

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

陳冠儒¹ 張惠玲² 吳佳蓉³ 汪琮³ 洪景山⁴ 楊舒芝⁵

¹中央氣象局第四組

²中央氣象局科技中心

³中央氣象局衛星中心

⁴中央氣象局資訊中心

⁵中央大學大氣物理研究所

(中華民國 107 年 4 月 20 日收稿，中華民國 107 年 9 月 10 日定稿)

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，產生多個系集預報成員，目的在於攫取預報過程中各種不確定性來源。經濟價值EV (Economic value)可用以評估使用者參考了系集預報進行決策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：WEPS (WRF ensemble prediction system) 發展系集颱風降雨機率預報，除評估使用者以此預報產品做為決策依據所能獲得的經濟效益外，同時也比較機率預報與決定性預報兩者經濟價值的差異。結果顯示，即便決定性預報與機率預報來自於相同的系集成員，對於大部分的模式使用者來說，機率性預報能夠提供的經濟價值較高。

關鍵字：機率預報、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，預報誤差也會隨之增大，影響政府及人民判斷災情是否發生、是否需要防災作為。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，期望藉由多個預報成員，涵蓋合理且足夠的預報不確定性。

當我們評估一個預報系統的可用性時，除了考量系統本身的預報品質之外，使用者以該預報資訊做為決策依據時可獲得的經濟效益也是需要考量的因子(Chang et al. 2015)。只有預報系統能協助使用者作出決策並得到益處時，該預報系統才有價值(Mylne, 2002)。

在數值天氣預報問世以前，人們習慣以自身經驗作為決策的依據，例如農民在颱風來襲前，會依照過去每次颱風侵襲帶來的損失經驗，決定是否執行農作物防護或提前採收等防災行動，假設該農民過去的經驗指出，每次颱風來襲後農作物將造成嚴重的損失，此時農民便會提前搶收；若經驗指出每次颱

風期間農作物損失不大，或是防災成本過高，該農民將因為不符合經濟效益而不採取防災作為。

隨著氣象模式發展精進，其預報準確性已足以作為防災決策的依據，決策者可以根據數值預報的結果決定是否針對某特定災害或損失有所作為。例如模式預報未來可能會有強降雨出現時，果農可提早或即時採收水果；或是預期未來一年可能發生乾旱的前提下，做出休耕的決定。Babara et. al. (1986)描述如何利用決策模式決定美國農夫當年度應該要種植小麥或是休耕一年。

一旦決策者不再根據過去的氣候經驗進行判斷，而是仰賴數值預報的結果決定採取防災行動與否，此時衍伸出的課題便是：「相較於參考氣候經驗而決定的防災行動，參考數值模式預報將可減少多少損失？」

經濟價值分析的目的即為探討數值模式的預報結果，能夠為防災行動的決策者帶來多少經濟效益，也就是以數值模式預報做為防災決策的依據時，長期下來能夠降低多少成本及損失。此外，透過經濟價值分析，我們可以瞭解哪些決策者能夠透過數值模式預報得到經濟效益，而哪些決策者的經濟效益反而不如參考氣候值。一旦決策者了解自身特性之後，便能得知數值模式對自己的決策是否有所幫助，以及其效益的高低。本文中所提之經濟價值並非「模式本身的價值」，而是「對於決策者而言，模式所能帶來的價值」。

關於如何利用機率預報做出最好的決策，Murphy(1977)證明如果是採用校正後接近完全可信的機率預報，那麼在明確知道使用者的成本損失比 r 的狀況下，只要選擇和 r 值相同的機率門檻(Probability threshold, P_t)，就可得到最大的經濟價值。 P_t 所代表的意思是：當預報機率達到此門檻時，使用者就視為所預報的天氣事件會發生，而會事先採取防災行動。但在某些情況下，使用者的 r 並無法明確被得知，例如Chang et al. (2015)中的應用實例，但透過經濟價值分析，使用者依然可以藉由過去的防災經驗求出成本損失比，進而做出最好的決策。

Chang et al. (2015)同時指出：(1)預報系統所能提供給使用者的整體經濟價值主要決定於系統的區辨能力；亦即，預報系統所能提供的整體經濟價值只能透過改善系統的區辨能力來加以提升。(2)預報系統所能提供的整體經濟價值對於預報偏差並不敏感。換句話說，校正程序並無法改善預報系統所能提供的整體經濟價值。(3)如果使用者選擇適當的機率門檻，即便採用有偏差的預報，依然可以得到最大的經濟價值。此機率門檻可以經由過去長期的經濟價值分布而求得。

由於一般民眾並不熟悉機率預報產品，習慣的資訊往往是「決定性預報」，例如：「未來24小時內會發生100毫米的降雨」或「不會發生100毫米的降雨」。但系集機率預報提供的資訊為：「未來24小時內降下100毫米雨量

的機率為80%」，許多民眾因不理解降雨機率的真正含意而難以決定是否需要採取防災作為。此外，水文動力模式只能以決定性降水預報作為模式之初始條件，而無法以降雨機率預報作為初始場。

基於上述理由，中央氣象局以系集預報為基礎，利用機率擬合平均PM (Probability-matched mean)、超越機率 QPFP (QPF exceeding a probability threshold) 等統計後處理方法，將系集預報轉換為包含不確定訊息的決定性預報產品。然而，這些經過數學方法轉換後的決定性降水預報產品，為模式使用者帶來的經濟價值是否與原本的機率預報相同？或者是機率性資訊轉換成相對容易使用的決定性資訊後，將損失某種程度的經濟效益作為代價呢？

本研究主要針對台灣地區的颱風，利用中央氣象局發展的WEPS進行定量降雨機率預報 PQPFs (Probabilistic quantitative precipitation forecasts)，並進一步對系集機率預報進行評估、校正和經濟價值分析，最終目的在於幫助防災決策者及一般民眾在颱風期間能夠藉由參考系集機率預報做出最好的決策，獲得最大的經濟價值，以提升防颱作業成效。所有研究成果分述於三篇論文中，包括系集降雨機率預報之評估、校正與經濟價值分析。本論文的重點在於評估使用者以WEPS PQPFs做為決策依據所能獲得的經濟效益外，同時也比較系集機率預報與系集決定性預報

的經濟價值差異。擬探討的科學議題是：我們將系集降雨預報透過系集平均、PM或QFPF方法轉成決定性的系集降雨預報，以供水利單位之防災需求，在轉換過程中，究竟損失了哪些系集預報原有的資訊或優勢呢？

本論文第二部份簡述WEPS模式及資料來源，第三部份介紹分析方法，第四部份探討WEPS PQPFs的可信度以及經濟價值，並分析預報偏差校正前後的經濟價值變化。第五部份評估使用者選擇WEPS機率預報或各種決定性預報作為決策依據時，整體所帶來經濟效益的差異，第六部份我們以實例說明針對台北氣象站50毫米之災害事件，參考系集平均或機率預報時的成本損失概算。最後一部分則是結論。

二、WEPS 簡介及個案資料

本研究所採用的WEPS是使用WRF/ARW 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；透過邊界條件擾動、初始場擾動以及不同的模式物理參數法設定，產生20組系集成員（李及洪，2011，2014）。WEPS的預報作業每日執行4次，分別為每日的00、06、12和18 UTC。本研究採用其解析度最高的第三層網格資料進行系集颱風降雨機率預報。

由於2016年起氣象局WRF進行模式改版，為了避免模式改版後預報特性改變增加分析的不確定性，本文僅採用2013年至2015年，中

央氣象局有發布警報之的颱風個案，進行WEPS 0至24小時PQPFs預報評估。使用的颱風個案名稱及時間範圍如表1所示。預報校驗的觀測資料取自氣象局劇烈天氣監測系統QPESUMS (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors)之雷達降水估計，該系統整合多種觀測資料，並將雷達觀測資料進一步計算，得到雷達降水估計、雷達風場等應用產品，提供給政府機構作為防災之參考依據。為評估WEPS在不同地形之預報差異，本研究將地表類型區分為兩類，海拔高於500公尺的網格點視為山區，低於500者視為平地。

三、分析方法

(一) 可信度 (Reliability)

數值模式均存在著某種程度的系統性偏差，本研究透過可信度分析圖評估WEPS PQPFs的系統性偏差，了解預報機率與觀測頻率的一致性。圖1為可信度分析圖之示意圖。橫軸為預報機率，針對每一個模式格點，將降雨預報高於50毫米的成員數，除以模式成員數後即可得到「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。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」。

若模式預報為完美可信，觀測出現的頻率應與預報機率相同。換言之，採用完美可信

的預報系統時，當模式預報機率為 $X\%$ 時，其所對應的真實觀測頻率也會是 $X\%$ ，因此信賴曲線會落在對角線上。若預報機率高於觀測頻率，表示模式呈現過度預報，此時信賴曲線會落在對角線下方，如圖1中的紅線；反之，則會落在對角線上方，如圖1中的藍線。圖中同時顯示出該降雨事件的氣候發生頻率，以水平曲線的方式呈現，以圖1為例，該項與事件出現的氣候頻率約為29%。

（二）線性校正方法（LR calibration method）

幾乎所有的預報模式都存在系統性偏差，而WEPS PQPFs經過統計分析後發現也具有濕偏差的特性（吳等，2015）。透過歸線性迴歸方法可以有效修正系統性偏差（Chang et.al.

2012）。為修正數值模式存在之系統性偏差，本研究使用線性迴歸法進行交叉驗證，而為了降低訓練組與驗證組的將依性，我們進一步將颱風個案分離處理，以提高評估結果的統計代表性。校正過程分為訓練及驗證，首先由小到大選擇17種不同的雨量門檻，訓練時將12個颱風個案中的11個視為訓練組，透過函數取得某雨量閾值與其相鄰雨量門檻之線性迴歸關係，1個颱風個案視為驗證組，將其預報之PQPFs預報結果導入其關係式中，得到校正後的PQPFs。直到12個颱風個案都分別當過驗證組後，即完成交叉驗證。

本研究亦採用了類神經網路校正法ANN（Artificial neural network）進行偏差修正，但由於兩種校正方法的結果相當類似，故本研究僅以線性迴歸校正作為代表。

表1、2013年至2015年侵台颱風個案及侵台期間。

Year	Typhoon	Start – End
2013	Soulik (TY 01)	0000 UTC 11 Jul – 0000 UTC 14 Jul
	Trami (TY 02)	0000 UTC 20 Aug – 0000 UTC 22 Aug
	Kong-Rey (TY 03)	0000 UTC 27 Aug – 0000 UTC 30 Aug
	Usage (TY 04)	1800 UTC 19 Sep – 1200 UTC 22 Sep
	Fitow (TY 05)	1800 UTC 04 Oct – 0600 UTC 07 Oct
2014	Matmo (TY 06)	0000 UTC 21 Jul – 1800 UTC 23 Jul
	Fung-Wong (TY 07)	1800 UTC 18 Sep – 1200 UTC 22 Sep
2015	Linfa (TY 08)	1800 UTC 05 Jul – 0600 UTC 08 Jul
	Chan-Hom (TY 09)	1200 UTC 08 Jul – 0600 UTC 11 Jul
	Soudelor (TY 10)	1800 UTC 05 Aug – 0600 UTC 09 Aug
	Goni (TY 11)	0600 UTC 20 Aug – 1800 UTC 23 Aug
	Dujan (TY 12)	1800 UTC 26 Sep – 1800 UTC 29 Sep

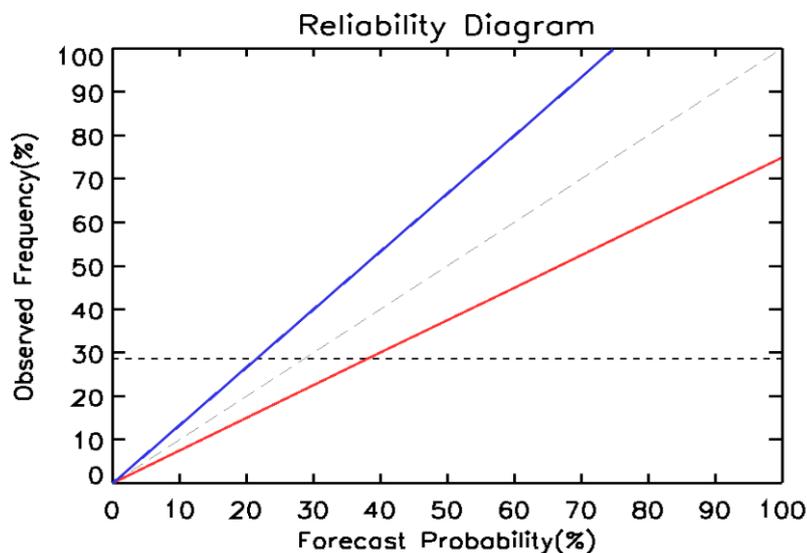


圖1、系集機率預報之可信度示意圖，橫軸為系集模式預報某天氣閾值發生的機率，縱軸為預報出該機率的網格點，於實際觀測中出現該天氣閾值的機率。灰色對角虛線為參考線。當模式傾向「高報」降雨機率時，其可信度曲線位置會偏向參考線下方，如紅線所示。反之，若模式傾向「低報」降雨機率，則可信度曲線會偏向參考線上方，如藍線所示。黑色橫虛線表示該天氣閾值在氣候上實際發生的機率。

(三) 經濟價值 (Economic value)

一個預報系統的經濟價值定義如下 (Richardson 2000) :

$$EV = \frac{E_{climate} - E_{forecast}}{E_{climate} - E_{perfect}} \quad (1)$$

$E_{climate}$ 、 $E_{forecast}$ 和 $E_{perfect}$ 分別是以氣候資訊、預報系統資訊以及完美預報系統資訊做為決策依據的費用期望值。完美的預報系統是指預報系統對於天氣事件的發生與否，永遠提供正確的預報，因此 $E_{perfect}$ 是三個費用期望值中最小的一個。

簡言之，經濟價值是以 $E_{climate}$ 做為基準，去計算「 $E_{forecast}$ 所降低的費用」佔「 $E_{perfect}$ 所降低的費用」的百分比。根據這個定義，經濟價值可解釋為：相對於採用氣候資訊做決策，如果完美的預報系統可以讓使用者省下100元，那麼經濟價值是EV的預報系統，將可為使用者省下的金額為 $100 * EV$ 元。

EV的值域從負無限大到1。當預報系統的費用期望值等於氣候資訊的費用期望值，即 $E_{forecast}$ 等於 $E_{climate}$ 時，使用者不如直接使用氣候資訊為參考，此時該預報系統沒有任何經濟價值，EV之值為0；唯有預報系統的費用期望值小於氣候資訊的費用期望值，也就是 $E_{forecast}$ 小於 $E_{climate}$ 的情況下，預報系統才具有相對的經濟價值，其EV值將大於0，使用者也才會捨棄氣候資訊，改以此預報系統做為決

策依據。而採用完美的預報系統時將可得到最大的經濟價值，其EV值等於1。

經濟價值分析可用以評估決策者以某個預報系統作為決策依據時，所能獲得的經濟效益。每次防災行動將伴隨著三項成本或損失，包括：防災行動所需的成本C、採取防災行動後可避免的損失 L_p 以及無法避免的損失 L_u 。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2所示， h 表示數值模式預測出災害，且觀測上也確實發生災害的機率； m 表示模式沒有訊號，但實際上卻發生災害的機率； f 代表預測有災害發生，而實際上沒有發生的機率； c 則是模式預報沒有災害，觀測上也確實沒有災害事件的機率。

$E_{climate}$ 是以氣候資訊做為決策依據的費用期望值，表示為：

$$E_{climate} = \text{Min}[\bar{o}(L_p + L_u), C + \bar{o}L_u] \quad (2)$$

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：

$$E_{forecast} = h(C + L_u) + fC + m(L_p + L_u) \quad (3)$$

$E_{perfect}$ 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：

$$E_{perfect} = \bar{o} (C + Lu) \quad (4)$$

經過換算後，可將(1)式轉換為以下形式 (Richardson 2000)：

$$EV = \frac{\min(\bar{o}, r) - Fr(1 - \bar{o}) + H\bar{o}(1 - r) - \bar{o}}{\min(\bar{o}, r) - \bar{o}r} \quad (5)$$

$$H = \frac{h}{(h+m)} \quad (6)$$

$$F = \frac{f}{(1 - (h+m))} \quad (7)$$

其中H為模式命中率，F為模式誤報率，為模式預報本身的表現； \bar{o} 為降雨事件出現的氣候頻率，表示該事件的頻繁程度；r是使用者的成本損失比，定義為「防災行動的成本C」除以「防災後可避免損失 L_p 」。針對某一天氣事件，不同的使用者有不同的C和 L_p ，因此會有不同的r。要說明的是，當r值超過1時，表示C高於 L_p ，此時使用者執行防災的成本高於可以避免掉的損失，這個情況下使用者顯然不會有防災的需求，因為防災並不符合成本效益；而r值等於0時代表使用者的C等於0，即為防災行動完全不需要成本，在這個情況下只需要每次可能的災害發生前都執行防災即可，因此也沒有必要參考模式預報。綜合以上所

述，所有模式潛在使用者類型均會落在r從0到1之間的範圍內。

此外，r值很小的使用者是具有最大經濟效益的一群，因為他們相對地只需要支出微薄的防災成本，就可以避免掉相當大的損失。另一方面，r值很大的使用者必須支付較多的防災成本，才能避免掉同樣大小的損失，因此需要有更可靠的預報來降低防災成本的風險。

由公式(5)可知：經濟價值除了和預報本身表現，即H和F有關外，同時也和事件的氣候發生頻率 \bar{o} ，以及使用者的成本損失比r有關 (Zhu et al. 2002)。而對於機率預報而言，命中率H及誤報率F會隨著決策者選擇不同的機率閾值 P_t 而有不同的變化。

舉例說明，假設WEPS某預報出現80mm累積降雨的機率為50%，而實際觀測上亦有出現80mm以上的降雨。某使用者設定40%作為 P_t 時，由於預報結果高於設定的 P_t ，因此將被認定為預報為命中；但另一個使用者將 P_t 定為60%，此時由於預報結果沒有超過設定的 P_t ，則會被認定為預報沒有命中。由上述例子可以發現，選擇不同的 P_t 作為機率預報的參考時，反映模式表現的H及F也將不同。更進一步地說，當使用者選擇不同的 P_t 做作為閾值參考時，所得到之經濟價值也將有所差異。

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，應選擇之最佳 P_t 也會有所差異。Murphy(1977)證明：

如果採用完全可信，也就是無偏差的預報，則使用者得到最大經濟價值的最佳機率門檻恰好就等於自己的成本損失比 r 。比方說， $r=0.5$ 的使用者如果選擇0.5做為機率門檻，就可得到最大的經濟價值。

本研究針對2013至2015年颱風個案，進行WEPS PQPFs預報結果之評估，選定50mm/24hr、80mm/24hr、13mm/24hr等3種降雨事件，以及平地、山區兩種不同區域進行分析。

表2、防災決策與各項成本損失的關係表。

		防災行動	
		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

四、結果分析

(一) 降雨機率預報可信度

圖2為WEPS 0-24小時PQPFs的可信度分析圖，(a)、(b)、(c)為山區網格之可信度，(d)、(e)、(f)則為平地網格之可信度，由上至下分別為24小時內累積50mm、80mm、130mm之降雨事件。虛線為WEPS PQPFs原始之可信度曲線，實線則為經過線性迴歸校正後的可信度曲線。

可以發現，比起在平地的預報，校正前的PQPFs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WEPS在山區容易有高報現象。而透過線性迴歸的校正後，WEPS PQPFs的可信度曲線很接近對角線，表示校正後的預報相當接近完全可信，顯示線性迴歸校正能成功修正WEPS PQPFs的系統性偏差，且山區尤為明顯。由於平地的預報原本就很接近於完全可信，因此修正幅度較小，

但仍可發現在較低預報機率時出現的低估情形有被改善的情況。

整體而言，線性迴歸可以成功的修正 WEPS PQPFs 在山區和平地的預報偏差。圖中線段缺漏的部份是由於樣本資料不足而被剔除，剔除標準為 12 個颱風個案中，共計 3 個以上颱風於該降雨閾值的資料數目為 0 時，將不繪製該線段資料，目的是為了避免樣本缺乏統計代表性。

（二）經濟價值分析

圖 3 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 作為決策依據時，所能得到的經濟效益 EV 。橫軸表示該使用者選擇的 P_t ，縱軸表示相應可得到的 EV 。

藍線為 WEPS PQPFs 未經校正之 EV 分佈情形。可以發現藍線 EV 最大值在 P_t 等於 0.9 的位置，表示對 r 為 0.7 的決策者而言，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%。換句話說，每當 WEPS 預報 50 毫米的降雨機率高於 90% 時採取防災行動，長期下來可將損失最小化。

橘線為經過線性迴歸校正後的 EV 分佈情況，可以發現校正前後決策者可得到之最大 EV 值幾乎相同，顯示偏差校正對於 EV 最大值的變化並不顯著，決策者並不會因為使用了校正後的 WEPS 預報結果，而減少花費。

不過校正前後的最佳閾值出現了變化。校正後決策者要得到最高的 EV ，應該選擇 0.7 作為警戒閾值，也就是當校正後的 WEPS 預報結果，顯示有 70% 的機會發生 50 毫米的降雨時，決策者必須採取防災措施，以期將損失最小化。

接下來我們進一步探討針對相同的降雨強度， r 值不同的決策者各自能獲取最大 EV 值為多少，以及得到最大經濟價值所需選擇的最佳 P_t 。圖 4 顯示 WEPS PQPFs 針對山區降雨大於 50mm/24hr 的事件，所能提供給不同決策者的最高經濟價值 EV_{max} 分佈。

左側縱軸為決策者所能夠得到之 EV_{max} ，藍色表示預報偏差修正前，橘色表示修正後。可以發現：WEPS PQPFs 對於 r 介於 0.2 至 0.4 之間的山區決策者而言有較高的經濟效益，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，並選擇適當的機率閾值作為防災決策的參考將具有一定助益。

此外也發現線性迴歸校正前後的 EV_{max} 曲線並沒有太大的變化，雖然根據先前可信度分析顯示，WEPS PQPFs 在山區有高報情況，可以透過線性迴歸校正後提高預報可信度，但校正對於整體的經濟價值而言幾乎沒有影響。

圖 4 中的點對應的是右側縱軸，表示某 r 決策者為了能得到 EV_{max} 時應採用的 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 P_t 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 EV_{max} ，其值約為0.6。而經過校正後 P_t 點的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，此結果與Murphy (1977)相同。而未經校正的WEPS機率預報，則必須經過分析後，才能知道最佳的機率閾值。

圖5比較在不同的區域、不同的降雨事件下，WEPS PQPFs所能提供給使用者的 EV_{max} 。可以發現，代表山區的(a)、(b)、(c)圖 EV_{Max} 分佈較高，表示WEPS對於目標為山區的使用者能夠提供較高的經濟價值，推測是由於颱風的強降雨分佈與颱風中心及中央山脈的相對位置密切相關 (Su et. al. 2012)，強降雨容易出現在迎風面的特性，讓山區的颱風降雨可預報度高於平地。

隨著降雨強度增加，山區 r 高於0.3的使用者其所能得到的 EV_{max} 會降低， r 低於0.3的使用者反而會得到更高的 EV_{max} ；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。亦即，當降雨強度增加時，WEPS PQPFs的預報資訊將為 r 值很小的使用者帶來更高的經濟效益。

此外不論是平地或山區的使用者，若欲使用校正後的WEPS做為決策依據並得到最高的經濟效益，大致上可選擇自身的 r 值作為機率閾值 P_t 。而不論針對山區或平地、大降雨事件或小降雨事件，校正前後的經濟價值均沒有明顯變化，顯示 EV_{max} 對於線性迴歸校正並不敏感。

本研究亦分析了類神經網路校正後PQPFs之經濟價值變化，發現其與線性迴歸校正的結果相同：其經濟價值於校正前後無明顯改變，表示 EV_{max} 對於校正的敏感度低。而此也印證了Chang et al. (2015) 所提經濟價值對於預報機率校正的敏感度不高之結果。

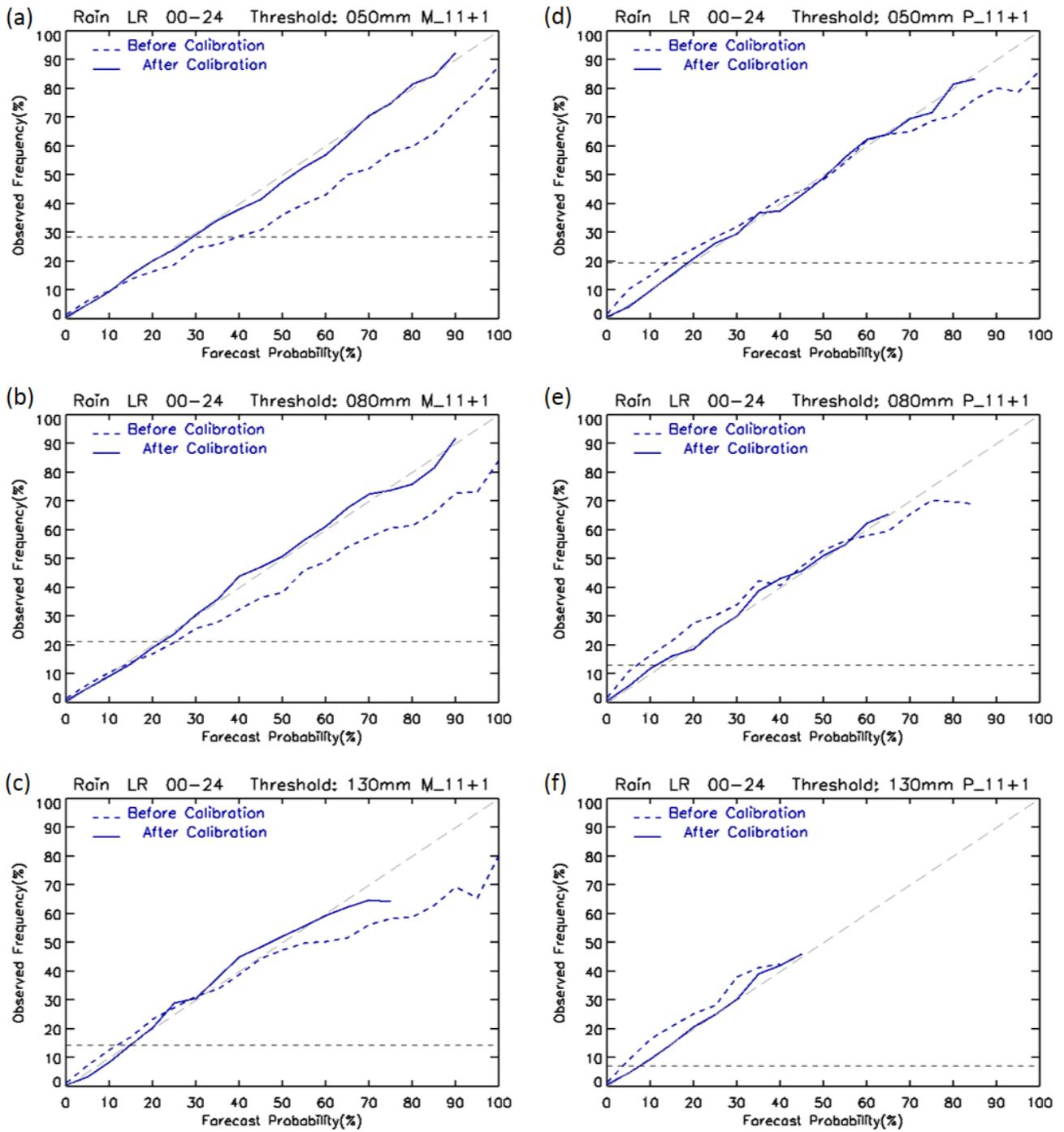


圖2、WEPS預報0-24小時各降雨事件閾值在不同地表類型下的可信分析圖。(a)、(b)、(c)為山區網格之可信度，(d)、(e)、(f)則為平地網格之可信度，各類型對應之閾值分別為50毫米、80毫米、130毫米/24小時之降雨事件。圖中虛線為未經校正的WEPS PQPFs可信度曲線，實線則為經過線性迴歸校正後的可信度曲線。由圖可知，透過線性迴歸的校正後(實線)，WEPS PQPFs可以調整至接近完全可信(對角虛線)，顯示線性迴歸校正能成功修正WEPS PQPFs的系統性偏差，且山區尤為明顯。

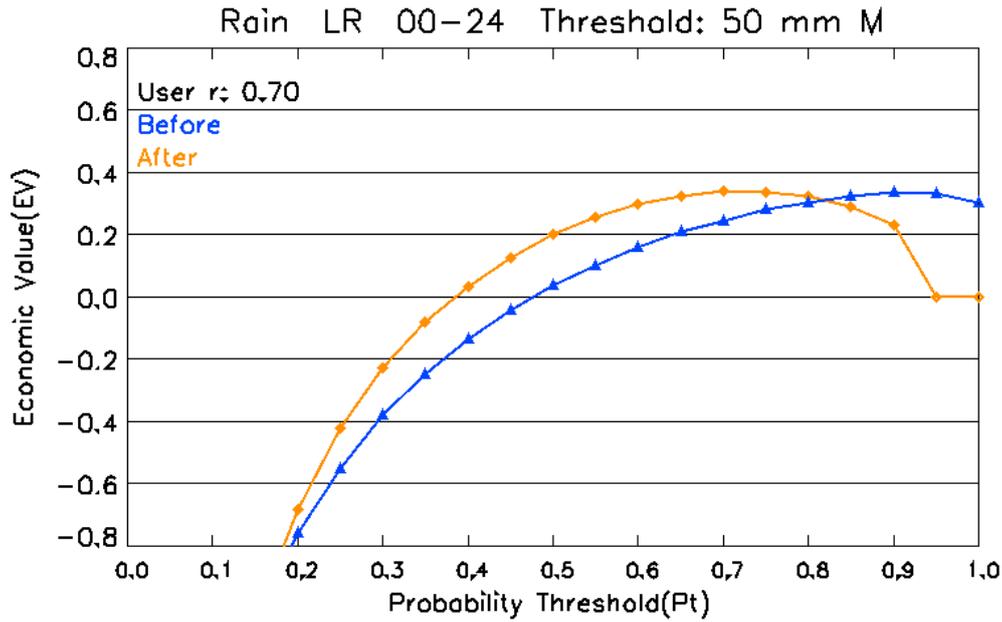


圖3、 $r=0.7$ 的模式使用者參考了WEPS做出對「山區50毫米降雨事件」之防災決策時，可得到之經濟價值分佈情形。藍色線為該使用未經修正之WEPS PQPFs，橘色為使用修正後的WEPS PQPFs。由圖可知，使用者選擇的Pt將會影響到所得到之效益。

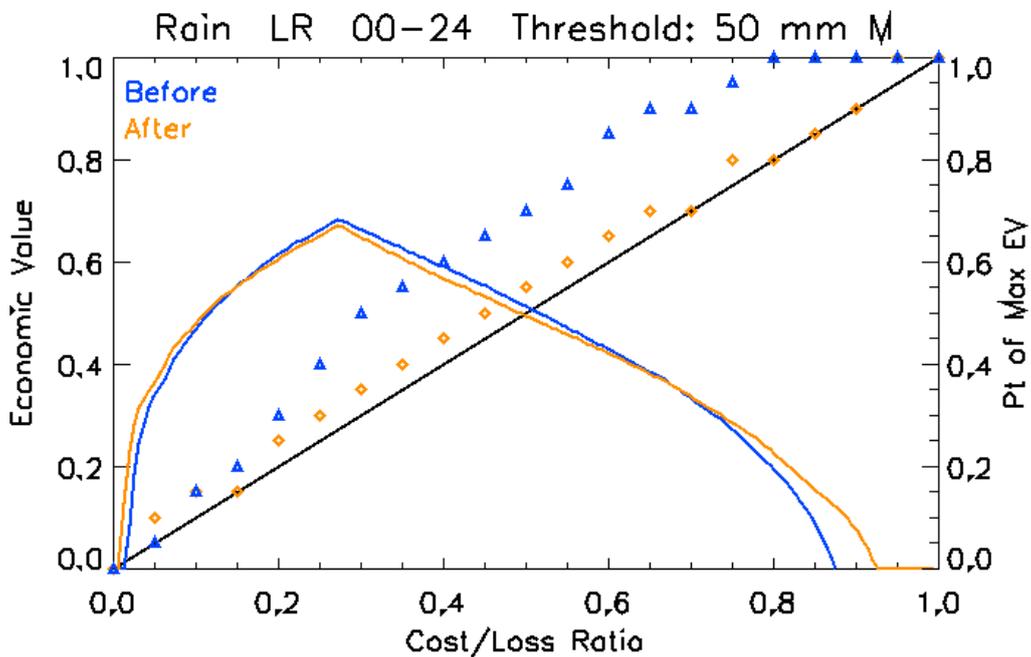


圖4、WEPS系集預報模式預報山區50毫米的降雨機率時，對不同使用者所帶來最高經濟價值的分佈情形。橫軸代表模式使用者的 r 值。線段對應至左側縱軸，表示使用者可以得到之最大經濟價值，點對應至右側縱軸，代表使用者希望得到最大經濟價值時，應當選擇的Pt。藍色為校正前，橘線為校正後。

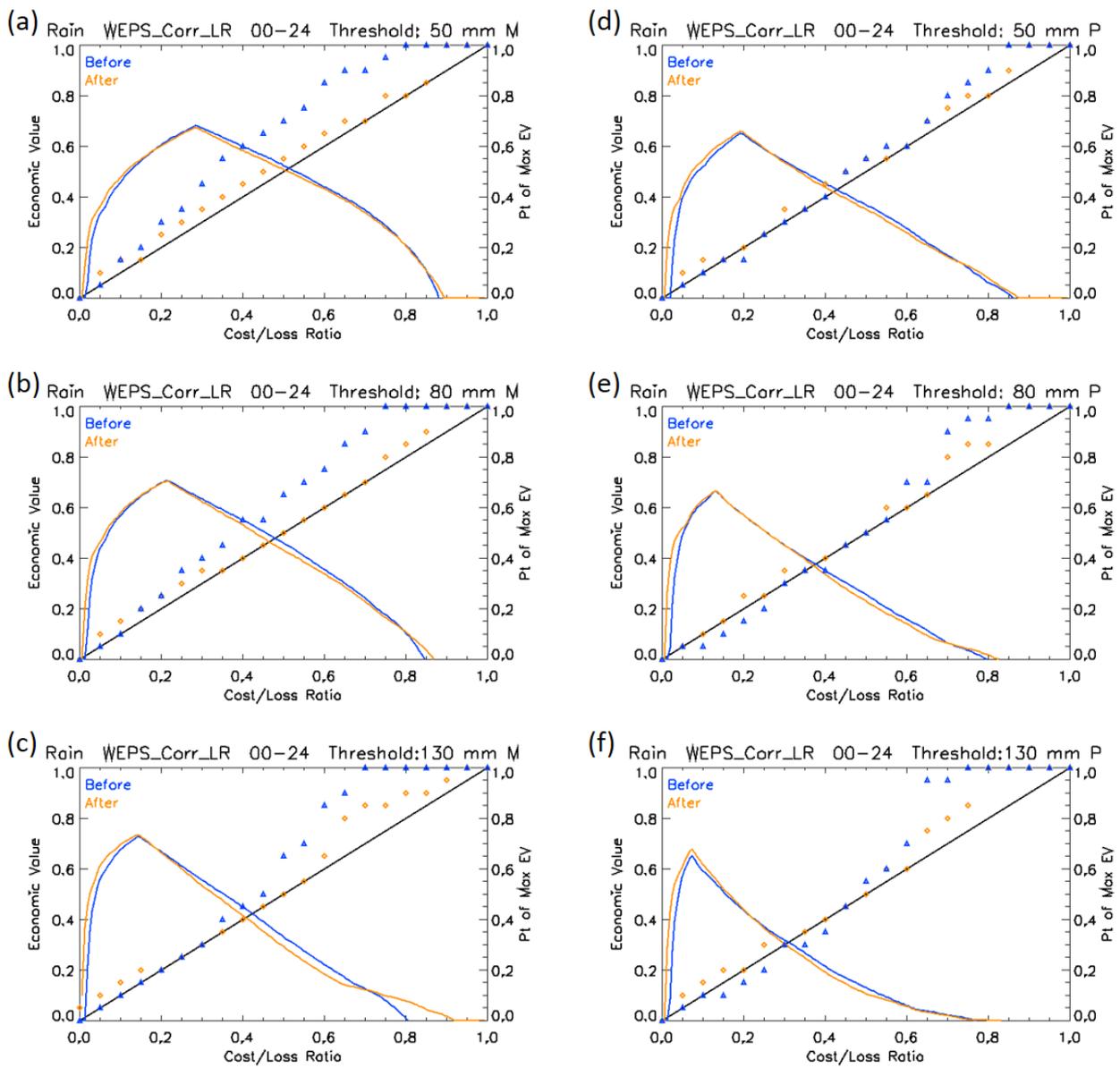


圖5、與圖4相同，但比較WEPS經濟價值在不同的區域、不同的降雨閾值下的分佈情形。(a)、(b)、(c)為山區網格之經濟價值，(d)、(e)、(f)則為平地網格之經濟價值，對應之閾值分別為50毫米、80毫米、130毫米/24小時之降雨事件。

五、決定性與機率性預報之經濟價值

機率預報的優點是能夠涵蓋預報之不確定性，但一般民眾往往不理解降雨機率隱含的意義，使得應用上不如決定性預報容易，政府防災單位及一般民眾對機率預報的接受度較低。除此之外，災害評估時除了降雨，洪水預報、土石流預報、都市淹水預報等下游模型必須以決定性預報作為初始條件，而降水機率預報在這些水文模式上的使用常有應用之困難（黃等，2016）。基於上述需求，許多由系集預報衍伸而來的決定性預報逐漸被發展出來，「系集平均」便是最常見的例子。

這些源自於相同系集預報成員，但經過了其他數學方法轉換後所得到的決定性預報產品，與機率預報產品的經濟效益有何不同？

為進一步量化機率預報與決定性預報之間整體表現的不同，本研究比較WEPS系集平均、PM、QPFP等決定性預報，與WEPS PQFPs 機率預報的經濟價值差異。

（一）WEPS系集平均

WEPS系集平均來自於20個預報成員定量降水預報之平均值，其優點在於計算簡單，僅需將每個網格點上所有成員的降雨預報量值加總後平均即可，實務上也常以系集平均作為預報參考。

但系集平均的計算過程容易平滑掉降雨極值，導致降雨的量值被低估（Ebert, 2001）。如圖6所示。圖6(a)為WEPS預測0-24小時降水

之系集平均，初始時間為2015年8月7日0000UTC，(b)為QPESUMS於同時段之累積降水分佈。可以發現相較於雷達降水分佈，系集平均的降雨分佈較為平滑，位於東北部山區的強降雨也比較弱。

（二）機率擬合平均PM

PM降水產品如圖7所示。PM方法針對系集平均容易低估降雨極值的缺點進行改進，其假設系集平均的降雨分佈是正確的，降雨的量值大小則來自於WEPS中的20個系集成員各自預報出的降雨量值為依據。

PM的產製過程如下：首先，將20個成員的預報降雨場網格資料依照大小排序，並以20為間隔挑依序挑出降雨數值，並且依序填入系集平均之降雨分佈中，系集成員最大的降雨數值填入系集平均中最大降雨量值的網格位置，系集成員中第21高的降雨數值則填入系集平均中第2高的網格位置，以此類推。該重新配置降雨量數值的方法能夠產生與系集平均相同的降雨分佈，但是降雨量值能夠保留極值，改善因進行平均造成降雨強度被平滑的問題。

（三）超越機率QPFP

QPFP降水產品如圖8所示。其降雨預報量值會隨著給定機率 $y\%$ 的不同而變化，其預報場為QPFP y ，意義為將有 $y\%$ 的機率出現高於該降雨預報的量值，例如QPFP40在某個網格

點上的降雨量值為80毫米，亦即WEPS 20個成員中有8個成員在該網格點上報出的80毫米以上的降雨，表示該網格點將有40%的機率出現高於80毫米的雨量。

雖然QFPF為決定性預報，卻隱含了機率的性質，根據研究顯示，QFPF20可作為定量降水預報評估的重要參考（黃等，2016），因此本研究選擇QFPF20與QPFPs進行比較。

（四）經濟價值之差異

圖9中藍線、紅線、綠線分別代表WEPS系集平均、PM、QFPF20的經濟價值曲線。可以發現，系集平均與PM之經濟價值曲線雖然略

有差異，但兩條曲線相當接近，顯示不論決策者採用哪一種決定性預報作為執行防災行動的依據，長期下得到的經濟效益並沒有太大的落差。而QFPF20對於 r 較小的使用者而言，有較高的經濟價值，但對於高 r 的使用者來說，其經濟效益不如系集平均與PM。

黑線為WEPS PQPFs機率預報經過線性迴歸校正後的最大經濟價值曲線，所代表的意義是當決策者參考WEPS PQPFs機率預報作為是否執行防災的依據時，所能獲取的最大效益值。黑色曲線大多高於其他顏色的曲線，顯示對多數決策者而言，WEPS PQPFs機率預報能帶來較高的經濟效益。

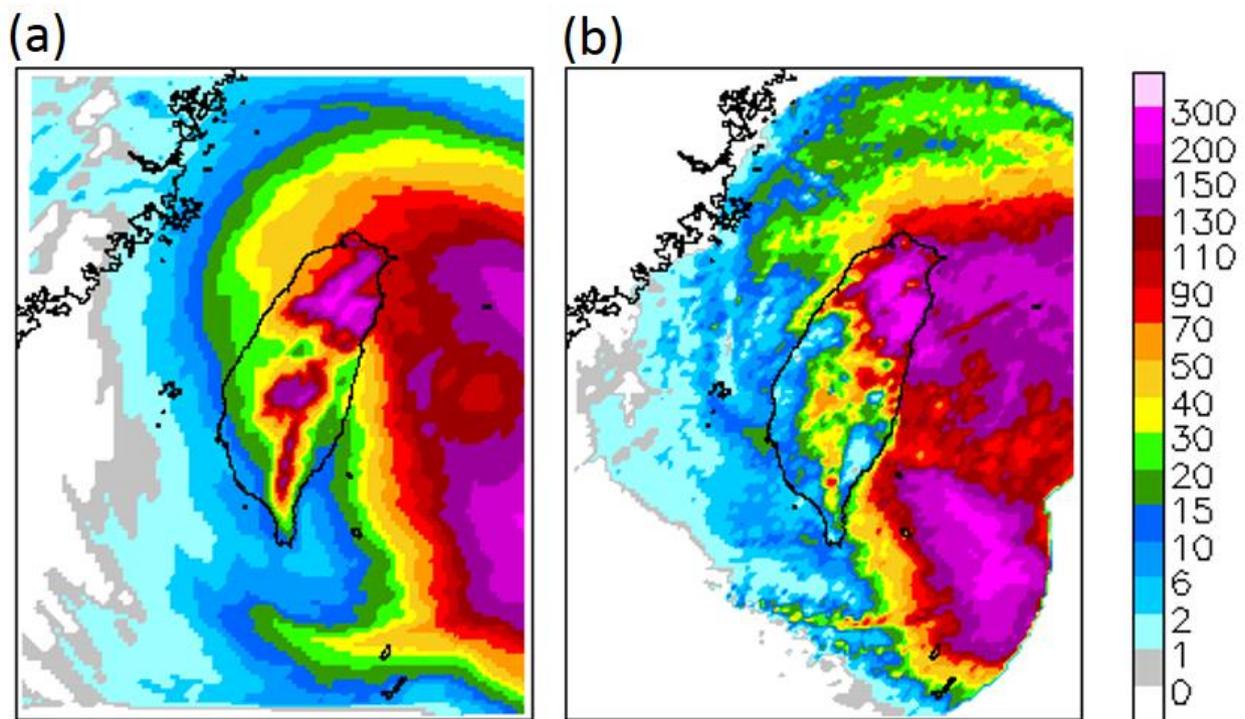


圖6、初始時間為2015年8月7日0000UTC，累積24小時之降雨量。(a)圖為WEPS系集平均之降雨量分佈，(b)圖為同時段之QPESUMS雷達降水估計。

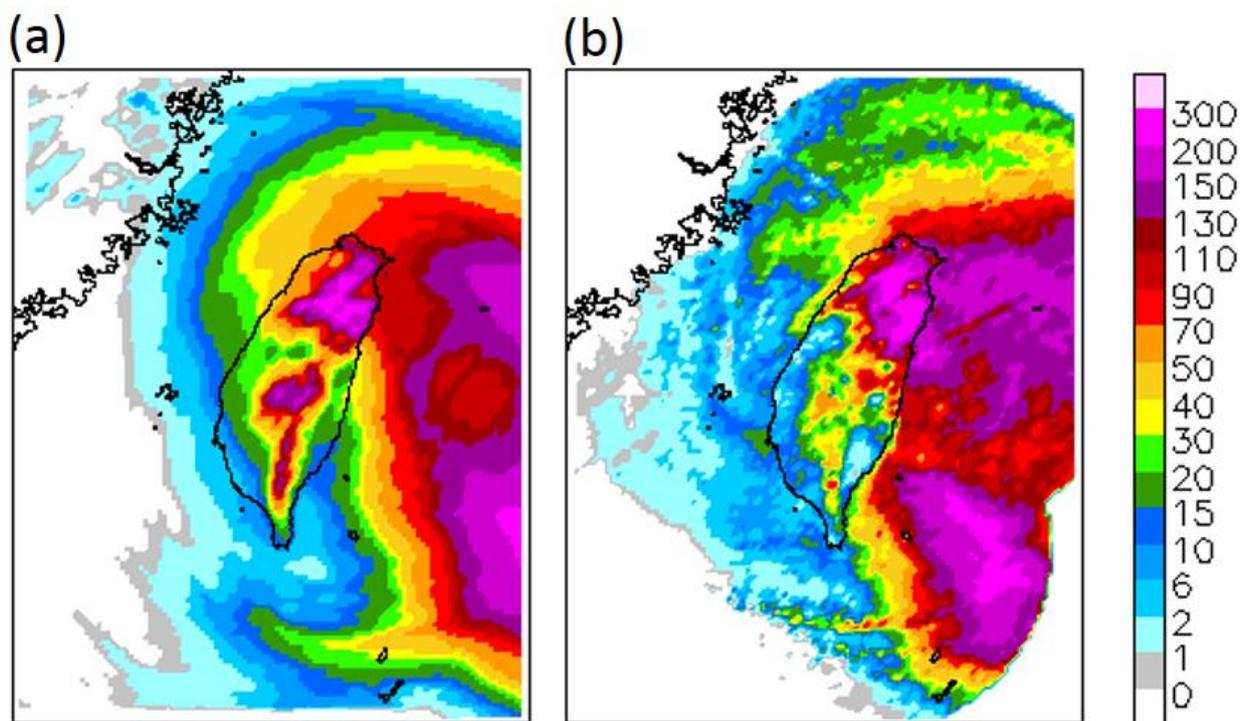


圖7、初始時間為2015年8月7日0000UTC，累積24小時之降雨量。(a)圖為以WEPS系集預報資料為基礎之PM降水產品。(b)圖為同時段之QPESUMS雷達降水估計。

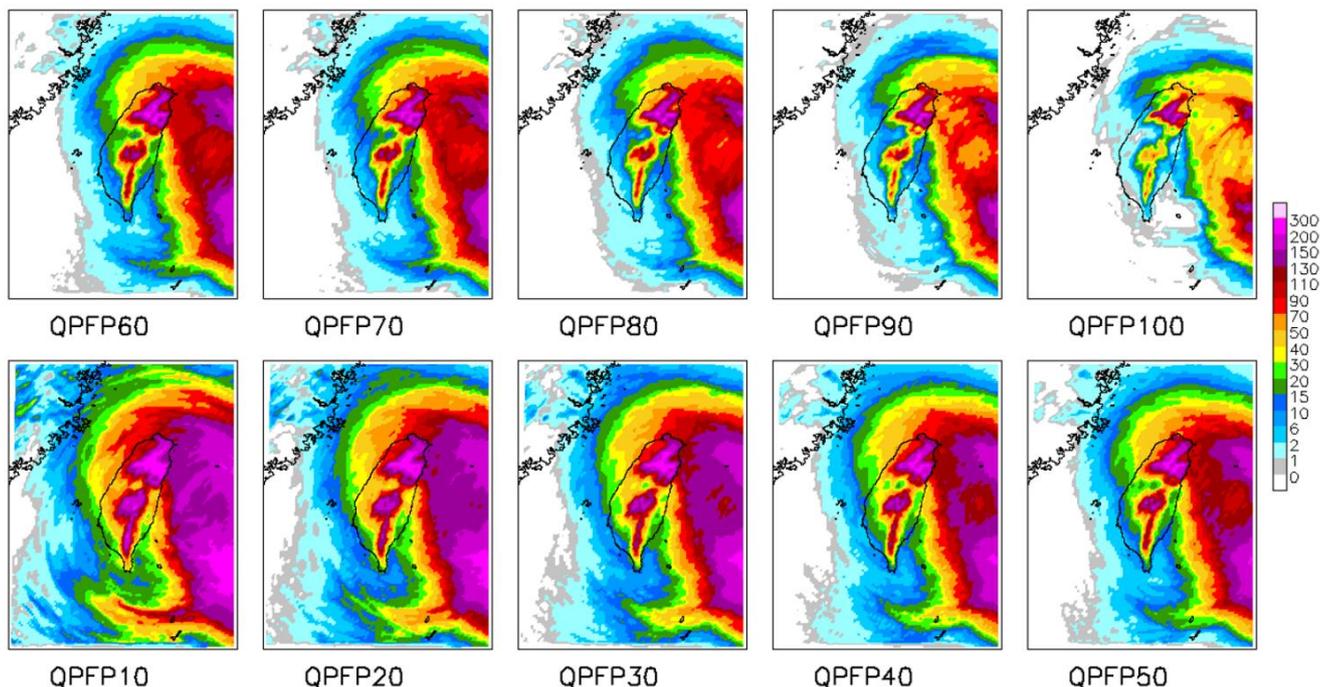


圖8、以WEPS系集成員預報結果產生的QFP產品，初始時間為2015年8月7日0000UTC，預測0-24小時之降水。QPFP40表示有40%的機率出現高於該降雨分佈的量值。

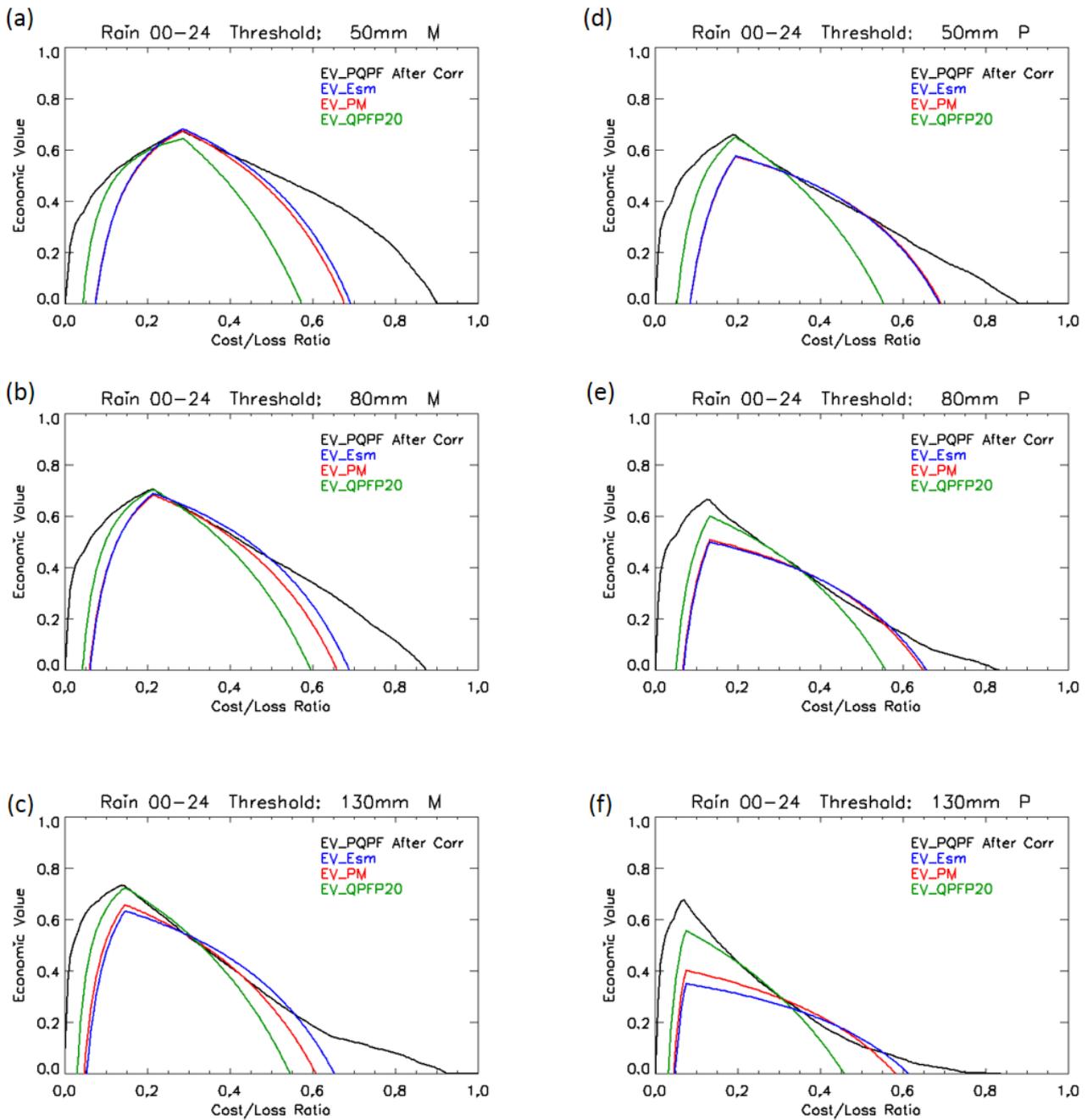


圖9、機率預報WEPS PQPFs (黑)與WEPS系集平均 (藍)、PM (紅)、QPFP20 (綠)等三種決定性預報之最大經濟價值EVmax分佈情形。可以發現，對於絕大多數的使用者而言，機率預報相較於其他決定性預報，具有較高的經濟價值。

以山區50毫米為例，對於r在0.2左右的決策者來說，不論使用那一種預報模式，其經濟效益差別並不大，但是對於其他多數的決策

者來說，參考WEPS PQPFs的效益明顯高出其他三種決定性預報。此外決定性預報僅對於r介於0.1至0.7之間的決策者有經濟效益，而其

他使用者的經濟價值均小於0，代表決定性預報對這些決策者而言沒有參考的價值。而由PQPFs的經濟價值曲線可以發現， r 由0至0.9使用者可得到之 EV_{max} 皆高於0，即對於大多數的決策者都能藉由使用PQPFs而得到經濟效益。值得注意的是某些無法從決定性預報中得到經濟效益的使用者們，卻能夠因為使用了機率預報而減少他們的損失，例如 r 高於0.7的使用者們，或是 r 小於0.1的使用者們，這些

六、決定性與機率性預報之實例說明

為了說明決策者使用機率預報或決定性預報時的差異，本研究以WEPS系集機率預報及其系集平均為例，選取WEPS最靠近臺北氣象站網格之QPESUMS雷達降水資料，對12個颱風個案決策過程進行分析比較。

假設台北氣象站的某位決策者，在24小時的累積降雨大於50mm時會對其造成災害，每次的災害發生時會伴隨新臺幣1000元的損失，而決策者可以參考數值預報的結果決定是否進行防災作業，每次防災作業的成本為200元。為簡化問題，我們假定所採取的防災行動可以避免掉所有的損失。此時該決策者參考WEPS PQPFs與系集平均降雨所需付出的成本損失如表3所示。

當WEPS系集平均反映出高於50mm的累積降雨時，決策者判斷將會產生災害進而採取防災行動，每次所需付出的成本為200元，共計3次；若WEPS系集平均小於50mm且實際

使用者原本僅能以自身的氣候經驗決定是否防災，但機率預報卻提供了更好的選擇。

從整體表現來看，受惠於WEPS PQPFs機率預報的使用者 r 值較為廣泛，表示機率預報可以提供價值給多元的使用者，而個別使用者可得到的 EV 一般而言也較決定性預報來的高。儘管該三種決定性預報均由WEPS成員預報結果轉換而來，但是在轉換過程中，似乎損失了部份的資訊，降低了使用者所能得到的經濟效益。

觀測也沒有出現高於50mm的降雨時，成本損失為0元；然而在Case7系集平均顯示降雨僅44mm，但實際上卻出現68mm的降雨，由於決策者參考系集平均而沒有執行防災，此時需要付出1000元的損失。加總12次決策過程的費用可得知：決策者參考決定性預報，也就是WEPS系集平均時，總計將付出1600元。

接下來為採用機率預報時的分析。當決策者以機率閾值75%為決策基準時，表示決策者僅在WEPS 機率預報大於0.75時才會執行防災行動，分別為Case1及Case10，此狀況下決策者所需支付的費用是防災成本每次200元；而Case3及Case7的降雨機率小於0.75，決策者未採取防災行動，卻發生了50mm以上的降雨而造成災情，此狀況下決策者所需支付的費用是天氣事件所造成的損失每次1000元。統計12次決策行動的費用支出，得知若以75%做為機率閾值，決策者必須付出共計2400元。但是當決策者以25%為決策基準時，便可將付

出的成本最小化，僅需要付出1000元，此為參考機率預報時，會付出的最小成本損失。

由上述分析可知，決策者使用WEPS系集平均為防災依據時，12次決策行動的總費用為1600元，而使用WEPS系集機率預報時，決策者最少僅需要付出1000元的成本損失，即選擇了適當閾值的條件下，機率預報的成本損失將低於決定性預報。

此實例顯示：同樣為WEPS 20個成員的預報資料，系集機率預報經過了數學轉換成決定性預報後，所能提供給使用者的經濟效益

降低了。但決策者仍需注意，若選擇了不恰當的機率閾值，機率預報的花費可能會高於決定性預報，以上述台北氣象站的例子來看，75%即為不合適的閾值，選用後決策者的成本損失反而變高。

上述實例說明了，選擇合適的閾值是相當重要的課題。那該如何選擇閾值呢？而由本文第四章第二節的分析中我們知道，當我們使用了校正後的WEPS PQPF，能以使用者的 r 作為降雨閾值，以得到該使用者最大的效益。

表3、某決策者於12個颱風侵台期間參考系集平均或機率預報時分別所需支付的費用表。假設該決策者位於臺北氣象站，當24小時累積降雨大於50mm時將會有損失，而每次防災成本為新台幣200元，可避免1000元之損失。觀測雨量資料來自臺北站之QPESUMS雷達降水估計，並四捨五入至整數位。由表可知，參考系集平均時將會花費1600元，但選擇了機率預報並以25%為降雨閾值時，費用可降至1000元。

個案	觀測雨量 mm/24hr	系集平均 mm/24hr	機率預報 %	系集平均花費	機率預報花費				
					0%	25%	50%	75%	100%
1	2	104	1.00	200	200	200	200	200	200
2	4	22	0.10	0	200	0	0	0	0
3	66	89	0.55	200	200	200	200	1000	1000
4	4	24	0.20	0	200	0	0	0	0
5	0	3	0	0	200	0	0	0	0
6	14	15	0	0	200	0	0	0	0
7	69	44	0.40	1000	200	200	1000	1000	1000
8	0	3	0	0	200	0	0	0	0
9	5	15	0	0	200	0	0	0	0
10	251	143	1.00	200	200	200	200	200	200
11	11	21	0.05	0	200	0	0	0	0
12	3	45	0.25	0	200	200	0	0	0
總花費（新台幣）				1600	2400	1000	1600	2400	2400

七、結論與展望

本研究對中央氣象局發展的系集預報系統WEPS PQPFs進行經濟價值分析，以了解使用此系集預報系統作為決策依據時，能得到多少的經濟效益。

整體而言，WEPS對山區使用者來說經濟價值較平地高，對於山區50毫米的降雨事件而言，相較於其他使用者， r 介於0.2至0.4之間的決策者可獲得較高的經濟價值。不過隨著降雨強度的增大，對於高 r 值決策者經濟價值會降低，但低 r 值的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，本研究嘗試以線性迴歸修正WEPS之系統性偏差，但儘管成功修正了預報偏差，決策者能得到之最大經濟價值卻不會因此而上升。即使使用未經校正的PQPFs，只要分析長期下來的歷史資料後，找出適合的機率閾值，仍舊可以得到最大的經濟效益。但若是採用了校正後的PQPFs，雖然並不會增加決策者的經濟價值，根據Murphy (1977)，直接採用與決策者 r 值相同的 P_t ，即可得到最高的經濟效益。

為了解系集預報所衍伸出的決定性產品是否會因為數學轉換過程而減損其經濟效益價值，本研究選擇系集平均、PM、QFPF等三種由WEPS系集成員預報轉換而來的決定性預報，並比較這些決定性產品與WEPS PQPF機率預報經濟價值的差異。結果顯示，儘管對

於少部份決策者而言，使用任何一種預報產品得到的經濟效益沒有太大的不同，但整體而言機率預報能夠提供經濟效益給更多的決策者，且所提供之經濟價值普遍高於決定性預報，顯示這些轉換方法確實犧牲了一部份的預報資訊。因此，對於一個決策者而言，長期下來選擇機率預報作為防災依據將會是效益較高的選擇。

氣象局對颱風之官方預報也是以決定性預報為主，該預報不僅僅參考了各種模式及觀測資料，同時也包含了氣象人員長年以來的預報經驗。未來可分析官方定量降水預報的經濟價值，並與系集模式的預報結果進行比較，來了解官方預報與系集模式間經濟效益的差異。

致謝

感謝中央氣象局資訊中心提供WEPS降雨預報資料，以及衛星中心提供QPESUMS雷達降水估計資料和電腦計算資源。本研究是在中華民國科技部專題研究計畫補助下完成，張惠玲由MOST-104-2625-M-052-004、MOST-105-2625-M-052-001以及MOST-106-2625-M-052-001所支持；楊舒芝由MOST 106-2625-M-008-015所支持。

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。
- 唐玉霜、張保亮，2015：劇烈天氣系統(QPESUMS)發展與客製化服務。《104年天氣分析與預報研討會論文彙編》，**A6-9**，6。
- 吳佳蓉、汪琮、陳冠儒、張惠玲、洪景山、楊舒芝，2016：WRF系集預報系統(WEPS)之颱風降水與風速預報評估。2016年天氣分析研討會。中央氣象局。
- 黃椿喜、葉世瑄、呂國臣、洪景山，2016：系集定量降水預報方法之探討與分析—系集平均、機率擬合平均與超越之定量降水預報。《大氣科學》，**44**，173-196。
- Babara G. B., R. W. Katz, A. H. Murphy, 1986: On the Economic Value of Seasonal-Precipitation Forecasts: The Fallowing/Planting Problem. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **67**, 883-841.
- Chang, H. L., H. Yuan, P. L. Lin, 2012: Short-Range(0-12h) PPDFs from Time-Lagged Multimodel Ensembles Using LAPS in Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 1496-1516.
- Chang, H. L., S.-C. Yang, H. Yuan, P. L. Lin and Y. C. Liou, 2015: Analysis of relative operating characteristic and economic value using the LAPS ensemble prediction system in Taiwan area. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1833-1848.
- Clark, A. J., W. A. Gallus Jr., M. Xue, and F. Kong, 2009: A comparison of precipitation forecast skill between small convection-allowing and large convection-parameterizing ensembles. *Wea. Forecasting*, **24**, 1121-1140.
- Ebert, E. 2001: Ability of a Poor Man's Ensemble to Predict the Probability and Distribution of Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2461-2480.
- Hamill, T.M., 1997: Reliability diagrams for multicategory probabilistic forecasts. *Wea. Forecasting*, **12**, 736-741.
- Gourley, J. J., Zhang, J., Maddox, R. A., Calvert, C. M., and Howard, K. W.: A real-time precipitation monitoring algorithm - Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors (QPE SUMS), Preprints Symp. on Precipitation Extremes: Prediction, Impacts, and Responses, Albuquerque, Amer. Meteor. Soc., 57-60, 2001.
- Murphy, A. H., 1977: The value of climatological, categorical and probabilistic forecasts in the cost-loss ratio situation. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 803-816.
- Mylne KR. 2002: Decision-making from probability forecasts based on forecast value. *Meteorological Applications.*, **9**, 307-315.
- Richardson, D. S., 2000a: Skill and economic

value of the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 649 – 668.

Su, S. H., H. C. Kuo, L. H. Hsu, and Y. T. Yang, 2012: Temporal and Spatial Characteristics of Typhoon Extreme Rainfall in Taiwan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 721–736.

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.

Evaluation, Calibration and Economic Value Analysis of the Probabilistic Forecasts from WRF Ensemble Prediction System in Taiwan Area- Part 3: Analysis of Economic Value

**Guan-Ru Chen¹ Hui-Ling Chang¹ Chia-Jung Wu¹ Tsung Wang¹
Jing-Shan Hong¹ Chu-Chih Yang²**

¹Central Weather Bureau , Taiwan

²Department of Atmospheric Sciences, National Central University , Taiwan

(manuscript received 20 April 2018 ; in final form 10 September 2018)

Abstract

Ensemble prediction system is perturbed by different initial states, boundary conditions, and physical parameterization for generating different members. The multiple simulations are conducted to account for the source of uncertainty in forecast model. Analysis of Economic Value can estimate the benefit that user can obtain by making decision based on forecasting model.

This study aims to WRF Ensemble Prediction System (WEPS) developed by Center Weather Bureau (CWB). The probabilistic quantitative precipitation forecasts (PQPFs) is generated for typhoon rainfall. We not only estimate the economic value decision makers obtained from this prediction system, but compare the different of economic value between probability forecasts and deterministic product transferred from same ensemble. As a result, probability forecasts can offer more economic value to a wider range of users.

Key word : probability forecasts, economic value.

doi: 10.3966/025400022018064602004