

運用大尺度西南氣流指數法 預報臺灣梅雨季極端降雨頻率年際變化

卓盈旻^{1,2} 盧孟明^{1*}

¹ 中央氣象局氣象科技研究中心

² 資拓宏宇國際股份有限公司氣象科技事業處

(中華民國一〇六年六月二十三日收稿；中華民國一〇六年九月二十八日定稿)

摘 要

梅雨季極端降雨事件是臺灣的重要災害天氣，然而事件發生趨勢的季度預報研究卻尚未見文獻探討。本文提出大尺度環流指數降尺度預報法，以中央氣象局月與季短期氣候預報系統(TCWB2T2)產品應用為例，說明臺灣梅雨季極端降雨頻率二分類機率預報及準確度評估結果。極端降雨事件的判斷標準乃是根據臺灣西部 10 個測站的各站 50 年(1951~2000)五、六月發生最大日雨量的中位數為各站的門檻值，收集至少有一站事件發生的日期與資料研判利於極端事件發生的大尺度條件。極端事件發生的 177 天中，有 70% 的個案出現正渦度距平低壓氣旋環流從華南經臺灣通過東海到日本南方洋面，並有從西南往東北方向的負渦度距平高壓反氣旋環流從南海東北部經菲律賓往西北太平洋延伸，而在南海北部到琉球附近的正、負渦度距平之間有強勁的西南氣流等特徵，據此設計了西南氣流指數(Southwesterly Flow Index, SWFI)作為預報因子。預報對象為梅雨季 10 個測站加總的事件數，定義為梅雨季極端降雨事件發生頻率(Taiwan Mei-yu Extreme Rainfall Frequency, TMERF)，TMERF 與 SWFI 的 50 年相關係數達 0.62，在 16 年驗證期(2001~2016)的相關係數有 0.75。由於 SWFI 的預報結果可從全球數值預報系統產品計算獲得，因此能用 SWFI 預測值進一步預測 TMERF 的變化，也就是將全球模式的預報結果降尺度到臺灣應用。以氣象局 TCWB2T2 作業性預報為例，以每年四月的每日觀測分析場作為預測初始值得到 120 組

*通訊作者：盧孟明，台北市中正區公園路 64 號 Email: mongminglu@gmail.com

SWFI 的預測值，藉此即能預測 TMERF 的變化傾向。TMERF 在回溯預報期(1982~2011)的二分類機率預測有 56.7% 命中正確類別，5 年實時預測(2012~2016)有 3 年預測正確。SWFI 降尺度方法的物理基礎在於它的變化反應出與臺灣息息相關的東亞與西北太平洋季風氣候系統和太平洋與印度洋海溫變異的關係。本預報方法未來可廣泛運用到其他全球預報系統產出的季內至年際尺度預報資料，能改善臺灣梅雨季極端降雨事件發生趨勢的季度預測。

關鍵字：梅雨、極端降雨預報、長期天氣預報、月與季預報、臺灣氣候

一、前言

梅雨是臺灣在春夏季節轉換時最重要的天氣現象，平均而言，每年梅雨季約有 4-5 道鋒面影響臺灣甚至帶來劇烈降水（陳、紀，1978；陳、蔡，1980）。王等(1985)分析 1960~1984 年中央氣象局所屬 24 個測站發現，每年豪大雨發生頻率除了颱風以外主要出現在 5 月中至 6 月中之梅雨時期。局部地區的強降雨易引發暴洪、淹水、山崩、土石流等劇烈變化，帶來重大災害，對於社會經濟人民生活造成無法忽略的影響。隨著都市快速發展，強降雨對都市居民的影響也日益加劇，發展有物理根據和經過客觀評估預測水準檢驗的極端降雨事件發生趨勢季度預報方法是相當急迫的重要研究課題。

臺灣梅雨季降雨研究在中尺度天氣與動力及預報研究二十餘年來持續蓬勃發展進展顯著(陳，2007)，但梅雨季降雨頻率和尺度環流條件的相關研究並不多見。臺灣梅雨是東亞與西北太平洋夏季季風的一部分（陳、陳等，2007；陳、嚴等，2007），因受臺灣地形影響有明顯的區域差異(Chen et al. 1999; Yen and Chen 2000; Boyle and Chen 1987; Tao and Chen 1987)，雨量變化受到海洋提供的豐沛水氣影響更加複雜。Chen et al. (2010)發現臺灣季風雨在北部和南部比較顯著，東部較不明顯，中南部地區梅雨最顯著，但年與

年之間差異甚大。Yim et al. (2015)則發現臺灣梅雨季雨量變化主要受到印度洋與太平洋海表面溫度(Sea Surface Temperature, SST)變化及伴隨北大西洋振盪(North Atlantic Oscillation, NAO)的 SST 變化影響。Hsu et al. (2016)發現華南與臺灣區域 5~8 月極端降雨事件明顯受到季內振盪影響，當北半球夏季季內振盪(BSISO)第二個主模態處於第 5-7 相位，由於水氣平流至華南區域增強以至於極端事件發生機率比其他狀態增加 60%。

臺灣面積小地形複雜，梅雨期劇烈降雨主要發生在狹長的梅雨鋒面帶內，全球預報模式對於梅雨季極端降雨變異的模擬能力還相當有限，但是對於數百公里以上的綜觀尺度環流變化，尤其是海氣偶合變化的季度預報還能有不錯的掌握(Stockdale et al. 2011)。為充分使用月與季預測的全球動力模式產品，本文提出一個具有物理概念的降尺度方法，設計了與臺灣梅雨季劇烈降雨發生頻率統計關係顯著的大尺度環流指數，運用模式預報的指數推估臺灣梅雨季劇烈降雨發生頻率偏多與偏少的機率。大尺度環流指數法可應用在作業性預報，也可作為實時氣候監測分析的概念架構，期能在梅雨季開始之前就掌握梅雨季劇烈降雨發生頻率多寡的前兆，於梅雨季結束後進行回顧分析，進而完善概念架構。

本文所使用的資料、極端事件和大尺度環流

指數分析方法在第二節說明，第三節為分析及預測結果，第四節是綜整討論與結論。

二、資料與分析方法

(一) 資料

本文使用了觀測和預報資料，觀測資料含有臺灣測站與全球格點兩種分析資料，而預報資料為氣象局第二步法月與季短期氣候預報系統第二版(TCWB2T2)產出的 30 年(1982~2011)回溯預報(retrospective forecast、hindcast)和 5 年實時(real time)預報。

觀測的測站資料使用了西部 10 個傳統氣象測站(基隆、淡水、臺北、新竹、梧棲、臺中、嘉義、臺南、高雄、恆春)的 1951-2016 年 5~6 月日雨量資料。僅考慮西部測站是因 5~6 月梅雨季的鋒面型劇烈降水和災害主要集中於臺灣西部(陳, 1981)，而東部劇烈降水的主要影響因子是颱風，兩者必須分別設計大尺度指數，本研究以和東南亞夏季季風發展期關係較好，且對社會經濟影響較大的梅雨鋒面為預報標的。全球格點資料在分析場部分採用和測站資料相同時間的 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 重分析(Reanalysis 1, R1)(Kalnay et al. 1996)資料，該資料氣壓場經緯網格點為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，在近地面接近 $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$ ，使用的層場與變數有 200hPa 和 850hPa 風場、500hPa 重力位高度場、地表上 2 公尺氣溫場(T2m)、海平面氣壓(SLP)場、可降水量(precipitable water, PWAT)。雨量資料還使用了 GPCP v2.3 (Global Precipitation Climatology Project version 2.3) (Adler et al. 2003)。在預報場方面，除了 TCWB2T2 以外還使用了美國海洋與大氣總署(NOAA)支持的北美多模式多組系集預報計畫

(North American Multi-Model Ensemble, 簡稱 NMME) (Kirtman et al. 2014) 回溯性預報(1982~2011)的預報資料。

氣象局第二步法短期氣候預報系統第二版(TCWB2T2)是在氣象局「災害性天氣監測與預報作業建置計畫」支持下發展完成的旬、月、季預報系統，2016 年開始作業，它的前身 TCWB2T1 是第一套由氣象局建置完成以動力數值模式為骨幹的月、季預報系統，2009 年開始作業。這兩版預報系統都採第二步法，也稱二階段預報法，就是先用統計與數值動力方法計算全球海表面溫度(SST)預測值，然後以預測海溫值作為大氣的下邊界條件牽動全球數值動力模式預測大氣狀態。TCWB2T2 為多模式多組預測組成的系集預報系統，在大氣模式方面分別使用了氣象局全球數值天氣預報模式(T119L40 版)與德國馬普研究院 ECHAM5 模式(T42L19 第 5.2 版)；SST 預測值除了有氣象局第二版全球海溫最佳化預報系統產品(OPGSST2)外，也使用從美國氣象局取得的 NCEP CFSv2 (Saha et al. 2014) 全球海溫預測資料(CFS2SST)。兩組大氣模式與兩組海溫預測資料交錯搭配出四種組合，每一種組合以每月每日為初始場產出 30 組 7 個月預測結果，因此每月可有 120 組長達 7 個月的預測結果作為加工產出月與季預測產品的原料。為分析 TCWB2T2 的預報準確度以及發展統計降尺度方法預報臺灣溫度和雨量，氣象局以 NCEP/CFSRR 再分析資料(Saha et al. 2010)作為 TCWB2T2 的大氣初始場，NCEP/CFSRR 和氣象局回溯預報結果，分別以 CFS2SST 和 OPGSST2 代表預報海溫，建立 30 年(1982~2011)的 TCWB2T2 回溯預報資料庫。NCEP 的氣候預報作業系統在 2012 年改為 NCEP CFSv2，氣象局 TCWB2T2 也以銜接該系統產出

的實時 SST 預測值，並以該系統前端資料同化系統 NCEP/CDAS (Saha et al. 2010) 產出的全球分析場作為初始場進行預測，因此雖然 TCWB2T2 在 2016 年才開始在氣象局作業，實際上可以把 2012 年之後的預報都視為實時預測。TCWB2T2 產出的資料非常豐富，本研究根據臺灣梅雨季極端降雨事件的大尺度條件特性僅僅使用了其中的 850hPa 風場。

(二) 極端降雨事件

極端降雨事件定義依照最直觀的排序原則，取各測站 50 年(1951~2000)五、六月日雨量資料年度最大值的中位數為極端事件門檻值(Rc)，若一測站日雨量高於此門檻值即判斷為該站有極端事件發生，每年梅雨季 10 個測站累積總事件數定義為「臺灣梅雨季極端降雨事件發生頻率」(Taiwan Mei-yu Extreme Rainfall Frequency, TMERF)。各測站的 Rc 與 50 年的極端事件總數整理在表 1，50 年梅雨季有 177 天有極端事件發

表 1 臺灣西部 10 個測站的梅雨季極端降雨事件門檻值與 1951~2000 年達到雨量門檻值的極端降雨事件數。

測站	極端門檻(Rc) mm/day	極端降雨事件 1951-2000 總事件數
淡水	88.6	33
基隆	99.1	29
臺北	89.6	33
新竹	118.2	37
梧棲	112.5	15
臺中	102.3	44
嘉義	105.7	22
臺南	114.1	43
高雄	105.8	42
恆春	111.8	39

生。對照利用廣義柏拉圖分布(Generalized Pareto Distribution, GPD)模擬臺灣極端降雨事件的雨量機率分布(林與盧, 2008), Rc 的降雨規模約為重現期距 1.5 年的 24 小時降雨事件，若以日雨量大於 1 釐米降雨事件排序百分位(PR)判斷，Rc 約在 PR95 百分位點，可見 Rc 是合理的門檻值。

圖 1 是 1951~2000 年極端事件在 5~6 月各候發生次數統計結果，「候」是以五天為單位的曆法，一年有 73 候，5 月 1 至 5 日是第 25 候，五、六兩個月為第 25~36 候。圖 1 顯示極端事件在第 31~32 候明顯高於其他日期，表示 5 月 31 日至 6 月 9 日在氣候上是臺灣梅雨季極端事件最頻繁的時間。

(三) 西南氣流指數

依照有極端事件發生日期計算的 850hPa 風場與渦度總量與距平的平均場量(圖 2)可看出利於極端事件發生大尺度條件的端倪。圖 2a 為極端事件的 850hPa 平均風場與渦度值合成圖，只顯示通過 95% 統計顯著性檢定部分，最顯著的特徵是在臺灣及巴士海峽上的帶狀正渦度及與孟加拉灣連成一氣的西南氣流。圖 2b 的極端事件 850hPa 風場與渦度值距平合成圖更清楚顯示極端事件發生日期在西太平洋沿岸東亞區域的環流特徵，從東北亞經華南與臺灣往菲律賓與熱帶西太平洋有負、正相間渦度變化，從華南、雲貴和兩廣區域經臺灣往東北方向經琉球到日本東南方的海面上都是正渦度距平，正渦度距平南方的西太平洋海面上為伴隨反氣旋風場的負渦度距平，華中與華北以及 50°N-55°N 的東西伯利亞也是負渦度距平。圖 2c 與圖 2d 分別顯示極端事件合成的降水、500hPa 重力位高度場、200hPa 風場的總量與距平圖，降水合成圖清楚顯示臺灣附近的降水正距平，

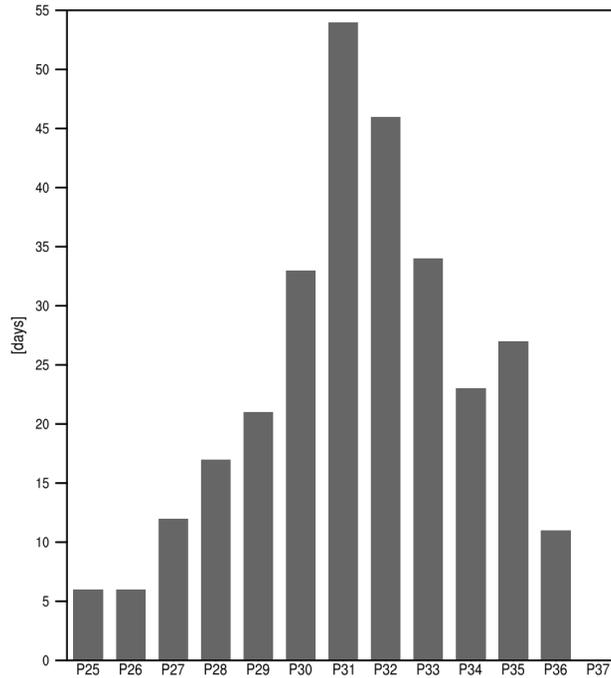


圖 1 1951~2000 年臺灣梅雨季極端降雨事件於梅雨季期間發生頻率的時間分布。橫軸的時間單位：候，第 25 候 (P25)是 5 月 1~5 日。

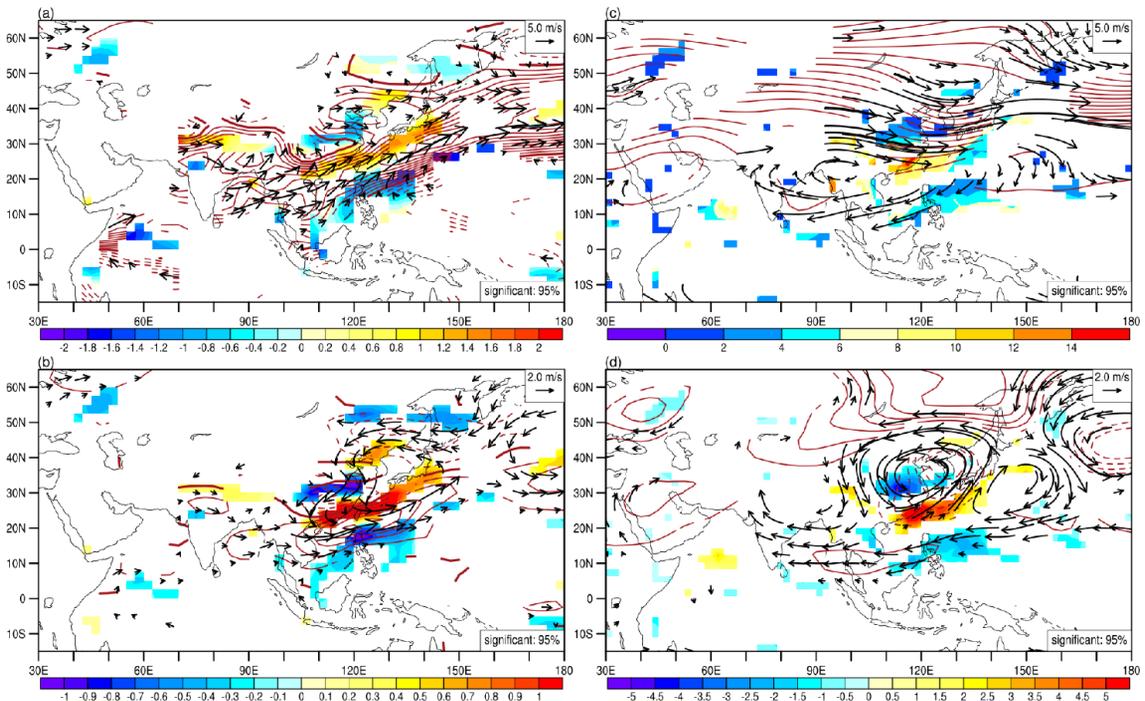


圖 2 1951~2000 年臺灣梅雨季極端降雨事件的環流合成圖 (通過 95%顯著性檢定)，(a)色階為 850hPa 渦度場，等值線為東西向風場，流線為 850hPa 水平風場，(b)為(a)的距平合成圖，(c)色階為降雨，等值線為 500hPa 高度場，流線為 200hPa 水平風場，(d)為(c)的距平合成圖。

高層風場則清楚顯示在高緯度東西伯利亞有阻塞高壓的結構，在 50°N 以北有清楚的高壓脊（圖 2c）與重力位高度正距平（圖 2d），但在 50°N 以南有低壓槽（圖 2c）與重力位高度負距平（圖 2d），低壓槽前有降水正距平，槽後則為負距平，從孟加拉灣、中南半島、南海北部、巴士海峽往東北至小笠原群島(Bonin Islands)(30°N , 140°E)有狹長的反氣旋風場，這樣的大尺度高層流場配置有利極端降雨事件在臺灣發生。

有極端事件發生的 177 天中，70%的個案在圖 3 的藍圓格點處的渦度是負值，而紅圓格點處的渦度為正值，這些格點位置與圖 2 的 850hPa 渦度場的配置相當契合。許多研究指出臺灣梅雨季發生劇烈降雨時，在臺灣東部沿岸及巴士海峽一帶有強勁低層噴流出現（簡與洪，2010），本研究依此決定以正、負渦度之間的綠圓格點區域在 850hPa 的平均西風距平(SWU)大於接下來定義的門檻值作為有利極端降雨事件發生的條件。首先把 1951~2000 年梅雨季期間渦度符號符合前述（圖 3）條件的 SWU 風速分布以灰色柱條呈現在圖 4，若把灰色柱條中位數定為西南氣流門檻值(SWUc)，則在有極端事件發生的 177 天（藍色柱條）SWU 強度達此標準的有 55%，表示只有約 50%的極端降雨個案伴隨有西南氣流高於 SWUc 這項條件。

在預報應用方面，本研究以 30 年(1982~2011)的回溯預報為基礎，挑出圖 3 標示格點的渦度符號與配置相符的日期，計算挑出日期的綠色格點的 SWU 值，將全部挑出日期的 SWU 排序後以其中位數定為 SWUc，再計算 5、6 月渦度符號和 $\text{SWU} > \text{SWUc}$ 條件均滿足的總共日數定為西南氣流指數(South West Flow Index, SWFI)。由於影響臺灣梅雨季極端降雨事件發生與否的因素甚

多，僅有一部分和大尺度條件有關，本研究提出有預報應用潛力的大尺度指標，按作者所知是第一個在臺灣極端降雨季節頻率預報方面的嘗試。概念清楚簡單，作為未來更好方案的評比基礎也相當合適。

三、結果

(一) SWFI 與 TMERF 統計關係式

為評估以 SWFI 作為 TMERF 預報因子的可行性，首先進行二者的相關性分析。SWFI 是根據 NCEP R1 分析場資料計算獲得，因此可視為是完美動力預報模式(perfect model)的預報結果，能代表的 TMERF 變異部分也就是模式預報準確度的上限。SWFI 和 TMERF 在 1951~2016 年的時間序列顯示在圖 5，在 1951~2000 年預報發展期二者相關係數為 0.62，而在 2001~2016 年預報實驗期二者相關係數為 0.75，均達 99% 信心度統計顯著水準。由於計算 SWFI 時用以判斷渦度符號的格點和 SWUc 門檻設定僅使用了 1951~2000 年的資料，沒有用到 2001~2016 年的資料，因此前段時期稱為預報方法發展期或訓練期，後段時期稱為預報驗證期。

圖 6 顯示 SWFI 與 TMERF 的散佈圖，看到 TMERF 偏少年份 SWFI 也是偏小，而 TMERF 偏大年份 SWFI 分佈的範圍較廣，但 TMERF 數值越大 SWFI 的數值也越大。在預報應用上曾嘗試過運用 SWFI 做 TMERF 三分類（偏高、正常、偏低）預報，結果並不理想，預報技術得分未能勝過隨機預報，只能改以二分類預報。圖 6 上方標示出 TMERF 二分類（偏高、偏低）預報結果列聯表，顯示正確預報的命中率在 1951~2000 年有 70%，2001~2016 年有 68.8%，以 Hanssen and

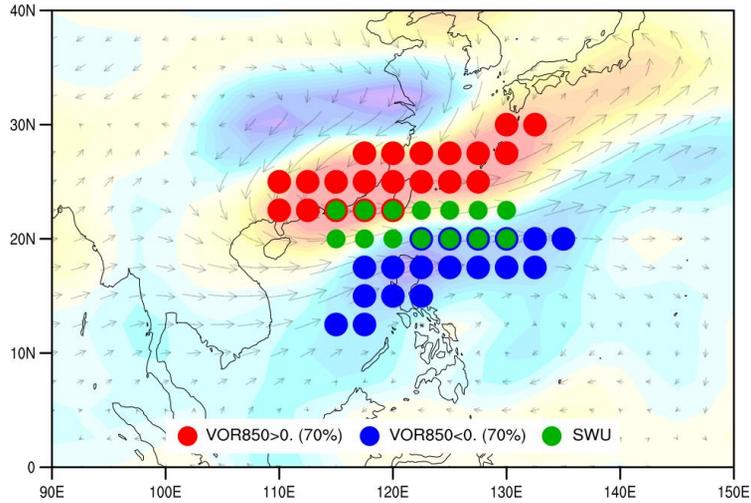


圖 3 有利於臺灣梅雨季極端降雨發生的環流條件區域，紅點和藍點分別代表正渦度和負渦度，綠點代表西南氣流區(SWU)。格點是根據 1951-2000 年的 177 天有極端事件發生日期的 850hPa 渦度場和風場至少有 70% 的個案滿足渦度與西風條件判斷。背景為 1951~2000 年臺灣梅雨季極端降雨事件的環流場距平台合成圖，色階為 850hPa 渦度場，流線為 850hPa 水平風場。

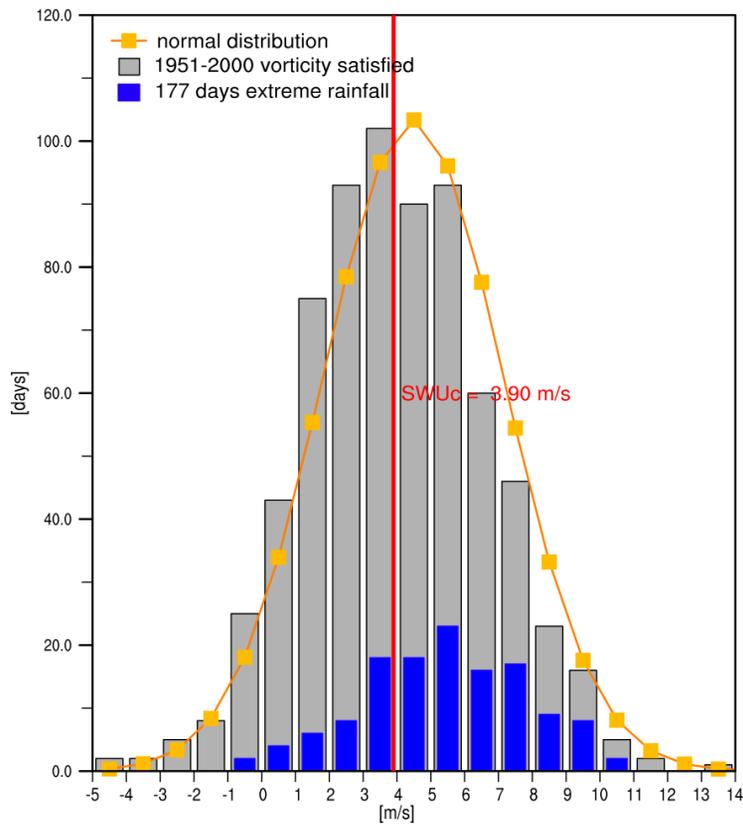


圖 4 1951~2000 年梅雨季期間的 SWU 風速分布頻率，灰色長條為符合渦度條件下的風速強度頻率，藍色長條為臺灣梅雨季極端降雨事件的風速分布，黃線為理論常態分布。

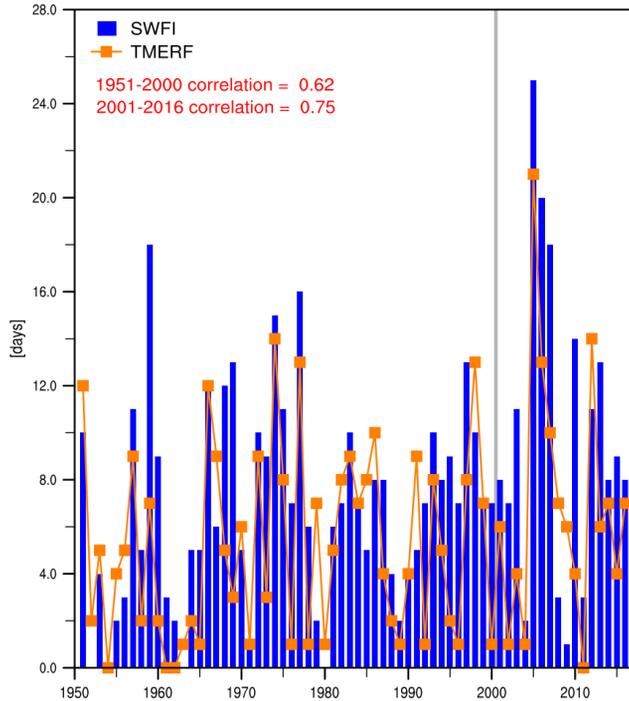


圖 5 1951~2016 年臺灣梅雨極端降雨頻率(TMERF)和西南氣流指數(SWFI), 橘線為 TMERF, 藍色長條為 SWFI。

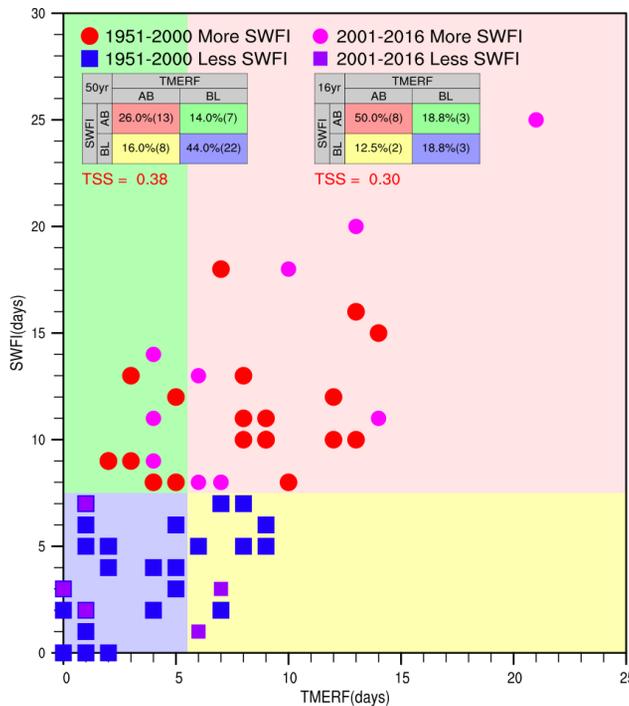


圖 6 1951~2016 年臺灣梅雨極端降雨頻率(TMERF)和西南氣流指數(SWFI)分為偏多和偏少兩類的類別對照關係圖, TMERF 和 SWFI 的單位為天數。方塊表示 SWFI 偏小的類別, 實心圓點表示 SWFI 偏大的類別, TMERF ≥ 6 屬於偏多類別, 小於 6 則偏少。

Kuipers Score (<http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>)評估的真實預報技術統計得分(True Statistic Skill, TSS)則分別為 0.38 和 0.30。TSS 是命中率和誤報率差值, TSS > 0 表示預報技術高於隨機預報, 可見以 SWFI 作為 TMERF 二分類預報的預報因子確實可產出有價值的結果, 命中率達到接近上限值的 70%。由於預報驗證期的資料較短且 TMERF 偏高(圖 5), 使得圖 6 顯示的 TMERF 偏高類別命中率在驗證期明顯高於訓練期, 而 TMERF 偏低類別的命中率則在驗證期明顯低於訓練期。

本節討論了 SWFI 和 TMERF 的同時相關, 也用觀測資料說明了以 SWFI 作為預報因子來預報 TMERF 確實可行, 接下來將運用動力預報模式產出的 SWFI 預報值進行降尺度預報 TMERF。

(二) 預報應用與技術評估

在第 2.1 節已說明氣象局短期氣候預報系統 TCWB2T2 是由多模式多組預測組成的系集預測系統, 系集成員差異僅在使用了不同日期的分析資料場作為預報初始值, 月與季機率預報是根據 30 個初始日期 4 個預報模組集成 120 個預報成員, 統計兩個類別的各類發生機率, 預報初始值為 4 月 1 至 30 日, 各個預報成員按 2.3 節說明的 SWFI 定義, 根據 1982~2011 年回溯預報資料分別定出各預報成員的 SWUc 以及每年 SWFI 預報值。圖 7 以不同預報組合求取的 SWFI 預報值和依觀測分析場(NCEP R1)計算的 SWFI 相關係數箱形圖, 從相關係數的中位數來看, 以氣象局全球預報模式(CWB AGCM)和 NCEPCFSv2 預報海溫的組合(CWB_CFS)預報計算的 SWFI 和觀測值相關係數最高, 但不如多模式多組預報的系集平均(Multi-Model Ensemble mean, MME), 相關係數

中位數最低的是 ECHAM5.2 和最佳化全球預報海溫的組合(EC5_OPG)預報計算的 SWFI 和觀測值相關係數。整體表現仍以 MME 與觀測分析場的相關係數最高。特別要注意的是 30 年的相關係數 95% 信心度統計檢定門檻值是 0.35, 可見 CWB AGCM 與 OPGSST2 和 ECHAM5.2 與 OPGSST2 兩種組合的大多數成員無法合理預報 SWFI 的年際變化, 用 NCEP CFSv2 預報海溫作為邊界條件的預報組合相關係數表現優於用 CWB 的 OPGSST2 預報海溫。初始場在 4 月 15 日以前的預報結果以 CWB_CFS 預報的 SWFI 表現較佳, 但初始場在 4 月 15 日以後的預報結果以 EC5_CFS 預報的 SWFI 表現較佳(圖未示), 可能是因模式對東亞夏季季風模擬能力不同造成的差異。

由 120 個預報成員構成的二分類機率預報結果顯示在圖 8, 預報方法發展期也就是模式的回溯預報期(1982~2011), 根據預報機率較大類別判斷的命中比例為 56.7%, 驗證期(2012~2016)則是 5 年預報命中 3 年。分別評估各種預報組合的表現, 發現以 CWB_CFS 組合的表現最佳, 表現最差的是 EC5_CFS 組合, 但整體而言仍以 MME 表現最好, 並且經逐項測試後(圖未示)發現剔除任何一種組合並不會提升 MME 的 TSS 預報得分。

(三) 可預報度歸因分析

前一節的預報與分析結果顯示運用 TCWB2T2 預報的 SWFI 作為預報因子, 可以產出有價值(優於隨機預測)的梅雨季極端降雨頻率發生趨勢二類別機率預測結果, 本節將討論 SWFI 作為預報因子的物理基礎, 結論可作為梅雨季氣候監測與分析的輔助性物理概念。

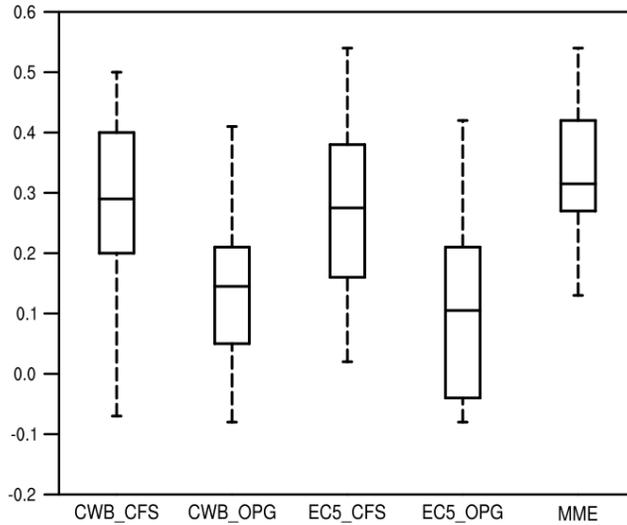


圖 7 根據 TCWB2T2 預報系統在 1982~2011 年回溯預報資料分為五種模式組合，統計按各組 30 個系集成員計算的西南氣流指數(SWFI)和觀測分析場(NCEP R1)計算的 SWFI 相關係數繪製的箱形圖，每個箱形由下而上代表每組模式 30 個系集成員的最小值、下四分位數、中位數、上四分位數和最大值。

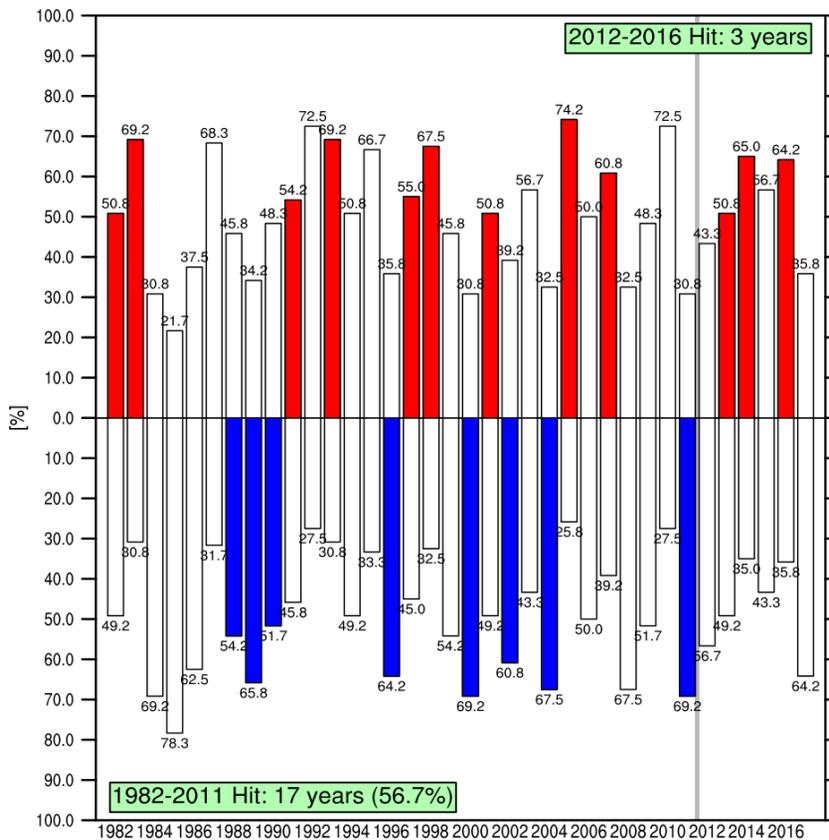


圖 8 TCWB2T2 預報系統的 MME 預報系集成員預報 1982~2017 年 SWFI 偏多和偏少類別的比例，紅色長條為預報偏多的命中年，藍色長條為預報偏少的命中年，空心長條為非命中年。

回溯預報期(1982~2011)的預報命中年在 TMERF 偏高類別有 9 年(1982, 1983, 1991, 1993, 1997, 1998, 2001, 2005, 2007)，偏低類別有 8 年(1988, 1989, 1990, 1996, 2000, 2002, 2004, 2011)，從這兩組不同 TMERF 類別的大尺度環境場差異最能看出以 SWFI 作為 TMERF 預報因子的大尺度環境。圖 9 為偏高年減去偏低年的低層(925hPa)和高層(200hPa)風場以及降水、近地表氣溫

(T2m)、海平面氣壓(SLP)等大尺度變數的差異。本段討論目標為強調海氣耦合模式的重要，因此用更靠近海洋邊界的 925hPa 風場而未採用 850hPa 風場，兩種風場的結果非常接近唯在 925hPa 的差異比在 850hPa (圖未示) 稍微更加清楚。圖 9a 顯示 TMERF 偏高年的熱帶高層風場在巴布亞紐幾內亞(Papua New Guinea)以北有偏強的輻合現象，印度洋與印尼群島上為偏強西風，

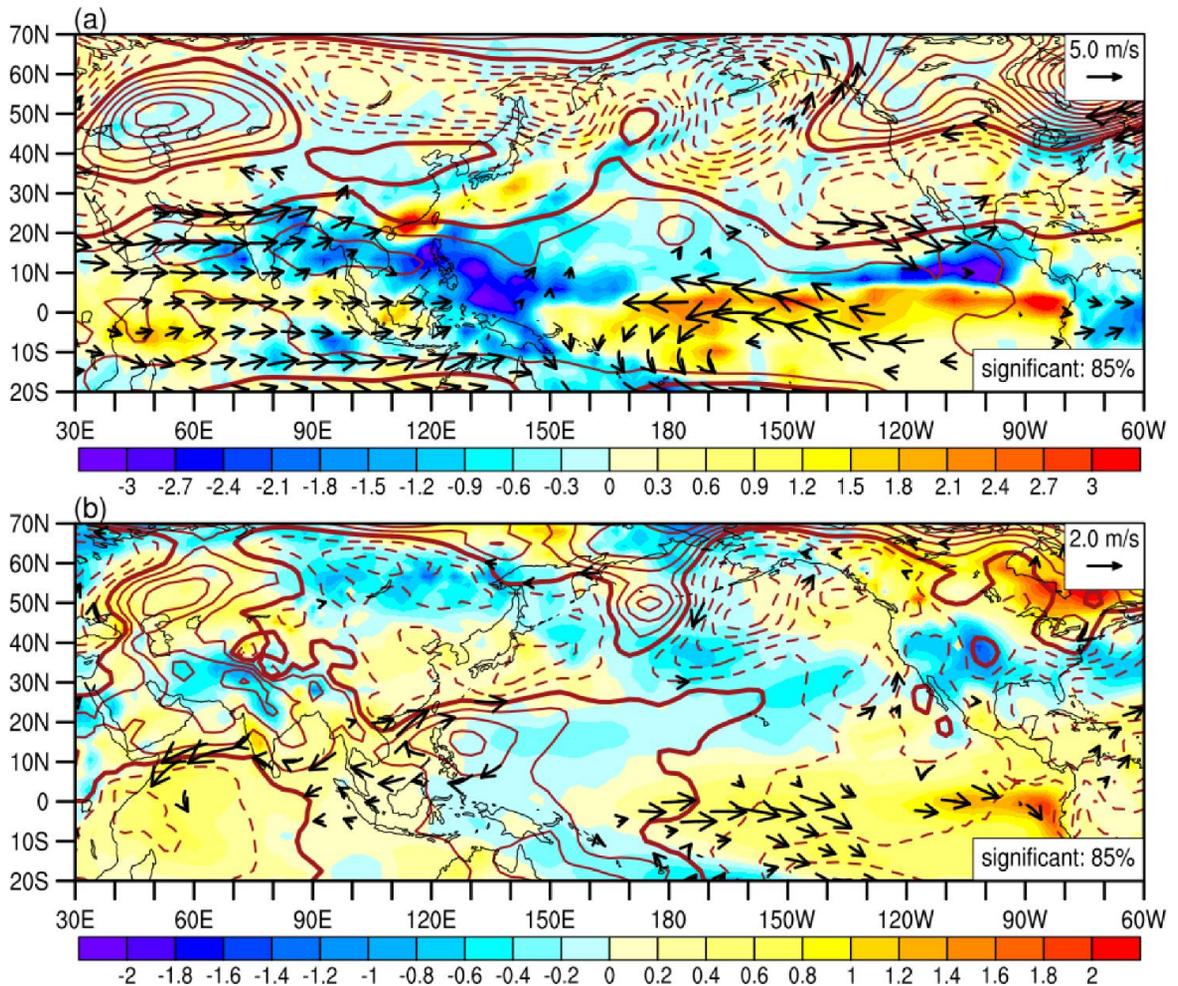


圖 9 TCWB2T2 回溯預報期(1982~2011)以西南氣流指數(SWFI)降尺度預報臺灣梅雨季極端降雨事件頻率(TMERF)偏高和偏低類別命年的環流場差異圖，偏高年為 1982、1983、1991、1993、1997、1998、2001、2005、2007，偏低年為 1988、1989、1990、1996、2000、2002、2004、2011，(a)色階為降水，等值線為 500hPa 高度場，流線為 200hPa 水平風場（只顯示通過 85%顯著性檢定），(b)色階為地表上 2 公尺氣溫場，等值線為海平面氣壓場，流線為 925hPa 水平風場（只顯示通過 85%顯著性檢定）。

而赤道中太平洋上為偏強東風，臺灣位在中亞和西亞的偏強氣旋的下游，高層有較強的西風。圖 9b 顯示低層風場的差異，TMERF 偏高年在巴布亞紐幾內亞以北的近赤道西太平洋風場有向東太平洋和印度洋輻散的現象，赤道東太平洋西風偏強，而北印度洋 10°N 附近東風偏強，偏強的反氣旋環繞菲律賓海與南海，並在中南半島往南海北部及臺灣一直到西北太平洋有偏強的西南氣流。從 T2m 的差異看到 TMERF 偏高年熱帶西印度洋與東太平洋的海溫都偏高，赤道附近的低層風場往高海溫區域加強，北印度洋 10°N 附近的高海溫與低層東風的位置相當契合，顯示海溫可能受到季節性西風偏弱的影響而偏高。降水的差異與高低層風場和 T2m 的差異也非常契合，從華南往東北與臺灣、琉球群島、小笠原群島連成一體的梅雨鋒面雨帶在 TMERF 偏高年明顯偏強，而在偏強雨帶南方的廣大中南半島、南海、菲律賓海、熱帶西太平洋等區域都是降水偏少，孟加拉灣上也是降雨偏少。在 90°E-130°E 與 20°S-50°N 範圍內南北方向上有複雜的降水差異交錯結構，大致上與低層風場結構有很一致的搭配關係，在印尼群島上的赤道東風和伴隨對稱於赤道的南北半球熱帶反氣旋環流，以及在華北和東海上另有反氣旋環流，降水偏少的區域大致都屬於反氣旋環流的覆蓋範圍。

從高、低層風場在預報命中的 TMERF 偏高和偏低年的差異可知，以 SWFI 預報 TMERF 的物理基礎在於動力預報模式能適當掌握 SST 對 SWFI 的影響。圖 7 顯示 SWFI 的預報與觀測相關係數在用 NCEP CFSv2 預報海溫作為邊界條件的組合優於用 CWB 的 OPGSST2 預報海溫，表示海溫是預報 SWFI 的重要影響因子。事實上，在 30 年的回溯預報期四種預報模式組合都正確預

報的情況在 TMERF 偏高年僅有 4 年(1983, 1993, 1998, 2005)，TMERF 偏低年也僅有 4 年(1989, 2000, 2004, 2011)，而正確預報 TMERF 偏高（偏低）的 4 年有 3 年的梅雨季緊接在 El Niño (La Niña) 冬季之後。另一方面，四種預報模式組合都沒有正確預報的情況在 TMERF 偏高年僅有 3 年(1984, 1985, 2008)，TMERF 偏低年則有 5 年(1987, 1992, 1995, 2003, 2010)，前者均屬於 La Niña 年份，而後者均屬於 El Niño 年份。繼續檢視模式均正確預報年與均非正確預報年的極端事件發生時間(圖 10)，看到均正確預報年的時間分佈與 1951~2000 年整體分佈(圖 1)比較接近，大部分事件發生在第 31~33 候，均非正確預報年的時間分佈與 1951~2000 年整體分佈差異較大，發生在第 30 候的事件數最多，其次為第 32 候，第 31 候的氣候尖峰值反而在 8 年當中只出現 3 次，由此推測模式對於大尺度環流的變化時序與年循環(annual cycle)接近的狀態比較有預報能力，但若有振幅大的大氣內部擾動發生，以致於大尺度環流變化明顯偏離年循環規律，模式無法正確預報。

四、討論與結論

本文介紹了運用月與季動力預報系統產品預測臺灣梅雨季極端降雨頻率的大尺度環流指數法。大尺度環流指數法具有簡單易懂且容易操作的優點，預報因子 SWFI 之所以適用的主要原因在於該指標的年際變化反應出東亞與西北太平洋季風氣候系統和太平洋與印度洋海溫變異的關係，也就是當南海與菲律賓海反氣旋與印度洋與太平洋海溫變異有正反饋加強作用時，臺灣梅雨鋒面發生極端降雨事件的機率隨之升高。

近年來世界氣象組織的世界氣候研究計畫(World Climate Research Program)和世界天氣研究

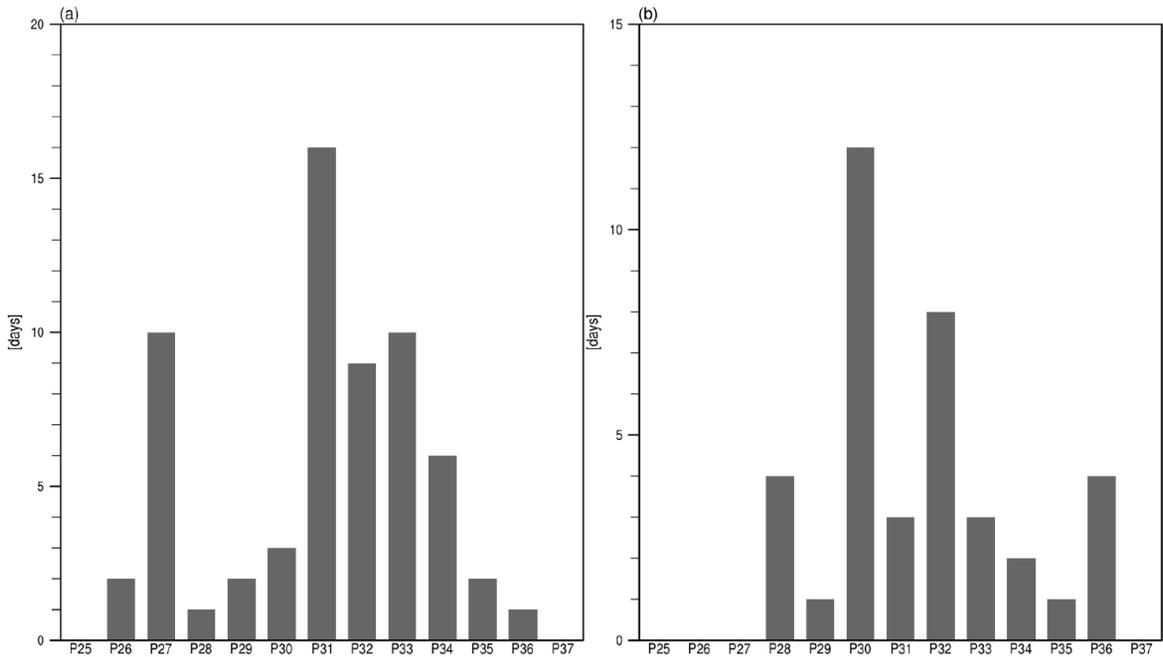


圖 10 (a)四種預報模式組合（如圖 7）都正確預報的預報命中年於梅雨季期間的極端事件發生時間分布頻率，命中年為 1983、1989、1993、1998、2000、2004、2005、2011，(b)四種預報模式組合都沒有正確預報的非命中年於梅雨季期間的極端事件發生時間分布頻率，非命中年為 1984、1985、1987、1992、1995、2003、2008、2010。橫軸的時間單位：候，第 25 候(P25)是 5 月 1~5 日。

計畫(World Weather Research Program)一起推動以 10 天以上為預報目標的季內與季度預報(Subseasonal to Seasonal Prediction, 簡稱 S2S Prediction), 及以 90 天和更長尺度為目標的季節與年際預報(Seasonal to Interannual Prediction, 簡稱 SIP), 未來可見將有越來越大量開放的預報資料供研究使用(Vitart et al. 2017)。大尺度環流指數法不失為一個簡便入門的思考方式, 不僅可藉以熟悉國際間預報資料庫使用方法, 也能快速加工產出實用的在地化預報資訊。以美國海洋與大氣總署(NOAA)支持的北美多模式多組系集預報計畫(NMME)為例, 本研究從該計畫資料庫(<https://www.earthsystemgrid.org/project/nmme.html>)下載了有提供 850hPa 風場的回溯性預報(1982~2011)日資料的 3 個預報模式, 分別是加拿大氣象

局發展及使用的兩個月與季動力預報模式(CanCM3, CanCM4)和美國大氣研究中心(NCAR)發展但由邁阿密大學研究團隊使用的氣候模式(CCSM4)。圖 11 是分別根據 NMME 模式預報場和觀測分析場(NCEP R1)計算的 SWFI 相關係數箱形圖, 可見 CCSM4 比 CanCM3 和 CanCM4 的預報結果變動大, 三者相較以 CanCM4 表現最佳, 總體而言, 系集平均結果(NMME)優於單一模式。經過如本文前面章節所述相同步驟計算, 結果顯示 CanCM4 的預報得分最高, 且略優於 CWB AGCM 與 NCEP CFSv2 SST 組合(CWB_CFS)。可惜目前 NMME 沒有提供實時預報日資料, 因此還無法評估 CanCM4 在 2011 年之後的表現及嘗試運用該模式對臺灣進行實時預報。比較 TCWB2T2 和 NMME 三個模式的系集平均預報

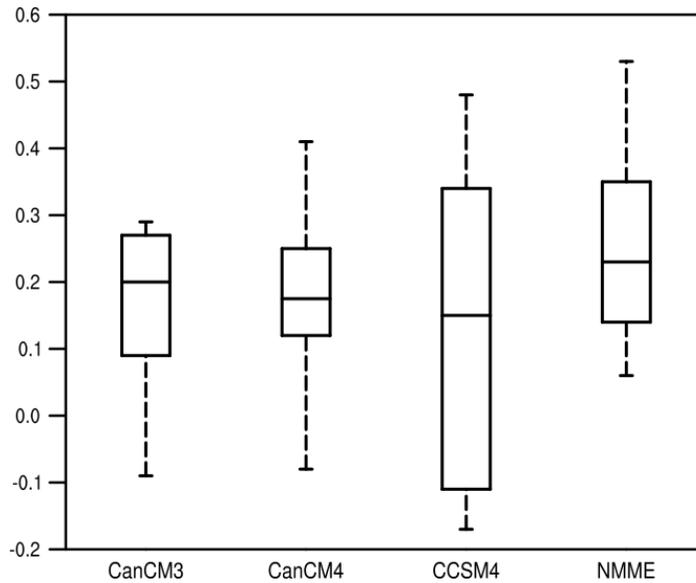


圖 11 同圖 7，但為 NMME 預報實驗的 3 組預報結果，CanCM3 與 CanCM4 為加拿大氣象局預報模式，CCSM4 為 NCAR Community Climate System Model (CCSM) 第 4 版，預報資料由邁阿密大學研究團隊提供(Kirtman et al. 2014)。

結果，二者不分軒輊。未來還需持續發掘與分析 NMME 和 S2S 預報計畫(<http://s2sprediction.net/>) 提供的資料。

致謝

本研究在氣象局「氣候變異與劇烈天氣監測預報系統發展計畫」及「氣象資訊之智慧應用服務計畫」支助下完成，特此致謝。

參考文獻

- 王時鼎、鄭俠、徐晉淮、邱台光，1985：五、六月間臺灣地區暴雨之環境條件。天氣分析與預報研討會論文彙編，中央氣象局，55-72。
- 林昀靜，盧孟明，2008：臺灣極端降雨事件辨識方法之分析。天氣分析與預報研討會論文彙編，297-302。
- 陳正改，蔡清彥，1980：影響臺灣北部地區之梅雨系統。大氣科學，7，49-58。
- 陳泰然，1981：影響臺灣地區八個梅雨系統平均結構之初步分析。大氣科學，8，43-52。
- 陳泰然，2007：最近之梅雨研究回顧。大氣科學，35:4，261-286。
- 陳泰然，紀水上，1978：臺灣梅雨鋒面之中幅度結構。大氣科學，5，35-47。
- 陳景森、陳宇能、林秉承、林沛練、劉哲伶、蘇炯瑞、彭文君，2007：梅雨季臺灣西南部豪雨之探討。大氣科學，35:4，287-304。
- 陳慶昌、嚴明鈺、王世宇，2007：臺灣與東亞之夏季季風降雨變化。大氣科學，35:4，305-352。
- 簡芳菁、洪玉秀，2010：梅雨季西南氣流氣候平均與個案之數值研究。大氣科學，38:4，237-268。

- Adler, R.F., G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P.-P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, and P. Arkin, and E. Nelkin, 2003: The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *J. Hydrometeor.*, **4**, 1147-1167.
- Boyle, J. S., and T. J. Chen, 1987: Synoptic aspects of the wintertime East Asian monsoon. *Monsoon meteorology*, Chang, C.-P., and Krishnamurti, T. N. (Eds.), Oxford University Press, pp 125-160.
- Chen, T. C., M. C. Yen, and J. C. Hsieh, R. W. Arritt, 1999: Diurnal and seasonal variations of the rainfall measured by the automatic rainfall and meteorological telemetry system in Taiwan. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 2299-2312.
- Chen, J. M., T. Li, and C. F. Shih, 2010: Tropical cyclone-and monsoon induced rainfall variability in Taiwan. *J. Climate*, **23**, 4107-4120.
- Hsu, P.-C., J.-Y. Lee, and K.-J. Ha, 2016: Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on rainfall extremes in southern China. *Int. J. Climatol.*, **36**, 1403-1412. DOI: 10.1002/joc.4433
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kirtman, B. P., D. Min, J. M. Infanti, J. L. Kinter, D. A. Paolino, Q. Zhang, H. van den Dool, S. Saha, M. P. Mendez, E. Becker, P Peng, P. Tripp, J. Huang, D. G. DeWitt, M. K. Tippett, A. G. Barnston, S. H. Li, A. Rosati, S. D. Schubert, M. Rienecker, M. Suarez, Z. E. Li, J. Marshak, Y.-K. Lim, J. Tribbia, K. Pegion, W. J. Merryfield, B. Denis, and E. F. Wood, 2014: The North American Multimodel Ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; Phase-2 toward developing intraseasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 585-601. doi: 10.1175/BAMS-D-12-00050.1
- Saha, S., and Coauthors, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1015-1057. doi:10.1175/2010BAMS3001.1
- Saha, S., and Coauthors, 2014: The NCEP Climate Forecast System Version 2. *J. Climate.*, **27**, 2185-2208. doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1
- Stockdale, T. N., D. L. T. Anderson, M. A. Balmaseda, F. Doblas-Reyes, L. Ferranti, K. Mogensen, T.N. Palmer, F. Molteni and F. Vitart, 2011: ECMWF seasonal forecast system 3 and its prediction of sea surface temperature. *Clim. Dyn.*, **37**, 455-471. DOI:10.1007/s00382-010-0947-3
- Tao, S. Y. and L. X. Chen, 1987: A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. *Monsoon meteorology*, Chang, C.-P., and Krishnamurti, T. N. (Eds.), Oxford University Press, pp 60-92.
- Vitart, F., and Coauthors, 2017: The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 163-173. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0017.1

Yen, M. C., and T. C. Chen, 2000: Seasonal variation of the rainfall over Taiwan. *Int. J. Climatol.*, **20**, 803-809.

Yim, S.-Y., B. Wang, W. Xing, and M.-M. Lu, 2015: Prediction of Meiyu rainfall in Taiwan by multi-lead physical-empirical models. *Clim. Dyn.*, **44**, 3033-3042.

A downscaling Method for Predicting Taiwan Mei-yu Seasonal Extreme Rainfall Event Frequency Using a Large-Scale Southwest Flow Index

Yin-Min Cho^{1,2} Mong-Ming Lu¹

¹Research and Development Center, Central Weather Bureau, Taiwan

²International Integrated Systems, Inc., Taiwan

(manuscript received 23 June 2017 ; in final form 28 September 2017)

ABSTRACT

The extreme rainfall events during Taiwan Mei-yu season (May and June) is one of the major hazardous weather phenomena in Taiwan. However, to the authors' best knowledge up to this moment no research on Taiwan Mei-yu extreme rainfall frequency seasonal outlook has ever been published. This paper proposes a large-scale index method applicable to downscale global monthly and seasonal forecast model product to outlook Taiwan Mei-yu season seasonal extreme rainfall frequency. The global forecast model output used in this study is generated at the Central Weather Bureau (CWB) of Taiwan by Taiwan CWB 2-Tier monthly and seasonal forecast system version 2 (TCWB2T2). The extreme rainfall events identified on the station basis are based on the data at 10 stations to the west of the central mountain range. During 50 Mei-yu seasons from 1951-2000, 177 days are identified with rainfall extremes, which means at least one in ten stations received above-threshold daily rainfall amount. The predictand of study is Taiwan Mei-yu Extreme Rainfall Frequency (TMERF), which is the sum of the total extreme events of 10 stations during May and June. The predictor is a southwesterly flow index (SWFI), which is defined according to the large-scale circulation pattern and strong southwesterly wind condition satisfied by at least 70% of the 177 days with the extreme events. The 50-year correlation between SWFI and TMERF during the statistical relationship identification period (1951-2000) is 0.62. The correlation during the verification period (2001-2016) is 0.75. Applying the SWFI and TMERF relationship to TCWB2T2 for two-category downscaled forecast, during the hindcast period (1982-2011) the hit rate is 56.7%. For the experimental forecast years (2012-2016), three out of five of which the TMERF category is correctly forecasted. The downscaling method presented in this study can be easily applied to the blooming forecast database generated by WMO/GFCS/Global Producing Centers for Long-range Forecasts and research institutes.

Key Words: Mei-yu (Baiyu), Extreme rainfall forecast, Long-range forecasts, Monthly and seasonal prediction, Taiwan climate.

doi: 10.3966/025400022017064502001

