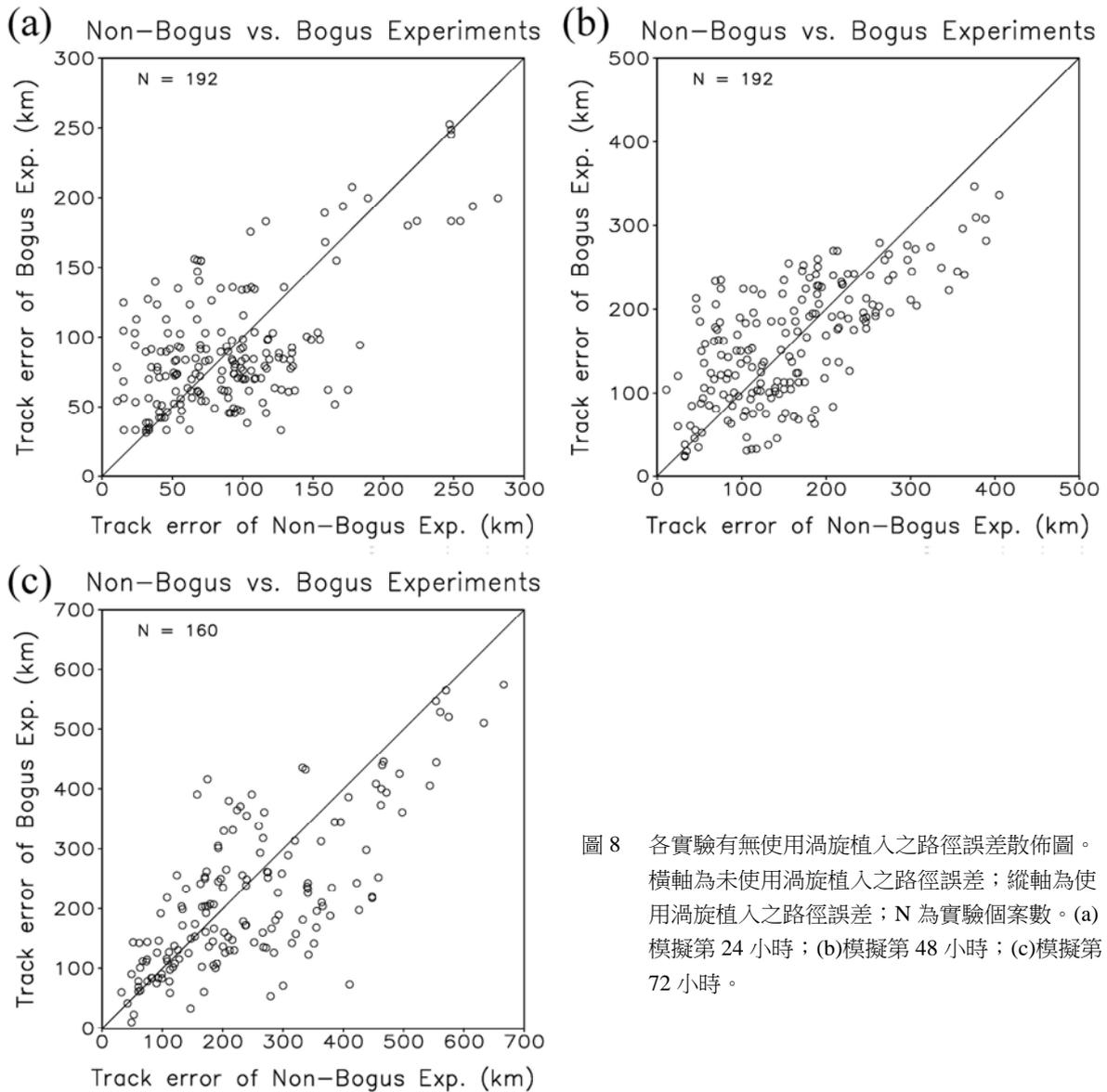


圖 8 各實驗有無使用渦旋植入之路徑誤差散佈圖。橫軸為未使用渦旋植入之路徑誤差；縱軸為使用渦旋植入之路徑誤差；N 為實驗個案數。(a) 模擬第 24 小時；(b) 模擬第 48 小時；(c) 模擬第 72 小時。

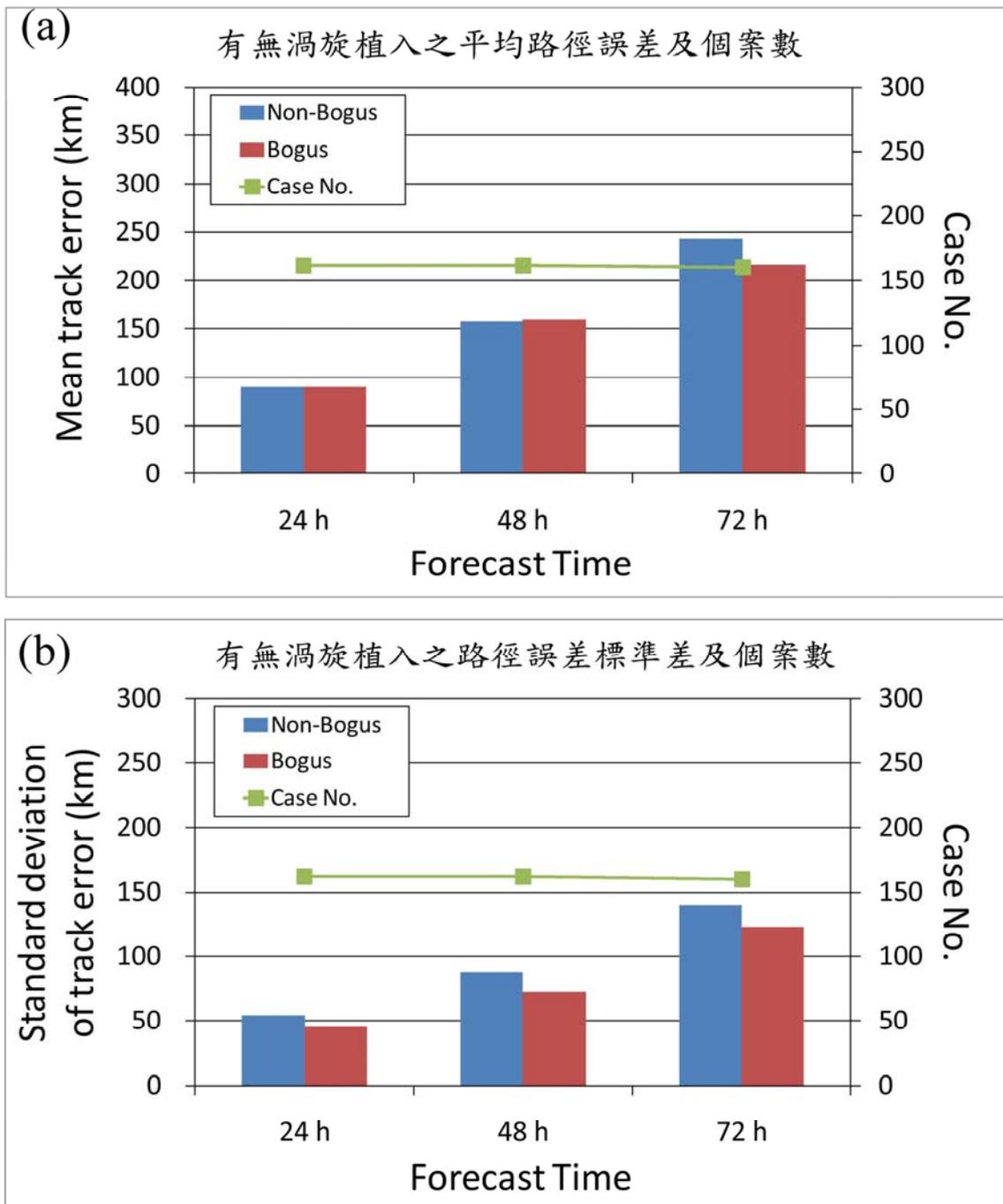


圖9 (a)有無使用渦旋植入於模擬第24、48及72小時之平均路徑誤差與統計個案數；(b)同(a)，但為路徑誤差標準差。

植入在三個預報時段的平均路徑誤差圖，圖中結果與圖 8 相當一致，即有無使用渦旋植入在模擬第 24 與 48 小時路徑誤差差異不大，但模擬第 72 小時，渦旋植入實驗的平均路徑誤差可減少 26 公里左右，約有 11% 的路徑誤差改善率。此外，分別計算有無渦旋植入實驗路徑誤差在三個預報時間 T-test 統計檢定的 P 值，計算結果為 0.40, 0.37, 0.00。此結果顯示，渦旋植入對於模擬第 72 小時路徑的改善已明顯通過統計檢定，明確證實渦旋植入方法對於改進颱風路徑模擬的成效。圖 9b 為統計各實驗有無渦旋植入在三個預報時段的路徑誤差標準差，可以發現，有渦旋植入的實驗相較於無渦旋植入實驗於預報第 24、48、72 小時的標準差分別減少 8、15、17 公里或 16、17、12%。此結果與圖 3a,c 與圖 6a,b 之 16 組系集路徑分佈差異相當一致，即渦旋植入法可以讓系集路徑的

分布範圍有縮小的趨勢。

圖 10 為各主要全球模式、JUNE 與 WRF 模式各平均系集路徑誤差比較圖。由圖 7a 可以發現，當積雲參數法選擇 GD 時的多數實驗中 (run32b、run33b 及 run36b)，其平均路徑誤差明顯小於積雲參數法選擇其他方法的平均路徑，因此類似 ensm04 的定義方式，將積雲參數法選擇 GD 的四組實驗作為新的系集預報組合 ensmGDb；此外，也定義將積雲參數法選用 KF 的系集預報組合為 ensmKFb，藉以跟先前未進行渦旋植入的實驗有所區分。圖中顯示 ensmGDb 在每個時段的平均路徑誤差均少於各全球模式的平均路徑誤差，但仍高於 JUNE 的平均路徑誤差。此外，ensmGDb 的平均路徑誤差並沒有比 ensmKFb 來的理想，此結果也可以由圖 7a 與 7b 的比較得知，主要是因為 run31b 實驗的平均路徑

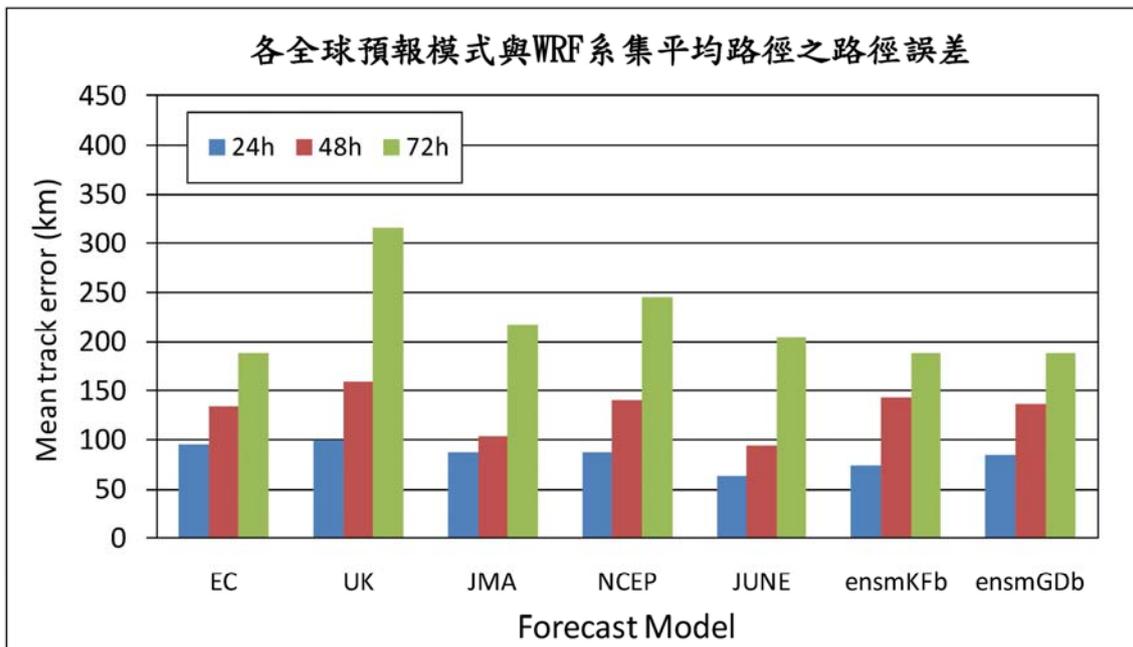


圖 10 各全球預報模式(EC、UK、JMA、NCEP)、全球預報模式平均(JUNE)及 WRF 模式各平均系集路徑(ensmKFb、ensmGDb)之平均路徑誤差。統計個案包括辛樂克颱風及薔蜜颱風所有使用渦旋植入之模擬個案，總共為 12 個。

誤差明顯較大所造成。同樣進行 T-test 統計檢定結果發現，JMA 與 ensmGDb 在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.473、0.080 及 0.231；UK 與 ensmGDb 在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.227、0.096 及 0.022；NCEP 與 ensmGDb 在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.406、0.431 及 0.105；EC 與 ensmGDb 在 24、48 及 72 小時 P 值分別為 0.291、0.463 及 0.496。由上述計算結果可知，ensmGDb 於第 72 小時略優於 JMA、UK 及 NCEP，並與 EC 的預報能力相當，因此也可顯示其有與全球預報模式相當之預報能力。

五、各參數法組合對颱風強度、結構與路徑探討

Fovell et al. (2009)的研究中發現，不同的降水物理過程會改變雲中粒子的終端速度，對暴風半徑外的風具有影響，因而影響颱風的結構與路徑。本研究特別針對辛樂克颱風 9 月 9 日 0000 UTC 及蓄蜜颱風 9 月 24 日 1200 UTC 這兩個時間點來檢驗不同降水物理過程參數法對於強度、結構及路徑的相關探討。

圖 11 為辛樂克颱風與蓄蜜颱風兩時間個案模擬的系集平均颱風中心氣壓變化圖。圖 11a 中顯示各實驗模擬之颱風增強速度較慢，但可以發現積雲參數法固定於 KF 時的四組系集平均，颱風中心海平面氣壓有較快的下降趨勢，並可模擬出較小之氣壓值，而模擬 72-120 小時期間的強度變化也與 JTWC 的分析強度十分一致。而積雲參數法分別選用 BMJ 及 NG 的四組系集平均，均表現緩慢增強的趨勢；而積雲參數法選用 GD 參數法，則有增強趨勢最慢且有偏弱之情形發生。然而，若比較固定微物理參數法的四組系集平均，結果如圖 11b 所示，其強度變化的趨勢則差異不

大。此由於選用不同降水過程造成颱風強度增強速度差異的情況同樣可以出現在蓄蜜颱風的模擬結果中。圖 11c 為蓄蜜颱風固定積雲參數法後，所計算四組系集平均之颱風中心氣壓隨時間變化圖，與辛樂克颱風個案一致，KF 仍為增強最快且可模擬出較強颱風強度之積雲參數法，而 BMJ、GD 及 NG 則為緩慢增強且強度偏弱；另外，固定微物理參數法後，改變積雲參數法實驗中強度變化的差別則不明顯，結果如圖 11d 所示。

圖 12 為各實驗模擬第 72 小時之軸對稱平均地表 10 公尺切向風場隨颱風中心距離之分佈圖，模式初始時間分別為辛樂克颱風 9 月 9 日 0000 UTC 及蓄蜜颱風 9 月 24 日 1200 UTC 之個案。同樣比較選用不同積雲參數法之系集平均，如圖 12a,c 所示，可以發現當積雲參數法使用 KF 參數法時，大致可獲得較大強度之模擬，而積雲參數法選用 GD 時，颱風強度明顯發展較弱，此結果與圖 11a,c 颱風中心最低氣壓之比較一致。此外，除了颱風中心風速差別會有不同外，颱風結構（外圍風速）的發展也有明顯差異，積雲參數法選用 KF 的系集平均所模擬的颱風外圍風速明顯大於選用其他積雲參數法所模擬的外圍風速。若比較選用不同微物理參數法之系集平均(圖 12b,d)，結果顯示颱風強度發展的差別則並不明顯，當微物理參數法選用 LFO 與 WSM6 參數法時，其颱風強度發展略強，此結果同樣與圖 11b,d 結果互相呼應。另外，圖 12b,d 顯示各系集平均之外圍風場差異很小，此結果說明選用不同微物理參數法對於外圍風速發展較不敏感。

由圖 11 與圖 12 結果顯示，不同降水過程的選擇的確會影響到模式中颱風強度的發展與結構上的差異。由本研究的結果顯示，颱風強度與結構的發展對於積雲參數化的選擇比較敏感，其中

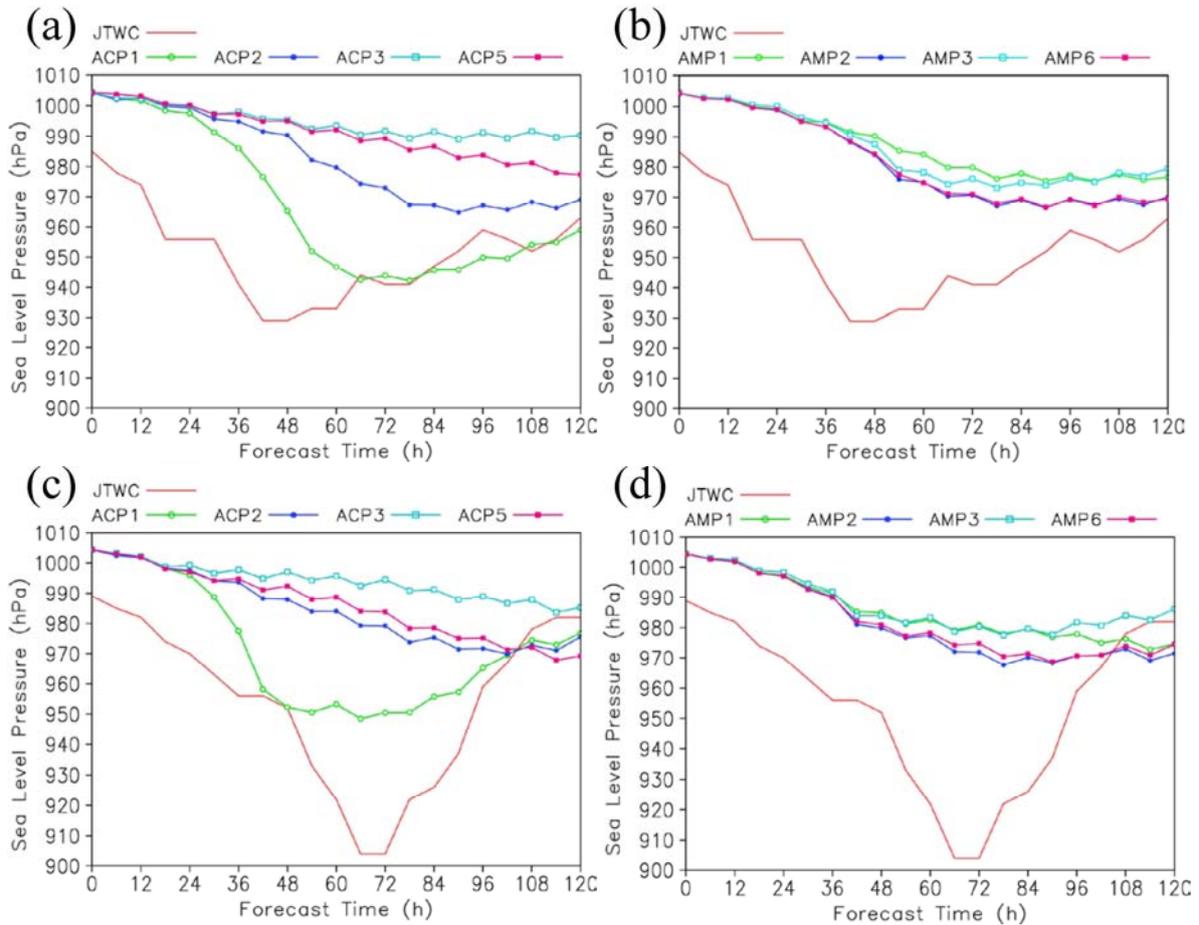


圖 11 JTWC 最佳路徑與模式系集平均強度變化圖。(a)與(b)為辛樂克颱風個案，模擬初始時間為 2008 年 9 月 9 日 0000 UTC；(c)與(d)則為薔蜜颱風個案，模擬初始時間為 2008 年 9 月 24 日 1200 UTC。ACP1 為積雲參數法選用 1(KF)的四組系集平均、ACP2 為積雲參數法選用 2(BMJ)的四組系集平均、ACP3 為積雲參數法選用 3(GD)的系集平均、ACP5 為積雲參數法選用 5(NG)的四組系集平均、AMP1 為微物理參數法選用 1(Kessler)的四組系集平均、AMP2 為微物理參數法選用 2(LFO)的四組系集平均、AMP3 為微物理參數法選用 3(WSM3)的四組系集平均、AMP6 為微物理參數法選用 6(WSM6)的四組系集平均。

以積雲參數法選用 KF 時，颱風強度可以發展較強且範圍也較大。除此之外，若比較當積雲參數法選用 KF 的模擬路徑時（圖 3a,c 所示），其移動路徑明顯偏向西北，而積雲參數法選用 BMJ 的模擬路徑，則明顯偏東，此結果與 Fovell et al. (2009) 的研究相當一致。Fovell et al. (2009) 研究指出颱風大小較大的颱風可以引發較強的 beta-effect，因此可以造成颱風有較明顯往西北方向移動的分

量。然而，Fovell et al. (2009) 的颱風數值模擬為在沒有背景流場下所做的理想實驗，因此 beta-effect 在他們的研究中扮演較重要的角色，本研究中所進行的為真實個案的模擬，大尺度環境流場發展的差異（例如：太平洋高壓）對於颱風移動造成的影響也相當重要。

圖 13a,b 分別為 run13 與 run21 實驗模擬第 72 小時 500 hPa 重力位高度場，兩實驗可以作為

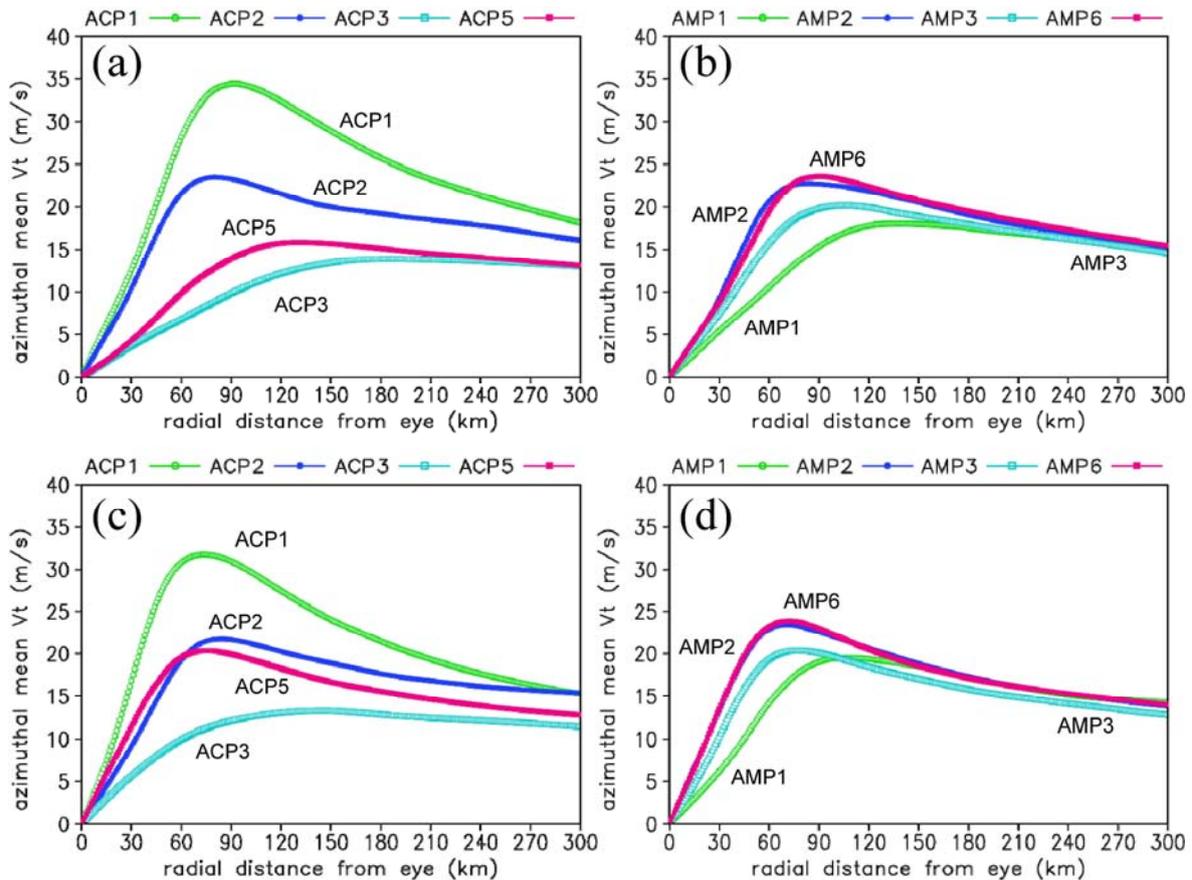


圖 12 模式模擬第 72 小時之切向風隨颱風中心距離變化圖。(a)與(b)為辛樂克颱風個案，模擬初始時間為 2008 年 9 月 9 日 0000 UTC；(c)與(d)則為薔蜜颱風個案，模擬初始時間為 2008 年 9 月 24 日 1200 UTC。ACP1 為積雲參數法選用 1(KF)的四組系集平均、ACP2 為積雲參數法選用 2 (BMJ)的四組系集平均、ACP3 為積雲參數法選用 3 (GD)的系集平均、ACP5 為積雲參數法選用 5 (NG)的四組系集平均、AMP1 為微物理參數法選用 1 (Kessler)的四組系集平均、AMP2 為微物理參數法選用 2 (LFO)的四組系集平均、AMP3 為微物理參數法選用 3 (WSM3)的四組系集平均、AMP6 為微物理參數法選用 6 (WSM6)的四組系集平均。

積雲參數法使用 KF 參數法明顯偏北及微物理參數法使用 Kessler 參數法明顯偏東之代表。由兩圖比較可以發現 run13 颱風強度較強，位置也明顯偏西，而 run21 實驗颱風則明顯較弱，颱風位置也偏東。造成兩實驗明顯差異的原因主要是颱風東側太平洋副高氣壓發展強弱的差別所造成。本研究中選取並計算計算圖 13a,b 中虛線方框中平均重力位高度場在模擬期間的變化情形，來代表太平洋高壓的強弱指標。至於選取區域的標準是

依據模擬期間颱風整體移動路徑東側的區域來選取，由於辛樂克個案其颱風初始位置較偏西，因此其選取的範圍較大。各實驗中太平洋高壓強度計算結果如圖 13c 所示，可以發現 run13 實驗在模擬期間，太平洋高壓的強度最強，而 run21 實驗則最弱。另外，若比較選用不同積雲參數法的系集平均可以發現，選用 KF 積雲參數法的系集平均組合，太平洋高壓的強度發展遠高於選用其他三種積雲參數法的系集平均，其他三種所模擬

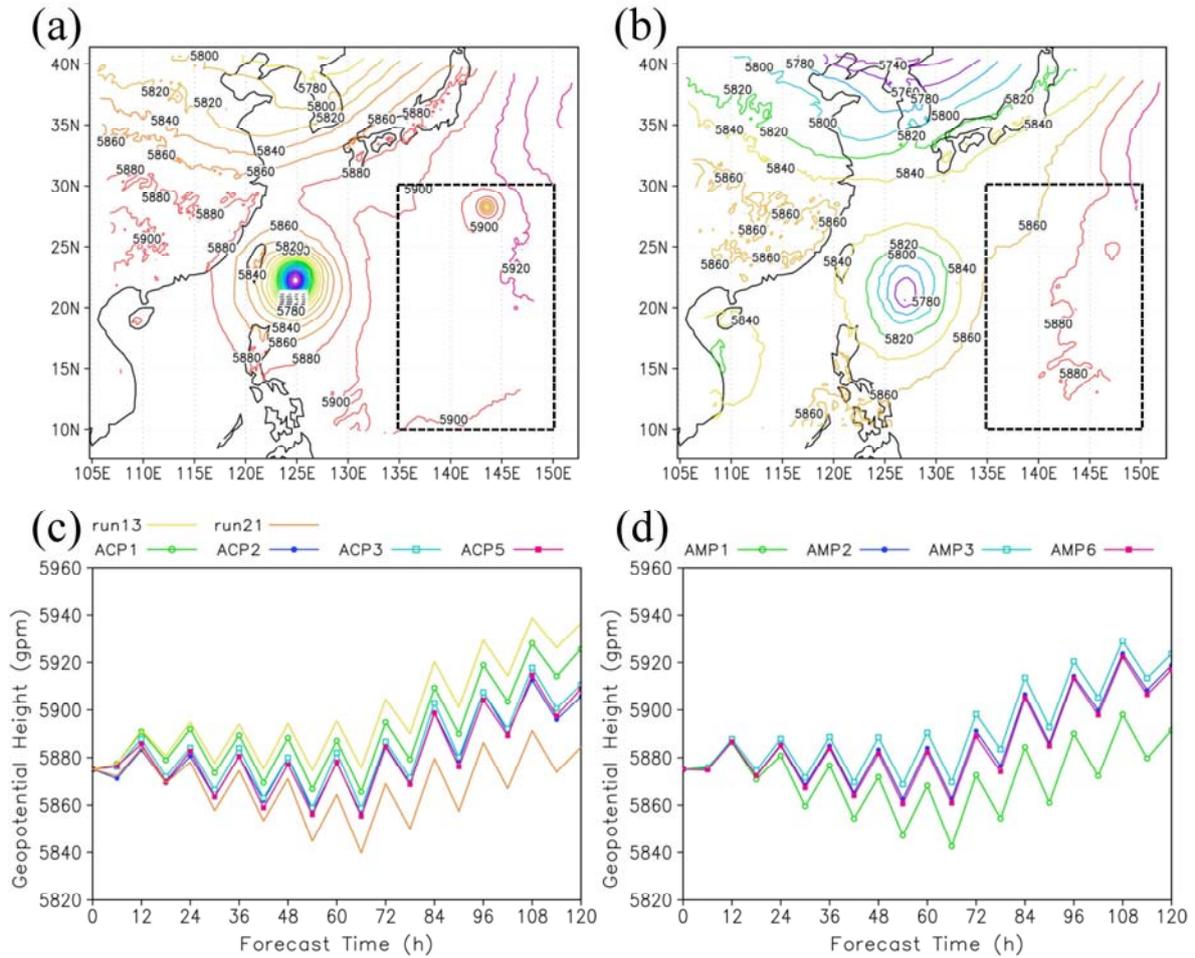


圖 13 (a)與(b)分別為辛樂克颱風 run13 與 run21 實驗模擬第 72 小時之 500 hPa 重力位高度場，模擬起始時間為 2008 年 9 月 9 日 0000 UTC。(c)與(d)為圖(a)與(b)中虛線方框內的平均重力位高度於模擬前 120 小時的變化圖。ACP1 為積雲參數法選用 1(KF)的四組系集平均、ACP2 為積雲參數法選用 2(BMJ)的四組系集平均、ACP3 為積雲參數法選用 3(GD)的四組系集平均、ACP5 為積雲參數法選用 5(NG)的四組系集平均；AMP1 為微物理參數法選用 1(Kessler)的四組系集平均、AMP2 為微物理參數法選用 2(LFO)的四組系集平均、AMP3 為微物理參數法選用 3(WSM3)的四組系集平均、AMP6 為微物理參數法選用 6(WSM6)的四組系集平均。

之太平洋高壓的強度發展則差異不大。同樣，若比較使用不同微物理參數法的系集平均可以發現（如圖 13d 所示），選用 Kessler 微物理參數法的系集平均，其太平洋高壓的強度遠弱於選用其他三種微物理參數法的系集平均，其他三種所模擬之太平洋高壓差異同樣不大。此選擇不同積雲與微物理參數法定性上的差異可以說明，為何 run13 實驗會模擬出最強的太平洋高壓，而 run21 實驗

則模擬出最弱的太平洋高壓。相同的結果可以在 薔蜜颱風 9 月 24 日 1200 UTC 之模擬結果發現，如圖 14 所示。即 run13 實驗可以模擬出較強的颱風強度，環境流場有較強的太平洋高壓導引；而在 run21 實驗中，模擬之颱風亦為偏弱，且環境流場的太平洋高壓較弱，因此模擬之颱風易往東移動。

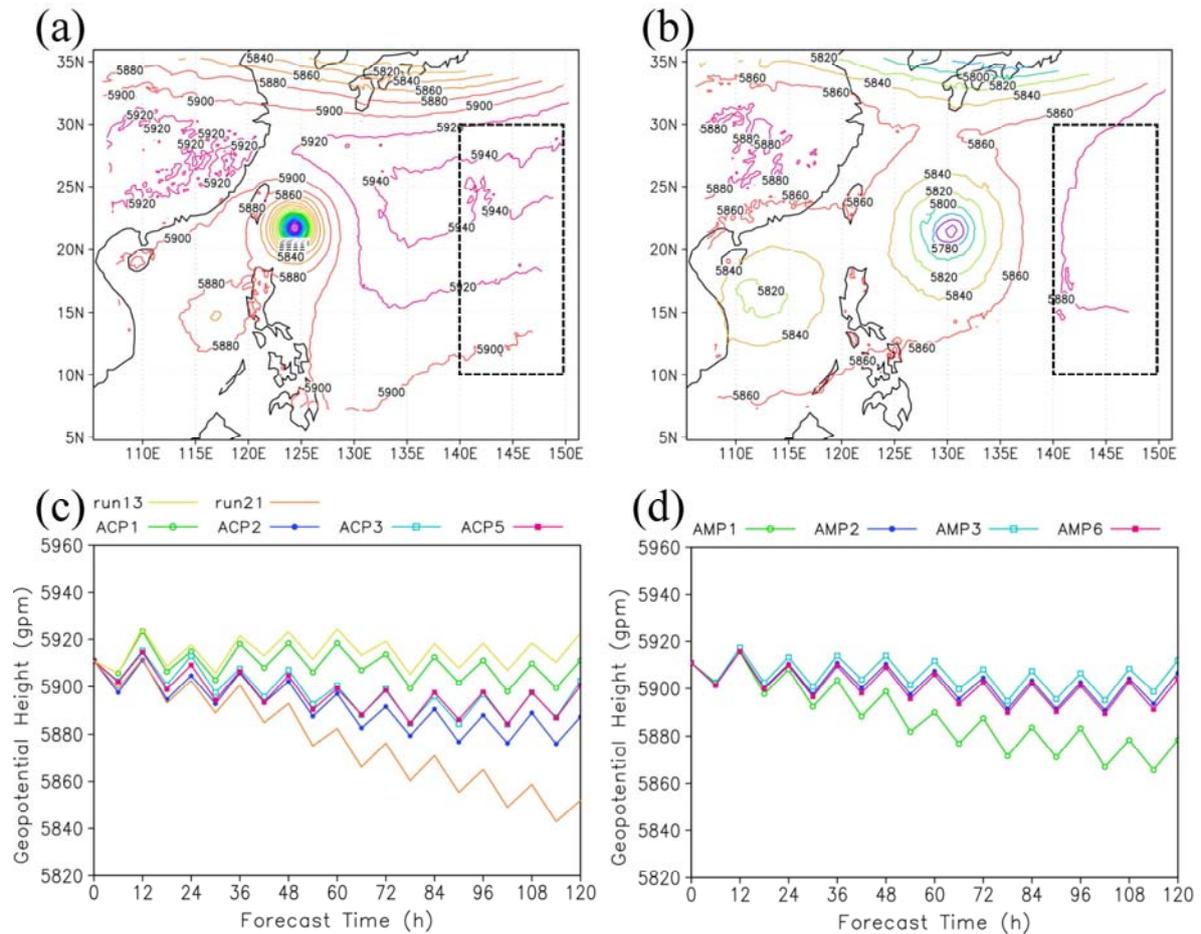


圖 14 同圖 13，但為薈蜜颱風個案，模擬初始時間為 2008 年 9 月 24 日 1200 UTC。

總結上述可知，區域模式解析度在 15 公里時，積雲參數法使用 KF 參數法進行颱風模擬時，可以有效且快速加強颱風之強度，且移動方向有偏北之趨勢，移動速度也較快；當固定微物理參數法 Kessler 參數法，可能導致預報路徑有偏東的趨勢。造成此結果可能與降水物理參數法組合導致模擬之颱風強度、結構與環境流場產生變化有關。另外，且在積雲參數法使用 KF 參數法時，可以模擬出較強的太平洋高壓；而微物理參數法使用 Kessler 參數法時，可則模擬出較弱的太平洋高壓。研究中也發現颱風周遭的綜觀尺度系統，例如：南海中低壓系統與颱風北側中緯度槽線，

同樣會受到模式中選用不同降水物理參數法所造成系統強度模擬的差異，進而對颱風系集成員的颱風移動造成影響。但礙於這些環境系統多在模擬的後期才會對颱風移動造成影響，因此較難定性比較其對颱風路徑模擬上的影響程度。

本研究與 Yang et al. (2005)之差異在於其最小網格解析度為 6.67 公里，故沒有考慮次網格積雲參數法對模擬颱風之影響，發現暖雲過程（即 Kessler 參數法）組合針對桃芝颱風(2001)模擬呈現向西北移動，且可模擬出較強之強度。另外，本研究與 Fovell et al. (2009)之探討差異在於其最

小網格解析度為 3 公里，同樣沒有考慮積雲參數法對模擬颱風之影響，僅著重討論微物理參數法與路徑之關係；此外，其模式架構為不考慮環境流場之理想模式。他們的研究結果顯示 Kessler 參數法會呈現快速向西北移動，進一步的分析顯示模式使用 Kessler 參數法時會讓颱風大小擴大，可以讓模式中的渦旋產生更大的 β -effect，進而導致颱風快速往西北運動。而本研究則非理想模式，因此降水物理參數法對於颱風路徑之模擬較為複雜，但可以發現，降水物理參數法對於環境流場及颱風本身結構具有影響，進而使颱風路徑出現變化。本節討論中亦可發現，在解析度 15 公里之區域模式，積雲參數法在路徑、強度與颱風結構模擬中則扮演較重要的角色。

六、結論與展望

根據 Fovell et al. (2007, 2009) 的研究指出，透過改變積雲參數法及雲微物理參數法得到不同降水物理過程之組合，可得到颶風路徑系集預報的概念，本研究嘗試在東亞地區進行數值模擬研究，以期可以獲得最佳颶風路徑系集預報結果。研究中選取 2008 年侵襲台灣的辛樂克颱風及蕃蜜颱風作為研究個案，使用 WRF 模式預報出 16 種不同降水物理過程之系集路徑，並與世界各主要全球預報模式進行探討比較。研究中亦探討渦旋植入程序對 WRF 模式系集預報的影響。另外，研究中特別分析不同降水物理過程參數法對於颱風強度、結構與路徑模擬之作用。重要結果如下列各項：

一、未進行渦旋植入之實驗結果：

1. 藉由不同降水物理過程組合之颱風路徑系集預報皆可產生一系集路徑分布，此路徑分布可提

供颱風未來移動方向；而此路徑分布與中央氣象局所發布之颱風路徑潛勢預測圖相似，可說明其預報價值。

2. 模擬之颱風登陸時，系集路徑預報會因為模擬之颱風強度減弱而無法提供長時間預報，而颱風強度減弱除地形影響外，也可能與降水物理過程組合有關。
3. 環境流場明顯時，系集預報結果將呈現一致性且路徑分布縮小。
4. 選擇 KF 積雲參數法及 WSM3 微物理參數法作為組合時，可以獲得最小平均路徑誤差，是為未進行渦旋植入模擬之最佳參數法組合。
5. 積雲參數法固定於 KF 參數法時，其四組參數法組合所產生的平均系集路徑可以產生與世界主要全球預報模式相近的預報。
6. 實驗中發現各全球預報模式之系集平均可有最佳預報表現，再次驗證系集預報的價值。
7. 在區域模式解析度在 15 公里時(即模式中降水物理過程考慮積雲參數法時)，積雲參數法使用 KF 參數法可有效且快速加強颱風強度與大小，並容易偏北移動且移動速度較快；而當固定微物理參數法為 Kessler 參數法時，可能導致預報路徑易偏東移動。此結果主要為降水物理參數法對於環境太平壓高壓流場及颱風本身結構具有影響，進而使颱風路徑出現變化。

二、使用渦旋植入後之實驗結果：

1. 亦可以獲得系集路徑之分布，但分布的範圍縮小，更易於掌握颱風未來移動方向。
2. 提供更強的颱風於模擬中，相對增加颱風存在於模擬中之時間，延長颱風路徑的可預報性；又因為初始強度一致，故在預報前期有較一致

的路徑分布。

3. 積雲參數法選擇 GD 及微物理參數法選擇 WSM3 時，可作為渦旋植入實驗中最佳參數法組合；而此組合略優於未使用渦旋植入法前最佳參數法組合。此結果也顯示透過渦旋植入的方法，可以有機會獲得決定性(deterministic)的路徑預報，並有待未來更多研究個案檢驗。
4. WRF 模式各系集成員使用渦旋植入法後，可以減少模擬第 24、48、72 小時之路徑誤差標準差，即代表渦旋植入可以縮小系集路徑之路徑分佈。另外，T-test 統計檢定顯示渦旋植入可以明顯減少第 72 小時之路徑誤差，再次說明渦旋植入對於改進颱風路徑誤差之成效。

本研究中並未深入探討為何渦旋植入可以改善部分模式系集成員的路徑預測的原因，此問題需要進一步分析環境駛流場、颱風強度與颱風運動的診斷分析工作，也需要透過全球分析資料來跟模式結果進行較驗方能釐清。另外，近年來亦有颱風路徑系集預報之研究，例如：超級系集預報的概念 (Kumar et al. 2003; Mark et al. 2008) 及權重定位及權重移動向量的概念 (Elsberry et al. 2008)，來調整不同系集預報成員之個別權重，決定出最佳颱風之預報路徑。未來可以嘗試使用上述概念，以期決定更好的颱風預報路徑。此外，各降水物理參數法組合對於颱風強度、結構與環境系統模擬差異，所造成的 beta-effect 流場與環境流場間相互的重要性，亦有待更透過理想模式來進一步檢驗與探討。受限於電腦計算資源，本研究僅能使用 15 公里的最小網格解析度進行颱風路徑的系集預報研究，如能網格解析度提高至 5 公里，則能針對各參數法進一步探究對路徑或颱風結構之影響，並進行定量降水系集預報，若

能將研究成果實際應用於即時數值預報中，對於颱風路徑預測及防災將有所助益。

致謝

感謝國科會 NSC 98-2111-M-034 -002 -之支持得以進行此研究，也感謝中央氣象局預報中心黃文亭提供辛樂克及薔蜜颱風全球預報模式路徑資料進行較驗，最後特別感謝 2 位審查委員之建議與文圖訂正。

參考文獻

- 李清勝、林慧娟，1999：侵台歐菲莉颱風(1990)之數值模擬，*大氣科學*，**27**，235-256。
- 青麟，2003：桃芝(2001)颱風之系集模擬研究。*中國文化大學，地學研究所大氣科學組，碩士論文*，共99頁。
- 周昆炫、吳俊傑及顏自雄，2001：瑞伯颱風(1998)之數值模擬探討，*大氣科學*，**29**，291-314頁。
- 洪景山、林得恩、簡芳菁、劉素屏、周仲島、林沛練、張文錦、繆璿如、陳致穎及雷銘中，2006：WRF 模式之敏感度測試第一部分：探空測站上的校驗，*大氣科學*，**34**，241-259頁。
- 洪景山、林得恩、簡芳菁、劉素屏、周仲島、林沛練、張文錦、繆璿如、陳致穎及雷銘中，2006：WRF 模式之敏感度測試第二部分：定量降水預報校驗，*大氣科學*，**34**，261-276頁。
- 喬森、黃清勇及郭英華，1996：黛特 Dot 颱風的 MM5 數值模擬，*大氣科學*，**24**，123-144。

- 黃清勇及羅璋盛，2006：颱風路徑預報誤差 EOF 分析，*大氣科學*，**34**，277-290 頁。
- 黃清勇、周濤及郭勉之，2007：GPS 掩星折射率資料同化對於颱風模擬的影響，*大氣科學*，**35**，135-150 頁。
- 簡芳菁、蕭育琪、周仲島、林沛練、楊明仁、洪景山、鄧仁星及林慧娟，2003：MM5 系集降水預報之校驗，*大氣科學*，**31**，77-93 頁。
- 簡芳菁、柳懿秦、周仲島、林沛練、洪景山及蕭玲鳳，2005：2003 年梅雨季 MM5 系集降水預報，*大氣科學*，**33**，255-275 頁。
- 簡芳菁及謝章眉，2008：投落送與 QuikSCAT 資料同化對 WRF 模擬之影響，*大氣科學*，**36**，217-247 頁。
- Aberson, S. D., S. J. Lord, M. DeMaria, and M. S. Tracton, 1995: Short-range ensemble forecasting of hurricane tracks. *Preprints, 21st Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc.*, 494-496.
- Buizza, R., and T. N. Palmer, 1995: The singular-vector structure of the atmospheric general circulation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1434-1456.
- Chou, K.-H., and C.-C. Wu, 2008: Development of the typhoon initialization in a mesoscale model combination of the bogus vortex and the dropwindsonde data in DOTSTAR. *Mon. Wea. Rev.* **136**, 865-879.
- Du, J., S. L. Mullen, and F. Sanders, 1997: Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2427-2459.
- Elsberry R. L., J. R. Hughes, and M. A. Boothe, 2008: Weighted position and motion vector consensus of tropical cyclone track prediction in the Western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 749-770.
- Elsberry R. L., and P. A. Harr, 2008: Tropical Cyclone Structure (TCS08) Field Experiment Science Basis, Observational Platforms, and Strategy. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **44**, 3209-3231.
- Fovell, R. G., and H. Su, 2007: Impact of cloud microphysics on hurricane track forecasts, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L24810, doi:10.1029/2007GL031723.
- Fovell, R. G., Kristen L. Corbosiero, and Hung-Chi Kuo, 2009: Cloud microphysics impact on hurricane track as revealed in idealized experiments. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 1764-1778.
- Houtekamer, P. L., and J. Derome, 1995: Methods for ensemble prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2181-2196.
- Krishnamurti, T. N., C. M. Kishtawal, T. LaRow, D. Bachiochi, Z. Zhang, C. E. Williford, S. Gadgil, and S. Surendran, 1999: Improved skills for weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *Science*, **285**, 1548-1550.
- Krishnamurti, T. N., and Coauthors, 2000a: Multimodel superensemble forecasts for weather and seasonal climate. *J. Climate*, **13**, 4196-4216.

- Krishnamurti, T. N., C. M. Kishtawal, D. W. Shin, and C. E. Williford, 2000b: Improving tropical precipitation forecasts from a multianalysis superensemble. *J. Climate*, **13**, 4217-4227.
- Krishnamurti, T. N., and Coauthors, 2001: Real-time multianalysis-multimodel superensemble forecasts of precipitation using TRMM and SSM/I products. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2861-2883.
- Krishnamurti, T. N., K. Rajendran, T. S. V. Vijaya Kumar, S. Lord, Z. Toth, X. Zou, J. Ahlquist, and I. M. Navon, 2003: Improved skills for the anomaly correlation of geopotential heights at 500 hPa. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1082-1102.
- Kumar, T. S. V., T. N. Krishnamurti, M. Fiorino, and M. Nagata, 2003: Multimodel superensemble forecasting of tropical cyclones in the Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 574-583.
- Hong, S.-Y., J. Dudhia, S.-H. Chen, 2004: A revised approach to ice-microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 103-120.
- Lin, Y.-L., R. D. Rarley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Appl. Meteor.*, **22**, 1065-1092.
- Liu, Y., D.-L. Zhang, and M. K. Yau, 1997: A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3073-3093.
- Liu, Y., D.-L. Zhang, and M. K. Yau, 1999: A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part II: Kinematics and inner-core structures. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2597-2616.
- Mark R. Jordan II, T. N. Krishnamurti, and Carol Anne Clayson, 2008: Investigating the utility of using cross-oceanic training sets for superensemble forecasting of Eastern Pacific tropical cyclone track and intensity. *Wea. Forecasting*, **23**, 516-522.
- Molteni, F., R. Buizza, T. N. Palmer, and T. Petroliagis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 73-119.
- Morison, R. P., L. M. Leslie, and G. D. Hess, 1996: Development of tropical cyclone landfall strike probabilities using Monte Carlo simulations. *Preprints, 11th Conf. on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc.*, 414-415.
- Mullen, S. L., and D. P. Baumhefner, 1988: Sensitivity to numerical simulations of explosive oceanic cyclogenesis to changes in physical parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 2289-2329.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR tech notes-475+STR*.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330.

- Vitart, F., J. L. Anderson, and W. F. Stern, 1997: Simulation of interannual variability of tropical storm frequency in an ensemble of GCM integrations. *J. Climate*, **10**, 745–760.
- Wu, C.-C., K.-H. Chou, H.-J. Cheng, and Y. Wang, 2003: Eyewall Contraction, Breakdown and Reformation in a Landfalling Typhoon. *Geophys. Res. Lett.*, **30** (17), 1887, doi: 10.1029/2003GL017653.
- Wu, C.-C., 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, and C.-H. Liu, 2005: Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR): An Overview. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 787-790.
- Wu, C.-C., K.-H. Chou, P.-H. Lin, S. D. Aberson, M. S. Peng, and T. Nakazawa, 2007: The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR. *Wea. Forecasting*, **22**, 1157-1176.
- Wu, C.-C., H.-J. Cheng, Y. Wang, and K.-H. Chou, 2009: A numerical investigation of the eyewall evolution in a landfalling typhoon. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 21-40.
- Yang, M. -J., and L. Ching, 2005: A modeling study of Typhoon Toraji (2001): physical parameterization sensitivity and topographic effect. *T.A.O.*, **16**, 177-213.

The Influence of The Bogused Vortex on The Typhoon Track Ensemble Forecasts

Kun-Hsuan Chou¹ Bo-Chih Huang²

¹Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan

²Graduate Institute of Earth Science/Atmospheric Science,
Chinese Culture University, Taipei, Taiwan

(manuscript received 13 August 2010 ; in final form 30 December 2010)

ABSTRACT

A series of numerical simulations are conducted by the Weather Research and Forecasting model (V3.0.1) to examine typhoon track ensemble forecast. Four different convective parameterizations (CPs) and four different microphysical parameterizations (MPs) are chosen as the combination of the precipitation parameterizations. The track error statistics for all members, ensemble mean and four main operational global model forecasts (NCEP, JMA, UK, and EC) are also investigated in this study. Besides, due to the intensity of tropical cyclone analyzed by the global analyses is generally too weak to present the actual strength of tropical cyclone, the implantation of bogused vortex are applied in this study to obtain the better intensity simulation and examine its impact on the performance of the ensemble forecasts. Furthermore, the impact of different precipitations on the intensity and structure of typhoon as well as the environmental flows are also investigated.

Based on the experiments without the implantation of bogused vortex, the results show that ensemble forecasts by using different precipitation parameterization schemes could obtain a track spread that regard as an area that typhoon might approach. Furthermore, the ensemble track from four tracks of fixed Kain-Fritsch CP the better typhoon forecast track. Moreover, the combination of Kain-Fritsch CP and WSM3 MP precipitation parameterization could lead to the smaller averaged track errors and this result indicates that this combination of precipitation parameterization will provide the best track forecast. Meanwhile, for the experiments with the implantation of the bogused vortex, the Grell-Devenyi CP and WSM3 MP precipitation parameterizations could be the best combination of precipitation parameterization which leads to the smaller

averaged track errors. Furthermore, the results show that the implantation of the bogused vortex efficiently shrink the spread of the ensemble tracks, and significantly improve the track forecast in the later part of the forecast period.

For the impact of different precipitation parameterization schemes on the simulated intensity and structure of typhoon as well as the environmental flows. The model tends to simulate more intense and larger size typhoon as well as obvious northward movement track when the Kain-Fritsch CP are chosen, while appears to simulate more weaker and smaller size typhoon as well as obvious eastward movement track when the Kessler MP are used. The reason is raised from that the steering flows are mainly dominated by the strength of the Pacific high and the structure of typhoon where are significantly influenced by the precipitation parameterization schemes in the numerical model.

Key Words: WRF, Ensemble forecasts, Convective and Microphysical parameterizations

