

交通部中央氣象局

委託研究計畫期末成果報告

中央氣象局全球預報模式對臺灣梅雨期之 降雨預報能力評析

計畫類別：☒氣象 ☐海象 ☐地震

計畫編號：MOTC-CWB-105-M-09

執行期間：105 年 05 月 05 日至 105 年 12 月 31 日

計畫主持人：黃婉如

執行機構：國立臺灣師範大學

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

☐赴國外出差或研習心得報告 1 份

☐赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份

☐出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	中央氣象局全球預報模式對臺灣梅雨期之降雨預報能力評析		
計畫編號	MOTC-CWB-105-M-09		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立臺灣師範大學		
年度	105	執行期間	5 月 5 日起至 12 月 31 日
本期經費 (單位：千元)	500 千元		
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100	100	0
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率 (%)
	500	500	100
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	黃婉如		陳冠杰
報告頁數	35	使用語言	中文
中英文關鍵詞	降雨、全球預報模式; precipitation、global forecast model		
目標達成狀況	本研究針對「中央氣象局全球預報模式(CWBGFS)對臺灣梅雨期之降雨預報能力」進行評析。為了瞭解 CWBGFS 對於 2016 年東亞及臺灣地區 5-6 月降雨的預報能力，本研究利用多種統計分析方法，將 CWBGFS 與美國國家環境預報中心(簡稱 NCEP)之全球預報模式(簡稱 NCEPGFS)資料進行比對。研究著重在評估 CWBGFS 與 NCEPGFS 在預報前置時間(lead time)第 1~10 天，對東亞及臺灣地區降雨的預報能力差異。研究結果發現，CWBGFS 的預報具有與 NCEPGFS 的預報近似的參考價值。其中針對 2016 年 5-6 月東亞地區的降雨平均場，CWBGFS 與 NCEPGFS 在預報降雨分布位置以及降雨量方面，LT1~5 皆較 LT6~10 有較好的預報結果，且兩模式的預報能力並無顯著差異。而比對兩模式在 LT6~10 對 5 月和 6 月的降雨預報差異，發現兩模式皆呈現 6 月的預報結果較 5 月的預報結果佳，特別是對 2016 年 6 月 9~14 日影響臺灣的大尺度降雨系統，兩模式在 LT10 的預報結果中已能清楚呈現。此外，透過個案分析 2016 年 6 月 9~14 日期間的降雨場、環流場、水氣傳輸場，本研究更		

	發現 NCEPGFS 與 CWBGFS 的預報降雨差異，與兩模式對環流場、水氣傳輸場的預報差異有關。這些研究結果將有助於 CWBGFS 的未來改善參考。
資源使用情形	無
主要執行成果	本研究之具體成果如下： ● 已完成 CWBGFS 對東亞(含臺灣)地區 5-6 月降雨預報與觀測資料之比較，其中包含平均場之比對、空間相關係數、距平相關係數、均方根誤差校驗，並且完成與 NCEPGFS 降雨預報能力之比較。 ● 已完成 CWBGFS 分別對東亞地區與臺灣地區 5-6 月之定量降雨預報技術得分校驗，其中包含預兆得分、公正預兆得分、修正後之公正預兆得分、偏倚得分，並且完成與 NCEPGFS 預報技術得分之比對分析。 ● 已完成 CWBGFS、NCEPGFS 在 5-6 月期間影響臺灣地區之降雨預報與觀測資料的比對，其中包含分別對 5、6 月進行降雨預報能力之校驗(空間相關係數、均方根誤差)。 ● 已完成 CWBGFS 對 6 月 9~14 日西南氣流個案之預報降雨場、環流場、水氣傳輸場與觀測資料之比較，並且完成與 NCEPGFS 預報結果之分析比對。 ● 已完成 CWBGFS 針對臺灣地區在 6 月 9~14 日西南氣流個案之定量降雨預報技術得分校驗，其中包含預兆得分、偏倚得分，並且完成與 NCEPGFS 預報技術得分之比較。
建議事項	無
具體落實應用情形	本研究顯示，透過水平空間解析度的提高、降雨參數化的改善，新版的 CWBGFS 其預報 2016 年 5-6 月東亞地區降雨的能力，已不亞於 NCEPGFS。由於國外的預報作業資料(如 NCEPGFS)，其獲取需耗時、耗力，當沒有國外資料可供參考時，本研究的結果顯示新版的 CWBGFS 亦有相當的參考價值。
計畫變更說明	(若有)
落後原因	(若有)
因應對策(檢討與建議)	這次計畫主要評估新版 CWBGFS 對 2016 年 5-6 月之降雨預報能力。由於執行期程限制，尚有許多相關議題(如：CWBGFS 對夏季降雨的預報能力、對午後對流事件的預報能力)仍待未來深入研究。建議後續研究能針對夏季降雨或者更多造成臺灣地區強降雨之個案進行 CWBGFS 之預報能力評析。

中文摘要

梅雨季(5-6 月)的降雨往往對臺灣民生經濟與安全上造成重大的影響，因此評析中央氣象局(Central Weather Bureau; 簡稱 CWB)對東亞及臺灣地區 5-6 月降雨的預報能力更顯重要。從 2016 年 4 月開始，新一代的 CWB 全球預報模式(Global Forecast System; 簡稱 CWBGFS)其解析度由原來的 T319L40 (水平解析度約 40 公里，垂直 40 層)提升至 T511L60 (水平解析度約 25 公里，垂直 60 層)。為了瞭解新一代的 CWBGFS 對於 2016 年東亞地區 5-6 月降雨的預報能力，本研究利用多種統計分析方法，將 CWBGFS 與美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction; 簡稱 NCEP)之全球預報模式(簡稱 NCEPGFS)資料進行比對。研究著重在評估 CWBGFS 與 NCEPGFS 在預報前置時間(lead time)第 1~10 天(往後以 LT1~10 表示)，對東亞及臺灣地區降雨的預報能力差異。研究結果發現，CWBGFS 的預報具有與 NCEPGFS 的預報近似的參考價值。其中針對 2016 年 5-6 月東亞地區的降雨平均場，CWBGFS 與 NCEPGFS 在預報降雨分布位置以及降雨量方面，LT1~5 皆較 LT6~10 有較好的預報結果，且兩模式的預報能力(含空間相關係數、均方根誤差校驗)並無顯著差異。而比對兩模式在 LT6~10 對 5 月和 6 月的降雨預報差異，發現兩模式皆呈現 6 月的預報結果較 5 月的預報結果佳，特別是對 2016 年 6 月 9~14 日影響臺灣的大尺度降雨系統，兩模式在 LT10 的預報結果中已能清楚呈現。此外，透過個案分析 2016 年 6 月 9~14 日期間的降雨場、環流場、水氣傳輸場，本研究更發現 NCEPGFS 與 CWBGFS 的預報降雨差異，與兩模式對環流場、水氣傳輸場的預報差異有關。這些研究結果將有助於 CWBGFS 的未來改善參考。

Abstract

This study examines the capability of the newest generation of Central Weather Bureau Global Forecast System (i.e. CWBGFS) in forecasting the precipitation over East Asia, during the 2016 May and June. Analyses focus on the performance of predictions at lead times from day-1 to day-10. By comparing the CWBGFS precipitation forecasts with the NCEPGFS (National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System) precipitation forecasts, our results showed that CWBGFS has the forecast skill similar with NCEPGFS in predicting the precipitation over East Asia, during the 2016 May and June. Both CWBGFS and NCEPGFS show that (1) the forecast skill at lead times from day-1 to day-5 is better than the forecast skill at lead times from day-6 to day-10, and (2) the forecast skill for the precipitation revealed in June 2016 is better than the forecast skill for the precipitation revealed in May 2016. Analyses also indicate that the differences between the CWBGFS's and NCEPGFS's forecast skill are closely related to their differences in forecasting the variation of low-level atmospheric circulation and the moisture flux convergence.

一、前言與研究背景

5-6 月的梅雨季是臺灣主要的降雨期之一，其中的強降雨常常嚴重影響人民的安全與經濟。在今年(2016) 6 月 2 日上午北部地區受到鋒面的影響，大雷雨使得桃園蘆竹雨量站的時雨量高達 85mm，短時間內的強降雨造成桃園機場淹水(聯合新聞網 6 月 3 日)，影響許多班機與旅客。因此，為了使一般民眾以及水利、農業、防災單位能夠提早因應和提供決策的參考，有必要詳加了解氣象預報模式對於臺灣梅雨季期間的降雨預報表現。新一代中央氣象局(Central Weather Bureau)的全球預報模式(Global Forecast System) (簡稱 CWBGFS)在 2016 年 4 月正式上線作業，此新版模式的水平與垂直解析度皆較舊版模式的高，在物理參數化過程中也陸續採用美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction)的全球預報模式(簡稱 NCEPGFS)模組，例如現有的雲物理參數化設定，即是參考 NCEPGFS (表一)。為了瞭解現行的氣象預報模式對臺灣與東亞地區降雨的可預報度，因此有必要針對 CWBGFS 的降雨預報產品進行校驗與評析。

過去許多研究曾針對不同的全球預報模式產品深入探討其對區域降雨的可預報度(Kumar et al. 2011；江等 2012；Li and Robertson 2015；Tippett et al. 2015；林等 2015；黃等 2015)。一般而言，大部份的全球預報模式對七天以內的降雨事件較具有可預報度，相較之下，對展期(6-10 天)、次月(10-30 天)到季內(30-60 天)時間尺度內的降雨事件之可預報度則較低(Wang et al. 2014；Hirons et al. 2013；Vitart 2014)。近來不少研究指出透過提高預報模式的解析度以及改善預報模式的物理參數化過程，可提高全球預報產品對七天以上降雨預報的可預報度。舉例來說，Wang et al. (2014) 使用 NCEP 所產製的氣候預報系統第二版資料對 30-60 天季內震盪(Madden-Julian Oscillation；簡稱 MJO) 的預報能力進行分析，結果發現模式可提前 20 天預報 MJO 現象。此結果較第一版氣候預報系統資料(可提前 15 天預報 MJO 現象)，有明顯的改進。除 NCEP 之外，歐洲中期

天氣預報中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）亦透過不斷地修正其模式內部的物理過程及提高模式水平與垂直解析度，成功地改善了模式對 MJO 現象的預報能力（Hirons et al. 2013；Vitart 2014）。若從這些前人研究做推論，可以合理預期新版的 CWBGFS 在提高解析度及修正物理參數化過程後的預報產品，其對七天以上區域降雨之可預報度能有所提升，然而此推論尚待進一步證明。

表一 新舊版 CWBGFS 以及 NCEPGFS 之比較。

模式 變數	CWBGFS 舊版 (T319L40)	CWBGFS 新版 (T511L60)	NCEPGFS (T574L64)
資料同化	Hybrid GSI	Hybrid GSI	Hybrid GSI
水平解析度	40 公里	25 公里	23 公里
垂直解析度	sigma 座標 40 層	S-P hybrid 座標 60 層	S-P hybrid 座標 64 層
模式頂層	1mb	0.1mb	0.27mb
網格尺度 降雨	Zhao and Carr (1997)	Zhao and Carr (1997)	Zhao and Carr (1997)
積雲對流	Han and Pan (2011) : NSAS	Han and Pan (2011) : NSAS	Han and Pan (2011) : NSAS
淺對流	Li (1994)	Han and Pan (2011)	Han and Pan (2011)
垂直擾動	Mahrt and Pan (1984)	Han and Pan (2011)	Hong and Pan (1996)
土壤模式	Noah Land Surface model	Noah Land Surface model	Noah Land Surface model
輻射	Fu et al. (1997) 、 Fu an Liou (1992 ; 1993)	Fu et al. (1997) 、 Fu an Liou (1992 ; 1993)	Fu (1996) 、 Mlawer et al. (1997) 、 Iacono et al. (2000) 、 Clough et al. (2005) 、 Hu and Stamnes(1993)
地形重力波 拖曳	Palmer et al. (1986)	Palmer et al. (1986)	Alpert et al. (1988) 、 Kim and Arakawa (1995)

近來多個先進國家已開始聯合進行多國預報資料比對的聯合計畫 (Swinbank et al. 2015; Robertson et al. 2015)，其主要目的是希望能透過各國資料的整合，進行不同預報中心之間的模式預報資料比對，進而瞭解並改善氣象模式的預報能力。而為了瞭解 CWBGFS 與其他國家的預報資料差異，Liou et al. (1997)比較舊版 CWBGFS 和美國 NCEPGFS 的預報結果，發現舊版 CWBGFS 的預報降雨能力較 NCEPGFS 差。不同於 Liou et al. (1997)，本研究將使用新版 CWBGFS 的預報結果與美國 NCEPGFS 的預報結果進行相互比較分析，期望能夠客觀地深入了解新版 CWBGFS 的整體預報能力。本研究將著重在 2016 年 5-6 月(梅雨季)期間的降雨資料分析。研究中所採用的資料來源與校驗方法將詳列於第二章節。降雨的校驗結果分析與討論將列於第三章節。並於第四章節總結本研究成果。

二、研究方法

2.1 資料來源

本研究中所指的東亞地區與臺灣地區，其範圍定義分別為 $80^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$ ， $0^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ，以及 $120^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$ ， $22^{\circ}\text{N}\sim 25.25^{\circ}\text{N}$ 。在觀測資料方面，對於東亞地區的降雨，本研究採用美國國家航空暨太空總署所提供的 TRMM 3B42RT 即時的衛星觀測降雨資料(Huffman et al. 2007; Liu et al. 2012)，此資料的時間解析度為每 3 小時一筆，空間解析度為 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。TRMM 降雨資料在過去已被證實對於東亞地區降雨的時、空特性有良好的掌握(Huang and Chan 2012; Huang and Wang 2014)。此外，針對模式在臺灣地區降雨的預報技術得分，其所比對的觀測降雨資料，則採用中央氣象局提供的降雨網格化資料，此資料的時間解析度為每小時一筆，空間解析度為 $0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$ 。

在模式資料方面，本研究使用新版的 CWBGFS 與 NCEPGFS 所提供的預報資料進

行相互比較分析，以期能夠客觀地瞭解 CWBGFS 的預報能力與其他先進的數值天氣預報模式之預報能力差異。新版的 CWBGFS，其模式解析度從過去的 T319L40 提升為 T511L60，即水平解析度從大約 40 公里 ($\sim 0.375^\circ$) 上升至 25 公里 ($\sim 0.234^\circ$) 左右，垂直解析度從 40 層提升至 60 層，模式的頂層也從 1mb 提高至 0.1mb。而 NCEPGFS 則為現今全球線上作業中最先進的數值天氣預報模式之一，其模式解析度為 T574L64 (即水平空間解析度 ~ 23 公里，垂直解析度為 64 層)，模式的頂層約在 0.27mb。除了解析度的差異之外，其它有關 NCEPGFS 與新舊版 CWBGFS 模式的動力和物理參數比較，詳見表一。

2.2 校驗方法

本研究將著重在比對新版 CWBGFS 與 NCEPGFS 所產製之 240 小時 (第 1~10 天) 預報降雨資料。研究中所採用的比對方法包括：平均值、空間相關係數 (spatial correlation coefficient; 簡稱 Scorr)、均方根誤差 (root-mean-square error; 簡稱 RMSE)、距平相關係數 (anomaly correlation coefficient; 簡稱 ACC)、預兆得分 (threat score; 簡稱 TS)、公正預兆得分 (equitable threat score; 簡稱 ETS)、偏倚得分 (bias score; 簡稱 BS) 等事後預報技術得分的校驗。有關 Scorr、RMSE 的計算方法，詳見 Storch and Zwiers (2002)。上述多種統計校驗方法在過去已被廣泛的應用在各國全球模式的校驗 (Schaefer 1990; Ebert et al. 2003; Li et al. 2008; Wang 2014; Wang et al. 2014)，故應可以合理地評析 CWBGFS 和 NCEPGFS 的降雨預報能力。各個事後預報技術得分之計算方法如下：

$$ACC = \frac{\sum \{[(x_m - x_c) - \overline{(x_m - x_c)}][\overline{(x_o - x_c)} - (x_o - x_c)]\}}{\sqrt{\sum [(x_m - x_c) - \overline{(x_m - x_c)}]^2} \sqrt{\sum [\overline{(x_o - x_c)} - (x_o - x_c)]^2}} \quad (1)$$

其中，x 為物理變數，下標 m 為模式預報值，下標 o 為觀測值，下標 c 為氣候值。一般來說，距平相關係數大於 0.6 顯示模式預報有較好的結果 (Krishnamurti et al. 2003)。

$$TS = \frac{H}{F+O-H} \quad (2)$$

$$ETS = \frac{H-R}{F+O-H-R} \quad (3)$$

$$BS = \frac{F}{O} \quad (4)$$

其中，F 為模式預報的雨量、O 為觀測的雨量、H 為 F 和 O 的交集，即預報命中的雨量值、N 為校驗目標的區域、 $R(=O \times F/N)$ 為隨機預報(表二)。一般而言，TS 和 ETS 的範圍值介於 0~1，越接近 1 表示預報結果越好(Wang 2014)。BS 的值為 0~ ∞ ，最佳值為 1，可以表示預報結果為過度預報或不足預報(Wilks 1995)。

此外，由於 ETS 應用在小區域時，無法客觀反映模式實際的預報能力(Wang 2014)，本研究使用 Wang (2014)修正後的 ETS(簡稱 ETSc)來加以修正校驗的預報結果。對於 ETSc 技術得分，計算方法如下：

$$ETSc = \frac{H-R_C}{F+O-H-R_C} \quad (5)$$

$$R_C = \frac{O \times F_M}{M} \quad (6)$$

其中，M 為模式的總格點數， F_M 為模式達到不同降雨門檻值的總格點數。有關 ETSc 的詳細介紹，請參閱 Wang (2014)。

表二 二分類列聯表。

觀測 預報	是 ($\geq$ 門檻值)	否 ($<$ 門檻值)	總和
是 ($\geq$ 門檻值)	命中 H	錯誤預報 F-H	F
否 ($<$ 門檻值)	未命中 O-H	正確預報 $N-(O+F-H)$	N-F
總和	O	N-O	N

2.3 系集平均方法

為了方便分析，本研究將前置時間(lead time) 240 小時的預報降雨資料分成 1~10 天(簡稱 LT1~10)。其中 LT1 的降雨量為預報第 0 小時到第 24 小時內之累積雨量，LT2 的降雨量為預報第 24 小時到第 48 小時內之累積雨量，依此類推至 LT10 的降雨量為預報第 216 小時到第 240 小時內之累積雨量。而在系集平均方面，本研究採用的方法如圖 1 所示。以目標時間 5/10~6/30 為例，其 LT1 的預報結果來自於 5/10~6/30 總共 208 個成員(每 6 小時預報一次)之 LT1 平均(圖 1 紅色方框處)，而 LT2 的預報結果為 5/9~6/29 總共 208 個成員之 LT2 平均(圖 1 藍色方框處)，依此類推至 LT10 的預報結果為 5/1~6/21 總共 208 個成員之 LT10 平均(圖 1 黑色方框處)。而為了讓 LT1 到 LT10 的系集成員數目相同，本研究將僅針對目標期間(5/10~6/30)的 LT1~10 進行深入分析。

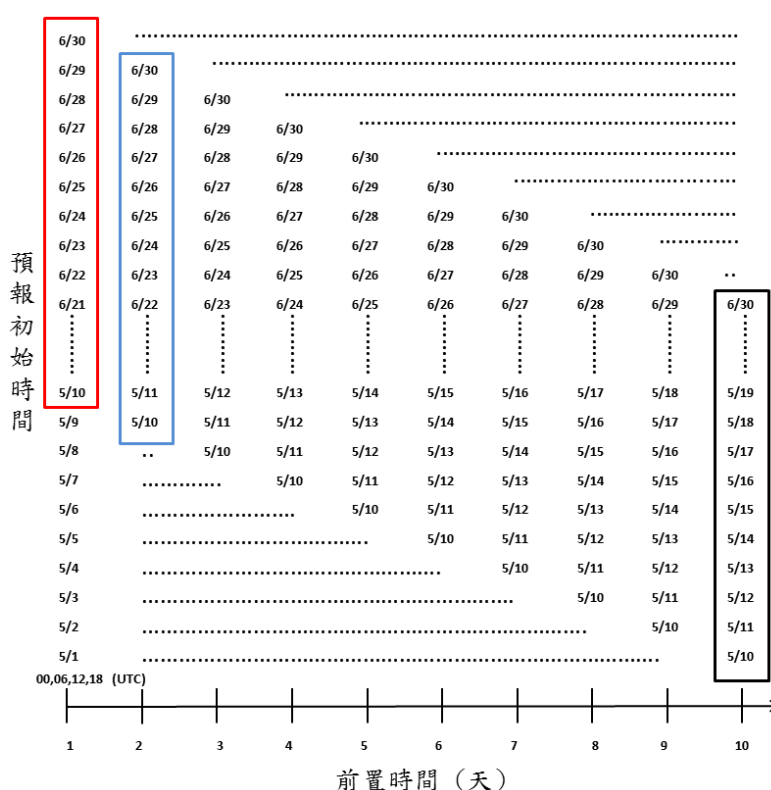


圖 1 本研究所採用之系集平均方法。以目標時間(5/10~6/30)為例，其 LT1 的預報結果來自於 5/10~6/30 總共 208 個成員(每 6 小時預報一次)之 LT1 平均(紅色方框處)，而 LT2 的預報結果為 5/9~6/29 總共 208 個成員之 LT2 平均(藍色方框處)，依此類推至 LT10 的預報結果為 5/1~6/21 總共 208 個成員之 LT10 平均(黑色方框處)。

三、研究成果

本章節的安排如下:在第 3.1 小節,我們將針對 2016 年東亞地區梅雨季之平均降雨,進行觀測資料與模式預報資料之比較。在第 3.2 小節,我們將分別針對 5 月、6 月兩個不同月份,進行模式降雨預報能力的檢驗。在第 3.3 小節,我們將選取一個為臺灣帶來豪大雨的個案進行分析,藉此探討影響模式降雨預報能力差異之可能原因。

3.1 目標期間 (5/10~6/30) 之平均降雨

圖 2a 顯示目標期間(5/10~6/30)內,TRMM 所觀測到的平均降雨空間分布特徵。綜觀而言,在 5/10~6/30 期間,東亞地區受到兩個主要降雨帶的影響,一個是從華南地區到日本西南方的梅雨鋒面降雨帶,另一個是熱帶地區的季風槽降雨帶。為瞭解 NCEPGFS 及 CWBGFS 模式是否能有效預報上述主要的降雨特徵,我們檢視模式在 LT1~10 對 5/10~6/30 所作的預報降雨資料(圖 2b~2e)。為方便討論,此處我們僅顯示 LT1 到 LT5 的平均(往後以 LT1-5 表示)和 LT6 到 LT10 的平均(往後以 LT6-10 表示)。首先,分析 NCEPGFS 的 LT1-5 結果(圖 2b),整體來說,其對於前述梅雨鋒面降雨帶和季風槽降雨帶的存在大致都能掌握。而比對 NCEPGFS 在 LT6-10 的預報結果(圖 2c),發現其雖有掌握到梅雨鋒面降雨帶的生成,但對於位在 $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$, $0\sim 10^{\circ}\text{N}$ 範圍內的季風槽降雨帶之生成已無法掌握。此外從觀測資料(圖 2a)中可見,幾個主要降雨極大值的地區,分別位於長江流域下游、華南地區,以及孟加拉灣東部海域和青藏高原南邊。比對此降雨特性,則發現 NCEPGFS 不論在 LT1-5(圖 2b)或 LT6-10(圖 2c)的預報中,皆能清楚掌握到位在孟加拉灣東部海域和青藏高原南邊的降雨極大值區,而對於在長江流域下游和華南地區之較大降雨區,則較無法清楚呈現。

就 CWBGFS 的預報結果(圖 2d、2e),我們發現 CWBGFS 對於梅雨鋒面降雨帶和季風槽降雨帶的掌握,與 NCEPGFS 的預報結果近似。在 LT1-5 的時候(圖 2d),CWBGFS

大致可以預報到梅雨鋒面降雨帶和季風槽降雨帶的主要分布位置。但到了 LT6-10 (圖 2e), CWBGFS 雖對於梅雨鋒面降雨帶還能有所預報, 但對於位在 $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$, $0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 的季風槽降雨帶則已無法明顯掌握。此外, 不論是 LT1-5 或 LT6-10 的 CWBGFS 預報結果(圖 2d、2e), 皆可大致看出孟加拉灣東部海域和青藏高原南邊的降雨極值, 但針對長江流域下游和華南地區的降雨極值則無法清楚呈現, 此結果亦與 NCEPGFS 相近似。

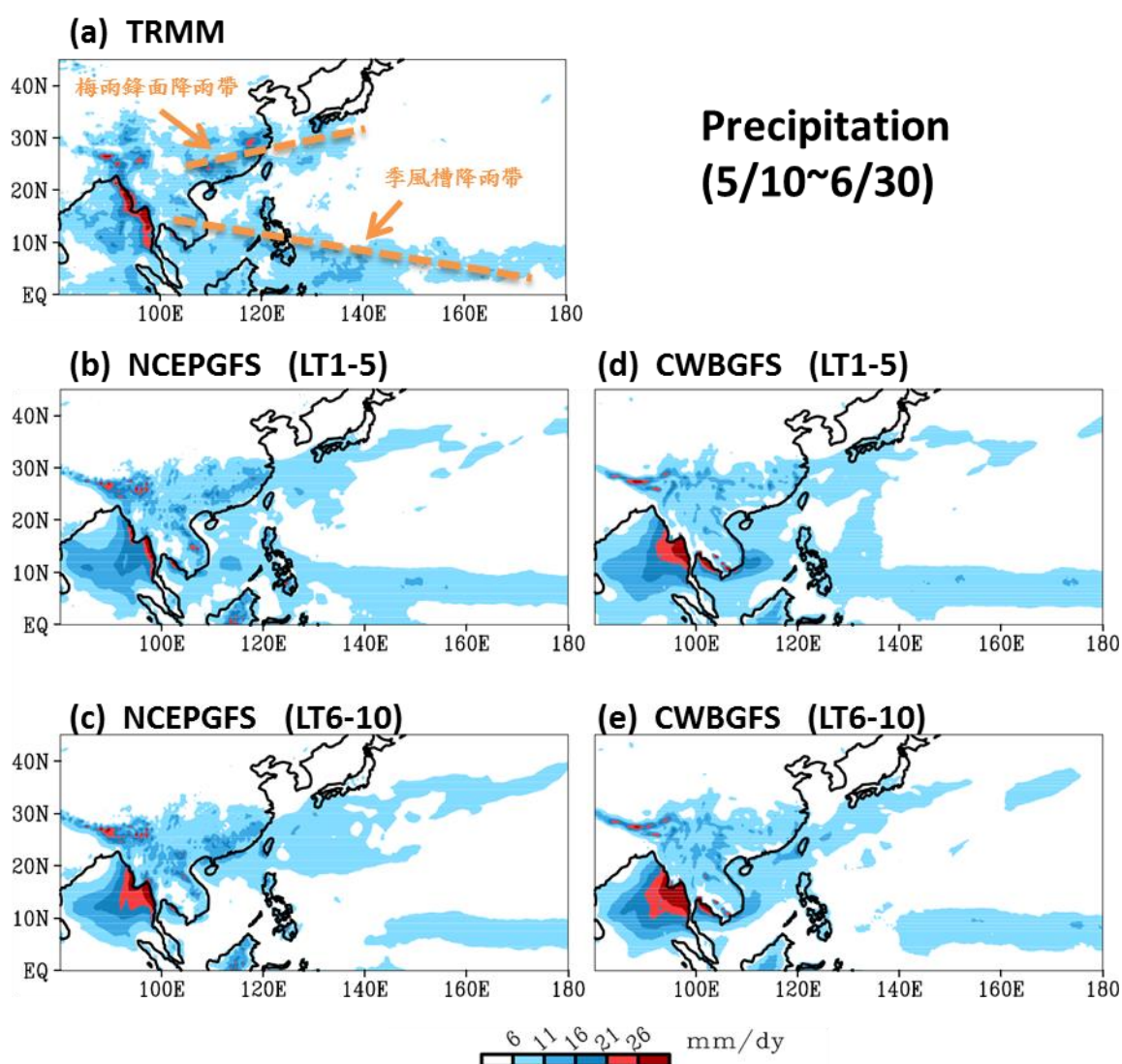


圖 2 2016 年 5/10~6/30 期間之平均日降雨量。(a)為 TRMM 觀測結果 (橘色虛線標示主要降雨帶之所在位置), (b)為 NCEPGFS 在 LT1-5 所作的預報降雨平均結果, (c)為 NCEPGFS 在 LT6-10 所作的預報降雨平均結果。(d)、(e)分別同(b)、(c), 但為 CWBGFS 之結果。降雨色標位於圖下方, 單位為 mm/天。

為了可以更明顯表現模式與觀測的差異，我們將圖 2 中 NCEPGFS 及 CWBGFS 之預報結果減去觀測值，所得到的差異如圖 3。針對 NCEPGFS 的 LT1-5 預報(圖 3a)，我們發現主要降雨高估的地區分別有婆羅洲北部、南中國海、雲南地區以及孟加拉灣，降雨低估的地區分別在緬甸西部沿岸、長江流域下游以及菲律賓海以南 $130^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 左右的位置。到了 LT6-10 (圖 3b)，NCEPGFS 的預報誤差有較 LT1-5 增加的現象，其中除了

Difference between Predicted and Observed Precipitation (5/10~6/30)

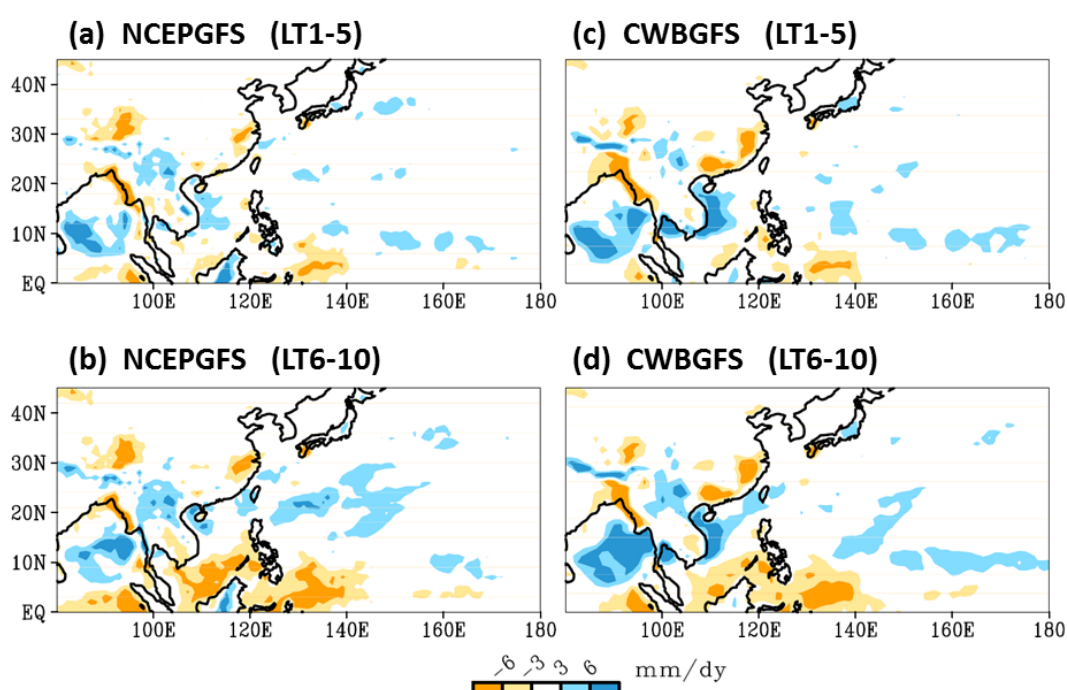


圖 3 模式預報與觀測降雨量在 5/10~6/30 期間之平均差異值。(a)為圖 2b 減去圖 2a，(b)為圖 2c 減去圖 2a，(c)為圖 2d 減去圖 2a，(d)為圖 2e 減去圖 2a。色標在圖之下方，單位為 mm/天。

對 $80^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$, $0\sim 10^{\circ}\text{N}$ 海域的降雨低估變得更加明顯之外，對於臺灣鄰近海域的降雨預報誤差也有所增加。另一方面，CWBGFS 不論是 LT1-5 還是 LT6-10 的預報誤差正負值之空間分布情形(圖 3c、3d)，則大致與相對應的 NCEPGFS 預報誤差(圖 3a、3b)結果相似。反之，CWBGFS 與 NCEPGFS 主要明顯的不同之處，在於 CWBGFS 對華南地區的降雨預報低估程度，以及對南中國海北邊、孟加拉灣的降雨預報高估程度，均較

NCEPGFS 來得大。另外，對於臺灣東邊的菲律賓海以及 $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ， $0\sim 10^{\circ}\text{N}$ 的季風槽降雨帶，CWBGFS 之 LT6-10 的預報誤差則較 NCEPGFS 之 LT6-10 的預報誤差小。

除了上述討論，我們進一步利用空間相關(Scorr)、距平相關(ACC)以及均方根誤差(RMSE)三種統計方法，針對 LT1 到 LT10 的模式預報結果與觀測資料進行比對，以分析兩個模式在不同前置時間的降雨預報差異。圖 4a 呈現的是觀測與模式對研究範圍

Comparison between Predicted and Observed Precipitation (5/10~6/30)

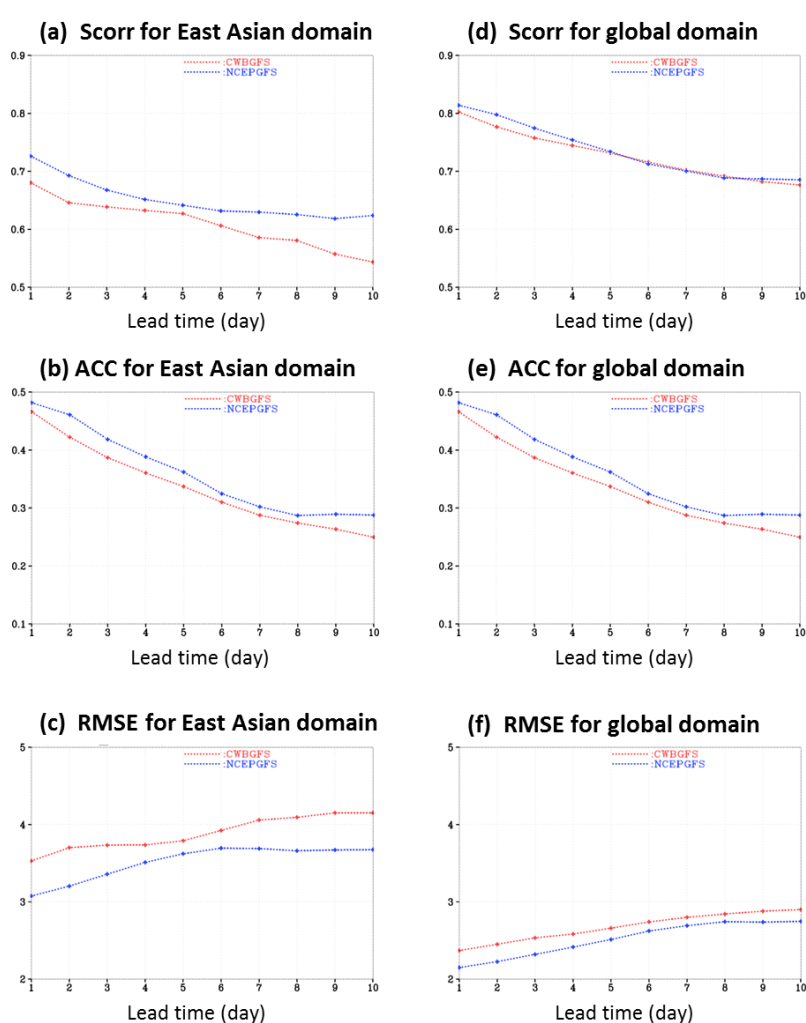


圖 4 (a)為針對 5/10~6/30 期間，東亞地區($80^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$ ， $0\sim 45^{\circ}\text{N}$)的降雨平均值(如圖 2)，所作的模式預報資料(如圖 2b)與觀測資料(如圖 2a)之空間相關係數(Scorr)比對。此處紅色與藍色點線，分別為對應到 CWBGFS 與 NCEPGFS 之統計結果。(b)與(a)相似，但為距平相關係數(ACC)比對。(c)與(a)相似，但為模式針對不同前置時間所得之預報資料與觀測資料之均方根誤差(RMSE)比對。(d)、(e)、(f)分別與(a)、(b)、(c)相似，但為針對全球範圍降雨，所作之預報資料與觀測資料比對。

80°E~180°E, 0~45°N 的 Scorr。大致來說，不論是 NCEPGFS 或是 CWBGFS，其與觀測降雨的 Scorr 均隨著預報前置時間的增加而減少，而在 ACC 的部分也有類似的現象(圖 4b)。反之，不論是 NCEPGFS 或是 CWBGFS，其與觀測降雨的 RMSE 均隨著預報前置時間的增加而增加 (圖 4c)。值得注意的是，圖 4a-c 中顯現 CWBGFS 所對應之 Scorr、ACC、RMSE 數值皆與 NCEPGFS 相近似，此顯示 CWBGFS 對東亞地區的梅雨季降雨預報之參考價值已上升到與 NCEPGFS 之參考價值相近似。更甚者，對於擴展至全球範圍的計算也有類似的結果(圖 4d-f)。

如何客觀了解模式預報結果的差異，其中有關定量降雨預報的校驗亦相當重要。故我們利用 TS、ETS、ETSc、BS 四種預報技術得分評估方法，針對兩模式對東亞地區降雨的預報差異進行比對，其中 NCEPGFS 和 CWBGFS 的得分結果分別如圖 5、圖 6。首

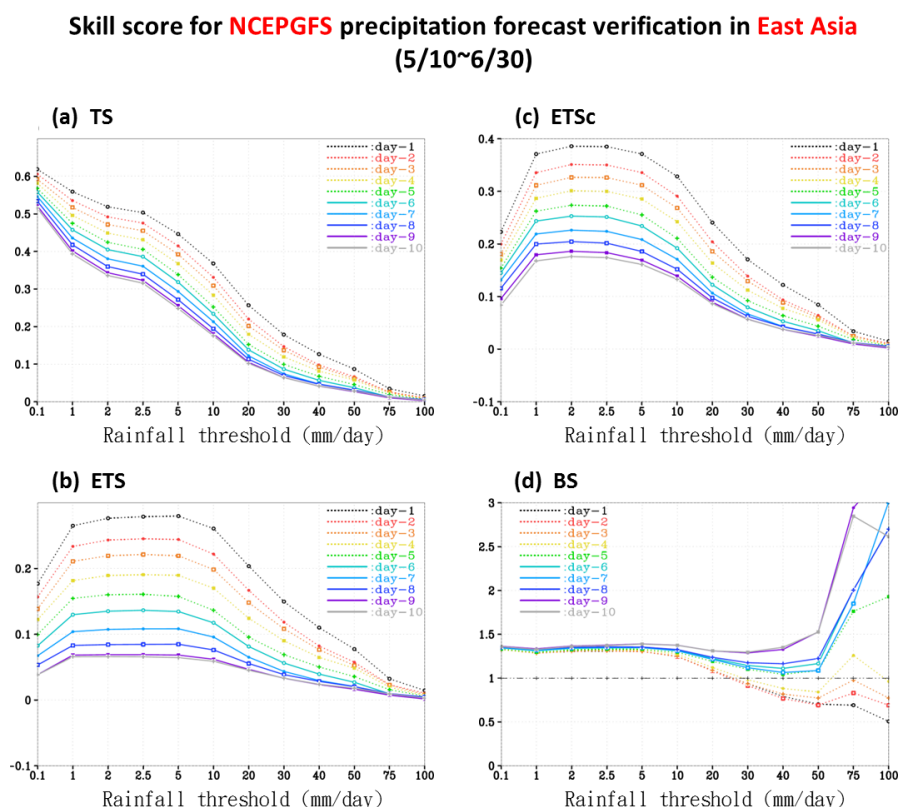


圖 5 NCEPGFS 針對東亞地區在 5/10~6/30 期間的 LT1~LT10(LT1:黑色點線，LT2:紅色點線，LT3:橘色點線，LT4:黃色點線，LT5:綠色點線，LT6:深綠色實線，LT7:藍色實線，LT8:深藍色實線，LT9:紫色實線，LT10:灰色實線)之各降雨門檻預報得分值。(a)為 TS 得分，(b)為 ETS 得分，(c)為 ETSc 得分，(d)為 BS 得分。

**Skill score for CWBGFS precipitation forecast verification in East Asia
(5/10~6/30)**

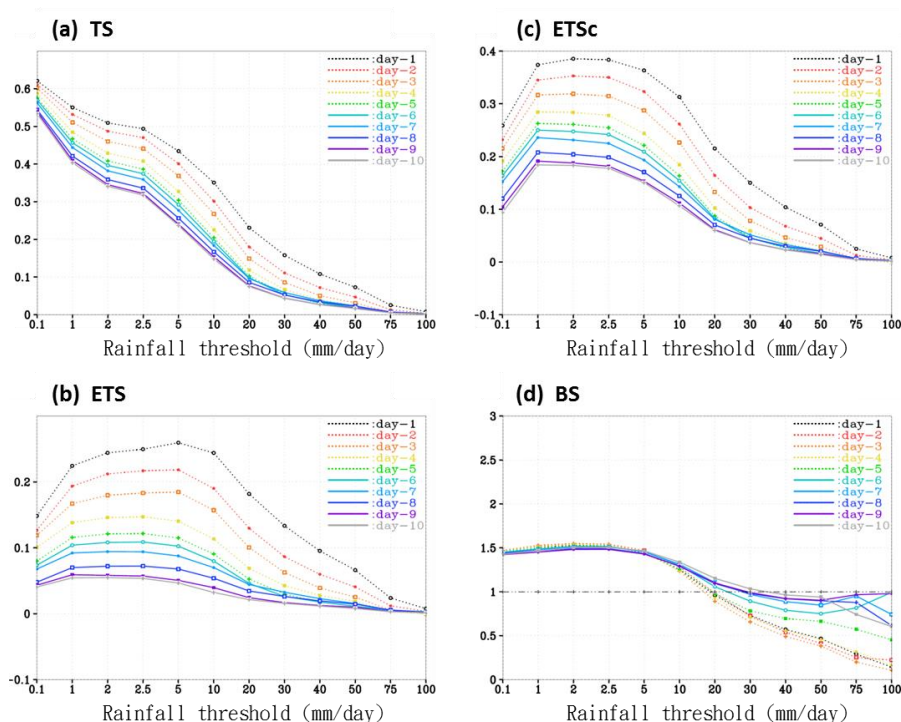


圖 6 同圖 5，但為 CWBGFS 的結果。

先，就 NCEPGFS 的研究結果發現，對於 TS、ETS、ETSc 的得分(圖 5a-c)，在不同的降雨量門檻值均隨著預報前置時間的增加而有得分降低的情形，並且針對預報極端降雨的得分值都有明顯較低的現象。與前述結果相比，BS 的得分較無規律性(圖 5d)，LT6~LT10 在各降雨量門檻值均有過度預報的結果。而 CWBGFS 整體的得分特性大致與 NCEPGFS 相近，TS、ETS、ETSc 的得分隨著預報前置時間的增加而減少(圖 6a-c)，至於 BS 的得分則同樣較無規律性(圖 6d)。

為了方便比較與討論，我們進一步將兩模式在 LT1-5 和 LT6-10 的 TS、ETS、ETSc、BS 平均得分進行比對(圖 7)。在 TS 的得分方面(圖 7a)，兩模式的特性差異不大，LT1-5 與 LT6-10 的 TS 得分均有隨著降雨門檻值的增加而遞減的現象，並且 LT1-5 在預報各降雨門檻值的得分均較 LT6-10 的得分高。此外，在門檻值 $\geq 0.1\text{mm/天}$ 的 TS 得分，兩模式的得分都大於 0.5，但對於較強降雨的預報表現，兩模式的得分值都有明顯偏低的情況。

**Skill score for model precipitation forecast verification in East Asia
(5/10~6/30)**

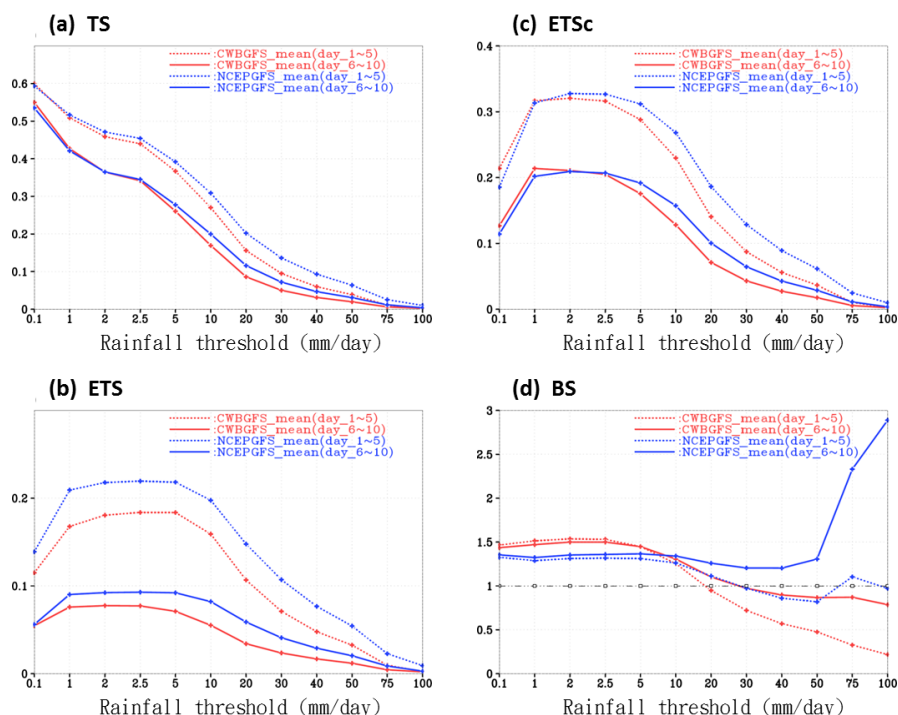


圖 7 CWBGFS(紅線)與 NCEPGFS(藍線)針對東亞地區在 5/10~6/30 期間各降雨門檻的 LT1-5 預報得分平均值(點線)與 LT6-10 預報得分平均值(實線)。(a)為 TS 得分，(b)為 ETS 得分，(c)為 ETSc 得分，(d)為 BS 得分。

在 ETS 與 ETSc 方面(圖 7b、7c)，兩模式在 LT1-5 的得分亦均較 LT6-10 的得分來得高，但各降雨門檻值的得分值均偏低。比較 TS、ETS 和 ETSc 的結果發現，CWBGFS 的得分值雖大致略低於 NCEPGFS 的得分值，但兩者的差異並不會太大，表示有關命中降雨量的預報能力，CWBGFS 與 NCEPGFS 相近似，此結果再次印證 CWBGFS 對東亞地區的梅雨季降雨預報之參考價值與 NCEPGFS 相去不遠。而就 BS 的得分方面(圖 7d)，CWBGFS 不論在 LT1-5 還是 LT6-10，對較低的降雨門檻值均有過度預報的情形，LT1-5 與 LT6-10 分別在門檻值為 20、30mm/天的得分最接近 1，預報的結果最佳，當超過此門檻值的時候，便均轉為預報不足的結果。與 CWBGFS 的結果相比，NCEPGFS 的 BS 得分則無此現象，尤其到了 LT6-10，任何的降雨門檻值平均皆有過度預報的表現，其中在門檻值 ≥ 75 mm/天以上的過度預報相當明顯。比較 CWBGFS 與 NCEPGFS 的 BS 結果，

對於極端降雨的過度、不足預報能力，在 LT1-5 (LT6-10)時期 CWBGFS 的得分表現較 NCEPGFS 來得差(好)。

上述結果顯示 CWBGFS 預報梅雨季東亞地區的定量降雨預報能力已與 NCEPGFS 相近，為進一步瞭解 CWBGFS 對於在梅雨季常受到強降雨成災的臺灣地區之降雨預報能力，我們將 TS、ETS、ETSc、BS 預報技術得分校驗的範圍縮小至臺灣地區，其中 NCEPGFS 與 CWBGFS 的結果分別如圖 8、圖 9。就 NCEPGFS 的得分顯示，TS、ETS、ETSc 在各降雨門檻值均隨著預報前置時間的增加而有得分降低的情形(圖 8a-c)，且對預報極端降雨的得分值均偏低，與東亞地區的結果類似，不同之處在於各個預報前置時間的得分值有較集中的現象。BS 的得分方面(圖 8d)，從 LT1 到 LT10，在門檻值 $\geq 10\text{mm/}$ 天的過度預報最明顯，誤差最大。而 CWBGFS 的得分特性整體與 NCEPGFS 的結果相

Skill score for **NCEPGFS** precipitation forecast verification in **Taiwan**
(5/10~6/30)

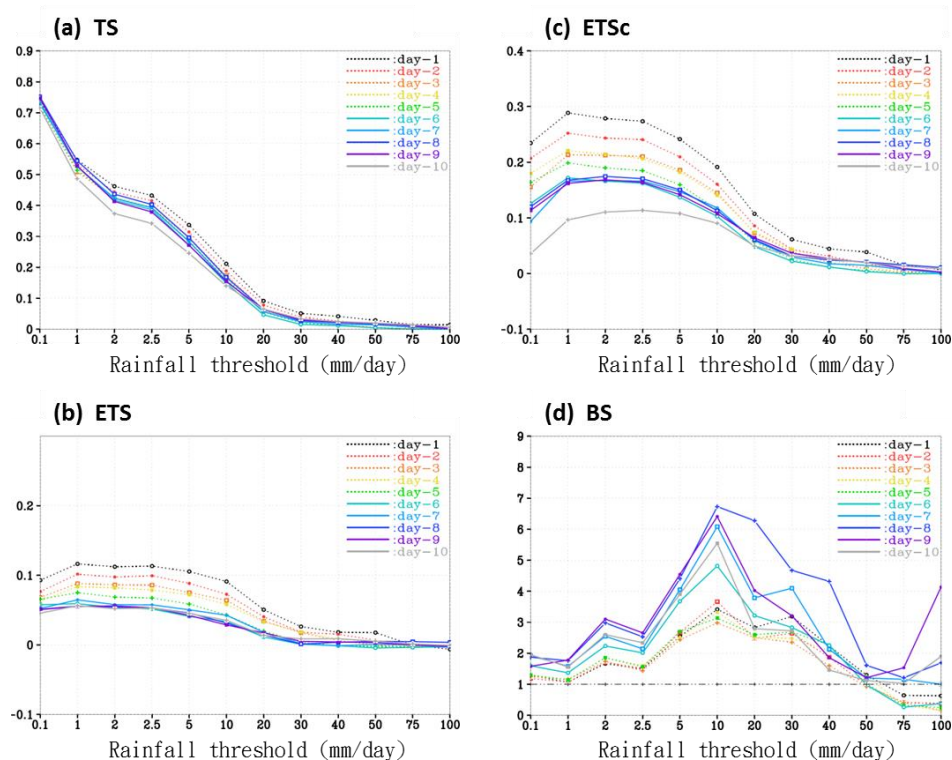


圖 8 同圖 5，但為針對臺灣地區的結果。

**Skill score for CWBGFS precipitation forecast verification in Taiwan
(5/10~6/30)**

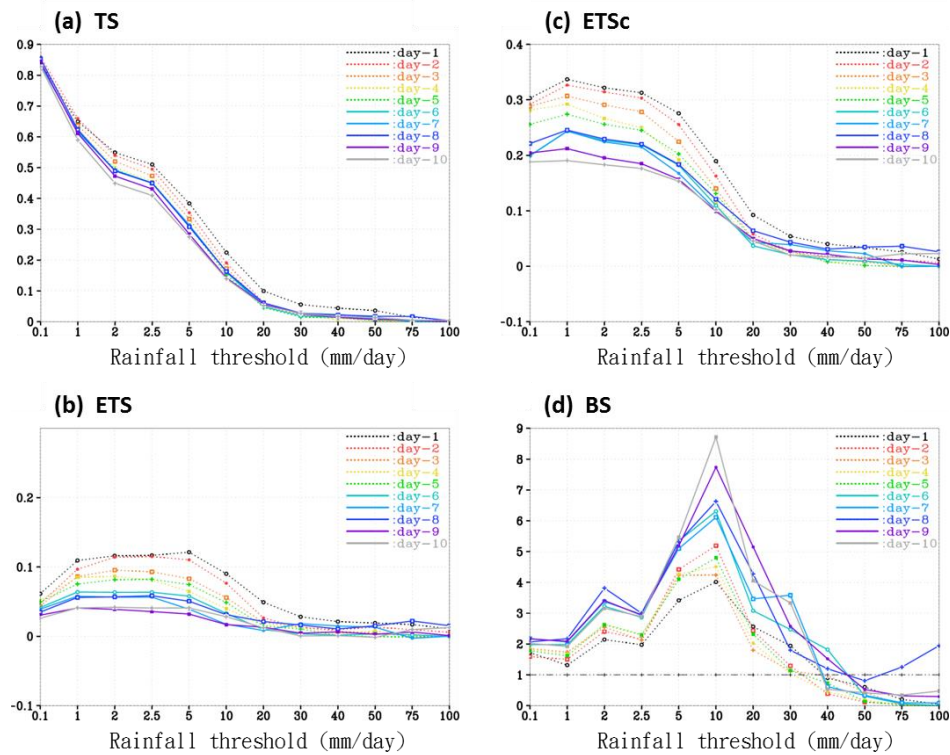


圖 9 同圖 6，但為針對臺灣地區的結果。

近似(圖 9)。比較兩模式的 LT1-5 和 LT6-10 平均結果，在 TS、ETS、ETSc 的得分方面(圖 10a-c)，整體來說，兩模式隨著降雨門檻值的增加，TS、ETS、ETSc 的得分均隨之遞減，而 LT1-5 的平均得分較 LT6-10 的平均得分高，並且 CWBGFS 的得分值較 NCEPGFS 的得分值稍高，意味著 CWBGFS 針對梅雨季臺灣地區的定量降雨預報能力也與 NCEPGFS 相去不遠。BS 得分的結果顯示(圖 10d)，CWBGFS 與 NCEPGFS 類似，在兩時期門檻值為 10mm/天的時候，有最明顯的過度預報，且其過度預報的現象較東亞地區來得顯著。

Liou et al. (1997) 比對舊版 CWBGFS 與 NCEPGFS 的降雨預報能力，發現舊版 CWBGFS 的整體表現較 NCEPGFS 差。過去許多研究指出，水平空間解析度的提高、降

雨參數化的改善，有助於降雨模擬結果的改進(Dirmeyer et al. 2011；Bacmeister et al. 2013；Yuan et al. 2013；Li et al. 2015)。由此推測，新版 CWBGFS 較舊版 CWBGFS 能力的提升，可能與新版 CWBGFS 的水平空間解析度提升及降雨參數化的改善有關。有關新、舊版 CWBGFS 的模式設定，請參見表一。

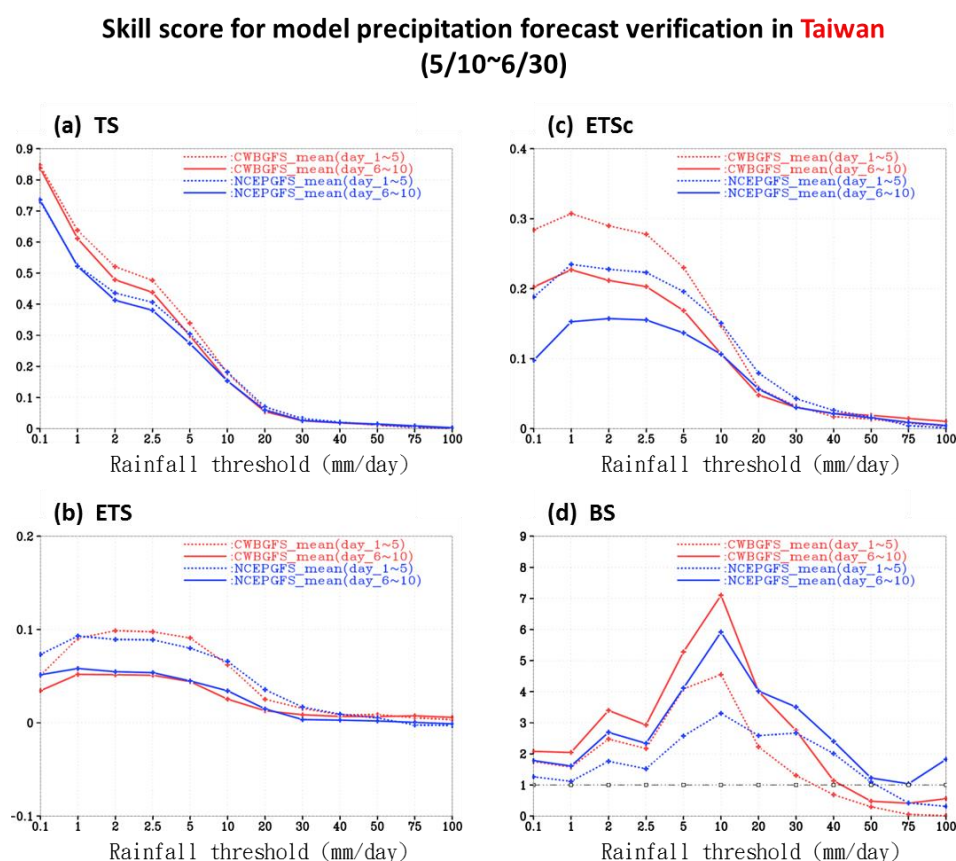


圖 10 同圖 7，但為針對臺灣地區的結果。

3.2 五月和六月之預報差異

為了瞭解模式是否能有效預報影響臺灣地區的降雨天氣系統，我們將臺灣地區附近的觀測降雨隨緯度-時間(latitude-time)變化圖(圖 11a)分別與 NCEPGFS 及 CWBGFS 之 LT1 的預報降雨結果(圖 11b、11c)進行比對。從圖 11a 的觀測資料中可以發現，主要影

響全臺地區的大尺度降雨系統有：(1) 5 月 20 日左右的鋒面系統以及 (2) 6 月 9~14 日的西南氣流系統。比對圖 11a 與圖 11b，可以發現 NCEPGFS 在 LT1 的預報結果中，能夠清楚呈現 6 月 9~14 日的降雨系統，但對於 5 月 20 日的鋒面系統則明顯低估其降雨量。而就圖 11c 與圖 11b 相比，同樣發現 CWBGFS 較能掌握 6 月 9~14 日的降雨系統，但對 5 月 20 日的系統其降雨量的預報能力較差。這些結果意味著不論是 NCEPGFS 或是 CWBGFS，其對 5 月降雨的整體預報能力可能較對 6 月降雨的預報能力差。為了佐證此猜測，我們進而於圖 12 中分別針對 5 月及 6 月預報降雨結果進行統計分析。

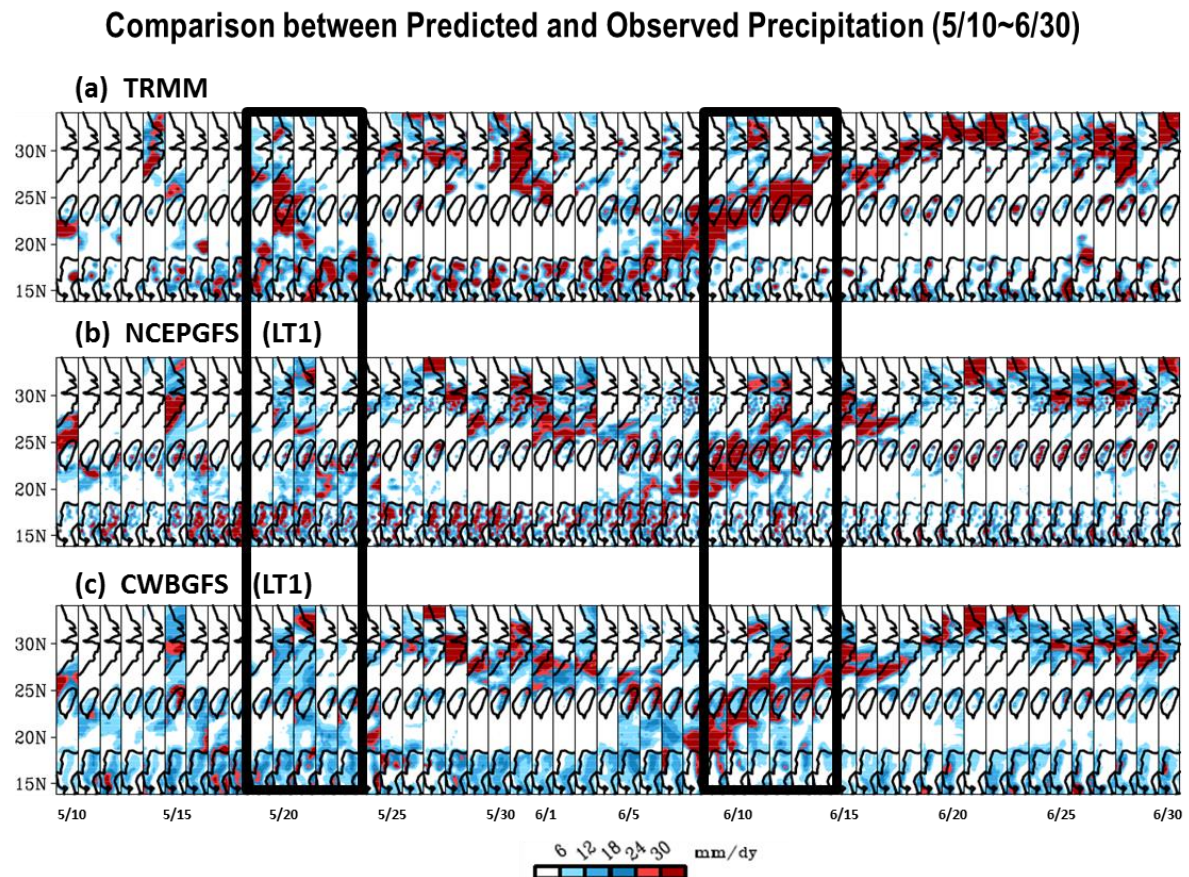


圖 11 2016 年 5/10~6/30 臺灣地區附近之日累積降雨隨緯度—時間分布圖。(a)為 TRMM 觀測結果，(b)為 NCEPGFS 之 LT1 預報結果，(c)為 CWBGFS 之 LT1 預報結果。黑色方框為文中所提之比對降雨系統。降雨色標在圖之下方，單位為 mm/天。

圖 12 為針對圖 11 中所示之觀測與模式的緯度-時間分布圖，所進行之 Scorr 以及 RMSE 比對。此處我們分別針對 5 月(圖 12a-b)和 6 月(圖 12c-d)，LT1~10 的預報校驗結果進行比對。首先，在 5 月的預報方面，兩模式所對應的 Scorr 隨著前置時間增加，其數值皆呈現下降的結果(圖 12a)，顯示隨著前置時間愈久，兩模式預報降雨的能力愈差。值得一提的是，圖 12a 中 CWBGFS 所對應之 Scorr 除了在 LT2~LT4 與 NCEPGFS 相比明顯較低之外(相差大於 0.1)，其他前置時間的 Scorr 則差異不大，甚至在 LT7~LT10 的結果略優於 NCEPGFS。而兩模式在 5 月降雨預報所對應的 RMSE(圖 12b)，其數值均隨著預報前置時間增加而增加，其中 CWBGFS 的 RMSE 在各個前置時間都比 NCEPGFS 的 RMSE 略低。

Comparison between Predicted and Observed Precip. at Different Month

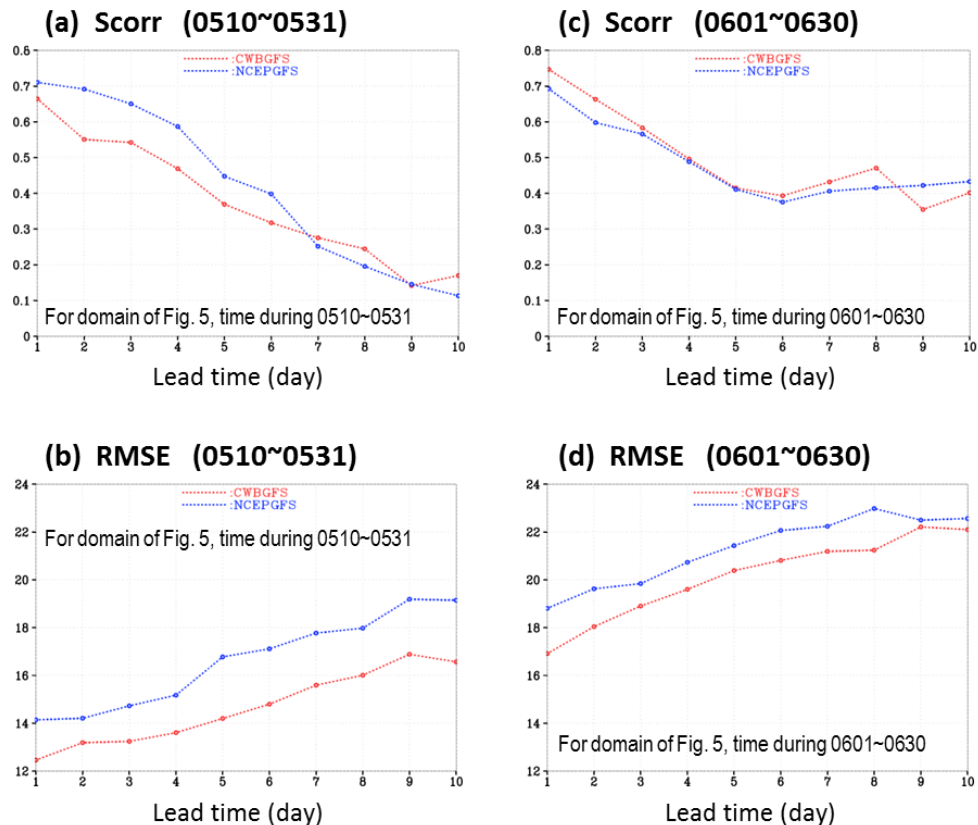


圖 12 利用圖 11 的緯度-時間分布圖，計算觀測與 CWBGFS(紅色點線)、NCEPGFS(藍色點線)對 5 月(5/10~5/31)降雨之(a)空間相關係數(Scorr)，(b)均方根誤差(RMSE)。(c)、(d)分別同(a)、(b)，但為 6 月(6/1~6/30)的結果。

若就兩模式在 6 月降雨預報所對應的 Scorr (圖 12c)結果分析，則可發現兩個模式在 LT1~LT5 的 Scorr 具有明顯下降的情形，但到了 LT6 之後，兩模式的 Scorr 已無明顯下降，甚至在 LT6~LT10 其 Scorr 數值都還可以維持在 0.4 左右。而在 6 月降雨預報所對應的 RMSE 方面(圖 12d)，雖然兩模式的 RMSE 皆隨著前置時間增加，但在 LT6~LT10 的增加幅度顯然較 LT1~LT5 的小。圖 12 中所呈現的結果，意味著 CWBGFS 和 NCEPGFS 在 LT6~LT10 的預報中，其對 2016 年 6 月份降雨的預報能力較對 2016 年 5 月份降雨的預報能力佳。為了確認此發現，我們將臺灣地區附近的觀測降雨隨緯度-時間變化圖(圖 11a)與 NCEPGFS 及 CWBGFS 在 LT10 所呈現的降雨預報(圖 13)進行比對。其中以 2016 年 6 月 9~14 日的西南氣流為例，CWBGFS 和 NCEPGFS 的預報結果到了 LT10 都還可以約略掌握到該降雨系統的分布位置。此結果顯示，不論是 NCEPGFS 或是新版 CWBGFS 對某些東亞地區大尺度降雨系統之發生，具有提前 10 天預報的能力。

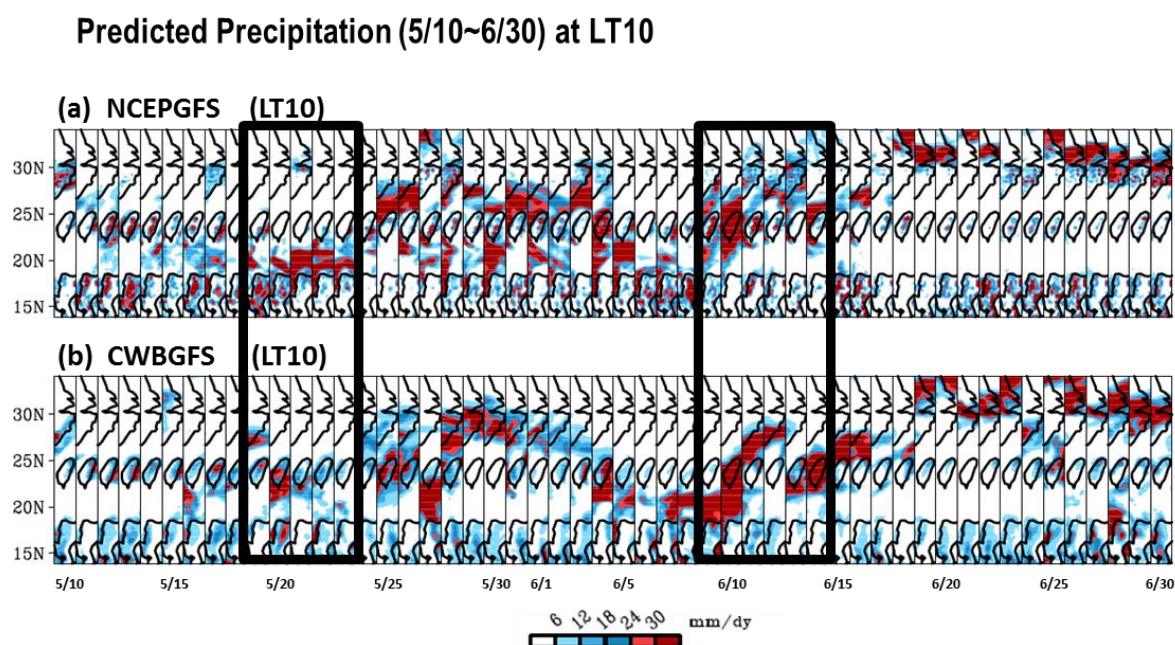


圖 13 同圖 11，但為 LT10 的結果。(a)為 NCEPGFS，(b)為 CWBGFS。降雨色標在圖之下方，單位為 mm/天。

3.3 豪大兩個案預報能力：2016 年 6 月 9-14 日西南氣流帶來降雨為例

以下我們就 6 月 9~14 日之個案進行相關環流系統分析，以期能初步了解大氣的動力機制如何影響降雨的分布，進而了解預報降雨差異的可能原因。從觀測降雨(圖 14a 中的著色區)及 850hPa 流函數場(圖 14a 中的等值線區)的空間分布，可發現 2016 年 6 月

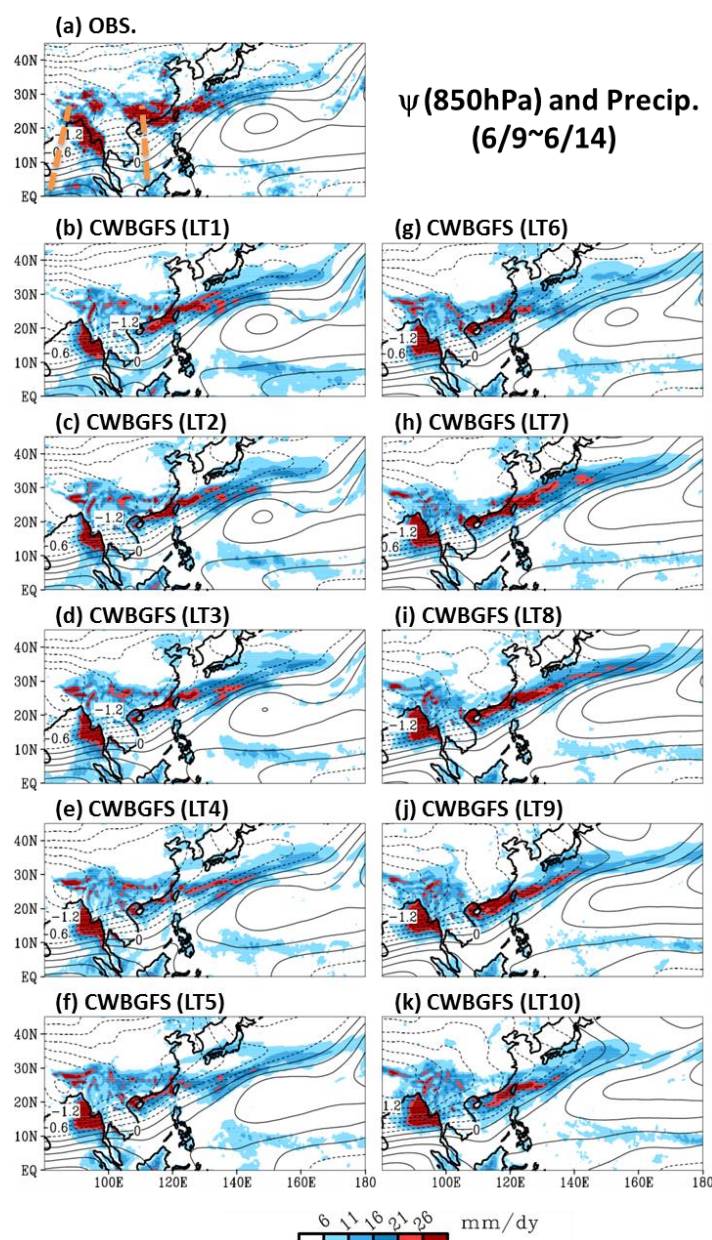


圖 14 降雨(著色區)與 850hPa 流函數場(ψ ; 等值線)在 6/9~6/14 期間的平均。(a)為觀測結果，橘色虛線為文中所提季風槽位置，(b)~(k)分別為 CWBGFS 之 LT1~10 預報結果。降雨色標在圖之下方，單位為 mm/天，等值線單位為 $1 \times 10^7 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 。

9~14 日影響臺灣地區的降雨，主要來自於西南氣流加上鋒面系統，其中較大降雨(孟加拉灣東部海域、華南地區)主要集中在季風槽前的位置，且影響臺灣的鋒面降雨系統具有沿著太平洋副高邊緣往東北延伸的特性。而比對 CWBGFS 所預報的降雨變化與相對應的 850hPa 流函數場變化(圖 14b-k)，同樣可發現模式預報鋒面系統的位置明顯受到其所預報之太平洋高壓的影響。整體而言，CWBGFS 在 LT1~10 的預報中皆有掌握到孟加拉灣東部海域的較大降雨區和鋒面降雨帶的分布位置，但對華南地區的降雨則有明顯低估的情形。比較 CWBGFS(圖 14b-k)與 NCEPGFS(圖 15)的降雨預報結果，發現 NCEPGFS 在 LT1~10 的預報中，對於華南地區的降雨量預報明顯較 CWBGFS 佳，但對位於臺灣東方的鋒面帶，CWBGFS 整體的降雨預報似乎較 NCEPGFS 的結果更接近觀測值。

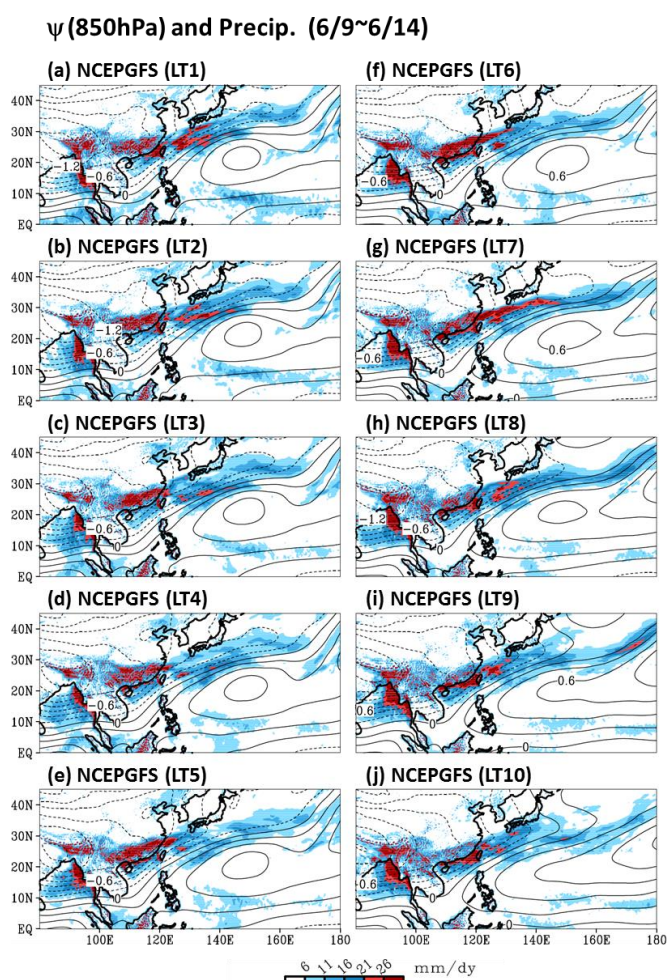


圖 15 同圖 14b~k，但為 NCEPGFS 的結果。降雨色標在圖之下方，單位為 mm/天，等值線單位為 $1 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。

過去文獻指出東亞地區的降雨分布主要受到水氣輻合、輻散場的影響(Chen 2005 ; Huang et al. 2010 ; Huang et al. 2013)。對此，我們進一步分析 6 月 9~14 日期間之水氣輻合、輻散場的變化(圖 16)，在此同圖 2，我們將預報分為 LT1-5 和 LT6-10 兩部份作探討。分析觀測場的結果發現(圖 16a)，主要降雨的區域明顯分布在強烈水氣輻合的位置上。就 NCEPGFS 在 LT1-5 的平均預報結果顯示(圖 16b)，強烈水氣輻合的位置大致與觀測結果相近，使得預報孟加拉灣東部的降雨極值，以及鋒面降雨帶的位置亦大致可以掌握。到了 LT6-10(圖 16c)，整體的強烈水氣輻合處與 LT1-5 相似，但對於預報華南地區的水氣輻合程度有稍微減弱的現象，此結果與圖 15 中顯示 NCEPGFS 在華南地區的降雨預報，LT7~LT10 有較 LT1~LT6 降雨預報不足的情況相呼應。

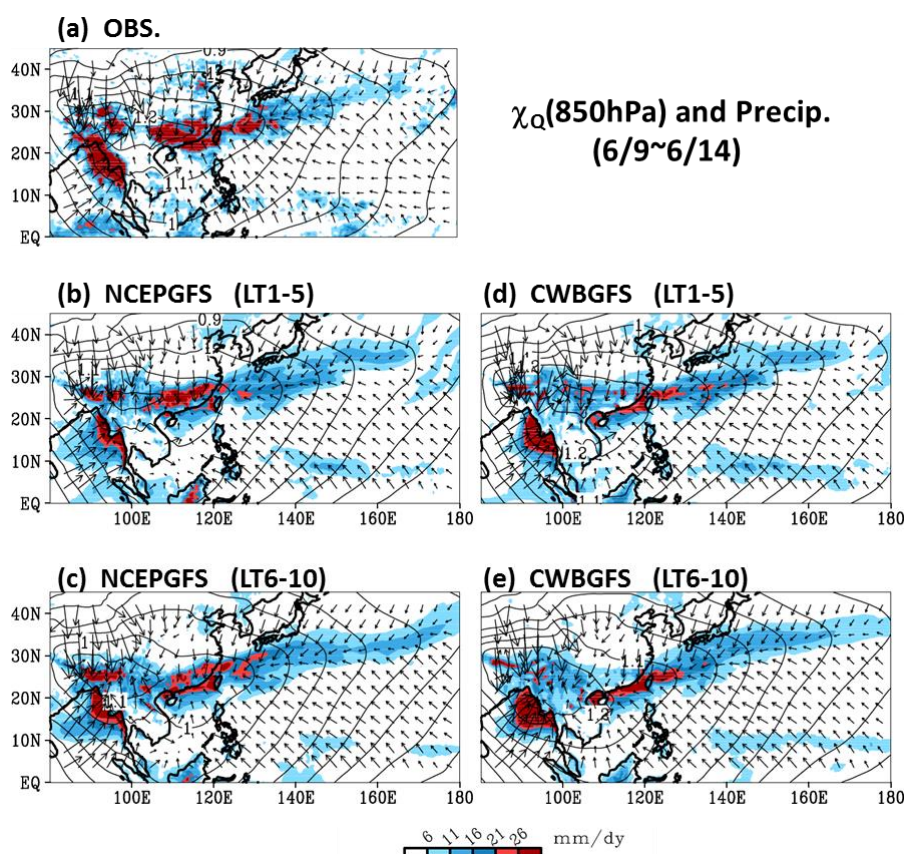


圖 16 降雨(著色區)與 850hPa 水氣輻合輻散場(χ_Q ; 等值線)在 6/9~6/14 期間的平均。(a) 為觀測結果，(b)為 NCEPGFS 在 LT1-5 所作的預報平均結果，(c)為 NCEPGFS 在 LT6-10 所作的預報平均結果。(d)、(e)分別同(b)、(c)，但為 CWBGFS 之結果。圖中箭頭部分為水氣通量的向量，降雨色標在圖之下方，單位為 mm/天，等值線單位為 10^7kg s^{-1} 。

若就 CWBGFS 的預報結果與觀測相比，不論在 LT1-5(圖 16d)還是 LT6-10(圖 16e)，強烈水氣輻合的位置大致可以呈現，但在華南地區的輻合場則都有預報較弱的情況，使得該地區的降雨預報結果明顯低估。進一步將模式的結果減去觀測可以發現(圖 17)，兩模式無論在 LT1-5 還是 LT6-10，對於 850hPa 水氣輻合的高估(低估)區域與對於降雨的高估(低估)區域，大致符合。舉例來說，CWBGFS 在 LT1-5 的時候(圖 17c)，對華南地區(海南島周圍海域)有低估(高估)水氣輻合的情形，此造成 CWBGFS 低估(高估)華南地區(海南島周圍海域)的降雨。而從圖 14-17 的討論可發現，不論是 NCEPGFS 或是 CWBGFS，其水氣輻合、輻散場預報能力的好壞，影響著其對東亞地區降雨預報能力的好壞。

Difference between Predicted and Observed [$\chi_Q(850hPa)$, Precip.] (6/9~6/14)

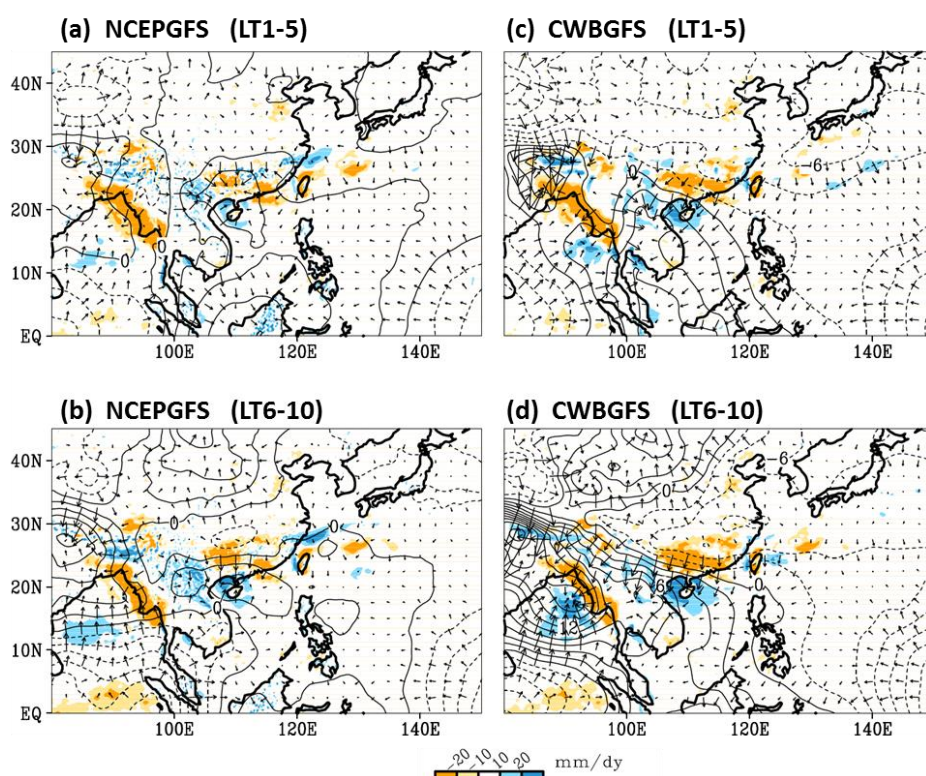


圖 17 模式預報與觀測在 6/9~6/14 期間之平均差異值。(a)為圖 10b 減去圖 10a，(b)為圖 10c 減去圖 10a，(c)為圖 10d 減去圖 10a，(d)為圖 10e 減去圖 10a。圖中箭頭部分為水氣通量的向量，色標在圖之下方，單位為 mm/天，等值線單位為 10^7kg s^{-1} 。

Skill score for model precipitation forecast verification in Taiwan area (6/9~6/14)

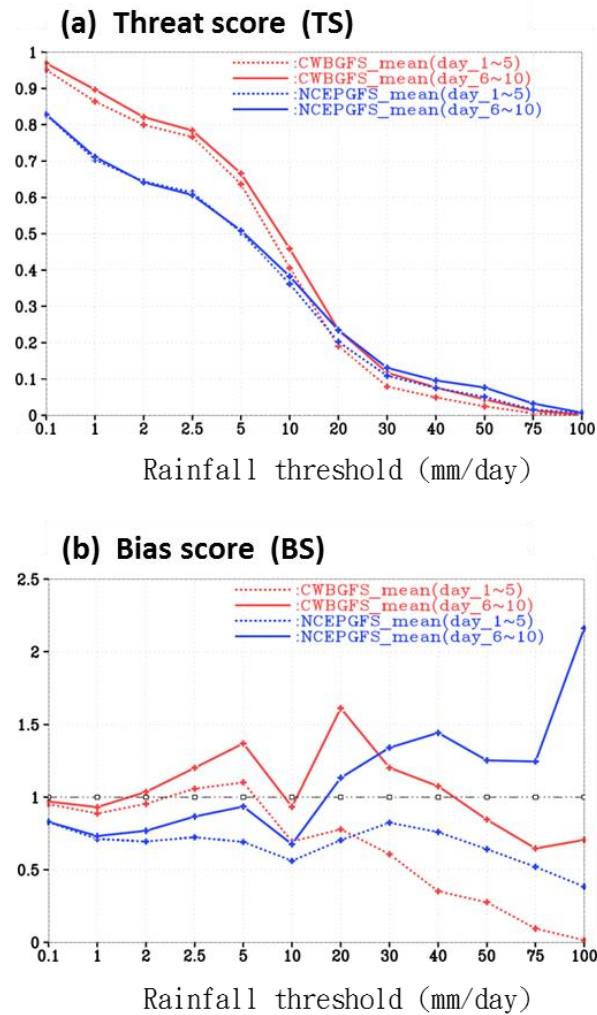


圖 18 CWBGFS(紅線)與 NCEPGFS(藍線)針對臺灣地區在 6/9~6/14 期間各降雨門檻的 LT1-5 預報得分平均值(點線)與 LT6-10 預報得分平均值(實線)。(a)為 TS 得分，(b)為 BS 得分。

最後，針對此降個案對臺灣地區所造成的降雨，我們就兩模式在 LT1-5 和 LT6-10 所得到的 TS(圖 18a)、BS(圖 18b)兩種預報技術得分進行比對。在 TS 得分方面，圖 18a 顯示兩模式之特性差異不大，不論是 LT1-5 或是 LT6-10 的預報結果，NCEPGFS 及 CWBGFS 均呈現 TS 得分隨著降雨門檻值的增加而遞減的趨勢。此外，在門檻值 $\geq 0.1\text{mm/天}$ 的 TS 得分，兩個模式的得分都大於 0.8，但對於較強降雨的預報表現，兩個模式的得

分值都有偏低的情況。平均而言，在門檻值 ≤ 10 mm/天(≥ 20 mm/天)的 TS 得分，CWBGFS 的預報表現較 NCEPGFS 略好(差)。另外，在 BS 的得分方面(圖 18b)，首先針對 LT1-5 的結果，NCEPGFS 在各門檻值的降雨都有不足預報的現象，隨著門檻值越高，不足預報越明顯。與 NCEPGFS 相比，CWBGFS 整體在 LT1-5 的降雨預報，其對於門檻值 ≤ 20 mm/天(≥ 30 mm/天)的 BS 得分表現較 NCEPGFS 好(差)，此結果與 TS 的得分相呼應。到了 LT6-10，兩模式的 BS 得分同樣有隨著門檻值越高，預報的誤差愈大的現象(圖 18b)。綜合上述 TS、BS 得分的結果，發現兩模式對於較低門檻值的降雨預報皆比較高門檻值的降雨預報結果來得好，顯示兩模式在極端降雨的可預報度上仍有相當大的進步空間。

四、 結論

從 2016 年 4 月開始，新一代的 CWBGFS 開始正式上線作業。為了瞭解新版的 CWBGFS 對於 2016 年東亞地區 5-6 月降雨的預報能力，本研究利用多種統計分析方法，將 CWBGFS 與 NCEPGFS 所提供之預報資料進行比對，研究著重在評估 CWBGFS 與 NCEPGFS 對東亞地區降雨的預報能力差異。本研究的主要發現歸納如下：(1)針對 2016 年 5-6 月東亞地區的降雨平均場，CWBGFS 與 NCEPGFS 在預報降雨分布位置以及降雨量方面，LT1~LT5 皆較 LT6~LT10 有較好的預報結果，且兩模式的預報能力(含空間相關係數、均方根誤差校驗)並無顯著差異。(2)CWBGFS 與 NCEPGFS 兩模式在 LT6~LT10 的預報中皆呈現 6 月的降雨預報能力較 5 月的降雨預報能力佳，特別是對 2016 年 6 月 9~14 日影響臺灣的大尺度降雨系統，兩模式在 LT10 的預報結果中已能清楚呈現。(3)針對 2016 年 6 月 9~14 日期間影響臺灣降雨的系統，CWBGFS 與 NCEPGFS 的預報降雨能力差異，主要與兩模式對環流場、水氣傳輸場的預報差異有關。而從兩模式之 TS、BS 預報降雨技術得分比對，發現兩模式對於較高門檻值的降雨預報得分值都偏低，顯

示兩模式在預報較強降雨的能力都不好。這些研究結果將有助於 CWBGFS 的未來改善參考。

過去 Liou et al. (1997)比對舊版的 CWBGFS 與 NCEPGFS 的降雨預報能力，發現舊版的 CWBGFS 其整體表現較 NCEPGFS 差。而本研究顯示，透過水平空間解析度的提高、降雨參數化的改善，新版的 CWBGFS 其預報 2016 年 5-6 月東亞地區降雨的能力，已不亞於 NCEPGFS。由於國外的預報資料(如 NCEPGFS)，其獲取需耗時、耗力，當沒有國外資料可供參考時，本研究的結果顯示新版的 CWBGFS 亦有相當的參考價值。然而值得注意的是梅雨季的降雨特性具有明顯的年際變化(陳與周 1989)，因此本研究的結論或許不適用在所有年份，未來若有更多年的資料可供使用，我們將針對此議題做深入分析。

參考資料

- 江宙君、陳熾竹、吳德榮，2012：定量降雨系集預報加值分析-以 2012 年 6 月梅雨鋒面為例。天氣分析與預報研討會論文彙編。171-175。
- 林昀靜、李清勝、盧孟明，2015：氣象局第二代二步法氣候預報系統統計降尺度預報技術評估。天氣分析與預報研討會，臺北，A3-19。
- 陳泰然與周仲島，1989：大尺度環流剖面結構之年際變化與台灣梅雨之活躍度。大氣科學，17，223-236。
- 黃椿喜、葉世瑄、呂國臣、洪景山，2015：氣象局官方與主要數值天氣預報指引之定量降水預報校驗與綜合比較。天氣分析與預報研討會，臺北，A7-11。
- 聯合新聞網(2016)：最黑暗的一天...桃機大淹水 37 年來最慘。2016 年 6 月 3 日，取自 <http://udn.com/news/story/9885/1737896>。
- Alpert, J.C., M. Kanamitsu, P.M. Caplan, J.G. Sela, G.H. White, and E. Kalnay, 1988: Mountain induced gravity wave drag parameterization in the NMC medium-range model. Preprints of the Eighth Conference on Numerical Weather Prediction, Baltimore, MD, American Meteorological Society, 726-733.
- Bacmeister, J. T., M. Wehner, R. B. Neale, A. Gettelman, C. Hannay, P. Lauritzen, and J. Caron, 2013: Exploratory high-resolution climate simulations using the Community Atmosphere Model (CAM). J. Clim., 27:3073–3099.
- Chen, T. C., 2005: Variation of the Asian monsoon water vapor budget: interaction with the global-scale modes. In: Wang B (ed) The Asian monsoon. Springer, Berlin, pp 417–458.
- Clough, S.A., M.W. Shephard, E.J. Mlawer, J.S. Delamere, M.J. Iacono, K.Cady-Pereira, S. Boukabara, and P.D. Brown, 2005: Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 91, 233-244.

doi:10.1016/j.jqsrt.2004.05.058.

- Dirmeyer, P. A. and Coauthors, 2011: Simulating the diurnal cycle of rainfall in global climate models: resolution versus parameterization. *Clim. Dyn.*, 39:399–418.
- Ebert, E. E., U. Damrath, W. Wergen, and M. E. Baldwin, 2003: The WGENE assessment of short-term quantitative precipitation forecasts (QPFs) from operational numerical weather prediction models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 481–492.
- Fu, Q., 1996: An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models. *J. Climate*, 9, 2058–2082.
- _____, and K. N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, 49, 2139–2156.
- _____, and K. N. Liou, 1993: Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2008–2025.
- _____, K. N. Liou, M. C. Cribb, T. P. Charlock, and A. Grossman, 1997: Multiple scattering parameterization in thermal infrared radiative transfer. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2799–2812.
- Han, J., and H.-L. Pan, 2011: Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather and Forecasting*, 26, 520–533.
- Hirons, L.C., Inness, P., Vitart, F., Bechtold, P., 2013: Understanding advances in the simulation of intraseasonal variability in the ECMWF model. Part I: the representation of the MJO. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 139, 1417–1426.
- Hong, S.-Y. and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322–2339.
- Hu, Y.X., and K. Stamnes, 1993: An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models. *J. Climate*, 6, 728–742.
- Huang, W.-R., and J. C.-L. Chan, 2012: Seasonal variation of diurnal and semidiurnal rainfall over southeast China. *Climate Dyn.*, 39, 1913–1927, doi:10.1007/s00382-011-1236-5.

- _____, J. C.-L. Chan, and A. Y. M. Au-Yeung, 2013: Regional Climate Simulations of Summer Diurnal Rainfall Variations over East Asia and Southeast China. *Clim. Dyn.*, 40: 1625-1642.
- _____, J. C.-L. Chan, and S. Y. Wang, 2010: A planetary-scale land–sea breeze circulation in East Asia and the western North Pacific. *Q J R Meteorol. Soc.*, 136:1543–1553. doi:10.1002/qj.663.
- _____, and S.-Y. Wang, 2014: Impact of Land-Sea Breezes at Different Scales on the Diurnal Rainfall in Taiwan. *Climate Dyn.*, 43, 1951-1963.
- Huffman, George J., and Coauthors, 2007: The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *J. Hydrometeor.*, 8, 38–55.
- Iacono, M. J., E. J. Mlawer, S. A. Clough, and J.-J. Morcrette, 2000: Impact of an improved longwave radiation model, RRTM, on the energy budget and thermodynamic properties of the NCAR community climate model, CCM3. *J. Geophys. Res.*, 105, 14873–14890.
- Kim, Y-J and A. Arakawa, 1995: Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity wave model. *J. Atmos. Sci.*, 52, 1875-1902.
- Krishnamurti, T. N., and Coauthors, 2003: Improved skill for the anomaly correlation of geopotential heights at 500 hPa. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 1082–1102.
- Kumar, A., M. Chen, and W. Wang, 2011: An analysis of prediction skill of monthly mean climate variability. *Climate Dyn.*, 37, 1119–1131.
- Li, J.-L., 1994: On shallow cumulus parameterization scheme for large-scale planetary boundary layers. Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison, pp203.
- Li, J., R. Yu, W. Yuan, H. Chen, W. Sun, and Y. Zhang, 2015: Precipitation over East Asia simulated by NCAR CAM5 at different horizontal resolutions. *J. Adv. Model Earth*

- Syst., 7:774–790.
- Li, S., and Andrew W. Robertson, 2015: Evaluation of Submonthly Precipitation Forecast Skill from Global Ensemble Prediction Systems. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 2871–2889. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-14-00277.1>.
- _____, L. Goddard, and D. G. DeWitt, 2008: Predictive skill of AGCM seasonal climate forecasts subject to different SST prediction methodologies. *J. Climate*, 21, 2169–2186, doi:10.1175/2007JCLI1660.1.
- Liu, Z., Ostrenga, D., Teng, W., and Kempler, S., 2012: Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) precipitation data and services for research and applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 1317–1325.
- Liou, C-S., and Coauthors, 1997: The second-generation Global Forecast System at the Central Weather Bureau in Taiwan. *Wea. Forecasting*, 12, 653–663.
- Mahrt, L., and H. -L. Pan, 1984: A two-layer model of soil hydrology. *Boundary Layer Meteorol.*, 29, 1-20.
- Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, and S.A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102, 16663-16682.
- Palmer, T. N., G. Shutts, and R. Swinbank, 1986: Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 1001-1039.
- Robertson, A. W., A. Kumar, M. Peña, and F. Vitart, 2015: Improving and promoting subseasonal to seasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, ES49–ES53, doi:10.1175/BAMS-D-14-00139.1.
- Schaefer, J. T., 1990: The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, 5, 570–575.

- Scinocca, J. F., 2003: An Accurate Spectral Non-Orographic Gravity Wave Parameterization for General Circulation Models, *J. Atmos. Sci.*, 60, 667–682.
- Storch, H. V. and F. W. Zwiers, 2002: Statistical analysis in climate research, Cambridge University Press.
- Swinbank, R., and Coauthors, 2015: The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE) and its achievements. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-D-13-00191.1.
- Tippett, M. K., Mansour Almazroui, and In-Sik Kang, 2015: Extended-Range Forecasts of Areal-Averaged Rainfall over Saudi Arabia. *Wea. Forecasting*, 30, 1090–1105. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-15-0011.1>.
- Vitart, F., 2014: Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 140, 1889–1899. doi:10.1002/qj.2256.
- Wang, C.-C., 2014: On the calculation and correction of equitable threat score for model quantitative precipitation forecasts for small verification areas: The example of Taiwan. *Wea. Forecasting*, 29, 788–798, doi:10.1175/WAF-D-13-00087.1.
- Wang, W., M.P. Hung, S. J. Weaver, A. Kumar, and X. Fu, 2014: MJO prediction in the NCEP Climate Forecast System version 2. *Clim. Dyn.*, 42, 2509–2520.
- Wilks, D. S., 1995: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction. Academic Press, 467 pp.
- Yuan, W., R. Yu, M. Zhang, W. Lin, J. Li, and Y. Fu, 2013: Diurnal cycle of summer precipitation over subtropical East Asia in CAM5. *J. Clim.*, 26:3159–3172.
- Zhao, Q. Y., and F. H. Carr, 1997: A prognostic cloud scheme for operational NWP models. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1931–1953.