

WRF系集預報系統(WEPS)之颱風降水與風速預報評估

吳佳蓉¹ 汪琮¹ 陳冠儒¹ 張惠玲¹ 洪景山² 楊舒芝³

1.中央氣象局氣象衛星中心 2.中央氣象局氣象資訊中心 3.國立中央大學大氣科學系

摘要

本研究使用 rank histogram、reliability diagram、relative operating characteristic (ROC)、Brier score 以及 BrSS(Brier skill score)等方法，針對中央氣象局發展之 WRF 系集預報系統(WRF Ensemble Prediction System, WEPS)的颱風降水和風速預報，進行系集散度、可信度、區辨能力及預報技術評估。整體評估結果顯示 WEPS 降雨及風速預報具有相當良好的區辨能力，但降雨及風速預報均有高報的情形，可信度隨著雨量及風速門檻增加而降低。此外，WEPS 在陸地區域的系集散度略微不足(underdispersive)。

不同區域的比較顯示：雨量預報的可信度是平地優於山區；區辨能力是山區優於平地；整體而言，山區的預報能力(BrSS)優於平地。風速預報的可信度在山區和平地並沒有顯著差異；區辨能力是平地優於山區。比較有趣的現象是，雨量預報在陸地區域的可信度與區辨能力均優於海洋區域，而風速預報恰好相反，這與做為真實場的觀測資料特性有關。此外，雨量預報的區辨能力隨著門檻增加而降低，而風速預報的區辨能力卻是隨著門檻增加而提高。

一、前言

台灣位於西北太平洋颱風易侵襲的區域，颱風及其環流帶來的強降雨及強風常常重創台灣地區，造成人民生命、財產、安全及社會的經濟損失。中央氣象局在颱風警報期間所提供之風雨預報，是中央及地方等各級政府防災單位做防災決策時所仰賴的重要參考資訊。

中央氣象局為了改善單一預報模式決定性預報的不確定性，因此積極發展一套以 WRF 區域模式為基礎之系集預報系統(WRF Ensemble Prediction System, WEPS)，透過不同的參數方法及隨機擾動，產生 20 個系集成員，並期望成員的預報結果能涵蓋大部分的預報不確定性，以提供有效的機率預報(李與洪 2014)。

為了解 WEPS 系集預報的優勢及其預報品質，本研究針對了 2013~2015 年 WEPS 之颱風降雨及風速預報，使用 rank histogram (Hamill 2011)、reliability diagram (Hsu and Murphy 1986; Hamill 1997)、Brier skill score(BrSS)、relative operating characteristic (ROC; Mason and Graham 1999; Jolliffe and Stephenson 2003; Hamill and Juras 2006)等方法，進行 WEPS 的預報品質評估，期望能提供系統開發者或使用者針對 WEPS 預報進行調整及預報結果校正之依據。

二、資料說明與校驗方法

(一)資料說明

本研究所使用的個案資料包括 WEPS 在 2013 ~ 2015 年共 12 個颱風個案(如表 1)的 00~24、24~48、00~72 小時降雨預報以及 24、48 小時風速預報。為評估 WEPS 在不同區域的預報表現及特性，我們將模式輸出的格點資料，區分為全區(total)和陸地(land)區域；

並進一步將陸地區域分為平地(plain;地形高度 < 500 m)及山區(mountain;地形高度 ≥ 500 m)要特別說明的是：在本研究中，陸地樣本約占全部樣本的 9%，因此全區的結果幾乎等同於海洋區域的結果。

本研究用以進行預報校驗的觀測資料在降雨方面是使用劇烈天氣監測系統(Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors, QPESUMS)的雷達定量降水估計(quantitative precipitation estimation, QPE)，解析度是 $0.0125^\circ \times 0.0125^\circ$ ；風速方面則使用 STMAS(Space and Time Multiscale Analysis System)-WRF 二維的分析場，解析度為 $0.025^\circ \times 0.025^\circ$ 。要特別說明的是：陸地區域的雷達 QPE 有經過雨量計的校正，但海洋地區則無法校正；此外，距離雷達站較遠的海洋地區，雷達波束離地面較高，因此 QPE 低估的可能性相當高。

(二)校驗方法

下列簡介本研究使用的各種分析方法：

1. rank histogram

此方法主要用來瞭解系集預報系統的預報偏差及其離散程度，是否能合理表現實際觀測變異。將格點上的 n 個系集預報成員的「預報值」，以及用來校驗的「觀測值」由小到大進行排序，統計「觀測值」落在每一個序位(1~ $n+1$ ；本研究：1~21)上的發生頻率，繪製成直方圖進行分析。

圖 1 為 rank histogram 示意圖，橫軸代表序位(1~ $n+1$ ；本研究：1~21)；水平虛線表示觀測資料的序位均勻分佈在所有序位時的頻率(1/ n ；本研究：1/21)。最理想的分佈狀況，如圖 1(中)所呈現的均勻分佈樣式，表示該系集預報的結果可以涵蓋觀測的變異性。若呈現如圖 1(上)的分佈，則代表觀測資料在排序時大部分都是最小的，顯示該系集預報有高報(overforecasting)的現象；反之，則如圖 1(下)所示，顯示系集預報有低

報(underforecasting)的現象。圖 1(右)呈現 U 型則代表該系集預報的離散程度不足(underdispersive)，無法涵蓋觀測的變異性；圖 1(左)則表示該系集預報的離散程度太過分散(overdispersive)。

2. reliability diagram

此方法可用以了解系集預報系統所預報的機率與實際觀測頻率之間的對應狀況，若兩者對應的情形一致，則預報的可信度越高，並且能夠進一步評估系集機率預報的偏差(高報或低報)。圖 2 中藍色曲線為信賴曲線，透過統計格點上的預報機率及觀測頻率繪製而成，當曲線越接近對角線則預報結果越接近完美可信(perfectly reliable)；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. relative operating characteristic (ROC)

ROC 可用以評估系集預報是否有能力區辨事件(例如大雨事件)的發生與否。ROC 是利用一組遞增的機率做為預警門檻(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(hit rate)、x 軸是錯誤預報率(false alarm rate)的圖(如圖 3)。應用上主要以 ROC 曲線下的面積(如圖 3 藍色範圍)大小來評估系集預報系統的區辨能力；只要 ROC 曲線下面積大於 0.5(亦即對角線下方面積)，即表示系集預報系統具有區辨該氣象事件之能力，若 ROC 曲線下面積大於 0.7 則表示具有良好的區辨能力(Buizza et al., 1999)。本研究除了使用 ROC 曲線圖來分析外，也將 ROC 曲線下的面積值繪製成直方圖，用來比較系集機率預報在不同區域之區辨能力。

4. Brier skill score (BrSS)

Brier skill score (BrSS)是用來評估系集預報在預報降雨事件時，相較於氣候預報的改善程度。計算 BrSS 之前，先計算 Brier score (BrS；如公式 1)，其中 N 為所有的校驗樣本數， P_j 為預報機率， O_j 為觀測機率；進而計算 BrSS(如公式 2)，其中， BrS_{ref} 為 BrS 的氣候參考值，亦即以氣候發生頻率(長期氣候值或樣本氣候值；本研究使用樣本氣候值)作為預報機率時，所求得的 BrS。

BrSS 的域值介於負無限大與 1 之間，若 $BrSS = 0$ 時，表示機率預報相對於氣候預報而言，不具有預報能力；當 $BrSS > 0$ 時，機率預報相對於氣候預報而言，具有預報能力；若 $BrSS = 1$ 則為完美預報。

$$BrS = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (P_j - O_j)^2 \quad (1)$$

$$BrSS = \frac{BrS - BrS_{ref}}{0 - BrS_{ref}} = 1 - \frac{BrS}{BrS_{ref}} \quad (2)$$

三、結果與討論

(一)雨量分析結果

從 rank histogram 分析結果來看(圖 4、5)，00-24 及 24-48 此 2 預報時段的觀測值在第一序位出現的頻率特別高(rank histogram 呈現 L 型)，顯示模式預報結果有明顯高報的現象，尤其以全區格點(Total)的結果

最為明顯，這與做為真實場的雷達 QPE 在海洋地區低估有關。此外，陸地區域的 rank histogram 略微呈 U 字型的分佈，顯示 WEPS 在陸地區域的系集散度略微不足。

從 reliability diagram 可信度分析(圖 6、7)，我們可以看到平地預報的雨量，在 reliability diagram 分佈較接近對角線，因此可以說平地區域預報的可信度較其他區域好。整體而言，降雨機率預報較實際觀測頻率高，顯示 WEPS 的雨量預報具有濕偏差的特性；但在部分時段的預報中，降雨機率較小時，有些微乾偏差；降雨機率較大時，有濕偏差的特性，尤以 00-72 小時的預報較為明顯。隨著降雨門檻增加，濕偏差特性越明顯

從 ROC 的分析結果(圖 8)可知 WEPS 預報 00-24、24-48、00-72 的結果，ROC 面積均大於 0.8，顯示 WEPS 具有良好的區辨能力；陸地區域的區辨能力優於海洋區域(全區)；其中陸地區域又以山區優於平地。由於我們將「陸地區域」分成「山區」和「平地」，因此「陸地區域」的分析結果會介於這兩者之間。此外，區辨能力隨著雨量門檻值增加而降低，顯示 WEPS 對於大雨事件的區辨能力較小雨事件差。並且區辨能力隨著預報時間增加逐漸降低，00-24 小時優於 24-48 小時，且更優於 00-72 小時。

BrSS 的分析結果中(圖 9)顯示，不同區域之降雨機率預報的 BrSS 值均大於 0，表示 WEPS 的預報相較於氣候預報，具有技術性。其中，00-24 小時以及 24-48 小時預報均顯示山區的預報能力優於平地(陸地區域介於兩者之間)。00-72 小時的結果恰巧相反，平地的預報能力優於陸地。

由於颱風降雨的空間分布主要決定於颱風中心和中央山脈的相對位置，此即所謂的地形鎖定效應(terrain-locking effect；Su et al. 2012；Cheung et al., 2008；Chang et al., 1993)。由於地形鎖定效應，颱風引發之大降雨經常發生在迎風面的斜坡上(地形高度 ≥ 500 m)；因此，在迎風斜坡上，颱風降雨的可預報度通常高於平地。在颱風路徑誤差不大的前提下，WEPS 降雨機率預報在山區的預報技術和區辨能力也相對較佳。由於颱風路徑誤差通常隨著預報時間拉長而加大，00-72 小時的預報就不再呈現山區優於平地的結果。

(二)風場分析結果

從 rank histogram 分析結果(圖 10、11)，陸地及平地的觀測值序位分佈呈向右遞減(L 型)分佈，顯示模式預報結果明顯高報；此外，全區及山區的结果略呈 U 字型的分佈，顯示 WEPS 的系集散度略微不足。

從 reliability diagram 可信度分析結果(圖 12、13)，可以發現全區格點的預報相較於陸地格點，具有較高的可信度，顯示海洋格點較陸地格點的預報結果可信；而平地與山區的分析結果相近。但整體來說風速的機率預報都有過度預報的偏差特性。此外，隨著風速門檻增加，可信度有降低的趨勢。

從 ROC 分析(圖 14)，ROC 曲線下面積均高於 0.8，

顯示 WEPS 的風速預報具有區辨能力；且面積值隨著風速門檻值增加而遞增。整體來說，結果顯示 WEPS 在預報強風事件上的區辨能力較弱風事件佳；全區較陸地佳；而陸地格點中，WEPS 在平地的區辨能力優於山區。

(三)綜合討論

綜合以上分析，WEPS 的預報在雨量與風速方面，可以看到 2 種相反的預報結果：1.模式對較極端大雨的可信度、區辨能力均較差；在風速方面，WEPS 對於較強的風力有較好區辨能力較佳。2.分析不同區域的預報，雨量預報在陸地的結果明顯優於海洋，而風速預報則是海洋的結果較佳，陸地有高報的現象。

上述結果的原因可能與做為真實場的觀測資料特性有關。本研究使用雷達降水估計(QPE)進行雨量校驗，而此 QPE 資料在陸地格點上經過雨量筒的雨量校正，而海洋上缺少觀測點，無法進行校正。此外，距離雷達站較遠的海洋地區，雷達波束離地面較高，因此 QPE 低估的可能性相當高。

而風速的校驗資料使用 STMAS-WRF 的風場分析，此分析場整合各項觀測資料（包括傳統的地面與高空觀測及非傳統資料的飛機、雷達、衛星觀測資料）進行資料同化分析(王等 2015)。相較於海洋，陸地上觀測資料的數量及種類均較多，因此 STMAS-WRF 在海洋上的風場資料主要是來自 WRF 模式所提供的背景場。因此海洋上的風速區辨能力較陸地佳，可能是因為校驗的預報與觀測兩種資料具有相同的背景場。

四、結論與未來展望

透過本研究可以得知 WEPS 模式預報結果之偏差特性；整體而言，WEPS 的雨量及風速均有過度預報的狀況；WEPS 對於事件的區辨能力相當好(ROC 面積 >0.7)；而 WEPS 之系集離散度略有不足。相較於氣候預報，WEPS 之雨量預報具有較高技術的預報能力(BRSS 較高)。

由於數值模式大多存在系統性偏差，在提供預報資訊給使用者前，若能先透過校正程序修正預報偏差，將可提高 WEPS 預報的可信度，讓使用者做出較佳的決策，減少防災行動上的成本浪費。後續，我們將針對 WEPS 的預報偏差進行校正，以提高預報可信度。

然而本研究僅針對雨量與風速預報結果進行討論，但由於颱風預報方面還有路徑、強度、綜觀環境場等等許多不確定因素，若要全面評估 WEPS 對於颱風的預報能力，可進一步對颱風進行路徑、強度、綜觀環境場等分類，以得到更完整的預報評估結果。

參考文獻

- 王溫和、張惠玲、陳嘉榮、方偉庭，2015：“STMAS-WRF 極短期預報模式能力評估”。*天氣分析與預報研討會*。中央氣象局。
- 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，2013：“區域系集預報系統研究：系

集成員產生方式之評估”。*大氣科學*，42，153-179。

- 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”。*天氣分析與預報研討會*。中央氣象局。
- 張惠玲，2010:LAPS 短時預報系統之機率定量降水預報校正技術發展。*中央氣象局自行研究發展專題*。
- 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
- Cheung, K. K., L.-R. Huang, and C.-S. Lee, 2008: Characters of rainfall during tropical cyclone periods in Taiwan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **8**, 1463-1474.
- Chang, C.-P., T.-C. Yeh, and J.-M. Chen, 1993: Effects of terrain on the surface structure of typhoons over Taiwan. *Mon. Weather Rev.*, **121**, 734-752.
- Chang, H. L., H. Yuan, P. L. Lin, 2012: Short-Range (0-12h) PQPFs from Time-Lagged Multimodel Ensembles Using LAPS. *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.
- Hamill, T.M., 1997: Reliability diagrams for multicategory probabilistic forecasts. *Wea. Forecasting*, **12**, 736-741.
- Hamill, T.M., 2001: Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 550-560.
- Hamill, T. M., and J. Juras, 2006: Measuring forecast skill: Is it real skill or is it the varying climatology? *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 2905-2923.
- Harms, D. E., R. V. Madala, S. Raman, and K. D. Sashegyi, 1993 : Diabatic initialization tests using the Naval Research Laboratory limited-area numerical weather prediction model. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3184-3190.
- Hsu, W.-R. and A.H. Murphy, 1986: The attributes diagram: A geometrical framework for assessing the quality of probability forecasts. *Int. J. Forecasting*, **2**, 285-293.
- Mass, C. F., 2003: IFPS and the future of the National Weather Service. *Wea. Forecasting*, **18**, 75-79.
- 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.
- Wilks, D. S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2nd Ed). Academic Press, 627 pp.

表 1、2013 年至 2015 年颱風個案列表

年	颱風名	資料使用時間(UTC)
2013	蘇力 SOULIK	07/11 00:00 ~ 07/14 00:00
2013	潭美 TRAMI	08/20 00:00 ~ 08/22 00:00
2013	康芮 KONG-REY	08/27 00:00 ~ 08/30 00:00
2013	天兔 USAGI	09/19 18:00 ~ 09/22 12:00
2013	菲特 FITOW	10/04 18:00 ~ 10/07 06:00
2014	麥德姆 MATMO	07/21 00:00 ~ 07/23 18:00
2014	鳳凰 FUNG-WONG	09/18 18:00 ~ 09/22 12:00
2015	蓮花 LINFA	07/05 18:00 ~ 07/08 06:00
2015	昌鴻 CHAN-HOM	07/08 12:00 ~ 07/11 06:00
2015	蘇迪勒 SOUDELOR	08/05 18:00 ~ 08/09 06:00
2015	天鵝 GONI	08/20 06:00 ~ 08/23 18:00
2015	杜鵑 DUJUAN	09/26 18:00 ~ 09/29 18:00

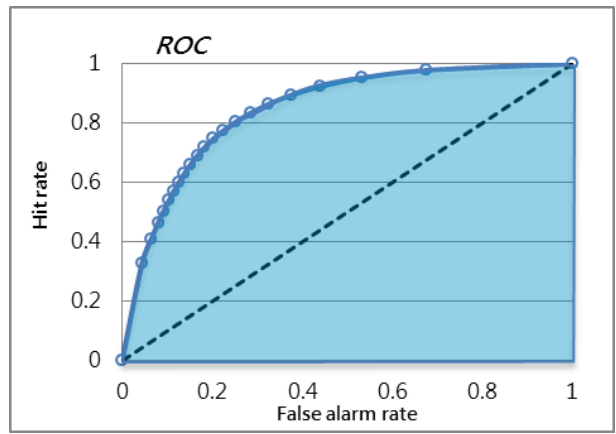


圖 3、relative operating characteristic (ROC)示意圖，藍色曲線為 ROC 曲線，藍色範圍為 ROC 曲線下面積。

Statistical Methods in the Atmospheric Sciences

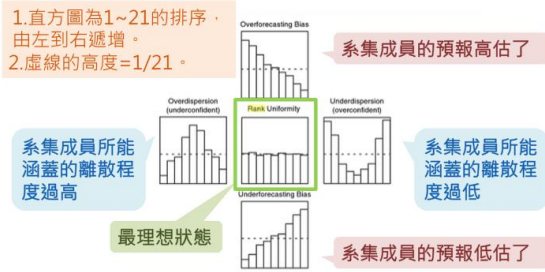


FIGURE 8.26 Example verification rank histograms for hypothetical ensembles of size $N_{ens} = 8$, illustrating characteristic ensemble dispersion and bias errors. Perfect rank uniformity is indicated by the horizontal dashed lines. The arrangement of the panels corresponds to the calibration portions of the reliability diagrams in Figure 8.16c.

圖 1、rank histogram 示意圖，擷取自 Statistical Methods in the Atmospheric Sciences 圖 8.26。各小圖中的虛線代表觀測值均勻分布在各序位的頻率。

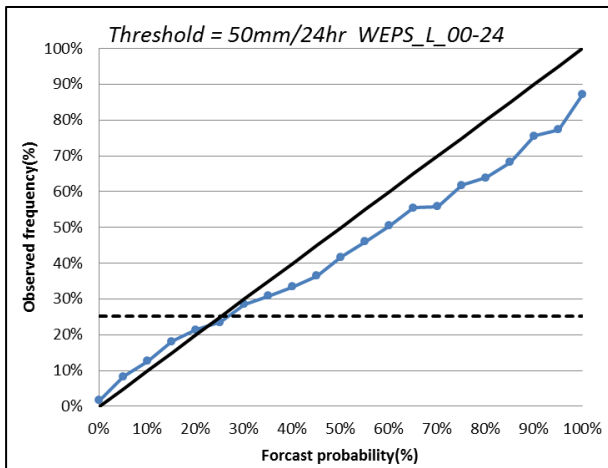


圖 2、reliability diagram 示意圖，縱軸為觀測頻率，橫軸為預報機率，藍色線為觀測頻率與預報機率間對應結果；而黑色粗線為完美預報的結果；黑色水平虛線為樣本的氣候發生頻率。

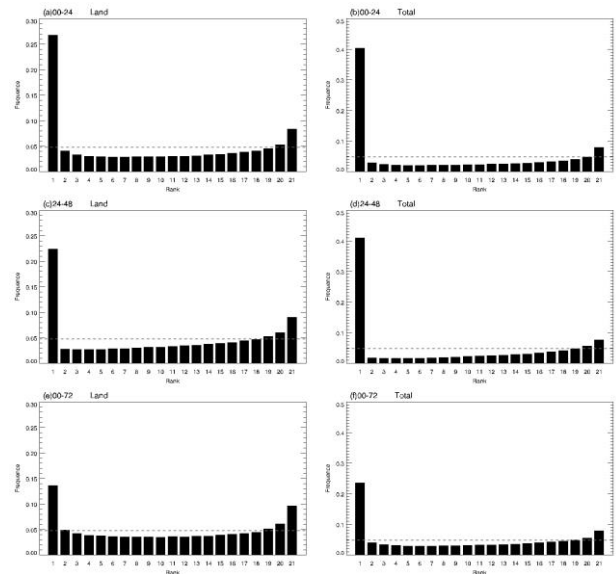


圖 4、雨量 rank histogram 分析結果，左側為陸地格點，右側為全區格點。橫排依序為 00-24、24-48、00-72 小時累積雨量結果。各小圖縱軸為觀測值在各序位出現的頻率，橫軸為 0~21 個序位。黑色水平虛線是觀測值均勻分布在各序位的頻率。

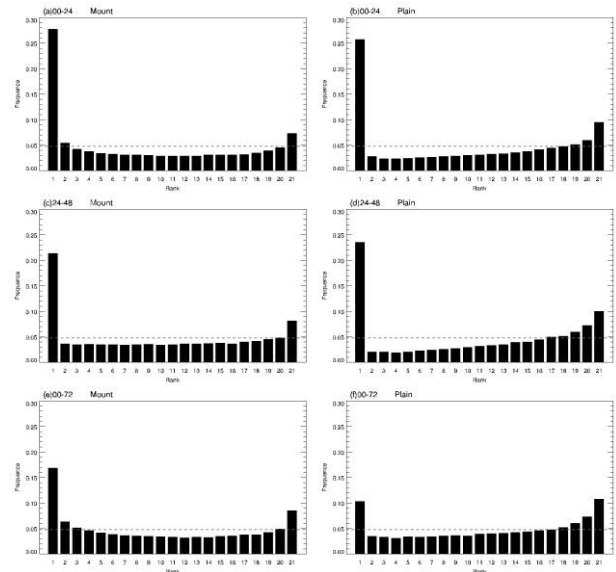


圖 5、同圖 4，左為山區格點，右為平地格點。

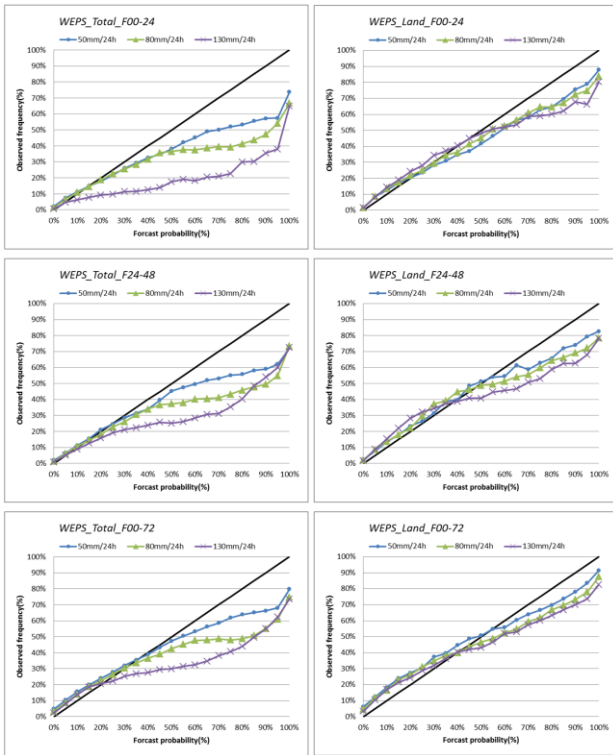


圖 6、累積雨量 reliability diagram 分析圖，左側為陸地格點，右側為全區格點。橫排依序為 00-24、24-48、00-72 等預報時段的結果。各圖中，門檻值用不同顏色表示，藍色為 50mm/24hr、綠色為 80mm/24hr、紫色為 130mm/24hr；縱軸為觀測頻率，橫軸為 WEPS 預報機率。黑色水平虛線為樣本的气候發生頻率。

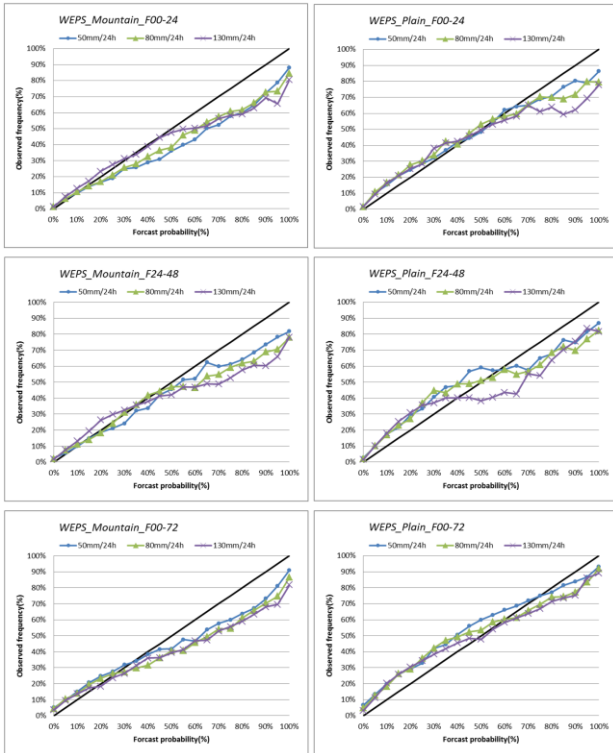


圖 7、同圖 6，左為山區格點，右為平地格點。

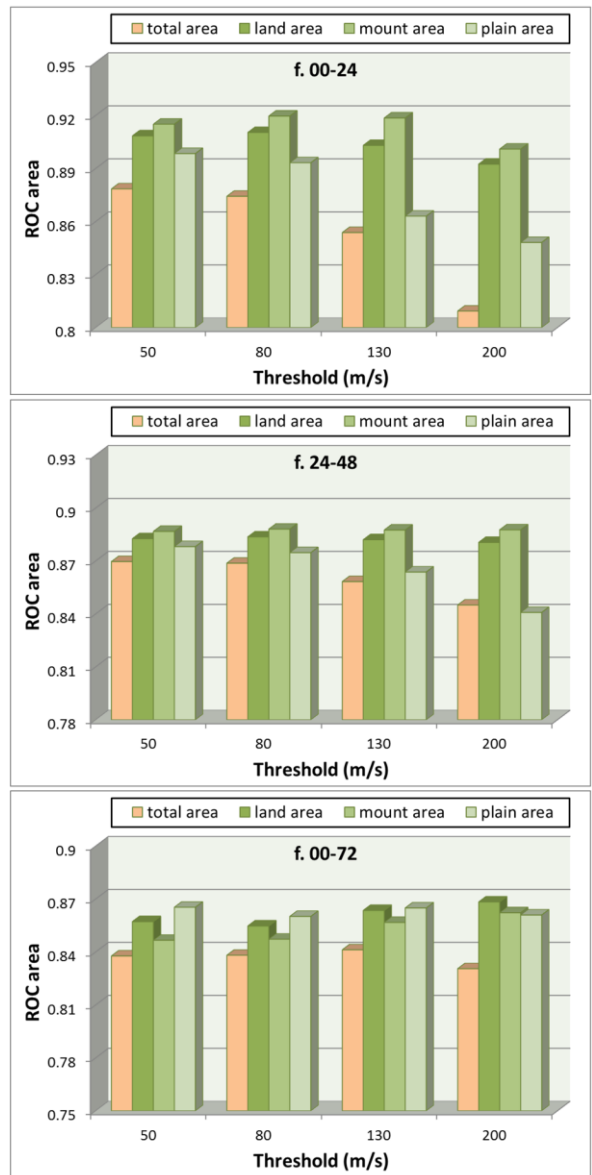


圖 8、雨量 ROC 曲線下面積直方圖。上為 00-24、中為 24-48、下為 00-72 的結果。小圖的縱軸為 ROC 曲線下面積值；顏色由左至右分別代表全區、陸地、山區、平地等不同類型格點的結果。

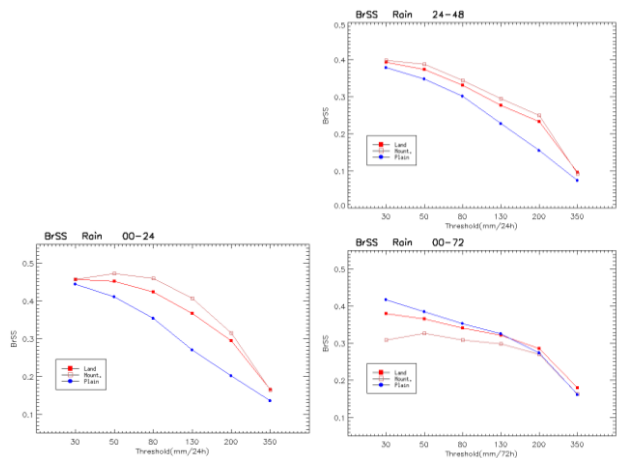


圖 9、雨量 BrSS 分析圖，縱軸為 BrSS 值，橫軸為雨量門檻值。空心方形為陸地、實心圓形為山區及空心圓形為平地；f00-24(左)、f24-48(右上)、f00-72(右下)。

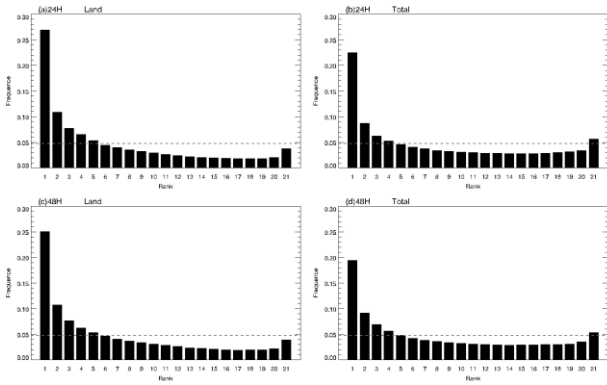


圖 10、風速 rank histogram 分析結果，左側為陸地格點，右側為全區格點。橫排依序為 24、48 小時。各小圖縱軸為觀測值在各序位出現的頻率，橫軸為 0~21 個序位。黑色水平虛線是觀測值均勻分布在各序位的頻率。

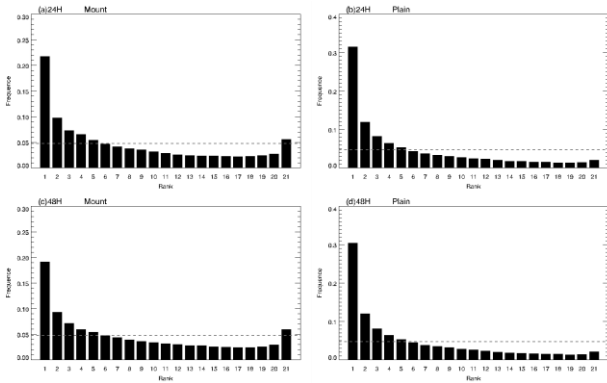


圖 11、同圖 10，左為山區格點，右為平地格點。

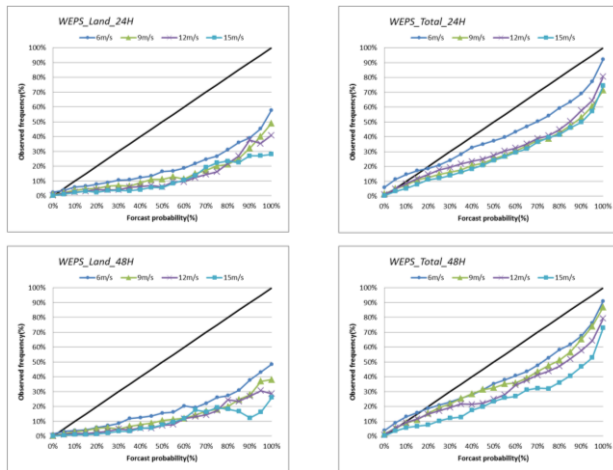


圖 12、風速 reliability diagram 分析圖，左側為陸地格點，右側為全區格點。橫排依序為 24、48 等預報時間的結果。各圖中，門檻值用不同顏色表示，藍色圓點為 6m/s、綠色三角形為 9m/s、紫色×型為 12m/s、天藍色方形為 15m/s；縱軸為觀測頻率，橫軸為 WEPS 預報機率。黑色水平虛線為樣本的氣候發生頻率。

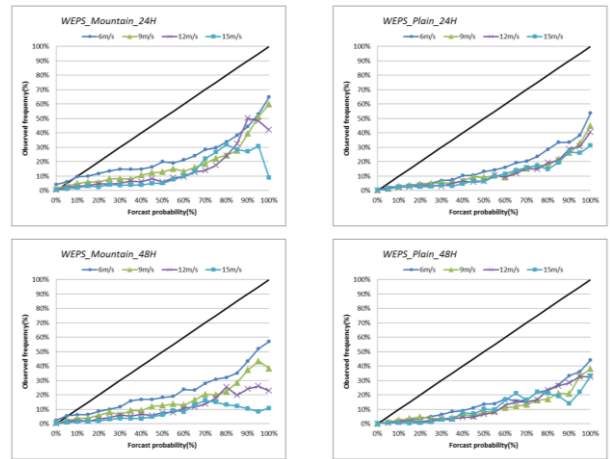


圖 13、同圖 12，左為山區格點，右為平地格點。

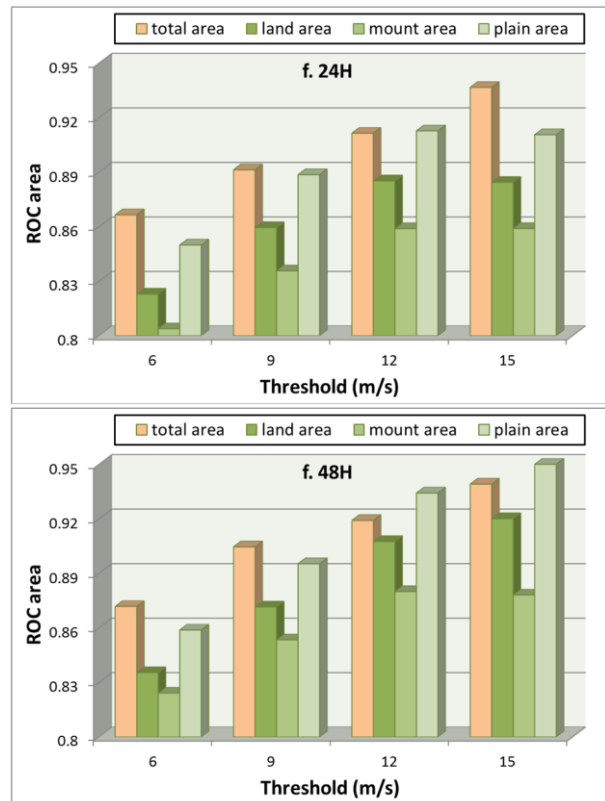


圖 14、同圖 8，但分別為預報 24(上)、48(下)小時之風速結果。