

# WRF 系集模式百米風速機率預報校正

林涵芳<sup>1</sup> 馮智勇<sup>1</sup> 張惠玲<sup>2</sup> 周柿均<sup>2</sup> 羅存文<sup>2</sup>

多采科技有限公司<sup>1</sup> 中央氣象局科技中心<sup>2</sup>

## 摘要

近年來為因應綠色經濟時代來臨，政府積極推動綠能基礎建設，藉以達到能源轉型，並提升產業競爭力促進環境永續發展。目前臺灣再生能源規劃以風力發電與太陽光電為主，但由於再生能源為間歇性能源，為避免供電不穩導致發電機組發生故障，故本研究針對臺灣地區風力發電調度與維護需求，利用中央氣象局 WRF 系集預報系統 (WRF Ensemble Prediction System, WEPS)，提供風機操作門檻(切入 $\geq 3m/s$ 、切出 $\geq 12m/s$ 、滿載 $\geq 25m/s$ )之百米風速機率預報(probabilistic forecasts)。

由於臺灣地區特殊的地理位置，於冬夏季分別受到東北季風與西南季風影響，故本研究針對冬半年(10-03月)與夏半年(04-09月)進行校驗評估。根據過去的研究顯示，WEPS 的系集散度可良好地反應預報的不確定性，且百米風速機率預報具相當好的區辨能力，但有明顯的預報偏差。因此，本研究依章等(2018)之複線性迴歸法(Linear Regression, LR)，對 WEPS 百米風速機率預報進行偏差校正，並提供更具參考價值的系集百米風速機率預報。研究結果顯示，複線性迴歸方法能有效修正 WEPS 百米風速機率預報，校正後信賴曲線接近完美可信(perfectly reliable)，且對於風機操作門檻仍維持良好的區辨能力，由 Brier 技術得分(Brier Skill Score, BrSS)結果顯示校正後預報能力提升。然而，風速門檻 $\geq 25m/s$ 因分析場樣本數不足，導致校正前後不論是冬半年或夏半年皆不具可信度與區辨能力，後續可考慮針對風速門檻 $\geq 25m/s$ ，採用颱風個案資料進行校驗評估。

關鍵字：WRF 系集預報、百米風速機率預報、複線性迴歸法

## 一、前言

由於臺灣地區特殊地理位置，臺灣海峽每年約 10 月開始迎接東北季風，受到臺灣中央山脈與福建武夷山脈的夾擊，使平均風速達到罕見速度，故風力發電成為臺灣政府積極推動的能源政策之一，一般而言，風力發電機組壽命約為 20 年，營運期間維持風機高效率運轉同時降低運轉維護成本為風電營運業者之重要課題。風力發電機組一般將風機切入、切出與滿載之百米風速門檻設為 $\geq 3, 12, 25 m/s$ ，當風速過低時發電效益不佳；風速過高則須鎖住葉片以避免遭瞬間強風破壞。近年來，風力發電機組之設置由陸域風電逐漸發展至海上之離岸風電，其建置成本隨之提高，若機組發生嚴重損壞，其所需之維修費用亦相當高昂。

為避免風機損壞或發電效率不佳導致風機之運維作業成本過高，可藉由氣象模式預測作為操作風機之參考依據。然而，現階段之數值模式雖已具有一定能力模擬天氣變化趨勢，但針對事件模擬的表現仍有改善空間，且不同的數值模式預報均存有各自的系統性偏差，如何讓現有的預報資源發揮其最大效益仍是重要課題。系集數值模式相較於模式決定性預報考慮了預報過程中的不確定性，若系集模式機率預報品質良好，除了定量預報資訊外，亦可進一步透過機率的方式提供預報的可信度資訊，用以評估未來發電量與可

能變異程度，也有利於電力調度單位決策並做應變準備。

本研究利用中央氣象局 WRF 系集預報系統 (WRF Ensemble Prediction System, WEPS)，針對風機操作門檻之發生機率進行預測，根據「107 年度氣象資訊綠能服務產品校驗及系集預報建置委外案期末報告」第二章中針對 WEPS 系集預報系統之預報品質進行校驗，研究結果顯示 WEPS 百米風速能夠良好的反應預報的不確定性與預報誤差，且預報可信度隨著風速門檻的提高而降低，但具有良好的區辨能力。由張等(2018)指出，若模式能夠良好的反應預報的不確定性與預報誤差，且具有良好的區辨能力，表示可藉由統計後處理的方式來進行偏差校正，進而提升 WEPS 系集機率預報的能力。

章等(2018)針對 WEPS 機率預報校正與校驗評估，分別採用複線性迴歸法(Linear Regression, LR)與類神經網路法(Artificial Neural Network, ANN)來校正 WEPS 之降雨系集機率預報(probabilistic quantitative precipitation forecasts, PQPFs)，從中瞭解 LR 及 ANN 之優劣。為了能充分了解 WEPS 的 PQPFs 在不同降雨門檻值的表現，而選擇颱風侵襲臺灣的強降雨事件，使用 2013 ~ 2015 年之 12 個颱風個案建立 25 至 500( $mm \cdot dy^{-1}$ )間共 17 個降雨門檻 (25、30、40、50、60、70、80、100、130、160、200、250、300、350、

400、450、500  $mm \cdot dy^{-1}$ ) 之 PQPF, 再針對 50、80、130、200, 四個降雨門檻的 PQPF 進行校正, 其步驟主要分為建模和驗證兩部分。在建模時需要一組建模資料, 包括以校正門檻為中心的 7 個相鄰門檻之  $PQPF(f_i(x, t))$  和 1 個觀測機率。所謂以校正門檻為中心的 7 個相鄰門檻如欲校正 50 這個降雨門檻, 則會將 25、30、40、50、60、70、80 這 7 個相鄰的降雨門檻之預報機率納入; 而觀測降雨機率是指觀測降雨量有無超過設定之門檻, 大於門檻則等於 1, 小於門檻則機率為 0。

研究結果顯示, LR 與 ANN 之校正結果均非常相似, 不論是何者皆有將預報之系統性偏差移除的能力, 與 Yuan et al.(2008)使用 LR 之線性迴歸法校正 PQPFs、Yuan et al.(2007)利用 ANN 校正 NCEP 之短期系集預報模式, 結果顯示一致。但 LR 計算簡單且快速, 也提出非線性的類神經網路法並沒有如預期能夠優於線性迴歸法。其中的原因可能為 WEPS 本身模式資料特性或是 ANN 之相關參數設定可能需做調整, 期望能找出 LR 無法勝任但 ANN 能處理的情況, 使校正後的 PQPFs 能對強降雨事件的決策分析能有助益。過去研究也指出統計校正結果深受訓練樣本數是否充足 (Atger 2003) 以及樣本間的相關性 (Eckel and Walter 1998) 所影響, 非線性的 ANN 比線性的 LR 需要更多的訓練樣本才能建立穩定校正關係, 同時也需要更多的計算資源。

由章等(2018)可知, 文章中所使用之 ANN 方法校正降雨機率預報雖有可行性, 但 ANN 在建模時期需使用大量計算資源與時間, 無法預期其是否有上線即時作業化預報的可能性, 因此, 本研究採章等(2018)之複線性迴歸法進行 WEPS 系集模式之機率預報校正, 並提供具參考價值之百米風速機率預報, 以降低風機運轉維護成本, 增加各單位機組之發電效益。

## 二、資料說明與研究方法

### (一). 資料說明

本研究模式預報資料採用 3 公里解析度之中央氣象局 WEPS 系集預報模式, 共有 20 組系集成員, 其預報作業每日執行 4 次, 分別為每日的 00、06、12 和 18 UTC, 並逐時預報未來 108 小時。百米風速分析場資料使用 3 公里解析度之中央氣象局 WRF 之決定性預報分析場, 將每報預報 f000 小時作為分析場。

研究資料起訖時間為 2018 年 06 月 14 日至 2020 年 03 月 30 日期間每日 00 UTC 模擬之百米風速其預報時間配合分析場採逐 6 小時進行系集百米風速機率預報。由於臺灣位於亞洲季風區內, 冬夏季分別受到東北季風與西南季風影響, 故本研究分別評估冬半年 (10~03 月)與夏半年(04~09 月)之百米風系集機率校正預報能力。使用範圍為  $21.4693^{\circ}N - 26.7233^{\circ}N$ ,  $117.4940^{\circ}E - 123.5340^{\circ}E$ (如圖 1)。



圖 1. 百米風速預報模型使用範圍

### (二). 複線性迴歸法

本研究根據章等(2018)之研究方法, 針對風機操作門檻 3, 12, 25 m/s 建立 1 至 25 m/s 間, 共 21 個百米風速門檻(1, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 m/s), 並合併不同預報時間之數據(f000-f072 逐 6 小時資料)增加樣本數, 採分區  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  作為中心點之建模空間範圍, 進行逐格點複線性迴歸 (Linear Regression, LR)建模,

$$J = \min \sum_{n=1}^N \left( OBS_j - \left[ a_0 + \sum_{i=1}^7 a_i \times F_{ji} \right] \right) \quad (1)$$

$$F_{corr} = a_0 + \sum_{n=1}^7 a_n \times F_n \quad (2)$$

公式(1)中, J 對各迴歸係數進行一階微分為 0, 透過建模資料便可建立線性方程式, 令公式(1)有最小值並可解出 a 與 F。再將驗證資料帶入公式(2)中, 即可得到校正後的 PQPFs。

## 三、評估系集機率預報能力

### (一). 校驗方法

#### 1. 機率預報誤差(Brier Score, BS)

Brier Score 是預報系統之機率預報誤差大小, 越趨近於 0 代表預報越好, 其定義如下:

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (f - o)^2 \quad (3)$$

其中 f 為預報機率; o 為觀測發生機率。

#### 2. Brier 預報技術得分(Brier Skill Score, BrSS)

Brier Skill Score 用來評估機率預報相對於氣候預報的誤差改善程度; 亦即, 相較於使用氣候資訊進行降雨預報, 機率預報是否有預報技術, 數值從 -∞ 到 1, 越接近 1 代表預報表現越好, 其定義如下:

$$BrSS = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} \quad (4)$$

其中  $BS_{ref}$  為氣候參考值之 BS, 以氣候百米風速頻率為預報百米風速機率求出的 BS。氣候百米風速頻率通常是採用長期氣候值或樣本氣候值, 本研究以樣本氣候值進行統計。

### 3. Reliability Diagram

Reliability Diagram 可用來評估天氣事件之預報機率與觀測發生頻率的一致性，藉以呈現機率預報之可信度(如圖 2)。假設預報機率發生在 0 到 0.1 之間的樣本數有 100 個，這 100 個樣本中所對應之觀測有 10 個真的發生，則 X 軸(預報機率)0 到 0.1 之間，會點在左側 Y 軸(觀測發生頻率)0.1 的位置，區間預報樣本數則以長條圖呈現對應右側 Y 軸(樣本數量)。若機率預報為完美可信的，則圖形應為對角線。圖 2 中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。圖 2 中著色區域與 Brier 技術得分(Brier Skill Score, BrSS)直接相關，用來評估系集機率預報事件時，相對於氣候預報的改善程度，若信賴曲線落在著色區域內，表示 BrSS 大於 0，即機率預報相對於氣候預報具有預報能力，而著色區域邊界表示 BrSS 等於 0，不具有預報能力(no skill)。

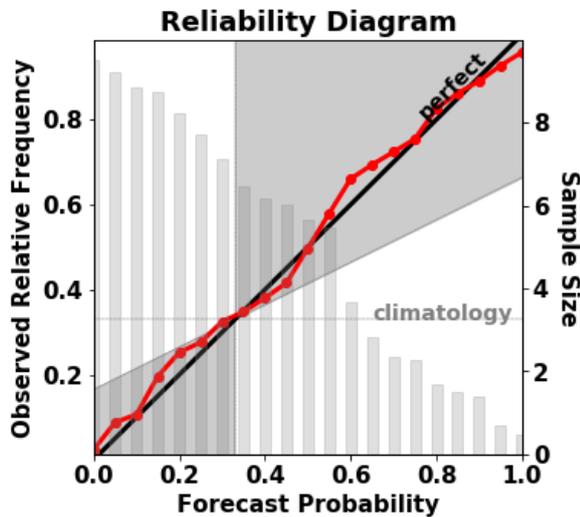


圖 2. Reliability diagram 示意圖，紅線為信賴曲線，長條圖為機率區間樣本數

### 4. Relative Operating Characteristic(ROC)

ROC 可評估機率預報是否有能力區辨事件(例如大雨事件)的發生與否(如圖 3)。ROC 是利用一組遞增機率做為預警門檻(亦即，當預報機率大於或等於此門檻時，代表預報有事件發生)，所畫出 y 軸是命中率(Probability of detection)、x 軸是錯誤預報率(false alarm rate)。應用上主要以 ROC 曲線下的面積(Area under the Curve of ROC, AUC(灰色範圍))大小來評估機率預報系統的區辨能力；只要 AUC 大於 0.5(亦即對角線下方面積)，即表示機率預報系統具有區辨該氣象事件之能力，若 AUC 大於 0.7 則表示具有良好的區辨能力(Buizza et al., 1999)。本研究將利不同風機操作門檻之 AUC 繪製折線圖，進一步比較系集機率預報校正前後於冬夏半年之區辨能力狀況。

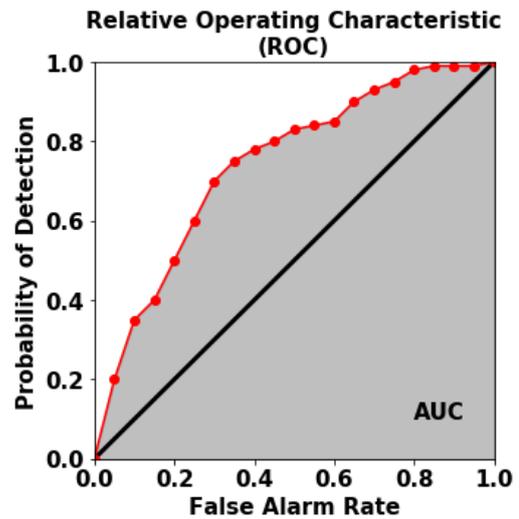


圖 3. ROC 示意圖，紅色曲線為 ROC 曲線，灰色範圍為 ROC 曲線下面積 AUC

### (二). 預報能力評估

本研究依百米風速建模策略進行逐年交叉驗證，評估 00 UTC 在未來 0~72 小時(逐 12 小時)的預報校正成效，夏半年交叉驗證校驗時段為 2018/06-2018/09 與 2019/04-2019/09，冬半年為 2018/10-2019/03 與 2019/10-2020/03。

由 WEPS 百米風速於夏半年(如圖 4(a, b, c))與冬半年(如圖 4(d, e, f))在風機操作門檻 $\geq 3, 12, 25$  m/s 下之 Reliability diagram 結果顯示，原始機率預報之信賴曲線皆落於對角線下方，表示 WEPS 百米風速原始機率預報有高報之情況。

經複線性迴歸校正機率後，於風機操作門檻 $\geq 3, 12$  m/s 下之信賴曲線皆貼近對角線，表示機率校正後可靠性提高，且機率預報誤差(BS)於各門檻皆有下降趨勢(如圖 5(a)與圖 6(a)校正後(紅線)皆低於原始預報(藍線))、預報技術得分(BrSS)亦有提高的現象(如圖 5(b)與圖 6(b)校正後(紅線)高於原始預報(藍線))，表示機率校正可有效降低機率預報誤差並提升機率預報技術。

在機率預報區辨能力上，由 WEPS 百米風速於夏半年在不同風機操作門檻之 AUC 結果顯示(如圖 5(c))，不論是校正前或校正後，均大於 0.8，表示原始機率預報已具有良好的區辨能力，而校正後依然可維持相同的區辨能力；由冬半年(如圖 6(c))之 AUC 折線圖顯示，在風機操作門檻 $\geq 3, 12$  m/s 下，校正前後之 AUC 皆維持相當良好的區辨能力。然而，在風機操作門檻 $\geq 25$  m/s 下，則因分析場之樣本數不足，導致校正結果不盡理想。

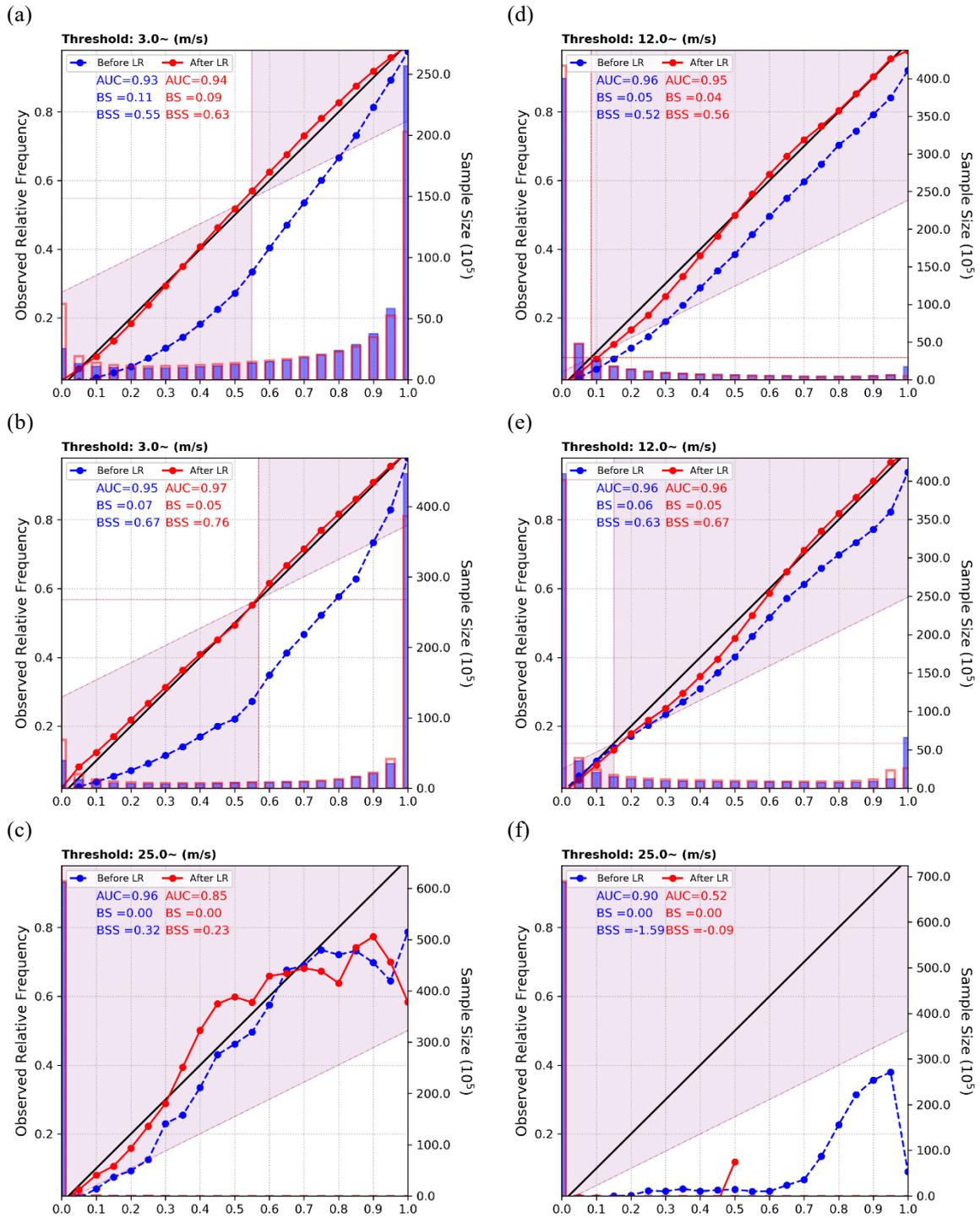


圖 4. 百米風速於夏半年(左欄)與冬半年(右欄) 00UTC f012-f072 之 Reliability Diagram

由上至下分別為風機操作門檻 $\geq 3, 12, 25$  m/s

(藍色為原始機率預報、紅色為經複線性迴歸校正後之機率預報，橫軸為預報機率，線條對應左縱軸為觀測發生頻率，長條圖對應右縱軸為機率區間之樣本數量)

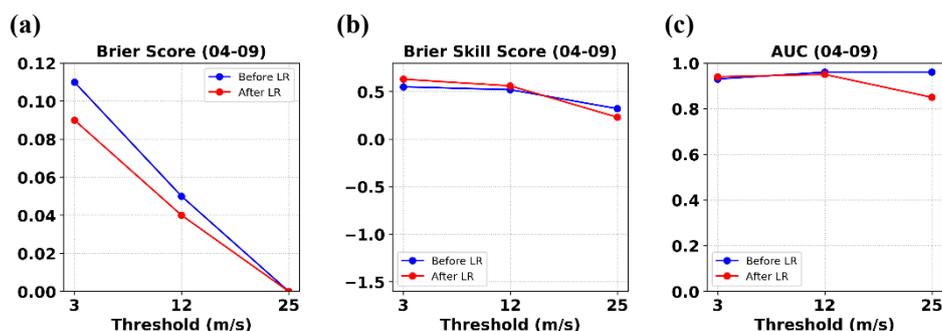


圖 5. 百米風速於夏半年 00UTC f012-f072 之 (a) Brier Score (b) Brier Skill Score (c) AUC 折線圖  
橫軸為風機操作門檻，縱軸為統計指標量值  
(藍色為原始機率預報、紅色為經複線性迴歸校正後機率預報)

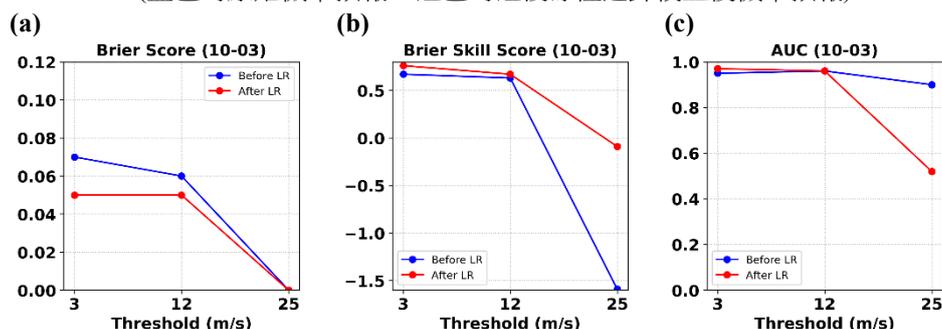


圖 6. 同圖 5，但為冬半年

## 四、結論與建議

根據上述結果可知，WEPS 百米風速系集機率預報不論在冬半年或夏半年，於風機操作門檻  $\geq 3, 12$  m/s 下，經複線性迴歸校正後可有效提高可信度，並改善機率預報誤差與預報技術，且能維持良好的區辨能力。然而，WEPS 百米風速系集機率預報於風機操作門檻  $\geq 25$  m/s，受到分析場樣本數不足影響，導致校正效果不佳。

後續可考慮使用採用具有較高風速樣本的颱風個案進行風機操作門檻  $\geq 25$  m/s 之校正測試，藉以改善分析場樣本數不足之影響，並提供完成機率偏差校正且具可信度與區辨能力之系集機率預報產品。

## 五、參考文獻

- 交通部中央氣象局，2018：「107 年度氣象資訊線能服務產品校驗及系集預報建置委外案」期末報告。
- 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。
- 章鶴群、陳冠儒、劉豫臻、張惠玲、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-第二部分：校正。大氣科學，46，71-106。

- Atger, F., 2003: Spatial and interannual variability of the reliability of ensemble-based probabilistic forecasts: Consequences for calibration. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 1509–1523.
- 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.
- Eckel, F. A., Walter, M. K., 1998: Calibrated probabilistic quantitative precipitation forecasts based on the MRF ensemble. *Wea. Forecasting*, 13, 1132–1147.
- Yuan, H., X. Gao, S. L. Mullen, S. Sorooshian, J. Du, and H. H. Juang, 2007: Calibration of probabilistic quantitative precipitation forecasts with an artificial neural network. *Wea. Forecasting*, 22, 1287–1303.
- Yuan, H., J. A. McGinley, P. J. Schultz, C. J. Anderson, and C. Lu, 2008: Short-range precipitation forecasts from time-lagged multimodel ensembles during the HMT-West-2006 campaign. *J. Hydrometeorol.*, 9, 447–491.

# Calibration of WEPS Probabilistic 100-meter Wind Forecasts

Han-Fang Lin<sup>1</sup>, Chih-Yung Feng<sup>1</sup>, Hui-Ling Chang<sup>2</sup>, Shih-Chun Chou<sup>2</sup>, Tsun-Wen Lo<sup>2</sup>

1. Manysplended Infotech Ltd

2. Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan

## Abstract

In recent years, the government in response to the advent of the era of green economy, has actively promoted the development of green energy infrastructure to achieve energy transformation and improve industrial competitiveness that promotes environmental sustainability. At present, Taiwan's renewable energy planning is mainly based on wind power and solar photovoltaics. However, renewable energy is an intermittent energy source, to avoid power plant failures due to unstable power supply, this study aims to the power dispatch and maintenance needs for wind farms in Taiwan develop the probabilistic 100-meter wind forecasts associated with wind turbines operation (cut-in  $\geq 3$  m/s, cut-out  $\geq 12$  m/s, full-load  $\geq 25$  m/s) by utilizing the WRF ensemble prediction system(WEPS) developed by Central Weather Bureau(CWB).

Because of the unique geographical location of Taiwan, it is affected by the northeast monsoon and southwest monsoon in winter and summer respectively. Hence, this study is conducted verification and evaluation for the winter half-year (October to March) and summer half-year (April to September).The past study indicates that the ensemble spread of WEPS can well represent the forecast uncertainties, and the probabilistic 100-meter wind forecasts have good discriminating ability but also obvious biases. Therefore, this study attempts to use the Linear Regression (LR) method (Chang et al. 2018) to calibrate the systematic forecasting bias in WEPS and improve the results of 100-meter wind forecast to have more practical value. The calibration results show that the LR method successfully corrects the bias and improve the forecast skill. However, because of the insufficient samples for analysis of the full-load threshold of wind turbines, there has worse credibility and distinguishing ability whether in the winter half-year or the summer half-year before and after the calibration. Considering the typhoon case data has sufficient sample at strong wind speed can be used to verify and evaluate the full-load threshold of wind turbines afterward.

Key word: WRF Ensemble Prediction System, probabilistic 100-meter wind forecasts, Linear Regression(LR)