

物理－經驗模式對臺灣梅雨季降雨 年際變化預報的應用與改善

張雅惠 陳冠杰 黃婉如*

國立臺灣師範大學地球科學系

(中華民國一〇六年十二月五日收稿；中華民國一〇七年三月二十九日定稿)

摘 要

過去研究顯示，影響臺灣梅雨季（5~6月）降雨的機制並非單一。Yim et al. (2015)以多個可能影響臺灣梅雨季降雨的機制為基礎，利用與這些機制相關的海表面溫度變化趨勢及地面溫度變化趨勢作為預報因子，對1979~2005年期間全球降水氣候學計畫(Global Precipitation Climatology Project; 簡稱GPCP)觀測到的梅雨季臺灣降雨(簡稱GPCP-TWRI)之年際變化現象，建立了多組具物理意義之經驗預報方程。在本研究中，我們以Yim et al. (2015)研究中所提出之表現最好的預報方程(即前置時間為0-month lead者)為基礎，針對以下議題進行探討：(1)是否可以在Yim et al. (2015)的基礎上，對1979~2005年期間地面測站觀測到的臺灣梅雨季降雨(簡稱CWB-TWRI)之年際變化現象，建立具物理意義的經驗預報方程？(2)是否可以透過預報因子的調整，找出對2006~2015年期間的CWB-TWRI之年際變化現象，更具預報能力的預報方程？(3)與CFSv2(Climate Forecast System version 2)動力模式預報相比，議題(2)中所找出的經驗預報方程，是否對CWB-TWRI更具預報能力？針對上述議題，本研究發現可以在Yim et al. (2015)的基礎上，對1979~2005年期間梅雨季「CWB-TWRI年際變化」現象，建立具物理意義的經驗預報方程；但若以此預報方程對2006~2015年期間之CWB-TWRI進行預報，其預報能力表現不佳。在預報方程的改善方面，我們發現若依海溫變化趨勢特徵，將預報因子中的「北大西洋海溫變化趨勢之選取區域」進行調整後，所建立的預報方程對「CWB-TWRI年際變化」的預報能力可有效提高。而在與CFSv2模式預報能力的比對方面，本研究所建立之物理－經驗方程較CFSv2對「CWB-TWRI年際變化」更具預報能力。這些研究成果，有利於瞭解物理－經驗模式對梅雨季「CWB-TWRI年際變化」預報的可應用性及改善方法。

關鍵字：梅雨季、降雨年際變化、預報

*通訊作者地址：黃婉如，116臺北市文山區汀州路四段88號，Email: wrhuang@ntnu.edu.tw，
TEL: 02-77346413

一、前言

每年的 5 至 6 月為臺灣的梅雨季。根據臺灣長期氣候統計結果，梅雨季所帶來的豐沛降雨是臺灣各季節中，僅次於颱風的重要水資源來源(林和洪, 2014)。然而在梅雨季中常有連續性的降雨，且往往伴隨較劇烈的雨勢，若未加防範易造成災害，對於人民的安全以及民生經濟上的影響甚鉅。有鑑於此，梅雨季長期降雨預報的評估與改善，對防災、減災而言，更顯重要。

目前對於長期預報作業，各國氣象單位多以統計模式和動力模式兩種方法做為主要參考的依據(Troccoli et al., 2008)。就統計預報模式而言，其主要以過去已經發生的現象為預測基礎(van den Dool, 2007)。過去的研究指出若將純統計方法應用在氣候預報實務上，其結果往往不如預期，且對於其物理過程常常缺乏適當的解釋(李與盧, 2015)，因此有越來越多的研究，開始發展具物理概念的統計預報模式(physics-based empirical prediction model; 以下簡稱 PEM)(Lu et al., 2013; 胡等, 2014; Yim et al., 2014; Yim et al., 2015; 李與盧, 2015)。舉例來說，Yim et al. (2014)分析全球海表面溫度和近地面溫度的變化與華南地區梅雨季降雨的相關性，利用高相關的區域以逐步迴歸方法(stepwise regression)對華南地區建立降雨預報方程式，其結果顯示所建立的物理－經驗預報方程對華南地區降兩年際變化的掌握與系集模式結果相比有更好的表現。Yim et al. (2015)更進一步沿用 Yim et al. (2014)所提出之方法，對臺灣地區梅雨期的降雨做分析，其預報成果亦有不錯的表現。然而需注意的是，Yim et al. (2015)並非直接針對臺灣當地地面觀測降雨資料進行預報，而是採用全球降水氣候學計畫(Global

Precipitation Climatology Project; 簡稱 GPCP) 的網格化降雨資料(Huffmann et al., 2012)計算出臺灣梅雨季降雨指數(Taiwan Meiyu rainfall index) (以下簡稱 GPCP-TWRI) 做為被預報量進行討論。

就動力模式預報而言，則是以數值模式為主要工具的預測方法(Hoskins et al., 2008)。過去由美國國家環境預測中心(NCEP; National Centers for Environmental Prediction)所提供的氣候預報系統(CFS; Climate Forecast System)資料，常被各國當作重要的預報參考之一(Saha et al., 2006)。近年來氣候預報系統第二版(CFSv2; Climate Forecast System version 2)取代了原先的 CFS，新的預報系統提升了各方面的品質，包含資料同化以及模式預報系統的能力(Saha et al., 2014)。此新版的預報模式除了對於與聖嬰現象有關的熱帶太平洋地區海表面溫度空間與時間上的變化特徵有相當好的掌握能力之外(Zhu et al., 2012; Kim et al., 2012; Xue et al., 2013; Yang and Jiang, 2014)，對亞洲夏季季風的主要特徵(例如：季風降雨的中心、大尺度季風環流的型態、季風的肇始與結束，以及幾個動力季風指數和其伴隨的降雨與環流)亦有良好的預測結果(Jiang et al., 2013)。在應用方面，Yim et al. (2015)曾使用 CFSv2 與其他 3 個當今最先進的海氣耦合模式之預報資料進行系集平均後，分析此系集平均資料對於臺灣地區梅雨季總降兩年際變化的預報能力表現，其與觀測資料比對後的結果顯示動力模式預報能力不比 PEM 預報好，惟該研究並無單一使用 CFSv2 資料進行評估，故有關 CFSv2 資料對臺灣降雨的預報能力與 PEM 預報能力的差別，仍有待進一步評析。

綜合上述所言，本研究的主要目的是希望能以 Yim et al. (2015)所建立之預報方程為基礎，針

對以下科學議題進行探討：(1)是否可以在 Yim et al. (2015)的基礎上，對 1979~2005 年期間地面測站觀測到的臺灣梅雨季降雨（簡稱 CWB-TWRI）之年際變化現象，建立具物理意義的經驗預報方程？(2)是否可以透過預報因子的調整，找出對 2006~2015 年期間的「CWB-TWRI 年際變化」現象，更具預報能力的預報方程？(3)與 CFSv2 預報相比，議題(2)中所找出的 PEM 預報方程，是否對「CWB-TWRI 年際變化」更具預報能力？這些議題的探討，有助於瞭解並改善物理—經驗模式對臺灣梅雨季「CWB-TWRI 年際變化」的預報可信度。本研究的其它章節安排如下。有關研究中所使用的觀測資料及統計方法將在第二章中說明，第三章中將針對分析結果進行討論，最後於第四章總結本研究之主要發現。

二、資料與方法

(一) 資料

有關 1979~2015 年梅雨季（5、6 月）之降雨，本研究採用中央氣象局（Central Weather Bureau；簡稱 CWB）資料較完整的 21 個本島局屬測站（如圖 1 所示）之地面觀測降雨資料做分析，並且以 21 個測站之降雨平均值做為「臺灣地面觀測梅雨降雨指數（以下簡稱 CWB-TWRI）」。

除了臺灣測站降雨資料之外，我們亦使用與 Yim et al. (2015)相同的 GPCP 網格化降雨資料（其資料水平解析度為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ）進行分析，並定義臺灣附近(119-123°E, 21-26°N)之區域降雨平均值作為 GPCP 臺灣梅雨降雨指數(GPCP-TWRI)。另一方面，本研究採用歐洲數值預報中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF)所提供的 ERA interim(ECMWF Re-Analysis Interim)月平均 2 米溫度(T2m)再分析資

料做為地面溫度資料(Dee et al., 2011)，並且以美國國家海洋和氣象管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration)所提供的月平均海表面溫度資料第三版（Extended Reconstructed Sea Surface Temperature—version 3；簡稱 ERSSTv3）(Smith et al., 2008)進行分析。其中 ERA-interim T2m 的水平解析度為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，ERSSTv3 的水平解析度為 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ，為了分析的一致性，我們將這兩個溫度資料的解析度重新網格化成 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。這些網格化資料的來源與 Yim et al. (2015)相同。在動力模式資料部分，本研究中採用 NCEP 所提供的 CFSv2 資料。有關 CFSv2 資料，其起始時間為 1982 年，時間解析度為每 6 個小時 1 筆，空間解析度為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

(二) 預報方程的建立

根據影響臺灣梅雨季降雨的環境場特性及機制，Yim et al. (2015)提出了利用 3~4 月(0-month

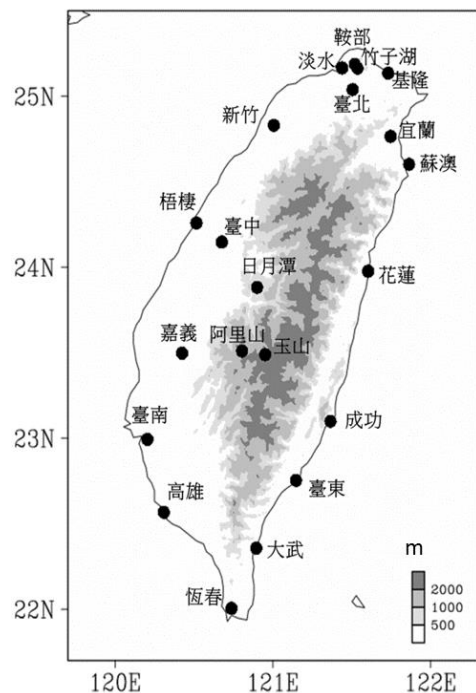


圖 1 中央氣象局測站位置分布。

lead)、3 月(1-month lead)及 2 月(2-month lead)的海表面溫度與地面溫度變化趨勢，對 5~6 月之 GPCP-TWRI 進行預報的方程式。在 Yim et al. (2015)的研究結果中顯示，三組預報方程中以 0-month lead 的可預報度最高，可有效預報 5~6 月之 GPCP-TWRI。有鑒於此，本研究僅採用 Yim et al. (2015)之 0-month lead 預報方程做進一步的分析，檢驗此方程式是否亦適用於 5~6 月之臺灣測站降雨資料(CWB-TWRI)預報。相關的分析將在第三章節說明，而在進入詳細分析之前，我們先簡介 Yim et al. (2015)是如何針對 GPCP-TWRI 建立起 0-month lead 預報方程。

Yim et al. (2015)所提出之 0-month lead 預報方程，如下列方程式(1)所示：

$$\text{預報總降雨量} \\ = -0.531 * \text{WNPT} + 0.499 * \text{NAT} + 0.291 * \text{EAT} \quad (1)$$

其中 WNPT (代表西北太平洋海溫趨勢)、NAT (代表北大西洋海溫趨勢)、EAT (代表東亞地表溫度趨勢)三者為此方程式中之預報因子，而-0.531、0.499 及 0.291 則為各個預報因子之迴

歸係數。各預報因子之選取範圍及計算公式，如圖 3a 及表 1 所示。此處「溫度趨勢」指的是採用「由 3、4 月平均溫度帶入表 1 計算公式後所得的數值」減去「由 1、2 月平均溫度帶入表 1 計算公式後所得的數值」。需說明的是，這 3 個預報因子的定義(表 1)及其範圍的選取(圖 3a)，是 Yim et al. (2015)參考過去眾多相關研究(Wang et al., 2000; Lau and Nath, 2003; Wang et al., 2009; Wu et al., 2009; Yim et al., 2010; Gong et al., 2011; Yim et al., 2013; Wang et al., 2013)，統整出與臺灣梅雨季降雨相關之物理機制後所決定。總的來說，此 3 個預報因子為夏季「菲律賓海反氣旋」及「中國華南地區氣旋」增強的前兆，當此兩系統增強時，臺灣、南海一帶會產生西南風距平，進而增強梅雨系統的發展(Yim et al., 2015)。細分來看，其中第 1 個預報因子為「西北太平洋地區的降溫趨勢(WNPT)」，過去研究指出此降溫趨勢可導致 3、4 月「菲律賓海反氣旋的異常增強現象」持續到 5、6 月，而導致臺灣降雨增加(Wang et al., 2000; Lau and Nath, 2003)。第 2 個預報因子為「橫跨北大西洋、緯向的三極海溫趨勢(NAT)」，此 NAT 預報因

表 1 Yim et al. (2015) 0-month lead 預報方程 [i.e. 方程式(1)] 中，各預報因子之選取範圍及計算公式。此處採用「由 3、4 月平均溫度帶入表 1 公式後所得的數值」減去「由 1、2 月平均溫度帶入表 1 公式後所得的數值」所計算出之「溫度趨勢」作為預報因子。

預報因子	相對應的溫度選取範圍及計算公式 (3、4 月平均減去 1、2 月平均)
WNPT	15°N-25°N, 130°E-180°E
NAT	{ 0°-20°N, 60°W-15°W } + { 45°N-55°N, 55°W-40°W } - { 25°N-40°N, 65°W-40°W }
EAT	30°N-60°N, 110°E-140°E

子的組成，包含了北大西洋赤道與中緯度區域的增溫現象及北大西洋副熱帶區域的降溫現象。NAT 預報因子的選取，與過去研究發現北大西洋振盪(NAO)可間接影響「菲律賓海高壓強度的發展」有關(Wu et al., 2009; Gong et al., 2011; Yim et al., 2013; Wang et al., 2013)，此反應了 NAO 現象對臺灣梅雨降雨的遙影響。最後第 3 個預報因子，代表的是「從前一年冬季持續到當年夏季初期的東北亞的增溫現象(EAT)」，此現象可導致東北亞的氣壓減低，並有助於梅雨季華南地區氣旋式環流的增強(Wang et al., 2009; Yim et al., 2010)，此有利於臺灣梅雨季降雨的增多。

值得注意的是，上述 3 個預報因子的選取，主要是以海溫或地表溫度變化為主。而之所以不選擇環流場的變化為預報因子，主要是因為季節性的環流場變化是由低邊界層的大氣變化交互作用造成，其特性變化的時間持續性大多較溫度變化短(Yim et al., 2015)。而在預報因子的選取過程，Yim et al. (2015)採用統計檢驗與逐步迴歸方式，確認所選出的預報因子是通過顯著性檢定且預報因子彼此之間獨立，相似的統計方法將被採用於本研究中，以利預報方程的改善。其它與方程式(1)有關之更詳細的物理背景知識，請參見 Yim et al. (2015)。

(三) 標準化分析

為方便比較觀測資料與各組預報方程之結果，本研究中以標準化方法進行分析，計算出各組資料之標準差值(standard deviation, σ)後，將各組變數值以標準分數(standard score, Z)表示再進行比較。標準分數為無因次值，是藉由變數值(X)減去平均值(μ)，再依照標準差計算出差距值。此方法可表現出變數值和平均值之間的距離，當變

數低於平均值時 Z 為負數，反之則為正數。此處標準差(σ)及標準化值(Z)的計算公式分別為： $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2$ 及 $Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$ ，其中 μ 為平均值， N 為資料筆數， X 為變數值。

三、結果分析

本章節安排如下。在第(一)節中，我們測試如何在 Yim et al. (2015)的研究基礎上，對 CWB-TWRI 建立具可信度的 PEM 預報方程。在第(二)節中，我們透過修改 Yim et al. (2015)所提出之預報因子選取範圍，以改善 CWB-TWRI 之 PEM 預報方程。在第(三)節中，我們將改善後的 PEM 預報方程之預報降雨能力與 CFSv2 動力模式預報降雨能力進行比對。相關分析，如下所述。

(一) CWB-TWRI 預報方程的初步建立

由圖 2 可知，GPCP-TWRI 與 CWB-TWRI 之年際變化相當接近（兩者時間相關係數達到 0.936），此意味著 Yim et al. (2015)針對 GPCP-TWRI 所建立的 PEM 預報方程，或許可以直接應用於 CWB-TWRI 之年際變化的預報。為了進一步驗證以上推論，我們採用 Yim et al. (2015)所提出之 0-month lead 預報方程（即前述方程式 1）做計算，分別比較預報降雨在 1979~2005（圖 3b 中藍線）及 2006~2015（圖 3b 中紅線）5~6 月期間與 CWB-TWRI（圖 3b 中黑線）時間變化的相關性。由相關係數比較中可以發現，直接採用方程式(1)進行分析之結果，其預報降雨量雖然在 1979~2005 年期間與 CWB-TWRI 的相關係數(0.64)有通過顯著性檢定（t-檢驗，可信度 90%），但在 2006~2015 年期間兩者的相關係數僅為 0.43，並未通過顯著性檢定。由此可知無法直接採用方程式(1)，對 2006~2015 年的 CWB-TWRI 做

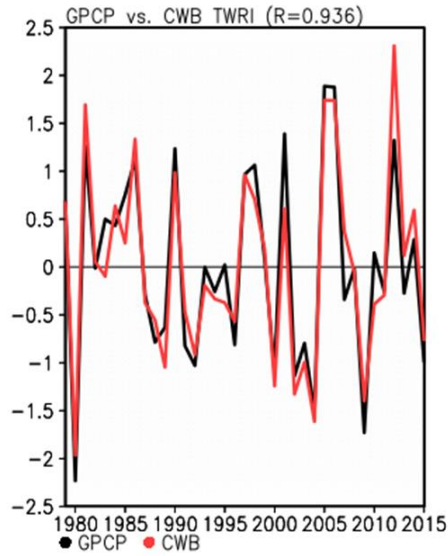


圖 2 1979~2015 年 5~6 月 CWB 測站降雨資料 (紅線)、GPCP-TWRI 降雨資料 (黑線) 標準化之平均降雨變化，兩者相關係數為 0.936。

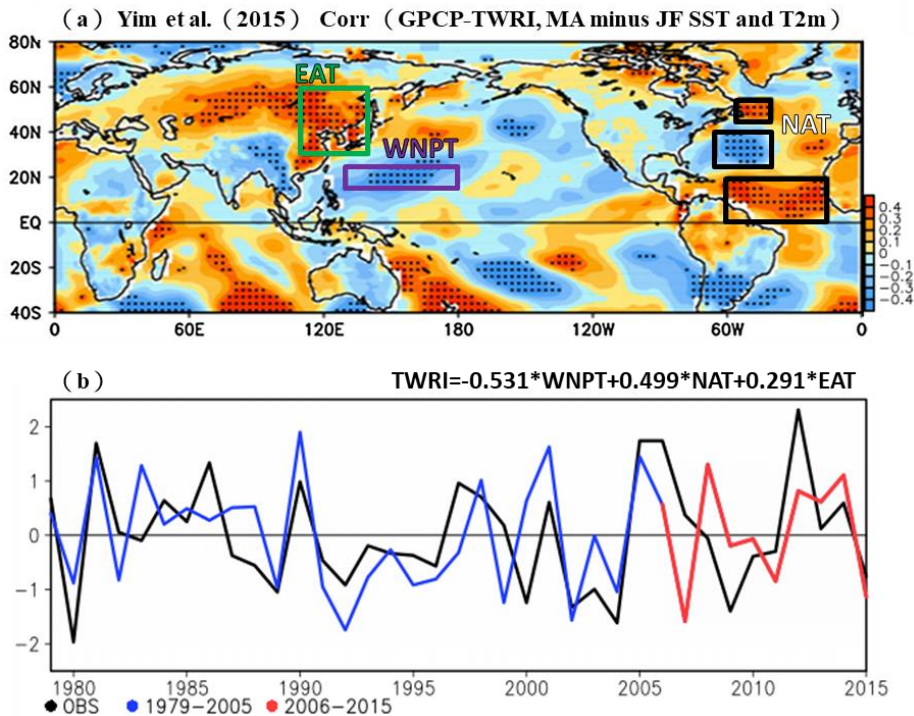


圖 3 (a)摘自 Yim et al. (2015)，為 1979~2005 年 5~6 月平均之 GPCP-TWRI 與 3~4 月平均減去 1~2 月(MA minus JF)平均之海表面與 2m 近地面溫度(SST and T2m)之時間相關分析分布結果。其中綠色、紫色、黑色方框內分別為 EAT、WNPT、NAT 預報因子選定之範圍(詳細選取範圍及計算方式見表 1)，黑色圓點為通過 95%顯著檢定之區域。(b)為以方程式(1)計算之預報總降雨量與 1979~2015 年 5~6 月 CWB-TWRI (黑線)之標準化分析結果。其中紅、藍線分別為 1979~2005、2006~2015 之預報結果。相關係數分析結果見表 3。

有效預報。這個結果，其實是合理的，因為 GPCP-TWRI 與 CWB-TWRI 的年際變化本就存在差異，即便這個差異不大，但若直接採用 GPCP-TWRI 的預報方程去預報 CWB-TWRI，則誤用的可能性很大。

由於 PEM 預報方程是由預報因子和迴歸係數所組成，因此我們推測造成預報方程(1)無法直接適用於 CWB-TWRI 年際變化預報的原因，可能來自於預報因子選取的差別，或迴歸係數的改變。為了檢驗此推測，我們接著沿用與 Yim et al. (2015)研究（圖 3a）中相類似之理論基礎與分析方法，將 1979~2005 年期間 3、4 月平均減去 1、2 月平均(MA minus JF)之海表面與 2m 近地面溫度(SST and T2m)，與 5、6 月平均之 CWB-TWRI 指數做時間相關，所得之空間分布結果如圖 4a 所示。比較圖 4a 與圖 3a，可以發現在兩分析結果中 EAT 預報因子之選取區域皆呈現正相關；WNPT 選取區域主要呈現負相關；而 NAT 預報因子選取區域則由「北至南」皆呈現「正、負、正」三極型態的相關性分布特徵。由於圖 4a 與圖 3a 十分相似，此意味著 Yim et al. (2015)針對 GPCP-TWRI 所建立之 PEM 預報方程中所採用之預報因子，或許可以被應用於 CWB-TWRI 的預報中。

而在迴歸係數的檢驗上，我們採用 1979~2005 年的 CWB-TWRI 與 EAT、WNPT 及 NAT 三個預報因子進行與 Yim et al. (2015)相同的逐步迴歸分析，重新建立 CWB-TWRI 之 PEM 預報方程，所得之方程如(2)所示：

預報總降雨量

$$=-1.983*WNPT + 0.656*NAT + 0.239*EAT \quad (2)$$

比較方程式(1)和方程式(2)，可以得知各預報因子之相關迴歸係數有所不同，以相差最大者

WNPT 為例，在預報方程(1)中之迴歸係數為 -0.531，但在預報方程(2)中之迴歸係數則為 -1.983。若採用方程式(2)做計算，分別比較預報降雨在 1979~2005(圖 4b 中藍線)及 2006~2015(圖 4b 中紅線) 5~6 月期間與 CWB-TWRI(圖 4b 中黑線)時間變化的相關性，可以發現採用方程式(2)進行分析之結果，除了在 1979~2005 年與 CWB-TWRI 相關係數(0.67)通過顯著性檢定之外，在 2006~2015 年的相關係數(0.61)亦明顯提升且通過顯著性檢定。此結果顯示，雖 Yim et al. (2015)所提出之 0-month lead 預報方程無法直接應用於 CWB-TWRI 之預報，但利用其所提出之預報因子重新針對 CWB-TWRI 進行迴歸分析後所得之預報方程，則能有效地預報梅雨季 CWB-TWRI。

(二) 預報因子的調整與預報方程的改良

在上述分析結果中，雖然證明了應用 Yim et al. (2015) 0-month lead 預報方程所採用之預報因子，在經過迴歸係數的調整後，同樣能有效預報 CWB-TWRI，但從圖 4a 中我們亦發現位在 WNPT 以及 NAT 範圍附近的高相關地區，與圖 3a 有些許差異。因此，在本研究當中，我們希望能在 Yim et al. (2015)的研究基礎上，分別針對 WNPT 以及 NAT 區域之預報因子進行選取區域調整，測試經過預報因子調整後所建立的預報方程，是否能夠有效地提升預報 CWB-TWRI 年際變化的能力。

首先，我們進行 WNPT 預報因子選取範圍的調整測試，此處調整方式是依據 Yim et al. (2015) 針對 WNPT 預報因子的物理機制背景以及範圍選取方式，將範圍調整至菲律賓海的海溫變化與 CWB-TWRI 變化相關性較高（通過顯著性檢定）之區域（範圍 130°E-155°E，10°N-22°N），以下我

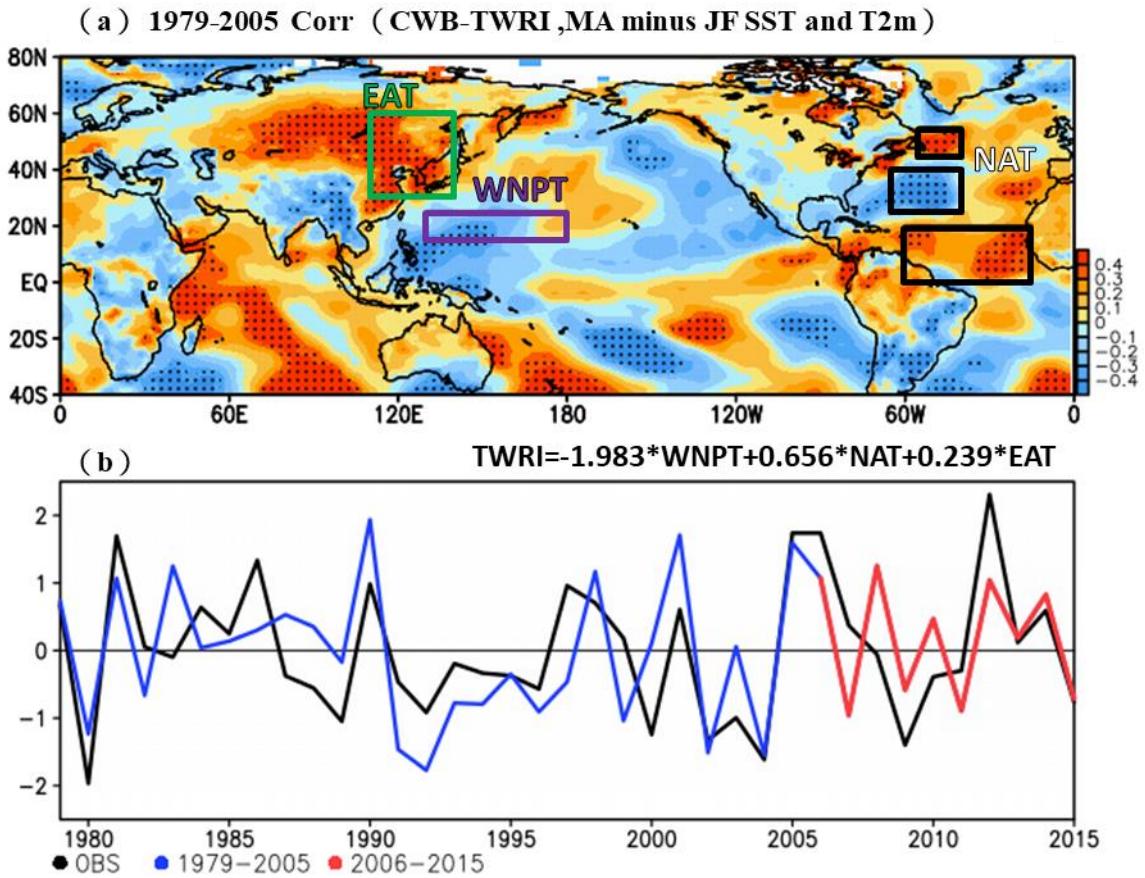


圖 4 (a)為 1979~2005 年 5~6 月平均之 CWB-TWRI 與 3~4 月平均減去 1~2 月(MA minus JF)平均之海表面與 2m 近地面溫度(SST and T2m)之時間相關分析分布結果。其中綠色、紫色、黑色方框內分別為 EAT、WNPT、NAT 預報因子選定之範圍(詳細選取範圍及計算方式見表 1)，黑色圓點為通過 95%顯著檢定之區域。(b)為以方程式(2)計算之預報總降雨量與 1979~2015 年 5~6 月 CWB-TWRI (黑線)之標準化分析結果。其中紅、藍線分別為 1979~2005、2006~2015 之預報結果。相關係數分析結果見表 3。

們以 $WNPT_{new}$ 表示(見表 2)。接著，我們利用 1979~2005 年期間 $WNPT_{new}$ 預報因子與 EAT 及 NAT 兩個預報因子針對 CWB-TWRI 重新進行迴歸分析，所建立之預報方程，如下列方程式(3)所示：

$$\text{預報總降雨量} = -2.308 * WNPT_{new} + 0.571 * NAT + 0.240 * EAT \quad (3)$$

若採用方程式(3)做計算，分別比較預報降雨

在 1979~2005(圖 5b 中藍線)及 2006~2016(圖 5b 中紅線)5~6 月期間與 CWB-TWRI(圖 5b 中黑線)時間變化的相關性，可以發現採用方程式(3)進行分析之結果，在 1979~2005 年與 CWB-TWRI 相關係數(0.71)除了通過顯著性檢定之外，其相關係數亦較前述採用方程式(2)進行分析之結果佳。但圖 5b 在 2006~2015 年的相關係數(0.45)則較前述採用方程式(2)進行分析之結果差。此結果顯示，調整 WNPT 的預報因子選取範

表 2 1979~2015 年 5~6 月 CWB 測站降雨資料 (紅線)、GPCP-TWRI 降雨資料 (黑線) 標準化之平均降雨變化, 兩者相關係數為 0.936。

預報因子	相對應的溫度選取範圍及計算公式 (3、4 月平均減去 1、2 月平均)
WNPT _{new}	130°E-155°E, 10°N-22°N
NAT _{new}	[25°N-40°N, 30°W-10°W] + [0°-20°N, 60°W-15°W] + [45°N-55°N, 55°W-40°W] - [25°N-40°N, 65°W-40°W]

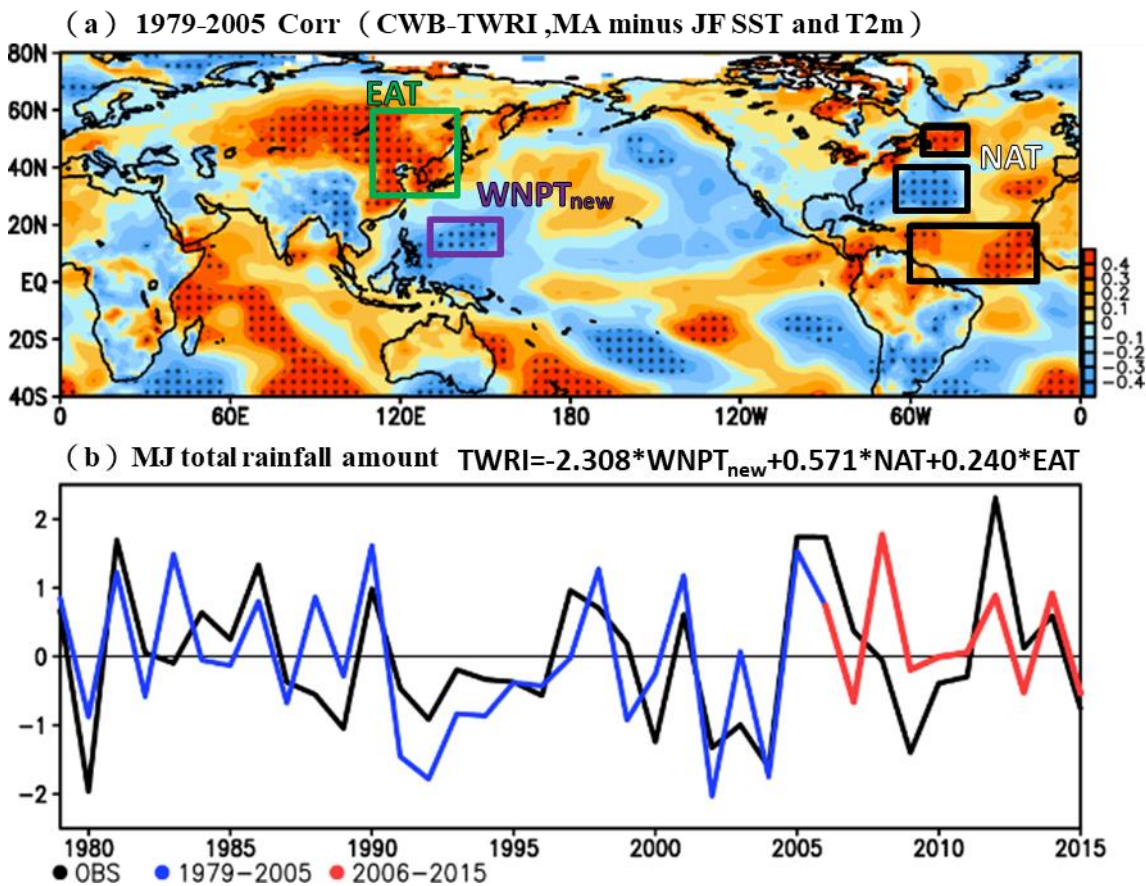


圖 5 (a)與圖 3a 相同, 但 WNPT 預報因子選定之範圍 (紫色方框) 改為 WNPT_{new} (詳細選取範圍及計算方式見表 1、表 2)。(b)以方程式(3)計算之預報總降雨量與 1979~2015 年 5~6 月 CWB-TWRI (黑線) 之標準化分析結果。其中藍、紅線分別為 1979~2005、2006~2015 之預報結果。相關係數分析結果見表 3。

圍，無法有效改善對 CWB-TWRI 的預報結果。

而就預報因子 NAT 的選取範圍調整，我們的分析步驟如下所述。Yim et al. (2015) 提出 NAT 的預報因子的組成，包含了北大西洋赤道與中緯度區域的增溫現象及北大西洋副熱帶區域的降溫現象。此預報因子的選取，主要是依據橫跨北大西洋、「緯向」的三極海溫趨勢特徵而定（如圖 3a）。然而，若進一步比較圖 3a 與圖 4a 中可以看到，雖然兩者在北大西洋的相關性分析結果中皆呈現三極海溫特徵分布，但在圖 4a 中赤道大西洋區域（0°-10°N, 60°-10°W）有通過相關性顯著檢定的範圍（黑色點狀區）較在圖 3a 中來得少，反觀在北大西洋東側地區（25°-40°N, 30°W-10°W）處，兩者則在圖 3a 與圖 4a 皆可見高相關區。根據圖 4a 北大西洋區域的特徵分布結果可以發現，海溫三極的空間分佈略有西南—東北傾斜走向的特徵，因此或許可以透過調整原本以「緯向」特徵平行選取區域的方式，進而獲得較佳的預報因子。為驗證此推測，我們以 Yim et al. (2015) 選取 NAT 的方式為基礎，並根據圖 4a 中大西洋地區海溫分佈特徵，考量海溫三極的空間分佈並非完全沿著相同緯度分佈，而是有西南—東北傾斜走向的特徵，來進行 NAT 選取範圍的調整〔即加入北大西洋東側（25°-40°N, 30°W-10°W）的區域進行計算（如圖 6a）〕，以產生新的 NAT 變數。調整過後的 NAT 預報因子（NAT_{new}）如下列方程式(4)所示（表 2）：

$$\begin{aligned} \text{NAT}_{\text{new}} = & (25^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\text{W}-10^{\circ}\text{W})\text{區域溫度} \\ & + (0^{\circ}-20^{\circ}\text{N}, 60^{\circ}\text{W}-15^{\circ}\text{W})\text{區域溫度} \\ & + (45^{\circ}\text{N}-55^{\circ}\text{N}, 55^{\circ}\text{W}-40^{\circ}\text{W})\text{區域溫度} \\ & - (25^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}, 65^{\circ}\text{W}-40^{\circ}\text{W})\text{區域溫度} \quad (4) \end{aligned}$$

若以上述 NAT_{new} 預報因子及表 1 中的 WNPT、EAT 預報因子，針對 1979~2005 年期間之 CWB-

TWRI 重新進行迴歸分析後，所獲得的預報方程如下列方程式(5)所示：

$$\begin{aligned} & \text{預報總降雨量} \\ & = -2.119 * \text{WNPT} + 0.547 * \text{NAT}_{\text{new}} + 0.222 * \text{EAT} \quad (5) \end{aligned}$$

若採用方程式(5)做計算，分別比較預報降雨在 1979~2005（圖 6b 中藍線）及 2006~2015（圖 6b 中紅線）5~6 月期間與 CWB-TWRI（圖 6b 中黑線）時間變化的相關性，可以發現採用方程式(5)進行分析之結果，除了在 1979~2005 年與 CWB-TWRI 相關係數(0.67)通過顯著性檢定之外，在 2006~2015 年與 CWB-TWRI 相關係數(0.64)亦較前述採用方程式(2)進行分析之結果佳。此結果顯示，加入大西洋東側（25°N-40°N, 30°W-10°W）區域海溫為預報因子的預報方程，可提升對梅雨季期間 CWB-TWRI 年際變化的預報能力。對此我們猜測可能是因為氣候變化導致 CWB-TWRI 與北大西洋海溫後期的海溫高相關係數位置產生些微改變，因此在經過調整海溫的選取區域之後可產生較好的預報結果。

需說明的是，圖 4a 中所呈現之西南—東北傾斜走向的海溫分佈特徵，其實與過去研究針對 NAO 與北大西洋 SST 相關性分布特徵的分析結果(Cassou et al., 2004; Zuo et al., 2013; Han et al., 2016)一致，即在 NAO 為正（負）向位時，其海溫正（負）距平主要分布在北大西洋西側、北美東岸，而負（正）距平則分布在其南北側並延伸至北大西洋東側，此分布亦常被稱作北大西洋馬蹄型(North Atlantic horseshoe pattern)特徵。換言之，本研究針對 NAT_{new} 預報因子的選取方式，其實並沒有與 Yim et al. (2015) 研究中所提及的 NAT 預報因子選取的物理背景機制相違背，而是在相同的物理機制解釋之下，額外考量西南—東北傾

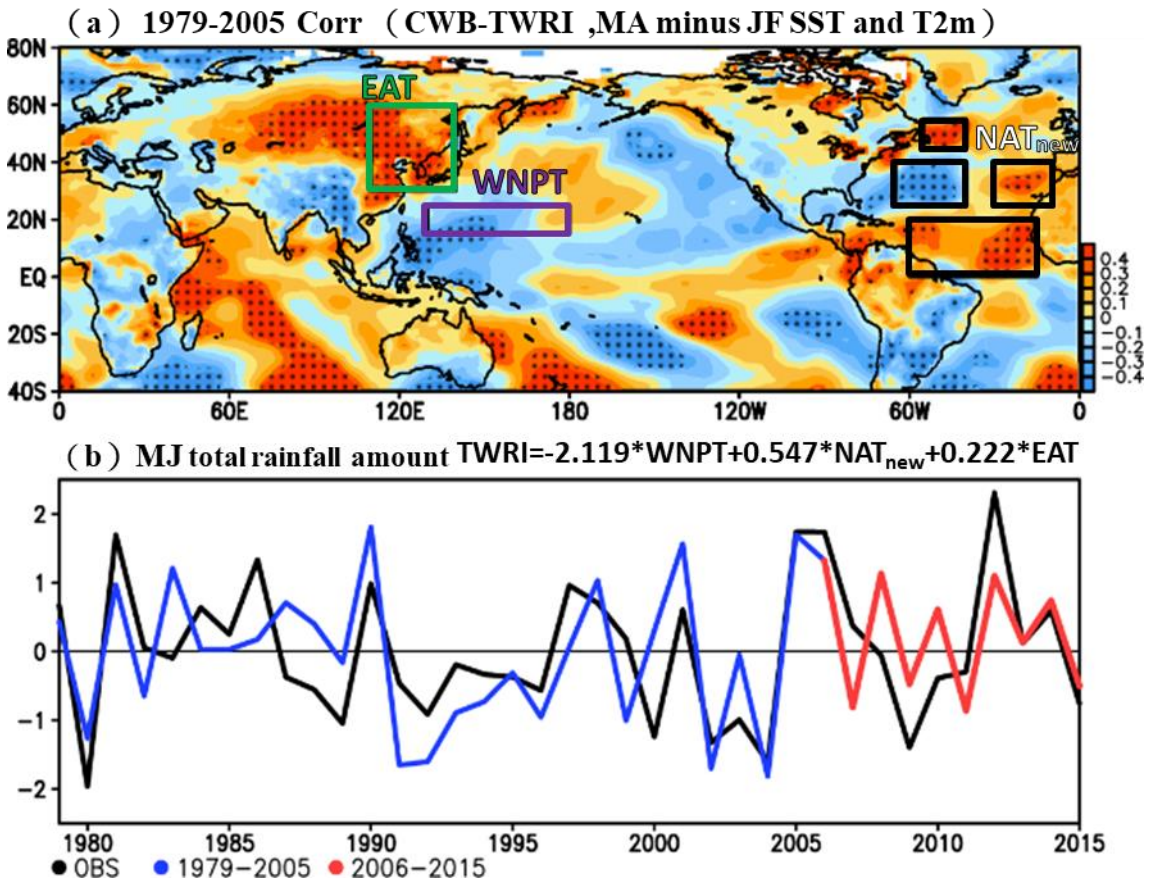


圖 6 (a)與圖 3a 相同，但 NAT 預報因子選定之範圍（黑色方框）改為 NAT_{new}（詳細選取範圍及計算方式見表 1、表 2）。(b)以方程式(5)計算之預報總降雨量與 1979~2015 年 5~6 月 CWB-TWRI（黑線）之標準化分析結果。其中藍、紅線分別為 1979~2005、2006~2015 之預報結果。相關係數分析結果見表 3。

斜走向的海溫分佈特徵，進行 NAT 預報因子的微調。

(三) 物理—經驗預報方程與 CFSv2 動力模式預報能力的差異

而為更加了解本研究中改善後之 PEM 的客觀預報能力與動力模式預報能力差異，此處我們除了針對 4 月預報 5~6 月（相當於 0-month lead）的 CFSv2 降雨資料進行分析，亦採用 3 月預報 5~6 月（相當於 1-month lead）與 2 月預報 5~6 月（相當於 2-month lead）的 CFSv2 預報資料進

行相關比對，以期較完整了解 CFSv2 對梅雨季 CWB-TWRI 年際變化的可預報度。由於 CFSv2 資料提供之起始時間為 1982 年，故在此僅針對 CFSv2 對 1982~2015 年之臺灣梅雨季平均降雨量預報結果進行分析。

圖 7 顯示的是 CFSv2 模式在 4 月、3 月、2 月對臺灣 5~6 月降雨的年際變化預測與 CWB-TWRI 的比對。從圖中可以發現，各組前置時間之分析結果對於臺灣 5~6 月降雨的年際變化預報結果均不甚理想。為了方便與方程式(5)預報 CWB-TWRI 之分析結果做比對，此處我們將

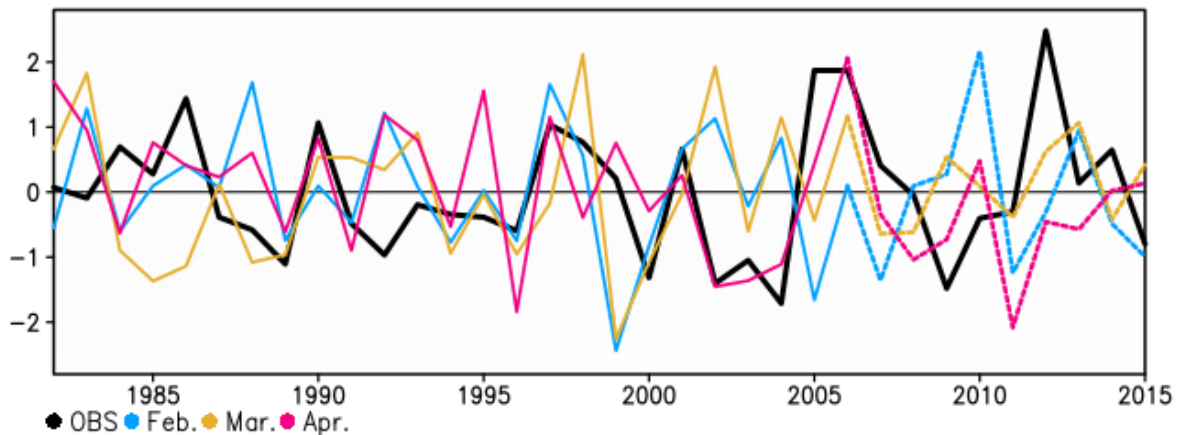


圖 7 1982~2015 年 5~6 月 CWB 測站降雨資料 (黑色實線) 以及 CFSv2 模式分別在 2 月 (藍色)、3 月 (黃色)、4 月 (桃紅色) 不同前置時間預報 5~6 月降雨平均之預報標準化結果。其中 CFSv2 模式 1982~2005 之預報結果以實線呈現, 2006~2015 之預報結果以虛線呈現。相關係數分析結果見表 4。

CFSv2 模式之預報結果分為 1982~2005 年以及 2006~2015 年與觀測資料進行相關性分析, 相關結果條列於表 4 中。從圖 7 與表 4 之分析結果中可以發現, 4 月預報 5~6 月的結果 (桃紅色線) 與 CWB-TWRI (黑色線) 之相關性雖然為三組預報結果之最高者, 但不論是 1982~2005 年或是 2006~2015 年之相關係數 (分別為 0.44、0.40; 見表 4) 表現皆明顯低於前述方程式(5)預報 CWB-TWRI 之預報結果 (相關係數分別為 0.67、0.64; 見表 3)。而從表 4 中之相關係數的比較, 更可以發現 CFSv2 在 3 月或 2 月預報 5~6 月 CWB-TWRI 的能力, 遠低於其在 4 月預報 5~6 月 CWB-TWRI 的能力。由此可知, 相對於第 (三) 章第 (二) 節中所提的方程式(5), CFSv2 較無法有效地被應用於 CWB-TWRI 的年際變化預報; 因此, 對於梅雨季 CWB-TWRI 的年際變化而言, 有關 PEM 預報方程的應用與改善更顯重要。

四、總結

本研究以 Yim et al. (2015) 針對「1979~2005

年期間 GPCP-TWRI」所提出之 0-month lead 預報方程為基礎, 探討以下科學議題: (1) 是否可以在 Yim et al. (2015) 的基礎上, 對 1979~2005 年期間 CWB-TWRI 之年際變化現象, 建立具物理意義的經驗預報方程? (2) 是否可以透過預報因子的調整, 找出對 2006~2015 年期間的 CWB-TWRI 之年際變化現象, 更具預報能力的預報方程? (3) 與 CFSv2 模式預報相比, 議題(2)中所找出的經驗預報方程, 是否對 CWB-TWRI 更具預報能力?

針對議題(1), 本研究發現 Yim et al. (2015) 針對 GPCP-TWRI 所提出之 0-month lead 預報方程雖無法直接應用於 CWB-TWRI 的預報, 但若利用其提出之預報因子針對 CWB-TWRI 重新進行迴歸分析後, 則可獲得有效的預報方程。這些結果表示我們可以在 Yim et al. (2015) 的基礎上, 對 1979~2005 年期間梅雨季 CWB-TWRI 之年際變化現象, 建立具物理意義的經驗預報方程。此外, 透過預報因子變化特徵, 我們亦進行選取區域之調整, 調整針對 CWB-TWRI 所建立的預報方程。結果發現, 使用調整過後的預報因子所得到的預

表 3 「不同預報方程式計算出之臺灣梅雨季總降雨量結果」與「實際地面觀測資料所得之總降雨量 (CWB-TWRI)」兩者之間的時間相關係數分析。此處分析時間分為兩段：1979~2005 年及 2006~2015 年。其中*標記表示該相關係數通過 90%顯著檢定。

與 CWB-TWRI 做相關分析之預報	分析時間	
	1979~2005 年	2006~2015 年
方程式(1)計算出之預報降雨量	0.64*	0.43
方程式(2)計算出之預報降雨量	0.67*	0.61*
方程式(3)計算出之預報降雨量	0.71*	0.45
方程式(5)計算出之預報降雨量	0.67*	0.64*

表 4 「CFSv2 模式在不同預報前置時間的預報結果」與「實際地面觀測資料所得之總降雨量 (CWB-TWRI)」之相關係數分析。此處分析時間分為兩段：1982~2005 年及 2006~2015 年。其中*標記表示該相關係數通過 90%顯著檢定。

與 CWB-TWRI 做相關分析之預報	分析時間	
	1982~2005 年	2006~2015 年
CFSv2 模式在 2 月預報 5~6 月降雨	-0.13	-0.11
CFSv2 模式在 3 月預報 5~6 月降雨	-0.13	0.26
CFSv2 模式在 4 月預報 5~6 月降雨	0.44*	0.40

報方程，其預報 CWB-TWRI 的能力較為提高，顯示預報因子的選取會顯著影響到預報方程的預報能力。這些研究成果，有利於瞭解物理—經驗模式對梅雨季 CWB-TWRI 年際變化預報的可應用性。

致謝

我們感謝隋中興老師及匿名審查者的寶貴建議，讓本研究的論述得以更加完整。本研究在科技部計畫 MOST 105-2625-M-003-002、MOST 106-2625-M-003-002 及 MOST 106-2628-M-003-001-MY4 的資助下完成，特此感謝。

參考資料

- Cassou, C., C. Deser, L. Terray, J.W. Hurrell, and M. Drévilion, 2004: Summer Sea Surface Temperature Conditions in the North Atlantic and Their Impact upon the Atmospheric Circulation in Early Winter. *J. Clim.*, **17**, 3349-3363.
- Dee, D.P., and co-authors., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553-597.

- Gong, D.Y., J. Yang, S.J. Kim, Y. Gao, D. Guo, T. Zhou, and M. Hu, 2011: Spring Arctic Oscillation-East Asian summer monsoon connection through circulation changes over the western North Pacific. *Clim. Dyn.*, **37**, 2199-2216.
- Han, Z., F. Luo, and J. Wan, 2016: The observational influence of the North Atlantic SST tripole on the early spring atmospheric circulation, *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 2998-3003.
- Hoskins, B., P. Schopf, and A. Navarra, 2008: Modeling the atmospheric, oceanic and coupled system. In: Troccoli A, Harrison M, Anderson DLT, Mason SJ (eds) Seasonal climate: forecasting and managing risk. *Springer Academic Publishers*, Dordrecht, 127-162.
- Huffman, G.J., D.T. Bolvin, and R.F. Adler, 2012: Last updated GPCP Version 2.2 combined precipitation data set. WDC-A, NCDC, Asheville, NC, 2011: Dataset accessed at <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wmo/wdcamet-ncdc.html>
- Jiang, X., S. Yang, Y. Li, A. Kumar, X. Liu, Z. Zuo, and B. Jha, 2013: Seasonal-to-Interannual Prediction of the Asian Summer Monsoon in the NCEP Climate Forecast System Version 2. *J. Clim.*, **26**, 3708-3727.
- Kim, H. M., P. J. Webster, and J. A. Curry, 2012: Seasonal prediction skill of ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective forecast for the Northern Hemisphere winter. *Clim. Dyn.*, **39**, 2957-2973.
- Lau, N.C., and M.J. Nath, 2003: Atmosphere-ocean variations in the Indo-Pacific sector during ENSO episodes. *J. Clim.*, **16**, 3-20.
- Lu, M. M., C. T. Lee, and B. Wang, 2013: Seasonal prediction of accumulated tropical cyclone kinetic energy around Taiwan and the sources of the predictability. *Int. J. Climatol.*, **33**, 2846-2854.
- Saha, S., and Coauthors, 2006: The NCEP Climate Forecast System. *J. Clim.*, **19**, 3483-3517.
- Saha, S., and Coauthors, 2014: The NCEP Climate Forecast System Version 2. *J. Clim.*, **27**, 2185-2208.
- Smith, T. M., R. W. Reynolds, T. C. Peterson, and J. Lawrimore, 2008: Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880~2006). *J. Clim.*, **21**, 2283-2296.
- Troccoli, A., M. Harrison, D. L. T. Anderson, and S.J. Mason, 2008: Seasonal Climate Variability: Forecasting and Managing Risk. *Springer Academic Publishers*, Dordrecht, 467pp.
- Van den Dool, H., 2007: Empirical Methods in Short-Term Climate Prediction. *Oxford Press*, 215pp.
- Wang, B., B. Xiang, and J.Y. Lee, 2013: Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **10**, 2718-2722.
- Wang, B., J. Liu, J. Yang, T. Zhou, and Z. Wu, 2009: Distinct principal modes of early and late

- summer rainfall anomalies in East Asia. *J. Clim.*, **22**, 3864-3875.
- Wang, B., R. Wu, and X. Fu, 2000: Pacific-East Asia teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? *J. Clim.*, **13**, 1517-1536.
- Wang, S. Y., H. H. Chia, R. R. Gillies, and X. Jiang, 2013: Quasi-biweekly mode and its modulation on the diurnal rainfall in Taiwan forecasted by the CFS. *Wea. Forecasting*, **28**, 981-993.
- Wu, Z., B. Wang, J. Li, and F.F. Jin, 2009: An empirical seasonal prediction of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO. *J. Geophys. Res.*, **114**, D18120.
- Xue, Y., M. Chen, A. Kumar, Z. Z. Hu, and W. Wang, 2013: Prediction skill and bias of tropical Pacific sea surface temperatures in the NCEP Climate Forecast System version 2. *J. Clim.*, **26**, 5358-5378.
- Yang, S., and X. Jiang, 2014: Prediction of Eastern and Central Pacific ENSO Events and Their Impacts on East Asian Climate by the NCEP Climate Forecast System. *J. Clim.*, **27**, 4451-4472.
- Yim, S.Y., B. Wang, and W. Xing, 2014: Prediction of early summer rainfall over South China by a physical-empirical model. *Clim Dyn.*, **43**, 1883-1891.
- 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.
- Yim, S.Y., J.G. Jhun, R. Lu, and B. Wang, 2010: Two distinct patterns of spring Eurasian snow cover anomaly and their impacts on the East Asian summer monsoon. *J. Geophys. Res.*, **115**, D22113.
- Yim, S.Y., B. Wang, and M. Kwon, 2013: Interdecadal change of the controlling mechanisms for East Asian early summer rainfall variation around the mid-1990s. *Clim. Dyn.*, **42**, 1325-1333.
- Zhu, J., B. Huang, L. Marx, J. L. Kinter III, M. A. Balmaseda, R. H. Zhang, and Z. Z. Hu, 2012: Ensemble ENSO hindcasts initialized from multiple ocean analyses. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L09602.
- Zuo, J. Q., W. J. Li, C. H. Sun, L. Xu, and H. L. Ren, 2013: Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, **30**, 1173-1186.
- 李思瑩與盧孟明，2015：臺灣冬季溫度統計預報模式之建立。天氣分析與預報研討會，臺北，A3-16。
- 林和駿與洪致文，2014：以臺灣分區雨量指數分析百年來降雨變化。天氣分析與預報研討會，臺北，A3-12。
- 胡志文、黃文豪、鄭凱傑、施宇晴及李清滕，2014：中央氣象局第二代動力統計氣候預報系統簡介。天氣分析與預報研討會，臺北，A3-1。

Application and Improvement of Physical-Empirical Model on the Prediction of Interannual Variation of Meiyu Season Rainfall in Taiwan

Ya-Hui Chang Kuan-Chieh Chen Wan-Ru Huang*

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

(manuscript received 5 December 2017 ; in final form 29 March 2018)

ABSTRACT

This study is a follow up study of Yim et al. (2015), who developed physical-empirical models (PEMs) to predict the GPCP (Global Precipitation Climatology Project)-estimated interannual variation of Meiyu season (May and June) rainfall amount in Taiwan. Analyses of this study focus on three scientific questions, as listed follows. (1) Is it possible to establish a useful PEM to predict the Central Weather Bureau's station-estimated interannual variation of Meiyu season rainfall amount in Taiwan (denoted as CWB-TWRI), based on the prediction factors of 0-month lead PEM equation developed by Yim et al. (2015)? (2) Is it possible to improve the skill of PEM equation developed in the current study for predicting CWB-TWRI, through the adjustment of prediction factors? (3) Is the adjusted PEM equation in scientific question (2) has better skill than the CFSv2 (Climate Forecast System version 2) model for predicting CWB-TWRI? For scientific question (1), our analyses show that it is possible to establish a useful PEM equation for predicting CWB-TWRI, based on the prediction factors of 0-month lead PEM equation developed by Yim et al. (2015). For scientific question (2), our analyses show that through the adjustment of the prediction factor related to the "Atlantic sea surface temperature tendency", the skill of PEM equation for predicting CWB-TWRI can be improved. For scientific question (3), our analyses show that the PEM equation developed in the current study has better skill than CFSv2 in predicting the CWB-TWRI. These findings provide a better understanding of the potential use and the further improvement of PEM in predicting CWB-TWRI.

Key Words: Meiyu season, Interannual rainfall, Prediction. doi: 10.3966/025400022017124504003