

臺灣冬季溫度季節預報的預報因子挑選及可預報度來源分析

李思瑩^{1,2} 盧孟明^{2,3*}

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

³國立臺灣大學大氣科學系

(中華民國 107 年 1 月 29 日收稿，中華民國 107 年 7 月 09 日定稿)

摘 要

本文提出簡單但有物理根據的臺灣冬季（12-2 月）溫度統計預報模式。以全球海表面溫度（SST）、陸地上 2 公尺氣溫（T2M）、海平面氣壓（SLP）三個氣候變數為範疇，經過繁複的預報因子篩選過程，確認出三個有預報技術的統計預報模式，繼而以 2002–2017 年冬季回溯預報實驗的預報結果說明這些模式的三分類預報命中率可作為選擇適合預報臺灣冬季溫度的季度氣候預報模式的判斷基準。三個統計預報模式的五個預報因子分散在四個不同區域：熱帶東太平洋、熱帶中印度洋、歐亞邊界的烏拉爾山、日本南端至南海北部的臺灣附近西太平洋海域，預報因子的變數有秋季平均 SST、SLP 以及秋季轉入冬季時 SST、T2M 變化幅度。預報因子與大尺度氣候變異遙相關模態的對應關係顯示臺灣冬季溫度年際變化可預報度根源於太平洋與北大西洋秋冬季的海表面溫度變異，但設想的情境能否實現則決定於大氣的遙相關反應，其中聖嬰現象（ENSO）、東大西洋與西俄羅斯模態（EA/WR）、西太平洋模態（WP）是聯繫海溫變異與臺灣附近冬季溫度變化的重要模態。預報單位若加強監測分析這些模態和海溫變異在入冬之前的關係，將有助於判斷臺灣冬季溫度的變化趨勢。

關鍵詞：東亞冬季季風、季節預報、臺灣氣候

* 通訊作者：盧孟明，台北市羅斯福路 4 段 1 號臺灣大學大氣科學系
Email: mongminglu@gmail.com

一、前言

氣溫變化是臺灣冬季最重要的天氣預報項目。臺灣氣溫變化幅度以冬季最大，如果在短時間內發生劇烈變化容易造成農漁業重大災害和生命與財產的損失。鑑於有效的防災減災措施須藉助於即時準確的預報資訊，目前已有一些長期天氣預報資訊的準確度達到「有用」的水準，2013 年世界氣象組織（World Meteorological Organization；WMO）通過「次季節至季節預測研究實施計畫」（Sub-Seasonal to Seasonal Prediction Research Implementation Plan）（WMO, 2012），提出以「就位、預備、起跑」（READY-SET-GO）為要點的災害性天氣因應策略（Vitart and Robertson et al. 2015）。月與季尺度的短期氣候預測是「就位」階段的關鍵資訊，次季節（sub-season）尺度的 10 天至 30 天展期（extended-range）天氣預測則是「預備」階段的必要參考，致於「起跑」決策則必定是以準確度最高的 10 天以內甚至 12 小時內的短時和即時天氣預測作為指引。

為改進「就位」階段的預報方法，中央氣象局在「氣候變異與劇烈天氣監測預報系統發展計畫」（2002–2009）發展完成的第一版動力統計全球短期氣候預報系統（胡等，2008），自 2010 年上線作業便例行每月產出 40 組全球月、季尺度氣候預報資訊，之後在「災害性天氣監測與預報作業建置計畫」（2010–2015）接續發展建置第二版短期氣候預報系統，自 2016 年開始作業（胡等，2014），每月產出 120 組全球月、季尺度氣候預報資訊。兩版預報

系統都是以二步法（two-tiered forecast strategy）作為預報架構，也就是先用統計或動力模式預報海表面溫度的變化，再使用大氣環流模式將之前所預報的海表面溫度作為下邊界條件預報大氣變化。

本研究以合適於作業性環境使用為目標，發展有物理根據的統計預報模式（physically motivated empirical model, P-E model, 見 Wang et al. 2015 第 2 頁），藉以瞭解影響臺灣冬季溫度年際變化的大尺度關鍵因素。由於 P-E 預報模式做法相當簡單，以此作為更複雜的預報模式的技術基準（benchmark）相當合適。為此，本文設計了回溯性預報實驗，比較統計和動力預報模式的預報表現，以預報實例說明研究結果的應用潛力。P-E 預報模式以了解預報因子和預報對象的物理關係為基本理念，預報因子和統計方法均力求簡單，未來可藉以針對預報資訊需求診斷或挑選合用的海氣偶合氣候預報模式，也可將動力預報模式產品引入 P-E 預報架構以開發更符合應用需求的預報產品。為臺灣季度氣候預測設計的 P-E 預報模式目前作業化的有影響臺灣的颱風累積動能預報（Lu et al. 2013, 2017）、梅雨季總降雨量預報（Yim et al. 2015）、梅雨季極端降雨頻率預報（卓與盧 2017）等預報項目。

臺灣冬季溫度季度變化大環境影響因子的研究文獻並不多見。李與盧（2014）設計了臺灣全島型寒潮發生頻率、日最低溫平均值、極端低溫總日數三個變量代表臺灣冬季低溫的季度特性，分析這三個變量與東亞冬季季

風 (East Asian winter monsoon, EAWM) 指標的關係，發現只有寒潮發生頻率和 EAWM 指標有顯著的統計相關性，平均日低溫與極端低溫總日數和季風的平均強度與變異都沒有明顯的關係。由於東亞冬季季風系統是南北方向跨越範圍最大的一個季風系統 (Wang et al. 2010)，活動範圍北至西伯利亞、南至赤道囊括全球人口最為密集的亞洲大陸東岸，對於同時受到中高緯和熱帶雙重影響的臺灣來說，欲在入冬前預測冬季平均溫度的變化趨勢並非易事。二週以上的長期天氣預報的可預報度來源 (predictability sources) 仍倚賴海表面溫度變化的影響 (National Academies of Sciences 2016a)，本研究依照 Wang et al. (2015) 提出的原則選取預報因子，探討臺灣冬季溫度和全球海表面溫度 (Sea Surface Temperatures, SST)、陸表地面上 2 公尺氣溫簡稱 2 米溫度 (2 meter temperature, T2M)、海平面氣壓 (sea level pressure, SLP) 等資料比較齊全的大氣下邊界變數的關係，評估臺灣冬季溫度季度預報的可預報度。近期研究結果顯示 (例: Vitart et al. 2015)，目前國際一流的預報模式仍無法合理預報季內尺度如阻塞高壓等直接影響臺灣冬季溫度的大氣內部變化 (Lu and Chang 2009, Chang and Lu 2012)，因此本研究並未將 500hPa 重力位高度場和其他高層大氣變數納入預報因子挑選對象。

預報因子的初步挑選由觀測與分析場資料相關係數決定，篩選出經交叉驗證確定預報技術得分達一定水準的預報模式，再經由回溯性預報實驗評比 P-E 與動力預報模式的

表現，最後提出有助於監測與詮釋實時 (real time) 氣候資料的 P-E 預報模式。本研究使用的資料在第二章說明，預報方法和結果在第三章說明，第四章模擬作業情境進行 2002–2017 年冬季回溯性預報實驗，比較統計預報模式和氣象局第二版二步法動力預報系統 (TCWB2T2) 預報結果，第五章討論臺灣冬季溫度可預報度的可能來源，第六章為結論與建議。

二、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分析兩種資料，而預測資料有氣象局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 6 年實時預報。

觀測的測站資料使用了中央氣象局 13 個局屬平地測站 (淡水、台北、基隆、花蓮、宜蘭、台南、高雄、台中、大武、新竹、恆春、成功、台東) 月平均溫度資料。全球格點分析場使用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 第一版重分析 (NCEP/NCAR Reanalysis 1; R1) (Kalnay et al., 1996) 以及用海氣偶合預報模式處理的重分析資料 (CFSR 或 CFSv2 Analysis) (Saha et al. 2010) 的 SLP、T2M 以及 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version3 (ERSSTv3) 月平均 SST 資料，空間解析度 SST 為經緯網格 2°，T2M

為 1.875° ，SLP 為 2.5° ，時間長度為 1951 年至 2017 年。本文以前一年 12 月至當年 2 月為當年冬季，2011 年冬季表示自 2010 年 12 月至 2011 年 2 月的三個月，因此使用的資料涵蓋了 66 個 (1952–2017) 冬季。

氣象局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。TCWB2T2 為多模式多組預測組成的系集預測系統，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 (CWBGAM, T119L40 版) 與德國馬普研究院 ECHAM5 模式 (T42L19, 5.2 版); SST 預測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 再分析資料與後預報資料 (Saha et al. 2010) 作為 TCWB2T2 的大氣初始場和海表面溫度完成 30 年 (1982–2011) 的 TCWB2T2 回溯預報，建立預報資料庫。NCEP 的氣候預報作業系統在 2012 年改為 NCEP CFSv2，氣象局 TCWB2T2 也已銜接該系統產出的 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，但 2012 年之後的預報初始場和海溫預測實際上都是運用 NCEP 的作業資料進行。TCWB2T2 產出的資料非常豐富，本研究僅分析了其中臺灣附近的 T2M 預報結果。

三、預報方法與結果

季預報的可預報度源自於大氣下墊面對天氣系統變化的記憶以及大氣、陸地、海洋偶合氣候系統中的緩慢變化過程 (Chapter 4 in National Academies of Sciences, 2016a)，因此在預報因子僅考慮 SST、T2M、SLP 三個氣候變數，預報對象是臺灣區域的冬季 (12–2 月) 平均溫度。預報模式建立流程的主要三個步驟整理在圖 1，第一步為以 1952–2001 年冬季為建模時期，針對 3 段 30 年冬季 (1952–1981、1962–1991、1972–2001) 分析臺灣冬季溫度與大尺度變數的相關係數，第二步則挑選在三段時期與臺灣冬季溫度都有顯著高相關的變數和區域，用向前增加逐步迴歸法挑選預報因子及建立預報模式，最後用世界氣象組織 (WMO) 建議的長期天氣預報標準驗證程序 [<https://www.wmo.int/pages/prog/www/DPS/SVS-for-LRF.html>] 檢驗統計模式預報水準。發展完成的 P-E 預報模式，再運用 30 年 (1972–2001) 預報發展期和 16 年 (2002–2017) 預報期進行回溯預報實驗，與 TCWB2T2 的預報比較預報結果，這部分在第四章說明。

統計預報模式建立流程

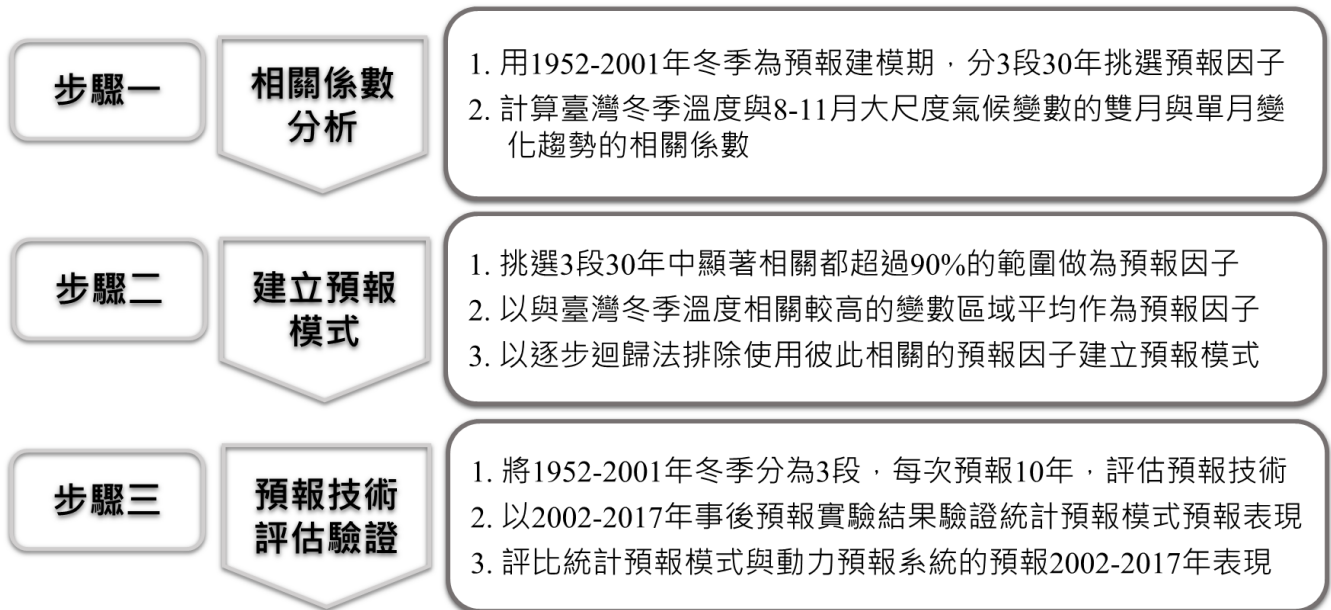


圖 1 統計預報模式建立流程的主要步驟。

3.1 臺灣冬季溫度指數

本文以前述的 13 個局屬平地測站冬季 (12-2 月) 平均溫度代表臺灣全島平均溫度，定義為 WTMP 指數。各測站的單站冬季平均溫度與 WTMP 的 66 年 (1952-2017) 相關係數都在 0.90 以上 (表 1)，用 WTMP 決定的冷冬 (百分位低於 PR25) 或暖冬 (百分位高於 PR75) 與使用各站的極端溫度定義的結果一致，因此以 WTMP 代表臺灣全島平均氣溫相當合適。

計算 WTMP 與全球格點資料 T2M 相關係數，發現兩者在 20°N-27.5°N、117.5°E - 125°E 區域範圍的相關性最高 (圖 2)，相關係數均高於 0.8，因此使用格點資料時可用此區域冬季 (12-2 月) 平均 T2M 代表臺灣全島平均氣溫，本文將此定義為 T2Mtw 指數。不

使用測站資料而改用全球格點分析場平均溫度是因為若以模式分析場的區域平均值作為完全 (perfect) 模式預報值，則 T2Mtw 等同於全球模式對臺灣區域冬季平均氣溫年際變化的預報或模擬能力的上限，以 T2Mtw 作為預報對象開發 P-E 預報模式也是為未來銜接動力模式預報產品做準備，在第四章將以實例詳細說明。

3.2 預報方法設計

預報對象 T2Mtw 與預報因子氣候變數 SST、T2M、SLP 的相關係數分析是建立預報模式的第一步驟，接下來提到的大氣下墊面溫度 (Surface Temperature, ST) 乃指海面上的 SST 和陸地上的 T2M 合併之後的通稱。圖 3 為三段 30 年期間的臺灣冬季溫度和 ST 與 SLP 和 925hPa 風場 (UV925) 的

表 1 臺灣 13 個平地測站的 1952–2017 年冬季（12-2 月）平均溫度的單站與全部平均溫度的相關係數。

測站	1952–2017	1952–1981	1962–1991	1972–2001
淡水	0.92	0.98	0.98	0.90
臺北	0.96	0.98	0.97	0.95
新竹	0.97	0.98	0.98	0.96
臺中	0.97	0.99	0.98	0.97
臺南	0.95	0.96	0.94	0.92
高雄	0.93	0.93	0.93	0.92
恆春	0.91	0.93	0.92	0.91
基隆	0.93	0.96	0.94	0.93
宜蘭	0.98	0.99	0.98	0.97
花蓮	0.95	0.95	0.94	0.91
成功	0.94	0.98	0.97	0.93
臺東	0.96	0.97	0.96	0.93
大武	0.91	0.95	0.93	0.90

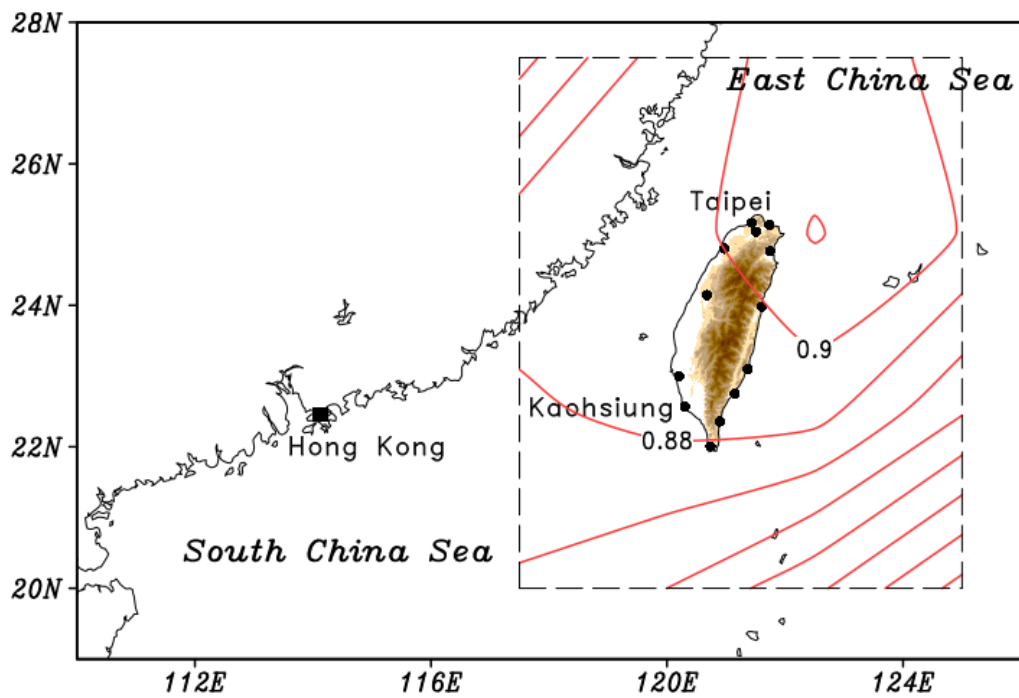


圖 2 用臺灣 13 個平地測站定義的冬季溫度指數 WTMP 和 NCEP R1 全球格點 2 米溫度分析場 66 年（1952–2017）的相關係數，虛線範圍冬季溫度指數 T2Mtw 的平均區域，區域範圍按 WTMP 與 2 米溫度的 0.8 相關係數等值線決定。

同時相關係數，顯示的是統計顯著性達 90% 信心度的部分，看到臺灣冬季溫度和大尺度變數的相關係數隨年代改變有明顯的變化。在熱帶區域，前兩段 30 年 T2M_{tw} 與赤道東太平洋附近的海溫有明顯正相關，但 1972 年之後正相關係數減弱，而 T2M_{tw} 與大西洋和印度洋以及西北太平洋的 SST 正相關係數增強，臺灣與歐亞大陸 T2M 甚至北極海 SST 的相關係數在 1972 年之後也比之前更強。另外，在高緯度西伯利亞以及熱帶西太平洋也在 1972 年前後出現明顯的差異，圖 3a,b 顯示臺灣與這些地方的一些區域有顯著的負相關，圖 3c 則顯示負相關明顯減弱。

大尺度氣候的多年代變化 (multi-decadal variability) 近年來受到廣泛重視 (Lu et al. 2016, Cassou et al. 2017)，雖然目前科學界對於氣候多年代變化仍了解不多也難有定論，但觀測資料顯示多年代氣候變化確實存在是無庸置疑的事實，多年代氣候變化也搖動了氣候預測實務仍然必須倚賴的統計預報模式的基礎 (National Academies of Sciences 2016b)。為減小年代際變化對統計預報模式預報穩定度的影響，本研究一方面依循 WMO 規範用 30 年作為模式發展期，另一方面在預報因子挑選過程則是考慮了前述的 3 段 30 年並挑出在 3 段時期都顯著的變數和區域作為預報因子以建立預報模式，期望藉由這個挑選過程降低多年代變化的影響。

預報因子的挑選流程為從 11 月開始往前取到 8 月，分別計算單月、雙月、三個月的 ST 和 SLP 與臺灣冬季的三個月和雙月

(12-2 月、12-1 月、1-2 月) 溫度的相關係數，也計算了 ST 和 SLP 的單月變化 (例：10 至 11 月變化為 11 月減去 10 月的變化量) 與臺灣冬季的三個月和雙月溫度的相關係數，但因雙月的結果沒有更好因此決定鎖定三個月，挑選至少達 5 個經緯度範圍 (9 個格點，網格解析度：2.5°x2.5°) 統計顯著性的區域平均變量為可能的預報因子，若選中的格點相距小於 5 個經緯度則合併成為一區，並以區域平均值作為預報因子。選出 3 段時期 (1952-1981, 1962-1991, 1972-2001) 相關係數都符合要求的可能預報因子清單列於表 2，屬於 SLP 有 12 個可能預報因子，屬於 SST 有 7 個可能預報因子，屬於 T2M 有 2 個可能預報因子。接下來使用向前增加逐步迴歸方法篩選 (forward stepwise regression screening) 預報因子建立預報模式 (Lu et al. 2010)，首先挑選與預報對象相關係數最大的預報因子 (predictor1) 建立單變數迴歸方程，第二步則先排除與 predictor1 高相關 (相關係數達 95% 統計顯著性) 的預報因子，再挑選與預報對象相關係數最大的第二的預報因子 (predictor2) 建立雙變數迴歸方程，如果增加 predictor2 能改善預報效果則選入 predictor2，並繼續前述程序挑選第三個預報因子，如果對預報效果沒有改善則停止選取。為避免過度擬合，預報因子數量以不超過訓練期的預報對象樣本數 (N=30) 的 10% (3) 為原則。預報效果除解釋率外也檢查了預報對象的觀測值和預報值的相關係數、類別預報命中率以及均方根誤差。為減小年代際變

化對預報模式的影響，預報模式分 3 段時期 (1952–1981, 1962–1991, 1972–2001) 建立，每次預報 10 年(1982–1991, 1992–2001, 2002–2011)，根據預報年份的預報效果篩選預報模式，再以 1982–2011 年預報表現評估綜整預

報效果。以 30 年作為訓練期預報 10 年的做法相較於慣用的提出 1 年或 3 年 (leave one out or leave three out) 交叉檢驗法 (例：Michaelsen 1987) 更嚴格，訓練期和預報期可視為完全獨立。

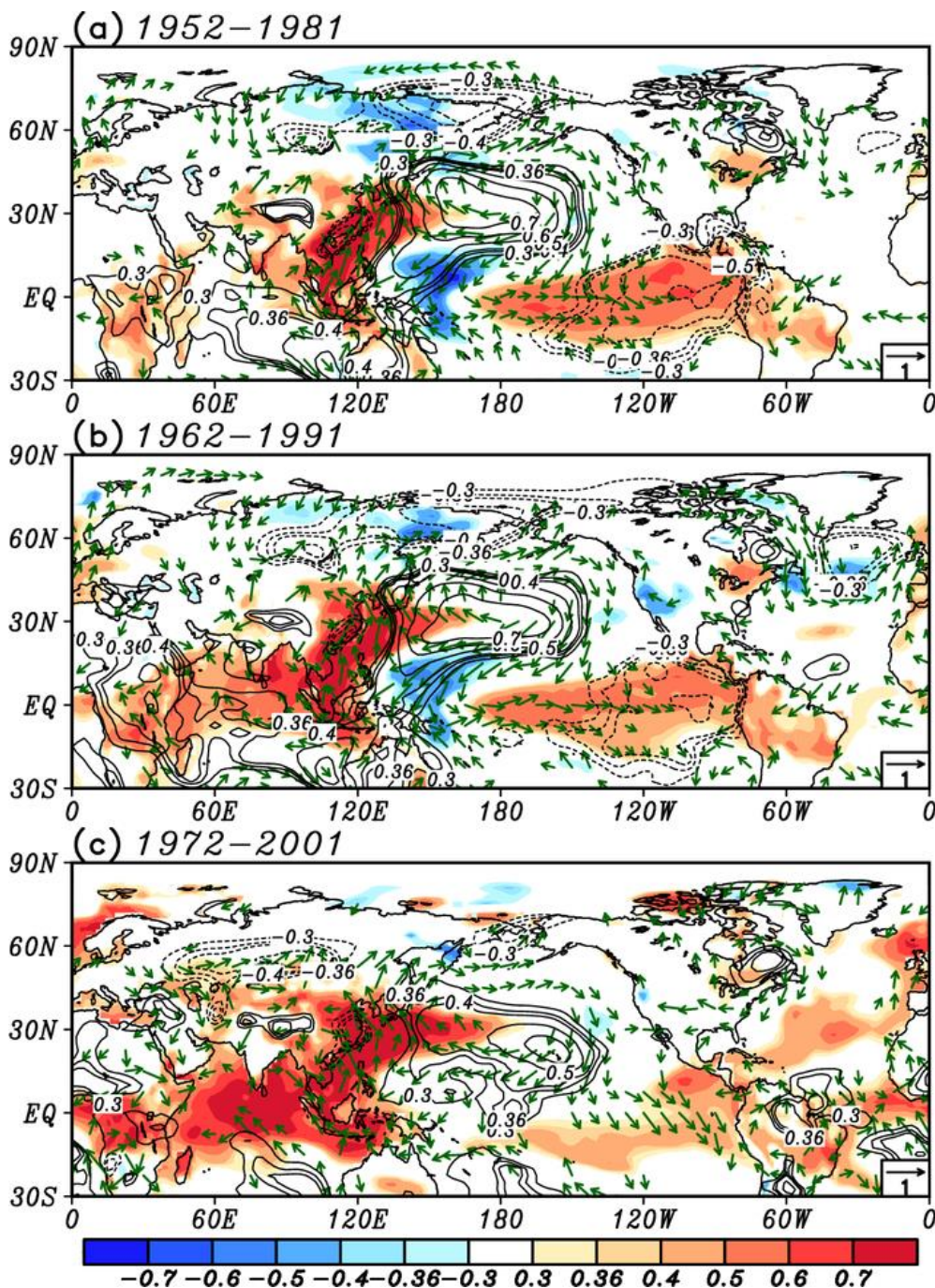


圖 3 臺灣冬季溫度指數 T2Mtw 與 ST、SLP、UV925 三個氣候變數同時 (DJF) 相關係數分析。顏色為海表面溫度 (SST) 以及陸表氣溫 (T2M)，等值線為 SLP，風標為 925hPa 風場。圖中只顯示超過 90% 顯著性檢定 ($r=0.31$) 的範圍。

表 2 挑選出的可能預報因子清單及說明，預報因子按變數與資料月份順序排列。

預報因子 (Predictor)	變數 (Variables)	說明 (Description)
SLP_IO_AS	SLP	SLP 2-month anomaly over Indian Ocean (17.5°S-30°N,50°E-90°E)
SST_EP_AS	SST	SST 2-month anomaly over eastern equatorial Pacific Ocean (22°S-12°N,176°E-72°W)
SLP_SP_9m8	SLP	SLP tendency (September minus August) over southern Pacific Ocean (25°S-15°S,147.5°E-152.5°W)
SLP_UR_ASO	SLP	SLP 3-month anomaly over URAL area (70°N-75°N,30°E-67.5°E)
SLP_IO_ASO	SLP	SLP 3-month anomaly over Indian Ocean (22.5°S-30°N,52.5°E-102.5°E)
SST_EP_ASO	SST	SST 3-month anomaly over eastern equatorial Pacific Ocean (26°S-16°N,176°E-70°W)
SLP_IO_SO	SLP	SLP 2-month anomaly over Indian Ocean (22.5°S-2.5°N,57.5°E-110°E)
SLP_AUS_SO	SLP	SLP 2-month anomaly over north Australia (25°S-10°S,120°E-170°E)
SST_EP_SO	SST	SST 2-month anomaly over eastern equatorial Pacific Ocean (26°S-18°N,174°E-70°W)
SLP_UR_SON	SLP	SLP 3-month anomaly over Ural area (72.5°N-80°N,30°E-92.5°E)
SLP_IO_SON	SLP	SLP 3-month anomaly over Indian Ocean (17.5°S-5°S,60°E-92.5°E)
SLP_WP_SON	SLP	SLP 3-month anomaly over western equatorial Pacific Ocean (5°S-7.5°N,130°E-155°E)
SST_EP_SON	SST	SST 3-month anomaly over eastern equatorial Pacific Ocean (26°S-16°N,176°E-70°W)
SLP_IO_ON	SLP	SLP 2-month anomaly over Indian Ocean (17.5°S-5°S,67.5°E-92.5°E)
SLP_WP_ON	SLP	SLP 2-month anomaly over western equatorial Pacific Ocean (2.5°S-7.5°N,135°E-157.5°E)
SST_EP_ON	SST	SST 2-month anomaly over eastern equatorial Pacific Ocean (26°S-18°N,178°E-70°W)
SLP_NP_11m9	SLP	SLP tendency (November minus September) over northern Pacific Ocean (22.5°N-35°N,175°E-167.5°W)
SST_TW_11m9	SST	SST tendency (November minus September) over Taiwan (20°N-36°N,118°E-140°E)
T2M_UR_11m9	T2M	T2M tendency (November minus September) over Ural area (54°N-68°N,48°E-68°E)
SST_TW_11m10	SST	SST tendency (November minus October) over Taiwan (22°N-32°N,118°E-138°E)
T2M_UR_11m10	T2M	T2M tendency (November minus October) over Ural area (58°N-70°N,51°E-80°E)

盧孟明

李思瑩

表 3 預報模式的預報因子組合，第一輪選出的預報因子為預報因子 1，其次為預報因子 2 和 3，建立預報模式的訓練（30 年）和測試（10 年）共 40 年。

預報因子 1 (Predictor 1)	預報因子 2 (Predictor 2)	預報因子 3 (Predictor 3)	建模與測試的 冬季年份 (Prediction Model Training and Testing)	預報模式代號 (Prediction Model Name)
SST_EP_ASO	SLP_SP_9m8		1952-1991	A
	T2M_UR_11m10		1952-1991	B
SST_TW_11m9	T2M_UR_11m10		1962-2001	C
	SLP_IO_ON	T2M_UR_11m9	1962-2001	D
SST_TW_11m9	T2M_UR_11m10		1972-2011	E
SLP_NP_11m9	SST_TW_11m9	T2M_UR_11m10	1972-2011	F

3.3 預報模式建立

根據上述預報因子挑選步驟決定的預報因子列於表 3，第一列預報因子是第一輪挑出的預報因子也是最重要的預報因子，分別有熱帶東太平洋 8 至 10 月平均 SST、臺灣附近 SST 的 9 至 11 月變化趨勢(11 月減 9 月)和北太平洋 SLP 的 9 至 11 月變化趨勢，預報因子變數和預報對象 (T2Mtw) 的相關係數圖顯示在圖 4。圖 4a-c 分別為 T2Mtw 與 8 至 10 月平均 SST 在三段 30 年 (1951-1980, 1961-1990, 1971-2000) 的相關係數圖，黑框矩形為預報因子 SST_EP_ASO (見表 2) 的範圍，與 T2Mtw 有顯著相關的 SST 以黑點標示，為考慮實際應用的方便而決定選用形狀規則、以固定經緯度作為邊界的區域定義預報因子。圖 4a-c 顯示 T2Mtw 和 SST 在熱帶東太平洋 SST_EP_ASO 區域在三段 30 年期間都有穩定的正相關關係，而西太平洋

SST 在前兩段 30 年與 T2Mtw 有負相關的關係，但在 1971-2000 期間則未出現顯著相關，反而是在北印度洋與中高緯度北太平洋和大西洋以及北極海都有顯著正相關。圖 4d-f 顯示在臺灣附近 SST 的 9 至 11 月氣溫變化趨勢 (SST_TW_11m9) 與 T2Mtw 有穩定的正相關關係，表示臺灣附近 SST 的秋季降溫幅度偏大時冬季易偏冷，而秋季降溫幅度偏小時冬季易偏暖。印度洋上的 9 至 11 月 SST 變化趨勢與 T2Mtw 也有明顯的關係並大約以 60°E 為界東西兩側印度洋 SST 與 T2Mtw 相關係數符號相反，表示當印度洋 SST 季節變化幅度偏弱，也就是在 60°E 以東 20°S 以北的東北印度洋 9 至 11 月降溫幅度偏小(11 月減 9 月 SST 為正距平)且在 60°E 以西 20°S 以南的西南印度洋的南半球 9 至 11 月升溫幅度偏小(11 月減 9 月 SST 為負距平)時臺灣冬季易偏暖。圖 4g-i 顯示在北太平洋夏威夷

群島西北方中緯度(30°N)換日線附近的秋季 SLP 變化幅度(SLP_NP_11m9)在三段 30 年期間都與 T2Mtw 有顯著正相關,若 9 至 11 月 SLP_NP_11m9 區域的高壓變化趨勢偏強(11 月減 9 月 SLP 的氣壓差為正距平)則臺灣冬季偏暖,反之若 SLP_NP_11m9 區域的高壓在 11 月相對於 9 月明顯偏低則臺灣冬季偏冷。不屬於第一輪而是在第二或第三輪挑中的預報因子(表 3)有 SLP_SP_9m8、T2M_UR_11m10、SLP_IO_ON 三項,以及 T2M_UR_11m9,因 T2M_UR_11m9 與 T2M_UR_11m10 非常相似為節省篇幅不在此特別討論。圖 5a 為 T2Mtw 與全球 SLP 的 8 至 9 月變化趨勢(9 月減 8 月 SLP)相關係數,SLP_SP_9m8 的經緯範圍以黑色框線標示在圖中。圖 5a-c 的相關係數均以 30 年(1981–2010)時間序列計算,但預報因子的空間範圍是根據三段 30 年都達顯著相關的格點(在圖 4 與圖 5 以黑點標示)決定。圖 5a 顯示的預報因子區域並不是相關係數最高而是在高相關的南方邊緣區域,乃因為預報因子挑選對訓練期的年份相當敏感,預報因子和 T2Mtw 在 1952–1991 年相關性最強而在 1981–2010 稍弱,用三段 30 年都有顯著相關的條件挑選預報因子無疑是合理的策略。圖 5b 為預報因子 T2Mtw 與全球 T2M 的 10 至 11 月變化趨勢(11 月減 10 月 T2M)相關係數,黑色框線是 T2M_UR_11m10 的經緯範圍。T2M_UR_11m10 與 T2Mtw 是負相關的關係,表示溫度降溫幅度愈大(11 月大幅降溫)則

臺灣冬季溫度愈高,降溫幅度愈小則臺灣冬季溫度愈低。圖 5c 是預報因子 T2Mtw 與 10 和 11 月平均 SLP 的相關係數,圖中標示的矩形是 SLP_IO_ON 的定義範圍。SLP_IO_ON 與 T2Mtw 有正相關關係,該區氣壓愈高臺灣附近冬季氣溫愈高,這些預報因子的變化隱含有大尺度氣候變異影響臺灣冬季溫度的訊息,預報因子與大尺度氣候關係的詮釋留在第五章詳細討論。

本文分別以 3 段時期(1952–1981, 1962–1991, 1972–2001)作為訓練期建立預報模式,每次往後預報 10 年(1982–1991, 1992–2001, 2002–2011),預報結果顯示在圖 6 而預報模式的預報因子整理在表 3,圖 6 顯示的預報值都是校準到以 1982–2011 年為基期的標準化距平。在表 3 可見每段時期有兩個預報模式,圖 6 顯示了兩個模式的分別預報結果和預報的平均值,預報平均值與觀測值在 1952–2001 年相關係數為 0.59,統計顯著性超過 99%信心度檢定,但是預報值變異量明顯小於觀測值,觀測值的標準差為預報值的 1.5 倍。預報和觀測的差異在 1982–1987 及 1998–2002 兩段期間尤其明顯,2004 與 2007 年也有比較明顯的差異。由於 T2Mtw 在 3 段時期(1952–1981, 1962–1991, 1972–2001)的變異量在後期均高於前期,這可能是預報值變異量低於觀測的原因,另一方面因受線性迴歸方法的限制預報值的變異量必然低於觀測。經比較各模式的類別預報命中率和均方根誤差並未發現表現特優或特差的模式。

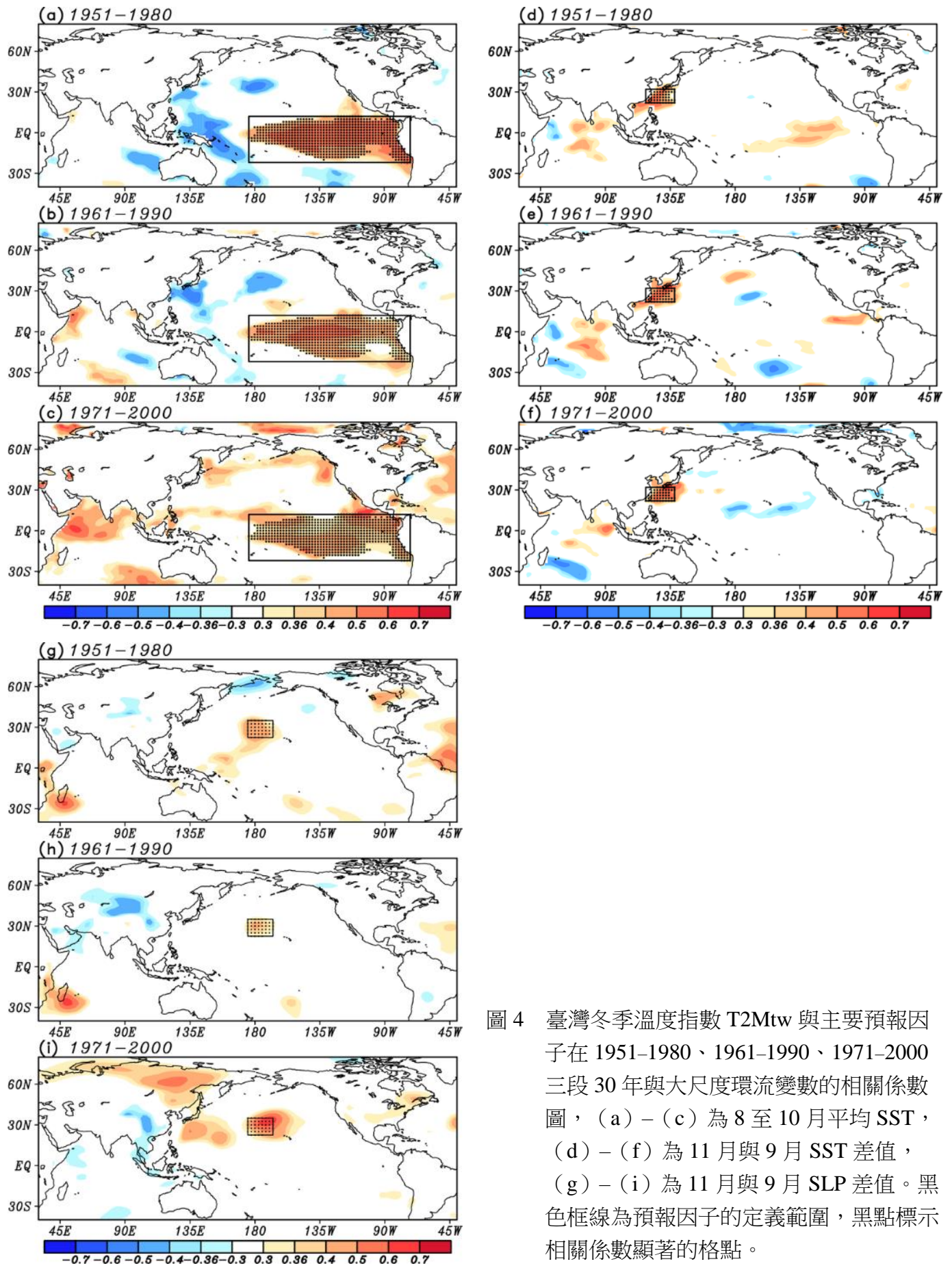


圖 4 臺灣冬季溫度指數 T2Mtw 與主要預報因子在 1951-1980、1961-1990、1971-2000 三段 30 年與大尺度環流變數的相關係數圖，(a) - (c) 為 8 至 10 月平均 SST，(d) - (f) 為 11 月與 9 月 SST 差值，(g) - (i) 為 11 月與 9 月 SLP 差值。黑色框線為預報因子的定義範圍，黑點標示相關係數顯著的格點。

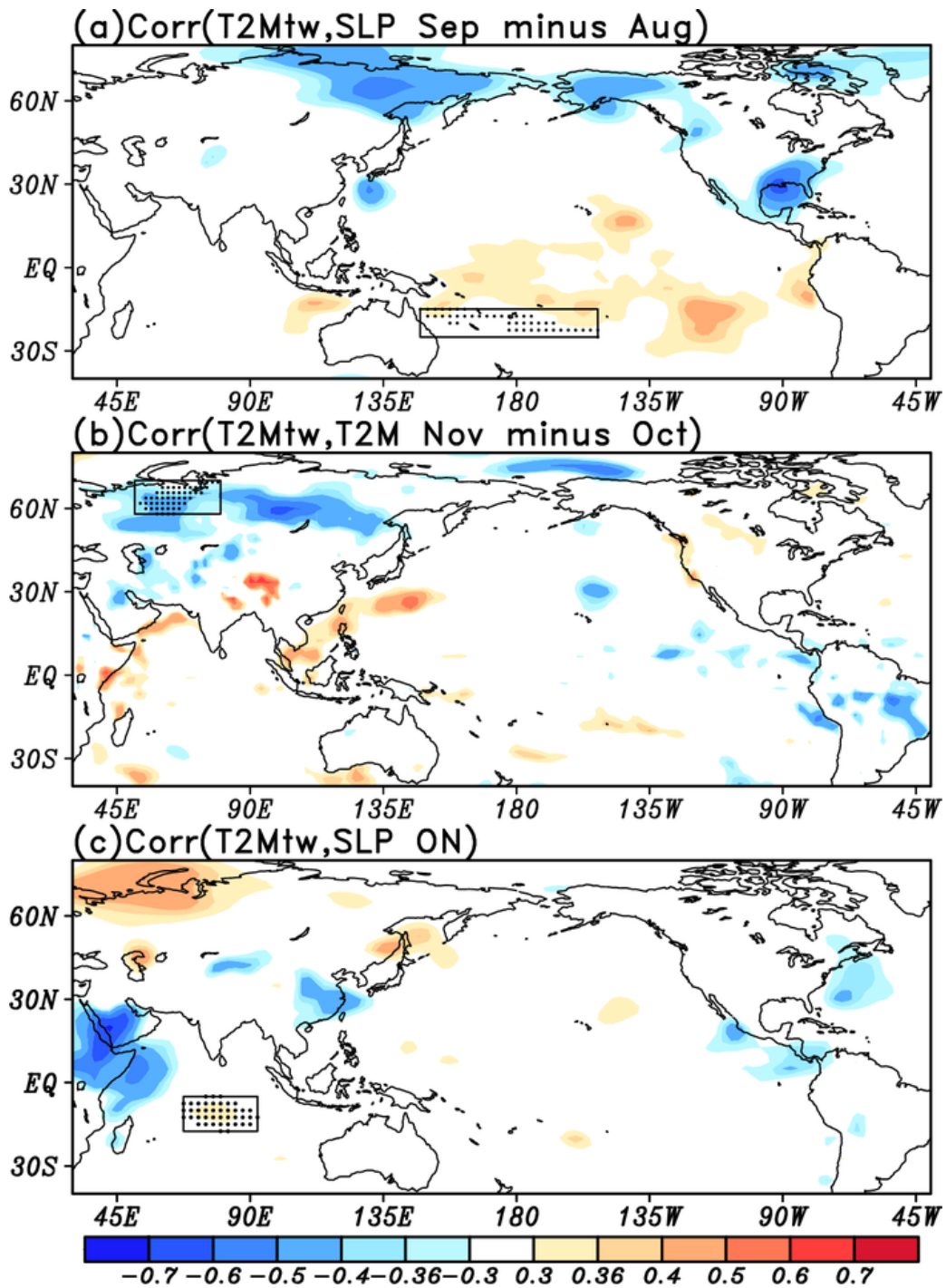


圖 5 臺灣冬季溫度指數 T2Mtw 與挑中的第二預報因子（空間範圍以黑色框線標示）在 1981–2010 期間相關係數圖，(a) 為 9 月與 8 月 SLP 差值，(b) 為 11 月與 10 月 T2M 差值，(c) 為 10 與 11 月平均 SLP。黑點標示相關係數顯著的格點。

四、回溯性（2002–2017）預報實驗

提出對實時預報作業有用的預報方法是本文的首要目標，為此本章依實時預報情境進行了 16 年的回溯性預報實驗，並用完全客

觀的方法比較統計預報模式和氣象局二步法動力預報系統（TCWB2T2）的預報結果。TCWB2T2 有非常完整的 30 年(1982–2011) 回溯性預報資料庫，實時預報的類別機率預

報分類以及預報水準評估都是以此資料庫為依據。統計預報模式在預報因子挑選程序使用了 1952–2001 年共 50 年的資料，而作業性預報的標準程序是以 30 年觀測資料為氣候基期或模式訓練期，每 10 年更新一次基期。回溯預報實驗以 1972–2001 年為 P-E 預報模

式訓練期，2002–2017 年為預報期，年份的決定乃是經過綜合考慮可用的 TCWB2T2 預報資料長度和 P-E 預報模式建模需要，雖然 16 年回溯預報資料仍不足以判斷模式表現，但可以呈現模式預報技術的評比方法與結果。

表 4 根據 NCEP CFSv2 分析場 T2M 定義的臺灣冬季溫度指數 T2Mtw 和根據臺灣 13 個平地測站定義的臺灣測站指數 WTMP 分別以各自 1982–2011 年資料定出三分類門檻值並運用到 2012–2017 年資料的分類對照表，上半部份顯示兩種指數判定的冬季溫度類別相同，下半部分顯示兩種指數判定的冬季類別不同。三分類的”BN”表示”Below Normal”（低於正常）類別，”NO”表示”Normal”（正常）類別，”AN”表示”Above Normal”（高於正常）”類別。

台灣測站指數 (WTMP) 與 NCEP 分析場指數 (T2Mtw) 類別相同				
		<i>T2Mtw</i>		
		BN	NO	AN
<i>WTMP</i>	BN	1982,1983,1984,1985, 1986,1989,1992,1996, 2011,2014		
	NO		1994,1995,2000,2004, 2005,2006,2008	
	AN			1988,1998,1999,2001, 2003,2007,2009,2010, 2013,2017
台灣測站指數 (WTMP) 與 NCEP 分析場指數 (T2Mtw) 類別不同				
		<i>T2Mtw</i>		
		BN	NO	AN
<i>WTMP</i>	BN		1997,2012	
	NO	1987,2015		1993,2002,2016
	AN		1990,1991	

統計和動力模式的預報對象 (T2Mtw) 觀測值都是以 NCEP CFSv2 的 T2M 資料為準，為考慮一般使用者可能是以測站觀測資料定準，因此也納入以臺灣 13 個平地站計算的 WTMP 指數一併檢視，也可以 T2Mtw 代表完美模式的預報結果而以 WTMP 代表在臺灣的實測溫度。預報校驗以三等分類別預報的命中率評比，T2Mtw 和 WTMP 分別根據 1982–2011 年的格點和測站氣候資料定出三分類門檻值，依此門檻判定的 1982–2017 年冬季的類別歸屬顯示在表 4，結果顯示 36 年當中有 9 年兩個指數判斷的類別不

一致，表示即使用完美的動力模式預測結果仍然不會完全與測站觀測結果相同，這些不一致都發生在格點或測站資料屬於正常類別的年份，可能反映出全球動力預報模式產出的臺灣附近分析場資料不能掌握沒有可預報性的雜訊 (noise) 的變化。根據 T2Mtw 和 WTMP 的類別差異估算，臺灣冬季溫度季預報的三分類命中率上限約在 75%。為了客觀評比統計和動力預報模式的預報類別，統計預報模式的預報分類有調校至根據 1982–2011 年預報資料定出的門檻值，使觀測值和預報值根據的分類基期相同。

表 5 統計預報模式 (Statistical) 和動力預報模式 (Dynamical) 在 2002–2017 年回溯預報表現較優的單一模式和組合對照表。呈現的統計預報模式有 B、D 和 B、D、E 的系集平均 (模式代號與說明見表 3)，動力預報模式有以氣象局最佳化全球預報海溫 (OPGSST2) 組合的系集平均 (OPGSST_ens) 和氣象局全球大氣和 NCEP 預報海溫的系集平均預報 (CWBGAM+CFS2SST)。預報模式 (Forecast Model) 欄右邊第一欄是對 T2Mtw 指數校驗的命中年數 (百分比)，第二欄是對 T2Mtw 指數校驗的 Gerrity Skill Score (GSS) 代表分類預報的預報技術得分，第三欄是對 WTMP 指數校驗的命中年數 (百分比)，第四欄是對 WTMP 指數校驗的 GSS 得分。T2Mtw 為 NCEP 分析場指數，WTMP 為台灣測站指數，詳細說明請閱內文。

Forecast Model		Hit # (%) T2Mtw	GSS T2Mtw	Hit # (%) WTMP	GSS WTMP
<i>Statistical</i>	B	10 (59)	0.53	11 (65)	0.74
	D	11 (65)	0.57	8 (47)	0.33
	BDE	11 (65)	0.61	9 (53)	0.4
<i>Dynamical</i>	OPGSST_ens	10 (59)	0.42	10 (59)	0.47
	CWBGAM+CFS2SST	8 (47)	0.26	10 (59)	0.45

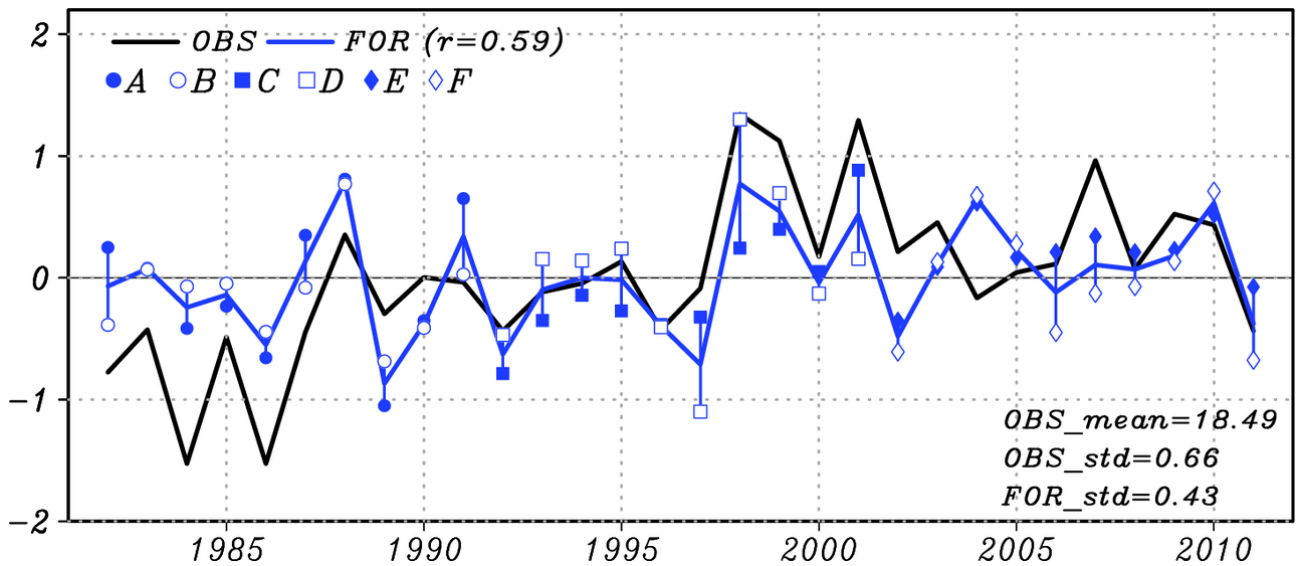


圖 6 分 3 段時期 (1952–1981, 1962–1991, 1972–2001) 訓練，每段時期建立 2 個預報模式 (表 3) 的 10 年 (1982–1991, 1992–2001, 2002–2011) 預報平均距平值以藍線表示，預報模式的代號 (表 3) 與符號標示在圖左上角。黑線為分析場 (T2Mtw) 的相對於 30 年 (1982–2011) 氣候平均的距平值，氣候平均溫度 (18.49°C) 以及觀測與預報資料的 1982–2011 年標準差標示在圖右下角。

統計預報除了運用單一模式 (模式 A-F, 詳見表 3) 預報也嘗試了各種模式的組合預報 (預報之後再平均)，結果顯示預報命中率最高 (65%) 的是對 T2Mtw 校驗的模式 D，模式 A 與 F 的預報命中率最低 (47%)，以 WTMP 或 T2Mtw 作為校驗對象的預報命中率結果差異不大，因此預報命中率的高下與模式的預報能力關係較大。動力模式的預報結果也分別檢視了單一模式的組合和不同模式的組合，由於 TCWB2T2 的預報工具是由兩種全球大氣預報模式 (CWBGAM、ECHAM5) 搭配兩種全球海溫預報 (CWB/OPGSST2、NCEP/CFS2SST) 組成的，單一模式組合乃指一種大氣預報模式配一種全球海溫預報 (例: CWBGAM+OPGSST2)，兩個大氣模式和兩組預報海溫共組出四種單

一模式組合，預報表現校驗則檢視了單一模式組合和依照大氣模式或預報海溫分類的兩兩模式組合的平均預報和四種模式組合的多模式多組預報平均，這些平均預報值以「系集」預報表示，例如「OPGSST 系集預報」意指以 CWBGAM + OPGSST2 和 ECHAM5 + OPGSST2 兩種組合產出的預報的平均。每一種動力模式的組合有 30 組預報，動力模式產出的預報資訊的豐富性非統計預報模式能比，動力預報模式可提供三分類機率預報產品但 P-E 預報方法不能產出類別機率預報產品。

表 5 整理了統計預報模式和動力預報模式的 2002–2017 年預報結果較優的單一模式和組合，P-E 預報模式 B、D 和 B、D、E 的系集平均表現優於其他結果，因此剔除了

SLP_NP_11m9(圖 4g-1)和 SLP_SP_9m8(圖 5a) 兩個預報因子。而動力預報模式以使用 OPGSST2 預報海溫的系集平均預報結果表現最佳，氣象局全球大氣和 NCEP 預報海溫的系集平均預報在以 T2Mtw 校驗結果略遜於前者，但以 WTMP 校驗則二者不分軒輊。單一模式的預報結果在 P-E 預報模式方面以模式 D 預報 T2Mtw 和模式 B 預報 WTMP 的表現最佳，16 年中命中 11 年(命中率 65%)，

動力模式則以氣象局 OPGSST2 系集平均命中 10 年最佳，氣象局全球大氣預報模式和 NCEP 的 CFS2SST 組合預報結果用 WTMP 校驗也有 10 年預報類別命中。若以 Gerrity Skill Score (GSS, 詳見 <http://www.bom.gov.au/wmo/lrfvs/gerrity.shtml>) 預報得分來看以統計模式 B 預報 WTMP 的得分最高，模式 B、D、E 系集平均預報 T2Mtw 次之。

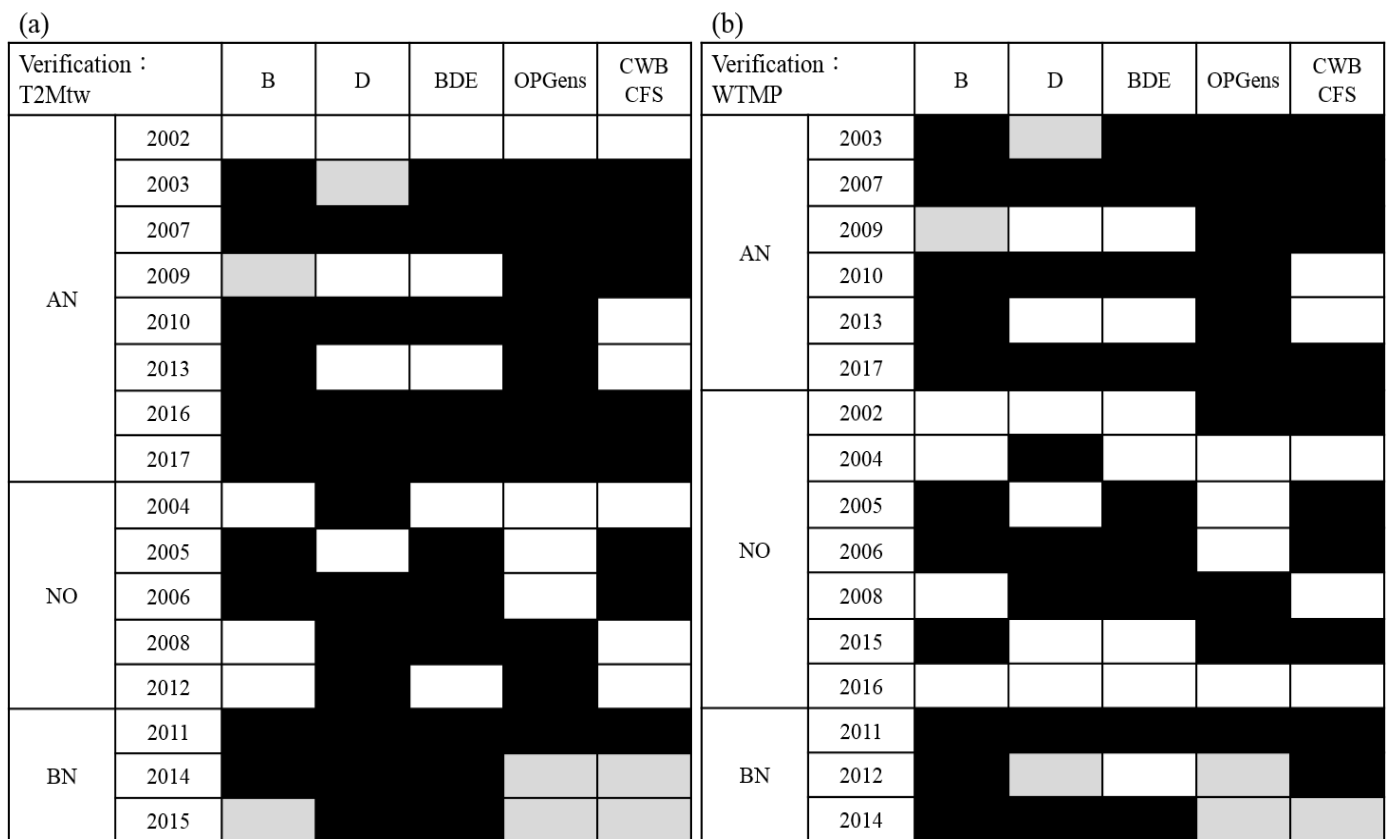


圖 7 2002–2017 年回溯預報實驗表現較佳的 P-E 與動力模式，預報結果校驗對象為 (a) T2Mtw, (b) WTMP 的三分類類別預報，分類門檻值比照以 1982–2011 年判斷的門檻值。預報類別命中者以黑色網底表示，校驗類別為 AN (Above Normal) 或 BN (Below Normal) 但預報為 NO (Normal) 的部分以灰色網底表示。

各模式與系集平均預報的命中年顯示在圖 7，完全命中的年份以黑色網底表示，實際值為偏高或偏低類別但預報正常類別的年份

以灰色網底表示。表 4 已整理了 T2Mtw 和 WTMP 判定的臺灣冬季溫度類別的差異，圖 7 更清楚看到以 T2Mtw 判斷在 2002–2017 期

間有 3 個冬季偏冷、5 個正常年及 8 個偏暖，而以 WTMP 判斷在同一期間也是有 3 個冬季偏冷，但有 7 個正常、6 個偏暖，並且 3 個偏冷年當中有 1 年 T2Mtw 和 WTMP 的結果不同。2011 年和 2015 年冬季兩個指數都判斷偏冷，P-E 預報模式在這兩年預報表現優於動力模式；偏暖年方面兩個指標判斷相同的有 2003、2007、2009、2010、2013、2017，OPGSST2 系集平均預報全部命中，CWBGAM + CFS2SST 有兩年（2010,2013）預報錯誤，而 P-E 預報模式的模式 B 預報也幾乎完全命中這些偏暖年，但模式 D 和 BDE 系集平均在 2009、2013 都預報錯誤。

回溯預報實驗結果顯示本文提出的統計預報模式（B、D、BDE）可產出有用的預報資訊，本節的預報技術評比方式可作為未來在 P-E 預報模式預報表現的基準上選擇適合預報臺灣冬季溫度的季度氣候預報模式的範例。接下來將運用 P-E 預報模式以大氣下邊界的氣溫和海平面氣壓為預報因子的優點討論臺灣冬季溫度變化的可預報度來源。

五、可預報度歸因分析

預報驗證結果證明可以用選出的預報因子作為預測臺灣冬季溫度的解釋變數（explanatory variables）建立有實際應用價值的預報模式。選出的預報因子分散在四個區域並且各有可關聯的大尺度氣候變化特徵，赤道東太平洋秋季海表面溫度 SST_EP_ASO 和熱帶印度洋晚秋海平面氣壓 SLP_IO_ON 位在 ENSO 的主要影響區內，與歐亞大陸高

緯度區域秋冬季節變化相關的 T2M_UR_11m10 與 T2M_UR_11m9 位在大西洋與北極海及歐亞大陸遙相關波列各關鍵區（Lu and Chang 2009, Chang and Lu 2012），臺灣附近秋冬季節的 SST 變化 SST_TW_11m9 位在以阿留申低壓在西太平洋變異為中心的西太平洋經向模態的關鍵區域（Lu et al. 2016）。季節預報的可預報度來源（predictability sources）來自於延長大氣「記憶」的機制，主要有變化較緩慢的大氣下墊面溫度或溼度特性，海氣偶合的長時間尺度（生命期長於 90 天）氣候變異模態，以及外作用力強迫（Chapter 4 in National Academies of Sciences 2016a）。統計預報模式因受觀測資料數量的限制，無法運用外作用力強迫機制建模，因此僅能從前兩項物理基礎推測為何能藉這些預報因子有效預測臺灣冬季溫度的年際變化。深入的歸因研究必須用氣候模式進行數值實驗，因已超出本文的研究範圍不多做討論。

影響東亞冬季溫度主要有四種主要氣候變異遙相關模態（Lim and Kim 2013）：北極振盪（Arctic Oscillation; AO）、東大西洋與西俄羅斯（East Atlantic/West Russia; EA/WR）、西太平洋（West Pacific; WP）和聖嬰現象（ENSO），但四種型態對於東亞不同區域的影響權重沒有明顯規律。Lim and Kim（2013）用四個比較特別的冬季（1998,2010,2011,2012）說明各遙相關模態的影響。1998 與 2010 年的冬季氣候狀態都是聖嬰正相位（El Niño）與 AO 負相位，1998

年的 El Niño 為超強而 2010 年的 AO 負相位也是超強，這兩年的東亞溫度型態在 50°N 以北的區域表現出 AO 負相位的影響氣溫偏低，而 50°N 以南的區域看到 El Niño 的影響氣溫偏高。2011 與 2012 年的冬季氣候狀態都屬於聖嬰負相位 (La Niña) 但強度為中等，AO 在這兩個冬季有明顯季內尺度的震盪，但 2011 年四個遙相關型態在東亞表現的溫度特徵類似，因此較 2012 年來說是比較容易預測的季節。從東亞冬季溫度對四個遙相關型態的迴歸 (Figure 4 in Lim and Kim 2013) 可見台灣冬季溫度年際變化與 WP 的關係最強，與 EA/WR 的關係次之，這兩個型態對臺灣附近冬季溫度的影響都勝於 AO 和 ENSO 型態的影響。本文圖 3 顯示臺灣冬季溫度和東亞與西北太平洋 50°N 以南的近地表氣溫有顯著正相關的關係，而和 50°N 以北是負相關的關係，並且氣壓場和低層風場都顯示東亞與西北太平洋在 50°N 以南和以北有反相位的關係，這與 WP 遙相關型態的特徵相符。EA/WR 遙相關型態 (Figure 1B in Lim and Kim 2013) 的正相位特徵為 40°N 以北有西歐和蒙古為高壓，但東歐與西伯利亞中部烏拉爾山附近為低壓的負-正-負 (250 hPa 高度場) 的遙相關關係，在本文圖 3 的歐亞大陸高緯度區域也可看到低層溫度場和高層遙相關型態的關聯，圖 3a,b 的風場和氣壓場顯示在 60°E 以西 60°N 附近有高壓脊並在高壓脊的兩側有低壓型態，圖 3c 顯示該區的高壓脊相關型態轉變為低壓 (50°N-60°N, 40°E-90°E)，這個區域和 Lim and Kim (2013) 指出的

EA/WR 遙相關型態的中心位置相當接近。AO 和 ENSO 型態的空間尺度遠大於其他兩個型態，更遠遠大於臺灣的尺度，雖然臺灣並不處於這兩個型態的主要影響區域內，但不表示不受影響。

ENSO 是地球氣候系統最明顯的季節至年際尺度變化型態，往往在秋季已發展成形冬季達到高峰，SST_EP_ASO 被選中作為預報因子並通過檢驗證明有預報價值，表示 ENSO 仍是臺灣冬季季節預報的主要可預報度來源。T2M_UR_11m10 與 T2M_UR_11m9 是與 ENSO 不相關的預報因子，其可預報度來源可以 EA/WR 遙相關型態對東亞冬季溫度年際變化的影響解釋。Barnston and Livezey (1987) 分析 700 hPa 重力位高度場的遙相關型態指出 EA/WR 有四個變異中心，除了前述的三個中心以外在北大西洋中部 (40°N-50°N) 還有一個變異中心，這個中心位置重力位高度場變異和裏海北方烏拉爾山附近的高度場變異呈相同相位的變化，學者認為 EA/WR 的激發與維持機制和大西洋海溫變異與北大西洋駐波及風暴路徑有關 (Wang et al. 2011, Bueh and Nakamura 2007)。圖 3c 與 4c 顯示臺灣冬季溫度與秋季和冬季北大西洋海溫有顯著正相關的關係，Lu et al. (2016) 發現臺灣冬季溫度的年代際變化與北大西洋 SST 的多年代變化 (Atlantic Multi-decadal Oscillation; AMO) 有顯著正相關的關係。T2M_UR_11m10 與 T2M_UR_11m9 能作為臺灣冬季溫度的預報因子，其可預報度來源可能是自從秋季持續至冬季的北大西洋 SST 變

化，若北大西洋中部 SST 偏暖（SLP 偏低），烏拉爾山附近 SLP 有較大偏低機會，表示該區域在秋冬轉換期氣溫變化幅度可能較氣候平均值偏小，依此可預測臺灣冬季傾向偏暖，這個推測可從圖 4c 顯示的 T2M_{tw} 與秋季 SST 在大西洋上有顯著正相關的關係獲得支持。

位於臺灣附近的預報因子 SST_{TW_11m9} 的可預報度來源可根據 WP 遙相關型態對東亞與西北太平洋冬季溫度的影響來理解。台灣冬季溫度變化以及東亞冬季季風的強度深受阿留申低壓的位置和強度影響（李與盧 2014, Wang and Chen 2014），WP 是阿留申低壓中心位置偏移特徵在西北太平洋最主要的經向模態（Wallace and Gutzler 1981, Hsu and Wallace 1985, Barnston and Livezey 1987），然而 WP 沒有固定的時間尺度，熱帶西太平洋暖池的海溫變異可激發緩慢變化的 WP 遙相關模態（Di Lorenzo et al. 2010, Park et al. 2012），影響冬季季風在 50°N 以南東亞沿海區域的強度，圖 4c 顯示的 T2M_{tw} 與秋季 SST 在熱帶西太平洋有顯著正相關以及圖 5b 顯示在南海與菲律賓海上 10 至 11 月的海溫下降幅度有顯著正相關的關係都有支持 WP 正相位（西北太平洋副高偏強）偏強臺灣冬季溫度偏暖的情境。預報因子 SLP_{IO_ON} 和 ENSO 海表面溫度變化顯著相關，與預報因子 SST_{EP_ASO} 在 1971–2000 年期間相關係數有 0.67，可預報度來源是 ENSO。總言之，預報因子和影響模態的相互對應可整理為（SST_{TW_11m9},

SLP_{IO_ON}, SST_{EP_ASO}, T2M_{UR_11m10}, T2M_{UR_11m9}）與（WP, ENSO, ENSO, ER/WR, ER/WR）的對應。

六、結論與建議

本文用 NCEP/NCAR 和 NCEP CFSv2 分析場的地表上 2 公尺氣溫（T2M）在臺灣周圍區域（20°N-27.5°N, 117.5°E -125°E）的冬季平均值（T2M_{tw}）作為預報對象，依照有物理根據的統計（P-E）預報模式的理念在全球格點資料的三個變數（SST、T2M、SLP）當中挑選預報因子，成功建立了預報模式。根據 2002–2017 年冬季回溯預報實驗結果，發現 2 個 P-E 預報模式（模式 B、D）的個別預報和以 3 個 P-E 預報模式（模式 B、D、E）的系集平均表現較佳。若以 P-E 預報模式作為門檻檢視氣象局月與季預報系統 TCWB2T2 的預報表現，發現用 OPGSST2 作為預報海溫的系集預報表現最佳，其次為用氣象局全球大氣預報模式搭配美國氣象局 NCEP/CFSv2 預報海溫，預報水準和 P-E 預報模式類似。

P-E 預報模式的預報因子隱含了大尺度氣候變化對臺灣氣候影響的關鍵資訊，預報實證數據是預報因子對預報對象解釋能力的重要指引。本文提出分散在四個不同區域的 5 個預報因子，根據這些預報因子和大尺度氣候的關聯在第五章討論了可預報度來源的歸因分析，認為臺灣冬季溫度年際變化的可預報度來源在於太平洋與大西洋海溫變異對 ENSO、EA/WR、WP 遙相關模態的影響。本

文提出的分析結果是根據預報實證和前人研究做出的推測，未來將循此線索運用氣候模式進行數值實驗深入探討臺灣冬季氣溫年際變異的可預報度和影響機制。

本研究的結果一方面可應用在作業性預報實務，另一方面可作為預報業務單位挑選動力預報模式的評比參考。近年來從網路上即可獲得的預報產品越來越多，NOAA 支持的 the North American Multi-Model Ensemble (NMME) 計畫 (Kirtman et al. 2014, Becker and van den Dool 2016) 和韓國 APEC (Asia-Pacific Economic Cooperation) Climate Center 支持的 MME Prediction 計畫 (Min et al. 2017) 都提供了大量的模式產品供預報研究者使用。建議未來可多多運用全球預報模式產品，針對臺灣關心的預報問題，了解模式的預報能力和大尺度氣候變化對臺灣的影響。

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

- 李思瑩、盧孟明, 2014: 冬季東亞季風與台灣氣候即時監測分析: 2010-2013 年實例。 *大氣科學*, **42**, 87-112。
- 卓盈旻、盧孟明, 2017: 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。 *大氣科學*, **45**, 83-100。
- 胡志文、蕭志惠、童雅卿、任俊儒、鄭凱傑、

黃文豪、施宇晴、施景峰、莊穎叡、賈愛玫, 2008: 中央氣象局動力統計氣候預報系統簡介。天氣分析與預報研討會論文彙編, 253-258。

胡志文、黃文豪、鄭凱傑、施宇晴、李清騰, 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論文彙編, A3-01。

Barnston, A. G., and R. E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1083–1126.

Becker E., and H. van den Dool, 2015: Probabilistic seasonal forecasts in the North American multimodel ensemble: a baseline skill assessment. *J. Climate*, **29**, 3015-3026. doi:10.1175/JCLI-D-14-00862.1

Bueh C., and H. Nakamura, 2007: Scandinavian pattern and its climate impact. *Quart J Royal Meteor Sci* 133: 2117-2131.

Cassou, C., Y. Kushnir, E. Hawkins, A. Pirani, F. Kucharski, I. Kang, and N. Caltabiano, 2017: Decadal Climate Variability and Predictability: Challenges and opportunities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* doi:10.1175/BAMS-D-16-0286.1, in press.

Chang, C.-P. and M.-M. Lu, 2012: Intraseasonal Predictability of Siberian High and East Asian Winter Monsoon in Recent Decades, *J. Climate*, **25**, 1773-1778。

Di Lorenzo, E., K. M. Cobb, J. C. Furtado, N. Schneider, B. T. Anderson, A. Braccor, M. A. Alexander, and D. J. Vimont, 2010:

- Central Pacific El Nino and decadal climate change in the North Pacific Ocean. *Nat Geosci* 3:762–765
- Hsu, H.-H., and J. M. Wallace, 1985: Vertical structure of wintertime teleconnection patterns. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1693–1710.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437–471.
- Kirtman B. P., and Coauthors, 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: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00050.1>
- Lim, Y.-K., and H.-D. Kim, 2013: Impact of the dominant large-scale teleconnections on winter temperature variability over East Asia, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 7835–7848, doi:10.1002/jgrd.50462.
- Lu, M.-M. and C.-P. Chang, 2009: Unusual Late-Season Cold Surges during the 2005 Asian Winter Monsoon: Roles of Atlantic Blocking and Central Asian Anticyclone. *J. Climate*, **22**, 5205–5217.
- Lu M.-M., P.-S. Chu, and Y.-C. Lin, 2010: Seasonal Prediction of Tropical Cyclone Activity in the Vicinity of Taiwan Using the Bayesian Multivariate Regression Method. *Weather and Forecasting* **25**: 1780-1795. DOI: 10.1175/2010WAF2222408.1.
- 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 DOI:10.1002/joc.3634.
- Lu, M.-M., Y.-M. Cho, Y.-C. Lin, and N. Huang, 2016: The influence of Atlantic and Pacific multidecadal variability on Taiwan winter temperature centennial trend during the period 1911-2010. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, DOI: 10.3319/TAO.2016.06.30.02
- Lu M.-M., C.-T. Lee, and B. Wang, 2017: Predictability of late-season tropical cyclone accumulated kinetic energy around Taiwan two months ahead. *Int. J. Climatol.* **33**: 2846-2854 Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.5307
- Luo, X. and B. Wang, 2016: How predictable is the winter extremely cold days over temperate East Asia? *Clim. Dyn.* DOI 10.1007/s00382-016-3222-4
- Michaelsen, J., 1987: Cross-validation in statistical climate forecast models. *J Climate Appl Meteorol* **26**:1589–1600
- Min, Y.-M., V. N. Kryjov, S. M. Oh, and H.-J. Lee, 2017: Skill of real-time operational forecasts with the APCC multi-model ensemble prediction system during the period 2008–2015. *Clim. Dyn.*, **49**:11-12, 4141-4156.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016a: Next Generation Earth System Prediction: Strategies for Subseasonal to Seasonal Forecasts. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/21873.

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016b: Frontiers in Decadal Climate Variability: Proceedings of a Workshop. Washington, DC: National Academies Press. DOI: 10.17226/23552.
- Park, J.-Y., S.-W. Yeh, and J.-S. Kug, 2012: Revisited relationship between tropical and North Pacific sea surface temperature variations. *Geophysical Research Letters* **39**:2, n/a-n/a.
- 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.
- Vitart, F., A. W. Robertson, and S2S Steering Group, 2015: Sub-seasonal to seasonal prediction: Linking weather and climate. Seamless Prediction of the Earth System: From Minutes to Months, G. Brunet, S. Jones, and P. M. Ruti, Eds., WMO-1156, World Meteorological Organization, 385–401. [Available online at http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1156_en.pdf.]
- Vitart, F., and Coauthors, 2017: The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0017.1>
- Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784–812.
- Wang L., and W. Chen, 2014: An Intensity Index for the East Asia winter monsoon. *J. Climate*, **27**:2361–2374
- Wang B., Z. Wu, C.-P. Chang, J. Liu, J. Li, and T. Zhou, 2010: Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: the northern and southern temperature modes. *J. Climate*, **23**:1495–1512
- Wang B., B. Xiang, J. Li, P. J. Webster, M. N. Rajeevan, J. Liu, and K. J. Ha, 2015: Rethinking Indian monsoon rainfall prediction in the context of recent global warming, *Nature Communications* 6: 7154 doi:10.1038/ncomms8154.
- Wang X., C. Wang, W. Zhou, D. Wang, and J. Song, 2011: Teleconnected influence of North Atlantic sea surface temperature on the El Niño onset. *Clim Dyn.*, **37**: 663–676 DOI:10.1007/s00382-010-0833-z
- WMO. 2012. Subseasonal to Seasonal Prediction Research Implementation Plan. Geneva: World Meteorological Organization. Available at https://library.wmo.int/pmb_ged/subseasonal_to_seasonal_prediction-research_implementation_plan_2012.pdf
- 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.

Statistical prediction models for Taiwan winter temperature seasonal forecast and possible predictability sources

Szu-Ying Lee^{1,2} Mong-Ming Lu^{1,2*}

¹*Research and Development Center, Central Weather Bureau, Taiwan*

²*International Integrated Systems, Inc., Taiwan*

(manuscript received 29 January 2018 ; in final form 09 July 2018)

Abstract

This paper presents a physically motivated empirical model (P-E model) for predicting Taiwan winter seasonal temperature with 0.5 month prediction lead time. The predictors are selected from three variables of global grid climate data, namely, sea surface temperatures, 2-meter air temperature, and sea level pressure. The predictor selection procedure is designed for reducing the influence of decadal-scale climate variability on the prediction performance. Through a retrospective forecast experiment, three P-E models with the best performance are selected to compare with the forecast skill of CWB 2-tiered monthly and seasonal dynamical forecast system TCWB2T2. The hit rate and Gerrity Skill Score are used as a baseline for evaluating the forecast performance. The procedure can actually be applied to any other seasonal forecast model for improving Taiwan winter temperature forecast. Through examining the relationship between the predictors and the influential large-scale teleconnection patterns to East Asian winter monsoon, we found the predictability sources of Taiwan winter temperature may have their root in SST anomaly over North Atlantic and Pacific through the teleconnection patterns, in particular ENSO, EA/WR and WP triggered by the anomalous SST. More studies are needed to evaluate the speculation.

Keywords: East Asian winter monsoon, seasonal climate forecast, Taiwan climate

doi: 10.3966/025400022018064602001

**Corresponding author: Dr. Mong-Ming Lu, Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan (R.O.C) mailto: mongminglu@gmail.com*