王尹懋等

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 公里附近以内之平均降雨增加 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°×1.25° 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° × 0.25° 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):

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

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

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。

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	

表 2 不同資料間 47 個颱風平均中心定位差異。

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(Dvorak1972、1973)或改善之 Dvorak法定位颱風中心(Dvorak1975; 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 公尺等高面)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 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2hPa)及風場(短桿及長桿分別為5及10ms⁻¹)。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 颱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 小時颱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)。以天氣數值模式模 擬結果與實際觀測之平均颱風中心差異而言,本 研究所選47個颱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 小時平均颱風路徑預報誤差(97 公里)與 NHC 之 48 小時颱風路徑預報誤差(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 個颱風於分析模擬期間(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,颱風路徑模擬與觀 測相近,使得 CTRL 模擬、重建(reconstruct)台灣 受颱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個颱風個案(平均CTRL與JTWC颱 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個颱風個案(平均 CTRL 與 JTWC 颱風中心 差距為 134.26 公里), CTRL 與地面觀測 pcase 類 別於150mm 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颱風降雨有 較佳之模擬、預報能力外,亦顯示颱風路徑差異 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 颱風個案共 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:颱風中心與測站 相對位置、地形因素、颱風強度、內插方式…… 等),將有助於理解、評估 CReSS 雲模式對於颱 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 個颱風於不同雨量 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 小時總兩量(stdcase)類別計算 47 個颱風觀測兩量站與 CTRL 於不同兩量門檻之 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100mm 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 兩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: Objectbased 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 recordbreaking 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: 10.1029/2009 JD013058.

- 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.

王尹懋等

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