

WEPS 系集百米風速機率預報之經濟價值評估

周柿均 張惠玲 陳冠儒 洪景山

中央氣象局

摘要

近年來隨著再生能源在國際上的重視，再加上再生能源發展與氣象預報息息相關，我國政府正積極推動氣象與其他能源領域之間的合作。因臺灣風能發展潛力極高，本篇研究主要評估 WRF 系集預報系統(WEPS)百米風速機率預報的預報品質與經濟價值分析，提供不同決策者在長期使用 WEPS 機率預報能夠獲得的經濟效益與最佳機率預報門檻。我們使用系集機率預報而非決定性預報的原因為機率預報可量化預報不確定資訊，且提供決策者更高的經濟效應。

結果顯示：1) 在盛行風向方面，系集風速機率預報在東北季風期間比西南季風期間有較明顯的過度預報，而在地區方面，則以臺灣北部的過度預報較南部嚴重；2) WEPS 系集機率預報可信度與潛在可用性皆足夠；3) 若使用者長期參考 WEPS 百米風速機率預報進行決策時，能夠獲得相對於氣候發生頻率更高的經濟效益；4) 相對於相同系集預報系統導出的系集平均，使用者參考系集機率預報進行決策能夠獲得更高的經濟效益。

關鍵字：系集預測系統、可信度、潛在可用性、經濟價值分析

一、前言

因應近年來國際致力於解決傳統化石能源耗竭與對環境衝擊等經濟環保議題，我國於 2016 年起積極推動能源轉型政策，以發展再生能源為主軸，期望達成環境永續願景。再生能源為可永續利用的潔淨能源，其中以太陽光電與離岸風力為最具發展潛力的再生能源類別。由於特殊的海陸分布，強勁的盛行季風賦予臺灣成為風力資源開發優良的區域。根據國際工程顧問公司 4C Offshore 統計 23 年平均風速全球風況最好的前 20 處觀測地，有高達 16 位處臺灣海峽。雖臺灣風能潛力極佳，但機組運轉時需要考量許多複雜的因素，不僅在風力場址的規劃時需要長期氣象資料找出具有經濟效益的區域，電力即發即用的特性、保護發電機組之停機風速與機組維運排程規劃等使得作業員需要氣象預報資料作為參考，才能順利完成電力調度的任務，顯示氣象資料與跨領域合作的重要性。

雖然數值模式的預報能力明顯提升，預報過程中仍不可避免地存在各種誤差來源，因此採用系集預報系統(ensemble prediction system, EPS)以涵蓋預報不確定性(forecast uncertainty)訊息，並進一步得到機率型或藉由後處理方法由系集導出決定型預報產品。考量風機輪轂高度往上延伸以擷取更多風能，本研究採用中央氣象局提供的高解析網格化百米高度風速預報資料，進一步評估系集預報系統的潛在可用性(potential usefulness)與經濟價值(economic value, EV)，並分析使用者以系集機率預報為依據做出決策時，能夠獲得多少經濟效益。另外，因不同使用者在面對相同天氣事件時會有不同的致災風險，防災門檻設定須隨著使用者防災成本與防災後可避免的損失大小不同而改變，因此在作業上應提供各使用者採取防災行動的最佳機率門檻(防災門檻)，以利後續決策判斷與防災預警。

二、模式與觀測資料

2.1 模式資料

中央氣象局以 Weather Research and Forecasting(WRF)區域模式為基礎所發展的區域系集預報系統(WRF Ensemble Prediction System, WEPS)，擁有 2 層槽狀網格，水平解析度為 15、3 公里。依據不同的初始條件、邊界條件與模式參數化等，組合得到 20 個系集預報成員。預報時間長度為 84 小時，逐時預報，更新頻率為每日 4 次(00/06/12/18 UTC)。本研究採用解析度 3 公里、空間範圍北緯 21.47°至 26.72°，東經 117.69°至 123.53°，校驗期從 2019 年 4 月至 2020 年 3 月，總共一年，僅考慮預報時間第 24 小時的系集預報資料。

2.2 觀測資料

為滿足逐網格點校驗需求，觀測資料採用 WRFD 分析場，擁有 2 層槽狀網格，空間解析度為 15、3 公里。預報時間長度為 120 小時，逐 6 小時預報，更新頻率為每日 4 次(00/06/12/18 UTC)。本研究採用觀測資料之解析度、時間與空間範圍與預報資料相同。

2.3 颱風個案資料

為了解百米風高風速資料的預報品質與經濟價值，本研究在第四部份-結果與討論中同時分析 2016 到 2019 年共 7 個颱風個案，53 個預報報數。

三、研究方法

3.1 Rank Histogram

Rank Histogram 能夠藉由圖形分布了解系集模式的預報偏差，以及評估系集預報的離散程度是否合理。當圖形平坦時，表示系集離散程度可以合理反映預報的不確性。若圖形呈現 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側，表示預報模式有高報(over-forecasting)的情形；反之，或圖形峰值偏向右側，預報普遍有低報(under-forecasting)的現象。

3.2 Reliability Diagram

給定某一發生門檻，可得到預報機率與觀測發生頻率，進而了解預報機率與觀測頻率的一致性，即預

報系統的可信度(reliability)。若預報機率等於觀測頻率，信賴曲線會落在對角線上，表示此預報系統完美可信。水平虛線為氣候發生頻率，當觀測頻率接近氣候發生頻率時，表示機率預報不具有解析能力(no resolution)。

3.3 Relative Operating Characteristic (ROC)

給定一組遞增的預警門檻，將系集機率預報轉至二分類預報(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)，得到命中率(hit rate)與錯誤預警率(false alarm rate)，即可繪製 ROC 曲線，而 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。若 AUC 等於 1 表示完美預報，AUC 大於 0.7 表示此預報模式具有良好的區辨能力。

3.4 relative 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, L_p)，(3)執行防災後無法避免的損失(Unpreventable Loss, L_u)。我們以 Cost-Loss Ratio (後續簡稱 r)來代表決策者特性， r 定義為防災成本(C)與執行防災可避免的損失(L_p)的比值($r=C/L_p$)。

某一預報系統的相對經濟價值(Richardson 2000)定義為：

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

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。

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

$$\begin{aligned} E_{climate} &= \text{Min}[\bar{o}(L_p + L_u), C + \bar{o}L_u] \\ &= \bar{o}L_u + \text{Min}[\bar{o}L_p, C] \end{aligned}$$

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

對於特定使用者與關心事件， $E_{climate}$ 與 $E_{perfect}$ 為定值， $E_{forecast}$ 與模式預報能力相關，越低越好。故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)； $EV \leq 0$ 表示長期參考此預報系統對該使用者沒有參考價值，因為參考預報系統所花的錢高於參考氣候預報所花的錢。

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：

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

由於 EV 與模式本身的預報能力相關，對於機率預報而言，模式的 hit rate 與 false alarm rate 會隨著決策者選擇不同的機率閾值(probability threshold, Pt)而變動。故經濟價值分析能夠針對使用者關心的天氣事件找出讓使用者獲得最高經濟價值的最佳機率閾值。

四、結果與討論

(一) 盛行季風期間系集機率預報評估

參考前人研究(韓, 2014)，將 4 至 9 月定義為西南季風期間，10 月至 3 月為東北季風期間，圖 1a-b 顯示臺灣附近風場結構受到盛行季風與地形效應影響，風速在東北季風與西南季風期間存在明顯差異。除將臺灣鄰近所有網格點進行全域分析外，另參考經濟部能源局公告離岸風力發電潛力場址區分為北、中、南三個離岸海域進一步評估模式在該範圍的預報表現(圖 1c)。

為了解系集預報百米風速的預報偏差，進行 rank histogram 分析，圖 2 結果顯示：觀測風速落在小於系集成員中最小值(rank1)的頻率最高，rank histogram 呈現 L 型態，表示 WEPS 系集百米風有高報(over-forecasting)現象：在盛行風向方面，以東北季風期間(圖 2a)較西南季風期間(圖 2b)顯著；在地區方面，兩盛行季風期間皆以臺灣北部離岸風機場址區域的高報現象最嚴重(圖 2c-d)。

風速低於 3m/s 時風力發電機組無法發電，風速大於 25m/s 時又因容易損壞機組而必須停機，因此我們採用切入風速(3m/s)與切出風速(25m/s)作為百米風速

閾值，評估百米風速的系集機率預報表現。全域的 reliability diagram(圖 3a)顯示 WEPS 在弱風速(0~3m/s)呈現低報、風電風速(3~25m/s)呈現高報；在盛行風向方面，西南季風期間的信賴曲線較接近對角線，表示西南季風期間系集機率預報的可信度較東北季風期間高。為了解 WEPS 預報百米風速的潛在可用性，透過 ROC 進一步分析(圖 3b)顯示：以東北季風期間的模式潛在可用性比西南季風期間高，然而相同盛行季風下不同風速區間的區辨能力差異不大。整體而言，西南季風與東北季風期間 0~3m/s 與 3~25m/s 百米風速區間的 ROC 曲線下面積皆高達 0.9 以上，表示百米風速機率預報具有相當良好的區辨能力，說明 WEPS 百米風速機率預報之潛在可用性很高。

另評估北、中、南部離岸海域進行百米風電風速(03~25 m/s)之系集機率預報：(1)reliability diagram (圖 4a)顯示在 3 個離岸風機區域中，臺灣北部離岸海域的機率預報高報情形最顯著，而中部離岸海域機率預報可信度最高。(2)模式潛在可用性結果(圖 4b)顯示：在分區方面，以北部、中部區域的潛在可用性較高，南部最低；在盛行風向方面，所有區域皆以東北季風的模式潛在可用性較西南季風期間高，與全域的評估結果一致。

(二) 颱風影響期間系集機率預報與經濟價值分析

為進一步探討強風速天氣事件(例如颱風)對離岸風機維運安全的防災決策，我們採用 2016~2019 年颱風個案(共 7 個颱風)之 WEPS 2.5 公里高解析網格預報資料，評估百米風速 \geq 切出風速 25m/s 的機率預報表現，結果顯示：(1)信賴曲線在低(高)預報機率有輕微高(低)報的情形；整體而言，信賴曲線接近對角線，表示 WEPS 百米風速在 25m/s 以上之系集機率預報可信度高(圖 5a)；圖 5b 顯示 ROC 曲線下面積高達 0.95 以上，說明 WEPS 百米風速 \geq 25m/s 的系集機率預報的潛在可用性非常高。

經濟價值分析結果(圖 6)顯示：相較於參考觀測樣本氣候頻率做決策，所有使用者參考 WEPS 機率預報進行決策皆可獲得較高的經濟效益($EV > 0$)；r 值較小(大)的使用者應採用較 r 值稍高(低)的機率閾值，表示 WEPS 對於低(高)機率預報有稍微高(低)報的現象，與 reliability diagram 的可信度分析結果一致。例如圖 7 當

使用者 r 值為 0.02 時，若系集模式為完美預報，最佳 P_t 的理論值與 r 值相同，應為 0.02，但因 WEPS 系集成員數量為 20 個(只能提供 0.1/20, 2/20, ...20/20 等 21 種預報機率值)，且 WEPS 具有過度預報，因此經濟價值分析結果顯示該使用者採取防災行動的最佳 P_t 為 0.15，較 r 值高，驗證經濟價值分析結果能夠同時反映決策者特性與系集機率預報的預報能力。

一般使用者不知如何以系集機率預報做決策，因此最常使用的系集預報產品是系集平均預報。接下來我們將評比系集平均預報與系集機率預報所能提供給使用者的 r 經濟價值多寡，結果顯示(圖 8)：系集機率預報最大經濟價值曲線普遍高於系集平均的經濟價值曲線，表示相對於系集平均預報，使用者參考系集機率預報進行決策能夠獲得更高的經濟效益(Richardson 2002)。為什麼系集機率預報相對於決定性預報，甚至是從相同系集預報產製的系集平均，具有更高的經濟價值？因為系集機率預報透過機率來描述預報的不確定性，同時讓使用者可以選擇不同的機率門檻做為防災門檻，但決定性預報只有兩種結果(全對或全錯)，僅提供一個防災門檻(100%)供使用者選擇，使用者無法在決策上考量到預報的不確定性。此結果與 ROC 分析可以互相呼應：單一決定性預報僅能在 ROC 圖上有 3 個點，計算得到的 ROC 曲線下面積相較系集機率預報來得小，故採用相同系集預報系統時，系集機率預報較系集平均能夠提供較高的經濟價值。

五、結論與展望

隨著永續發展意識抬頭，潔淨能源日益受到國際上的重視，國內政策正積極推動綠色能源與產業發展，並促進與氣象預報的跨領域合作。本研究聚焦於風力發電機組採用氣象預報資料進行維護與排程規劃需求，依據風電切入與切出風速作為百米風速閾值，同時分別針對東北與西南盛行季風期間進行系集機率預報評估。結果顯示本局 WEPS 百米風速在東北季風期間比西南季風期間有較明顯的過度預報，其中又以臺灣北部離岸海域過度預報最嚴重；WEPS 系集機率預報具有非常良好的模式潛在可用性。另外，在 3 個潛力風機場址區域中，中部離岸區域具有最佳的機率預報可信度與區辨能力，表示 WEPS 系集預報資料對

於蘊藏豐富風能的彰濱外海離岸區域具有良好的百米風場預報，值得未來加值應用。

針對颱風靠近臺灣鄰近區域而影響風機運轉安全的百米風高風速閾值($\geq 25\text{m/s}$)進行系集機率預報評估，結果顯示 WEPS 機率預報的可信度與模式潛在可用性皆相當高。經濟價值分析結果顯示：幾乎所有使用者在颱風期間參考 WEPS 系集機率預報進行決策都可獲得經濟效益。此外，相對於系集平均預報，使用者採用系集機率預報做決策能夠獲得較高的經濟價值，凸顯以系集機率預報傳達預報不確定性資訊給使用者的重要性。

因應國內政府綠能政策推動，未來風能業者與電力調度單位等勢必對於氣象預報資料的需求日益增加，了解所參考預報資訊的品質是極其重要的課題，且使用者可根據自己的成本/損失比在不同預警門檻下所能得到的經濟效益，選擇最佳的預警門檻，在最佳時機採取防災措施，以得到最大的經濟效益。雖然經濟價值分析仍存在些許限制，例如生命損失與隱含時間成本的損失等部分的成本估算不易，不過本研究目的在於提供下游單位應用氣象預報資訊進行防災決策的雛型，後續可因應不同需求彈性調整與精進模式的複雜度，在跨領域應用上具有極高的發展潛力。

六、參考文獻

- 周柿均、張惠玲、陳昀靖、羅存文、陳韋廷：東亞系集二週系集降雨預報之校驗分析。2019 年天氣分析研討會。中央氣象局。
- 張英彬：風速特性與發電量之統計分析。南開學報，7，85-94。
- 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。
- 韓宛容、盧孟明、徐堂家，2014：1961-2013 年期間台灣地區風向風速變化分析。2014 年天氣分析

研討會。中央氣象局。

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.

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.

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**, 73–83.

附圖

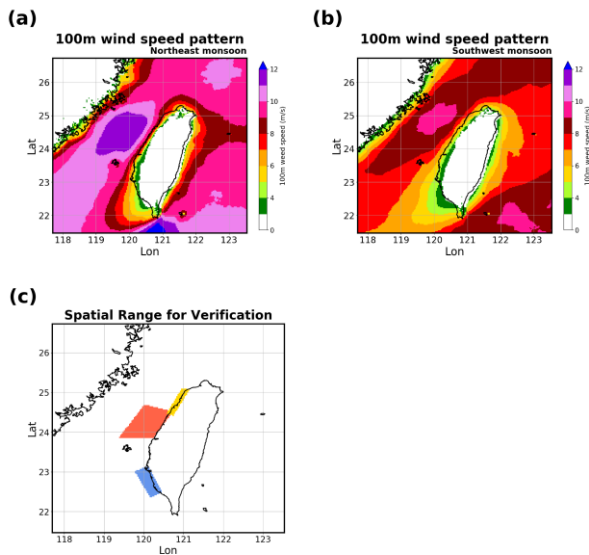


圖 1，盛行季風下百米平均風速分布圖(圖 a-b)與潛力風能場址區域分布圖(圖 c)。(a)為東北季風期間，(b)為西南季風期間，顏色對照長條圖為百米風速，單位為 m/s。(c)以顏色區別臺灣潛力風能場址區域，黃色代表北部、橘色代表中部、藍色代表南部離岸海域。

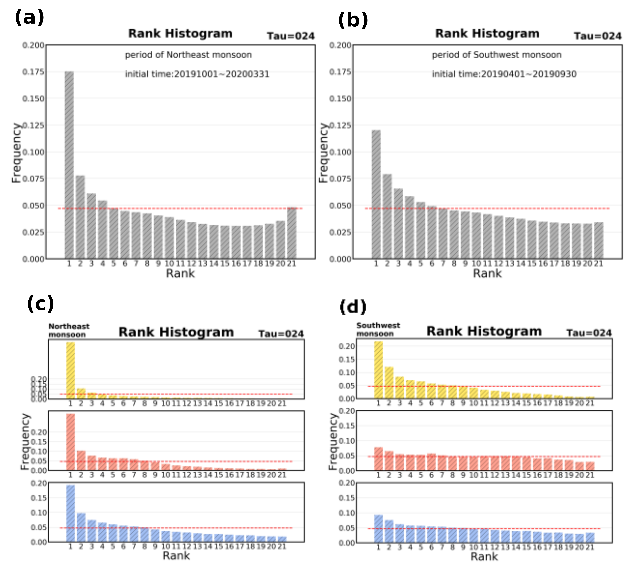


圖 2，WEPS 預報前領時間第 24 小時百米風速預報的序位直方圖，其中(a)、(b)為全域範圍，(c)、(d)為潛力場址分區範圍，分區對應顏色同圖 1；左側為東北季風期間，右側為西南季風期間。紅色水平虛線代表觀測序位均勻分布在所有序位狀況下的頻率。

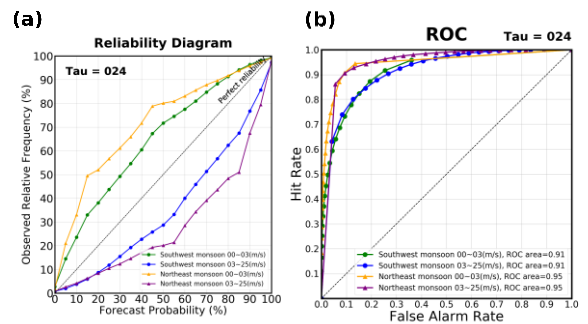


圖 3，WEPS 系集機率預報在預報領先時間第 24 小時的 reliability diagram 與樣本分布的 histogram(左圖)與 ROC 曲線圖(右圖)。顏色代表百米風速閾值：綠(藍)色為西南季風期間百米風速落在 0~3(3~25)m/s；黃(紫)色為東北季風期間百米風速落在 0~3(3~25)m/s。

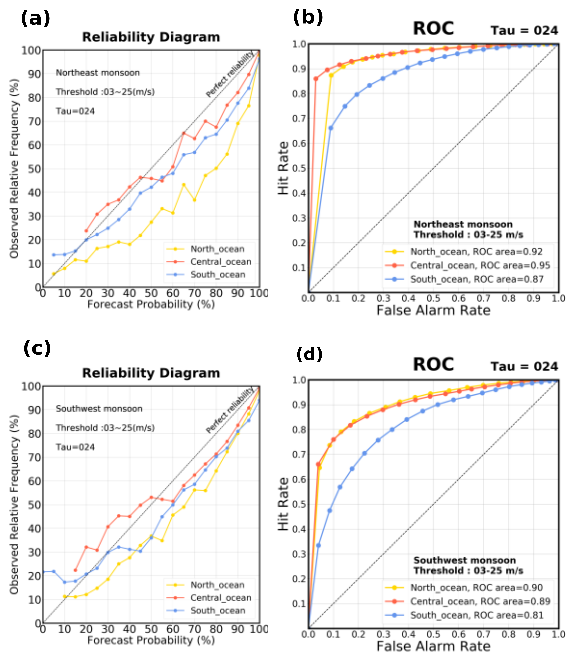


圖 4，同圖 3，但僅針對北、中、南部潛力風能場址範圍，分區對應顏色同圖 1。百米風速閾值為 3~25m/s。

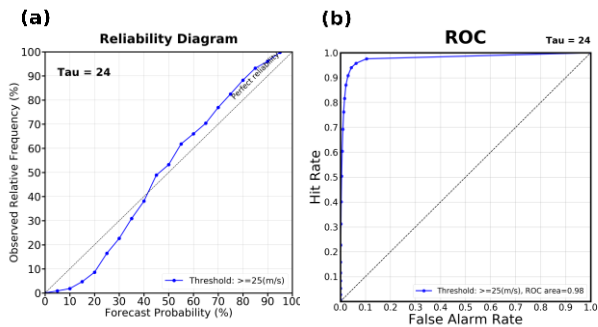


圖 5，同圖 3，但採用颱風個案資料，百米風速閾值為 $\geq 25\text{m/s}$ 。

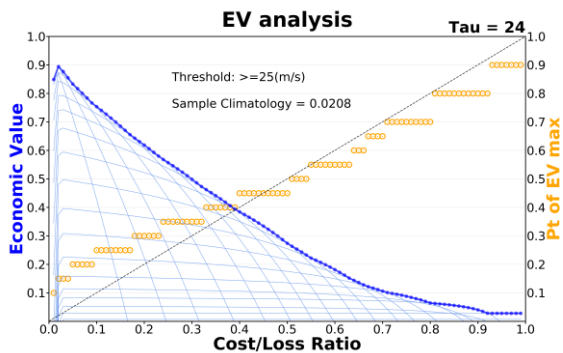


圖 6，WEPS 系集機率預報在預報領先時間第 24 小時的經濟價值分布(藍線；使用左側縱座標軸)與使用者欲得到最大經濟價值所需採用的最佳防災機率門檻

(橘色圓圈；使用右側縱座標軸)。深藍色曲線是使用者採用最佳防災機率門檻所能得到的最大經濟價值曲線，而淺藍色實線是採用不同防災機率門檻的經濟價值曲線。橫軸為使用者的 Cost-Loss Ratio(r)，代表不同的使用者。

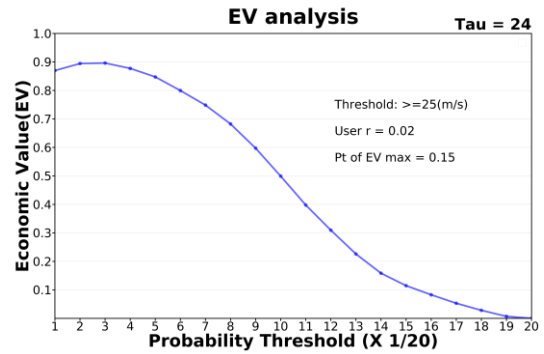


圖 7，某一使用者($r=0.02$)參考 WEPS 預報領先時間第 24 小時的 20 組預報機率能所能得到的最大經濟價值曲線(藍線)。橫軸為預報機率閾值(P_t)，縱軸為經濟價值。

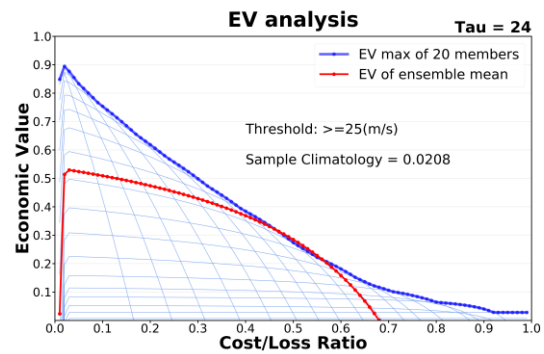


圖 8，同圖 6，增加使用者參考 WEPS 系集平均所獲得的經濟價值分布(紅線)。