

梅雨期間 WEPS 系集模式降水預報的分群特性 及合成天氣分析的應用

賴曉薇¹ 蘇奕叡¹ 吳英璋¹ 陳思穎¹ 陳文柔¹

徐驊¹ 蔡金成¹ 羅翊銓¹ 張保亮² 洪景山³

¹中央氣象局氣象資訊中心 ²中央氣象局氣象衛星中心 ³中央氣象局氣象科技研究中心

摘 要

伴隨梅雨鋒面的天氣系統內常存在複雜的多重尺度天氣交互作用，數值模式對於其綜觀環境的掌握能力雖逐年精進，但對於造成臺灣劇烈降水的局部對流仍有相當大的預報不確定。中央氣象局發展了以WRF為基礎的區域系集預報系統（WRF Ensemble Prediction System, WEPS），其系集成員可提供不同的定量降水預報，得以讓使用者掌握天氣預報的不確定性。為協助使用者有效的摘要大量的系集資訊，藉由WEPS成員的預報具有分群的特性，使用自組織圖（self-organizing maps, SOM; Kohonen, 1982）聚類演算法針對WEPS系集降水特徵進行資訊歸納。

本文以2021年5-6月WEPS降水預報為例分析梅雨期的群集特性。系集成員數最多的群集1平均大致佔2/3成員，前置時間較長時系集成員傾向於向主導群集中，而非分散在其它群集；而雖然弱勢群集（群集2-4）的成員數略減少，群內和群間的差異性則大致是增加的。群集1與降雨觀測差異度較小，但校驗分數及觀測相關性稍低於群集2。針對受梅雨鋒面影響的強降雨期的群集成員相關的天氣場進行合成，分析其預報特性及與降水情境的關聯。中低層風場和700hPa的天氣場與分析場的相關性較高；而850hPa相當位溫 and 925hPa水氣的相關性則較低。而與中層水氣有關的天氣場群集差異性/相關性與降水群集的差異性/相關性之間則呈現中度相關。個案在850hPa相當位溫合成天氣圖的分布歧異與降水情境相對應。

透由群集分析所得之降雨預報情境，具多數成員之群集的降水情境發生的機率較大，需要重視；具少數成員的群集，雖然發生機率較小，在可能發生極端降雨的情境時亦需要留意。差異性大的合成天氣場可作為降水預報不確定性來源的診斷參考。

關鍵字：系集預報系統、群集分析、梅雨

一、前言

每年的5~6月是臺灣的梅雨期，伴隨梅雨鋒面的天氣系統經過臺灣附近時，各地常有機會發生夾帶雷陣雨的連續性降雨。臺灣的年雨量大約有19-33%的集中在這段期間，梅雨鋒面是除了颱風之外對民生影響最重大的天氣系統。因著梅雨期有連續降雨的特性，使得土壤含水量大，伴隨梅雨鋒面之對流系統所造成的局部性豪（大）雨若出現在山區，可能導致落石、坍方、土石流、山洪爆發等災害，若是在低窪地區則可能造成淹水災情。

梅雨鋒沒有顯著的斜壓性，鋒後東北風的深度一般小於 1 公里，鋒面南側平均大尺度氣流以隨高度增加的西南氣流為特徵。西南氣流帶來豐沛水氣，在850hPa可發現高的相當位溫軸線，對應著鋒面主要的對流上升區域（Chen and Yu 1988；陳等 2007）。當綜觀環境高層存在噴流條的分流區和中層短波槽提供垂直上升運動，對流因釋放潛熱而增強低層正渦度與高度梯度，有利於低層輻合與鋒生（Chen et al. 1997；Chen and Tseng 2000；Chen et al. 2003；Chen et al. 2007），而低層輻合形成的跨鋒面次環流，進一步透過科氏加速西南風增強綜觀尺度低層噴流（SLLJ；Chou et al. 1990；Nagata and Ogura 1991；Chen et al. 2000）。在南海北部區域，有時出現在925-950 hPa的海洋邊界層噴流（MBLJ），被認為對於臺灣附近的水平水氣輸送中發揮著重要作用（Chen et al. 2018；Tu et al. 2019）。溫暖潮濕的低層大氣具有條件不穩

定，低層風切和豐富的水氣結合有利於形成有組織的MCS，並帶來劇烈降水，特別是後造型（back building）對流系統經常在局部地區造成持續性降水（Chen and Chen 2003；Chen et al. 2007；Chen et al. 2018）。而鋒前MCS之非絕熱加熱並伴隨SLLJ增強，有機會造成鋒面北退，並帶來二度降水高鋒（Yeh and Chen 2004；Chen et al. 2006）。

臺灣局部豪雨事件的發生經常與環境氣流受島嶼複雜地形調整或與局部環流的加強密切相關（Akaeda et al. 1995；Li et al. 1997；Teng et al. 2000；Chen et al. 2007；Wang et al. 2005）。盛行西南氣流低層受北部山脈地形阻塞導致臺灣西北部沿岸形成屏障噴流，加強局部水氣輻合，在地形迎風面上游之臺灣海峽中北部產生中尺度風切帶組織成線狀對流，若持續移進西北部陸地則帶來沿海劇烈降水（Trier et al. 1990；Chen and Hui 1992；Chen and Chen 1995；Chen and Li 1995；Li and Chen 1998；Yeh and Chen 2002）。而在西南部地區，山脈地形走向可能造成偏西風在迎風面、偏西南風沿著河谷抬升，而加深局部對流。西南山區持續性的降雨常與深厚而長延時的LLJ有關。另外，與地形有關的降雨多半呈現顯著的日變化特徵（Krishtawal and Krishnamurti 2001；Kerns et al. 2010）：伴隨屏障噴流的西北沿岸對流降雨常在清晨進一步被增強；西南部較大時雨量發生的最大頻率是發生在午後，特別是山區，第二個極值則在清晨發生於沿岸平原。在

梅雨鋒通過後的短時間內，臺灣東北部也有機會在下午出現強降雨（Chen et al. 2007）。在西南部，前一日的對流陣雨形成冷池或殘留大片雲層造成次日日出後加熱差異，則在西南海岸出現明顯阻塞，沿岸有較強的離岸風分量，溫暖潮濕的 LLJ 被準靜止、淺的鋒面或邊界抬升，對於次日對流的激發和增強有很大的影響（Davis and Lee 2012；Xu et al. 2012；Wang et al. 2014a, b；Tu et al. 2014）。

近年來數值天氣預報藉由預報技術和電腦運算能力提升，模式已能有效掌握大氣是否存在有利深對流發展的條件，對於綜觀尺度天氣的預報有長足進展，提前幾天便能可靠的預測劇烈天氣。然而，伴隨梅雨鋒面的降水系統大多為多重尺度交互作用的天氣系統，同時受到地形或和局部環流的影響和加強，複雜的中尺度過程導致較低的模式定量降水預報能力，數值模式難以提供準確的決定性降水預報。由於大氣流體固有混沌的特性（Lorenz 1963），擾動呈非線性成長，在使用數值模式預報時，微小的初始差異就可能在積分之後產生顯著差別，加上模式數值方法、物理過程、邊界場的差異等諸多影響，使得不同的模式有機會預報出截然不同的天氣型態。藉此，系集預報系統 EPS 應運而生：它提供了一組預報，用以儘可能涵蓋所有可能發生的天氣狀況。由 EPS 的預報資訊可得到關注事件的發生機率和不確定性的分布，也成為評估劇烈天氣風險和發布預警的寶貴工具。

然而，從另一方面來說，當系集成員的數量很大時（例如，ECMWF EPS 有 51 個成員），對龐大的預報資訊進行直接的氣象詮釋幾乎是不可能的。因著模式設定的關係，系集成員預報的離散情況主要受到模式物理多樣性來影響，彼此間會呈現分群的特徵，透過群集分析（或稱做聚類）可對模式輸出進行資訊摘要（Alhamed et al. 2002；Yussouf et al. 2004；Johnson et al. 2011a, b）。

聚類是一種降級選擇（down selection）的方式，將來自系集的相互接近的單個成員預報組合在一起，從而濃縮系集的大量資訊（Tracton and Kalnay 1993）。可藉由保留跨越預測不確定性空間的系集成員子集合，同時排除冗餘的成員。利用聚類來摘要大型系集的輸出，形成一些預報情境以作為使用者得以進一步應用的指引，是系集預報後處理的趨勢（Atger 1999；Brill 2015）。群集分析已成功應用於颱風路徑和結構預報（Evans et al. 2006；Don et al. 2016；Kowaleski and Evans 2016）。Brankovic et al.（2008）將聚類應用於識別不同尺度（全球和區域）系集預報之間的不一致，同時表示尚未發現基於高空天氣場的聚類和預報降水的形態之間存在明確的關係。

本研究以 2021 年 5-6 月系集預報為例，藉著系集預報分群的特性，基於降雨型態利用類神經網路之聚類技術將系集降水預報進行分群，分析群集的分群特性及預報表現。並利用降水群集連結於所伴隨

的天氣環境，探討可能造成群集降雨情境差異的天氣條件特徵。以聚類方法濃縮大量的定量降雨預報資訊，提供可能發生的降水情境及發生機率給預報員；為協助預報員進行梅雨季劇烈天氣的預報情境的詮釋，進一步建立各群集降水分布與天氣系統的連結。最後根據群集分析的特性，提出在梅雨預報應用上的建議。第2節將分別介紹使用資料及聚類方法比較。第3節分析2021年梅雨期間的降雨預報群集特性。第4節針對劇烈降水個案討論各群集所伴隨的有利天氣條件具備何種不確定特性。第5節為結論與總結。

二、資料與方法

為掌握天氣預報的不確定性，氣象局發展以WRF為基礎發展的區域系集預報系統（WRF Ensemble Prediction System，簡稱WEPS。李和洪2014；Li et al. 2019）。其系集成員提供了不同的預報，據以讓使用者得知可能發生的各種天氣情境，來掌握天氣預報的不確定性。現行WEPS模式有20組系集成員，模式解析度為15/3 km二層巢狀網格，每日更新4次，預報長度為108小時。本研究收集WEPS在2021年5-6月間20組系集成員的預報結果，進行群集特性研究。在本研究中，我們是針對WEPS降水預報逐12小時累積雨量進行聚類。

本研究所使用的聚類技術為自組織圖（self-organizing maps，SOM；Kohonen 1982）。SOM是特殊類型之人工類神經網路技術，透過自我組織的學習過程，通過神經元權重（neuron weights）對原始資料進

行降維，呈現整體輸入資料在拓樸（topology）空間中分佈情況，再依據這些資料間的拓樸分布關係對資料進行聚類。一般認為SOM可提供較傳統資料特徵萃取與樣式辨識技術更為客觀的分析結果。近年來，SOM在氣候水文研究的應用越來越多（Alexander et al. 2010；Horton et al. 2015；Lennard and Hegerl 2015；Swales et al. 2016；Nguyen-Le and Yamada 2019；Luong et al. 2020；Doan et al. 2021）。Wu et al.（2017）整合臺灣綜合數值天氣預報系統的定量降水預報並使用SOM進行分群，文中考慮到類神經網路的計算效率，以及EPS系統的成員數與應用需求，建議將群集數目定為4群。本文援引其結果同樣將群集數目訂為4群，並將依群集內成員數由多至寡進行排列來設定群集的編號。

在群集特性的評估指標度量上，本文使用歐幾里得距離做為2者的差異性指標、以相關係數（correlation coefficient）做為相關性指標、並以結構相似性指標（Structural similarity index，Wang et al. 2004）做為相似性指標，來分析評估各群集的預報特性。其中差異性指標（以下簡稱DIST）算式是參照均方根誤差：

$$\text{DIST}(X, Y) = \frac{\sqrt{\sum_i (X_i - Y_i)^2}}{N}$$

其中XY為兩個成員的資料，N為空間資料點數。DIST代表2成員間的數值差異，其值的大小受到降雨量的影響，降雨量大的格點或事件會帶來較大的DIST。相關性指標（以下簡稱CORR）算式是根據皮爾森相關

係數：

$$CORR(X, Y) = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

降雨型態分布相仿的2成員其CORR較高。結構性相似指標（以下簡稱SSIM）算式是將兩筆矩陣資料視為圖片，並藉由其亮度、對比度以及結構性來計算其相似性，其簡化後之公式為：

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C1)(2\sigma_{xy} + C2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C2)}$$

其中 μ_x 及 μ_y 、 σ_x 及 σ_y 分別為x和y的平均質和標準差，C1和C2則為設定常數，本文依

據降水量之尺度，分別設定為25跟225。

利用以上三個指標進一步計算某群集內每個成員對應另一個群集成員的平均評估指標，以此當作群間之特性評估指標（示意圖如圖1a）；另外，計算同一個群集內不同成員間之平均評估指標，作為群內特性評估指標（示意圖如圖1b）。而如果某個群集內不及兩個成員，則不計算該群集內相關之各項指標。最後再利用群內跟群間差異兩個數值的比值，得當其差異性/相關性/相似性商數。

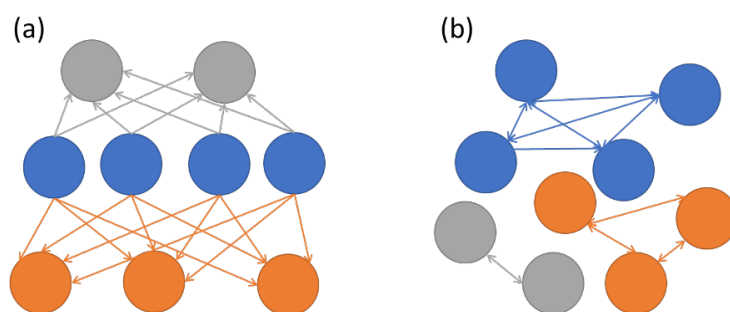


圖1 (a)群間之特性評估指標計算示意圖。(b)群內之特性評估指標計算示意圖。不同顏色代表不同的分群，詳述見內文。

Figure 1 Schematic diagram of the calculation of the characteristic evaluation index (a) between clusters and (b) within clusters. Different colors represent different clusters, see the text for details.

三、系集模式降水群集的預報特性

我們針對2021年5-6月的預報分為臺灣受梅雨鋒面影響出現強降雨期間（包含2021年5月28-30日，6月4-6日及19-23日）與其它非梅雨鋒面影響的弱降雨期間。使用SOM聚類之後，根據成員數多寡來排列群集順序，系集成員數最多的為群集1，其群內成員數佔系集成員數的一半以上（圖2

）；相較弱降雨期，強降雨期群集1的成員數較少，成員分散至其它群集。預報的前置時間（lead time，以下簡稱LT）較長，分至群集1的成員數稍增多，分至群集2-4的成員數則略減少。檢視同一群集內成員的DIST（圖3。SSIM及CORR結果一致，圖略），強降雨和弱降雨期被很顯著的區分開：弱降雨期群集內成員的DIST普遍較小。

群集1群內成員相異性不受LT影響；而在群集2-4方面，大致上當LT愈長，群內DIST愈大。只有群集4在LT 72小時DIST變小，應與聚類後常只分至1個或0個成員有關。圖4展示強弱降水期間之群集間的DIST（SSIM及CORR相仿，圖略），在強降雨期的群間差異度大致比弱降雨期大。大致而言，在60小時內，隨群集成員數愈少，群集間DIST愈大。LT愈長，群間DIST亦略增。

進一步藉由觀測校驗比較群集的降雨預報表現。利用機率擬合平均方法（Probability-Matched Mean；葉等2016）來產生四個群集的雨量預報，並以考慮所有系集成員的WEPS機率擬合平均（以下簡稱為WPM）做為比較基準。以公正預兆得分（Equitable Threat Score，ETS）及與偏倚得分（bias score，BS）來討論之（圖5）。WPM在降水閾值 10 mm / 12h以下有較佳的ETS分數；群集2-4的ETS在降水閾值 10-40 mm / 12h有機會優於擁有最多成員的群集1。BS結果顯示，相對於所有的群集降水預報WPM在梅雨鋒面影響強降雨期間的預報偏差最小，為稍偏預報不足，而在群集2-4則為顯著的過度預報，群集1在各種降雨狀況則皆向預報不足。圖6比較各群集雨量預報和WPM與降雨觀測間的各项評估指標。整體而言，LT愈長，強降雨之觀測DIST增加、CORR和SSIM下降。WPM有較小的DIST和較高的CORR及SSSIM。群集1在DIST與SSIM方面與WPM

相仿，但CORR則大致低於群集2，在較長的LT甚至低於群集3。以2021年其中2個梅雨強降水個案的具體呈現來探討群集降水與觀測之量度分數與降雨分布型態關聯（圖7）。2個案在SSIM方面皆呈現偏高的分數，不同群集的分數差異不大，從降水型態上大致指出降雨的範圍一致性高，分數則高的趨勢。CORR呈現較低的分數，不同群集的分數差異也較大，從降水型態上大致指出降雨的型態一致性高，CORR則高的趨勢。DIST的分數與觀測雨量的差異有關，當降雨預報偏差大時則數值高，例如個案2的群集2-4皆有過度預報的特徵，DIST數值則高。

總的來說，以降雨預報進行聚類的群集大致可反映系集預報系統的預報特性。強降雨的群集內和群集間差異性皆大於弱降雨。當LT增長，系集成員傾向於集中於主導群集（群集1），而不是分散在各群集；反之，弱勢群集（群集2-4）的群集內和群集間的DIST則大致是增加的。與觀測的比較來評估群集的預報表現，基於擁有完整系集成員WPM的預報表現大致優於群集，在中小雨的ETS較高，在梅雨鋒面影響強降雨期間的預報偏差最小。群集中的群集1的預報性能稍低於其它群集，由群集1可能是降水預報偏向預報不足而呈現較小的觀測DIST。而群集2有較高的觀測相關，表示其降雨分布型態有較高的參考性，但在降雨量方面具有過度預報的特性。

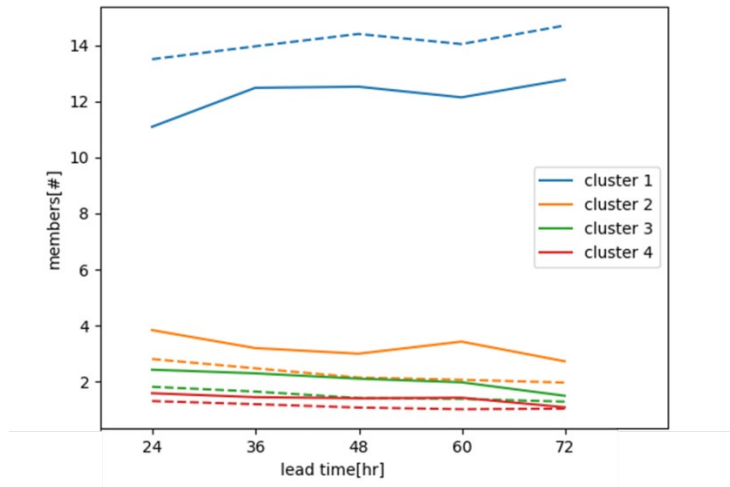


圖2 不同前置時間之各群集的系集成員數分布。實線為梅雨鋒面影響強降雨期間，虛線為非梅雨期的弱降雨期間。(橫軸為前置時間，代表前12小時的累積降雨資料計算結果，下同)

Figure 2 The distribution of ensemble members for each cluster at different lead times. The solid line is the period of heavy rainfall affected by the Meiyu front, and the dashed line is the period of weaker rainfall that is not during the Meiyu period.

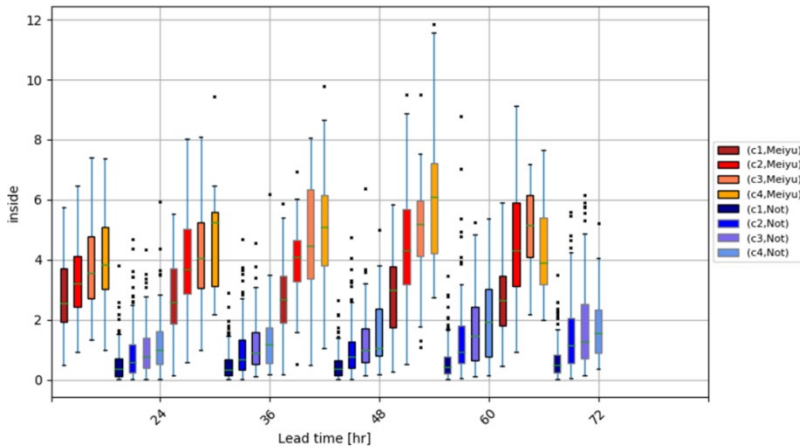


圖3 不同前置時間之各群集內DIST的盒鬚圖。暖色系為梅雨鋒面影響強降雨期間，冷色系為非梅雨期的弱降雨期間，同色系盒鬚從深色至淺色分別為群集1-4。

Figure 3 Boxplot of DIST within each cluster at difference lead time. The warm colors refer to the period of heavy rainfall affected by the Meiyu front, and the cool colors refer to the weak rainfall periods other than the Meiyu period.

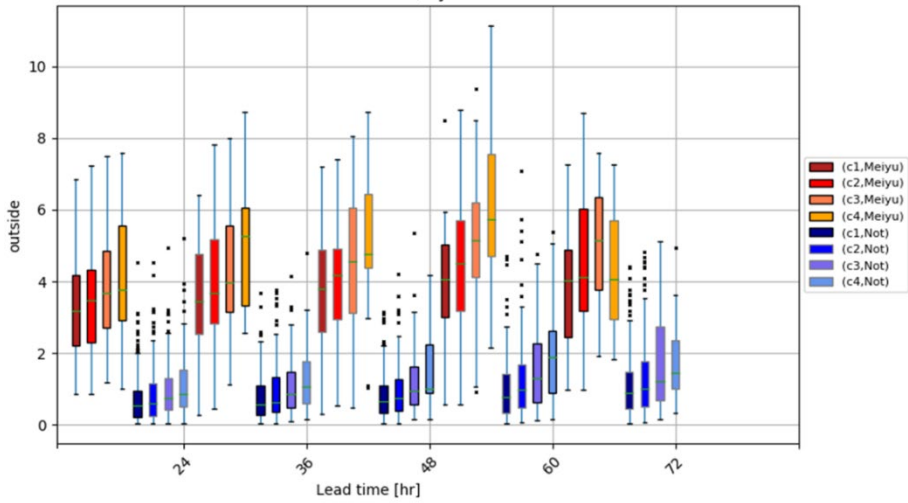


圖 4 不同前置時間之各群集間 DIST 的盒鬚圖。盒色同圖 3。

Figure 4 Boxplot of DIST between each cluster at difference lead time. The box color is the same as in Figure 3.

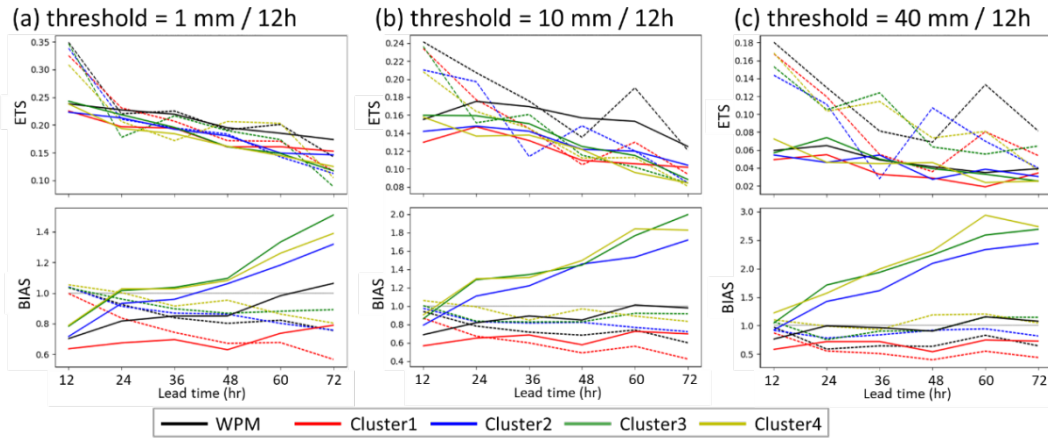


圖 5 WPM 及群集在不同前置時間的 ETS 及 BIAS。(a)為降水閾值 1 mm / 12h；(b)為降水閾值 10 mm / 12h；(c)為降水閾值 40 mm / 12h。實線為梅雨鋒面影響強降雨期間，虛線為非梅雨期的弱降雨期間。

Figure 5 The ETS for NPM and each clusters at different lead times. (a) is the precipitation threshold of 1 mm/12h; (b) is the precipitation threshold of 10 mm/12h; (c) is the precipitation threshold of 40 mm/12h. The solid line is the period of heavy rainfall affected by the Meiyu front, and the dashed line is the period of weaker rainfall that is not during the Meiyu period.

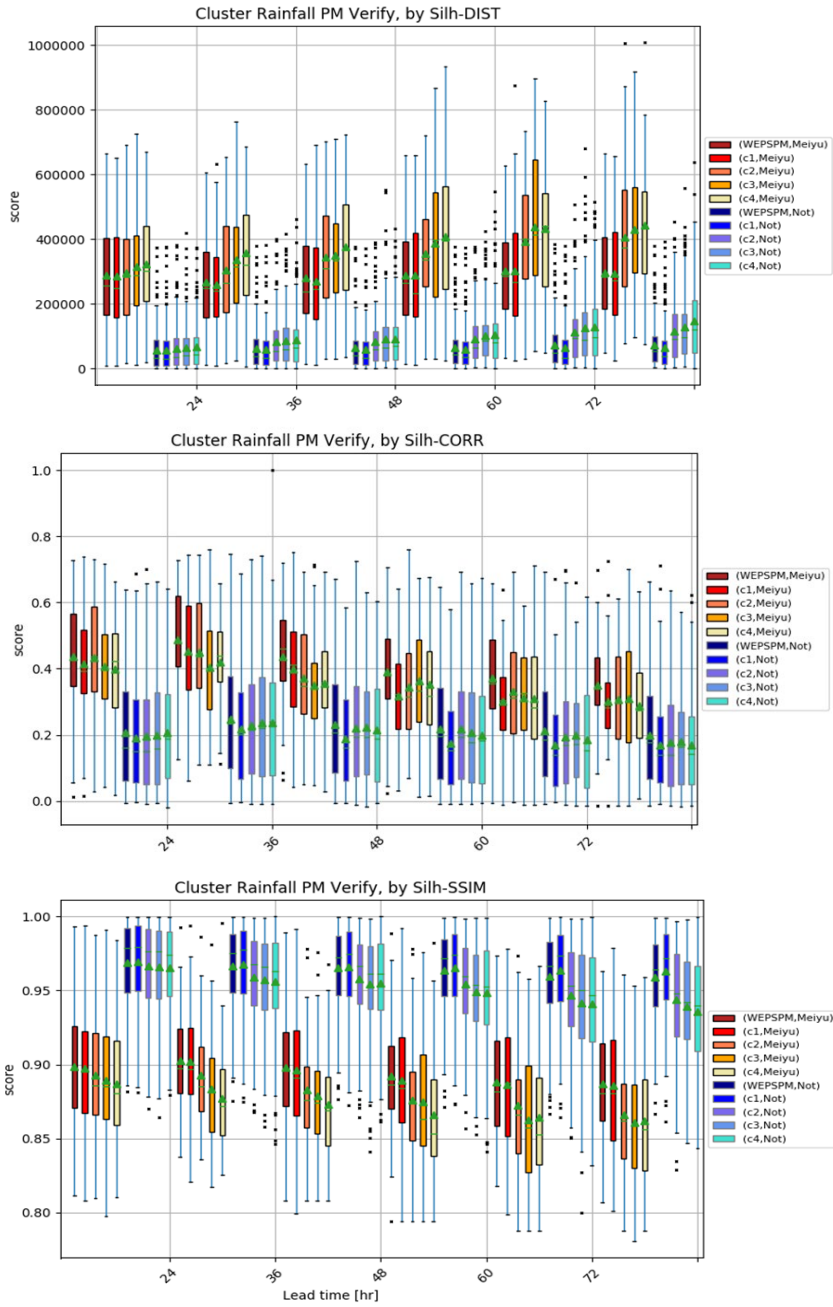
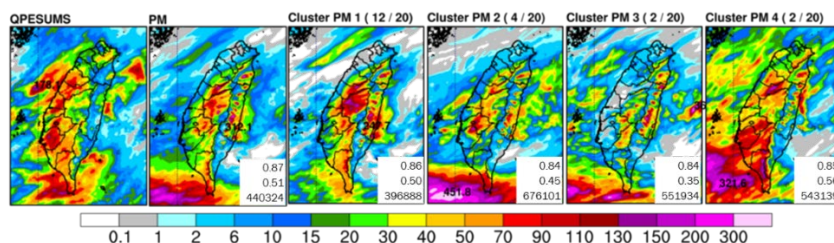


圖6 不同前置時間之WPM/群集與觀測間的DIST(上), CORR (中)和SSIM (下)的盒鬚圖。暖色系梅雨鋒面影響強降雨期間, 冷色系為非梅雨期的弱降雨期間, 同色系盒鬚從深色至淺色分別為WPM及群集1-4。

Figure 6 Boxplot of DIST(top), CORR(middle) and SSIM(bottom) between observations and WPM/each cluster at difference lead time.

(a) Case A - Valid time=20210605 00Z. Forecast time=24-36h



(b) Case B - Valid time=20210622 12Z. Forecast time=36-48h

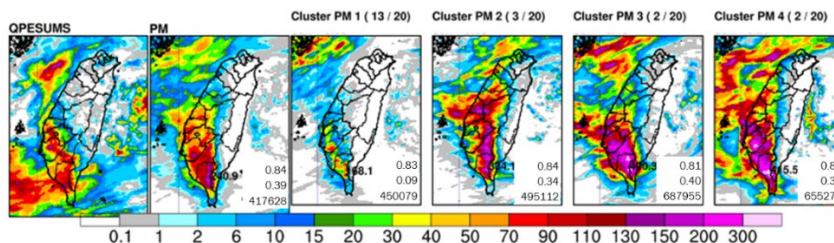


圖7 兩個梅雨個案之觀測、WPM及群集1-4的12小時累積降水分布（右下數字分別是後者與觀測之SSIM、CORR及DIST）。

Figure 7 12-hour accumulated precipitation distribution of observation, WPM, and cluster 1-4 in two Meiyu cases (the numbers on the lower right are the SSIM, CORR and DIST between forecast and observed respectively).

四、降水群集之合成天氣分析在梅雨強降雨期間的特性

本小節旨在連結梅雨期間降雨群集差異與相關之天氣場的關聯。由前述研究指出，中低層氣流提供的垂直和水平風切，及暖濕空氣帶來的條件性不穩定和水氣輻合，是影響局部降水的重要因素。因此，我們針對2021年5-6月間受梅雨鋒面影響的強降雨期間，選取中低層（925hPa、850hPa和700hPa）的風速、相當位溫、水氣及水氣通量，對同一群集之成員的天氣場進行平均得到該群集的合成天氣場，並診斷其對群集降雨情境的關聯。

首先比較「群集成天氣場」與「氣象局區域模式決定性預報分析場」間的

DIST、CORR及SSIM，了解各群集成天氣場的預報性能（圖8僅顯示CORR；DIST及SSIM圖略）。各群集在不同天氣場的CORR大致隨LT增加而降低。在同一LT，群集1的CORR大致稍微優於其它群集，群集3和4的CORR有稍大的變異度。不同高度的風場（LLJ）有較高的CORR，表示模式預報有較佳的掌握能力。在低層水氣相關的天氣場，700hPa的CORR較高，而850hPa相當位溫及925hPa水氣場的CORR較低，表示後者預報能力較低，是預報降水的可能不確定性因素來源。

進一步計算第三節所述之「群集雨量預報與觀測之CORR/SSIM/DIST」與「群集成天氣場與分析場之

CORR/SSIM/DIST」兩者的相關係數，嘗試連結降水不確定性的可能因素（表1）。2者的SSIM的相關係數較低，大部分的天氣場CORR/DIST與降雨CORR/DIST間的相關性亦可以忽略。但在850hPa和700hPa的水氣場及700hPa相當位溫方面則呈現中度正相關。亦即，當群集降水與觀測的CORR較高或DIST較低時，其中層合成水氣場相關的CORR或/DIST可能也存在類似的趨勢。這個結果指出，不同的群集降水情境可能導因於中層水氣的分布差異。

以上一節相同2個梅雨強降水個案為例來探討分析場群集成天氣場與群集降水分布的關聯（圖9）。個案之925hPa風速分布顯出群集與分析場及群集彼此間在風速分布的型態及強度的差異不顯著，僅有一些中小尺度微結構的差異。個案A的群集4在臺灣海峽南部的強風速區域稍大且較靠近沿岸；個案B的群集1至群集4在臺灣海

峽的風速遞增，群集降雨情境亦表現出遞增的形態。相對的，850hPa相當位溫的群集成天氣場可見群集間的溫度場形態、強度分布和細節的差異較大，個案B的群集1至群集4呈現在臺灣海峽高相當位溫的分布區域遞增，且極值的結構和範圍也有所差異，可對應群集降雨情境極值的強度和分布。

綜上所述，合成天氣場與分析場間的CORR較高或DIST較低，代表模式對該天氣參數的掌握力較佳，例如不同高度的風場或700hPa高度的天氣場。與低層水氣相關的合成天氣場與分析場的相關性則較低、差異較大，例如850 hPa 相當位溫或925hPa水氣場，可能是預報降水的不確定性因素來源。而中層與水氣場有關的合成天氣場CORR/DIST與降水的CORR/DIST呈現中度正相關，表示群集所展現出來的天氣場差異可能與降水情境的分布有關。

表1「降水群集與觀測之CORR/SSIM/DIST」與「群集成天氣場與分析場之CORR/SSIM/DIST」的相關係數。

Table 1 Correlation coefficients between "CORR/SSIM/DIST of clusters Precipitation and Observation" and "CORR/SSIM/DIST of cluster composited fields and analysis fields".

<i>Filed</i>	<i>Pres</i>	CORR	SSIM	DIST
<i>LLJ</i>	925	0.14	-0.03	0.20
	850	0.17	-0.06	0.15
	700	0.18	-0.14	0.36
<i>Qv flux</i>	925	0.14	-0.14	0.28
	850	0.17	-0.20	0.20
	700	0.18	-0.34	0.42
<i>Qv</i>	925	0.23	0.34	0.37
	850	0.38	0.33	0.40
	700	0.48	0.27	0.38
<i>Theta-E</i>	850	0.30	0.20	0.05
	700	0.40	0.23	0.38

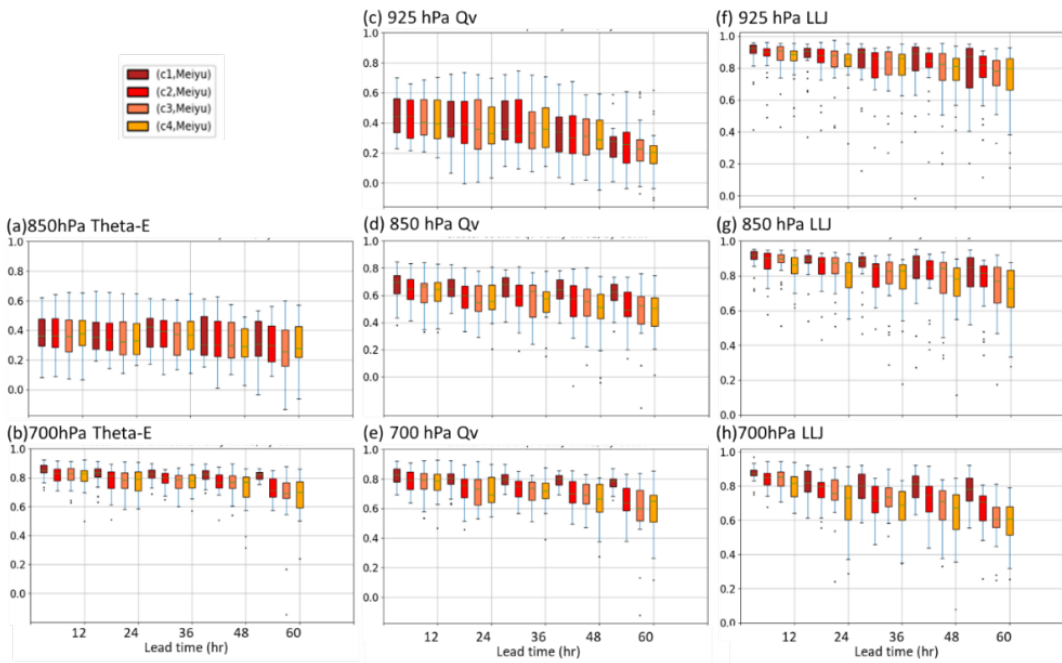
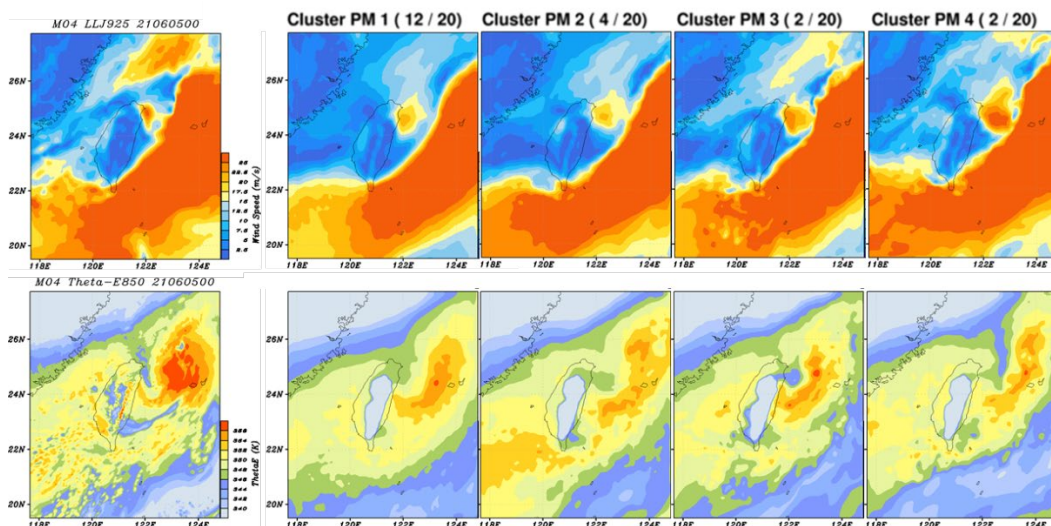


圖 8 群集成天氣場與分析場相關性的盒鬚圖。(橫軸為天氣場之前置時間)

Figure 8 Boxplot of CORR between of composited field of each cluster and analysis field.

(a) case A- Valid time=20210605 00Z. Lead time=24h



(b) case B - Valid time=20210622 12Z. Lead time= 36h

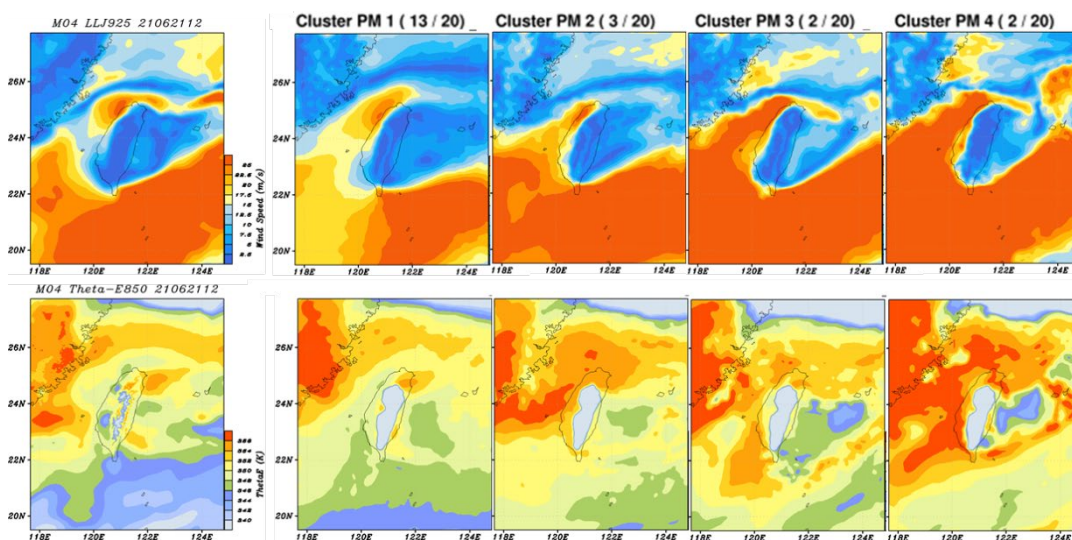


圖 9 同圖 7 兩個案，但上排為 925hPa LLJ 及下排為 850hPa theta-e 之分析場及各群集成天氣場。

Figure 9 The weather map of the contrast between analysis and cluster 1-4 in two Meiyu cases which are the same as Figure 7, but the upper row is the wind speed field at 925hPa and the lower row is the theta-e field at 850hPa

五、結論

伴隨梅雨鋒面的連續性降雨及局部性豪（大）雨可能造成災情，主管機關需要提前進行防災整備，以減少災害損失。數值模式對於綜觀環境預報能力逐年精進，數天前即可掌握梅雨鋒面系統是否臨近臺灣並帶來豪（大）雨。但是伴隨梅雨鋒面的天氣系統內常存在復雜的多重尺度天氣交互作用，對於造成劇烈降水的局部對流仍有相當大的預報不確定。氣象局發展WEPS提供不同的天氣情境，預報人員得藉以掌握預報的不確定性；然而在實務上，預報人員在作業時要對龐大的系集氣象預報資訊是難以即時進行氣象詮釋的。由於系集成員的預報會呈現分群的特徵，透過群集分析可對模式輸出進行資訊摘要。本研究藉由SOM基於WEPS系集降水特徵進行歸納與分群，並進一步分析群集的特性，及降水情境與天氣的關聯，以期提供精練資訊予預報人員進行診斷。

本研究以2021年5-6月WEPS降水預報為例，分析群集在梅雨期間的分群特性及預報表現。相較於弱降雨期，強降雨期的群集內差異性較大，群間差異亦然。系集成員數最多的群集1平均大致佔2/3成員，當前置時間較長時，系集成員傾向於向主導群集集中，而不是分散在其它群集；然而，雖然弱勢群集（群集2-4）的成員數略減少，群內和群間的差異性則大致是增加的。與觀測的比較來評估預報表現，擁有完整系集成員的WPM預報表現大致仍優於各群集，尤其在小雨的預報性能。群集

中的群集1的預報性能卻稍低於其它群集，由群集1展現較小的觀測相異性，並從個案分析推論可能是由於群集1較少出現過度預報。而群集2有較高的觀測相關，表示其降雨分布型態有較高的參考性。

為協助降雨情境詮釋，本研究試圖連結影響降水群集差異的天氣因素，特將群集成員的天氣場進行合成。考慮中低層氣流提供的垂直和水平風切，及暖濕空氣帶來的條件性不穩定和水氣輻合，是梅雨季影響局部降水的重要因素，而選取風場、相當位溫、水氣場及水氣通量進行合成。與決定性預報的分析場相比，相關性高或差異性低的合成天氣場可代表模式對該天氣參數的掌握力較佳，例如不同高度的風場或700hPa高度的天氣場。而與低層水氣相關的天氣場，例如850 hPa 相當位溫或925hPa水氣場，則與分析場的相關性較低，代表模式預報的誤差大，是降水預報不確定性因素的可能來源。另一方面，中層的水氣或相場位溫的分析相關性/相異性卻與群集降水的觀測相關性/相異性呈現中度正相關，表示其所展現出來的群集合成天氣的分布可能與降水情境的差異有關。對於預報誤差較大、不確定性高的天氣因子，基於降水聚類的群集合成的天氣場產品可亦顯示出某種程度的分布歧異，與降水情境相對應。

本研究應用了類神經網路的聚類方法SOM以濃縮大量的系集定量降雨預報資訊，提供可能發生的降水情境及發生機率，並進一步藉由建立群集降水特性分析

與天氣系統的連結，以方便預報員對梅雨季劇烈天氣的預報情境進行應用與詮釋。在實務應用上，我們提出以下建議：

1. 具多數成員的主導群集其降水情境發生的機率較大，需要重視，而因其降雨形態與具完整成員的WPM相似，且WPM的校驗分數較高，可交互參照。
2. 另一方面，具少數成員的群集，雖然發生機率小，仍需要留意極端降水的情境，同時保留其過度預報的特性。
3. 基於降水聚類的群集合成的天氣場，差異性大的合成天氣場可用以作為降水預報不確定性來源的診斷參考。

六、參考文獻

李志昕、洪景山，2011：區域系集預報系統研究：物理參數化擾動。*大氣科學*，**39**，95 - 116。

葉世瑄、林沛練、洪景山、黃椿喜，2016。機率擬合之系集定量降水預報後處理方法。*大氣科學*，**44**，83 - 111。

陳景森、陳宇能、林秉承、林沛練、劉哲伶、蘇炯瑞、彭文君，2007：梅雨季台灣西南部豪雨之探討（1997~2006）。*大氣科學*，**35**，287-303

Alexander, L. V., P. Uotila, N. Nicholls, and A. Lynch, 2010. A new daily pressure dataset for Australia and its application to the assessment of changes in synoptic patterns during the last century. *J. Clim.* **23**, 1111– 1126.

Akaeda, K., J. Reisner, and D. Parsons, 1995: The role of mesoscale and

topographically induced circulations initiating a flash flood observed during the TAMEX project. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1720–1739

Atger, F. 1999. Tubing: An alternative to clustering for the classification of ensemble forecasts. *Wea. Forecast.* **14**: 741–757.

Branković, Č., B. Matjačić, S. Ivatek-Šahdan, R. Buizza, 2008: Downscaling of ECMWF ensemble forecasts for cases of severe weather: Ensemble statistics and cluster analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3323–3342

Brill, K. F., A. R. Fracasso, C. M Bailey, 2015: Applying a divisive clustering algorithm to a large ensemble for Medium-Range Forecasting at the Weather Prediction Center. *Wea. Forecast.*, **30**:873–891.

Chen, C.-S. and Y.-L. Chen, 2003: The rainfall characteristics of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1323–1341.

Chen, C.-S., Y.-L. Chen, C.-L. Liu, P.-L. Lin, W.-C. Chen, 2007: Statistics of heavy rainfall occurrences in Taiwan. *Wea. Forecast.*, **22**, 981–1002.

Chen, G. T.-J., and C.-C. Yu, 1988: Study of low-level jet and extremely heavy rainfall over northern Taiwan in the Mei-Yu season. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 884–891.

Chen, G. T. J., C. C. Wang, and S. C. S. Liu,

- 2003: Potential vorticity diagnostics of a Mei-Yu front case. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2680-2696.
- Chen, G. T.-J., C.-C. Wang, and L.-F. Lin, 2006: A diagnostic study of a retreating Mei-Yu front and the accompanying low-level jet formation and intensification. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 874–896.
- Chen, G. T.-J., C.-C. Wang, and A.-H. Wang, 2007: A case study of subtropical frontogenesis during a blocking event. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2588–2609
- Chen, T.-C., S.-Y. Wang, and M.-C. Yen, 2007: Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei. *J. Appl. Meteor. Climato.*, **46**, 1324-1340.
- Chen, S.-J., W. Wang, K. H. Lau, Q. H. Zhang, and Y. S. Chung, 2000: Mesoscale convective systems along the Meiyu front in a numerical model. *Meteor. Atmos. Phys.*, **75**, 149–160.
- Chen, X. A., and Y. L. Chen, 1995: Development of low level jets (LLJs) during TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1695–1719.
- Chen, Y.-L., X. A. Chen, S. Chen, and Y.-H. Kuo, 1997: A numerical study of the low-level jet during TAMEX IOP 5. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2583–2604.
- Chen, Y.-L., and N. B.-F. Hui, 1992: Analysis of a relatively dry front during the Taiwan Area Mesoscale Experiment TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 2442–2468.
- Chen, Y.-L., and J. Li, 1995: Characteristics of surface airflow and pressure patterns over the island of Taiwan during TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 695–716.
- Chen, Y.-L., and S.-F. Tseng 2000: Comments on “The intensification of the low-level jet during the development of mesoscale convective systems on a Mei-Yu front”. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 495-506
- Chen, Y.-L., Y.-J. Chu, C.-S. Chen, C.-C. Tu, J.-H. Teng, and P.-L. Lin, 2018: Analysis and simulations of a heavy rainfall event over northern Taiwan during 11–12 June 2012. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 2697–2715.
- Chou, L. C., C-P. Chang, and R. T. Williams, 1990: A numerical simulation of the Mi-yu front and the associated low level jet. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1408–1428.
- Davis, C. A., and W.-C. Lee, 2012: Mesoscale analysis of heavy rainfall episodes from SoWMEX/TiMREX. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 521–537.
- Doan, Q.-V., H. Kusaka, T. Sato, and F. Chen, 2021: S-SOM v1.0: a structural self-organizing map algorithm for weather typing. *Geosci. Model Dev.*, **14**,

- 2097–2111.
- Don, P. K., J. L. Evans, F. Chiaromonte and A. M. Kowaleski, 2016: Mixture-based path clustering for synthesis of ECMWF ensemble forecasts of tropical cyclone evolution, *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3301–3320.
- Evans, J. L., J. M. Arnott, and F. Chiaromonte, 2006: Evaluation of operational model cyclone structure forecasts during extratropical transition. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 3054–3072.
- Horton, D.E., N. Johnson, D. Singh, D. Swain, B. Rajaratnam, and N. Diffenbaugh, 2015: Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends. *Nature*, **522**, 465–469
- Johnson, A., X. Wang, F. Kong, M. Xue, 2011 a: Hierarchical cluster analysis of a convection-allowing ensemble during the Hazardous Weather Testbed 2009 spring experiment. Part I: Development of the object-oriented cluster analysis method for precipitation fields. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 3673–3693.
- Johnson, A., X. Wang, F. Kong, M. Xue, 2011b. Hierarchical cluster analysis of a convectionallowing ensemble during the Hazardous Weather Testbed 2009 spring experiment. Part II: Ensemble clustering over the whole experiment period. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 3694–3710.
- Kerns, B. W. J., Y.-L. Chen, and M.-Y. Chang, 2010: The diurnal cycle of winds, rain, and clouds over Taiwan during the Mei-Yu, summer, and autumn rainfall regimes. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 497–516.
- Kohonen, T., 1982: Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*. **43**, 59–69.
- Kowaleski A. M., and J. L. Evans, 2016. Regression mixture model clustering of multimodel ensemble forecasts of hurricane Sandy: partition characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3825–3846.
- Krishtawal, C. M., and T. N. Krishnamurti, 2001: Diurnal variation of summer rainfall over Taiwan and its detection using TRMM observations. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 331–344.
- Lennard, C., and G. C. Hegerl, 2014: Relating changes in syn-optic circulation to the surface rainfall response using self-organising maps. *Climate Dyn.*, **44**, 861–879.
- Li, C.-H., J. Berner, J.-S Hong, C.-T. Fong and Y.-H. Kuo, 2019: The Taiwan WRF ensemble prediction system: Scientific description, model-error representation and performance results. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, <https://doi.org/10.1007/s13143-019-0012>

- 7-8.
- Li, J., Y.-L. Chen, W.-C. Lee, 1997: Analysis of a heavy rainfall event during TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1060–1082.
- Li, J., and Y.-L. Chen, 1998: Barrier jets during TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 959–971.
- Lorenz, E. N., 1963: On the predictability of hydrodynamic flow. *Trans. N.Y. Acad. Sci.*, **25**, 409–432
- Luong, T. M., H. P. Dasari, and I. Hoteit, 2020: Extreme precipitation events are becoming less frequent but more intense over Jeddah, Saudi Arabia. Are shifting weather regimes the cause? *Atmos. Sci. Lett.*, **21**, e981.
- MacQueen, J., 1967: Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, pp. 281–297.
- Nagata, M., and Y. Ogura, 1991: A modeling case study of interaction between heavy precipitation and a low-level jet over Japan in the baiu season. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1309–1336.
- Nguyen-Le, D., and T. J. Yamada, 2019: Using weather pattern recognition to classify and predict summertime heavy rainfall occurrence over the Upper Nan river basin, northwestern Thailand. *Wea. Forecast.*, **34**, 345–360.
- Neal, R., D. Fereday, R. Crocker, and R. E. Comer, 2016: A flexible approach to defining weather patterns and their application in weather forecasting over Europe. *Meteorol. Appl.*, **23**, 389–400.
- Swales, D., M. Alexander, and M. Hughes, 2016: Examining moisture pathways and extreme precipitation in the U.S. Intermountain West using self-organizing maps. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 1727–1735.
- Teng, J.-H., C.-S. Chen, T.-C. C. Wang, and Y.-L. Chen, 2000: Orographic effects on a squall line system over Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1123–1138
- Tracton, M. S., and E. Kalnay, 1993: Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects. *Wea. Forecast.*, **8**, 379–398.
- Trier, S. B., D. B. Parsons, and T. J. Matejka, 1990: Observations of a subtropical cold front in a region of complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 2449–2470
- Tu, C.-C., Y.-L. Chen, C.-S. Chen, P.-L. Lin, and P.-H. Lin, 2014: A comparison of two heavy rainfall events during the Terrain-Influenced Monsoon Rainfall Experiment (TiMREX) 2008. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 2436–2463.
- Tu, C.-C., Y.-L. Chen, P.-L. Lin, and Y. Du, 2019: Characteristics of the marine

- boundary layer jet over the South China Sea during the early summer rainy season of Taiwan, *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 457-475.
- Veren, D., J. L. Evans, S. Jones, and F. Chiaromonte, 2009: Novel metrics for evaluation of ensemble forecasts of tropical cyclone structure. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2830–2850.
- Wang, C.-C., G. T.-J. Chen, T.-C. Chen, and K. Tsuboki, 2005: A numerical study on the effects of Taiwan topography on a convective line during the Mei-Yu season. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 3217-3242.
- Wang, C.-C., J. C.-S. Hsu, G. T.-J. Chen, and D.-I. Lee, 2014: A study of two propagating heavy-rainfall episodes near Taiwan during SoWMEX/TiMREX IOP-8 in June 2008. Part I: Synoptic evolution, episode propagation, and model control simulation. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 2619-2643.
- Wang, C.-C., J. C.-S. Hsu, G. T.-J. Chen, and D.-I. Lee, 2014: A study of two propagating heavy-rainfall episodes near Taiwan during SoWMEX/TiMREX IOP-8 in June 2008. Part II: Sensitivity tests on the roles of synoptic conditions and topographic effects. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 2644-2664.
- Wang, Z., A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, 2004: Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, **13**, 600–612.
- Wu, M.-C., J.-S. Hong, L.-F. Hsiao, L.-H. Hsu and C.-J. Wang, 2017: Effective use of ensemble numerical weather predictions in Taiwan by means of a SOM-based cluster analysis technique. *Water*, **9**, 836; doi:10.3390/w9110836
- Xu, W., E. J. Zipser, Y.-L. Chen, C. Liu, Y.-C. Liou, W.-C. Lee, and B. J.-D. Jou, 2012: An orography-associated extreme rainfall event during TiMREX: Initiation, storm evolution, and maintenance. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2555–2574.
- Yeh, H.-C., Y.-L. Chen, 2002: The role of offshore convergence on coastal rainfall during TAMEX IOP 3. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2709–2730.
- Yeh, H. C., and G. T. J. Chen, 2004: Case study of an unusual heavy rain event over eastern Taiwan during the Mei-Yu season. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 320-337.
- Yussouf, N, D. J. Stensrud, and S. Lakshminarayanan, 2004: Cluster analysis of multimodel ensemble data over New England. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2452–2462.

Clustering Characteristics of WEPS Precipitation Forecast and the Application of Associated Weather Analysis during Meiyu Period

HsiaoWei Lai¹, Yi-Jui Su¹, Yin-Jun Wu¹, Si-Ying Chen¹, Wen-Rou Chen¹,
Hsu Hua¹, Chin-Cheng Tsai¹, Yi-Chuan Luo¹,
Pao-Liang Chang¹ and Jing-Shan Hong²

¹Meteorological Information Center, Central Weather Bureau

²Research and Development Division, Central Weather Bureau

Abstract

There are complex multi-scale interactions in the weather system accompanied by the Meiyu front. Although the forecast ability of the synoptic environment has improved in recent years, there is still considerable uncertainty in mesoscale forecasting which related to the severe precipitation in Taiwan. The Central Weather Bureau has developed the WRF based Ensemble Prediction System (WEPS), which can provide the uncertainty information of the weather forecast to the user through the different quantitative precipitation forecasts (QPF). In order to a facilitate the interpretation performed by forecasters, clustering algorithm based on self-organizing maps (SOM; Kohonen, 1982) is adopted to summarize the voluminous information content of WEPS QPF.

This paper takes the May-June 2021 WEPS forecast as an example to analyze the clustering characteristics of the Meiyu period. The principal cluster (cluster 1) accounts for roughly 2/3 of the members on average. As the lead time is longer, the ensemble members tend to be concentrated into the dominant cluster rather than scattered in other clusters. While the number of members in the clusters 2-4 decreased slightly, the intra- and inter-cluster variability roughly increased. Cluster 1 is less disparity from rainfall observations, but the verification scores and observation correlations are slightly lower than those of cluster 2. The weather fields related to the members in each cluster during the heavy rainfall period affected by the Meiyu front were composited. The correlation between the composited weather and the analysis of middle/low-level wind field is relatively high, as well as the weather fields on 700hPa; while the correlation of the theta-e field on 850hPa are lower, as well as the Qv field on 925hPa. On the other hand, there is a moderate correlation between the correlation/disparsity of weather fields related to moisture and the correlation/disparsity of precipitation. The case shows that the distribution divergence of the composited theta-e fields on 850hPa

corresponds to the precipitation scenario.

The study suggests, according to the rainfall forecast scenarios obtained by clustering, the precipitation scenarios of clusters with a large number of members are more likely to occur and need to be paid attention to; to the clusters with a few members which the probability of occurrence is smaller, forecasters are advised to be alert to situations that extreme rainfall scenarios may occur. The composited weather fields with large divergence can be used as a diagnostic reference for the source of uncertainty in precipitation forecasts.

Key words : Ensemble forecast system, clustering, Meiyu