

從天氣類型演變看2020和2021梅雨季的氣候變異

Understanding Climate Variability from Weather Type Evolution during 2020 and 2021 Mei-yu Seasons

朱芸霆 (Jhu Y.-T.) 曹習愛 (Tsao H.-A.) 盧孟明 (Lu M.-M.)

國立臺灣大學大氣科學系
Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

摘 要

近兩年來梅雨季極端降水使長江流域發生嚴重洪患，2020年夏季長江流域經歷了1998年以來最嚴重的洪患，梅雨季持續時間特別長，而2021年夏季也發生特大暴雨；然而2020和2021年的異常降雨的發生時間、區域和天氣型態差異都不盡相同。本研究運用數據導向方法分析東亞季風區1979~2020年4~11月間逐日850-hPa風場類型，發現最佳群集數為6，運用這6種天氣類型能客觀描述東亞西北太平洋季風演變的變化規律。由於5~7月是從臺灣到長江下游往北及至日本韓國夏季季風快速建立的時期，850-hPa風場類型提供了以大尺度季風演變進程為主軸判斷梅雨季主要降雨區域發生時間與位置的客觀指引。本研究將以2020、2021年為例，說明如何從天氣類型提供的季風演變訊息分析梅雨季的環流特徵，討論這兩年在臺灣與長江流域的降水異常和區域氣候變異。

關鍵字：東亞季風、梅雨、氣候變異、k-means群集分析法、季風演變

一、前言

(一) 研究背景與動機

2020年夏季長江流域經歷了1998年以來最嚴重的洪患，梅雨季持續時間特別長，總共五次主要的洪峰造成人員傷亡與巨額的經濟損失，而臺灣地區受西北太平洋反氣旋增強西伸的影響，使臺灣附近環境場相對穩定，不易發生劇烈降水。2021年夏季長江流域也發生特大暴雨，但發生劇烈降水的區域和時間與2020年不太相同，而臺灣地區因為西北太平洋反氣旋並未增強西伸，盛行西南季風使南部地區有劇烈天氣及累積大量降雨的機率。

由於發現2020年和2021年的異常降雨發生時間、區域和天氣型態差異與往年不盡相同，因此想運用數據導向方法分析東亞季風區1979~2020年4~11月間逐日850-hPa風場類型和雨量的關係，嘗試藉由季風演變的角度分析長江流域極端多雨與臺灣降雨在2020年和2021年的差異。

(二) 研究目的

基於上述的動機和理由，本研究透過數據導向分析方法了解大尺度季風環流特徵與往年的差異。同時藉由文獻探討及觀測資料分析了解2020年和2021年東亞季風區梅雨季異常降雨，並達到下列目的：

- 1、比較2020年和2021年季風演變環流特徵與氣候場的差異
- 2、了解導致2020年和2021年發生極端降水的可能因素

(三) 文獻探討

2020年梅雨季時期在長江到日韓一帶發生破紀錄異常降雨，除了梅雨季提早開始、較晚結束，形成長達兩個月的梅雨外，來自熱帶持續且強勁的水氣輸送也促進梅雨期間數波強降雨過程的發生(Ding et al., 2021)，其背後存在大氣與海洋的因子共同配合而造成這次的異常降水事件。在近期發表的論文裡，Ding et al. (2021)指出包含西北太平洋副熱帶高壓、低層西南風噴流、高層的西風噴流和南亞高壓、熱帶印度洋的

暖海溫等因素都對 2020 年異常降雨事件有所貢獻。

從梅雨季的發展時程來看，在東亞區域季風的發展以及季節演變過程中，梅雨的開始與結束為重要的一環(Wang and Lin, 2002)，其中也受到大尺度系統和環境背景條件的影響。西北太平洋的副熱帶高壓(以下簡稱「副高」)，其勢力範圍的移動直接影響梅雨雨帶的位置，而位於副高邊緣的低層西南風噴流會控制從南海、印度洋往長江流域的水氣輸送(Ding et al., 2021; Zhou et al., 2021)。

臺灣與長江梅雨季是亞洲夏季季風的建立與發展過程中重要的一環(Ding et al., 2005)，2020 年和 2021 年長江梅雨的發展時程與以往有明顯的差異，因此將採用 Qian et al. (2021)相同的 k-means 群集分析法，從天氣類型(Weather Type, WT)的角度分析 2020 年 4 到 11 月東亞與西北太平洋地區的季節演變過程，藉此了解 2020 年長江流域極端降雨事件的發展過程與季節演變的關係。2021 年則是透過氣候場和環流指標來了解 4 到 7 月季節演變過程，並與 2020 年做對照分析。

二、資料與研究方法

(一) 資料

計算 k-means 時使用的資料是 NCEP/NCAR Reanalysis 1 u850 and v850 逐日資料，時間範圍是 1979 年到 2020 年 4 到 11 月，空間解析度為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ；降水資料是使用 CMORPH 逐日資料，時間範圍是 1998 年到 2020 年 4 到 11 月，空間解析度為 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ；計算環流指標時使用的資料為 ERA5 850 hPa 風場逐日資料，時間範圍是 1998 年到 2020 年 4 到 11 月，空間解析度為 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。空間範圍皆是赤道至北緯 40 度，東經 90 至 140 度，主要鎖定在亞洲季風區與西北太平洋區域。

(二) k-means 群集分析法

k-means 群集分析法是 Stuart Lloyd 於 1957 年提出，此演算法的核心概念為經由反覆改變群集中心，使資料點與群集中心的距離減小，進而將資料點分成

k 群，而每個資料點都被歸類至本身與群集中心距離最小的群集中。本研究根據 Roller and Qian (2016) 的分類步驟，先用經驗正交函數(EOF)法保留 75% 變異度的 uv850 資料，降低風場資料的維度以及篩選掉小尺度的風場資料。挑選出適合的主成分(principle component)後，再使用 k-means 法分析風場的主成份時間序列，將逐日資料分群成不同的 Weather Type (WT)。根據 Michelangeli et al. (1995) 提出可藉由分群性指數(Classifiability Index, CI)判斷最佳群數，當 CI 值越高表示 K 群在 100 次迭代計算中有越高的相關係數距平(anomaly correlation coefficient, ACC)平均。

群集分析的詳細過程為先計算出 $N \times K$ 的 ACC 矩陣，其中 K 是從 2 到 12，為資料會分成的群數，而 N 為 100，代表重複計算 k-means 分群演算法的次數(以下以「區間」稱呼各次的分群結果)。接下來計算 P 區間第 i 個群心(P_i)和 Q 區間第 j 個群心(Q_j)的相關係數距平，其中 $1 \leq i, j \leq K$ 又 P 區間與 Q 區間互斥。從 $ACC(P_i, Q_{j=1 \sim K})$ 中選出最大值，為 P_i 與 Q 區間中最相似群心的 ACC 值，再將 P_i 對所有 Q 區間的 ACC 值最大值取出並平均，此值會被填入為 $ACC[P, i]$ 中，為 P_i 和其他區間的平均 ACC。最後，CI 值為此 ACC 陣列的平均值，由圖 1 可以發現族群為 6 時有最高的 CI 值，代表此風場資料最適合分成 6 群 Weather Type 來討論。

分群的效果可以藉由輪廓係數(silhouette score, SS)來判斷，輪廓係數的定義為 $SS = \frac{b-a}{\max(a,b)}$ ，其中 a 為某一資料點與同一群集其他點的平均距離，b 為某一資料點和最近群集其他點的平均距離。當 SS 值接近 1 時代表該資料點被分類至對的群集中；相反地，當 SS 值為負時表示該資料點分類至錯的群機中；如果 SS 值接近 0，代表該資料點屬於這兩個群集。

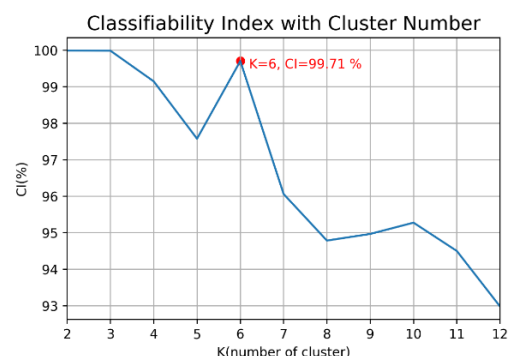


圖 1：不同組群的 Classifiability Index 圖

三、研究結果

(一) 各個天氣類型的時間特徵

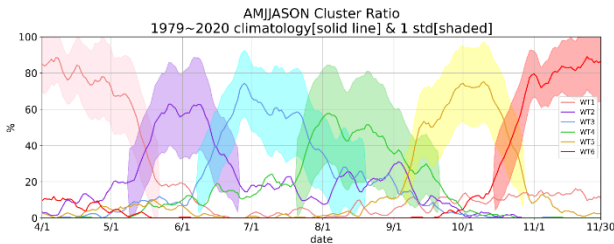


圖 2：1979 至 2020 年 4 至 11 月每日 Weather Type 所占比例圖，所占比例大於 20% 的氣候平均值上下一個標準差為著色範圍。

將各個 WT 按照最常出現時間編號，從圖 2 可以發現 WT1 的主要發生時間在 4 至 5 月中，WT2 為 5 至 6 月，WT3 為 6 月中至 8 月中，WT4 為 7 月底至 9 月中，WT5 為 9 至 10 月，WT6 則為 10 月中至 11 月。也可以透過圖 2 每個 Weather Type 發展時間的更迭發現季節變化，數據導向客觀判斷以天氣類型為基礎的季節有別於按月份劃分的日曆季節，更能表現季風氣候特徵。

(二) 天氣類型與氣候平均場的對照

1. 天氣類型

Qian et al. (2021) 指出 WT 的季節特徵在扣除了包含 WT 每月發生比例計算的 WT 背景氣候場之後可以看得更清楚，而扣除氣候背景場的 WT 稱為 WT 距平。Weather Type 的氣候背景場計算方式為先得出 1979 至 2020 年 4 至 11 月每個月的氣候平均值後依照各個 Weather Type 每個月所佔比例去分配。

WT_i 's climatology

$$= \sum_{m=4}^{11} Month_m \text{ climatology} \times WT_i \text{ ratio in } Month_m$$

圖 3 為各個 Weather Type 的風場與降水距平。WT1 為典型的春季氣候型態，可看到很明顯的赤道東風，而臺灣地區以及海洋偏乾、華中地區則偏溼；WT2 為臺灣發生梅雨季的氣候型態，在南海上的反氣旋、東海上的氣旋以及臺灣地區附近明顯的西風是這個 Weather Type 的氣候特徵，此時臺灣地區附近偏溼，

而南海和長江流域則偏乾；WT3 為長江流域發生梅雨季的氣候型態，其氣候特徵為菲律賓外海的氣旋、西北太平洋反氣旋以及長江流域附近明顯的西南風，此時長江流域和低緯度地區偏溼，而西北太平洋附近偏乾；WT4 的氣候特徵為南海有明顯的氣旋，此時降水主要集中在迎風坡；WT5 為秋季的氣候型態，南海上的氣旋減弱並向東移至菲律賓海，此時臺灣地區附近偏乾；WT6 為典型的冬季氣候型態，歐亞大陸上有反氣旋，使得臺灣地區受北方乾冷空氣影響雨量較少。

圖 2 與圖 3 皆顯示 WT2 和 WT3 分別為臺灣梅雨季以及長江梅雨季發生時期，也是本研究會著重的 Weather Type。

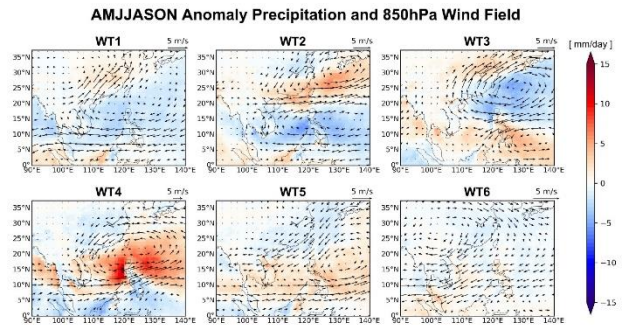


圖 3：各個 Weather Type 1979 至 2020 年 4 至 11 月 850 hPa 距平風場(vectors)與 1998 至 2020 年 4 至 11 月距平降水場(shaded; mm/day)。

2. 春末、臺灣梅雨、長江梅雨的氣候平均場

圖 4a 的春末距平場可以發現東亞地區普遍偏乾；圖 4b 為臺灣梅雨時期，有明顯氣旋出現在東海附近，而臺灣附近地區降水為正距平，長江流域附近則為負距平；圖 4c 為長江梅雨時期，可發現西北太平洋上副高的訊號，而中南半島、菲律賓迎風面以及長江流域降水皆為正距平，臺灣附近地區則為負距平。

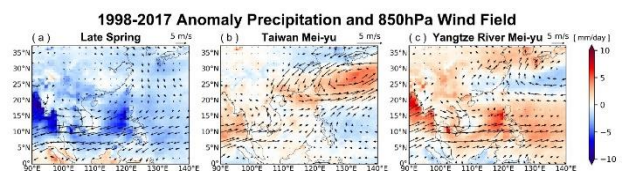


圖 4：1998 至 2017 年 (a) 春末 (4/1~5/10)、(b) 臺灣梅雨 (5/11~6/14) 和 (c) 長江梅雨 (6/15~7/31) 850 hPa 距平風場 (vectors) 與距平降水場 (shaded; mm/day)，氣候平均值為 1998~2017 年 4~7 月。

(三) 比較2020與2021降雨特徵

1. 氣候平均距平場

從2020年臺灣梅雨時期的降水距平場(圖5b)可以發現臺灣和長江地區為正距平，而西北太平洋反氣旋有明顯的訊號；2020年長江梅雨時期的降水距平場(圖5c)可以發現長江地區為非常明顯的正距平訊號，臺灣地區則為負距平，而西北太平洋反氣旋則明顯西伸至中國南方。

從2021年春末的風場距平(圖6a)可以看到在菲律賓外海有明顯的氣旋，而臺灣附近區域為降水負距平；在臺灣梅雨時期(圖6b)可以看到明顯的反氣旋訊號，臺灣及長江流域地區為降水正距平；在長江梅雨時期(圖6c)西北太平洋地區則有氣旋，長江流域和菲律賓外海地區為降水正距平，臺灣地區則偏乾。

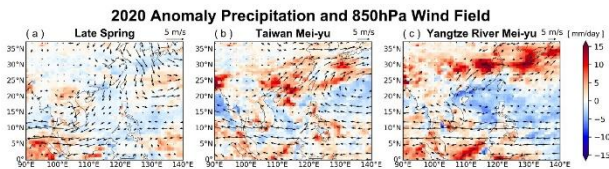


圖 5：同圖 4 但為 2020 年且氣候平均值為 1998~2017 年春末、臺灣梅雨和長江梅雨時期。

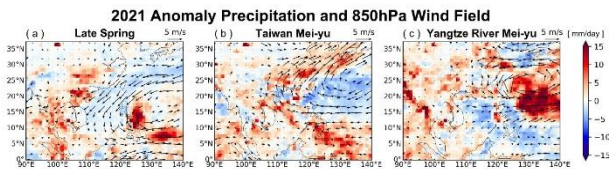


圖 6：同圖 4 但為 2021 年且氣候平均值為 1998~2017 年春末、臺灣梅雨和長江梅雨時期。

2. 長江、臺灣降水指數在兩年4-7月的變化

從圖7可以發現長江流域在2020年和2021年整體偏溼，在2020年在6月初(P32+P33)後數值皆明顯高於1998~2017，而2021年在5月前期(P25+P26 ~ P28+P29)和6月底至7月(P36+P37 ~ P42+P43)的數值明顯較高，有兩波峰值的出現，與2020年強降水的發生時間和頻率不太相同。

從圖8可以發現臺灣附近地區在2020年和2021年整體偏乾。2020年在5月中(P27+P28 ~ P29+P30)的降水指數比1998~2017年高，而2021年在6月前期(P31+P32 ~ P35+P36)的降水指數較高，其餘時段2020年和2021年皆低於1998~2017年。

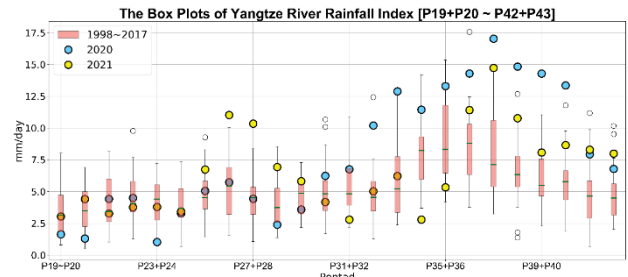


圖 7：1998~2017 年每旬長江降水指數箱形圖，藍點為 2020 年每旬長江降水指數，黃點為 2021 年每旬長江降水指數。空間範圍為 28°-34°N, 110°-122.5°E，降水指數單位為 mm/day。

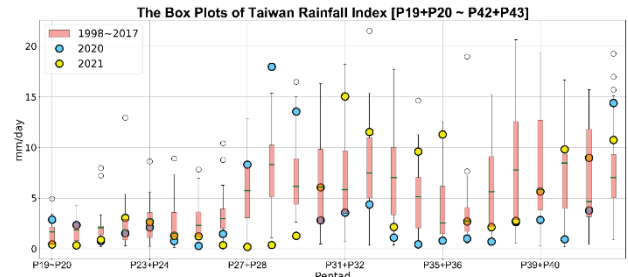


圖 8：同圖 7 但為臺灣降水指數且空間範圍為 18° - 24°N, 116° - 126°E。

(四) 比較2020與2021環流特徵

由於WT2和WT3分別為臺灣梅雨季時期與長江梅雨季時期，而2020年和2021年在梅雨季都發生極端降水事件，因此想藉由圖3中WT2和WT3的環流和西風特徵來了解2020年與2021年和氣候平均值的差異，以及比較這兩年的不同之處。

圖9中南海反氣旋指數、東海氣旋指數、臺灣西風指數、西太平洋反氣旋指數和長江西風指數在這四個月皆以正距平為主，而菲律賓海氣旋指數則以負距平為主；其中，西太平洋反氣旋和長江西風在2020年6、7月較強盛，與文獻(Ding et al., 2021; Zhou et al., 2021)指出導致長江流域地區發生劇烈降水的主要原因相符。從南海反氣旋指數在7月仍為正距平可以看出此時西北太平洋反氣旋持續偏強，副高環流勢力甚至籠罩南海，使得臺灣和南海北部持續偏乾。

圖10中4月除了菲律賓海氣旋指數有明顯的正距平值外，其他指數皆以負距平為主；2021年5月6個指數皆以正距平為主，尤其是臺灣西風指數、西北太平洋反氣旋指數和菲律賓海氣旋指數；而6、7月菲律賓海氣旋指數、西北太平洋反氣旋指數與長江西風指數皆以負距平為主，與2020年的環流特徵不太相同。

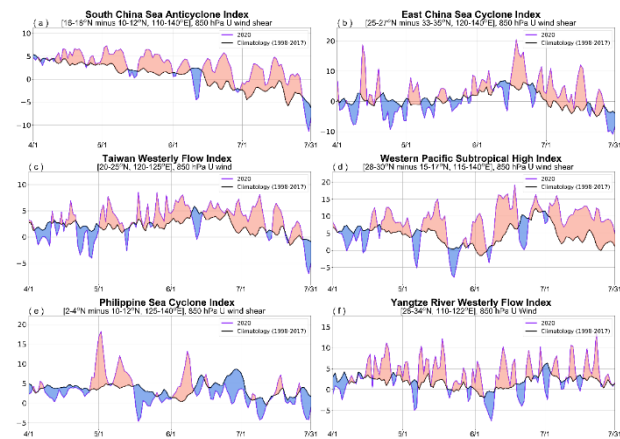


圖 9：2020 年和氣候平均值 4 至 7 月的 6 種指數，分別為(a)南海反氣旋指數、(b)東海氣旋指數、(c)臺灣西風指數、(d)西北太平洋反氣旋指數、(e)菲律賓海氣旋指數和(f)長江西風指數，氣候平均值為 1998 至 2017 年的 20 年平均。

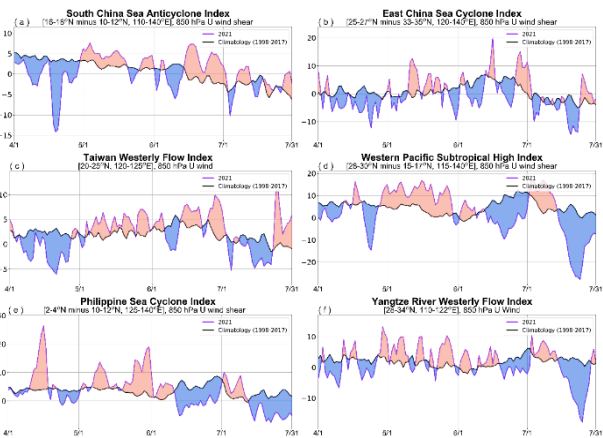


圖 10：同圖 9 但為 2021 年。

四、結論與討論

從以上的研究結果可以發現，長江流域在2020年和2021年梅雨季整體偏溼，而臺灣附近地區則偏乾；從2020年4-7月逐日Weather Type可知WT2發生頻率較低且WT3提早出現，而在WT3的距平場中可以看到副高的訊號(圖3)，從圖9d也指出2020年西北太平洋反氣旋指數為明顯正距平，Ding et al. (2021)的論文中提到副高邊緣的低層西南風噴流會控制從南海、印度洋往長江流域的水氣輸送，因此可推測2020年強盛的副高為導致長江地區發生異常降水事件的主要原因；而從圖10的環流指數看到副高在2021年6月中旬之後有季內尺度的劇烈震盪現象，6月中下旬副高偏弱，7月上旬副高轉強而7月下旬再度偏弱並在長江流

域出現東風距平，東海低壓和長江流域西風指數有類似的震盪變化(東海出現高壓距平時長江為東風距平)，這樣的季內震盪現象和長江流域及臺灣2021年劇烈降水的關係有待後續研究釐清。

2020年長江梅雨時期臺灣附近呈現大範圍偏乾的情形(圖5c)，在空間上位處長江地區滯留鋒雨帶的南側，對應到副高籠罩的區域，不利於降雨的發生。透過南海反氣旋指數可知在4-7月是以正距平為主，而此時西北太平洋反氣旋指數也為明顯的正距平值，因此推測此時西北太平洋反氣旋持續偏強，副高環流勢力甚至籠罩南海，使得臺灣和南海北部持續偏乾。而從圖6c和圖10可知2021年副高勢力較弱，紓解了臺灣2020年5月下旬開始延續一年的乾旱現象。

從以上的討論我們可以得知副高在梅雨季具有重要的地位，對梅雨的發展時程或降雨強度都具有關鍵的影響。副高特別強可能和熱帶太平洋以及印度洋海面溫度異常有關，2020年夏天之前的秋天印度洋發生有紀錄以來最強的正偶極事件，Zhou et al. (2021)認為這個事件激發的沉降海洋羅士培波(downwelling oceanic Rossby waves)，使印度洋海溫在2020年夏天維持高溫，熱帶對流在赤道附近偏強，加強了副熱帶高壓。也有研究(Pan et al. 2021)指出赤道太平洋在2020年夏天從微弱的CP El Niño轉變為La Niña，加強了印尼群島海洋陸地區域的對流，也有助於副熱帶高壓加強。過去的1998與2016年為正偶極事件與強聖嬰年發生後一年，同時長江地區都有發生較強的梅雨(Ding et al., 2021)，在未來可以去研究極端異常降雨與大氣邊界層的陸面及海面氣溫的關係，以及這兩年在印太海陸區域氣候季內震盪主模態的差異及影響。

參考資料

Ding, Y. H., and J. C. L. Chan, 2005: "The East Asian summer monsoon: An overview." *Meteorology and Atmospheric Physics*, **89(1-4)**, 117-142, doi:10.1007/s00703-005-0125-z

- Ding, Y. H., Y. Y. Liu, and Z.-Z. Hu, 2021: “The record-breaking meiyu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies.” *Adv. Atmos. Sci.*, doi:10.1007/s00376-021-0361-2
- Michelangeli, P.A., Vautard, R. and Legras, B., 1995: “Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity.” *Journal of the atmospheric sciences*, **52(8)**, pp.1237-1256, doi: 10.1175/1520-0469(1995)052<1237:WRRAS>2.0.CO;2
- Pan, X., T. Li, Y. Sun, and Z. W. Zhu, 2021: “Cause of extreme heavy and persistent rainfall over Yangtze River in summer 2020.” *Adv. Atmos. Sci.*, doi:10.1007/s00376-021-0433-3
- Qian, X., Di Renzo, M., & Eckford, A, 2021: “K-Means Clustering-Aided Non-Coherent Detection for Molecular Communications.” *IEEE Transactions on Communications*, **69(8)**, 5456–5470, doi:10.1109/tcomm.2021.3075523
- Qian, J.-H., M.-M. Lu, C.-H. Sui, 2021: Evolution of South China Sea and East Asian Monsoon from Spring to Summer by the Progression of Daily Weather Types. *Int. J. Climatology*. (submitted)
- 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, doi:10.1175/jcli-d-15-0274.1
- Wang, B., Lin H. (2002), “Rainy seasons of the Asian-Pacific monsoon.” *J. Climate*, **15**, 386–398, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0386:RSO TAP>2.0.CO;2
- Zhou, Z.-Q., Xie, S.-P., & Zhang, R, 2021: “Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions.” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **118(12)**, doi:10.1073/pnas.2022255118
- 傅鏗漩、林聖琪、吳宜昭、施虹如、何瑞益、張志新，2021：災害防救科技與知識專欄—2020年長江流域雨季洪災。國家災害防救科技中心災害防救電子報。第188期。
<https://www.ncdr.nat.gov.tw/UploadFile/Newsletter/20210309105056.pdf>

Abstract

During recent two years East Asian monsoon region experienced extremely heavy Mei-yu rainfall that caused severe floods in China, Korea and Japan. Taiwan saw severe rainfall deficits during 2020 and delayed abundant Mei-yu rainfall in 2021. The contrast of the abnormal Mei-yu rainfall patterns during these two years provides a good opportunity for us to understand the relationship between Mei-yu and East Asian monsoon evolution. In this paper we analyzed the monsoon evolution using the data-driven concept by identifying the daily weather types (WTs). The WTs are classified by a k-means clustering analysis based on 850 hPa winds from April 1 to November 30 in the 42-year period of 1979 to 2020. Six WTs are identified, typifying the progression of weather regimes in the monsoonal evolution. The evolution of the WTs is gradual but intermittent, representing the weather-within-climate information. The Mei-yu season (May~July) is characterized by WTs that show longer persistence than other types. It suggests a promising potential to use the WTs as a guideline for diagnosing the major large-scale influential factors on Mei-yu rainfall patterns. We will investigate and discuss the extreme rainfall in Taiwan and Yangtze River and the climate variability in 2020 and 2021.

Key words: East Asian monsoon, Mei-yu season, climate variability, k-means clustering analysis, monsoon evolution