

臺灣北部梅雨季極端降水個案之系集分析與可預報度研究

李名翔 王重傑

國立臺灣師範大學地球科學系

摘要

本研究針對 2017 年 6 月初的梅雨個案，並著重於 6 月 2 日當日北部地區的極端降雨事件，進行系集敏感度分析 (ensemble sensitivity analysis, ESA) 與可預報度的探討。該事件在短短 12 小時的最大累積雨量就達到 641 毫米的驚人雨量，並造成北部地區多處產生積、淹水現象。但在事件發生前，多數的數值模式都無法很好掌握北部地區的極端降雨，嚴重低估雨量，不利於事前的防災準備。

本研究採用 45 個成員的系集預報，選取北部地區 (東經 120.9–122.1 度，北緯 25.0–25.5 度) 的平均 6 小時累積降雨量 (6 月 2 日 0300–0900 LST) 當作反應函數 (response function) 來進行系集敏感度分析。結果顯示，影響北部地區降雨的因子主要有 (1) 鋒面位置和移速 (2) 鋒面強度 (3) 環境水氣含量 (4) 低壓擾動 (5) 中低層槽線，而這些因子彼此之間也互相影響。中低層槽線的位置與移速會影響到地面鋒面的位置和移速，進而導致主要降雨位置的差異，而低壓擾動的生成與發展又與對流密切相關，當低壓擾動生成後，除了會改變降雨位置的分布，也有助於將鋒後冷空氣帶至較南邊的位置，若鋒面因此南移至臺灣西北近海一帶，再配合地形阻擋使得海峽西南風增強，讓此區域的輻合作用增強，此區域恰好為北部地區降雨的上游位置，加上因輻合而加強的鋒生作用，使鋒面強度增強，而鋒生作用又會影響到鋒面的移動速度，使鋒面移動速度較慢並增強對流發展，造成北部地區產生較多的降雨。

關鍵字：梅雨鋒面、臺灣北部極端降雨、系集敏感度分析、可預報度

一、前言

每年的五、六月是臺灣的梅雨季，在此期間因大陸冷氣團與太平洋暖氣團勢力相當，常有滯留鋒面形成於華南一帶，並南下影響臺灣，有時鋒面滯留於臺灣附近數日造成連續性的降雨。構成梅雨鋒面系統的主要分量除了梅雨鋒面本身外，還有低層噴流、鋒面上低壓擾動以及伴隨地形效應產生之中尺度現象 (陳，2007)，而鋒面上之低壓擾動的發展經常伴隨較劇烈的天氣現象，也是梅雨鋒面易致災的主因之一。

關於梅雨季臺灣北部地區豪雨事件的研究指出，臺灣複雜的地形對於北部降雨有所影響，Yeh and Chen (2003) 透過模擬指出地形對於西北沿海強迫輻合的產生並造成該區出現降雨最大值的重要性。

由於風暴尺度上的誤差成長以及強非線性作用的限制下，劇烈對流的預報度是相當困難的，因為在風暴尺度中，誤差可以在幾個小時內就快速增長 (Hohenegger and Schär 2007)，大幅影響預報的結果。檢測可預報度的一種方法是透過敏感度分析，其通常定義為預報變數如何反應初始條件的變化。敏感度分

析的方法有許多種，近期有一種稱為系集敏感度分析（ensemble sensitivity analysis, ESA）的方法，允許對預報敏感度進行更合適的統計估算，並且能夠快速估計預報與大量初始條件變數之間的關係，由於在敏感度計算前執行了完整的非線性預報，因此系集敏感度分析可能可以超出純線性方法所造成的一些限制。Bednarczyk and Ancell (2015) 針對美國南部平原的一個對流個案，利用系集敏感度分析來探討影響對流強度的因素，分析結果顯示對流強度會受到 500hPa、300hPa 低壓槽線位置和氣旋發展階段的影響，也會受到 850hPa 的溫度和水氣影響，當對流周圍環境較為暖濕的時候，有利於對流發展更強的強度，而透過往回追溯敏感度之訊號，發現此暖溼氣流來自研究區域的西南方，另外 850hPa 的鋒面位置以及強度也會影響到對流發展的強度。

二、個案介紹

2017 年 6 月 2 日伴隨著梅雨鋒面在北部近海有一東西走向的線狀對流，隨後影響北海岸地區並在臺灣海峽上產生類似後造型對流的現象，新對流胞在舊對流胞西側生成後向東移至臺灣北部地區，此線狀對流在北海岸地區近似滯留約 10 小時，造成當地產生劇烈降雨。圖 1 為 6 月 2 日當日 12 小時(0000-1200 LST) 累積雨量圖，可以看到臺灣主要有三個雨區：北海岸地區、中部山區和南部山區，從色階梯度來看，降雨相當集中在北海岸地區，且雨區呈現東西走向，此為線狀對流滯留在北海岸附近將近 10 小時所造成的降雨，而中南部山區的降雨為環境西南風受中央山脈阻擋所造成地形上的連續性降雨。

三、資料來源與研究方法

(一)資料來源

本研究使用的資料為美國國家環境預測中心 (National Centers for Environmental

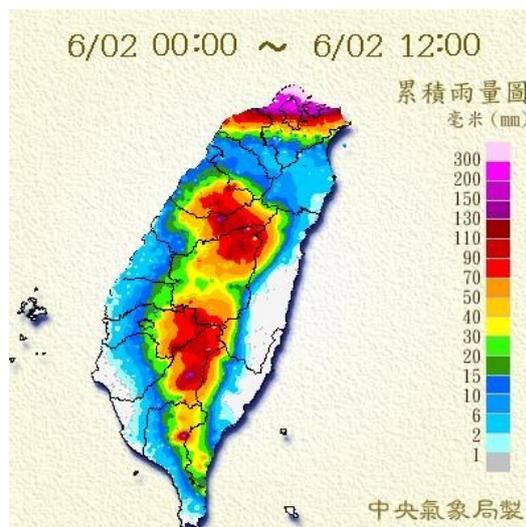


圖 1 中央氣象局 2017 年 6 月 2 日當日觀測之 12 小時累積雨量圖。

Prediction, NCEP) 之全球預報系統 (Global Forecast System, GFS) 經緯網格預報資料當作模式的初始及側邊界條件，其空間解析度為 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ，時間解析度為每 3 小時一筆，垂直層數共 26 層，選用的氣象參數有緯向風場、經向風場、相對濕度、重力位高度、氣溫和氣壓。

(二)模式介紹與系集成員

本研究採用的數值模式為名古屋大學 (Nagoya University) 太空地球環境研究所 (Institute for Space-Earth Environmental Research, ISEE) 所開發的雲解析風暴模式 (Cloud Resolving Storm Simulator, CReSS)。在本研究中使用了版本 2.3 和 3.4.2 兩種模式版本。該模式採用完全可壓縮之非靜力方程式系統，且不使用積雲參數化方法，對於雲的形成和雲中演變過程採用外顯之雲微物理方法計算，共有暖雲和冷雲兩種總體過程可供選用。

本研究使用 CReSS 模式產生 45 個系集成員，大致將成員分成四組，各組間主要為網格間距、模擬範圍、模式版本和積分時間長短的差異，相關比較可參考表一，其餘設定相同。

(三)研究方法

1. 系集敏感度：

表一 系集成員與模式相關設定。Group 1 成員之初始時間為 00、12 UTC 時，積分時間為 120 小時，若為 06、18 UTC 則為 126 小時。

	Group1	Group2	Group3	Group4
Grid size	5.0km×5.0km×0.5km	3.0km×3.0km×0.5km	2.5km×2.5km×0.5km	2.5km×2.5km×0.5km
Grid number	301×240×40	1152×672×52	600×480×40	600×480×40
Model	CReSS v2.3	CReSS v3.4.2	CReSS v2.3	CReSS v3.4.2
Integration length	120/126 hr	120 hr	78 hr	78 hr
IC/LBCs	NCEP GFS analysis/forecast 0.5° × 0.5°			
Member number and Initial time (UTC)	M01_2017052900 M02_2017052906 M03_2017052912 M04_2017052918 M05_2017053000 M06_2017053006 M07_2017053012 M08_2017053018 M09_2017053100 M10_2017053106 M11_2017053112 M12_2017053118 M13_2017060100 M14_2017060106 M15_2017060112	M16_2017052900 M17_2017052912 M18_2017053000 M19_2017053012 M20_2017053100 M21_2017053112 M22_2017060100 M23_2017060112	M24_2017053000 M25_2017053006 M26_2017053012 M27_2017053018 M28_2017053100 M29_2017053106 M30_2017053112 M31_2017053118 M32_2017060100 M33_2017060106 M34_2017060112	M35_2017053000 M36_2017053006 M37_2017053012 M38_2017053018 M39_2017053100 M40_2017053106 M41_2017053112 M42_2017053118 M43_2017060100 M44_2017060106 M45_2017060112
Members	15	8	11	11

根據 Ancell and Hakim (2007) 提出的系集敏感度公式如下：

$$Sensitivity = \frac{\partial R}{\partial x_t} = \frac{cov(R, x_t)}{var(x_t)}$$

R 稱反應函數 (response function)，為某預報之純量變數， x_t 為稍早時間 t 的預報狀態，透過系集預報利用線性迴歸的方式來估計 R 與 x_t 之間的關係，其中 cov 和 var 分別為共變異數 (covariance) 和變異數 (variance)。此敏感度的值相當於 R 與 x_t 最小平方線性迴歸的最佳直線斜率，其代表之意義為在系集中，當 x_t 每增加一個單位時，相對應 R 的變化量大小，因此數值越大就表示 R 對於該變數 x_t 越敏感。

在本研究中，選用系集平均之北部區域 (120.9°E–122.1°E, 25.0°N–25.5°N) 累積雨量最多的 6 小時雨量當作反應函數，此累積雨量時間為 6 月 1 日 1900 UTC–6 月 2 日 0100 UTC (6 月 2 日 0300–0900 LST)。而在不同時間變數狀態的選擇，分別有相對於反應函數的前 15 小時 (t_{-15} , 6 月 1 日 0400 UTC)、前 12 小時 (t_{-12} , 6 月 1 日 0700 UTC)、...、前 3 小時 (t_{-3} , 6 月 1 日 1600 UTC) 和當下 (t_0 , 6 月 1 日 1900 UTC) 共 6 個時間點，間隔為 3 小時。

使用系集敏感度分析能夠揭示與預報動力相關的特徵，透過對於高敏感地區在較早時間的系集預報與觀測做比較，來推估未來可能的演變，具有潛在的作業應用價值 (Bednarczyk and Ancell 2015)；也可利用此方法往回追溯高敏感之變數與區域，來研究可預報度問題。

2. 子集差異：

另一個分析手法為將 45 個系集成員分成較小的兩個子集，子集一 (Subset 1, S1) 為北部區域平均 6 小時累積雨量最多的前 1/3 成員，視為多雨組；子集二 (Subset 2, S2) 則為北部區域平均 6 小時累積雨量最少的後 1/3 成員，視為少雨組。透過將不同時間的變數 x_t ，以多雨組減去少雨組來分析兩組之間的平均差異。

四、系集敏感度分析

在進行系集敏感度計算時，因為各變數之單位不同，且變動範圍差異大，因此將分母的變數 x_t 轉換成以標準差來度量，亦即該敏感度表示為當變數 x_t 每增加一個標準差所對應的北部區域 6 小時累積降雨量 (反應函數) 變化，如此有助於比較變數間相對之影響，且可將結果的數值範圍標準化，也就是不同變數皆可採用相同色階繪圖，有利於在即時作業上的方便使用。另外，本研究四組系集成員的網格間距與數目不盡相同，但在計算系集敏感度時需要各成員在相同的網格上都有值才能計算，因此需要先進行內插，本研究的作法是將第一組與第二組成員預報結果的水平和垂直網格內插至第三組成員的網格位置上 (第三組與第四組成員的網格大小、位置都相同)，且為了讓內插後的每個網格點都為有效值，將邊界的網格點去除 (x 方向東、西各減一格，y 方向南邊減一格、北邊減兩格，z 方向仍維持 40 層)，因此內插後的網格點數 (x,y,z) 為 598×477×40，而內插方式是尋找模式裡最接近內插點位置的四個點，再依照距離遠近而有不同的權重來

做內插。

圖 2 為多雨組 (S1) 減去少雨組 (S2) 在不同時間的時雨量與地表水平風向量差異，可看見在 t_0 時多雨組在北部區域產生較多的降雨，而在較早的時間 (t_{-15} 至 t_{-9}) 可以發現少雨組的主要降雨位置較多雨組偏南，顯示出兩者鋒面位置的差異。

圖 3 為不同時間地表經向風對於北部平均 6 小時累積降雨量之敏感度，粗黑實線為 0 值線，指示出風切位置，也可大略代表平均鋒面的位置，在 t_{-12} 時可以看見在風切線南側呈現正敏感，而風切線北側在 t_{-3} 時呈現負敏感的訊號，此時在臺灣海峽也出現較大範圍的正敏感區域。此結果表明當鋒面南側南風越強、北側北風越強，亦即鋒面帶上的輻合作用越強時，特別是在臺灣西北近海一帶，越有利於北部區域的降雨產生。

圖 4 為不同時間地表的水氣混合比對北部平均 6 小時累積雨量之敏感度，粗虛線為系集平均的鋒面位置，圖中可發現從 t_{-15} 開始在華南地區出現正敏感訊號，且隨時間向東、向南傳播，再仔細檢視此正敏感訊號又可分成較南邊的東西向帶狀區域以及其北邊的片狀區域，此帶狀區域與風切位置大致相對應，顯示當鋒面附近含有較多的水氣時，有利於隨後北部區域產生較多的降雨，而其後的片狀正敏感區域則是表示，當鋒面後伴隨著較潮濕的空氣時，也有利於北部區域的降雨。

圖 5 為不同時間 591 公尺高的相當位溫對北部平均 6 小時累積雨量之敏感度，粗虛線為系集平均的鋒面位置，圖中顯示在 t_{-3} 到 t_0 期間，鋒面南側呈現正敏感、北側呈現負敏感，顯示當鋒面南北兩側相當位溫梯度越大時 (亦即鋒面強度越強)，特別是在臺灣西北近海一帶，有利於北部區域產生較多的累積降雨，此結果也與圖 3 顯示較強的輻合位置一致。

而前述從 t_{-3} 至 t_0 較強的輻合區域，從圖 6 的不同時間 591 公尺高的氣壓與水平風向量

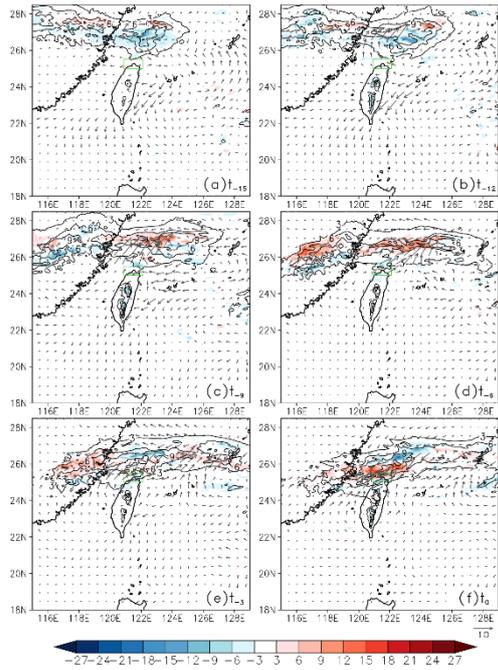


圖 2 多雨組 (S1) 減去少雨組 (S2) 在不同時間的時雨量差異 (mm, 色階) 與地表水平風向量差異 (m/s, 箭頭), 等值線為系集平均之時雨量 (mm)。

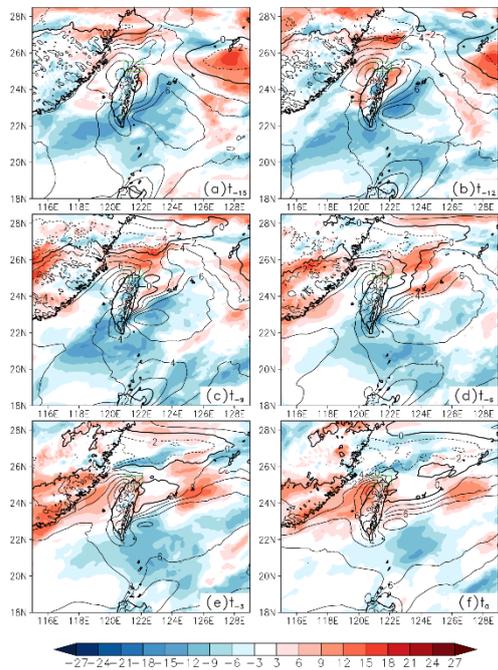


圖 3 不同時間地表經向風 (v , m/s) 對於北部區域 (綠色方框) 平均 6 h 累積雨量之敏感度 (mm per standard deviation, 色階), 等值線為系集平均地表經向風 (m/s), 粗黑線為 0 值線, 代表風切線位置 (約略的鋒面位置)。

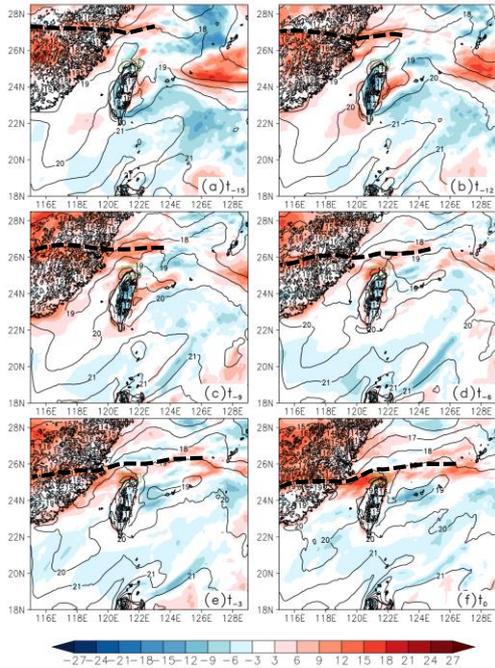


圖 4 與圖 3 類似，但為不同時間地表水氣混合比 (g/kg) 之敏感度 ($\text{mm per standard deviation}$, 色階)，等值線為系集平均地表水氣混合比 (g/kg)，粗虛線為系集平均大致的鋒面位置。

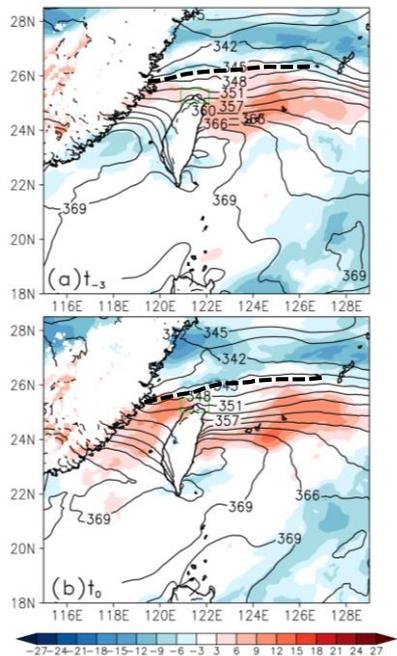


圖 5 圖 3 類似，但為不同時間 591 公尺相當位溫 (K) 之敏感度 ($\text{mm per standard deviation}$, 色階)，等值線為該高度系集平均相當位溫 (K)，粗虛線為系集平均的鋒面位置。

差異中，顯示出與北部近海鋒面上發展出的低壓擾動有關。圖中顯示，此低壓擾動約在 t_{-6} 開始出現於臺灣東北方海面上（在系集平均中呈現一封閉等值線），其中風向量差異呈現氣旋式環流，表示多雨組成員的此低壓較強，3 小時後 (t_{-3} 時) 風向量差異更加明顯且氣壓差異也增大，加強了多雨組在北部近海、鋒面北側的東北風，配合同時在此時間臺灣海峽北部增強的西南風，使得臺灣西北近海一帶輻合增強，並導致該區域的對流活動增加。而透過進一步檢視每個成員可發現不同成員其鋒面上低壓擾動發展的時間、位置、個數與強弱變化均不盡相同。

另外在不同時間 3201 公尺高的緯向風以及水氣混合比對北部平均 6 小時累積雨量之敏感度（因版面有限圖未示），約略從 t_{-12} 左右開始，兩者在華南地區皆表現出正敏感訊號，且此訊號隨時間向東、向南傳播，進一步檢視後發現此現象與中低層的槽線位置有關，槽線的位置和移速會影響到地面鋒面的位置和通過北部地區時的移動速度，進而影響北部地區降雨的多寡。

而透過觀察多雨組和少雨組之各個成員，發現到在某些特定的初始時間傾向於得到較好的預報結果，某些則得到較差的結果。表現較好的初始時間其成員在反應函數時段鋒面大多位在所選取的北部區域附近且移動緩慢或呈現滯留，與實際狀況較為相似，而表現較差的初始時間其成員則呈現鋒面比實際狀況提早通過或晚抵達北部的現象，造成 6 小時累積降雨量偏少，顯見初始與邊界條件的品質好壞對於該超大豪雨事件的預報也相當重要。

五、結論與討論

針對 2017 年 6 月 2 日梅雨鋒面造成的北海岸超大豪雨個案，本研究使用 CReSS 模式產生了 45 個成員的系集預報來做系集敏感度分析，選取北部區域平均 6 小時累積降雨量當

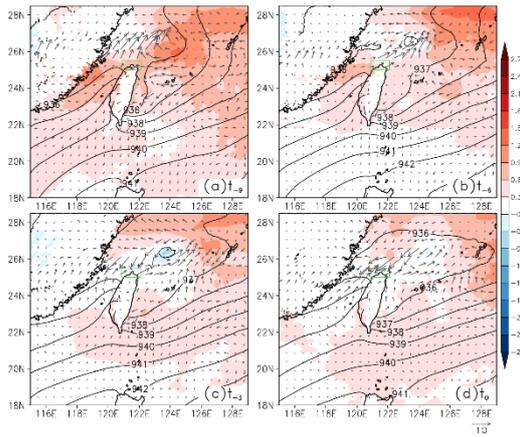


圖 6 與圖 2 類似，但為不同時間 591 公尺氣壓差異 (hPa, 色階)，等值線為該高度系集平均氣壓 (hPa)，箭頭為該高度的水平風差異 (m/s)。

作反應函數，檢視不同時間的數個氣象變數與反應函數之間的關係，大致可歸納出幾項影響北部地區降雨較重要的因子：

(一) 鋒面位置和移速：當鋒面位置與實際狀況差異較大，在較早或較晚的時間通過北部地區，亦或是在通過北部區域的移速較快時，都會顯著影響到累積時段內北部降雨的結果。

(二) 鋒面強度：當鋒面的強度越強（鋒生作用較強、鋒面兩側相當位溫梯度大）且南北向的輻合作用也越強時，特別是在臺灣西北近海處，越有利於北部地區產生較多的降雨。另外，鋒生作用也會影響到鋒面的移動速度，當臺灣西北近海處持續有較強的鋒生作用時，有利於減緩鋒面南移速度，使鋒面滯留於北部附近，拉長降雨時間。

(三) 環境水氣含量：當鋒面附近有較多的水氣時，有利於較多降雨的產生，另外在鋒面後側的華南地區底層（約 3 公里高至地面）若伴隨著較潮溼的大氣，也有助於北部地區有較多的降雨。

(四) 低壓擾動：在鋒面附近生成的低壓擾動，其生成的時間、位置和強度都會影響到北部地區的降雨，顯示此個案極端降雨的發生，並不僅止於鋒面通過或滯留時間的長短，而與

此類尺度較小的鋒面低壓擾動（可預報度較低）的發展也有關係。進一步透過多雨組和少雨組個案，分析低壓擾動在模式裡如何造成兩者在北部地區的雨量差異，以多雨組的結果顯示，臺灣東北方海面上的低壓擾動生成後可增強北部近海的東北風，並將鋒面南推至接近臺灣陸地，再配合海峽上受鋒面南移以及臺灣地形阻擋而增強的西南風（局地增強的西南風），使得臺灣西北近海一帶的輻合增強，且冷暖平流加強鋒面南北向的相當位溫梯度，有利鋒生作用，並影響後續鋒面移動速度和對流的強度，進而造成多雨組和少雨組之間顯著的差異。

(五) 中低層槽線：槽線的位置和移速會影響地面鋒面的位置和移動速度，若槽線位置較南會將鋒面推擠至較南的位置，使得鋒面在較早時間通過所選取的北部區域，亦或是槽線南移較快時，鋒面在通過北部區域移速較快、停留時間較短，造成北部區域裡的降雨較少。

參考文獻

- 陳泰然, 2007: “最近之梅雨研究回顧”, 大氣科學, 35, 261-286
- Ancell, B., and G. J. Hakim, 2007: “Comparing adjoint- and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting”, *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 4117–4134
- Bednarczyk, C. N., and B. C. Ancell, 2015: “Ensemble sensitivity analysis applied to a southern plains convective event”, *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 230–249
- Hohenegger, C., and C. Schär, 2007: “Atmospheric predictability at synoptic versus cloud-resolving scales”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, 1783–1793
- Yeh, H. C., and Y. L. Chen, 2003: “Numerical simulations of the barrier jet over northwestern Taiwan during the Mei-Yu Season”, *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1396–1407