

臺灣上空大氣溫度垂直結構的季節性變化 及與亞澳季風系統的聯結

李洋¹³ 盧孟明^{2*} 林博雄¹

國立臺灣大學大氣科學系¹

國立臺灣大學理學院大氣資源與災害研究中心²

交通部中央氣象署大氣觀測組³

(中華民國 114 年 6 月 13 日收稿；中華民國 115 年 4 月 27 日定稿)

摘 要

本文使用 30 年 (1991~2020) ERA5 氣候平均場，透過 K-means 分群法與集群指數 CI 決定最佳群數，分析臺灣 (120°E–122.5°E, 22.5°N–25°N) 與亞澳季風區 (40°E–180°E, 35°S–35°N) 上空大氣溫度垂直剖面季節循環特徵及臺灣與季風區季節性變化關聯。結果發現臺灣每日氣候平均溫度垂直剖面可分為 6 群，各群的日期集聚在冬季、後冬、春季、梅雨季、夏季、秋季及前冬等七段時間，以此定為自然季節。接著對亞澳季風區內由 365 天與 37 層組成的年度溫度垂直剖面季節循環矩陣圖進行分類，總共 1,537 個格點的矩陣圖可分為南半球中緯度、南半球副熱帶、赤道熱帶 (約 10°S–7°N)、北半球外熱帶 (約 7°N–15°N)、北半球副熱帶 (約 15°N–25°N) 及北半球中緯度 (25°N 以北) 等六類。臺灣位在北半球外熱帶與北半球副熱帶交界處，年度溫度垂直剖面季節循環特徵在秋季與北半球副熱帶相似性較高，其他季節則較接近外熱帶類別。

所提出的運用從地表至平流層頂之逐日氣候平均與年平均溫度差的溫度垂直剖面辨識季節循環特徵方法，是了解臺灣氣候季節性變化的新視角；依此判斷的自然季節清楚呈現臺灣與亞澳季風區的季節性關聯，大幅拓展了僅仰賴地面資料且受制於月、旬、候等時間劃分的傳統作法，有助於了解臺灣氣候與大氣環流的季節性變化與變異。

關鍵字：臺灣氣候、季節循環、亞澳季風系統、整層大氣溫度、氣候溫度垂直剖面

*通訊作者：盧孟明 (mongminglu@gmail.com ; mongminglu@ntu.edu.tw)

一、前言

臺灣位於東亞季風區，季節性氣候變化受季風環流與地形控制（王時鼎等 1984，吳與陳 1993，Chen and Yen 1999，Chen and Chen 2003）。冬季（12 月至 2 月）東北季風帶來北方陸上較冷空氣和海上水氣，在東北部與北部沿海地區形成穩定的降水。春季（3 月至 5 月）為過渡季節，鋒面活動頻繁，氣溫回升並伴隨對流降水。夏季（6 月至 9 月）受到熱帶西南季風與颱風影響，容易出現高溫與午後雷陣雨和強降水等劇烈天氣。秋季（10 月至 11 月）則是季風轉換期，氣溫逐步下降，中南部降水減少。以往研究臺灣季節和氣候分區主要依據降水與溫度特徵劃分，例如吳與陳（1993）運用群聚分析法分析十六個氣象測站 1942-1991 年各月平均氣溫和降水資料發現臺灣氣候分區可分為北部（臺北、新竹、彭佳嶼），北海岸（基隆），東北部（宜蘭），中部（臺中、日月潭），西南部（澎湖、臺南、高雄），東部（花蓮、成功、臺東、大武壠春），及山地（阿里山）等七種類型，他們根據測站資料特性判斷出大尺度環流及擾動的季節變化受中央山脈地形影響在各區的不同反應。冬季在北部與東北部受東北季風與地形抬升影響降水較多，而中南部則受地形屏蔽影響相對乾燥；

夏季受西南季風影響，全臺高溫，北部略高於南部，阿里山山區降水最多，南部（高雄、屏東）地區雨量增加，這些特徵在之後研究（Chen and Yen 1999，Chen and Chen 2003）獲得更多資料的支持與分析。

雖然臺灣本島氣候有明顯的區域性差異，但總體而言氣溫年循環大致分為冬、夏兩型而雨量分為豐、枯兩期（盧與劉 2017，李庭慧等 2018）。李庭慧等（2018）以日均溫資料經過長周期濾波（去除半年以下波動）後，把平均溫度最暖連續 90 天定義為夏季；反之定義成冬季，研究發現不管在百年或 50 年趨勢上，夏季有延長；而冬季有縮短的趨勢。盧與劉（2017）使用臺灣測站資料從季風觀點判斷臺灣的豐雨期與枯雨期，發現臺灣及周圍區域降雨特徵與大尺度氣候季節變化可按豐雨期的開始和結束時期各分三個階段解析，如此可依據從印尼往南太平洋中部延伸的南太平洋輻合帶（SPCZ）以及北太平洋近赤道的熱帶輻合帶（ITCZ）的主要對流區移動規律定出臺灣年雨型以及豐雨期季節性變化的重要特徵。由於臺灣氣候的季節性大氣熱力及動力特徵深受亞澳季風系統的季風循環影響，依照熱帶對流和季風環流的變化特徵分析臺灣的季節變化對於了解臺灣本土與亞澳季風區氣候皆具重要意義。

本文將從另一個角度，依據臺灣上空大氣溫度和風向垂直剖面季節變化分析紀錄臺灣氣候與亞澳季風系統的關係。臺灣的陡峭地形和優質地面測站構成相當獨特的氣象觀測條件。地面測站提供的氣象要素紀錄若按測站高度排列，可作為探空之外了解臺灣及周圍區域氣象要素垂直剖面結構的重要輔助（Chen and Yen 1999）。然而據作者所知，關於臺灣上空大氣溫度和風向垂直結構與大尺度氣候關係的研究文獻至今仍不多見。王時鼎等（1984）利用 700 hPa、500 hPa、300 hPa 與 100 hPa 的高度場與溫度場變化，探討臺灣不同季節的大氣環流特徵。他們發現，高空環流的季節轉變在 500 hPa 與 300 hPa 層尤為顯著，特別是在東亞地區的西風噴流位置變化與波動強度，能有效指標化四季的轉換。冬季（12 月至 2 月）時東亞地區的高空噴流南移，500 hPa 與 300 hPa 的冷氣團勢力增強，並伴隨較深的長波槽。春季（3 月至 5 月）高空噴流北移，西風環流減弱，並開始出現不穩定波動，使得鋒面活動頻繁。夏季（6 月至 9 月）副熱帶高空噴流逐漸西移青藏高原北方位置，副熱帶高壓系統也隨著夏季熱帶對流加強而增強與北移；臺灣位在高壓邊緣，受到低層西南氣流傳送來的暖濕空氣和地形抬升作用的影響午後對流活動頻繁。秋季（10 月至 11 月）

為過渡季節，鋒面系統活躍度降低，並逐漸向冬季型態轉變。劉廣英等（1986）進一步透過合成分析方法針對臺灣地區 26 年（1956-1981）的探空資料分析臺灣地區垂直向氣象因子的變化，發現臺灣地區的垂直剖面有明顯的年循環特徵，並且臺灣的平均大氣剖面曲線和極區與熱帶明顯不同。臺灣的對流層頂高度較標準大氣偏高，對流層內的垂直溫度遞減率也較高，平流層內的垂直溫度遞增率也是較高，可見溫度垂直梯度、重力位高度與風場結構在不同高度層的變化能更細緻地描述季節轉換的過程。他們指出 700 hPa 與 500 hPa 的溫度梯度變化可作為春夏與秋冬交替的標誌，而 100 hPa 層的平流層溫度變化與季節轉變同步，因此高空變數對於定義季節具有重要參考價值。

二十一世紀以來觀測與全球模式再分析資料不斷精進，為了解臺灣氣候變化提供了許多新的機會。本研究根據世界氣象組織（WMO）規範的 30 年（1991-2020）標準氣候（<https://www.ncei.noaa.gov/products/wmo-climate-normals>），以歐洲中期天氣預報中心第五期再分析格點資料（ECMWF Reanalysis v5（ERA5））為主體，分析臺灣上空大氣溫度與風向垂直結構的季節變化，進而分析亞澳季風區的大氣溫度結構季節變化的區域性差異以及和

臺灣氣候的關係。ERA5 資料在天氣與氣候研究和氣象監測分析及預報實務上均被廣泛使用，運用 ERA5 資料的分析結果將可作為後續相關研究的參考。

本文章節安排如下。研究使用的資料和名詞定義及分析方法在第二章說明，將臺灣上空每日大氣溫度垂直結構氣候特徵進行分類所決定的自然季節分析結果在第三章說明，第四章將亞澳季風區大氣溫度垂直結構全年變化類似區域歸類，探討臺灣自然季節和季風區域的溫度垂直結構及對流與環流的關係，第五章為全部分析結果的綜合討論與結論及未來研究展望。

二、資料與方法

(一) 觀測資料

1. ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) dataset

本研究使用的 ERA5 資料是從歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF) 透過 Copernicus Climate Change Service (哥白尼氣候變遷服務，簡稱 C3S) 提供的資料庫取得 (<https://climate.copernicus.eu>)。該數據集涵蓋自 1940 年至今的全球氣候和天氣數據，提供每小時的大氣、陸地和海洋氣候變數的估計值 (Hersbach et al. 2020)。本文使用的資料時間介於 1991 年 1 月 1

日至 2020 年 12 月 31 日；空間範圍為 40°E-180°E；35°S-40°N (包含臺灣地區)。資料具有垂直 37 個等壓層 (1000 hPa 至 1 hPa) 和 0.5°×0.5°水平空間解析度，下載的氣象變數有重力位高度 (ϕ)、溫度 (T)、風速 (u, v)、全柱水氣含量 (Total Column Water Vapor、TCWV)。大氣高度 (z , 單位: meter) 可由 ϕ 轉換求得 ($z = \frac{\phi}{g}$)， g 為重力加速度設為 9.8m/s²。溫度為絕對溫度 (單位: K)，風向以角度為單位乃根據風速資料代入公式 ($\arctan2(-u, -v) \times \frac{180}{\pi}$) 計算，風速單位為 m/s、TCWV 單位為 kg/m²。

全球流函數 (Stream function, PSI) 和速度位 (Velocity potential, CHI) 是根據各氣壓層的水平風 (u, v) 場計算，將風場轉換為 PSI 和 CHI 可清楚觀察大尺度動力系統氣候特性。

2. 全球雨量資料

本研究使用的雨量資料是美國國家海洋暨大氣管理局 (NOAA) 氣候預測中心運用 Climate Prediction Center Morphing Technique 產製的 CMORPH 全球降雨資料 (Joyce et al. 2004)。受限於衛星觀測，這組資料起始時間為 1998 年 1 月 1 日，水平解析度為 0.25°×0.25°。本文的雨量氣候值是根據 1998 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日共 23 年的每日資料計算。

3. Outgoing Longwave Radiation (OLR)

本研究使用 NOAA Interpolated Outgoing Longwave Radiation (以下稱 OLR) 研究亞澳季風區範圍內對流系統的特性，此 OLR 資料由 NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL) 提供，以 NOAA 極軌衛星每日兩次 (00 UTC、12 UTC) 的 OLR 觀測值為基礎，經時間與空間內插 (interpolation) 之後，生成解析度為 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的一筆的日平均資料，單位為 W/m^2 ，OLR 值愈高代表長波輻射較強，通常代表晴空地表溫度；OLR 值愈低代表長波輻射較弱，通常代表對流系統雲頂溫度。本文使用 1991 年 1 月 1 日到 2020 年 12 月 31 日每日資料，空間範圍為 30°E - 180°E ， 45°S - 45°N ，計算氣候平均值。

4. 中央氣象署測站觀測資料

地面測站資料使用了中央氣象署設置的臺灣本島 27 個駐人觀測站。氣象站使用的系統有數次更換，自 1986 年 9 月至 2020 年 12 月 31 日逐漸將觀測溫溼度等 11 項氣象因子由純人工轉向全自動化的觀測系統 (代號 A5)。本研究使用雨量、風向、風速資料，雨量使用日本竹田計器工業株式會社生產的型號 TK-1 0.5mm 傾斗式雨量儀測量 (單位： mm)，風向風速使用美國 R.M. YOUNG COMPANY 生產的觀測儀測量 (風向單位：度、風速單位： m/s)，時間解析度為每日一筆，使用時間區間為 1991 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日。

(二) 區域與季節定義

1. 亞澳季風區

亞洲-澳洲季風區 (Asian-Australian monsoon region) 是以經度： 40°E - 180°E ；緯度： 35°S - 35°N (圖 1 綠框) 為研究區域，

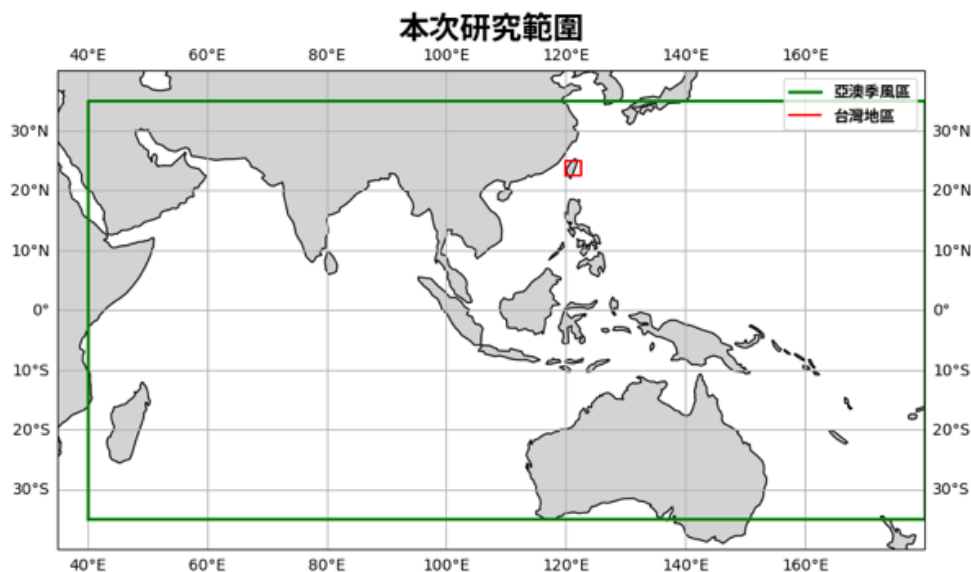


圖 1：本次研究範圍，綠框為亞澳季風區 (40°E - 180°E ; 35°N - 35°S)。紅框為臺灣地區 (120°E - 122.5°E ; 22.5°N - 25°N)。

範圍涵蓋了從澳洲北部至東南亞、南亞、東亞等廣大陸地區域和印度洋與西太平洋的海面區域。臺灣本島則以 120°E - 122.5°E , 22.5°N - 25°N 為經緯範圍 (圖 1 紅框)。

2. 自然季節

本研究的季節界定是依照 30 年(1991-2020)氣候平均大氣氣溫垂直剖面結構的相似度判斷,與依照地球與太陽運轉關係決定的四季或是從農業時代沿用至今反映日照程度的二十四節氣相比增加了對於整層大氣溫度特徵的描述。大氣溫度垂直剖面結構一方面反映近地表的季節性溫度變化,同時也呈現出氣候背景大氣穩定度,有助於了解季節性降雨特性。根據觀測資料判斷的季節通稱為自然季節 (Natural Seasons),有別於天文季節受限於日曆的規範,自然季節的判斷結果隨區域氣候特性和氣象因子改變,是客觀描述區域氣候的基礎,因此也可藉以標示不同區域的氣候差異。

3. 亞澳季風區溫度垂直結構分類

本研究的自然季節判斷分為臺灣區域和亞澳季風區兩部分。臺灣自然季節是根據臺灣小區域平均的大氣溫度垂直剖面劃分季節,而亞澳季風區(40°E - 180°E , 35°S - 35°N)共有 1537 個格點,每一格點的大氣溫度垂直剖面日氣候距平全年分佈,即為

由 365 日和 37 層構成的一張溫度距平矩陣圖,運用集群分析方法將 1537 張矩陣圖進行分類便能客觀辨識亞澳季風區季節變化類似格點的空間分佈,作為關聯臺灣自然季節和亞澳季風年循環的依據。

(三) 集群分析方法

集群分析使用 K-means 方法運算,最佳群數依據 Classifiability Index (CI) 指數決定,分析步驟說明如下。

1. K-means 分群法

K-means 是一種常用的非監督式學習演算法,主要應用於資料分群分析。其目標是將 n 個資料點分成 k 個集群 (clusters),其中 k 是使用者預先設定的參數。該演算法的核心概念在於最小化資料點與所屬集群中心 (centroid) 之間的距離平方和,若其歐基里得距離達最小則表示達到最佳的分群效果,否則繼續更新群心進行迭代計算直到資料點與所屬集群中心之間的距離達到最小。

2. 集群指數 CI

使用 CI (Classifiability Index) (Michelangeli et al. 1995, Moron et al. 2016, Roller et al. 2016)的目的為決定 K-means 的適合群數 (K)。各群的 CI 值是經由更新 N 次 K-means 隨機初始點來計算 ACC,求平均值後的結果,計算公式如下:

$$ACC (P_i, Q_i) = \frac{\sum_{n=1}^N p'_n \times q'_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (p'_n)^2 \times \sum_{n=1}^N (q'_n)^2}} \quad (1)$$

$$p'_n = p_n - \frac{\sum_{n=1}^N p_n}{N} \quad (2)$$

$$q'_n = q_n - \frac{\sum_{n=1}^N q_n}{N} \quad (3)$$

$$CI (i) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} ACC}{N-1} \quad (4)$$

其中 n 代表第 n 次更新 K-means 初始點編號。 p'_n 、 q'_n 代表在第 n 次更新時，各群中心到中心重心的歐基里德的距離(式 2、式 3)。在計算上會取第 N 次(最後一次) q'_n 為最後一次更新的各群中心到中心重心的歐基里德距離， p'_n 為第 $1-(N-1)$ 次的各群中心到中心重心的歐基里德距離。而後代入(1)式，可算出 $N-1$ 個 ACC 值，最後平均則得到 CI (分群數= k ，式 4)。若 p'_n 、 q'_n 相同，則 ACC 值會等於 1，若不相同則會小於 1。因此，當 $k=2$ 時 CI 值必定趨近 1，隨著 k 值改變 CI 值不同，最佳群數乃指隨著 k 的增加 CI 降到谷底後的高峰值，此為各分群的群心間距離最大狀態 (Moron et al. 2016, Roller et al. 2016)，並以高於隨機產生 N 組紅噪音計算的背景 CI 值的群數為最佳。

三、臺灣上空大氣溫度垂直結構季節性變化

(一) 平均垂直剖面變化特徵

臺灣區域 30 年(1991-2020 年)平均溫度的垂直剖面在一年中的變化顯示在圖

2，本文稱同一日期的 30 年平均值為該日期的氣候值，全年溫度垂直剖面的逐日變化由 365 日和 37 層構成的矩陣呈現，對全年 365 天進行平均得到的結果稱為「全年平均氣候值」(圖 2b)，每層一個數值，而日氣候值減去全年平均氣候值的結果稱為「日氣候距平」(圖 2c)。「日氣候距平」的垂直剖面圖清楚呈現臺灣上空從地面到大約 50 公里(1hPa)高度的大氣溫度季節變化的垂直特徵，看到近地表(1000hPa-850hPa)在 5 月至 9 月溫度明顯高於 11 月至 4 月，夏季比冬季溫暖的現象有向上凸起的拱形特徵，高對流層(300hPa-100hPa)溫度的夏冬對比明顯小於低層，而中低平流層(75hPa-10hPa)在 4 月至 6 月最溫暖而 12 月至 2 月最冷，靠近平流層頂(10hPa-1hPa)則看到 12 月是全年最冷月份。圖 2b 的臺灣上空大氣溫度全年平均氣候值顯示整層大氣的溫度最低點在 100hPa-70hPa 附近，反映了對流層頂的位置，自 70hPa 往上到 2hPa 是平流層大氣，溫度隨高度遞增並大約在 2hPa-1hPa 達到最高且隨高度變化不大，應是平流層頂的位置。臺灣上空大氣溫度的季節變化特徵(圖 2c)顯示在 200hPa 以下的對流層內正距平區(溫度日氣候值較全年平均氣候值高)在 5 月至 11 月而負距平區在 11 月至 4 月。高對流層和對流層頂附近(200hPa-50hPa)的溫

度季節變化有別於大氣溫度在其他氣壓層的季節變化特徵。在 200hPa -100hPa 從 1 月到 9 月雖其中有零星負距平但主要都是正距平，從 10 月到 12 月這三個月則是負距平但量值不大；在 100hPa-50hPa 對流層和平流層交界處又稱 UTLS (Upper Troposphere - Lower Stratosphere) 區域看到 7 月至 9 月有明顯的高正距平值而在 1 月下旬至 2 月有量值較大的負距平，並且從 12 月至 4 月都是負距平。在 50hPa 以上的中高平流層溫度變化和對流層差異很大。本研究對溫度距平垂直剖面進行分類時有包含 50hPa-1hPa 溫度，但在分析討論

臺灣天氣與亞澳季風關聯則僅聚焦在 50hPa 以下的對流層和低平流層。

高對流層和對流層頂附近 (200hPa-50hPa) 因位於對流層和平流層的交界區域大氣溫度的季節變化和分別在對流層及平流層內的變化不同，其根本原因是大氣溫度變化的物理機制在對流層和平流層不同。太陽無疑是地球大氣能量的唯一來源，太陽輻射對對流層大氣溫度的影響主要是透過地表吸收太陽短波輻射之後以長波向外輻射，長波輻射能量被大氣的溫室氣體吸收後向地輻射使地表大氣維持溫暖。由於大氣密度隨高度迅速遞減，距離地表愈

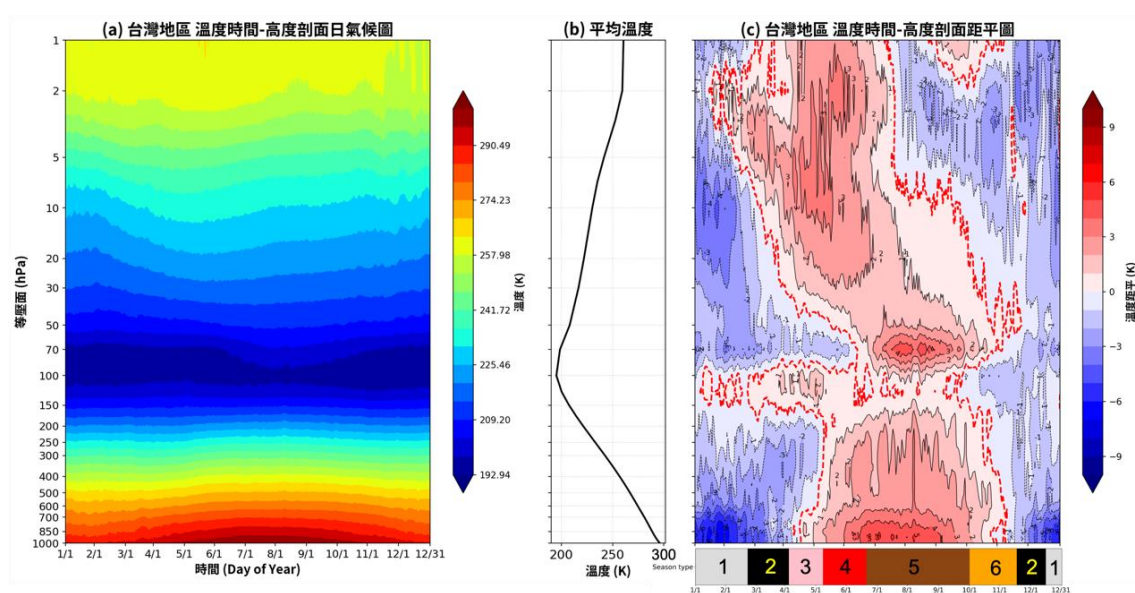


圖 2：臺灣地區 1991-2020 年 30 年氣候平均溫度垂直剖面圖 (a) 為 1/1-12/31 每日溫度剖面圖，橫軸為日期，縱軸為等壓面高度，彩色陰影部份為溫度 (單位：K)。(b) 為 30 年溫度氣候平均的溫度垂直剖面。(c) 1/1-12/31 溫度剖面日氣候距平，計算方法為 (a) 圖中每日的溫度剖面，減去 (b) 的氣候平均剖面，下方橫條為溫度剖面日氣候距平使用 K-means 與 CI 值界定出的 6 種類型，分別為灰色為類別 1、黑色為類別 2、粉紅色為類別 3、大紅色為類別 4、棕色為類別 5、深黃為類別 6。

遠的大氣壓力愈低，空氣體積膨脹溫度下降，至對流層頂大氣溫度達到最低，而溫室氣體中除水氣可藉由熱帶深對流運動傳送到低平流層且其相位變化仍對大氣溫度有些影響，其餘氣體因濃度甚低對溫度變化的影響甚微。太陽輻射對平流層大氣溫度的影響並非經由溫室效應，而是經由平流層臭氧吸收紫外線產生的光化學效應使分子動能大增氣溫升高，並且臭氧的光化作用隨高度因與太陽距離越近而增強（可參考 Wallace and Hobbs 2006 第 1、4 章）。平流層臭氧濃度與日照強度及平流層中由赤道到高緯度極區的經向單胞 Brewer-Dobson 環流關係密切（Bönisch et al. 2011），氣候上以北半球春季的濃度最高（Butchart 2014, Salawitch et al. 2023），季節變化特徵與圖 2c 所示相符。

(二) 垂直結構季節分類

圖 2c 顯示的臺灣上空大氣溫度的日氣候距平可用 K-means 方法判斷溫度垂直剖面類似的日期進而分類。圖 3 是對 365 筆 37 層溫度日氣候距平分類群數為 2 至 12 的 CI 值，看到 k=6 時有超過紅噪音的 CI 峰值（99.3%），表示分為 6 種類型最佳。按照各類發生日期以及慣用的四季時序進行類別編號，對應的日期和類別標示在圖 2c 下方並整理在表 1。這裡「類別」意指溫度垂直剖面的分類結果，季節則是依慣用時序命名。冬季（類別 1）的對應日期為 12 月 16 日至隔年 2 月 21 日。前冬與後冬的溫度垂直剖面都歸在類別 2，前冬（類別 2）的對應日期為 11 月 17 日至 12 月 15 日，後冬（類別 2）的對應日期為 2 月 22 日至 4 月 3 日，春季（類別 3）的對應日

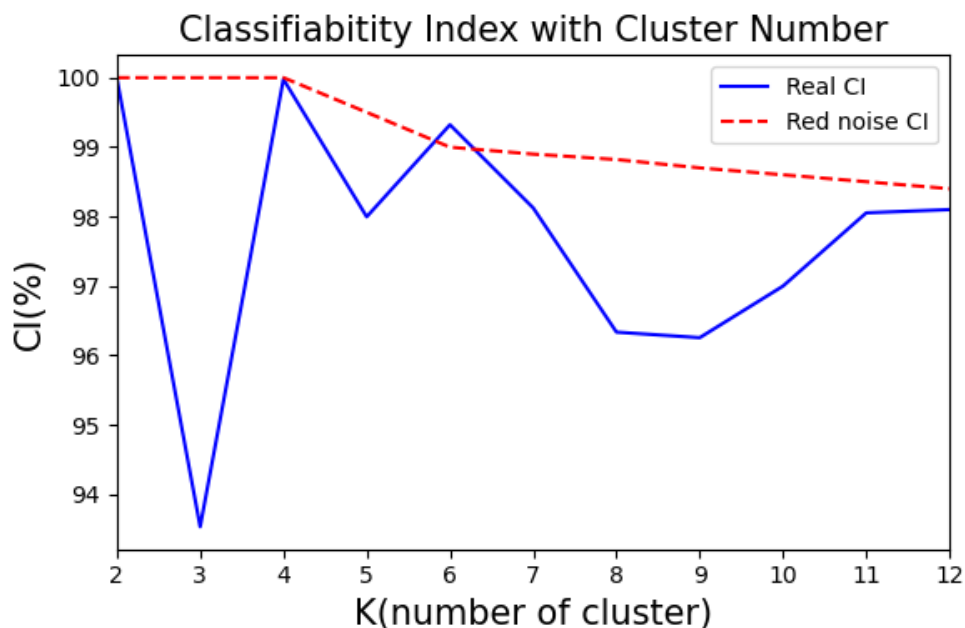


圖 3：不同分群數的 CI 值大小，紅色虛線代表紅噪音資料的隨機 CI 值，k=6 時真實 CI 大於隨機 CI，本次研究選擇分 6 個自然季節。

表 1：分群結果與各群對應時間區間和天數。

類別編號 (季節)	日期	天數
1 (冬)	12/16-02/21	68
2 (後冬、前冬)	02/22-04/03 、 11/17-12/15	41 、 29
3 (春)	04/04-05/07	34
4 (梅雨)	05/08-06/19	43
5 (夏)	06/20-09/30	103

期為 4 月 4 日至 5 月 7 日，梅雨季（類別 4）的對應日期為 5 月 8 日至 6 月 19 日，夏季（類別 5）的對應日期為 6 月 20 日至 9 月 30 日，秋季（類別 6）的對應日期為 10 月 1 日至 11 月 16 日。類別和日期的對應關係顯示臺灣上空大氣溫度日氣候距平垂直結構可作為臺灣氣候自然季節的另一種判斷方法。

圖 4 是依各類別日期平均的溫度距平（與全年氣候平均的差值）垂直剖面與平均水平風向和風速（總量）的風標圖，由於類別 2 代表前冬與後冬的兩段轉換期，因此將兩段時間分開製圖。在冬季（類別 1，圖 4a）溫度整層皆為負距平，顯示整層大氣偏冷，低層（1000–850hPa）尤為明顯。低層風標顯示偏東北或偏北風，且風速較大，中高對流層（700hPa–150hPa）則轉為西風，最大風速出現在 200hPa 附近，為西風噴流，中平流層（20hPa）以上轉為東風。

後冬（類別 2，圖 4b）在高平流層（10hPa–1hPa）溫度距平已從冬季的負值轉變為正值，平流層頂（2hPa–1hPa）風向也從冬季的東風轉變為西風，顯示冬季末的季節性轉變訊號始於高平流層的增溫和西風增強，在對流層頂區域（150hPa–100hPa）也看到較弱的增溫和西風減弱的轉變訊號。圖 4c 顯示春季（類別 3）在 50hPa 以上的平流層氣溫明顯比冬季溫暖，在對流層和平流層交界的 UTLS 區（170hPa–50hPa）同樣有增暖，但平流層底（100hPa–50hPa）仍維持在負距平；對流層頂（170hPa–100hPa）為明顯正距平，近地表（1000hPa–700hPa）也出現明顯增暖。從 700hPa 往上的對流層及 UTLS 的西風相較於後冬偏弱，而 700hPa 以下南風分量增強。圖 4d 顯示梅雨季（類別 4，圖 4d）整層大氣溫度均較春季更加溫暖，唯獨對流層頂（170hPa–100hPa）的溫度低於春季，在風

的方面看到對流層(600hPa-100hPa)風向隨高度有順時針旋轉特徵,表示臺灣附近的地轉風有暖平流作用,空氣順著氣壓梯度從暖區往冷區流動。對流層的風向隨高度變化在夏季(類別5,圖4e)與春季和梅雨季截然不同,在700hPa-150hPa風向呈現隨高度是逆時針旋轉特徵,600hPa以下為西南風、500hPa-400hPa吹東南風、400hPa-200hPa吹東北風、200hPa-100hPa吹東風,100hPa以上為越來越強的東風,表示從地轉平衡角度來看臺灣附近夏季地轉風乃是順著氣壓梯度從海面上較冷區域往亞洲大陸上的較暖區域流動。同時,看

到夏季中高平流層(20hPa-1hPa)的氣溫相較於梅雨季已有明顯的季節性降溫變化,但風向風速仍維持與梅雨季相同的東風增強趨勢。圖4f顯示秋季(類別6)整層大氣相較於夏季均為偏冷,風向風速的改變也非常明顯,在700hPa以下轉變為東北風而700hPa-100hPa都轉為西風,在UTLS看到風向隨高度逆時針旋轉的特徵,顯示秋季在UTLS有較強的溫度梯度,並且從前冬至春季的北半球冬半年期間(圖4g,a-c)UTLS的垂直風切持續存在。運用K-means方法整層大氣溫度結構在前冬(11月17日至12月15日)與後冬(2月22

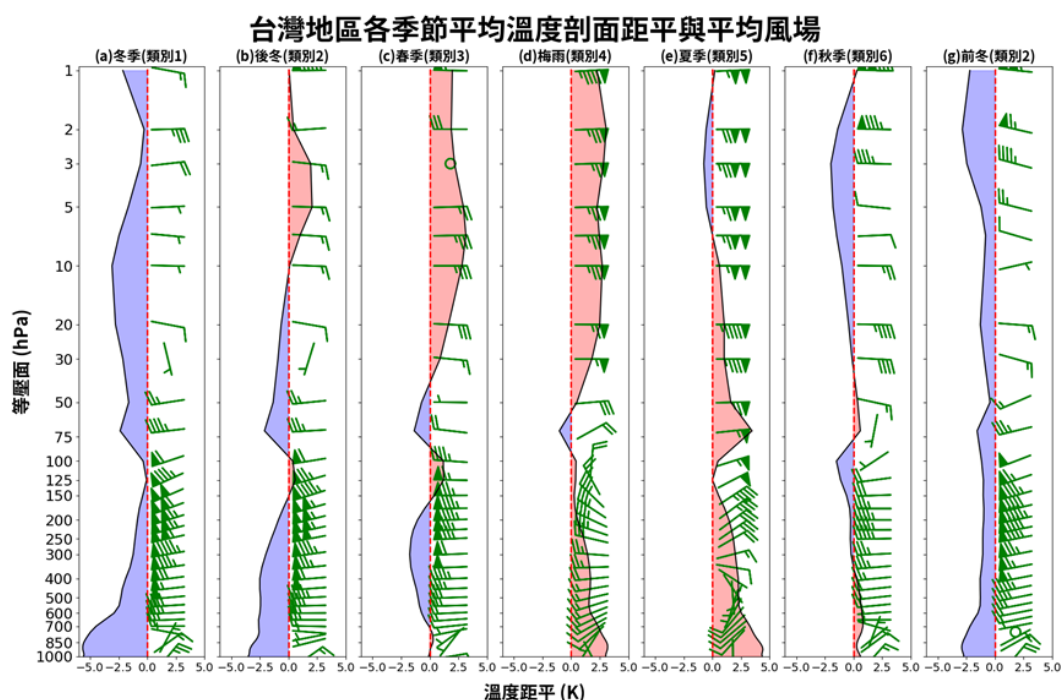


圖 4: 為使用表 1 中 6 個類別所對應的平均溫度剖面日氣候距平。(a) 為冬季(類別 1), (b) 為後冬(類別 2), (c) 為春季(類別 3), (d) 為梅雨季(類別 4), (e) 為夏季(類別 5), (f) 為秋季(類別 6), (g) 為前冬(類別 2), 藍色色塊代表負距平, 紅色色塊代表正距平。風標代表不同季節中特定高度的平均風向風速(半枝風羽: 0.5m/s; 1 枝風羽: 2m/s; 三角風羽: 5m/s)。

日至 4 月 3 日)被歸為相同類型(類別 2), 比較圖 4g 與圖 4b 的溫度距平垂直結構看到在高平流層(3hPa-1hPa)的差別非常明顯, 但其他部分的變化特徵大致接近, 最冷距平出現在低層近地表大氣, 在 200hPa 西風噴流上方有較小溫度距平, 而在 75hPa-50hPa 附近有較大冷距平, 10hPa 附近距平值均較小, 伴隨的風向特徵也相當類似而中高對流層風速在後冬高於前冬。由於資料在高平流層的垂直層數較少, 集群分析法未能將前冬與後冬區隔為兩群, 而兩段時期都沒有類似冬季在 30hPa-50hPa 出現偏冷極值因此集群分析法未能區隔這兩段時期的溫度垂直結構與冬季的不同。高平流層溫度因受平流層臭氧濃度影響使後冬溫度高於前冬, 平流層臭氧濃度在南半球夏季後期與秋季(2 月至 6 月)達到高峰此時高平流層的溫度也升至全年最暖。

由上述結果可知, 使用溫度垂直剖面日氣候距平特性得到的季節分類大大擴展了僅用地面溫度和雨量分類的傳統做法, 為了解臺灣氣候與大尺度亞澳季風系統季節性變化提供了不同的分析思維。傳統季節劃分著重在近地面氣象要素的季節變化, 以溫度來說整層大氣的變化遠較地面溫度包含了更豐富的訊息。由於對流層與平流層決定大氣溫度變化的機制不同, 構

成了在 UTLS 出現特徵分明的季節變化, 並且整層大氣溫度結構的差異也區隔出前冬、後冬與冬季的差異, 這些精細的劃分有利於未來從不同的角度和視野了解臺灣氣候。

下一節將討論依據前述類別(表 1)分季的臺灣測站雨量及風向風速的氣候特徵, 第四章將討論臺灣氣候與亞澳季風系統季節性變化的關聯。

(三) 不同季節分類下地面風雨的特性與變化

由於臺灣面積不大且處於亞熱帶區域, 地面溫度的季節性變化相當緩和僅有冬、夏之分(盧等 2012), 近地表冬夏溫度變化在圖 2c 也清楚可見, 但是在在大尺度季風環流和臺灣地形抬升或阻擋作用的影響下臺灣雨量的變化則較複雜。本節依照表 1 日期統計 1991~2020 年中央氣象署地面駐人觀測站的雨量、風向、風速資料可對照不同季節類型地面的風雨特性, 討論根據大氣溫度垂直結構分季的地表風雨特徵。

圖 5a-g 為根據測站雨量繪製的臺灣全島雨量隨季節變化的時空分佈圖, 看到冬季(類別 1)主要雨區集中在東北迎風面, 後冬(類別 2)雨區由東北往中南部山區移動, 春季(類別 3)的雨區分佈與後冬特徵類似但量值更大, 中部山區尤其明顯。

梅雨季(類別4)全臺多雨，中南部山區雨量高於平地，夏季(類別5)主要雨區從中南部山區往臺灣南端延伸，值得注意的是北海岸和臺北盆地也是雨量熱點，並且維持到秋季(類別6)和前冬(類別2)。圖5f顯示秋季主要雨區集中在中央山脈以

東，前冬(圖5g)主要雨區則在東北角，整體而言看到以大氣溫度垂直結構分季確實也展現了臺灣降雨時空分佈的季節特性，這是臺灣的特殊地形和地理位置與亞洲季風環流共同影響的結果。比較基隆和高雄兩站的風花圖(圖6)可看到臺灣北、

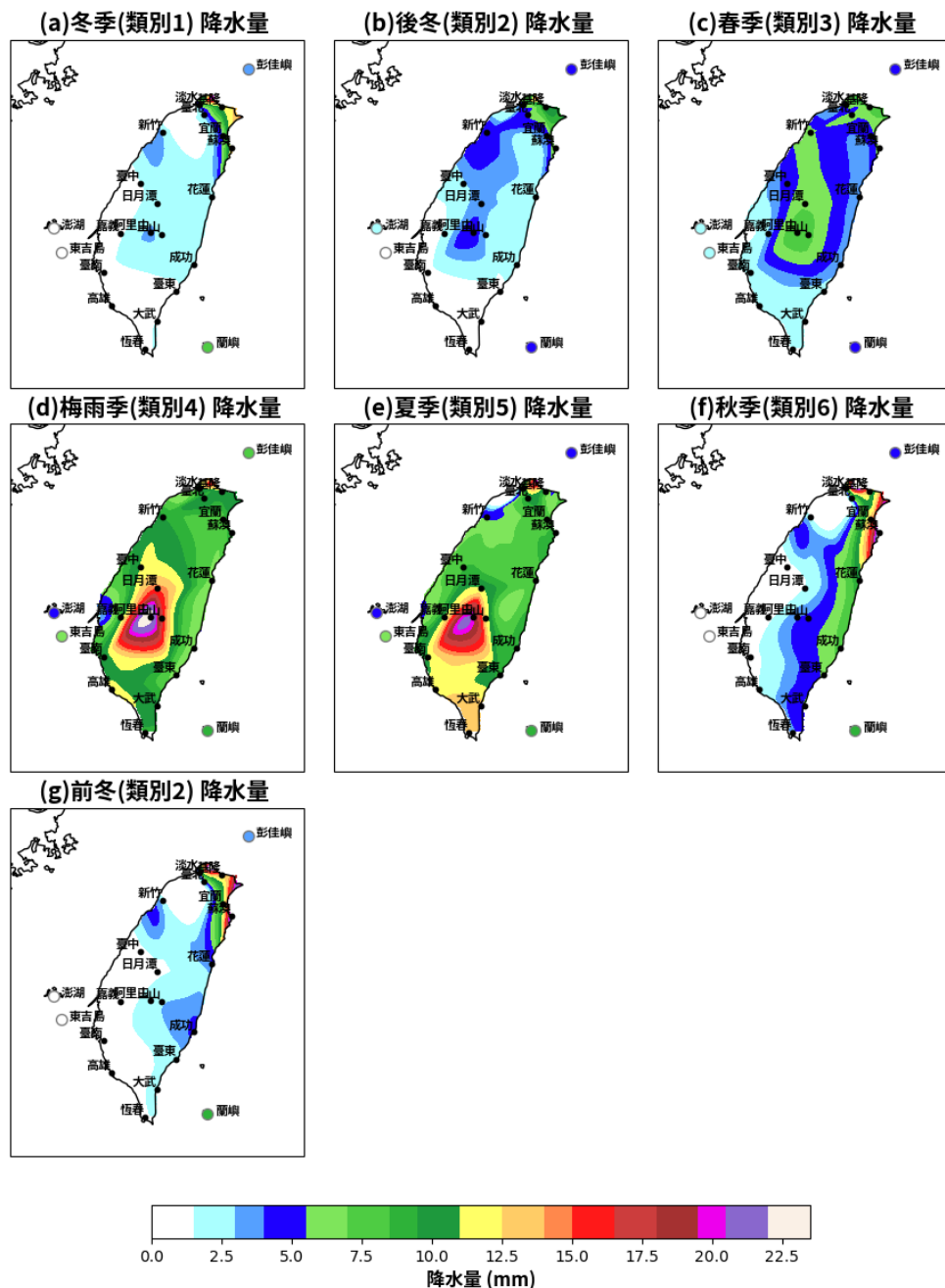


圖 5：(a) 到 (g) 為使用表 1 中的類別 1 至類別 6 對應的各測站平均降雨量（彩色色塊）圖，類別 2 中的後冬和前冬分開討論。

南兩地的風向和強度隨季節的變化。基隆測站全年盛行東北風，西南風出現在春季、梅雨季和夏季。高雄測站的風明顯小於基隆，北風在春季、梅雨季和夏季極少出現，而這段時期以西北風最為頻繁，南風在梅

雨季和夏季也常出現。由於各測站的風向、風速受測站環境影響甚大，探討區域氣候與季風環流關係時較難參考，再分析資料的重要性不言而喻。

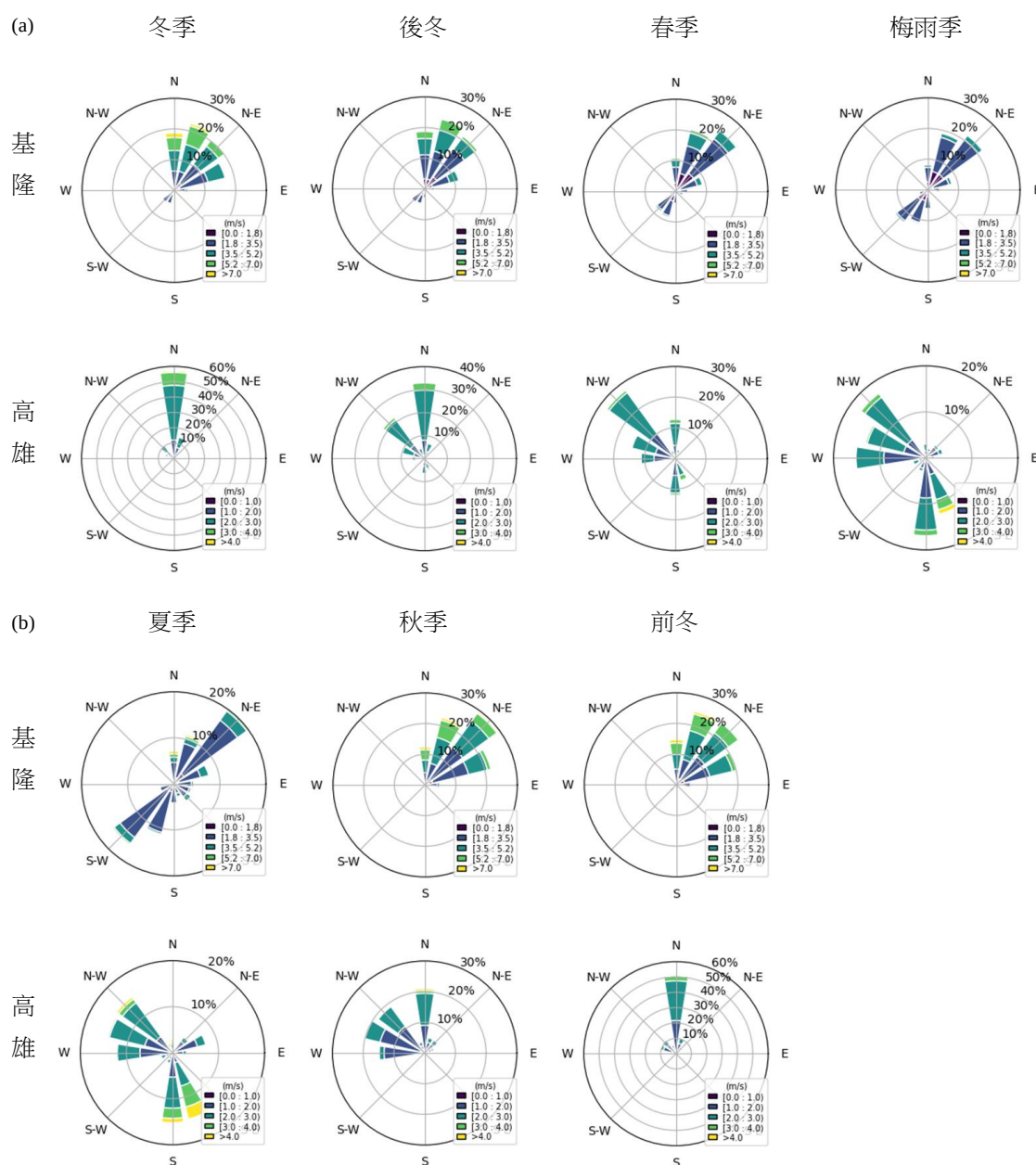


圖 6：依照表 1 中 6 個季節類別統計基隆站、高雄站的風向風速觀測資料繪製出風花圖，(a) 由左至右為冬季、後冬、春季、梅雨季，(b) 由左至右為夏季、秋季、前冬。每一子圖顯示該季節風向分佈頻率（圖形刻度為占整體百分比）與分級風速（m/s，由子圖右下角的列出的顏色代表風速）。

根據 ERA5 資料的臺灣上空溫度垂直剖面可客觀判斷臺灣區域的季節變化特性，且從臺灣地面測站資料印證了以判斷出的自然季節為規律可顯示臺灣雨量一年中的時空變化特徵。接下來將分析亞澳季風區的大氣溫度垂直剖面季節變化類別，了解臺灣自然季節和亞澳季風區整層大氣溫度變化及季風環流的關聯。

四、亞澳季風區大氣溫度垂直結構與環流的季節性變化

(一) 大氣垂直結構

亞澳季風區 (40°E - 180°E ; 35°S - 35°N) 大氣溫度垂直結構分析方法說明在第二章 (二) 之 3，本節討論根據季風區 1537 個

格點的大氣溫度垂直結構季節變化特徵進行集群分析，了解根據大氣垂直結構判斷的季節變化相類似的格點之地理位置分佈特徵，探討臺灣上空大氣溫度垂直結構季節變化與季風區內各個格點的季節變化特徵之異同。

圖 7a 為對 1537 筆矩陣圖進行 K-means 分群的 CI 值隨群數的變化，每一矩陣圖是由 365 日 37 層溫度日氣候距平組成的，結果顯示 $k=6$ 的 CI 值通過紅噪音統計檢定因此選為最佳群數。圖 7b 顯示分類結果大致平行於緯度，第一類 (Type1) 分佈在南半球中緯度，第二類 (Type2) 分佈在南半球副熱帶，第三類 (Type3) 分佈在赤道兩邊的赤道熱帶區域，第四類 (Type4) 分佈在北緯 15 度附近的北半球外熱帶區域，

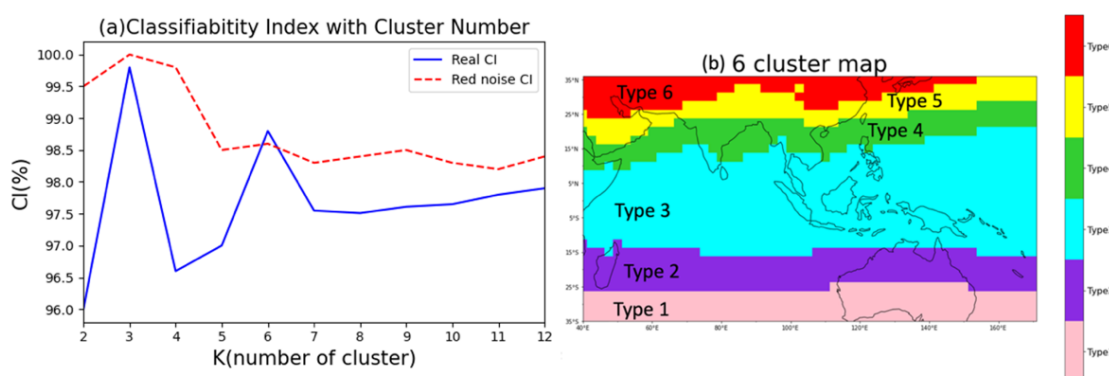


圖 7：亞澳季風區 (40°E - 180°E ; 35°S - 35°N) 中 1537 個格點的大氣溫度氣候日距平全年分佈分類結果。(a) CI 隨群數分佈，紅色虛線為以隨機產生 100 組紅噪音計算的背景 CI 值，(b) 為 $k=6$ 的分類結果，第一類 (Type1) 分佈在南半球中緯度，第二類 (Type2) 分佈在南半球亞熱帶，第三類 (Type3) 分佈在赤道兩邊的赤道熱帶區域，第四類 (Type4) 分佈在北緯 15 度附近的赤道外熱帶區域，第五類 (Type5) 分佈在北緯 25 度附近的北半球亞熱帶區域，第六類 (Type6) 分佈在北半球副熱帶以陸地為主區域。

第五類 (Type5) 分佈在北緯 25 度附近的北半球亞熱帶區域而第六類 (Type6) 分佈在緯度更高的北半球中緯度以陸地為主的區域。地球與太陽運轉關係是形成季節的根本原因，以整層大氣溫度季節變化特徵進行集群分析獲得緯向帶狀分布的分類結果證實運用整層大氣溫度結構判斷季節變化的合理性。

相同類別格點的平均溫度日氣候距平垂直剖面圖顯示在圖 8a-f，看到南半球對流層內的溫度日氣候距平 (圖 8a-b) 和北半球 (圖 8d-f) 相反，呈現為 11 月到 4 月南 (北) 半球為夏 (冬) 半年時溫度為正 (負) 距平、5 月到 10 月南 (北) 半球為冬 (夏) 半年時溫度則為負 (正) 距平。而在 UTLS (200hPa-50hPa) 則是南半球與熱帶區域 (Type1-4) 在 5 月到 10 月均為正距平而北半球熱帶外的緯度較高區域 (Type5、Type6) 為負距平；11 月到 5 月的距平轉為南半球與熱帶區域 (Type1-4) 為負而北半球熱帶外的緯度較高區域為正。UTLS 溫度日氣候距平反映出對流層在夏季較為濕熱冬季較為低溫度高於夏季的特徵，大氣靜力穩定度從不穩定至穩定的過渡層(對流層頂)在夏季亦較冬季為低。全部類別的溫度日氣候距平的季節變化在中高平流層 (30hPa 以上) 都和 UTLS 層相位相反，顯示在 30hPa 以上的大氣溫

度季節變化不受對流層的水氣或動力與熱力影響。值得注意的是 UTLS 與 30 hPa 以上的中高平流層溫度的反向相位關係在 Type5 和 Type6 較不明顯，這兩種類型的格點位置包含了亞洲大陸尤其是青藏高原和西亞與中亞山地，因此猜測是陸地以及高原和高山地形對於 UTLS 和中高平流層溫度季節變化的影響，這方面的觀測研究目前還沒有合適文獻可供參考。

為觀察溫度日氣候距平的季節變化受緯度和亞洲大陸地形的影響，接下來以亞洲與澳洲之間海陸交錯區域為核心選擇 110°E 與 130°E 經度範圍內的格點，分類別針對溫度日氣候距平依照表 1 的臺灣自然季節時間平均，結果顯示在圖 9。根據臺灣區域高空溫度氣候日距平全年變化判斷的季節也標示在圖 9，可方便對照臺灣季節與亞太澳其他地區的溫度垂直結構變化關係。由圖 7b 可知臺灣本島南北位於 22°N 至 25°N，在分區上位於 Type4、Type5 的交界，北臺灣屬於 Type5、南臺灣屬於 Type4，比對圖 4 與圖 9 確實可看到臺灣的溫度垂直剖線有這兩類的特徵，整體而言臺灣與 Type4 非常相似，但秋季尤其是平流層溫度距平剖線則較接近 Type5。此外，看到赤道附近 (圖 9c) 在 150hPa 以下的對流層溫度季節變化微小但以上的平流層溫度季節變化明顯，最冷出現在臺灣

冬季最暖出現在臺灣後冬和春季，而高平流層在臺灣梅雨季稍微趨冷，夏季則轉為

與南半球（圖 9a-b）類似的負距平，但至秋季又轉為正距平並初冬和冬季維持與比

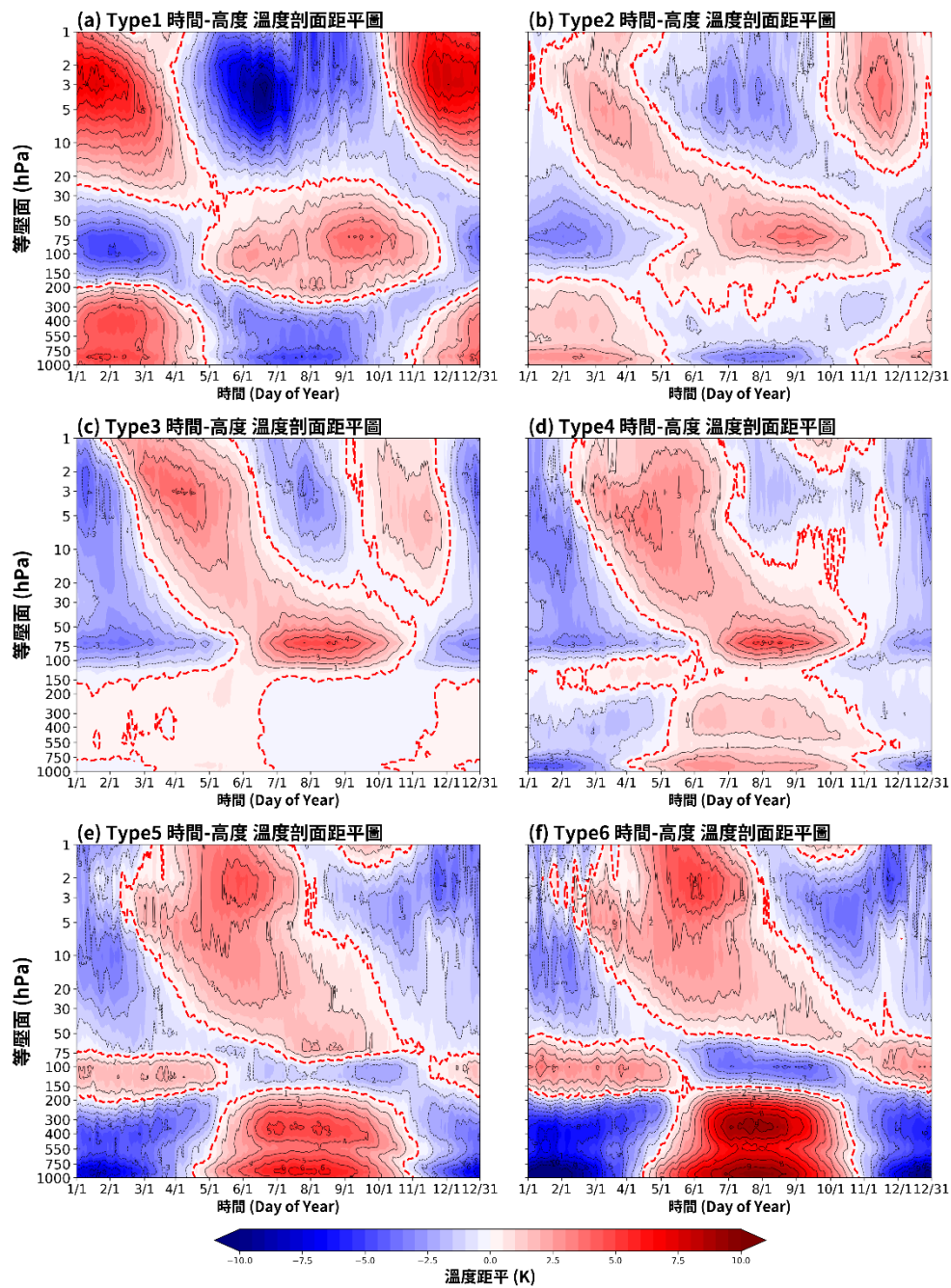


圖 8：將亞澳季風區分成 6 區對應的合成溫度剖面日氣候距平的平均垂直溫度剖面年循環圖。(a) Type1：南半球副熱帶地區以南 (20°S 以南)，(b) Type2：南半球副熱帶區域 (15°S - 25°S)，(c) Type3：赤道地區 (15°S - 10°N)，(d) Type4：北半球 10°N - 15°N 區域，(e) Type5：北半球 15°N - 25°N 區域，(f) Type6：北半球 25°N 以北地區。

較接近北半球（圖 9d）型態的距平。平流層的溫度變化和日照度直接相關，是判斷季節變化的重要參考，由於平流層的季節變化不是本文的研究重點，接下來將聚焦在活躍於對流層的亞澳季風系統的季节變

化，平流層大氣動力與熱力和季風的關係有待日後繼續研究。

(二) 季風環流與對流

圖 10 顯示了對照本文提出的臺灣氣候季節（表 1）在臺灣附近季風區的雨量、高

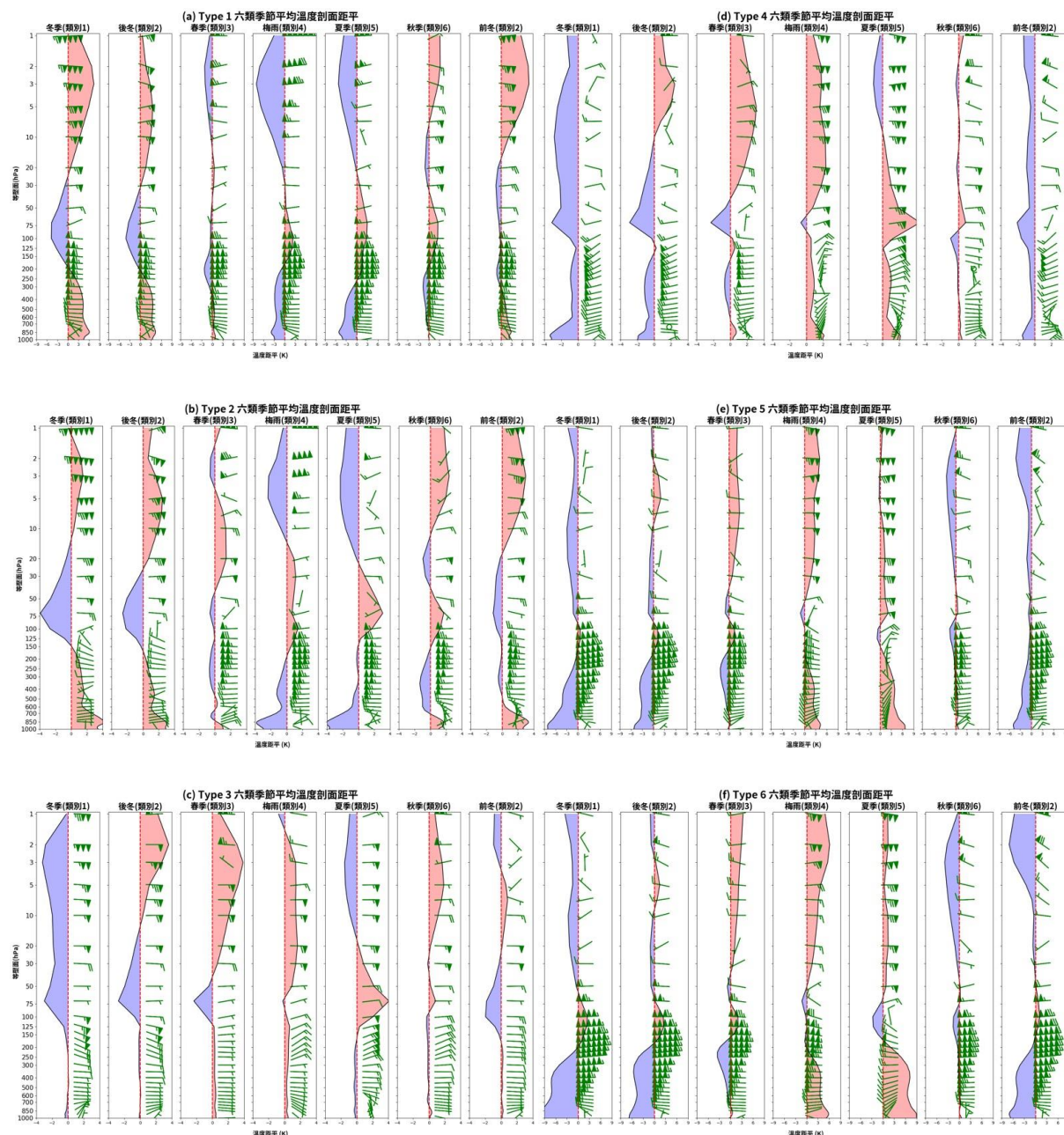


圖 9：依照臺灣地區所分出的 6 個季節類別日期（表 1）根據圖 7b 所示的 6 種分群的格點所在位置進行區域平均的各氣壓層溫度季氣候距平、風場剖面圖（a）-（f）分別為 Type 1-6。（a）、（d）、（f）x 軸座標範圍為 -9K~+9K，（b）、（c）、（e）x 軸座標範圍為 -4K~+4K。

風標半枝風羽：0.5m/s；1 枝風羽：4m/s；三角風羽：10m/s。

低層風場及重力位高度場隨季節的變化。 中以冬季最少，後冬至梅雨季的雨量漸增
 首先，在圖 10a-g 看到臺灣附近雨量全年 並有從西南往東北走向的雨帶，雨帶上方

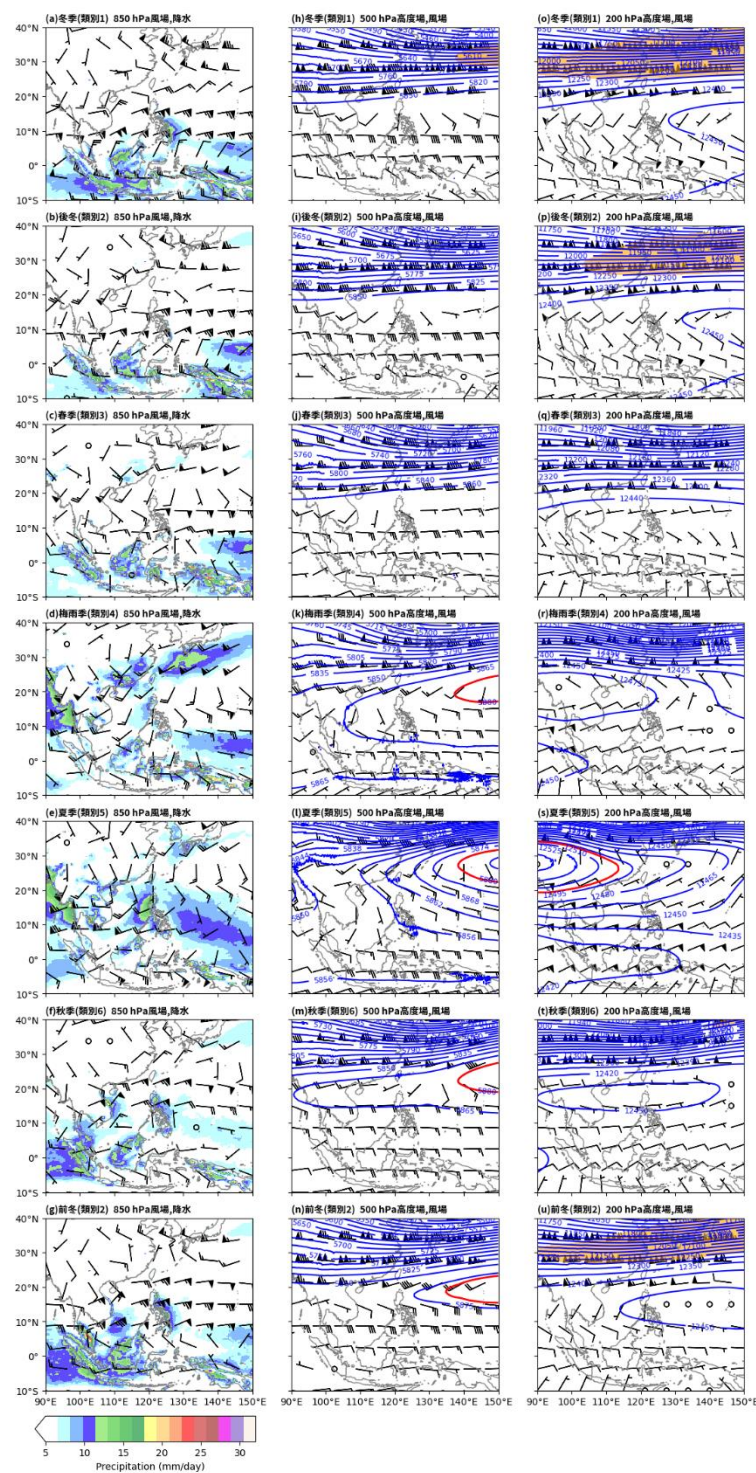


圖 10：依照表 1 中 6 個季節類別繪出的分層圖。(a) 到 (g) 為 6 個類別的 850hPa 風場（風標）和降水彩色色塊）。(h) 到 (n) 為 500hPa 層上的風場、高度場（等值線，強調 5880gmp）、噴流位置（使用橘色色塊，風速大於 35m/s）。(o) 到 (u) 為 200hPa 層上的風場、高度場（等值線，強調 12500 gmp）、噴流位置（使用橘色色塊，風速大於 50m/s）。

850hPa 風場以西南風為主而位在雨帶南方太平洋海面上風向以南風為主。夏季的主要雨帶在西北太平洋熱帶區域，從南海往赤道太平洋可見西北東南走向的雨帶伴隨著氣旋式風場是北半球夏季最多颱風生成的區域 (Lu et al. 2020)。隨季節轉變至秋季和前冬看到主要雨帶往赤道移動，前冬 (圖 10g) 除赤道太平洋以外，在赤道東印度洋、中南半島和蘇門達臘與婆羅洲等海洋島嶼區的降雨也非常豐沛，赤道以南熱帶區域冬季 (圖 10a) 降雨明顯增多，後冬 (圖 10b) 則看到新幾內亞大島是降雨熱點並持續到春季 (圖 10c-d)。圖 10h-n 顯示在分析區域作為指標性的西太平洋上 5880gpm 等值線在梅雨季 (圖 10k) 位在緯度 20°N - 25°N ，經度 140°E - 150°E 附近，代表副熱帶高壓的反氣旋環流勢力從西北太平洋向西南延伸至南海，副高勢力在夏季 (圖 10l) 明顯增強，高壓脊北抬至 30°N 附近，秋季 5880 gpm 等值線涵蓋區域仍在 20°N 以北，初冬則移至 20°N 以南。圖 10r-s 顯示梅雨季和夏季在 200hPa 的高壓區域在亞洲大陸上空稱為南亞高壓，高壓脊緯度與 500hPa 副高類似，秋季 (圖 10t) 的副熱帶高壓位置則在南海和菲律賓海上空，在副高北方 30°N 以北的中緯度西風明顯增強。副熱帶高壓在前冬 (圖 10u) 完全移到南海與菲律賓海上方，高壓脊在

10°N ~ 15°N 。冬季和後冬 (圖 10o-p) 高壓反氣旋繼續往東移動，緯度 15°N 以北吹西風以南吹東風，這個東西方向的反氣旋風切帶顯示是高空風場對南半球熱帶深對流活動和科氏力的響應 (Section 2.3.2 in Trenberth et al. 2006)。

前述區域季節變化與行星尺度環流變化的關係可藉由將全球風場分解為代表旋轉量的流函數 (PSI) 和代表輻散量的速度位 (CHI)，搭配大氣柱總水氣量 (Total Column Water Vapor, TCWV) 和向外長波輻射 (OLR) 可清楚觀察到印亞太澳區域主要環流與對流系統系統與臺灣季節特徵的關聯。結果顯示臺灣冬季至春季時低層風場的盛行風在赤道北邊為東風而赤道南邊為西風，跨赤道從北半球往南半球 (圖 11a-c)。850hPa 流函數 PSI850 在北(冬)半球為正而南(夏)半球為負，表示以 20°N 和 30°S 為東西向軸線在北半球的旋轉風是順時針方向的高壓環流而南半球則是逆時針方向的高壓環流。臺灣附近風場為從東北亞陸地往西北太平洋吹送但在臺灣北方轉為像南海吹送的東北季風。受太平洋副熱帶高壓影響，臺灣上空的 850hPa 東北風在後冬轉為西風 (圖 11b)，從春季到梅雨季都是西風和西南風 (圖 11c-d)，夏季則在臺灣南方 (南海北部) 出現低壓季風槽 (圖 11e)；在臺灣梅雨季印度洋上的跨

赤道流清晰可見(圖 11d), 夏季風速最強
(圖 11e), 秋季減弱並正 PSI 中心東移(圖

11e-f), 臺灣的前冬時期赤道印度洋上
850hPa 風場在赤道以北為北風而赤道以

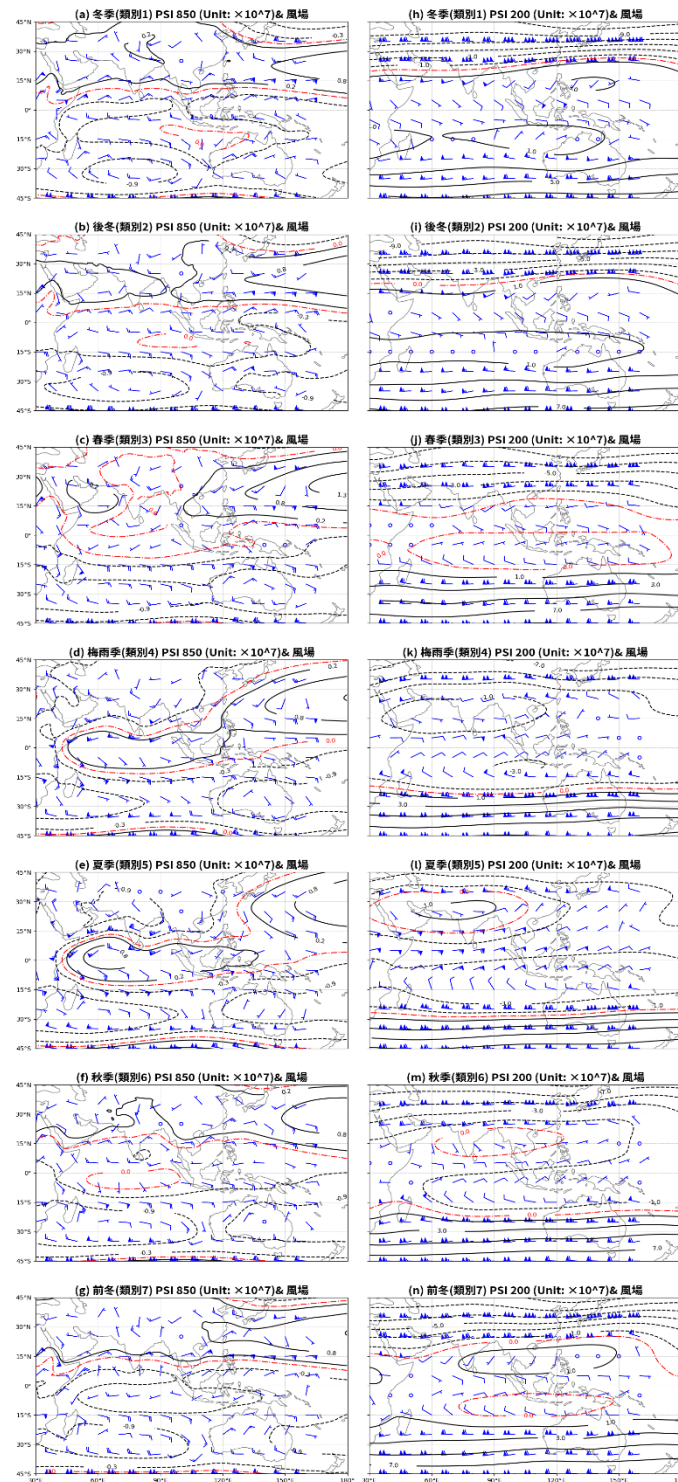


圖 11：依照表 1 中 6 個季節類別繪出的：(a) 到 (g) 為 6 個類別的 PSI (等值線，單位：107) 和 850hPa 風場 (風標，半枝風羽：0.5m/s；1 枝風羽：3m/s；三角風羽：7m/s)。

(h) 到 (n) 為 200hPa 層上的 PSI (等值線，單位：107) 和風場 (風標，半枝風羽：5m/s；1 枝風羽：10m/s；三角風羽：15m/s，圖中的紅點虛線為 PSI 為零的等值線。

南為西風，經向風的方向呈現從北往南的跨赤道流（圖 11g）。另一方面，200hPa 的南亞高壓反氣旋環流的變化在圖 11k-n 可更清楚看到，臺灣梅雨季時 200hPa 南亞反氣旋的脊線（ u 接近 0m/s 的軸線）位置在 15°N 附近的阿拉伯海、印度、孟加拉灣、中南半島和北印度洋等區域（圖 10r、圖 11k），夏季高壓脊北移至 25°N 附近，在秋季和前冬南移至孟加拉灣、中南半島、北南海與菲律賓海等地。臺灣冬季、後冬與春季高壓環流較弱，但仍可清楚看到赤道以南從西南太平洋往西橫跨熱帶印度洋直到非洲海岸均為東風帶赤道以北則為西風帶，因此在三個季節都清楚可見。

搭配圖 11a-n 與分別在 850hPa 和 200hPa 的速度位（圖 12a-n）可觀察到臺灣與所在的季風區雨帶和動力場季節變化的關係。速度位為負值的區域是氣流輻散區，為正值的區域是氣流輻合區，在正負速度位交界也是梯度最大的區域風場有最大輻散分量，熱帶深對流運動則是大氣中最主要的輻散源。熱帶深對流運動活躍區有高 TCWV 和低 OLR，臺灣後冬時期（圖 12b）赤道東印度洋及澳洲北方印尼群島與西太平洋暖池區域（90°E-160°E，15°S-5°N）有最明顯的熱帶深對流區（OLR 偏低、TCWV 偏高、CHI850 有閉合的正等值線、CHI200 有閉合的負等值線）和與對

流區形成強烈對比的熱帶外對流下沉高壓區（OLR 偏高、TCWV 偏低、圖 11b 在 10°N-25°N 西北太平洋上有反氣旋相當於高壓系統），隨季節演變看到赤道附近熱帶對流區漸漸減弱以及往緯度較高的中南半島與華南移動，夏季有豐沛水氣在孟加拉灣北部、中南半島北部、南海北部、菲律賓海，OLR 主要低值區在 15°N 附近也是 CHI200 負值中心區。秋季至前冬看到 OLR 的低值區和 CHI200 負中心隨季節往南移動，CHI200 負中心在前冬（圖 12n）和冬季（圖 12a）位置在南太平洋群島區域與洋面上，和 CHI850 及 TCWV 的特徵相比看到高層輻散和低層輻合風場相當契合。

綜上討論，依照臺灣上空大氣溫度垂直結構判斷的自然季節與亞澳季風系統季節演變特性的聯繫非常密切。由於平流層臭氧的放大效應使溫度變化對太陽輻射能量十分敏感，因此依據整層大氣溫度垂直結構變化可將臺灣冬季區分為前冬、冬季、後冬三個時段。本章的分析結果顯示，從 TCWV、OLR 和高低層風場及氣壓場的變化可知冬季在這三段時期確實變化明顯，印度洋上從北往南的跨赤道流在冬季才完全建立，同時在澳洲北方伴隨澳洲夏季風的建立於 850hPa 有季風槽形成，而在中南半島、南海、印尼、赤道西太平洋海

面及南太平洋島嶼的區域看到對流系統從前冬到後冬的三個時期中心位置有明顯變

化，前冬時對流主要在新幾內亞島以西的海洋陸地區發展，冬季和後冬的發展中心

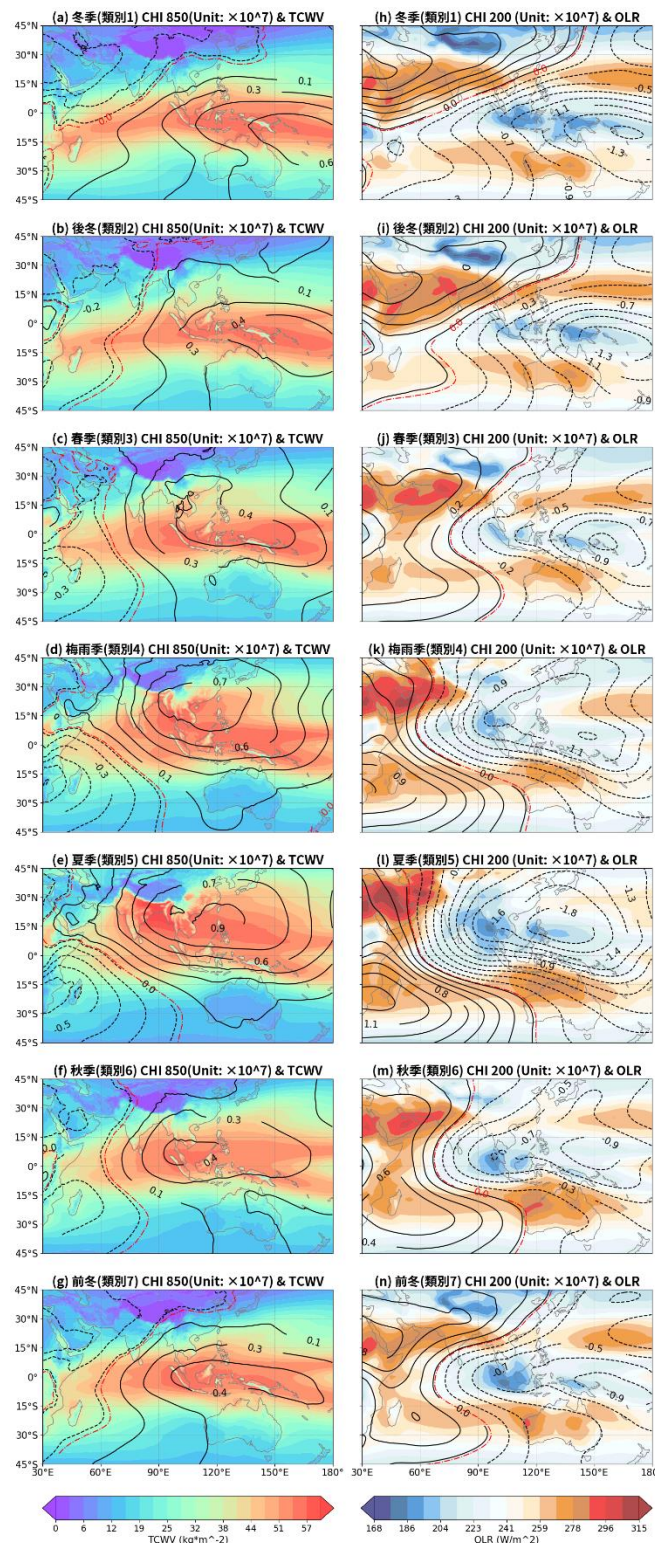


圖 12：如圖 11。(a) 到 (g) 為 850hPa CHI (等值線，單位： 10^7) 和 Total Column Water Vapor (TCWV，色塊，單位： kg m^{-2})。(h) 到 (n) 為 200hPa CHI (等值線，單位： 10^7) 和 OLR (色塊，單位： W m^{-2})，圖中的紅點虛線為 CHI 為零的等值線。

則往南太平洋對流輻合區 (SPCZ) 移動。後冬之後可看到 TCWV 的主要分佈區域隨春季、梅雨季、夏季從近赤道熱帶區域沿中南半島和東南亞及孟加拉灣往北擴張，夏季的 TCWV 最大也是 OLR 最低區域出現在孟加拉灣北方青藏高原南側的喜馬拉雅山區，菲律賓附近和西太平洋暖洋面也是深對流運動的活躍區域。熱帶對流區從夏季到秋季有明顯向南撤退的轉變，印度洋上從南往北的跨赤道流從夏季到秋季也有明顯減弱的變化，200hPa 的南亞高壓在夏季位在青藏高原上方但在秋季則南移到中南半島和南海上方，前冬則完全東移到菲律賓以東的熱帶太平洋上方，東亞與太平洋高空噴流也隨著南亞高壓的南移和北半球高緯度區域的變冷從秋季到前冬明顯增強。

五、結論

本研究運用 30 年 (1991-2020) 37 層等壓面 (1000hPa~1hPa) 的 ERA5 每日氣溫資料，分析臺灣上空大氣溫度垂直結構類型及季節特徵，臺灣上空大氣溫度以 120°E-122.5°E, 22.5°N-25°N 為經緯範圍的區域平均代表，以剖線區域平均的每日氣候平均值扣除日氣候全年平均後得到的 365 筆 37 層溫度日距平值，繼而運用 K-means 方法對 37 層溫度日距平隨高度變

化特徵進行分類，類似的資料 365 個大氣溫度垂直剖線得到最佳群數為 6 的結果，將 6 個類型依照日期整理之後發現在冬季前後的季節轉換期溫度日距平垂直結構特徵相似因此屬於同一類型，分別以前冬和後冬命名，其他類型則依日期稱為：冬季、春季、梅雨季、夏季、秋季。將亞澳季風區 (40°E-180°E, 35°S-35°N) 內 1537 個格點的溫度日氣候距平垂直剖面圖，每圖為 365 日 37 層溫度日氣候距平矩陣同樣運用 K-means 方法進行分類後發現以 6 類最佳，由南至北為：南半球中緯度、南半球副熱帶、赤道熱帶、北半球外熱帶、北半球副熱帶、北半球中緯度，15°N 以南的三類分佈大致平行緯度，在 15°N 以北的三類呈現由西南往東北方向的傾斜分佈。臺灣上空大氣溫度季節變化垂直剖線特徵在對流層類似北半球亞熱帶而平流層類似北半球中緯度 (圖 2c, 圖 8d, 圖 8e)，推測其可能原因為臺灣上空大氣溫度在對流層主要受東亞季風環流與水氣的影響而在平流層主要受臭氧濃度的影響，後者的季節變化或許受到亞洲大陸和極渦 (polar vortex) 的影響。本文主要目的為藉 ERA5 再分析資料揭示觀測結果，物理解釋有待繼續研究發現。

探討臺灣上空大氣溫度垂直剖面季節變化的文獻非常稀少。劉廣英等 (1986)

根據桃園、馬公、東港三個探空站的 26 年 (1956-1981) 資料首度發表溫度垂直剖面觀測結果，顯示地表和低平流層的溫度季節變化於夏季偏暖；冬季偏冷、而上對流層溫度季節變化不明顯，垂直方向的溫度季節變化有分層現象，地表和低平流層溫度季節變化的夏季特徵和本文分析結果一致，但本文發現上對流層 (150hPa-100hPa) 一年中以後冬 (2/22-4/3) 和春季 (4/4-5/7) 偏暖的現象在前人研究中並未發現。劉廣英等 (1986) 使用的探空資料垂直高度最高到 10hPa，垂直解析度 15 層，現今 ERA5 網站上提供的資料在垂直方向最高達 1hPa，標準層有 37 層，大大擴展了區域氣候的研究範圍。

傳統上對於季節分區或分類絕大多是根據近地面或衛星和降雨等觀測資料 (吳與陳 1993，王等 1984，吳與林 2006)，本文提出以大氣溫度垂直結構變化作為季節變化的客觀判斷，並以亞澳季風區大氣溫度垂直結構季節性變化以及季風降雨和環流為佐證，顯示整層大氣溫度變化可補充僅用地面溫度和雨量分類傳統做法的不足，尤其在高對流層與低平流層交界附近 (UTLS) 有非常明顯的季節變化，這些變化與亞澳季風區的平流層和對流層的水平與垂直環流的季節變化及平流層與對流層的交互作用都是有待探索的研究領域。臺

灣及鄰近區域的 UTLS 觀測資料在 2001 年之後隨著探空儀器全面改為 Vaisala RS41 (官與林 2005) 及福衛三號與七號先後在 2006、2019 年加入觀測使 UTLS 溫度變化有更高品質的資料可以運用 (Gleisner et al. 2022)。未來若結合 ERA5 和臺灣的探空、臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台團隊產出的臺灣歷史氣候重建資料 (Version 2021-10-25T07:39:15.112899) 及 GNSS-RO (<https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-do/gnss-radio-occultation>) 資料，將能進一步了解臺灣 UTLS 溫度變化與季風、ENSO 和極端天氣的關係。

致謝

本研究在科技部計畫『亞澳與西太平洋季風區季節與次季節氣候變異分析與預報研究』(MOST 111-2111-M-002-007-，NSTC 112-2111-M-002-010-，NSTC 113-2111-M-002-008-) 資助下完成，特此感謝。

參考文獻

王時鼎、鄭俠與趙友夔，1984：臺灣天氣變化之自然季節。大氣科學，11(1)，101-120。

- 李庭慧、黃威凱與許晃雄，2018：臺灣氣溫季節循環的長期變遷。大氣科學，46 (3)，294-316。
- 吳宜昭、林和，2006：北印度洋季風與季風低壓-(1)自然季節。大氣科學，34 (1)，47-65。
- 吳明進與陳幼麟，1993：臺灣的氣候分區。大氣科學 21.1 (1993)：55-66。
- 官岱煒與林博雄，2005：臺灣地區大氣探空剖面特徵分析。天氣分析與預報研討會，中央氣象局，臺北。
(<https://photino.cwa.gov.tw/rdcweb/lib/cd/cd01conf/dissertation/2005-1/004.pdf>)
- 劉廣英、張儀峰、葉文欽與呂國財，1986：臺灣地區垂直向氣象因子量之合成分析與探討。大氣科學，13 (1)，47-61。
- 盧孟明、卓盈旻、李思瑩、李清騰與林昀靜，2012：臺灣氣候變化：1911-2009年資料分析。大氣科學。40:3，297-322。
- 盧孟明與劉品誼，2017：從亞澳及西北太平洋季風觀點探討臺灣氣候年雨型辨識方法。大氣科學，45 (3)，193-219。
- Bönisch, H., Engel, A., Birner, T., Hoor, P., Tarasick, D. W., & Ray, E. A. (2011). On the structural changes in the Brewer-Dobson circulation after 2000. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(8), 3937-3948.
- Butchart, N., 2014: The Brewer-Dobson circulation, *Rev. Geophys.*, 52, 157–184, doi:10.1002/2013RG000448.
- Chen, C. S., & Chen, Y. L., 2003: The rainfall characteristics of Taiwan. *Monthly Weather Review*, 131 (7), 1323-1341, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<1323:TRCOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<1323:TRCOT>2.0.CO;2).
- Chen, T. C., & Yen, M. C., 1999: Annual variation of surface pressure on a high East Asian mountain and its surrounding low areas. *Journal of climate*, 12 (8), 2711-2716, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2711:AVOSPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2711:AVOSPO>2.0.CO;2)
- Gleisner, H., Ringer, M. A., & Healy, S. B., 2022: Monitoring global climate change using GNSS radio occultation. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5 (1), 1-4, https://doi.org/10.15770/EUM_SAF_GRM_0001
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Thépaut, J. N., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly*

- journal of the royal meteorological society, 146 (730), 1999-2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., & Xie, P., 2004: CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of hydrometeorology*, 5 (3), 487-503, [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2)
- Lu, M.-M., Sui C.-H., Wu C.-H., Solis A.L.S., and Cheng M.-D., 2020: Tropical cyclone climatology and variability in Taiwan and Philippine Region during 1979-2018. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* doi: 10.3319/TAO.2020.11.30.01
- Michelangeli, P. A., Vautard, R., & Legras, B., 1995: Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity. *Journal of Atmospheric Sciences*, 52 (8), 1237-1256, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<1237:WRRASQ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<1237:WRRASQ>2.0.CO;2)
- Moron, V., Gouirand, I., & Taylor, M., 2016: Weather types across the Caribbean basin and their relationship with rainfall and sea surface temperature. *Climate Dynamics*, 47, 601-621.
- Roller, C. D., Qian, J. H., Agel, L., Barlow, M., & Moron, V., 2016: Winter weather regimes in the Northeast United States. *Journal of climate*, 29 (8), 2963-2980, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0243.1>
- Salawitch, R. J. (Lead Author), L. A. McBride, C. R. Thompson, E. L. Fleming, R. L. McKenzie, K. H. Rosenlof, S. J. Doherty, D. W. Fahey, 2023: Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2022 Update, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, 75 pp., World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2023, <https://www.esa.noaa.gov/assessments/ozone/2022>
- Trenberth, K. E., Hurrell, J. W., & Stepaniak, D. P., 2006: The Asian monsoon: global perspectives. In *The Asian Monsoon* (pp. 67-87). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Wallace, John M., and Peter V. Hobbs, 2006: *Atmospheric science: an introductory survey*. Vol. 92. Elsevier.

Seasonal cycle of the climatological atmospheric temperature vertical profile over Taiwan and its relationship with Asian-Australian monsoon

Yang Lee¹³, Mong-Ming Lu^{2*}, Po-Hsiung Lin¹

¹ Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

² Center for Atmospheric Resource and Disaster Studies (CARDS), National Taiwan University, Taipei, Taiwan

³ Observation and Forecast Unit D, Central Weather Administration, Taipei, Taiwan

(manuscript received 13 June 2025; in final form 27 April 2026)

Abstract

This paper documents the seasonal cycle of the atmospheric temperature vertical profile over Taiwan (40°E–180°E, 35°S–35°N) using 30-year (1991–2020) daily climatology of the ERA5 reanalysis dataset. The vertical temperature profiles at each grid point in the Asia-Australia monsoon region (40°E–180°E; 35°S–35°N) and associated circulation and rainfall patterns are also analyzed. The vertical temperature profiles in this paper refer to the daily climatological anomalies of the atmospheric temperature at each of the 37 pressure levels from 1000 hPa to 1 hPa, which is a subtraction of the daily climatology from its annual mean. The optimal clusters/types of the 365 temperature vertical profiles are determined through K-means cluster analysis with the optimal number of clusters selection procedure based on a classifiability index (CI). It turns out that for the 365 vertical profiles of the daily climatological temperature anomalies over Taiwan six clusters is the optimal selection. After sorting the six clusters/types in time, the day within two seasonal transition periods, namely, from autumn to winter (pre-winter) and from winter to spring (post-winter), are classified into the same cluster. Thus, on the basis of the vertical temperature profile types over Taiwan, the seasonal cycle can be represented by seven natural seasons: winter, post-winter, spring, meiyu, summer, autumn, and pre-winter.

The seasonal cycle map represented by the annual temperature vertical profile (365 days by 37 levels) at 1,537 grid points in the Asia-Australia monsoon region are subsequently analyzed to reveal the regional differences. The seasonal cycle maps are optimally classified into six types and the maps at similar latitudes are grouped in the same cluster. After sorting the six clusters in latitudes, the seasonal cycle types from south to north are identified as: the Southern Hemisphere (SH) mid-latitudes, SH subtropics, Equatorial tropics (c.a. 10°S-7°N), near-equatorial Northern Hemisphere (NH) tropics (c.a. 7°N -15°N), the NH subtropics (c.a. 15°N -25°N), and NH mid-latitudes (north to 25°N). Taiwan lies at the border area of the near-equatorial NH tropics and the NH subtropical, with northern Taiwan resembling the subtropical type and southern Taiwan resembling the tropical type. During autumn season the atmospheric temperature seasonal vertical feature is similar to that of the NH subtropics, while during other seasons the temperature vertical feature is similar to that of the near-equatorial NH tropics.

The findings suggest that the vertical profiles of daily climatological temperature anomalies from surface to the top of stratosphere provides an innovative framework to link Taiwan climate and the seasonal evolution of large-scale circulation in the Asia-Australia monsoon region. The composite large-scale wind and water vapor fields in seven natural seasons suggest that the proposed framework greatly expands on the conventional practice that depends only on surface temperature and rainfall constrained in month or pentad. The rich temperature features near the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) that have been overlooked in Taiwan climate documents deserve more detailed study in the future.

Keywords: Taiwan climate, seasonal cycle, Asia-Australia monsoon, whole atmospheric temperature, climatological vertical temperature profile. doi: 10.53106/025400022026065401001

*Corresponding author: Mong-Ming Lu (E-mail: mongminglu@gmail.com; mongminglu@ntu.edu.tw)