

不同類型颱風之定量降雨機率預報分析與區域校驗結果

鄧旭峰 李清勝 翁進登

台灣大學大氣科學系

摘要

本研究針對2011-2013年臺灣定量降雨系集預報實驗(Taiwan Cooperative Precipitation Ensemble Forecast Experiment, TAPEX)期間8個侵臺颱風個案，進行定量降雨機率預報(Probabilistic Quantitative Precipitation Forecast, PQPF)分析與校驗，並根據颱風六項預報指引予以分類，分析不同類型颱風PQPF結果顯示，對於半徑較小西行颱風，高機率值易有過度預報之現象，且機率值分布掌握度也較低；對於北行颱風，機率掌握度較西行颱風差。另，本研究針對所發展之PQPF技術進行區域校驗，擴大縣市或多個鄉鎮區域範圍進行校驗分析，以避免單一鄉鎮區域內因雨量測站設置不均或取樣資料過少，而導致校驗結果難以參考應用之情形。因此，分析中央氣象局雨量觀測站所在行政區、地形及地理特性，將臺灣地區分為26個校驗區，透過系統性分析進行機率校驗。同時，為降低颱風侵臺期間沒有顯著降雨之時段對機率校驗的影響，將颱風顯著影響臺灣之時間進行分析，以通過臺灣地理基線為分界，分為颱風侵臺前(-24~0小時)、中(-12~12小時)及後(0~24小時)三個校驗時段。校驗結果顯示，西行颱風整體校驗結果優於北行颱風，離颱風中心較遠之顯著降雨區其PQPF準確性較差。在山區與平地校驗結果，當山區降雨大於350mm以上時，可靠性下降，機率有高估的情形；在颱風不同侵臺時期校驗結果，不論平地或山區在中、後期區辨能力較佳。另分析造成機率預報顯著誤差之因素與系集路徑預報一致性偏移有高度相關。

關鍵字：颱風、定量降雨預報、鄉鎮尺度、機率預報、預報校驗、系集預報

一、前言

近年來由於電腦科技的進步，使得中尺度氣象預報模式在預報網格解析度及延長預報時間上皆有顯著的進展；然而，數值天氣預報系統存在著非線性過程，任何微小的變化，皆有可能導致預報結果產生極大的差異。系集天氣預報主要在找出預報初始場最不穩定的擾動，評估此擾動對後續天氣預報的影響，藉由多個不同系集成員的預報，彌補單一模式預報的不足，量化系集預報場的不確定性，以提供預報未來天氣出現之機率，並延長有效預報時限。

國家實驗研究院臺灣颱風洪水研究中心（颱風中心）於2010年起研究颱風定量降雨數值模式系集預報技術，並邀集交通部中央氣象局（氣象局）、國家災害防救科技中心（災防中心）及學界的10位教授等共同進行颱風定量降雨系集預報實驗（Typhoon Quantitative Precipitation Ensemble Forecast Experiment, TAPEX）；並結合國家高速網路與計算中心(國網中心)的計算資源及氣象局、災防中心的實務經驗，於颱風影響臺灣期間，每日產出4次即時高解析度臺灣地區天氣變化狀況，以系集統計方法與機率預報概念，分析颱風路徑與雨量分布。

李（2009，2010，2011）透過整合數值動力模式預報法之動力一致合理性，與統計預報穩定性及

重現性之優點，建立侵臺颱風鄉鎮尺度降雨之動力統計預報指引系統。李（2011）進一步針對2010年西行(凡那比)及北行(萊羅克、梅姬)颱風個案，進行陸上颱風警報期間，所有測站累積雨量進行預估，並與觀測資料進行差異評估，以了解此動力統計預報指引系統之預報能力。分析結果顯示，利用預報指引系統挑選模擬成員，預先建立背景資料之動力統計模式，雖可提高降雨量的預報準確度，但卻可能因為個案的挑選，使得降雨分布出現較顯著誤差。因此，藉由定量降雨機率預報(Probability Quantitative Precipitation Forecasts, PQPF)技術之發展與應用，改進數值模式之降雨預報，並使預報結果皆能包含系集成員之不確定性。

二、資料彙整與分類

(一) 雨量資料

以1994-2013年臺灣本島，經QC(李等2003、Lee et al., 2006)後，共有381個中央氣象局雨量觀測站(包括21個本島局屬測站及360個自動測站)進行統計分析及PQPF校驗。應用Cressman(1959) Interpolation方法將381個測站觀測資料內插至範圍21.75°N – 25.25°N; 120°E – 122°E內網格點上，網格點間距為0.009°×0.009°(約相當於1.1公里x1.1公里)。由於測站代表臺灣陸地上的降雨，因此內插至海洋上網格點的資料將不予以考慮，故地形以海拔1公尺為分界，

海拔高於1公尺的網格點值才予以保留做為分析之用。

後續為改善鄉鎮區之校驗，針對2011-2014年10個侵臺颱風進行系統性分析與校驗，應用中央氣象局2014年公布之雨量站資料，分析雨量站所在行政區、地形及地理特性，將臺灣本島地區劃分為26個校驗區共496個雨量站。

(二) 系集預報資料

蒐集2011-2015年颱風季，共計有10個侵臺颱風系集實驗預報個案資料共計240筆，包括TAPEX所有預報成員每6小時一組之系集預報結果，其中有臺灣地區解析度5公里之網格雨量預報資料及未來72小時內插對應測站位置之逐時雨量預報資料，以做為PQPF技術建立與後續校驗分析之應用。

三、定量降雨機率預報技術與校驗方法簡介

(一) 定量降雨機率預報技術

應用颱風中心TAPEX資料，針對某初始時間、每個網格點、特定雨量門檻值，計算系集成員達到門檻值以上之數量佔全部系集成員的比例，即為系集成員預報降雨達到特定門檻值之機率，其方程式表示如下：

$$PQPF_{(i,x,y,d,t,c)} = \frac{\text{number}(\text{member}_{(i,x,y,d,t)} \geq c)}{\text{number}(\text{member}_{(i,x,y,d,t)})}$$

其中PQPF為定量降雨預報之機率，i為初始時間(數量視侵臺時間長短而訂)，x、y為網格點(43x78格)，d為不同降雨累積時間(5種：1、3、6、12、24小時)，t為預報時間(1-72小時)，c為不同雨量門檻值(6種：10、25、50、130、200、350 mm)，member為符合設定之系集成員，number為符合條件之成員數量。其水平解析度為5km x 5km之網格(共43 x 78網格點)，於每一網格點上計算不同門檻值之降雨機率，必要時亦可內插至2.5km x 2.5km。因此，可針對指定鄉鎮進行該區域之平均，以代表該鄉鎮特定門檻值之颱風降雨機率預報。

(二).抽樣型定量降雨機率預報技術

考慮系集成員之數量會有限制，導致出現機率不連續之情形。因此，本研究嘗試透過統計原理，以亂數抽樣的方式，使系集成員之樣本數增多，而近乎連續分布。

(三).校驗方法介紹

針對2011-2013年侵臺颱風個案，應用颱風中心TAPEX之颱風降雨機率預報結果，與研發之抽樣型PQPF技術進行比對及分析，依不同門檻值(threshold)分別進行計算出現之機率並進行評估比對。另繪製

RD (Reliability Diagram) 圖、繪製 ROC(Relative Operating Characteristic)圖、了解系集預報技術在PQPF各類雨量閾值之改善能力。

四、不同類型颱風之降雨機率預報校驗分析

針對TAPEX2011-2013年期間發布陸警之8個颱風個案(圖1)參考李(2011)6項颱風降雨動力統計預報指引進行分類，分析不同類別颱風(如表1)PQPF的差異。

(一) 2011-2013所有發布陸上警報之颱風

分析定量降雨機率預報RD圖顯示，對於12小時、24小時累積雨量達到各雨量門檻值之PQPF掌握程度高，只有在高機率值的部分有過度預報之現象。計算ROC曲線下方之面積皆在0.9以上，顯示PQPF在準確機率與誤報機率上有良好的區辨能力。

(二).中度西行颱風與強烈西行颱風

在2011-2013年西行颱風個案中，2個屬於中度颱風，3個為強烈颱風。對於中度西行颱風而言，PQPF校驗結果，RD圖顯示其在高機率預報上有過度預報之現象，另在強烈颱風個案中，此過度預報之現象則較不明顯。

(三).中等移速西行颱風與快速行進西行颱風

若以移速分類，其中2個屬於中等移速颱風，分析RD圖顯示其在高機率預報上出現過度預報之現象；3個為快速行進颱風，分析RD圖顯示在高雨量門檻值之高機率預報中有些微過報情形。在PQPF的區辨能力上，計算ROC曲線下方之面積皆在0.92以上，此兩類颱風皆有相當良好的表現。

(四).西行半徑較大颱風與西行半徑較小颱風

若以半徑分類，其中4個屬於半徑較大之颱風，分析RD圖顯示，過度預報之情形較不明顯；另2個為半徑較小之颱風在高機率預報上也有過度預報之現象。在半徑較大之個案預報中，計算其ROC曲線下方之面積皆在0.93以上，有相當良好的區辨能力，在半徑較小之個案中，ROC曲線下方面積僅為0.87左右，其高雨量門檻值時區辨能力較差

(五).於台灣北部、東北部及花蓮登陸之西行颱風與未登陸之西行颱風

若以登陸位置分類，其中2個屬於在台灣北部、東北部及花蓮登陸之颱風個案，分析RD圖顯示，其高機率預報上有過度預報之情形；3個為未登陸颱風個案，則無過度預報之情形。計算ROC曲線下方之面積皆在0.90以上，此兩類颱風皆有相當良好區辨能力。

(六).於7月侵襲臺灣之西行颱風與於8月侵襲臺灣之西行颱風

在2011-2013之西行颱風個案中，其中2個屬於7月侵襲臺灣之颱風，分析RD圖結果呈現過度預報之現象較不明顯；另2個於8月侵襲臺灣之颱風，其高機率預報上有過度預報之現象。計算ROC曲線下之面積皆在0.94以上，顯示在7月侵襲臺灣颱風個案預報中，有相當良好的區辨能力，而在8月侵襲臺灣颱風個案中，ROC曲線下面積僅為0.87左右，其高雨量門檻值時區辨能力較差。

(七).未登陸之西行颱風與未登陸之北行颱風

若以路徑分類，其中3個屬於西行且未登陸之颱風個案，2個為北行且未登陸之颱風個案，分析RD圖其在高機率之預報上出現過度預報之現象，而在西行未登陸之個案預報中，則無過度預報之情形。在PQPF的區辨能力上，在西行未登陸之個案預報中，計算ROC曲線下之面積皆在0.91以上，顯示有相當良好的區辨能力，而在北行未登陸之個案中，ROC曲線下面積最低僅為0.78左右，區辨能力較差。

(八).小結

分析不同類型颱風PQPF的預報中，對於半徑較小之西行颱風，其高機率值有過度預報現象且機率值分布掌握度較低；對於北行未登陸之颱風，整體掌握度也不好，顯示數值模式中對降雨系統範圍較小，或是在颱風中心預報產生偏差時主要雨區改變，會造成PQPF較差之結果。另北行颱風路徑預報有較大不確定性，使得降雨區會有較大之變異。目前對PQPF校驗結果之討論，受限於TAPEX資料，其結果仍有侷限性，需等待更多數值資料，增加各類之颱風個案數後，才可得到較完整之PQPF分類特性。

五、鄉鎮之颱風降雨機率預報與校驗

受限於現有TAPEX網格資料解析度不足，無法直接進行鄉鎮預報分析，本研究透過3rd order Bessel interpolation方法，將TAPEX原始5km網格解析度內插至2.5km網格解析度，以提升各鄉鎮內的網格點數量，以利於進行臺北市中正區、臺北市北投區、臺中市北區、嘉義縣阿里山鄉、高雄市前鎮區、屏東縣三地門鄉、花蓮縣花蓮市及花蓮縣秀林鄉等8個示範鄉鎮區之颱風降雨機率預報與校驗，茲以2013年蘇力颱風為例說明如下：

(一).鄉鎮降雨機率預報

蘇力颱風(初始時間2013年7月11日0000UTC)預報結果顯示，台灣地區降雨受到颱風行進路徑與登陸地影響，在臺灣北部、中部、山區鄉鎮具有顯著的雨量門檻值機率訊號，尤其山區鄉鎮預報機率訊號較平地鄉鎮顯著許多。蘇力颱風影響東部地區鄉鎮時間較短，在南部地區鄉鎮受颱風影響較晚，其

雨量門檻值機率訊號較不顯著(圖2、圖3)。整體而言，鄉鎮之颱風降雨機率預報之峰值與預報時間序列受到颱風路徑影響較大，其次山區與平地鄉鎮的差異，鄉鎮面積範圍之大小與颱風距離亦會造成不同鄉鎮間降雨機率預報結果的差異。

(二).鄉鎮校驗分析

針對蘇力颱風降雨機率預報，進行前述8個鄉鎮校驗結果顯示，不論山區或平地鄉鎮，校驗示範區內測站數量多寡是影響RD(可靠度)、ROC(區辨率)之重要因素。另受到各機率事件出現次數所影響，RD、ROC會有非常顯著的變化，尤其在機率事件出現次數非常少時，RD、ROC則較差。整體而言，鄉鎮所在位置設立測站數量與颱風行進路徑造成降雨分布差異情形是影響校驗結果最主要的兩個因素。

為改善上述鄉鎮尺度颱風定量降雨機率預報(24小時累積降雨)，以單一鄉鎮行政區為範圍時，因校驗區內雨量站取樣資料過少而導致校驗結果區辨率過低，難以參考與應用之情形。應用中央氣象局2014年公布之雨量站資料，分析雨量站所在行政區、地形及地理特性，將臺灣本島地區劃分為26個校驗區共496個雨量站，針對2011-2014年10個侵襲颱風進行系統性分析與初步校驗，以了解定量降雨機率預報技術對各校驗區24小時累積降雨趨勢之掌握能力。同時對颱風顯著影響臺灣之時段，以西行颱風通過中央山脈基線(臺灣地理山脊線)或北行颱風通過北緯23.8度之時間為基點($t=0$)，取颱風侵臺前(-24~0小時)、中(-12~12小時)及後(0~24小時)三個時間區段進行校驗分析。結果顯示，西行颱風整體機率預報結果優於北行颱風，且離颱風中心較遠之顯著降雨區，此定量降雨機率預報技術之準確性較差。對山區與平地之校驗分析結果顯示，山區之機率預報對超大豪雨(雨量值大於350mm以上)的可靠性下降，且有高估的情形。對颱風不同侵臺時段之校驗分析顯示，不論平地與山區、在中、後期機率預報之區辨能力皆較佳。分析降雨機率預報誤差來源顯示，其誤差值大小與系集預報路徑之偏移程度有高度正相關。

(三).小結

整體而言，鄉鎮機率預報具有理想之預報結果，而各個鄉鎮之校驗差異主要受到颱風行進路徑影響，對具有顯著降雨之區域進行校驗結果較具意義。此外，鄉鎮面積範圍大小與校驗區內可供校驗之雨量站數量多寡亦是影響校驗結果的原因之一；因雨量站數量過少，容易造成各機率事件樣本不足的情況，導致系集機率預報之區辨率、可靠性下降，但卻沒有顯著的絕對誤差與準確度偏差。

七、結論

本研究對於2011-2013年TAPEX執行期間8個侵臺颱風個案進行分析結果顯示，透過TAPEX系集資料所發展之PQPF結果相當理想，系集PQPF之預報能力相較於氣候法PQPF有顯著提升。分析原始PQPF與抽樣型PQPF結果顯示，在校驗分析上並無一致的差異。此外，對於2011-2013年所有颱風警報期間定量降水機率預報之校驗結果顯示，整體機率分布、峰值及誤報率皆有相當的水準，惟機率值較高之預報有略為高估之現象。

本研究參考六項預報指引參數並以颱風路徑做為第一分類目標，探討不同類型颱風降雨機率預報(PQPF)的特性。分析結果顯示，對於暴風半徑較小之西行颱風，高機率值易有過度預報之現象，且機率分布掌握度也較低；而對於北行颱風，整體掌握度皆較西行颱風差。西行颱風可能因為暴風半徑小降雨範圍較小，在模式中掌握度較低，也可能是因在颱風中心產生偏差時，主要雨區改變而造成PQPF有較差之表現。

另一方面，本研究亦針對鄉鎮區域進行校驗分析。分析結果顯示，對各個區域之校驗差異主要受到颱風路徑所影響，西行颱風整體結果較北行颱風佳，且離颱風中心較遠之顯著降雨區，PQPF準確性較差。在颱風不同侵臺時期方面，無論是平地或山區，皆在中、後期有較佳區辨能力，尤以山區後期之結果最為理想。

整體而言，分析TAPEX系集颱風路徑預報與PQPF結果顯示，實際行進路徑偏移程度是影響PQPF表現程度之主因，路徑偏移的大小會導致PQPF之極值區向特定方向偏移，造成定量降雨機率預報在分佈上出現顯著誤差。反之，若系集路徑具有適當之歧異度，且實際路徑包含於系集路徑歧異度內，則定量降雨機率預報之區辨率(ROC)、可靠性(RD)都會有較理想之結果。

八、參考文獻

- 李清勝，沈鴻禧，翁進登與林宗生，2003：“颱風研究、預報與警報研究成果（二）”，防災國家型科技計畫辦公室，NAPHM92-04，100 頁
- 李清勝，2009：“颱風降雨整合預報技術之發展（1/3）”。交通部中央氣象局委託研究計畫報告，MOTC-CWB-98-2M-07，共142頁。
- 李清勝，2010：“颱風降雨整合預報技術之發展（2/3）”。交通部中央氣象局委託研究計畫報告，MOTC-CWB-99-2M-01，共122頁。
- 李清勝，2011：“颱風降雨整合預報技術之發展（3/3）”。交通部中央氣象局委託研究計畫報告，MOTC-CWB-100-M-04，共197頁。

李清勝，2014：“颱風降雨和系集模擬整合預報技術之發展（3/3）”。交通部中央氣象局委託研究計畫報告，MOTC-CWB-103-M-04，共191頁。

Cressman, G. P.: “An operational objective analysis system”. 1959, *Mon. Wea. Rev.*, **87**(10)pp:367-374.

Lee, C. S., L. R. Huang, H. S. Shen, and S. T. Wang, 2006: “A Climatology Model for Forecasting Typhoon Rainfall in Taiwan.” *Natural Hazards*, 37, 87-105

表1 2011-2013年發布陸警之颱風個案分類統計表

路徑分類	綜合預報指引項目	區分標準	颱風名稱
西行 颱風	颱風強度	輕度(34-63 kts)	潭美(2013)
		中度(64-99 kts)	蘇利(2012)、菲特(2013)
		強烈(>100 kts)	南瑪都(2011)、天兔(2013)、蘇力(2013)
	颱風移速	慢速(<17 km/hr)	南瑪都(2011)
		中速(17-23 km/hr)	蘇利(2012)、天兔(2013)
		快速(>23 km/hr)	蘇力(2013)、潭美(2013)、菲特(2013)
	暴風半徑	大颱風(半徑≥200km)	蘇力(2013)、天兔(2013)、菲特(2013)、蘇利(2012)
		小颱風(半徑<200km)	南瑪都(2011)、潭美(2013)
	登陸地點	第1區	蘇利(2012)、蘇力(2013)
		第2區	南瑪都(2011)
		未登陸	潭美(2013)、天兔(2013)、菲特(2013)
	太陽日	4月	無
		5月	無
		6月	無
		7月	蘇利(2012)、蘇力(2013)
		8月	南瑪都(2011)、潭美(2013)、
		9月	天兔(2013)
		10月	菲特(2013)
11月		無	
12月		無	
北行 颱風	颱風強度	輕度(34-63 kts)	泰利(2012)、康芮(2013)
		中度(64-99 kts)	無
		強烈(100 kts 以上)	無
	颱風移速	慢速(<17 km/hr)	無
中速(17-23 km/hr)		康芮(2013)	

	快速(>23 km/hr)	泰利(2012)
暴風半徑	大颶風(半徑 ≥200km)	泰利(2012)
	小颶風(半徑 <200km)	康芮(2013)
登陸地點	第1區	無
	第2區	無
	未登陸	泰利(2012)、康芮(2013)
太陽日	4月	無
	5月	無
	6月	泰利(2012)
	7月	無
	8月	康芮(2013)
	9月	無
	10月	無
	11月	無
	12月	無

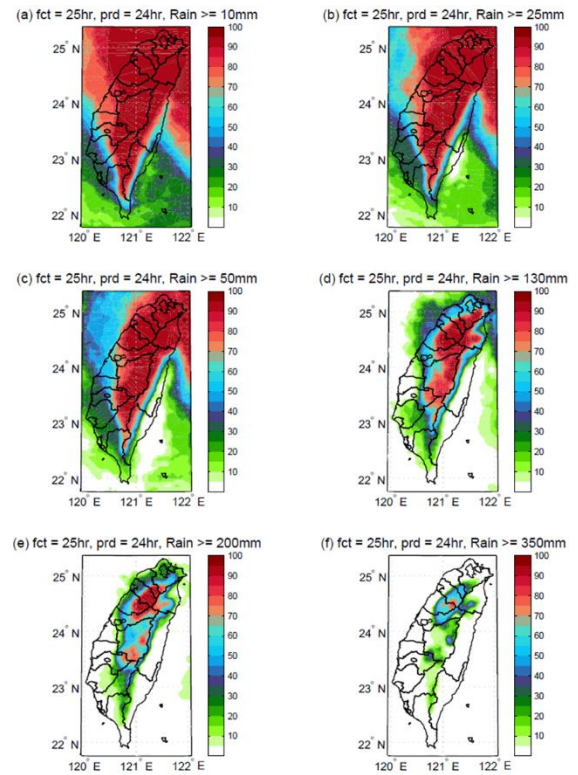


圖3 蘇力颱風(2013)(初發時間2013年07月12日0000UTC) 24小時累積雨量之系集QPF結果。色階表示機率(%)，(a)-(f)分別表示不同雨量門檻值(10、25、50、130、200、350mm)。

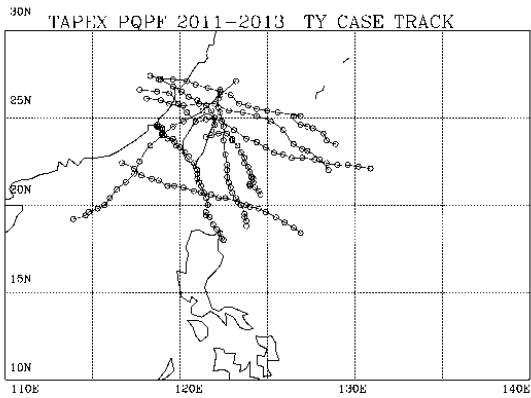


圖1 2011-2013年臺灣定量降雨系集預報實驗期間8個侵臺颱風路徑分布圖。

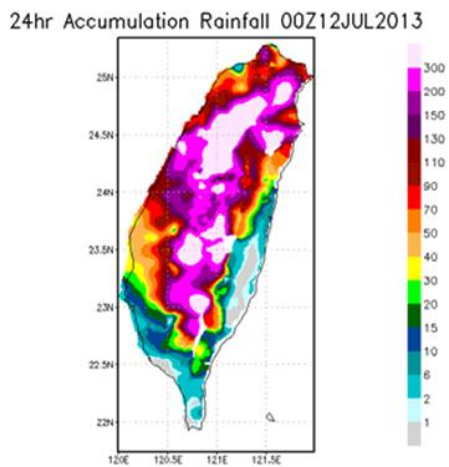


圖2 蘇力颱風(2013)7月12-13日0000UTC之24小時觀測累積降雨量(色階，單位：mm)。