

# 中央氣象局WRF系集預報系統之颱風風雨機率預報評估

陳冠儒<sup>1</sup> 張惠玲<sup>1</sup> 吳佳蓉<sup>1</sup> 汪琮<sup>1</sup> 洪景山<sup>1</sup> 楊舒芝<sup>2</sup>

中央氣象局<sup>1</sup>

中央大學大氣科學系<sup>2</sup>

## 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。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，並詳細評估其對2013年至2015年侵臺颱風之預報表現。

可信度（Reliability）與區辨能力（Discrimination ability）的校驗結果顯示，WEPS風雨機率預報呈現明顯高估，尤其是海洋區域以及大降雨/高風速事件，但具有良好的區辨能力。

關鍵字：系集預報

## 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年侵台颱風進行降雨及風速的預報，並以QPESUMS雷達降水估計(QPE)及時空多重尺度分析系統(Space and Time Multiscale Analysis System, STMAS)之風速分析場做為雨量與地面風速之校驗場，透過可信度（Reliability）、辨識能力（Discrimination ability）等校驗方法，評估WEPS在預報颱風時的表現。

## 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。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，風速部份則使用中央氣象局與美國海洋暨大氣總署（NOAA）地球系統實驗室全球系統組（Earth System Research Laboratory / Global Systems Division, ESRL/GSD）共同合作，所發展之時間與空間多尺度分析系統（Space and Time Multiscale Analysis System, STMAS）的分析場做為觀測資料。

## 三、校驗方法

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 在各個預報機率高估或低估的程度，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 ( $i/20$ ,  $i=0\sim 20$ )。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」，觀測資料使用的是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

另一種校驗方法為相對操作特性 (Relative Operating Characteristic, ROC) 圖二為相對操作特性的示意圖。ROC可用以評估「針對某降雨事件的發生或不發生，系集預報對該降雨事件的辨識能力」。

ROC縱軸表示「命中率」，亦即有多少比例的觀測事件樣本被模式預報到；橫軸則是「錯誤預警率」，表示觀測非事件中，被模式預報為事件的比例。由於WEPS可能產生21種不同的預報機率，因此相對操作特性圖上將會有21個點。

對於0%以上的機率預報而言，在「降雨事件發生的區域中」，由於所有的網格點都會包含在其中，因此在正確預報的比率為1.0，但當我們檢視「降雨事件不發生的區域」時，則會發現一樣所有網格都會被納入，此時錯誤預警的比例也是1.0，因此0%的位置便會在圖中的右上角。

將這21個點與原點連接起來，可以與橫軸圍成一個面積，這個面積愈大，代表該系集預報對於該降雨事件愈有區辯能力，若該曲線貼近黑色對角線，表示模式的預報結果等同隨機預報 (Random forecasts)，也就是沒有預報能力。單就由數學上看，只要曲線分佈於對角線的上方，也就是其圍成的面積大於0.5，就表示該模式對於該天氣事件有辨識能力。但由於氣象模式的發展日趨成熟，大部分的數值模式都有基本的辨識能力，故目前普遍共識為「需達到

0.7以上，數值模式才稱得上擁有合理的預報能力」。

本研究將針對WEPS預報2013年至2015年侵台颱風之累積降雨及地面風速之預報，進行預報能力之分析，降雨事件設定預報時間0至24小時、0至72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；風速預報預報時間24小時、48小時之地面風速達6m/s、9m/s、12m/s、15m/s進行風速機率預報，並區分全區、陸地、平地及山區等四種不同區域，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

圖三為WEPS預報全區域以及陸地區域各降雨事件閾值的可信度分析圖，左半邊的圖為0至24小時之間的累積降雨事件表現，右半邊則是0至72小時的累積降雨事件結果。

由於大部分的網格點都在海上，海洋樣本佔全部樣本的90%以上，故全區的預報結果主要來自於海洋樣本的貢獻，在此我們將全區的預報特性視為海上降雨機率預報的特性。

由圖中發現當系集模式預報某個降雨事件的發生機率高出50%以上時，實際觀測上發生的頻率往往會低於預測的機率。雖然不論是陸地區域或全區域，兩者在預報高機率時都會傾向高估降雨事件出現的機率，但陸地區域可信度線條較為接近黑色斜線，表示陸地區域的偏差 (Bias) 較小，其可信度比較高，即海洋上被高估的情況比陸地嚴重。

而這些高估機率的情況，會在預報機率接近100%時略有趨緩，尤其是海上區域。也就是說，雖然我們必須保守看待高機率的降雨預報，但當預報成員幾乎都預報該降雨事件發生時，預報結果相對比較可信。

由分析結果我們不難發現，整體而言海上的強降雨事件出現的機率容易被高估，陸地上的表現雖然較佳，但也略有高估。考量本研究採用QPESUMS雷達降水估計 (Quantitative Precipitation Estimation, QPE) 做為觀測，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，這可能是造成海洋區域預報嚴重高估的原因之一。

值得注意的是，對於陸上強降雨事件 (130公釐) 在模式預報出低機率時，反而會些微低估其發生的機率。

比較「0小時至24小時」以及「0小時至72小時」的結果發現，大部分的的特徵相似，但「0小時至72小時」預報高估的情形在各機率上均有減少，且預報出低機率時也變成有些許的低估。

接著我們將陸地區分為平地以及山區，以相同的方法繪製出圖四。由「0小時至24小時」的圖中可以發現對於較小的降雨事件（50公釐與80公釐）在山區會有普遍高估其發生機率的趨勢，而平地的預報機率表現較佳，不過對於高降雨事件（130公釐）來說，平地與山區的可信度表現較為接近，且在預報機率高（大於50%）時會有高估的情況。

系集模式山區的降雨機率偏高，可能是預報成員在處理山區降雨時，其作用略強於的大氣的降雨機制，導致在系集成員的預報中容易達到降雨事件的標準，使弱降雨事件普遍高估的現象，而在強降雨事件除了高機率偏高估外，整體而言比較貼近真實觀測出現的機率。

而將預報時間拉長至0小時至72小時後，其平原地區的預報結果更顯的低估，唯在山區50公釐與80公釐的降雨事件估計略為偏向高估其發生的機率。

與「0小時至24小時」不同的是，平原地區與山區的可信度曲線並沒有隨著降雨事件增強而變得接近，主要原因是對累積72小時的預報時間，130公釐的降雨量並不高。當我們把降雨門檻提昇至350公釐後，就可以看到類似的情形，如圖五所示。

由上述分析可知，陸地區域降雨率預報的可信度較高，山區的機率會略為高估，而平地的機率則會略為低估。

## （二）風速機率預報可信度

圖六為預報第24小時風速事件的可信度分析圖。左圖全區與陸地的比較圖，右圖平原與山區的比較圖。

由可信度分析可以發現，WEPS風速機率預報有普遍高估的情況，且陸地區域高估的情況較為明顯。與雨量機率預報相同的是，在風速事件預報機率接近100%時，高估的情形都略為減少，唯獨在山區的大風速（15m/s）沒有這個現象，推測是由於陸地區域要達到此風速的機會不高，使大風速樣本數量較少所致。

由右圖進一步分析平原以及山區個別表現時，發現平原風速高估的情況比起山區略為嚴重。實驗將WEPS預報時間往後延至48小時後進行比較，其機率預報的結果表現與24小時相當類似（圖未附）。

上述分析顯示，使用WEPS風速機率預報時，要保守地看待其風速事件的出現頻率，尤

其是陸地區域，其中平地高估情況又比山區更大。

若系集模式產生的降雨風速普遍偏小，將會使得預報機率「低估」，相反的模式中降雨風速偏強，則可信度分析會偏向「高估」天氣事件發生的機率。但位置偏移，也是造成「高估機率」的另一個原因。

假設系集成員可以精準地模擬出降雨或風場的量值與格點間的相對位置，除位置偏移外不考慮其他效應之下，對於某一個門檻值而言，「真實觀測」的位置離開「系集成員預報的聯集」時，於可信度分析時會因為預報為0%的網格中存在觀測事件而「低估」了發生機率，其他機率的網格則相對應會「高估」其發生機率。高低估的程度則與每種機率所佔有的樣本數目有關。

圖七為某颱風24小時個降雨門檻的分佈與WEPS機率預報的結果。可以看到預報機率接近100%的區域比70%大許多，即100%的樣本數目較多，同樣的位移距離對於樣本數多的100%機率影響較小，但對於樣本少的70%機率影響較大，進而造成高機率容易「高估發生機率」，但接近100%時高估卻反而情況趨緩。

這個效應陸地比較不明顯，因為對降雨而言，陸地因為地形效應的關係，強降雨基本上出現在迎風面，位置偏移相對於海洋較小，可能是海洋降雨機率預報高估較嚴重的另一個原因。

## （三）辨識能力分析

本研究使用「相對操作特性（以下稱為ROC）」對WEPS的系集預報進行分析，比較不同大小的降雨事件及風速事件的預報能力。如圖八所示。在數學上只要ROC達到0.5以上模式就算具有辨識能力，但由於數值氣象預報的發展日趨成熟，目前需要達到0.7以上才被認為是具有區辨能力(Buizza et al. 1999)。

圖八為WEPS的機率預報對降雨事件的辨識能力分析圖。預報時間0小時至24小時全區的降雨預報結果的分析顯示，不同閾值的降雨事件其結果表現僅有些微的差異，WEPS針對不同的降雨事件都有相當高的辨識能力，ROC的面積都在0.85~0.87左右，即便將累積時間拉長至72小時後ROC的面積有些許的下降，但也能維持在0.83以上。至於陸地方面的所有降雨事件預報在0至24小時的ROC面積都高於0.9，預報至72小時後的也能維持0.85以上的水準。

另外由全區與陸地的比較發現，兩者的圖形非常接近，只是全區的ROC面積稍微低於陸地。由於全區可視為洋面上的結果表現，因此該結果顯示，儘管差異性很小，但WEPS於陸

地地區對降雨事件的辨識能力稍稍優於海洋區。

在全區預報24小時風速的分析結果顯示於圖九。各風速事件亦滿足現代氣象數值模式的需求，ROC數值介於0.85至0.93之間，不過與降雨事件不同的是，其辨識能力隨著風速事件的大小有比較顯著的變化，風速事件的閾值愈大，其ROC的面積也愈大，表示WEPS對於高風速事件的辨識能力比低風速事件的辨識能力高。

預報時間拉長至48小時後，發現ROC數值並沒有明顯的變化，甚至有微小的提昇。在陸地區域的分析結果也大致與全區的結果類似。

## 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進行預報結果分析，結果顯示WEPS針對某降雨事件預報出小機率時，其發生的機率與觀測發生的機率很接近，而預報雨量累積0至72小時的機率時在小雨量事件出現的機率有略為低估。但當WEPS預報出高機率時，其預報結果容易有高估的情形，其中強降雨事件高估比弱降雨事件嚴重、海上比陸地嚴重、山區又比平地嚴重，故使用WEPS的預報結果時，隨著預報降雨機率的增加，對降雨出現的機率估計要愈保守、且海上要比陸上保守、山區又要比平地保守。

風速機率預報則是幾乎所有的風速事件在不同的預報機率上都被高估了，陸地較海洋嚴重、平地又比山區嚴重，不過本研究蒐集的樣本在高風速事件由於樣本數目較少，可能不具代表性。與降雨機率預報相同的是，當所有的成員幾乎都預報出該風速事件時，其高估的情況將會下降。

在所有的預報成員幾乎都預報出天氣事件時，機率高估的情況又會比較緩和，因此解讀WEPS降雨或風速事件的機率預報時，當其預報機率等於或非常接近100%時，真實發生的機率也會比較高。

就降雨事件而言陸地的預報能力似乎優於海上的預報能力，其中一個原因有可能是我們選用QPESUMS的雷達估計雨量當作真實觀測進行校驗，雷達資料的特性在於他必須安裝在陸地，也就是陸地上的空間解析度將優於洋面，此外由於錐狀掃描的觀測策略，使得遠洋觀測到的區域高度離地表比較遠，這有可能因此造成與數值模式間的差別。

本研究僅對WEPS進行簡單的初步分析，在上述兩種分析後，發現大部分的分析結果都指出WEPS的機率預報容易高估降雨事件或風速事件出現的機率，除了模式本身對降雨風速

的強度預估偏差外，另一個原因可能來自於位置偏差，即颱風路徑預報的誤差也會對分析結果造成影響，使可信度偏向高估。

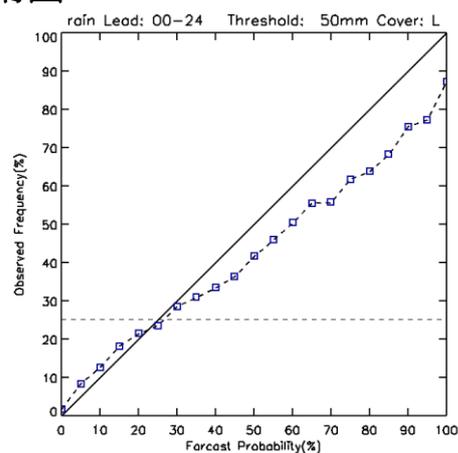
在預報辨識能力分析的部份，WEPS普遍都能達到ROC面積為0.85的水準，陸地上的預報甚至可以達到0.9以上，風速預報的辨識能力隨著風速事件的強度增加而增加，雨量預報在不同強度的降水事件的表現則沒有明顯差距。

本研究還需要更多的分析與校驗，確保找出變因最少的預報特性，提供預報員或決策者更有參考價值的預報資料，減少一般民眾生命財產的損失。

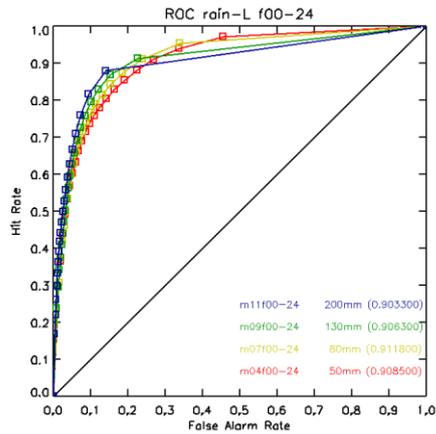
## 參考文獻

- 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 multicategory probabilistic forecasts. *Wea. Forecasting*, **12**, 736-741.
- Buizza, R., A. Hollingsworth, F. Lalaurette, A. Ghelli, 1999: Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System. *Wea. Forecasting*, **14**, 168-189.

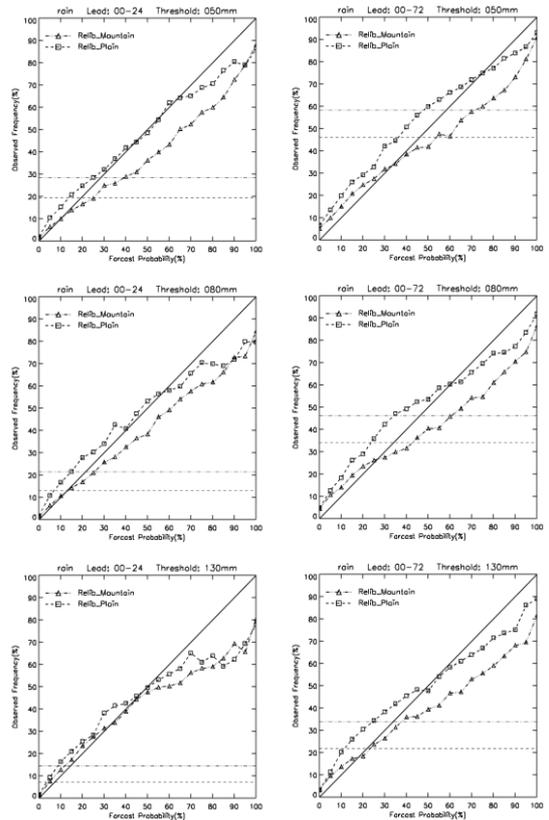
## 附圖



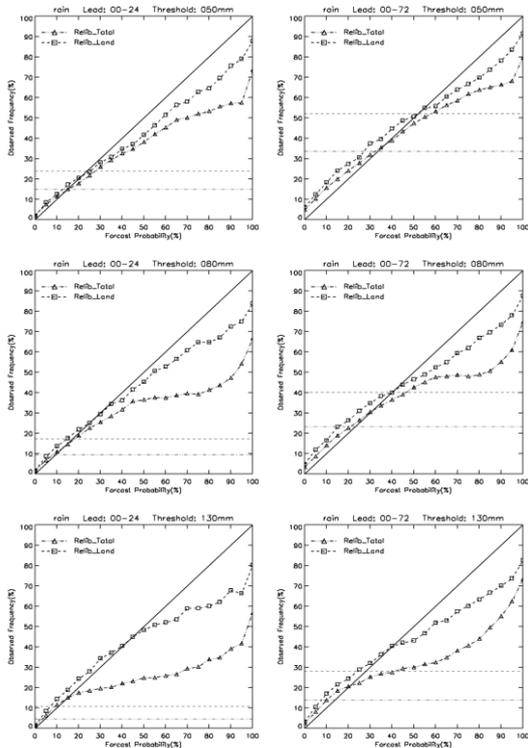
圖一、系集機率預報之可信度圖，橫軸為系集模式預報某天氣閾值發生的機率，縱軸為預報出該機率的網格點，於實際觀測中出現該天氣閾值的機率。黑色斜線為參考線，高於參考線表示低估天氣事件發生的機率；反之，則為高估。水平虛線則為氣候值，表示該天氣事件整體發生的機率。



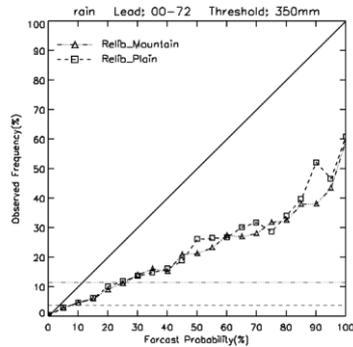
圖二、系集機率預報之辨識能力分析圖，橫軸為錯誤預報率，觀測上未出現的天氣事件，模式中卻預報出的比率；縱軸為正確預報率。表示觀測上出現了天氣事件，模式中預報出天氣事件的比率。不同顏色表示不同的天氣事件，圖中每個點各代表一個機率閾值。



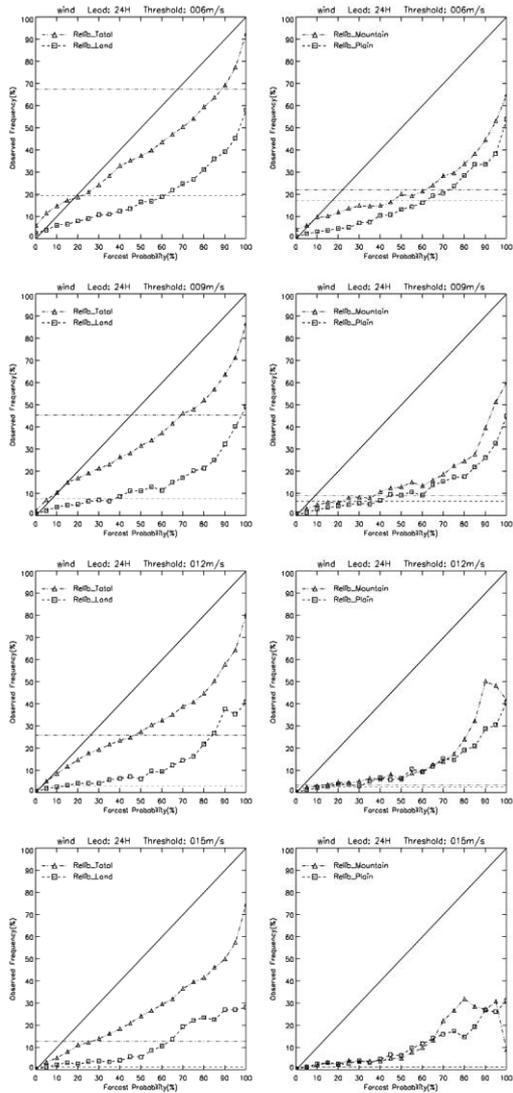
圖四、與圖三相同，但三角形的線表示山區，方形的線代表的是平原。



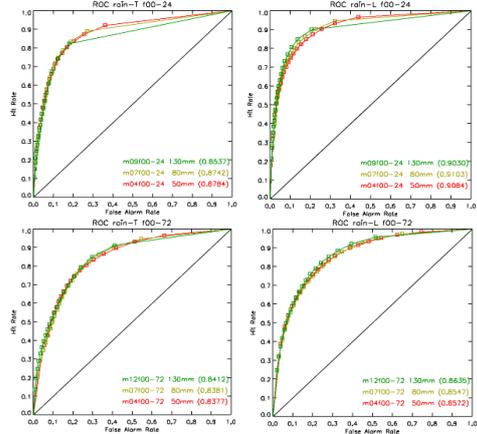
圖三、WEPS系集模式對降雨事件的預報可信度圖。左側降雨累積時間為0小時至24時，右側為0小時至72小時，由上至下分別為50公釐、80公釐、130公釐三種降雨事件。三角形的線表示全區，方形的線代表的是陸地區域，橫的虛線表示氣候值。



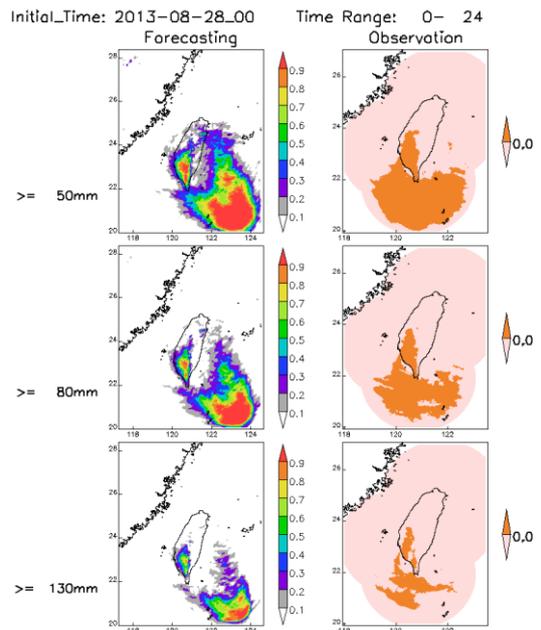
圖五、與圖四相同，但為降雨累積0小時至72小時內，累積降雨350mm的可信度圖。



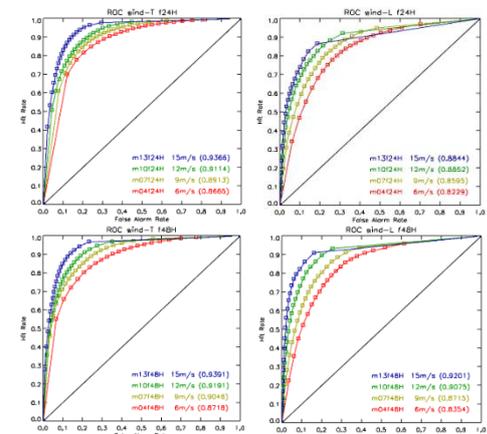
圖六、與圖三相同，但為風速事件的預報可信度圖。左側為全區與陸地的表現，右側為平地與山區的表现，由上至下分別為6m/s、9m/s、12m/s、15m/s四種風速事件。



圖八、WEPS系集模式對降雨事件的辨識能力分析圖。上方降雨累積時間為0小時至24小時，下方為0小時至72小時，左側為全區，右側為陸地區域，不同的顏色表示不同的降雨事件閾值。



圖七、2016年8月28日00UTC各門檻值累積24小時之降雨機率分佈，左邊為WEPS的機率預報，右邊為QPESUMS之雷達估計降水。



圖九、與圖八相同，但為風速事件。上方預報時間為第24時，下方為第48時。