

# 氣候變遷影響下台灣之颱風降雨分佈 第一部份：數值模式控制實驗之校驗

王尹懋 陳正達 張智昇 駱世豪

國立師範大學地球科學系

(中華民國一〇四年三月十八日收稿；中華民國一〇四年六月三日定稿)

## 摘 要

本研究以雲解析數值模式模擬結果，探討在氣候模式估計之情境下，氣候變遷因子對於颱風造成台灣降雨分佈之改變與影響。本文利用再分析資料為模式初始場與邊界條件，佐以隨時間可變動之海溫觀測資料，模擬 1996~2010 年 47 個影響台灣之颱風，以此為本研究所需之控制實驗。分析模擬之颱風中心（路徑）及其造成之降雨，經比較現行國內外實務作業單位之即時模擬，以及過去颱風個案研究等，結果顯示本文使用之模擬策略，不論在颱風中心（路徑）或降雨分佈之模擬，雖稍遜於其他經較複雜方式（例如：EnKF）改善者，但仍具不錯且可信之模擬結果。因此，本文之雲模式數值模擬結果，可合理地做為本研究第二部分以高水平解析度（3 公里）數值模式探討氣候變遷影響颱風對於台灣降雨分佈改變之控制實驗。

關鍵字：氣候變遷、颱風降雨、雲解析模式

## 一、前言

影響台灣降雨之各種天氣環流系統中，以颱風所造成之累積雨量為最多且範圍最廣（Wu 與 Kuo 1999）。颱風除導致台灣豪（大）雨及其伴隨之災害問題外，其中心（路徑）是否侵襲或環流是否影響台灣陸地，亦常為決定台灣水資源應用是否足夠之重要且關鍵因素。颱風環流與台灣地形間交互作用除可影響侵台颱風之降雨分佈（Wu 等 2002；Chang 等 2013）外，亦常影響颱風侵台之移動速度與路徑變化（Hsu 等 2013）。此地形因素對颱風降雨、移速影響之重要性，在 2009 年莫拉克（Morakot）颱風所導致台灣陸地破紀錄降雨個案中即非常明顯（Chien 與 Kuo 2011；Fang 等 2011；Wang 等 2012）。此外，相較於颱風中心（路徑）、颱風移速及颱風與台灣地形交互作用等因子，颱風強度對於颱風造成之台灣降雨分佈影響則相對不明顯（Chang 等 2013）。

不論是由自然(natural)或人為因素影響之氣候變遷，皆非常可能導致極端(extreme)天氣發生頻率之增加與其強度之增強（Cubasch 等 2013）。對於颱風與氣候變遷相關研究，Knutson 等 (2010a)認為以理論與數值模式推估(projection)在全球不同程度溫室效應之情境影響下，將使得未來（2100 年）全球平均颱風強度增加 2~11%、全球平均颱風出現頻率減少 6~34%、距颱風中心 100 公里附近以內之平均降雨增加 20%。類似 Knutson 等(2010a)的分析結果，Emanuel (2013)分析 6 個不同氣候模式之降尺度(down scaling)模擬，結果顯示在 2006~2100 年間，颱風活躍度(tropical cyclone activity)之增加在西北太平洋地區最明顯。值得注意的是，於各不同地區之模擬估計與使用不同數值模式之模擬結果，Knutson 等 (2010a)與 Emanuel (2013)皆認為各不同模式間存

在明顯差異。此外，Knutson 等(2010b)之回顧文章認為，造成上述氣候平均差異之因素可能包括：1)歷史颱風觀測資料之一致性、2)與颱風相關環境參數之一致性、3)數值氣候模式之限制，以及 4)高解析度數值模式之使用與模式相關理論之限制等。

常造成台灣大範圍、強降雨之颱風環流系統在氣候變遷影響下，將如何改變台灣降雨分佈？本研究將以類似 Lackmann (2015)實驗設計方式分析探討此議題。氣候模式資料、敏感度實驗設計方式等，將於本研究第二部份詳述。在利用數值模式不同實驗組之前，需選擇一合理且具代表性之控制實驗(control run，簡稱 CTRL)，以供其他敏感度實驗之對比。因此，本研究第一部份先敘述本研究選用之中尺度天氣數值模式與其設定，並分析 CTRL 所需網格分析資料與觀測資料之差異。隨後，校驗 CTRL 與實際觀測資料、國內外其他作業(operational)單位模式預報與相關研究於颱風中心（路徑）與颱風造成台灣降雨分佈之異同與優劣。本研究第二部分則將以氣候模式與中尺度天氣模式之模擬結果，評估並分析探討氣候變遷導致之大氣與海洋變化影響下，侵台颱風對台灣降雨分佈之變化。

## 二、資料、分析與校驗方法及數值模式

### 1、資料

對於客觀分析資料偵測颱風之準確率評估，Onogi 等(2007)曾比較 Japan Meteorological Agency（簡稱 JMA）之 25 年（1979~2004 年，該資料結束於 2014 年 2 月）再分析資料計畫（Japanese 25-year reanalysis project，簡稱 JRA25）與 European Centre for Medium-Range Weather

表 1 本文分析之 47 個颱風年份、名稱、分析模擬時間、模擬時間長度、地面雨量站數及 JRA25、CTRL 與 JTWC 颱風中心定位差異。第 6 欄「\*」表示分析時間內 JTWC 無中心定位。第 7 欄「★」表示 CTRL 較 JRA25 更接近 JTWC 定位之個案。

年份	颱風名稱	分析模擬時間	模擬時間長度	地面雨量站數	JRA25-JTWC	CTRL-JTWC
1996	Gloria	7/25 00Z ~ 7/27 12Z	60 h	264	74.40 km	★74.36 km
1996	Herb	7/31 00Z ~ 8/2 00Z	48 h	157	33.19 km	41.15 km
1997	Amber	8/28 00Z ~ 8/30 00Z	48 h	102	65.58 km	77.36 km
1997	Winnie	8/17 00Z ~ 8/19 12Z	60 h	79	24.00 km	45.20 km
1998	Babs	10/24 00Z ~ 10/28 00Z	96 h	304	*58.30 km	86.65 km
1998	Nichole	7/8 12Z ~ 7/10 12Z	48 h	304	125.67 km	211.92 km
1998	Otto	8/3 12Z ~ 8/5 12Z	48 h	319	*73.43 km	74.12 km
1998	Yanni	9/27 12Z ~ 9/29 12Z	48 h	312	42.10 km	91.84 km
1998	Zeb	10/15 00Z ~ 10/17 00Z	48 h	328	35.24 km	67.41 km
1999	Maggie	6/5 00Z ~ 6/6 12Z	36 h	337	32.00 km	87.03 km
2000	Bilis	8/22 00Z ~ 8/23 12Z	36 h	272	42.68 km	61.81 km
2000	Kaitek	7/8 00Z ~ 7/10 00Z	48 h	197	43.50 km	126.90 km
2000	Xangsane	10/31 00Z ~ 11/1 12Z	36 h	244	49.38 km	★43.71 km
2001	Chebi	6/22 00Z ~ 6/24 00Z	48 h	170	65.52 km	150.64 km
2001	Lekima	9/25 00Z ~ 9/28 12Z	84 h	160	63.72 km	★38.02 km
2001	Nari	9/15 00Z ~ 9/20 00Z	120 h	106	66.14 km	76.87 km
2001	Toraji	7/29 00Z ~ 7/31 00Z	48 h	155	55.39 km	205.96 km
2001	Trami	7/10 12Z ~ 7/12 00Z	36 h	168	121.98 km	123.36 km
2001	Utor	7/4 00Z ~ 7/6 00Z	48 h	174	63.01 km	★30.47 km
2002	Nakri	7/8 12Z ~ 7/11 00Z	60 h	208	78.48 km	125.38 km
2003	Dujuan	9/1 00Z ~ 9/2 12Z	36 h	357	62.31 km	65.82 km
2003	Melor	11/2 00Z ~ 11/4 00Z	48 h	359	66.80 km	★54.10 km
2003	Morakot	8/3 00Z ~ 8/4 12Z	36 h	339	143.36 km	★81.18 km
2004	Aere	8/23 12Z ~ 8/26 00Z	60 h	368	50.30 km	100.17 km
2004	Haima	9/11 12Z ~ 9/13 12Z	48 h	352	66.54 km	90.31 km
2004	Mindulle	6/30 12Z ~ 7/3 00Z	60 h	364	41.75 km	60.63 km
2004	Nanmadol	12/3 12Z ~ 12/4 12Z	24 h	371	*459.76 km	★98.52 km
2004	Nockten	10/24 00Z ~ 10/26 00Z	48 h	369	68.21 km	74.18 km
2005	Haitang	7/17 00Z ~ 7/20 00Z	72 h	260	*53.31 km	100.74 km
2005	Longwang	10/1 00Z ~ 10/3 00Z	48 h	355	46.98 km	55.38 km
2005	Talim	8/31 00Z ~ 9/2 00Z	48 h	326	*38.54 km	54.26 km
2006	Bilis	7/12 12Z ~ 7/14 12Z	48 h	336	66.90 km	96.44 km
2006	Bopha	8/7 12Z ~ 8/9 12Z	48 h	186	63.81 km	197.85 km
2006	Kaemi	7/24 00Z ~ 7/26 00Z	48 h	342	30.53 km	66.40 km
2007	Krosa	10/5 12Z ~ 10/8 00Z	60 h	244	43.26 km	65.84 km
2007	Pabuk	8/7 00Z ~ 8/8 12Z	36 h	258	60.40 km	104.99 km
2007	Sepat	8/17 00Z ~ 8/19 12Z	60 h	206	35.48 km	56.65 km
2007	Wipha	9/17 12Z ~ 9/19 00Z	36 h	288	32.39 km	47.03 km
2007	Wutip	8/8 12Z ~ 8/9 12Z	24 h	279	*551.07 km	783.78 km
2008	Fungwong	7/27 00Z ~ 7/29 00Z	48 h	269	29.70 km	50.78 km
2008	Jangmi	9/27 12Z ~ 9/30 00Z	60 h	271	37.61 km	48.87 km
2008	Kalmaegi	7/16 12Z ~ 7/19 00Z	60 h	246	37.17 km	178.62 km
2008	Sinlaku	9/12 12Z ~ 9/16 12Z	96 h	223	36.26 km	81.13 km
2009	Morakot	8/6 12Z ~ 8/10 00Z	84 h	276	*44.66 km	★42.34 km
2009	Parma	10/4 00Z ~ 10/11 00Z	168 h	162	69.85 km	★49.61 km
2010	Fanapi	9/18 12Z ~ 9/20 12Z	48 h	241	37.25 km	61.30 km
2010	Megi	10/20 12Z ~ 10/24 00Z	84 h	213	48.39 km	★34.82 km

Forecasts 之 40 年 re-analysis (簡稱 ERA-40; Uppala 等 2005) 再分析資料, 由於 JRA25 為全世界首先同化風剖面資料之再分析資料, 因此無論在全球、大西洋、東北太平洋及西北太平洋等地區, JRA25 皆較 ERA-40 更能偵測並重現颱風之四維風場結構 (Onogi 等 2007)。因此, 本研究選擇以 JRA25 做為分析場與數值模式所需之初始與邊界資料。JRA25 之水平解析度為  $1.25^\circ \times 1.25^\circ$  經緯度網格資料, 時間間距為 6 小時, 垂直層數自地面至 10 hPa 共 18 層。此外, 使用美國國家大氣海洋管理局 (National Ocean and Atmospheric Administration, 簡稱 NOAA) 提供之衛星所載 Advanced Very High Resolution Radiometer, 觀測時間每 6 小時一筆、水平解析度  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  經緯度海表面溫度資料 (此資料其他說明可參考 <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>)。

本研究選取 1996~2010 年西北太平洋區域 47 個接近或登陸台灣之颱風 (表 1), 圖 1 即為此 47 個颱風中心與路徑, 但僅包含本研究分析模擬期間。由於各颱風影響、侵襲台灣之時間長短並不一致, 因此各颱風之分析與模擬時間長短亦不一致 (表 1 第 3、4 欄), 但皆為 JRA25 網格資料時間解析度 6 小時之倍數。此外, 表 1 第 5 欄為 47 個颱風個案於分析期間內可供校驗之觀測雨量測站數, 其數量變化自 79 至 371 個測站不等。

## 2、分析與校驗方法

為校驗 JRA25 所定位颱風中心 (主觀分析地面氣旋式環流與地面最低氣壓中心) 之合理性, 本文同時選取美國海軍聯合颱風警報中心 (Joint Typhoon Warning Center, 簡稱 JTWC) 及 JMA 所定義每 6 小時颱風最佳路徑資料, 分析三者平均

中心定位差異時, 由於分析與模擬時間內, 部分影響台灣降雨颱風在其生命期後期並未被 JTWC 及/或 JMA 定義為颱風。因此, JTWC 及/或 JMA 無中心定位資料時, 其中心位置在本研究中被定位為 JTWC 及/或 JMA 最後兩筆中心資料之線性外延。表 1 第 6 欄之「\*」即表示該颱風於分析、模擬時間內出現 JTWC 及/或 JMA 無中心定位之個案。

颱風環流無論是否與地形交互作用所產生之降雨, 常於短時間、小範圍內呈現劇烈變化之分佈 (例如: Wang 等 2012, 其文中圖 2)。因此, 本文選取校驗 CTRL 雨量預報結果優劣之地面雨量觀測站, 必須滿足「於個案分析模擬期間內皆有資料之測站」條件後, 將 CTRL 於模式網格點上之個案累積雨量內插至供校驗之地面雨量站位置, 即可計算統計預報校驗常用之技術得分。包括: 預兆得分 (threat score, 簡稱 TS, 亦為 critical success index):

$$TS = \frac{n11}{n11 + n01 + n10}$$

次數 ( $n$ ) 後第一位數字為模式, 第二位為觀測; 該數字 0 表示未達門檻, 1 表示達門檻。公正預兆得分 (equitable threat score, 簡稱 ETS, 亦為 Gilbert skill score):

$$ETS = \frac{n11 - C}{n11 + n01 + n10 - C}$$

其中  $C$  為「機率命中值」(hits by chance):

$$C = \frac{(n11 + n10) \times (n11 + n01)}{n11 + n10 + n01 + n00}$$

本研究之  $C$  值隨不同個案而有不同值。偏倚得分 (bias score, 簡稱 BS):

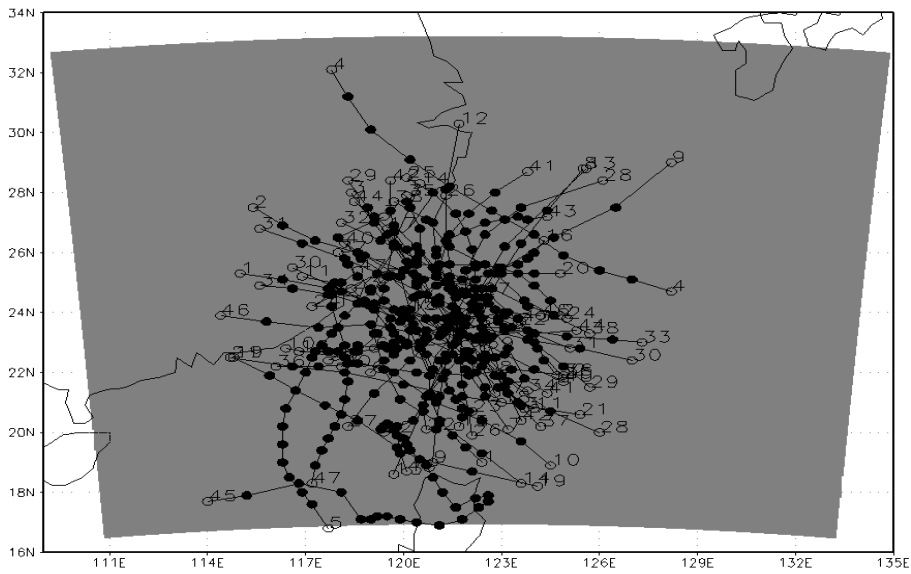


圖 1 由 JTWC 定位之每 6 小時颱風中心與路徑，起點與終點以空心圓標示。右上數字表示第幾個颱風（可參考表一，例如：“4”為 1997 年 Winnie）。灰色區為 CReSS 模式模擬範圍。

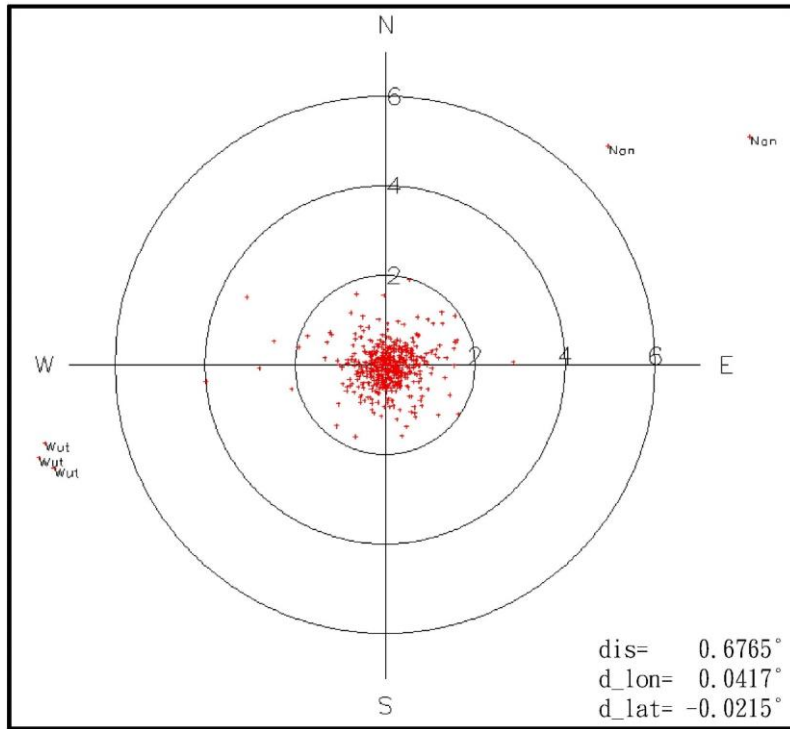


圖 2 本文分析 47 個颱風 JRA25 與 JTWC 颱風中心差距經緯向分布圖 (JRA25 減 JTWC)。圖右下數字為平均中心差(dis)及平均經向(d\_lon)、緯向差(d\_lat)，單位皆為度。“Nan”與“Wut”分別代表 Nanmadol (2004)與 Wutip (2007)。

$$BS = \frac{n11+n10}{n11+n01}$$

詳細統計方法可參閱 Schaefer (1990)。不論何種得分，皆需選取一門檻值為模擬或觀測雨量是否達標之標準，本文選擇之門檻值為累積雨量大於或等於 50、100、130、150、200、250、300 及 350 mm 等。累積雨量用兩種計算類別，分別為個案總雨量（簡稱：pcase）類別與標準化個案 24 小時總雨量（簡稱：stdcase，門檻值×模擬小時數÷24）類別。顯然，無論是模擬或觀測累積雨量，當統計雨量時間超過 24 小時以上，pcase 相較於 stdcase 更易達到門檻值。

### 3、數值模式

台灣颱風洪水研究中心 (Taiwan Typhoon and Flood Research Institute, 簡稱 TTFRI) 自 2010 年開始，於台灣颱風季進行作業化之「定量降雨系集預報實驗」(Lee 等 2011)，在總計約 20 個數值模式系集成員中，利用日本名古屋大學地球水循環研究中心 (Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University) 所研發之雲解析風暴模式 (Cloud-Resolving Storm Simulator, 簡稱 CReSS; Tsuboki 與 Sakakibara 2002、2007) 2.3 版常可得到較其他系集成員為佳之預報結果。而對於颱風結構 (例如: Akter 與 Tsuboki 2012) 或侵台颱風之定量降雨預報 (例如: Wang 等 2012)，CReSS 亦有優異之模擬與預報能力。因為 CReSS 較新之 3.4.1 版海溫資料可隨時間變動與更新，因此，本研究選擇此新版之 CReSS 為數值模式模擬工具。

圖 1 灰色區為 CReSS 模擬範圍，模式投影方式使用藍伯特正角圓錐投影法 (Lambert conformal conic projection)，涵蓋範圍約在 110°~135°E、16°

~33°N 區域內。模式水平解析度設定為 3 公里，網格點數在東西向與南北向分別為 800 與 600 點。垂直層數 40 層，垂直解析度在低對流層較高，可達 150 公尺，並隨高度增加而遞減，平均為 0.5 公里；模式頂設定約至 19.6 公里。此外值得注意的是，以數值模式探討颱風造成中尺度區域之降雨分佈，即使利用同樣數值模式，若模式版本、各參數設定、編譯器 (compiler) 版本等任一選擇有所不同，在經過較長時間 (例如本研究以長時間步進 7.5 秒、短時間步進 3.75 秒積分 24~168 小時) 模擬之後，降雨分佈將可能呈現明顯不同之模擬結果，此中小尺度預報能力之限制在 Knutson 等 (2010b) 與 Emanuel (2013) 皆曾被提及。

其他較重要之模式相關設定與 Tsuboki 與 Sakakibara (2007) 相同，例如：雲微物理過程選用混合相位總體冷雲降雨 (mixed phase bulk cold rain) 法 (Lin 等 1983; Cotton 等 1986; Murakami 1990; Ikawa 與 Saito 1991; Tsuboki 與 Sakakibara 2007)，未使用任何積雲參數法。此外，雖然 CReSS 3.4 版較 2.3 版額外增加冰雹 (hail) 降水模組，但此模組仍存在程式錯誤，因此本研究模擬分析之模式降雨並未計算 CReSS 3.4 版本更新之冰雹模組所造成之累積降雨。

## 三、控制實驗 (CTRL) 之分析與校驗

### 1、颱風路徑

颱風路徑為決定其造成台灣降雨分佈非常重要且關鍵之因素 (Hsu 等 2013)，因此，天氣數值模式模擬結果與觀測資料之路徑 (中心) 校驗為一重要評估依據。在比較 CTRL 與觀測之颱風中心定位平均差異之前，統計本研究選取之 47 個颱風個案於總計 2640 小時分析時間，共 487 個中心

位置(2640小時除以每6小時,加47個初始颱風位置)分析場(JRA25)與觀測之差異(表1,但僅列JRA25與JTWC定位差),結果顯示JRA25與JTWC及與JMA所定位之颱風中心平均差距(表2)分別為64.97與61.56公里。由於本研究主要分析颱風接近台灣所造成台灣陸地之降雨分佈,個案分析模擬時間分別於72、96及120小時以上者僅8、4及2個案,因此僅討論平均颱風中心差異而未採用以時間分類(例如:第24、48及72小時)所計算之平均颱風中心差異。

表2 不同資料間47個颱風平均中心定位差異。

JTWC - JRA25	64.97 km
JTWC - CTRL	88.05 km
JMA - CTRL	90.64 km
CTRL - JRA25	50.64 km
JTWC - JMA	36.20 km
JMA - JRA25	61.56 km

圖2為JRA25與JTWC中心定位差異(JRA25減JTWC,即以JTWC所定之中心為原點)於經向(X軸)與緯向(Y軸)分佈圖,顯示多數JRA25定位之颱風中心皆與JTWC觀測差異於1°經緯度範圍內。此外值得注意的是,表2所列JTWC與JMA兩不同作業中心所定義之颱風中心差異約為36.2公里。Song等(2010)曾分析比較JTWC與JMA於1951~2007年間西北太平洋地區所有颱風之定位,兩不同作業單位間差異最大可達約26公里左右(Song等2010,其圖2c)。颱風定位方式於兩不同作業單位使用方法雖大同小異,皆為參考飛機觀測、衛星、雷達及探空等觀測資料,以Dvorak法(Dvorak 1972、1973)或改善之Dvorak法定位颱風中心(Dvorak 1975; Velden等

1998; Olander與Velden 2007),但與本文之颱風中心定位方式則有顯著不同。如上節所述,本文定位JRA25颱風中心方式為同時參考JRA25地面最低氣壓中心與地面氣旋式風場環流中心,而CTRL因中尺度模式於低層常受地形影響,導致地面或近地層難以定位颱風或低壓中心,因此CTRL之颱風中心則以最靠近700 hPa(距地表2930.24公尺等高度)且最明顯之氣旋式風場環流中心定位為CTRL颱風中心。

分析Nanmadol(2004)與Wutip(2007)兩個案於24小時模擬分析時間各共5個颱風中心定位之平均差異(JRA25與JTWC之比較),分別高達459.76公里與551.07公里(表1第6欄,以及圖2標Nan與Wut者,僅額外標示差異超過6°經緯度之中心),此兩數值遠高於47個颱風平均64.97公里(表2)。分別分析2004年12月4日0000 UTC~1200 UTC與2007年8月9日0000 UTC~1200 UTC之JRA25地面氣壓、風場及颱風中心與路徑(圖3,颱風路徑起點為空心圓,該時間之終點為空心三角形),JTWC對該兩颱風最後定位時間分別為2004年12月4日0000 UTC(圖3a)與2007年8月9日0000 UTC(圖3b),之後已無明顯颱風環流與中心可供定位(圖3c~f)。JTWC(圖3藍色點)最後定位Wutip(2007)之位置為121.7°E、23.2°N,於該時間在JTWC定位之颱風中心附近已無法由JRA25(圖3紅色點)分析颱風中心與氣旋式環流(圖3b),此現象於前一個分析時間(2007年8月8日1800 UTC)即存在,導致該時間之中心差異已達165.48公里(圖未示)。顯然僅憑JRA25地面氣壓與氣旋式環流風場定義颱風中心,在類似此兩颱風個案(弱颱風或即將消散、即將變性等)會造成明顯定位差異。固然可考慮將JTWC無定位資料或弱颱風導致定位

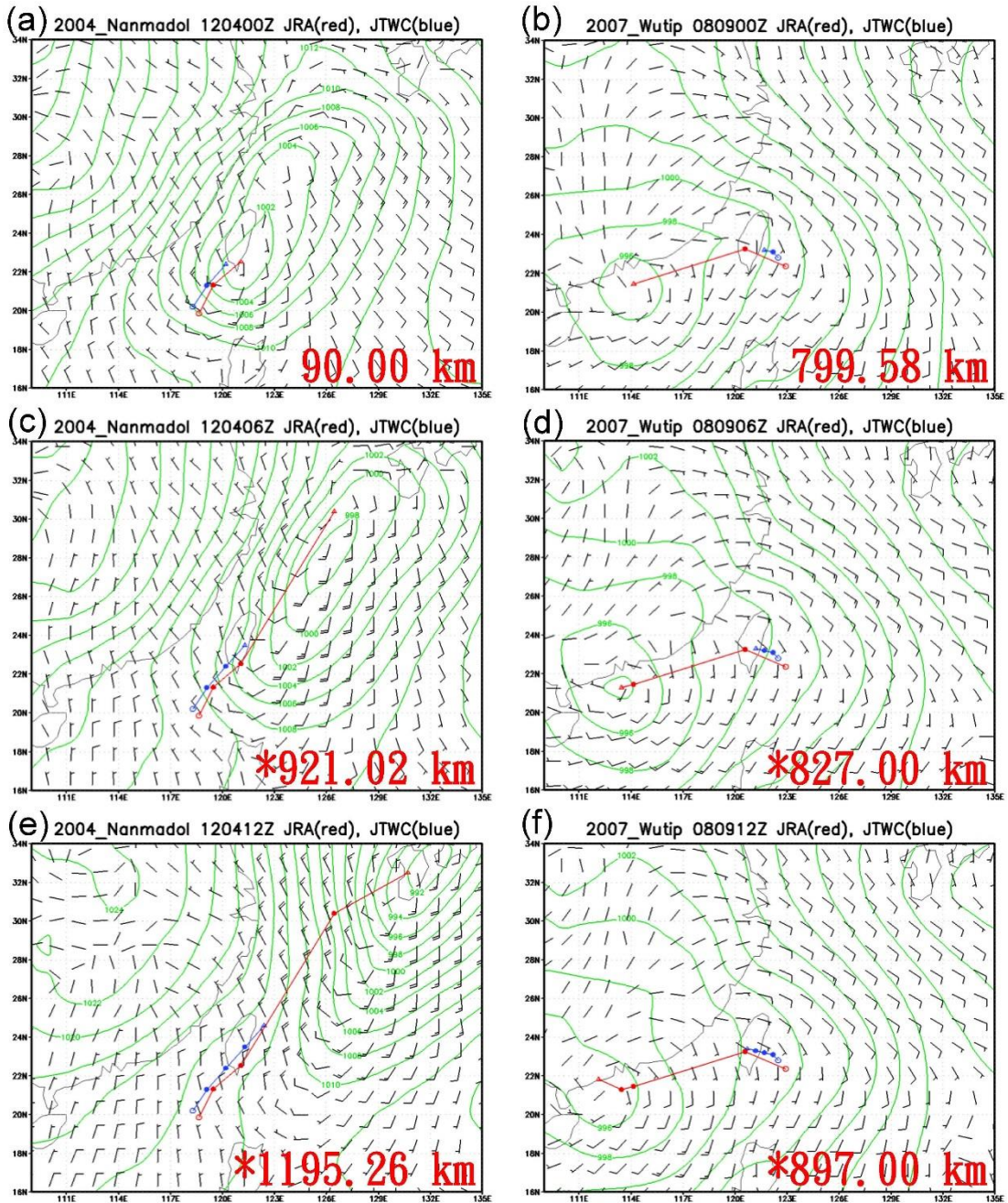


圖 3 以 JRA25 (紅色) 及以 JTWC (藍色) 定位之颱風中心與路徑，終點標記為三角。時間分別為 Nanmandol 於 2004 年 12 月 4 日(a) 0000、(c) 0600 及(e) 1200 UTC；Wutip 於 2007 年 8 月 9 日(b) 0000、(d) 0600 及(f) 1200 UTC 之 JRA25 地面氣壓(等值線，單位：hPa，間距 2 hPa)及風場(短桿及長桿分別為 5 及 10 m s<sup>-1</sup>)。圖右下為該時間颱風中心差距，前標“\*”表示無 JTWC 定位，詳見內文。



困難之個案時間排除於此統計之外，但本研究主要為分析颱風造成之台灣降雨分佈，而由即將消散或消散不久之颱風與鄰近環流系統共同影響下所造成之降雨，本研究亦納入討論。

綜上所述，以 JRA25 之水平解析度（於台灣附近約為 120 公里解析度），且未刻意排除定位困難之颱風個案之下，提供為 CReSS 初始場與邊界條件之網格分析資料與觀測平均中心定位差，實屬可接受範圍。

相較 JTWC 與 JRA25 之颱風中心定位平均差（64.97 公里），觀測（JTWC 與 JMA）與 CTRL 共 47 個颱風個案平均定位差則分別增至 88.05 與 90.64 公里（表 1 與表 2），但其中仍有 10 個個案

之 CTRL 模式模擬颱風中心較 JRA25 分析資料者更接近於 JTWC 所定位之颱風中心（表 1 第 7 欄標「★」個案）。圖 4 為 CTRL 減 JTWC 之中心定位差經緯向分佈圖，相較於圖 2，平均經向差由 0.0417°西移至-0.0385°，而平均緯向差則由-0.0215°南移至-0.1006°，顯示平均而言，模式模擬之颱風位置較網格再分析資料離觀測颱風位置稍遠，雖可能與模式可預報度有關，但亦難以排除是否為主觀分析 CTRL 與 JRA25 颱風中心所造成之誤差。此外，表 2 所列 CTRL 與 JRA25 之中心差（50.64 公里）小於 JTWC 與 CTRL 者（88.05 公里）以及 JTWC 與 JRA25 者（64.97 公里）亦屬合理，原因可能為 JRA25 是 CTRL 之初始與邊界資料所致。

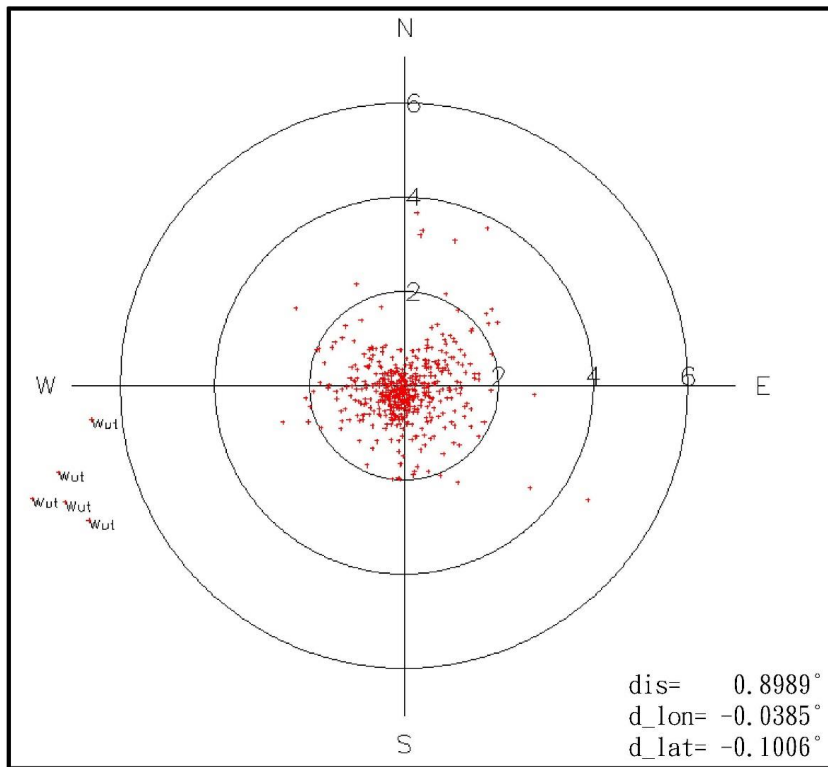


圖 4 同圖 2 但為 CTRL 與 JTWC 定位差（CTRL 減 JTWC）。

TTFRI 於 2011 年針對 16 個西北太平洋地區颶風作業預報結果顯示,在其 18 個系集預報模式成員、367 個系集即時作業預報時間,系集模擬之 24、48 及 72 小時颶風中心平均預報誤差分別約為 97、179 及 281 公里(可參考 <http://www.ttfri.narl.org.tw/service01.html>)。此外,NOAA 之國家颶風中心(National Hurricane Center, 簡稱 NHC)針對 2013 年大西洋區於 24、48 及 72 小時颶風平均作業預報之中心誤差,分別約為 79、164 及 226 公里(可參考 [http://www.nhc.noaa.gov/verification/pdfs/Verification\\_2013.pdf](http://www.nhc.noaa.gov/verification/pdfs/Verification_2013.pdf))。以天氣數值模式模擬結果與實際觀測之平均颶風中心差異而言,本研究選 47 個颶風個案平均模擬時間為 56.17 小時,CTRL (約 88 公里)優於前述 TTFRI 之 24 小時平均颶風路徑預報誤差(97 公里)與 NHC 之 48 小時颶風路徑預報誤差(164 公里)。導致此結果主因應為:實務即時(real-time)作業使用之初始場資料為全球預報模式之預報資料(多數現行作業預報之初始場與邊界資料使用美國 National Weather Service/Global Forecast System 提供之即時網格資料),而本研究使用之初始場資料為 JRA25 再分析資料,且此分析資料有同化風剖面資料(Onogi 等 2007)。對於解析大氣環境場而言,再分析之網格資料顯然優於模式預報場。

## 2、定量降雨

圖 5 為本文 47 個颶風於分析模擬期間(表 1 第 3、4 欄)之累積降雨(色階,單位: mm),圖中各個案左側為觀測、右側為 CTRL 模擬以及上方處亦列出 CTRL 與觀測個案總降雨(即 pcase 類別)門檻為 150 mm 之 TS 值。如第二節所述,圖 5 之觀測雨量是由各個案分析期間皆有雨量觀測之地面站,經 Cressman 法(Cressman 1959)內插至水平解析度 3 公里網格所繪製。由前小節校驗

結果得知,以 JRA25 再分析資料為 CReSS 模式初始場與邊界資料之 CTRL,颶風路徑模擬與觀測相近,使得 CTRL 模擬、重建(reconstruct)台灣受颶風影響之累積降雨與觀測降雨分佈具相當程度一致性。以 TS 門檻 150 mm 為例,有多達 34 個個案(佔 72.3%)之 TS 超過 0.4,其中在模擬時間較長且降雨較大之 Lekima (2001)、Haitang (2005)、Sinlaku (2008)、Morakot (2009)及 Parma (2009)等 5 個颶風個案(平均 CTRL 與 JTWC 颶風中心差距為 62.37 公里),pcase 類別之 TS 可高於 0.8 以上;此 pcase 類別雖較 stdcase 類別為寬鬆,但在模擬分析時間較短且降雨較少之 Nichole (1998)、Chebi (2001)、Trami (2001)及 Melor (2003)等 4 個颶風個案(平均 CTRL 與 JTWC 颶風中心差距為 134.26 公里),CTRL 與地面觀測 pcase 類別於 150 mm 門檻之 TS 仍低近 0。此結果除顯示 CReSS 模式對強度愈大且分布愈廣之颶風降雨有較佳之模擬、預報能力外,亦顯示颶風路徑差異與降雨有重要關係(Hsu 等 2013)。

圖 6 為觀測(橫軸)與 CTRL(縱軸)之 pcase 類別個案總雨量分佈圖,顯示在本研究所選 47 個颶風個案共 12200 筆資料(測站數,表 1 之第 5 欄總和)中,兩者間相關係數可達約 0.79 之正相關。線性趨勢線分析顯示,平均而言,個案單一測站總雨量約在 98 mm 以下者,CTRL 會略高估實際降雨,而在約 98 mm 以上者 CTRL 則會低估。進一步之校驗分析(例如:颶風中心與測站相對位置、地形因素、颶風強度、內插方式……等),將有助於理解、評估 CReSS 雲模式對於颶風定量降雨模擬之優缺點,但此議題非為本研究之重點。

圖 7 與圖 8 分別列出 47 個颶風於不同雨量門檻(50~350 mm 不等),以不同方式(stdcase

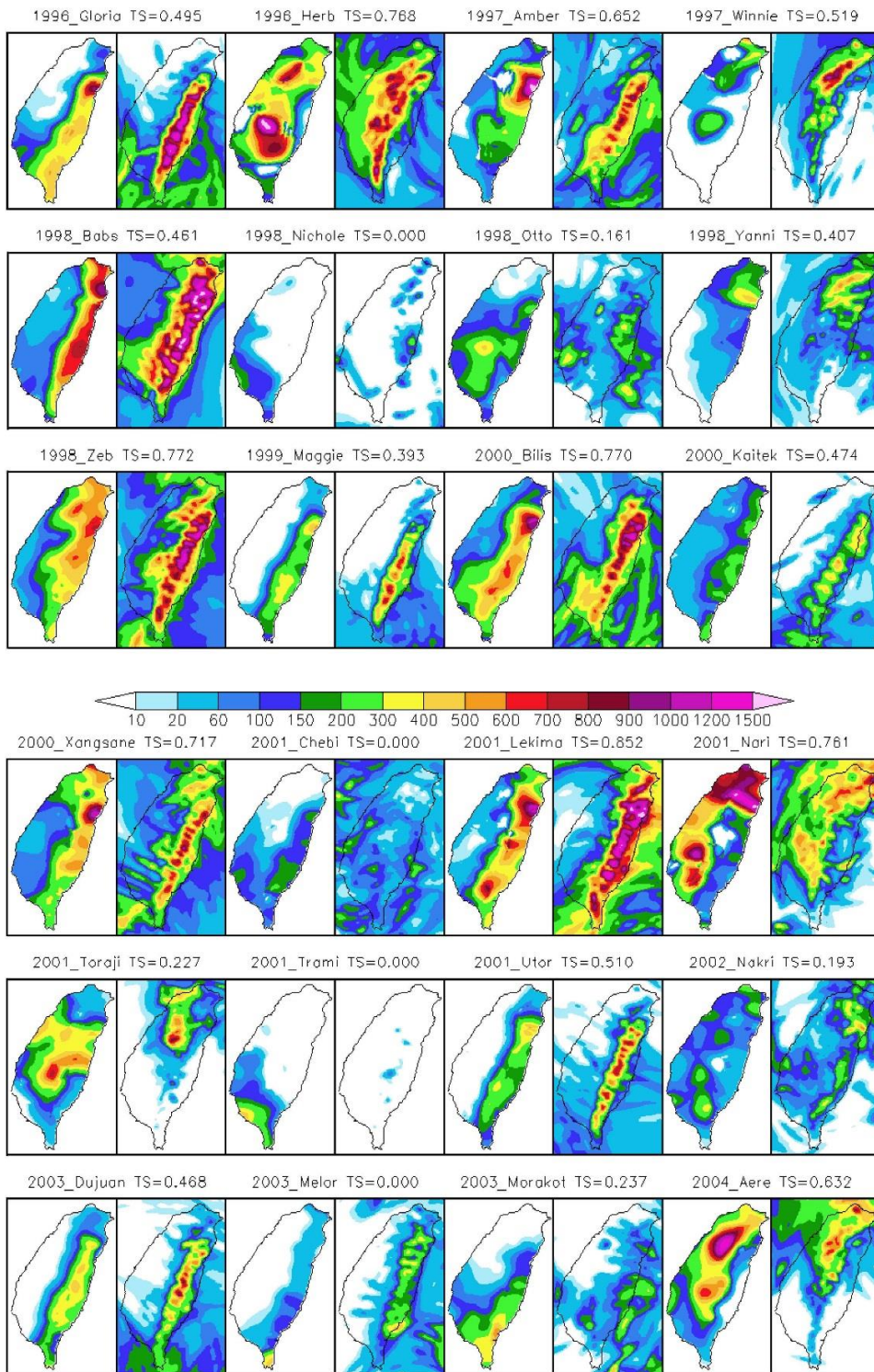


圖 5 色階為 47 個颱風 (參閱表一) 分析模擬期間地面觀測 (左側) 及 CTRL 模擬 (右側) 之各個案累積雨量，單位皆為 mm。各圖上側數值為個案總雨量(pcase)類別門檻值 150 mm 之 TS 得分。

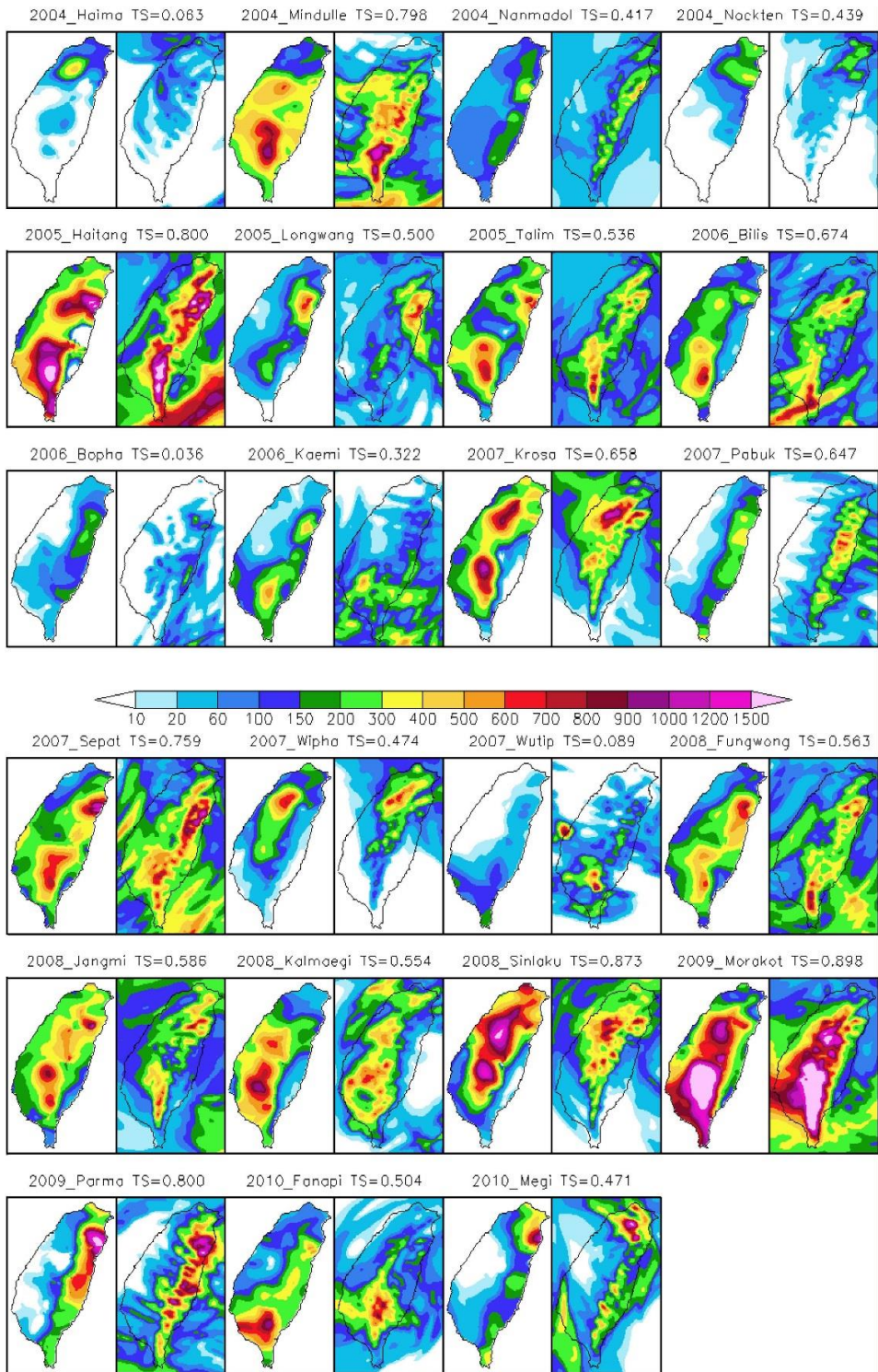


圖 5 (續)。

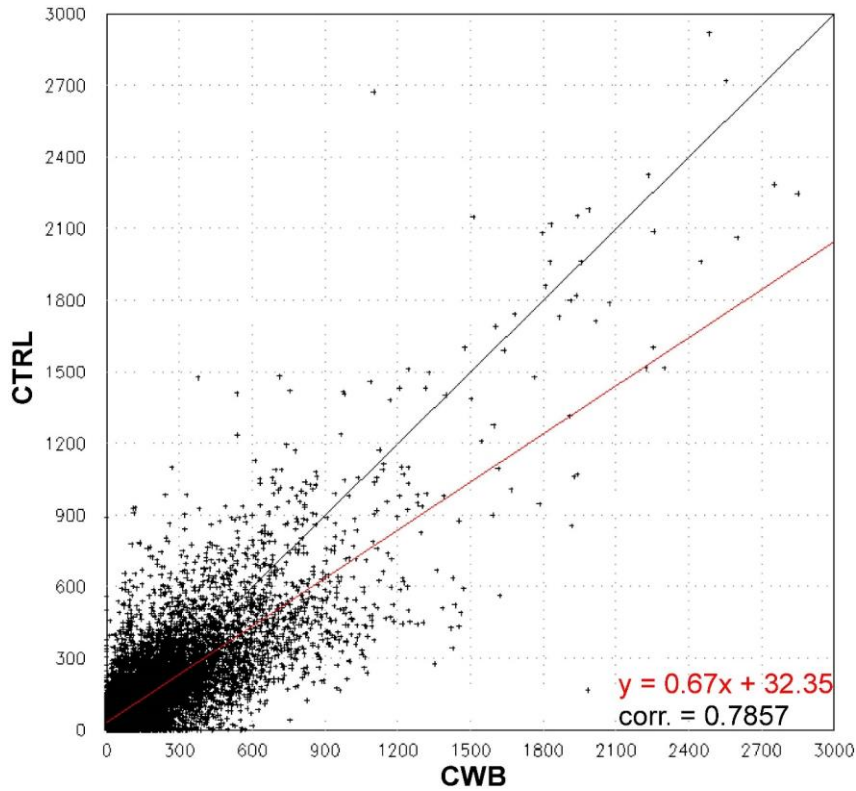


圖 6 本文所選 47 個颱風各測站觀測個案總降雨（橫軸，單位：mm）及 CTRL 內插至測站位置個案總降雨（縱軸，單位：mm）分布圖。圖中紅線為 12200 筆資料之線性趨勢線，圖右下為趨勢線方程及相關係數。

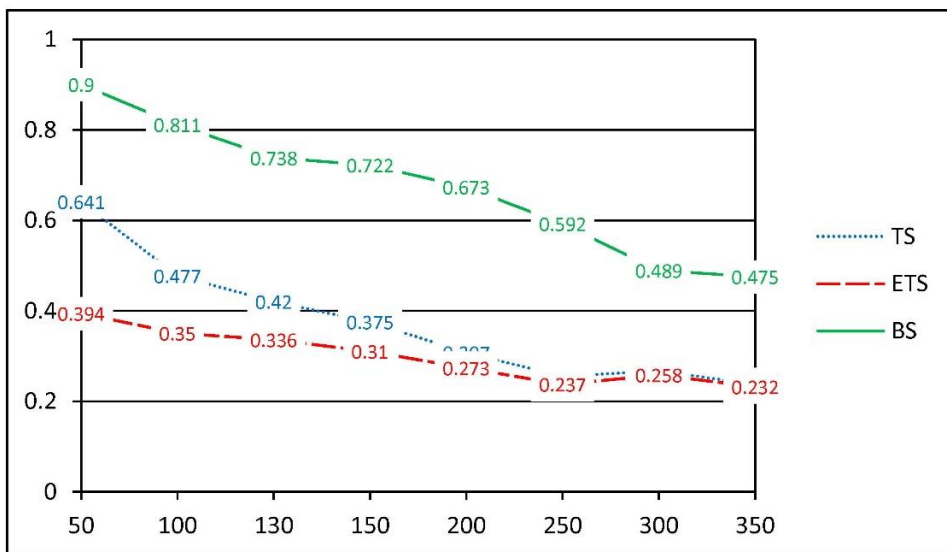


圖 7 以標準化個案 24 小時總雨量(stdcase)類別計算 47 個颱風觀測雨量站與 CTRL 於不同雨量門檻之 TS（藍色）、ETS（紅色）及 BS（綠色）得分。

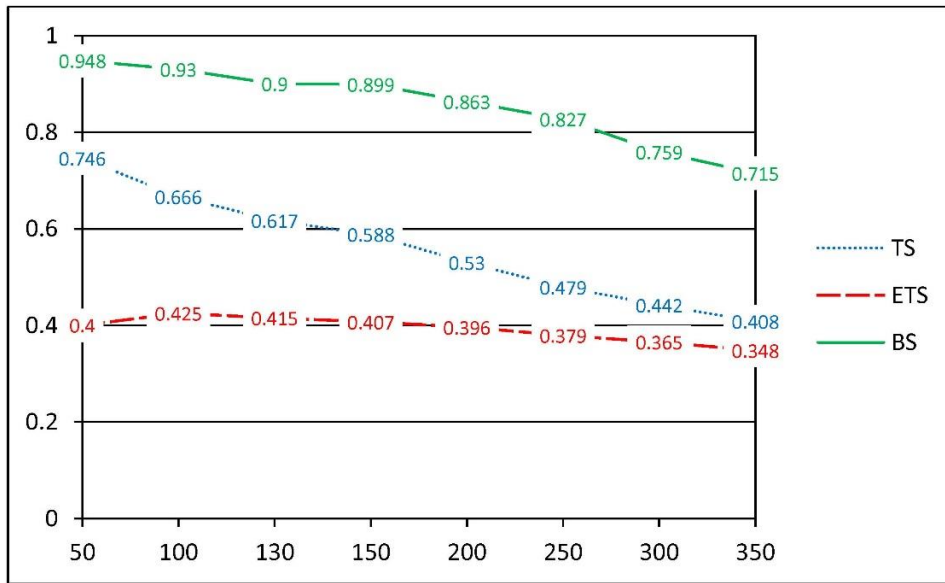


圖 8 同圖 7，但為以個案總雨量(pcase)類別計算之得分。

與 pcase 類別)計算之平均 TS、ETS 及 BS 得分。如第二節所述，pcase(個案總雨量)較 stdcase(標準化 24 小時累積雨量)易達門檻值，因此不論是 TS、ETS 或 BS 得分，pcase 類別皆高於 stdcase 類別(圖 7、8)。此外，隨雨量門檻愈高，TS 與 BS 得分皆愈低，主因除為達門檻之測站數(不論是地面雨量站或 CTRL 內插至有資料測站)隨雨量門檻值增高而減少，亦表示中尺度數值天氣模式對於中小尺度之定量降雨預報、模擬，常因造成較大降雨之強對流系統位置及/或強度有模擬誤差，導致統計得分降低(例如：Davis 等 2006)。

Huang 等(2005)研究顯示，將 GPS (Global Positioning System)掩星(occultation)技術反演之溫度、水氣之一維(地面至高層)資料，以三維資料變分法同化(assimilate)後改善模式初始場，可有效提升 Nari(2001 年 9 月 16 日 0000 UTC 為該文模擬初始時間)與 Nakri(2002 年 7 月 7 日 1200 UTC 為該文模擬初始時間)颱風模擬第 24

~48 小時之累積降雨。兩颱風降雨之平均 TS 得分於 50 mm 門檻值分別由 0.462、0.113 提升至 0.504、0.166；於 100 mm 門檻值則分別由 0.277、0.000 提升至 0.393、0.129 (Huang 等 2005 之表 2)。比較本文模擬分析之 Nari (2001)與 Nakri (2002)兩颱風(本研究該兩颱風模擬分析初始時間與 Huang 等 2005 不同，可參考表 1 第 3、4 欄)，stdcase 類別(標準化個案 24 小時總雨量)計算之 TS 得分於 50 mm 門檻值分別為 0.638、0.244，此值優於 Huang 等(2005)以資料同化後之 TS 得分達 0.078~0.134；但於 100 mm 門檻值之 TS 得分分別為 0.163、0.111，則稍低於 Huang (2005)之結果達 0.018~0.230。此外，Wu 等(2013)以系集卡曼濾波(ensemble Kalman filter)植入渦旋、同化非傳統觀測資料等方式，模擬 Sinlaku (2008)於 9 月 12 日 0000 UTC~15 日 0000 UTC 共 72 小時(其模式初始時間為 9 月 11 日 1200 UTC)北台灣與中台灣區域之累積降雨，其模式

最小網格解析度 1.67 公里模擬之降雨結果顯示，ETS 得分在 100~1000 mm 各不同門檻值約為 0.54~0 左右（可參考 Wu 等 2013 之圖 7）。而本研究 CTRL 模擬之 Sinlaku (2008)於 9 月 12 日 1200 UTC~16 日 1200 UTC 共 96 小時累積降雨，在 100~1000 mm 每隔 100 mm 之 pcase 類別（個案總雨量）ETS 得分分別為 0.583、0.514、0.246、0.182、0.123、0.119、0.074、0.052、0.039 及 0。值得注意的是，不論是分析模擬時間、初始與邊界網格分析資料、數值模式、模式實驗設計、計算統計得分之觀測雨量站資料……等因素有所不同，皆可導致難以定量地互相比較 TS 與 ETS 得分，僅適合定性地參考統計得分結果。

#### 四、結 論

本研究利用 CReSS 雲解析數值模式（水平解析度 3 公里）之不同實驗設計，探討在氣候變遷因素影響下，颱風造成台灣降雨分佈之差異。比對數值模式控制實驗(CTRL)與敏感度實驗前，本文先分析校驗本研究所選 1996~2010 年間 47 個影響台灣降雨之颱風個案，主要評估 CTRL 與實際觀測之颱風中心（路徑）與定量降雨等兩重要因子。

結果顯示，相較於 NHC 與 TTFRI 兩即時作業單位之平均颱風中心（路徑）預報結果而言，納入風剖面資料同化之 JRA25 再分析資料可合理解析颱風環流與其移動路徑，而以 JRA25 做為 CReSS 之 CTRL 初始場與邊界條件，CTRL 雖於兩個較弱及/或即將變性之颱風 24 小時平均中心與觀測(JTWC)颱風中心出現 4~5 百公里左右差距，但於所有 47 個颱風之平均中心則有不錯之模擬結果（88.05 公里）。另外，定性而言，由於 CTRL 有不錯之颱風中心（路徑）模擬，相較於其

他利用較複雜方法改善初始場之研究，CTRL 在 TS、BS 及 ETS 平均降雨統計得分上，其定量降雨模擬亦有不錯之模擬成果，可合理呈現侵台颱風之降雨歷程。因此，本文所選之數值模式模擬策略，實可合理地做為本研究以天氣數值模式探討氣候變遷因素影響下，颱風對於台灣降雨分佈議題之控制實驗組。

#### 致 謝

感謝《財團法人國家實驗研究院·國家高速網路與計算中心》提供軟硬體資源，使得本研究所需大量計算得以順利進行。感謝 TTFRI 大氣研究資料庫提供之中央氣象局地面雨量站觀測資料。感謝兩位匿名審查者給予寶貴之審查意見。本文由科技部計畫 NSC 100-2119-M-003-005-MY5 支持下完成。

#### 參考文獻

- Akter, N., and K. Tsuboki, 2012: Numerical simulation of cyclone Sidr using a cloud-resolving model: Characteristics and formation process of an outer rainband. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 789-810. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2011MWR3643.1>.
- Chang, C. -P., Y. -T. Yang, and H. -C. Kuo, 2013: Large increasing trend of tropical cyclone in Taiwan and the roles of terrain. *J. Climate*, **26**, 4138-4147. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00463.1>.
- Chien, F. -C., and H. -C. Kuo, 2011: On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009). *J. Geophys. Res.*, **116**, D05104, doi:10.1029/2010JD015092.

- Cotton, W. R., G. J. Tripoli, R. M. Rauber, and E. A. Mulvihill, 1986: Numerical simulation of the effects of varying ice crystal nucleation rates and aggregation processes on orographic snowfall. *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 1658-1680.
- Cressman, G. P., 1959: An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **87**, 367-374.
- Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M. C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J. -G. Winther, 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G. -K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Davis, C., B. Brown, and R. Bullock, 2006: Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1772-1784.
- Dvorak, V. F. 1972: A technique for the analysis and forecasting for tropical cyclone intensities from satellite pictures, NOAA Tech. Memo., NESS36, 15 pp.
- Dvorak, V. F. 1973: A technique for the analysis and forecasting for tropical cyclone intensities from satellite pictures, NOAA Tech. Memo., NESS45, 19 pp.
- Dvorak, V. F. 1975: Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery, *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 420-430.
- Emanuel, K. A., 2013: Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **110**, 1219-1224. doi: 10.1073/pnas.1301293110.
- Fang, X., Y. -H. Kuo, and A. Wang, 2011: The impacts of Taiwan topography on the predictability of typhoon Morakot's record-breaking rainfall: A high-resolution ensemble simulation. *Wea. Forecasting*, **26**, 613-633.
- Hsu, L. -H, H. -C. Kuo, and R. G. Fovell, 2013: On the geographic asymmetry of typhoon translation speed across the mountainous island of Taiwan. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1006-1022.
- Huang, C. -Y., Y. -H. Kuo, S. -H. Chen, and F. Vanderberghe, 2005: Improvements in typhoon forecasts with assimilated GPS occultation refractivity. *Wea. Forecasting*, **20**, 931-953.
- Ikawa, M., and K. Saito, 1991: Description of a nonhydrostatic model developed at the Forecast Research Department of the MRI. MRI Tech. Rep. **28**, 238 pp.
- Knutson, T. R. and Coauthors, 2010a: Tropical cyclones and climate change, *Nat. Geosci.*, **3**, 157-163.
- , C. Landsea, and K. Emanuel, 2010b: Tropical cyclones and climate change: A review. *Global Perspectives on Tropical Cyclones*, World Scientific, pp.243-284.



- Lackmann, G. M., 2015: Hurricane Sandy before 1900 and after 2100. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 547-560. DOI:10.1175/BAMS-D-14-00123.1.
- Lee, C. -S., L. -Y. Chang, M. -J. Yang, L. -F. Hsiao, and H. -C. Kuo, 2011: Typhoon quantitatively precipitation forecast ensemble experiment in Taiwan: 2010. 8th Annual Meeting and Geosciences World Community Exhibition (AOGS), Taipei, Taiwan.
- Lin, Y. -L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1065-1092.
- Murakami, M., 1990: Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud—The 19 July 1981 CCOPE cloud. *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 107-128.
- Olander, T. L., and C. S. Velden, 2007: The advanced Dvorak technique: Continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery, *Wea. Forecasting*, **22**, 287-298, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/WAF975.1>.
- Onogi, K., and Coauthors, 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Schaefer, J. T., 1990: The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570-575.
- Song, J. -J., Y. Wang, and L. Wu, 2010: Trend discrepancies among three best track data sets of western North Pacific tropical cyclones, *J. Geophys. Res.*, **115**, D12128, doi: 10.1029/2009JD013058.
- Tsuboki, K., and A. Sakakibara, 2002: Large-scale parallel computing of cloud resolving storm simulator. *High Performance Computing: 4th International Symposium*, H. P. Zima et al., Eds., Lecture Notes in Computer Science, Vol. **2327**, Springer, 243-259.
- , and ———, 2007: Numerical Prediction of High-Impact Weather Systems: The Textbook for the Seventeenth IHP Training Course in 2007. Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University, and UNESCO, 273 pp.
- Uppala, S. M., and Coauthors, 2005: The ERA-40 reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 2961-3012. DOI: 10.1256/qj.04.176.
- Velden, C. S., T. L. Olander, and R. M. Zehr, 1998: Development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity from digital geostationary satellite infrared imagery, *Wea. Forecasting*, **13**, 172-186,
- Wang, C. -C., H. -C. Kuo, Y. -H. Chen, H. -L. Huang, C. -H. Chung, and K. Tsuboki, 2012: Effects of asymmetric latent heating on typhoon movement crossing Taiwan: The case of Morakot (2009) with extreme rainfall. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 3172-3196.
- Wu, C. -C., S. -G. Chen, S. -C. Lin, T. -H., Yen, and T. -C. Chen, 2013: Uncertainty and predictability of tropical cyclone rainfall based on ensemble

- simulation of typhoon Sinlaku (2008). *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3517-3538.
- , and Y. -H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan – Current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67-80.
- , 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. Forecasting*, **17**, 1001-1015.

# **Typhoon Rainfall Over Taiwan Under the Impact of Climate Change**

## **Part I: Verification of Numerical Control Simulation**

**Mark Yin-Mao Wang Cheng-Ta Chen Chih-Sheng Chang Shih-How Lo**

**Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan**

(manuscript received 18 March 2015 ; in final form 3 June 2015)

### **ABSTRACT**

In this study, the cloud-resolving model was utilized to discuss the impact of climate change on typhoon (TY) rainfall over Taiwan. Using atmospheric reanalysis and sea surface temperature observations as the model initial and boundary conditions, total 47 TYs affected Taiwan during 1996~2010 were simulated, and the set of simulations was treated as control run (CTRL) for this study. Compared with the results of real-time forecasts by operational centers, it shows that the strategy of CTRL utilized by this study can provide good and reliable results in terms of TY tracks and its rainfall over Taiwan, although the complex methods (e.g. EnKF for TY initial condition) utilized by other related researches can simulate a slightly better or comparable rainfall pattern over Taiwan than the CTRL. Therefore, the CTRL with 3-km horizontal resolution can be used as the control simulation for discussing the impact of climate change on TY rainfall over Taiwan.

**Key Words: Climate change, Typhoon rainfall, Cloud-resolving model**

