

臺灣地區連續數日不下雨機率預報評估

周栴均¹ 張惠玲¹ 馮智勇² 林涵芳² 陳昀靖¹ 朱心宇¹ 羅存文¹ 周筱倩¹
氣象科技研究中心¹ 多采科技有限公司²
中央氣象局

摘要

氣候變化改變降水量、強度、頻率與空間分佈，不僅影響自然環境本身，所造成的災害亦對人類帶來衝擊。除熱帶氣旋、梅雨鋒面、西南氣流等天氣系統造成的極端降雨外，乾旱或極端少雨導致供水嚴重不足、造成民生及農工商等產業蒙受損失也不容小覷。

本研究採用美國國家環境預報中心(NCEP)全球系集預報系統(GEFS)之降雨預報，透過統計後處理技術進行偏差修正，並降尺度到高解析格點，以得到臺灣陸地連續數日不降雨機率預報。長期(2000至2019年)預報評估顯示：(1)相較於原始預報，校正後之預報顯著改善原始系集離散度不足的問題；(2)校正後之連續數日不降雨機率預報在未來四週具有良好的可信度與區辨能力(潛在可用性)；(3)校正後的預報對於不同成本損失比的使用者普遍能夠提供正的經濟價值，且使用者參考校正後預報可獲得較原始系集預報更高的經濟效益。整體而言，對於需要長期預報資訊以因應極端少雨造成災損之使用者，本研究校正後之連續不降雨系集機率預報具有高度參考價值。

關鍵字：系集預報系統、可信度、潛在可用性、經濟價值

一、前言

隨著工業革命帶動人類生活型態快速發展，長期高碳排放加重暖化現象進而造成全球氣候變遷，自然環境改變與氣候變異已成為全世界不可忽視的重大議題。根據2021年聯合國氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第6次評估報告(the Sixth Assessment Report, AR6)統計過去極端天氣事件頻率強度增加的事實，並嚴正指出未來氣候變遷帶來的嚴峻衝擊，包含更多更強的熱浪與暴雨、乾旱增加導致更多的野火事件、海洋暖化酸化使得生態環境面臨極大的威脅等，透過科學角度了解氣候變遷是不可抹滅的存在事實，應思考調適與減緩氣候變遷影響的應對策略。

臺灣水資源豐富，年平均降雨量約為2500毫米，是全球年平均雨量的2倍以上，但因臺灣有顯著的季風特性與陡峭的地形分佈，使得臺灣陸地降雨在時空上具有高度不均勻的特性，主要降雨集中在梅雨季與颱風季。不過2020年臺灣氣候出現與過往不同的變化，根據中央氣象局2021年發行的氣候年報統計結果顯示，2020年臺灣年總雨量為1742.4毫米，低於氣候平均值464.7毫米，因太平洋副熱帶高壓偏強致使無颱風經過臺灣，使得水庫匱乏主要雨量來源，再加上2021年春雨過少，導致2021上半年臺灣面臨嚴重的乾旱缺水，不僅影響民生用水外，亟需用水的農林畜牧業、工業等社會經濟出現高度危機。由於

天氣現象危及民生及農工商等產業，除需採用氣象降雨預報資訊來提前進行防範措施與思考因應對策，更凸顯跨域應用的重要性。

數值天氣預報(Numerical Weather Prediction, NWP)發展起源於Lorenz於1963年提出的混沌理論，說明數值天氣模式預報過程中存在很多不同的預報誤差來源，且預報時間的增加，預報結果通常會嚴重偏離未來的真實天氣狀況，因此發展系集預報系統(ensemble prediction system, EPS)來產製一組能夠擷取預報過程中各種不確定性來源的代表性樣本，藉此描述未來天氣狀態的分佈，並計算出預報機率，量化預報不確定資訊傳達給使用者。如何產生具有合理離散度的系集成員以反映預報的不確性，以及如何從大量的預報資料中萃取出有價值的資訊，是評估系集預報發展的重要關鍵。除EPS發展外，預報資料可以透過合適的統計後處理(statistics post-processing, SPP)方法藉此修正EPS的系統性偏差，進而得到更符合真實情況的預報結果。

在臺灣農業水資源應用廣泛，除農作物生長過程與溫度、降雨等天氣資訊有關外，農牧業在乾草調製過程中需要曝曬牧草，而且依據天氣情況曝曬長度可能需要連續數日。因此除降雨資訊外，部分畜牧業者也需要不降雨的資訊。隨著過去觀察到的氣候變遷呈現連續降雨日減少、連續不降雨日增加，而未來推估此現象很可能愈益嚴重，對於農牧業水資源管理單位而言，如何因應氣候變遷維護人類最基礎

的飲食需求將面臨極大的挑戰。故本研究針對連續數日不降雨的系集機率預報進行完整評估，以定量了解氣象預報表現與氣象資訊對於使用者的參考價值。

二、模式與觀測資料

(一) 模式資料

預報資料採用美國國家環境預測中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)發展的全球系集預報系統第12版本(Global Ensemble Forecast System version 12, 後續簡稱GEFS v12)再預報(Reforecast)資料。GEFS v12每日輸出5個系集成員，每週三輸出11個系集成員(包含1個控制組)；預報時間長度每日為16天，每週三預報時間長度為35日。GEFS v12逐6小時預報，水平解析度0.5度。本研究透過簡單線性內插將0.5度網格資料降尺度至1公里高解析網格，目的是與本研究採用的觀測資料空間解析度一致。校驗期從2000年1月至2019年12月，總共20年。

(二) 觀測資料

觀測資料採用中央氣象局產製的臺灣高解析格點降雨網格化資料(GEF1km)作為真實場，資料長度從1998年迄今，空間解析度為1公里，時間解析度為逐日。

三、統計後處理方法

本研究針對臺灣降雨校正方式採用類比後處理(Analog Post-processing, 後續簡稱AP)方法，透過數值模式降雨預報與真實發生降雨情形間存在一定關聯的假設下，採用降雨作為相似變數，並透過相似度準則搜尋歷史上相似的降雨觀測，即為相似成員。其中相似度準則是利用 Schefzik(2016)方法，比對模式格點系集平均與系集離散度之量值，並依其相似度準則數值大小作為相似度依據。此研究透過AP方法搜尋20個相似成員作為系集成員，而此方法可以任意決定校正後系集成員數量，先前評估結果以取20個的校正成效與計算效率最佳。

四、評估方法

(一) 序位直方圖(Rank Histogram)

逐格點將預報值與觀測值由小自大進行排序，紀錄觀測值落在哪個序位，在該序位累計一次，待統計完所有時間與網格點的資料後，即可得到Rank Histogram。Rank histogram可透過圖形分布了解系集模式的預報偏差，並評估系集預報的離散度能否合理地涵蓋到真實觀測，達到所有成員可以等機率預報到真實觀測的一致性；當圖形平坦時，表示離散程度合理；若呈現U型分布，表示此系集模式離散程度不足(under-dispersive)；若呈現A型分布，表示離散程度太大(over-

dispersive)；若圖形的峰值偏向左(右)側，表示真值大部分落在較小(大)值序位，預報模式有高報(低報)的情形(Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, figure 8.26; Wilks 2011)。

(二) 可信度圖(Reliability Diagram)

若給定某一發生門檻，統計樣本中達到該門檻之系集個數與總系集個數之比例，即為預報機率(forecast probability)；接著對應各預報機率之滿足該門檻之預報樣本中，實際觀測亦達到該門檻個數之比例，稱為觀測相對發生頻率(observed relative frequency)。將各預報機率與對應之觀測發生頻率連線可得到信賴曲線分布，主要用以評估預報機率與觀測頻率的一致性，即機率預報的可信度(reliability)；若信賴曲線落在reliability diagram對角線上，表示此預報系統完美可信；若信賴曲線普遍落在對角線上(下)方，表示預報機率通常大(小)於觀測發生頻率，說明模式機率預報為過度預報(預報不足)；若信賴曲線在高機率預報高(低)報、低機率預報低(高)報，顯示機率預報具有過度自信(自信不足)的情形(Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, figure 8.8a; Wilks 2011)。

(三) Brier Skill Score (BSS)

Brier skill score (BSS)可用來評估系集機率預報相較於以氣候發生頻率(長期氣候值或樣本氣候值；本研究使用樣本氣候值)進行預報的改善程度。BSS可藉由計算機率預報、參考預報、完美預報的Brier Score(BrS, Wilks 1995)而得到的，而BrS與BSS的計算方式為：

$$BrS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2$$
$$BSS = \frac{BrS - BrS_{ref}}{BrS_{perf} - BrS_{ref}}$$

其中 P 為預報機率， O 為觀測機率(僅有0與1兩種)， n 表示總樣本數， i 為樣本編號。BrS的值域介於0至1之間，而BSS的值域介於 $-\infty$ 至1之間。若 $BSS > (=) 0$ 時，表示機率預報相對於氣候發生頻率預報具有(不具有)預報能力；若 $BSS = 1$ 則為完美預報。

(四) 相對操作特徵曲線(Relative Operating Characteristics, ROC)

給定一組遞增的機率作為事件會發生的門檻，換句話說，將機率預報轉至單一預報(即Yes/No預報)，並對應觀測實際發生情形建立二維列聯表(Contingency Table; Finley 1884)，進一步計算出命中率(hit rate)與錯誤預警率(false alarm rate)。將各預報機率的hit rate與false alarm rate連線即得到ROC曲線。ROC曲線下方的面積(ROC area)代表預報模式區辨事件發生與否的能力(Discrimination Ability)，是判定預報系統能力的一個重要指標；若ROC area=1表示完美預報；若曲線落在對角線上，即ROC area=0.5，可視為隨機預報；若ROC area>0.5 (<0.5)，表示此預

報系統有(無)區辨能力。後續校驗分析參考Buizza et al. (1999)以ROC area>0.7作為判斷模式具有預報能力的標準。

(五) 經濟價值(Economic Value, EV)

假設使用者是否採取防災行動完全依據數值模式預報特定事件發生與否，經濟價值分析考量數值模式預報能力與決策者特性兩個因素，從使用者角度評估數值模式的預報價值：當給定特定事件發生閾值，可藉由歷史模式預報與觀測資料計算二維列聯表得到h、m、f、c，用以代表該數值模式的預報能力；執行防災行動涉及三種成本或損失：(1)防災行動所需的成本(Cost, C)，(2)執行防災行動可避免的損失(Preventable Loss, Lp)，(3)執行防災後無法避免的損失(Unpreventable Loss, Lu)。我們以Cost-Loss Ratio(後續簡稱r)來代表決策者的成本損失比，r定義為防災成本(C)與執行防災可避免的損失(Lp)的比值($r=C/Lp$)。某一預報系統的相對經濟價值定義為(Richardson 2000)：

$$EV = \frac{E_{climate} - E_{forecast}}{E_{climate} - E_{perfect}}$$

其中 $E_{forecast}$ 、 $E_{climate}$ 、 $E_{perfect}$ 分別是使用者參考模式預報、氣候預報與完美預報做決策的費用期望值，本研究的氣候預報是指沒有任何即時預報資訊的情況下，使用者以事件發生的頻繁與否(事件發生頻率)作為決策的參考憑據。

Richardson(2000)將模式預報能力(h、m、f、c)改以hit rate與false alarm rate表示，並結合r與 \bar{o} 得到以下EV型式：

$$EV = \frac{\min(\bar{o} - r) - Fr(1 - \bar{o}) + H\bar{o}(1 - r) - \bar{o}}{\min(\bar{o}, r) - \bar{o}}$$

EV值代表某一使用者「參考該預報系統所減少的成本損失費用」是「參考完美預報所減少的成本損失費用」的多少倍數：若EV=1，表示該預報系統為完美預報；EV值越高(低)，表示該模式相對於氣候預報，其參考價值越高(低)；EV<=0表示長期參考此預報系統對該使用者沒有參考價值。

五、結果與討論

考量臺灣地區降雨特性存在季節性的差異，故定義5月至6月易受滯留鋒面系統影響的梅雨季，7月至9月為颱風與午後熱對流系統常見的夏季，其他月份(10月至4月)則定義為秋冬春季主要降雨系統為東北鋒面與春雨。因針對臺灣陸地降雨進行評估，故僅校驗臺灣陸地範圍(包含綠島、蘭嶼、澎湖、金門、馬祖等地區)，共有42158個空間點。

首先針對原始與校正後系集預報未來一週週累積雨量的rank histogram(圖1)，結果顯示不論在夏季、冬季、梅雨季，原始模式存在明顯over-forecasting與under-dispersive的情形(圖1a-圖1c)，而AP方法雖然在夏季與冬季有輕微的under-forecasting，不過整體而言校正後的預報能夠顯著改善原始

系集離散度不足的問題。除評估第1週預報外，本研究將第1週至第4週預報共同比較，另外也將連續天數拉長至14天進行系集品質評估，分析方式調整為計算各序位實際機率與理想等機率的絕對誤差，加總後得到序位偏差量(圖2)。7天累積雨量(圖2a)結果顯示，不論是哪個季節與預報週數，AP校正後預報的序位偏差相當接近0，明顯低於原始系集的序位偏差，表示AP在不同季節、不同預報週數的rank histogram圖形皆相當平坦，改善預報偏差並使其具有相對合理的系集離散度。當天數拉長至14天累積雨量(圖2b)，校驗結果與7天累積雨量的結果一致，再次說明AP方法能夠顯著改善原始系集的預報品質。

在連續不降雨之系集機率預報評估部分，本研究定義7天累積降雨量<5毫米與14天累積降雨量<10毫米作為連續天數不降雨的門檻。在夏季(圖3a、圖3d)與梅雨季(圖3c、圖3f)時，原始系集機率預報相對於AP系集機率預報不容易提供非常高的預報機率，且具有明顯的低報；而在秋冬春季時，預報機率70%以下普遍呈現低報的情形，而在較高的預報機率則為高報，表示原始模式具有不足的系集離散度，與rank histogram結果一致。整體而言，圖3可以很明顯地觀察到AP校正後的機率預報比原始模式機率預報更接近reliability diagram的對角線，表示AP校正後有效地改善原始模式機率預報的可信度。接續reliability diagram分析結果，此部分採用BSS量化機率預報的校正成效(圖4)。原始模式的機率預報僅在冬季具有預報能力(圖4b、圖4e)，而AP不論是哪個季節、連續7天或14天，甚至預報至第四週，其機率預報的BSS皆>0，表示AP校正後機率預報相對於氣候頻率預報具有良好的預報表現，同時也優於原始機率預報，此結果可對應reliability diagram中AP校正後機率預報的信賴曲線較原始模式更靠近對角線。

將條件機率轉換成觀測的情況來評估模式的潛在可用性：透過ROC結果(圖5)顯示：在季節方面，原始模式連續不降雨機率預報在冬季已具有不錯的區辨能力(潛在可用性)，而夏季與梅雨季則沒有足夠的區辨能力(ROC area<0.7)；AP校正後機率預報的ROC area皆高於原始機率預報的ROC area，表示AP相較於原始模式能夠改善連續不降雨的區辨能力；在連續天數方面，當預報週數越久(例如預報第4週、預報第3至4週)時，模式潛在可用性普遍以連續14天高於連續7天，原因可能為連續累積雨量天數拉長時能夠降低雨量高度預報不確定性，進而提升潛在預報可用性，不過在梅雨季3至4週預報連續不降雨的潛在可用性仍不高(ROC area<0.7)。

經濟價值分析結果中，因EV與ROC area皆可透過hit rate與false alarm rate計算得到，而EV最大值會發生cost-loss ratio等於氣候發生頻率的使用者，此時EV最大值對應的預報機率(即最佳機率閾值)等同於ROC分析得到的最佳機率門檻，因此最大EV值與ROC結果直接相關，因此比較原始模式與AP校正後預報時，因EV最大值結果與ROC分析一致：AP校正後預報優於原始模式。為進一步綜合討論不同cost-loss ratio使用者長期應參考哪種預報資料進行決策能夠得到最大經濟效益，本研究綜合原始模式、AP校正後預報與參考氣候發生頻率能夠提供多少比例的cost-loss ratio最大EV

值，換句話說，當比例越高，該預報資訊能夠提供更廣泛的使用者。結果顯示：不論哪個季節或是預報週數，大部分使用者應長期參考AP校正後預報進行決策以獲得最高的經濟效益，除梅雨季(圖6c、圖6f)在預報週數2週內部分使用者應參考原始預報；另外，當預報週數越長，越多使用者應參考氣候發生頻率資訊進行決策。

六、結論

氣候變遷對自然環境本身所造成的災害與衝擊對人類生活造成極大的影響，除熱帶氣旋、梅雨鋒面、西南氣流等天氣系統造成的極端降雨引發洪水爆發外，乾旱或極端少雨導致供水嚴重不足，造成民生及農工商等產業面臨極大的風險。考量臺灣農畜業具有連續不降雨預報資訊的需求，本研究採用GEFS v12與經AP校正後的系集預報資料，針對夏季、秋冬春季與梅雨季連續7日與連續14日不降雨機率預報進行完整評估。結果顯示(1)相較於原始預報，校正後之預報顯著改善原始系集離散度不足的問題；(2)校正後之連續數日不降雨機率預報在未來四週具有良好的可信度與區辨能力(潛在可用性)；(3)校正後的預報勝於不同成本損失比的使用者普遍能夠提供正的經濟價值，且使用者參考校正後預報可獲得較原始系集預報更高的經濟效益。整體而言，對於需要長期預報資訊以因應極端少雨造成災損之使用者，本研究校正後之連續不降雨系集機率預報具有高度參考價值。

七、參考文獻

- 周栒均、張惠玲，2020：東亞地區二週系集降雨預報評估分析。《大氣科學》，**47**，178–209。
- 張惠玲、陳冠儒、吳佳蓉、汪琮、洪景山、楊舒芝，2018：臺灣地區 WRF 颱風系集降雨機率預報之評估、校正與經濟價值分析-第一部分：預報評估。《大氣科學》，**46**，71-106。
- 陳冠儒、張惠玲、吳佳蓉、汪琮、洪景山、楊舒芝，2018：臺灣地區 WRF 颱風系集降雨機率預報之評估、校正與經濟價值分析-第三部分：經濟價值分析。《大氣科學》，**46**，

198-220。

- Buizza, R., M. Miller, and T. N. Palmer, 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **125**, 2887–2908.
- Chang, H. L., S. C. Yang, H. L. Yuan, P. L. Lin and Y. C. Liou, 2015: Analysis of the relative operating characteristic and economic value using the LAPS ensemble prediction system in Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1833–1848.
- Chou, S. C., H. L. Chang, K. J. Chen, and J. S. Hong (2021, Aug). Forecast Evaluation and Economic Value Analysis of the Probabilistic Forecasts of 100-meter Wind Speed from WRF Ensemble Prediction System over Taiwan Area. *18th Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) virtual meeting*.
- Finley, J.P., 1884: Tornado predictions. *Amer. Meteor. J.*, **1**, 85-88.
- Murphy, A. H., and M.Ehrendorfer, 1987: On the relationship between the accuracy and value of forecasts in the cost-loss ratio situation. *Wea. Forecasting*, **2**, 243–251.
- Richardson, D. S., 2000: Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 649–667.
- Schefzik, R., 2016: A similarity-based implementation of the Schaake shuffle. *Mon. Weather Rev.*, **144**, 1909–1921.
- Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Cambridge Press, 547 pp.
- _____, 2001: A skill score based on economic value for probability forecasts. *Meteor. Appl.*, **8**, 209-219.
- _____, 2011: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3rd ed. Academic Press, 704 pp.
- Zhu, Y., Z.Toth, R.Wobus, D. S.Richardson, and K.Mylne, 2002: The economic value of ensemble-based weather forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 73–8.

附圖

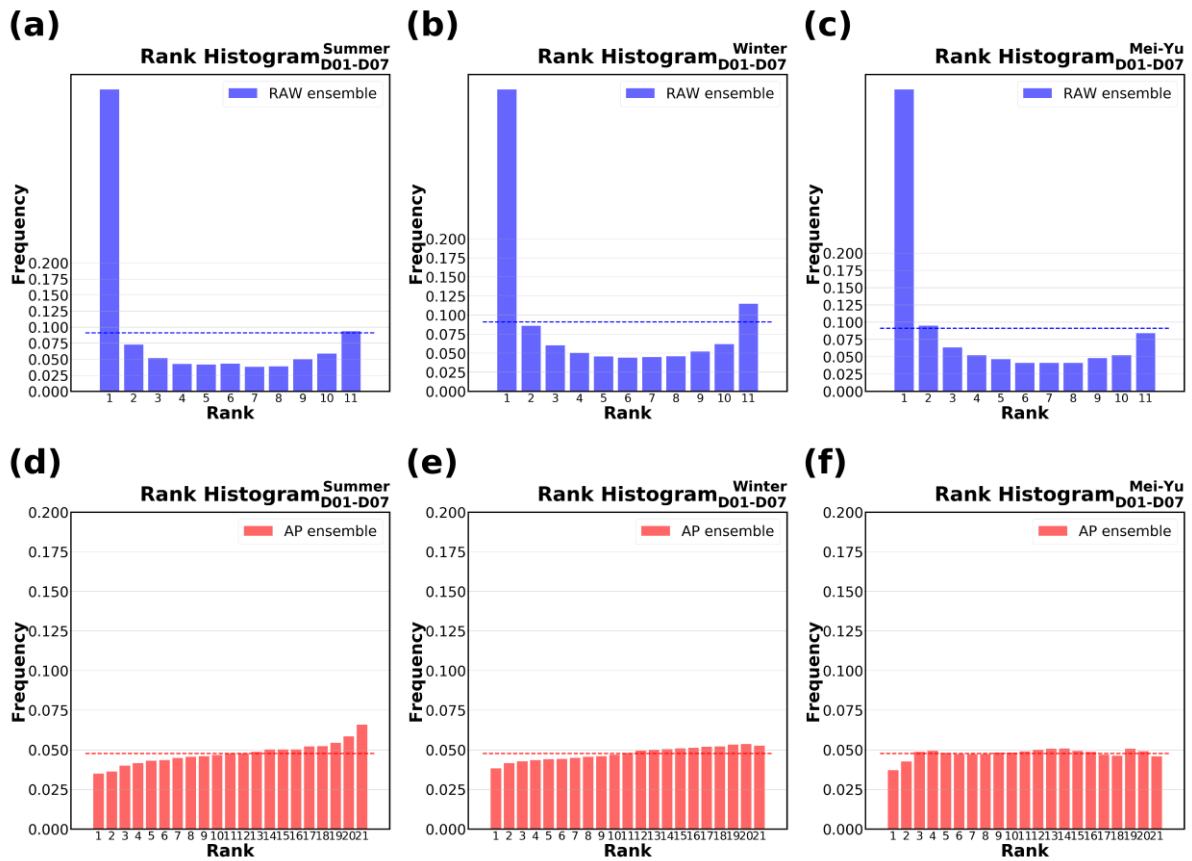


圖1、預報前鋒時間第1週7天累積雨量預報的序位直方圖，其中上排(a-c)為GEFS v12原始預報的結果，下排(d-f)為AP校正後預報的結果；左側(a、d)為夏季，中間(b、e)為秋冬春季，右側(c、f)為梅雨季。水平虛線代表觀測序位均勻分布在所有序位狀況下的頻率。

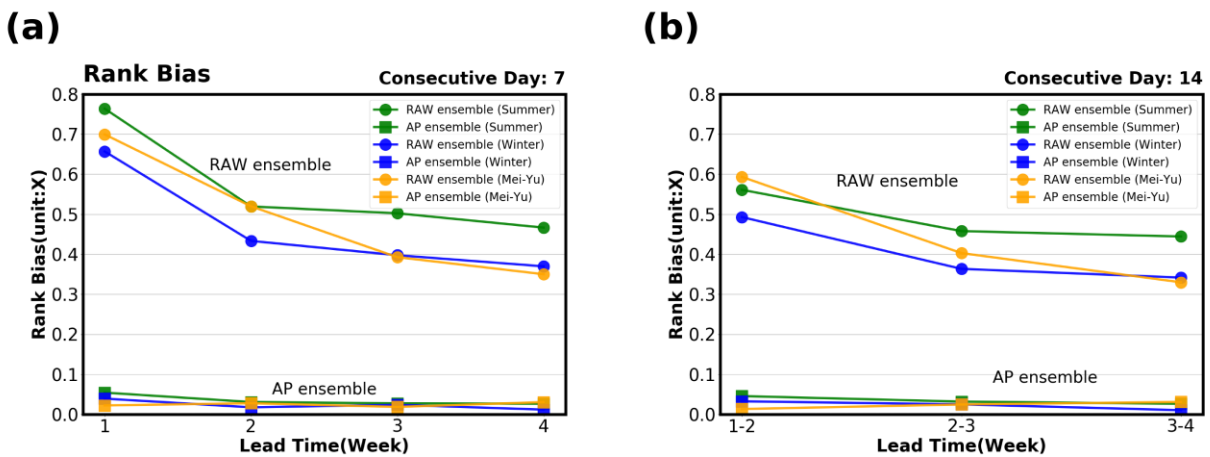


圖2、連續天數累積雨量的序位偏差折線圖，其中(a)為連續7日累積雨量的結果，(b)為連續14日累積雨量的結果。橫軸為預報前鋒時間，單位為週，縱軸為序位偏差量，無單位。顏色表示季節種類，其中綠色為夏季，藍色為秋冬春季，橘色為梅雨季；符號代表預報種類，圓形為GEFS v12原始預報，方形為AP校正後預報。

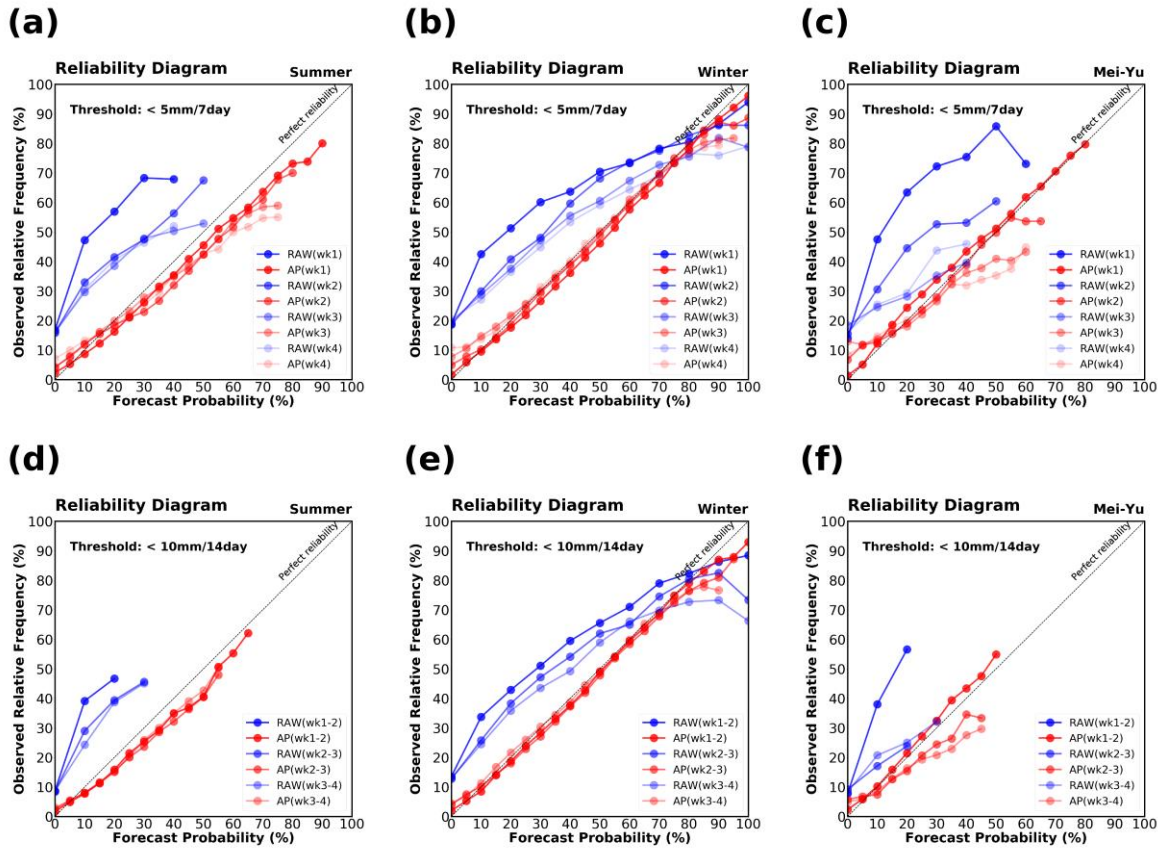


圖3、系集機率預報可信度圖，其中上排(a-c)為連續7天不降雨(門檻為 $< 5\text{mm}/7\text{day}$)的結果，下排(d-f)為連續14天不降雨(門檻為 $< 10\text{mm}/14\text{day}$)的結果；左側(a、d)為夏季，中間(b、e)為秋冬春季，右側(c、f)為梅雨季。顏色代表預報種類，藍色為GEFS v12原始系集機率預報，紅色為經AP校正後的系集機率預報；顏色深淺表示不同預報前領時間，由深至淺分別為第1週至第4週(a-c)與第1-2週至第3-4週(d-f)。

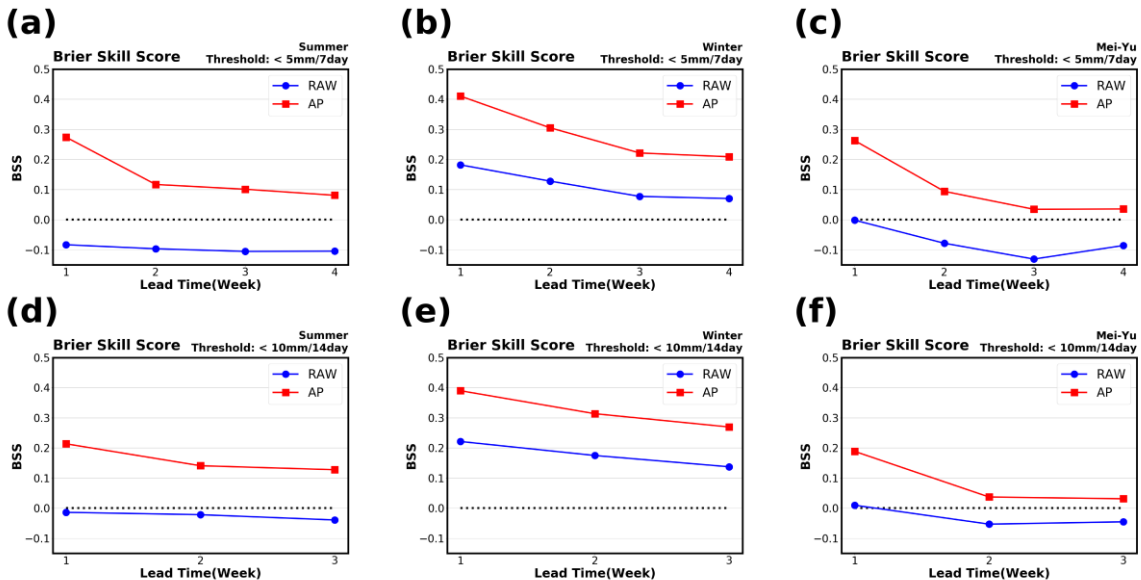


圖4、逐預報前領時間BSS折線圖，其中上排(a-c)為連續7天不降雨(門檻為 $< 5\text{mm}/7\text{day}$)的結果，下排(d-f)為連續14天不降雨(門檻為 $< 10\text{mm}/14\text{day}$)的結果；左側(a、d)為夏季，中間(b、e)為秋冬春季，右側(c、f)為梅雨季。顏色代表預報種類，藍色為GEFS v12原始系集機率預報，紅色為經AP校正後的系集機率預報。

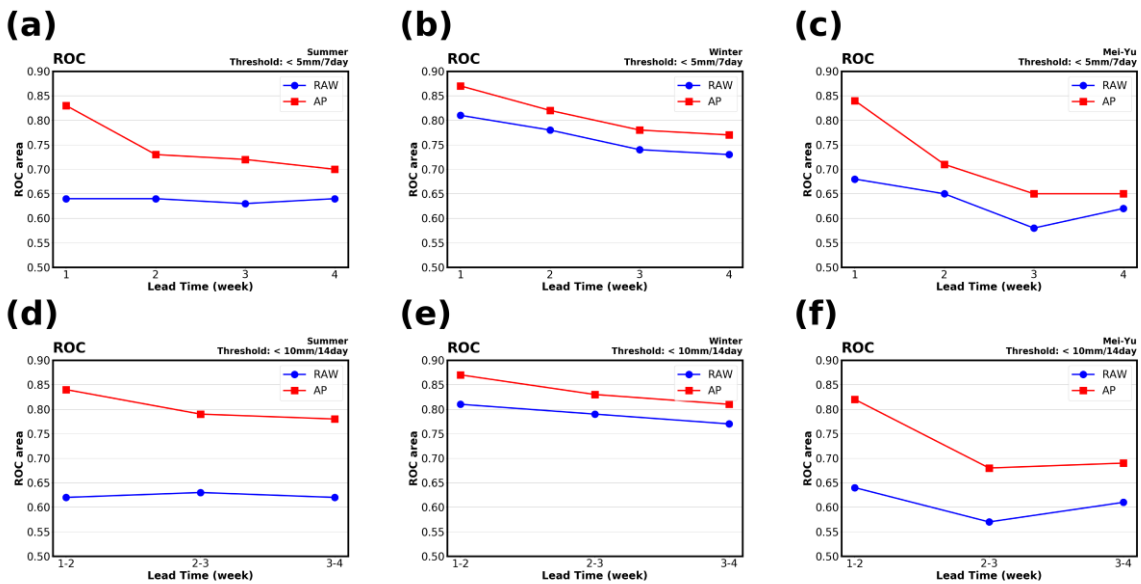


圖5、逐預報前領時間ROC area折線圖，其中上排(a-c)為連續7天不降雨(門檻為 $<5\text{mm}/7\text{day}$)的結果，下排(d-f)為連續14天不降雨(門檻為 $<10\text{mm}/14\text{day}$)的結果；左側(a、d)為夏季，中間(b、e)為秋冬春季，右側(c、f)為梅雨季。顏色代表預報種類，藍色為GEFS v12原始系集機率預報，紅色為經AP校正後的系集機率預報。

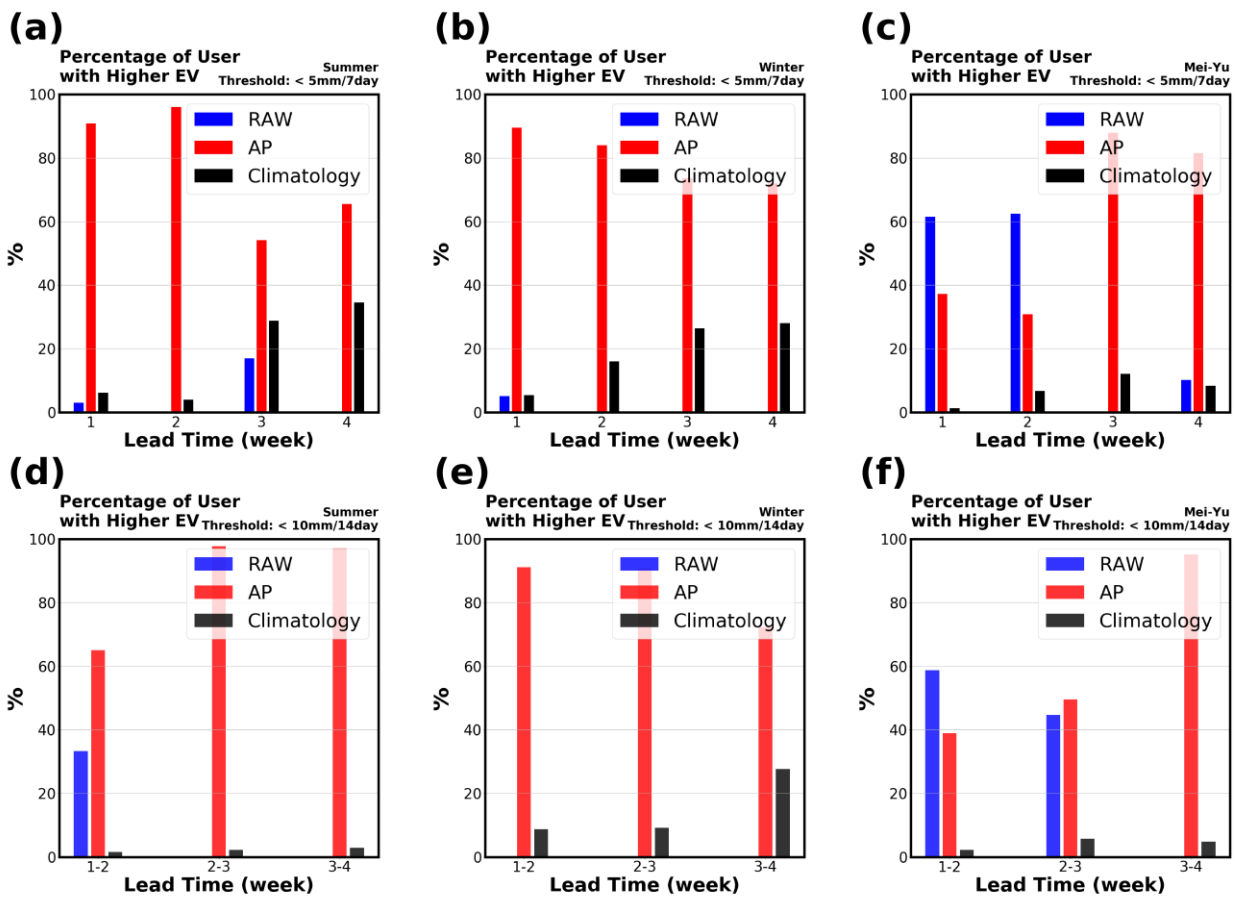


圖6、逐預報前領時間的各預報提供最大經濟價值之cost-loss ratio分布比率直方圖，其中上排(a-c)為連續7天不降雨(門檻為 $<5\text{mm}/7\text{day}$)的結果，下排(d-f)為連續14天不降雨(門檻為 $<10\text{mm}/14\text{day}$)的結果；左側(a、d)為夏季，中間(b、e)為秋冬春季，右側(c、f)為梅雨季。顏色代表預報種類，藍色為GEFS v12原始系集機率預報，紅色為經AP校正後的系集機率預報，黑色微氣候頻率預報。