

中央氣象局WRF系集預報系統之經濟價值分析

陳冠儒¹ 張惠玲¹ 吳佳蓉¹ 汪琮¹ 洪景山¹ 楊舒芝²

中央氣象局¹

中央大學大氣科學系²

摘要

系集預報主要是透過擾動模式初始場、邊界條件，以及各種參數法，產生多個集預報成員，目的在於攫取預報過程中各種不確定性來源。經濟價值（Economic Value, EV）可以評估使用者參考了系集預報後能夠獲得多少效益。

本研究主要採用中央氣象局之WRF系集預報系統（WRF Ensemble Prediction System, WEPS），共20個系集成員，發展系集風雨機率預報，並評估其對2013年至2015年侵臺颱風之預報表現，探討該模式針對不同使用者所能帶來的經濟效益。結果顯示，對於成本損失比（cost-loss ratio）過高或幾乎為零的使用者而言，WEPS所帶來的經濟效益有限；反之在成本損失比介於0.2至0.4的使用者而言，使用WEPS能夠有效降低損害。

關鍵字：系集預報、經濟價值

一、前言

颱風不但是台灣主要的天然災害之一，也是全年主要的降雨來源，每當颱風來襲期間，政府機關必須對即將來臨的強風豪雨做出各種決策，例如鐵路停駛、人員疏散、水庫洩洪、道路封閉等，其中任何一個決策錯誤都意味著人民生命財產的損失，必須非常小心謹慎。

然而數值天氣預報卻充滿著不確定性，且會隨著預報時間拉長，決定性預報的誤差也會隨之增大，增加氣象人員從事預報工作的困難性，連帶影響政府及人民判斷災情的發生。中央氣象局近年來致力發展區域系集預報系統，建立一套以WRF區域模式為基礎之系集預報系統（WEPS，WRF Ensemble Prediction System），期望藉由多個預報成員，涵蓋最大的預報不定性。

本研究使用WEPS對2013年至2015年12個侵台颱風個案的降雨機率預報資料，並以QPESUMS雷達降水估計(QPE)做為降雨之校驗場，經由線性回歸的方式校正其機率偏差，藉由可信度（Reliability）檢視其校正情況，並分析不同使用者參考了WEPS預報結果後所得到的經濟價值（Economic Value）。

二、WEPS簡介及個案資料

中央氣象局區域系集預報系統係以WRF區域模式為基礎所建立，故名WEPS（WRF Ensemble Prediction System），使用之版本為WRF 3.3.1版，擁有3層槽狀網格，水平解析度分別為45、15、5公里，垂直設定共有45層，頂層為30hPa。依照不同的初始條件、邊界條件、模式參數化等，組合成20個不同的系集預報成員。

本研究主要針對2013年至2015年颱風(中央氣象局有發布颱風警報)，進行WEPS之預報表現評估，使用的颱風名稱如表一所示。本研究將WEPS系集預報之各閾值出現機率，降雨預報結果方面與本局研發之劇烈天氣系統（QPESUMS）所推估之雨量的資料進行驗證。

三、分析方法

本研究使用可信度（Reliability）作為機率預報的分析工具，圖一為可信度的示意圖。可信度能用來分析機率預報的結果表現，評估

WEPS在各個預報機率高抱或低估的程度，藉以探究該系集預報模式的系統性偏差。

以預報0到24小時期間降雨量50毫米的機率為例。橫軸為預報機率，WEPS每個系集預報成員都會產生一組降雨分佈，將其20組的預報中針對某個網格點的降雨估計高於50毫米的成員數，除以總成員數目後即可得到「降雨達到50mm/24hr的機率」。由於系集成員有20個，因此可產生21個不同的機率值(i/20, i=0~20)。縱軸是相對應的觀測頻率，亦即「在某個預報機率出現的情況下，觀測真實出現的頻率為多少」，作為參考的觀測資料為QPESUMS的降雨估計。

若是採用完美可信(Perfectly reliable)的預報系統，當模式預報50%的機率出現50毫米的降雨時，真實觀測中出現該降雨量的頻率也是50%，此時信賴曲線(Reliability curve, 即圖一中的藍色虛線)將會落在對角線上。若預報機率高於觀測頻率，表示模式呈現過度預報(Over-forecasting)，此時信賴曲線會往下偏移；反之，則向上偏移。圖一中的黑色水平虛線為氣候發生頻率

經濟價值(Economic Value)的分析則用來評估防災決策者以某個機率預報為依據做出決策時，該預報模式能夠帶來的效益。

每次防災行為的背後將伴隨著下列三項成本或損失：

- 一、每次執行防災行為所需的成本C
- 二、執行防災後可避免之損失Lp
- 三、執行防災後仍無法避免的損失Lu

而防災行動執行於否、災害是否發生與上述三項成本損失的關係如表二所示。

經濟價值計算方法如(一)式所示。

$$EV = \frac{E_{climate} - E_{forecast}}{E_{climate} - E_{perfect}} \quad \dots\dots (一)$$

EV值愈高，表示模式的參考價值愈高，若EV接近0，則意味模式的參考價值與氣候直接進，對決策者的幫助不大。E_{climate}表示參考氣候值做出的防災決策將付出的成本損失，表示為：

$$E_{climate} = \text{Min}[\bar{o}(Lp + Lu), C + \bar{o}Lu]$$

其中 \bar{o} 為災害出現的機率。

E_{forecast}表示參考WEPS預報時將付出的成本損失，其中包含「正確預報時所付出的成本

及其無法避免的損失」、「錯誤警報時引起的防災成本虛耗」及「未報出災害發生時造成的整體損失」，可表示為：

$$E_{forecast} = h(C + Lu) + fC + m(Lp + Lu)$$

E_{perfect}表示參考「完美預報」執行決策所付出的成本損失，由於模式可以100%預報出災害事件的發生，故僅有災害發生時的防災成本及不可避免之損失，表示如下：

$$E_{perfect} = \bar{o}(C + Lu)$$

經過換算後，可將(一)式轉換為以下形式(Richardson 2000)：

$$EV = \frac{\text{min}(\bar{o}, r) - Fr(1 - \bar{o}) + H\bar{o}(1 - r) - \bar{o}}{\text{min}(\bar{o}, r) - \bar{o}r} \quad \dots\dots (二)$$

$$H = h/(h + m)$$

$$F = f/(1 - (h + m))$$

其中H為模式命中率，F為模式誤報率，代表預報模式的表現； \bar{o} 為降雨事件出現的氣候頻率，表示該事件出現的頻繁程度；r表示Cost/Loss Ratio，也就是「防災成本與防災行動可避免損失的比值」，與決策者自身相關，r值愈小表示該決策者可以用少量成本避免掉大量損失，r值愈接近1表示防災的成本與可避免損失相近。

由(一)式可知，經濟效益EV與模式本身的預報能力息息相關，而對於機率預報而言，模式的命中率H及誤報率F會決策者隨著選擇不同的機率閾值(Probability Threshold, Pt)而有不同的變化，因此選擇合理的機率閾值十分重要的。

此外，模式的經濟效益還與降雨事件出現的頻率多寡、模式使用者的特性有密切關係，由於每個決策者採取防災行動的成本，及其能夠避免之經濟損失不盡相同，因此能從WEPS獲得的經濟效益將有所不同，應選擇之機率閾值Pt也會有所差異。而每位模式使用者該如何選擇最有利的Pt則需透過進一步的研究分析。

本研究將針對WEPS預報2013年至2015年侵台颱風之累積降雨之預報，進行預報能力的分析，降雨事件設定預報時間0至24小時之累積降雨達50毫米、80毫米、130毫米進行機率預報分析，並區分平地及山區兩種不同區域，分別進行預報表現評估。

四、分析結果

(一) 降雨機率預報可信度

圖二為WEPS預報0至24小時各降雨事件閾值的可信度分析圖，圖的左半邊為山區的表现、右半邊則為平地的表现，虛線表示WEPS校正前的可信度，實線則為經過線性回歸校正後的可信度。

由圖可以發現，WEPS修正前（虛線）在山區預報出高機率降雨時，實際觀測出現的機率往往偏低，也就是在山區容易有高報機率的現象，表示模式使用者需要保守地看待WEPS在山區的降雨機率預報。而透過線性回歸的校正後（實線），可以發現WEPS的降雨機率預報可以調整至接近完全可信的對角線上，小雨量事件尤為明顯，顯示線性回歸能在一定程度上將WEPS在山區的預報調整至較為可信的狀態。

而WEPS對於平地的預報原本就很接近於完全可信的對角線，因此修正幅度較小，但整體而言，經過線性回歸校正後的實線依然較為接近完全可信。

圖中線段缺漏的部份是由於樣本資料不足而被剔除，目的是為了避免樣本數過低而導致其不具有統計代表性。

(二) 經濟價值分析

圖三為WEPS針對 r 等於0.7的模式使用者預報山區50毫米降雨事件之經濟價值分析圖，顯示出該使用者選擇了不同的機率閾值 P_t 時，所能得到的經濟效益 EV ，藍線為WEPS校正前的 EV 分佈情形。

由圖三可以發現藍線最大值在 P_t 等於0.9的位置，表示對 r 為0.7的使用者而言，若想要在山區得到最大的經濟效益，做決策時則必須將降雨機率閾值定在90%，也就是說每當WEPS預報50毫米的降雨機率高於90%時採取防災行動，長期下來可以將損失最小化。

橘線為經過線性回歸校正後的 EV 分佈情況，可以發現校正前後最大 EV 所對應之 P_t 等於0.7，即為「使用校正後的WEPS預報時，降雨機率閾值需選擇0.7以達到最高的經濟價值」。

圖四中的實線顯示出WEPS系集預報模式預報山區50毫米的降雨機率時，對不同使用者

所帶來最高經濟價值的分佈情形，橫軸 r 從0到1包含了所有的潛在使用者類型，左側縱軸為使用者所能夠得到之最大經濟價值 EV ，藍色表示修正前，橘色表示修正後。

由圖可以發現，WEPS在山區50毫米的預報對 r 介於0.2至0.4之間的使用者而言經濟效益較高，可達0.6以上，其他區域的 EV 也大多高於0，顯示對於大多數的決策者而言，使用WEPS機率預報作為防災決策的參考將具有一定助益。

此外也發現修正前後的 EV 最大值並沒有太大的變化，雖然根據先前可信度分析顯示，WEPS在山區偏向高報降雨機率的情況，可以透過線性回歸方式校正後提高預報可信度，但儘管可信度明顯增加，對於整體的經濟價值而言並沒有太顯著的影響，僅對 r 接近0與接近0.9的模式使用者有提昇其經濟價值。

另外圖中的點對應的是右側縱軸，表示某 r 使用者能得到最高經濟價值 EV 時所對應之機率閾值 P_t ，藍色表示校正前，橘色表示校正後。以 r 為0.2為例，使用校正前WEPS作為決策參考時，若將機率閾值設定在0.3，即每當降雨機率高於30%時便執行防災行為，此時將能夠得到之最高經濟價值 EV 約為0.6。

而經過線性回歸修正後 P_t 點位置比較接近對角線，代表 P_t 值與 r 的數值接近，因此當某決策者使用了校正後的WEPS機率預報時，若根據本身的 r 為依據選擇機率閾值，大致上即可得到最高的經濟價值。而未經校正的WEPS機率預報，則必須經過分析後，才能知道最合適的機率閾值。

圖五比較了在不同的區域、不同的降雨事件下，WEPS的經濟價值。左側3張圖為山區、右側為平地，降雨事件由上而下依序為50毫米、80毫米、及130毫米的累積降雨。

大致上WEPS對於存在於山區的使用者能夠提供較高的經濟價值，且隨著降雨事件增加，山區 r 高於0.3的使用者而言經濟價值會降低， r 低於0.3的使用者則會得到更多經濟價值；平地則是 r 高於0.2的使用者的經濟價值將減少，低於0.2者會增加，顯示出WEPS對於強降雨事件的預報，防災成本較低的使用者將有更多的受惠。

此外不論是平地或山區的使用者，若欲使用校正後的WEPS做為決策依據並取得最高的效益，大致上可選擇自身的 r 作為制定機率閾值 P_t 的參考。WEPS預報山區降雨時校正前後

的經濟價值並沒有明顯變化，而在預報平地區域強降雨時，校正後的經濟價值則有普遍提昇的現象。

五、結論與展望

本研究針對中央氣象局以區域模式WRF為基礎，發展出的系集預報WEPS進行線性回歸校正，並對其預報結果進行分析。結果顯示WEPS在山區有偏向高報降雨機率的現象，但經過校正後，減緩了降雨機率高報的情形，接近「完全可信」的系集預報。而在平地區域，WEPS原本就很接近「完全可信」，修正幅度有限。

經濟價值分析可以幫助我們評估使用系集預報作為決策參考時，能帶來多少的效益。整體而言，WEPS在山區的經濟價值較平地高，對於山區50毫米的降雨事件而言， r 介於0.2至0.4之間的決策者可獲得最高的經濟價值。

不過隨著降雨強度的增大，對於高防災成本（高 r ）決策者經濟價值會降低，但低防災成本（低 r ）決策者獲得之經濟效益將會增加，顯示決策者獲得之經濟價值與其降雨事件的大小及決策者本身特性息息相關。

除此之外，選擇了不同的機率閾值 P_t 做參考，也將得到不同的經濟價值，為了迅速選擇出合適的降雨閾值，可以使用校正後的WEPS作為決策的參考。雖然由經濟價值分析來看，校正前後並不會明顯改變模式預報之經濟價值，但使用了校正後的機率預報，比較容易訂出合理的參考閾值，得到最高的經濟效益。

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。

李志昕、洪景山，2014：“區域系集定量降水預報之應用與分析研究”。*天氣分析研討會大氣科學*。中央氣象局。

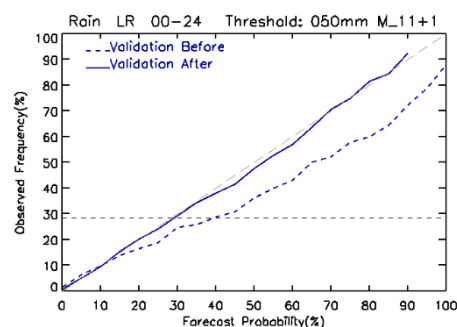
Hamill, T.M., 1997: Reliability diagrams for multcategory probabilistic forecasts. *Wea. Forecasting*, **12**, 736-741.

Richardson, D. S., 2000a: Skill and economic value of the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor.*

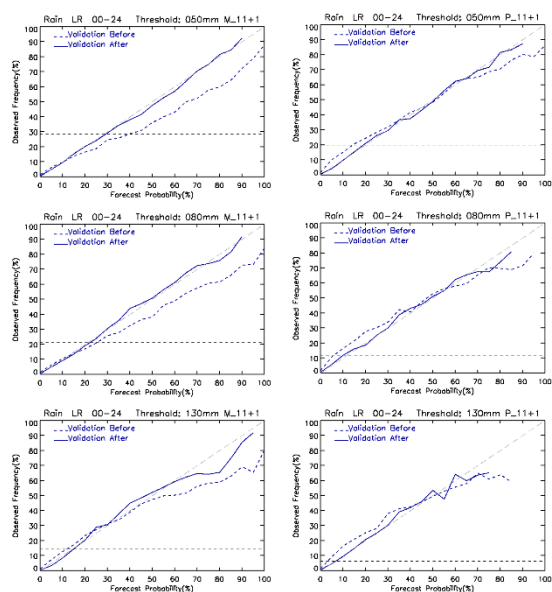
Soc., **126**, 649 – 668.

Zhu Y, Toth Z, Wobus R, Richardson D, Mylne K. 2002. The economic value of ensemble-based weather forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society* **83**: 73–83.

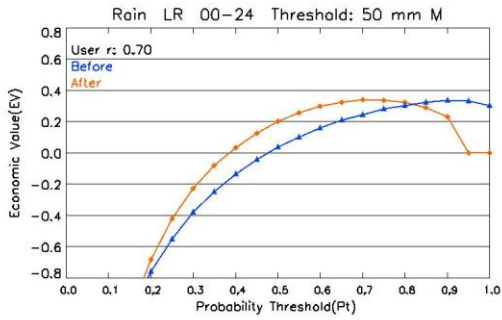
附圖



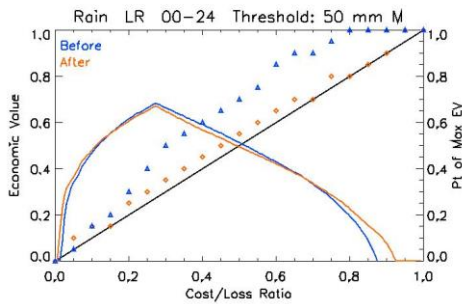
圖一、系集機率預報之可信度圖，橫軸為系集模式預報某天氣閾值發生的機率，縱軸為預報出該機率的網格點，於實際觀測中出現該天氣閾值的機率。灰色對角虛線為參考線，高於參考線表示低估天氣事件發生的機率；反之，則為高估。水平虛線則為氣候值，表示該天氣事件整體發生的機率。



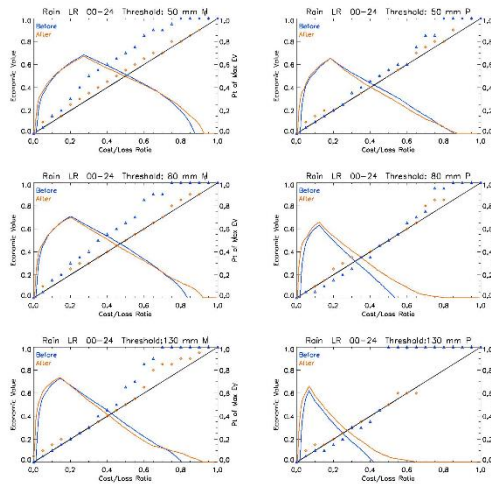
圖二、WEPS預報0至24小時各降雨事件閾值的可信度分析圖，圖的左半邊為山區表現、右半邊則為平地的表現，由上而下分別代表50毫米、80毫米、130毫米之降雨事件，虛線表示WEPS校正前的可信度，實線則為經過線性回歸校正後的可信度。



圖三、WEPS針對 r 等於0.7的模式使用者預報山區50毫米降雨事件之經濟價值分析圖，橫軸表示設定的降雨機率閾值 P_t ，縱軸表示能夠取得之經濟價值EV，藍線為WEPS校正前的EV分佈情形，橘線則為經過線性回歸校正後的EV分佈。



圖四、WEPS系集預報模式預報山區50毫米的降雨機率時，對不同使用者所帶來最高經濟價值的分佈情形，橫軸 r 從0到1包含了所有的潛在使用者類型。圖中的線對應左側縱軸，表示使用者所能夠得到之最大經濟價值EV，藍色表示修正前，橘色表示修正後。圖中的點對應的是右側縱軸，表示某 r 使用者能得到最高經濟價值EV時所對應之機率閾值 P_t ，藍色表示校正前，橘色表示校正後。



圖五、與圖四相同，但比較在不同的區域、不同的降雨事件下WEPS的經濟價值。左側3張圖為山區、右側為平地，降雨事件由上而下依序為50毫米、80毫米、及130毫米的累積降雨。

颱風個案

2013蘇力	2014鳳凰
2013潭美	2015蓮花
2013康芮	2015昌鴻
2013天兔	2015蘇迪勒
2013菲特	2015天鵝
2014麥德姆	2015杜鵑

表一、2013年至2015年侵台颱風個案。

		防災行為	
		Yes	No
災害發生	Yes	Hit(h) 損失減少 C+Lu	Miss(m) 損失 Lp + Lu
	No	False Alarm(f) 防災成本 C	Correct Rejection(c) 零花費 0

表二、防災決策與各項成本損失的關係表。