

水庫集水區之短期定量降雨預報技術發展

The development of short term quantitative precipitation forecast technique for reservoir watersheds

主管單位：財團法人國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心

徐理寰 蕭玲鳳 江宙君 張龍耀

黃麗蓉 吳明璋 黃公度 陳熾竹

Hsu, Li-Huan Hsiao, Ling-Feng Chiang, Chou-Chun Chang, Lung-Yao

Hwang, Li-Rung Wu, Ming-Chang Hwang, Gong-Do Chen, Yen-Chu

財團法人國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心

摘要

本研究針對石門水庫與曾文水庫集水區，發展小範圍、高精度之最佳化定量降雨預報技術，希冀能有助於改善台灣地區水庫水資源管理之效率。我們透過台灣定量降雨系集預報實驗(TAPEX)之 72 小時預報雨量，發展機率撮合(probability-matched, PM)方法改善系集平均於集水區之短期降雨預報。為了修正系集平均低估之雨量並保有系集平均雨量的空間分布特徵，PM 方法以系集平均的雨量空間分布為基準，重新分配各系集實驗中雨量值於模式中之格點位置，希望能使其更接近強降雨事件之觀測值。從 2013 年的侵台颱風中，挑選康芮颱風及菲特颱風作為測試 PM 方法的強降雨個案，康芮颱風個案使用 PM 方法最大降雨值提高為 443 mm (系集平均預報為 340 mm)。而 2013 年菲特颱風使用 PM 方法最大降雨值提高為 352 mm (系集平均預報為 139 mm)。結果顯示 PM 方法可顯著改善 72 小時系集平均預報之累積雨量，普遍在雨量低估處能提高預報之雨量。

關鍵詞：水庫集水區、短期定量降雨預報、機率撮合方法、台灣定量降雨系集預報實驗

Abstract

This research focus on the development of short term quantitative precipitation forecast technique in Shinmen and Zengwen reservoir watersheds. The precipitation forecast data from Taiwan Cooperative Precipitation Ensemble Forecast Experiment (TAPEX) is adopted. In this study, the probability-matched (PM) method is applied to improve the 72 hours precipitation forecast in reservoir watersheds. In order to improve the underestimating precipitation amounts for ensemble mean, the PM method would remain the precipitation spatial distribution and redistribute the precipitation amounts at each grid point among all ensemble members. Two heavy rainfall events including Typhoon Kong-Rey (2013) and Fitow (2013) are selected to examine here. In general, there are

significant improvements on maxima precipitation amounts in reservoir watersheds by using the PM method. As a result of 72 hours accumulated rainfall forecasts show that the PM method is increased the maxima amount of ensemble mean from 340 mm/139 mm to 443 mm/352 mm for Typhoon Kong-Rey/Fitow, respectively. The preliminary results suggest that the PM method may improve the 72 hours quantitative precipitation forecast in reservoir watersheds effectively.

Keywords : reservoir watershed, short term quantitative precipitation forecast, TAPEX, probability-matched method.

一、前言

在全球氣候變遷的影響下，近年來世界各地極端天氣現象的發生頻率漸增。台灣地區位於西北太平洋海域之樞紐位置，每年依季節分別受到梅雨、颱風及中緯度鋒面的影響。因此，台灣地區年平均降雨量約可達2,500毫米以上，但由於降雨之時空分布不均勻，若無法針對水資源進行預先的管理與調度，當無顯著梅雨鋒面或是颱風侵襲時，便容易面臨缺水現象；又或是當颱風來臨造成顯著降雨後，水庫才開始調節性洩洪，就會導致低窪地區出現淹水的狀況。過往針對台灣地區乾旱現象的研究，無論是由氣象、水文、水資源管理或乾旱預警等方面出發，均已投入大量之研究人員進行探討分析，並獲得許多豐碩的研究成果。然而，為增進台灣地區水庫水資源管理實務上的效率，本研究應用颱風中心定量降雨系集預報之實驗結果，針對水庫集水區，著重在72小時（一至三天）高解析度定量降雨預報技術之研發，強化短期定量降雨預報技術之能力，以協助降低乾旱災害預警的不確定性，並提供水庫管理單位於應變期間之參考。

二、研究背景與研究方法

台灣位處深受東亞季風特性影響之區域，且坐落於西北太平洋颱風路徑轉折之樞紐位置，降雨特性存在顯著季節變化，在夏季時侵台颱風帶來之雨量對台灣水庫集水區而言為重要雨量來源。在本研究中首先透過測站歷史降雨資料分析水庫集水區之氣候降雨特性，接著進一步發展短期定量降雨預報技術，並選取颱風個案做為強降雨事件之初步測試，希望能提供水庫管理單位於應變期間水庫操作之參考。

2.1 水庫集水區降雨氣候特徵

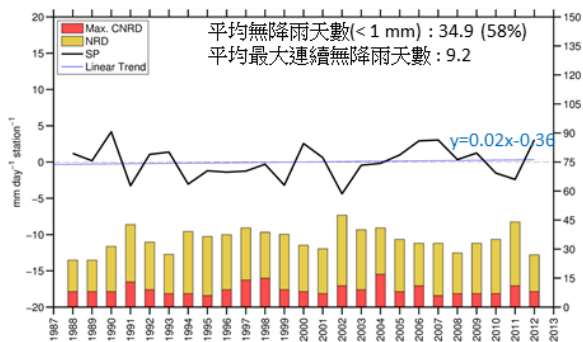
本研究蒐集並分析1987至2012年水庫集水區內氣象局及水利署測站之時雨量資料，包含石門水庫集水區內共17測站，曾文水庫集水區內共19測站。分析測站之月平均日降雨特性，並以該站單月有效雨量資料天數大於20天為篩選門檻值，在空間特性方面，各測站間日降雨之相關係數多在0.8以上，表示在集水區內各測站之降雨無顯著之空間分布差異，地理特性相似。而在時序列特性上，月平均日降雨呈現季節性變化，極值多為颱風季期間颱風降雨所造成。進一步將降雨資料分為春季(SP, 3、4月)、梅雨季(MY, 5、6月)、颱風季(TY, 7、8、9月)及冬季(WI, 10、11、12、1、2月)，其中各季節測站資料篩選門檻值分別設定為：春季，有資料天數大於40天；梅雨季，有資料天數大於40天；颱風季，有資料天數大於60天；冬季，有資料天數大於100天。總體來說在春、冬季曾文水庫集水區平均降雨量小於石門水庫集水區，而在颱風季曾文水庫集水區平均降雨量則大於石門水庫集水區。從降雨距平來看，冬季、春季降雨距平並無明顯之年際變化趨勢，而梅雨季及颱風季則呈現增加的趨勢。

以乾旱事件的角度，首先定義無降雨天數之門檻值為小於1 mm之日降雨，在冬、春季之平均無降雨天數所佔比例最高，石門水庫集水區分別為65%及58%，曾文水庫集水區則為86%及79%。考慮受乾旱影響嚴重的第一期作(包含春、梅雨季)，圖1為石門水庫集水區春、梅雨季(圖1(a)、(b))及曾文水庫集水區春、梅雨季(圖1(c)、(d))之日降雨距平(黑線)年際變化，平均日降雨之線性趨勢線(藍線)、平均無降雨天數(黃直條)及最大連

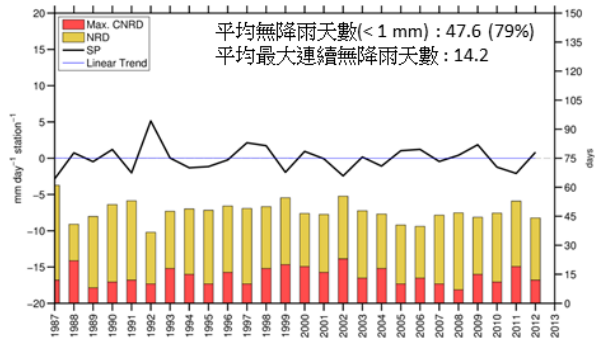
續無降雨天數(紅直條)。春、梅雨季與降雨的負相關性最高，石門水庫相關係數分別為-0.71與-0.55，曾文水庫則是達到-0.73及-0.75。此結果顯示過去發生乾旱事件時，春、梅雨季雨量距平值為偏低且季節內無降雨天數高，例如2002年北部之乾旱事件發生時，北部石門水庫集水區呈現偏少的雨量。圖1(c)、(d)之曾文水庫集水區分析也顯示相同的趨勢。

除了年際變化之線性趨勢外，利用快速傅立葉轉換(FFT)對日降雨進行頻譜分析，探討石門、曾文水庫集水區降雨之週期性特徵。圖2(a)、(b)為石門水庫、曾文水庫集水區之春季平均日降雨頻譜分析圖，縱軸為振幅，橫軸為週期。26年週期之振幅極值即為年際變化之線性趨勢，除此以外，集水區內春季降雨呈現2到4年的週期性特徵。其他季節如梅雨季降雨則較無一致性週期特徵，兩集水區差異大，而冬季則無顯著週期主宰。透過離散傅立葉轉換(Discrete Fourier Transform)重建春季降雨雨量資料(圖2(c)、(d))，若只取除26年週期以外最顯著前三個週期的訊號(2.89、3.71及8.67之週期)重建之雨量(綠色線)，可解釋大部分氣候春季降雨(黑色線)的趨勢，跟平均日降雨資料在石門水庫集水區相關係數達到0.63(圖2(c))，曾文水庫集水區相關係數達到0.66(圖2(d))，結果顯示春季降雨受聖嬰現象2~4年之週期影響最為顯著。

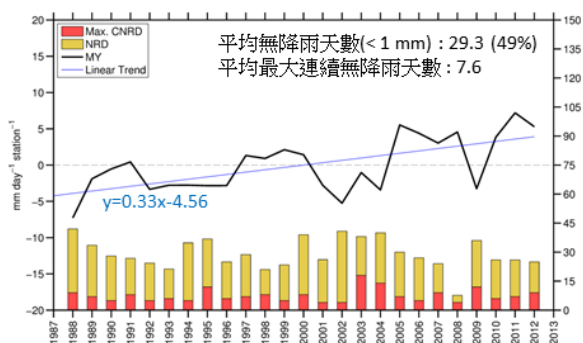
(a) 石門水庫集水區-春季



(c) 曾文水庫集水區-春季



(b) 石門水庫集水區-梅雨季



(d) 曾文水庫集水區-梅雨季

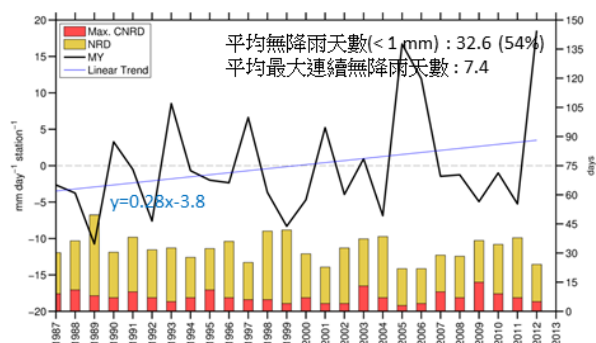


圖1、季節平均日降雨距平(黑線)、線性趨勢線(藍線)、季節平均無降雨天數(黃直條)及最大連續無降雨天數(紅直條)。(a)石門水庫集水區，春季平均。(b)石門水庫集水區，梅雨季平均。(c)曾文水庫集水區，春季平均。(d)曾文水庫集水區，梅雨季平均。

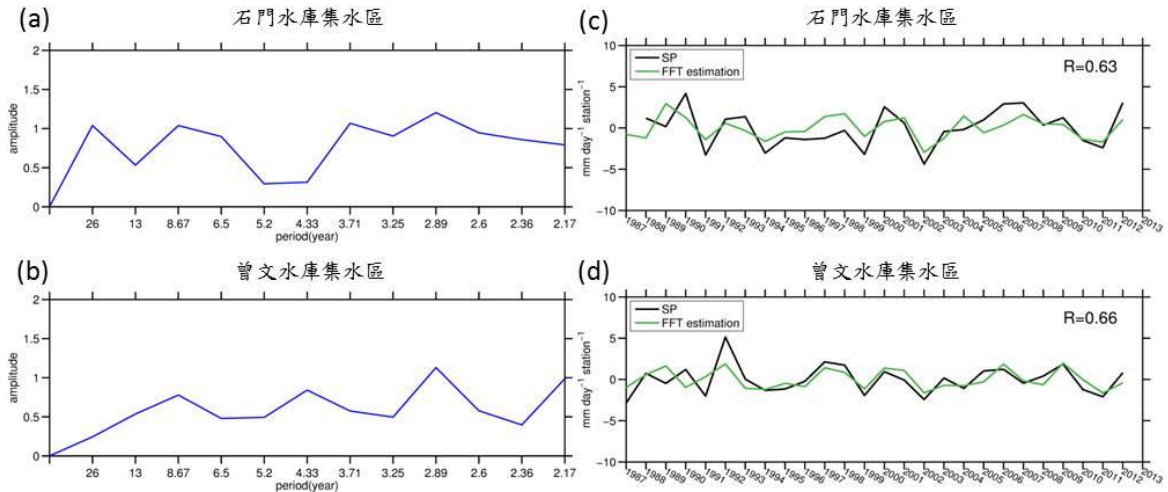


圖2、(a)石門水庫集水區及(b)曾文水庫集水區的春季降雨頻譜分析。(c)石門水庫集水區及(d)曾文水庫集水區春季降雨之離散傅立葉轉換(Discrete Fourier Transform)重建資料(綠色線)、氣候季節平均日降雨(黑色線)以及相關係數。

2.2 機率撮合(probability-matched, PM)方法

在強降雨系統的降雨事件情形下(如颱風季)，本研究參考過去機率撮合(probability-matched, PM)方法在雷達降雨、數值實驗上之應用經驗(Rosenfeld et al. 1993, 1994, 1995; Ebert 2001; Fang and Kuo 2013)，針對石門水庫與曾文水庫集水區發展機率撮合(probability-matched, PM)方法。以颱風中心「台灣定量降雨系集預報實驗」(Taiwan Cooperative Precipitation Ensemble Forecast Experiment, TAPEX)之72小時預報雨量為基礎上，發展適合之短期定量降雨預報技術。

分析2012年TAPEX中，挑選資料較完整之系集成員M01到M19，分析系集平均、系集成員以及觀測之機率密度函數(Probability Density Function, PDF)以及累積分佈函數(Cumulative Distribution Function, CDF)，結果如圖4，其中系集平均標示為黑色、19組系集實驗為藍色，觀測為紅色，而柱狀圖為其PDF，CDF則以折線圖表示。結果顯示在降雨強度50 mm/24hrs左右，系集平均與觀測之CDF大致相同，表示若降雨事件門檻值設為50 mm/24hrs時，系集平均與觀測在門檻值以上及以下的降雨強度事件發生機率皆相近，但系集平均在130 mm/24hrs以上之PDF明顯小於觀測，在強降雨事件有低估的情形；而從CDF分析來看，系集成員與觀測之CDF於70 mm/24hrs ~ 80 mm/24hrs，交會於CDF為0.93處，顯示整體系集成員相較系集平均來說更有機會能反應出強降雨事件。由整體趨勢來說，系集平均雖然可以反應降雨分布的空間特性，但是往往對於強降雨事件的降雨強度有所低估，各系集實驗中發生機率分布較系集平均更接近實際雨量事件發生的機率分布。因此，PM方法將TAPEX系集平均的雨量值進行排序，得到排序後之網格點上的雨量空間分布資訊，再將各系集實驗成員中網格點上雨量值也進行排序，最後將系集成員雨量資訊依照順序放入系集平均排列後的網格點上(圖3)。如此能同時保持較正確的系集平均雨量空間分布，又能夠修正系集平均雨量值使其更接近觀測雨量值。圖4綠色直條及綠色線即為PM後所得之結果，其中PM後的累積機率密度函數比系集平均更接近觀測，且在不損失成員資訊情形下，呈現所有系集成員雨量發生之機率分布。圖5為由

194個dtg初始時間實驗數求得之全台24小時累積雨量最大值之比較圖，結果顯示在發生雨量高值區域，PM方法能有效將系集平均高值提高，但在較低雨量時則會有略微高估的情況。

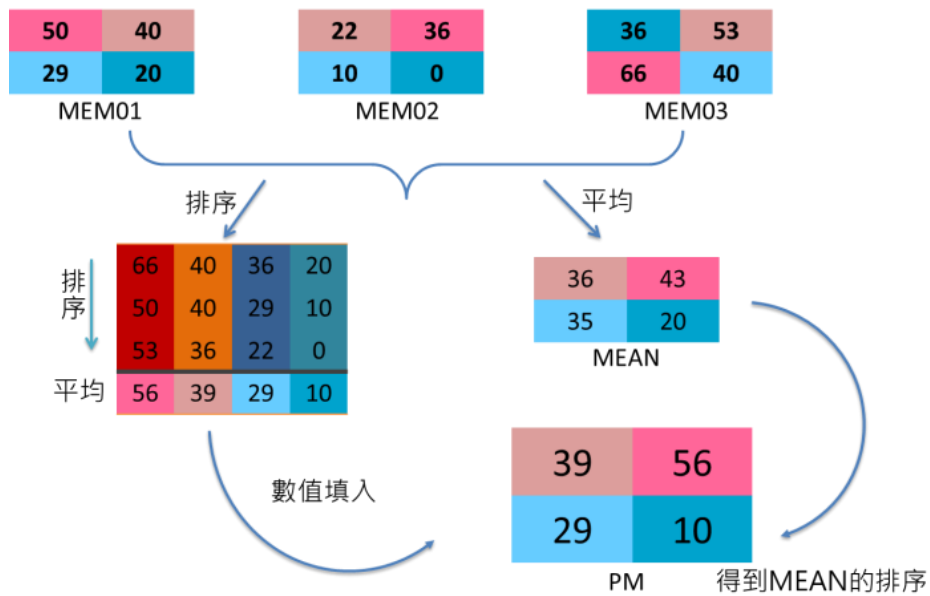


圖3、機率撮合(probability-matched, PM)方法流程圖。

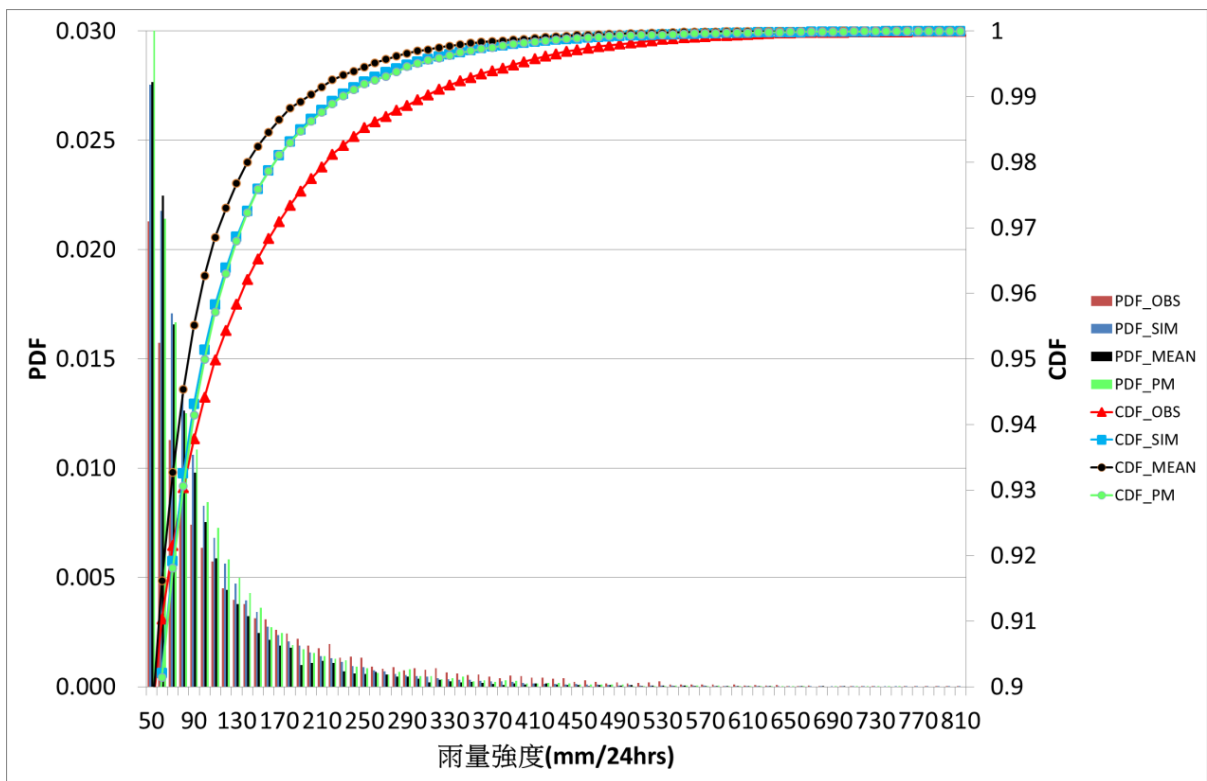


圖4、2012年TAPEX之系集平均(黑色)、所有系集成員(藍色)、觀測(紅色)以及PM(綠色)後之機率密度函數(PDF, 柱狀圖)與累積分佈函數(CDF, 折線圖)。

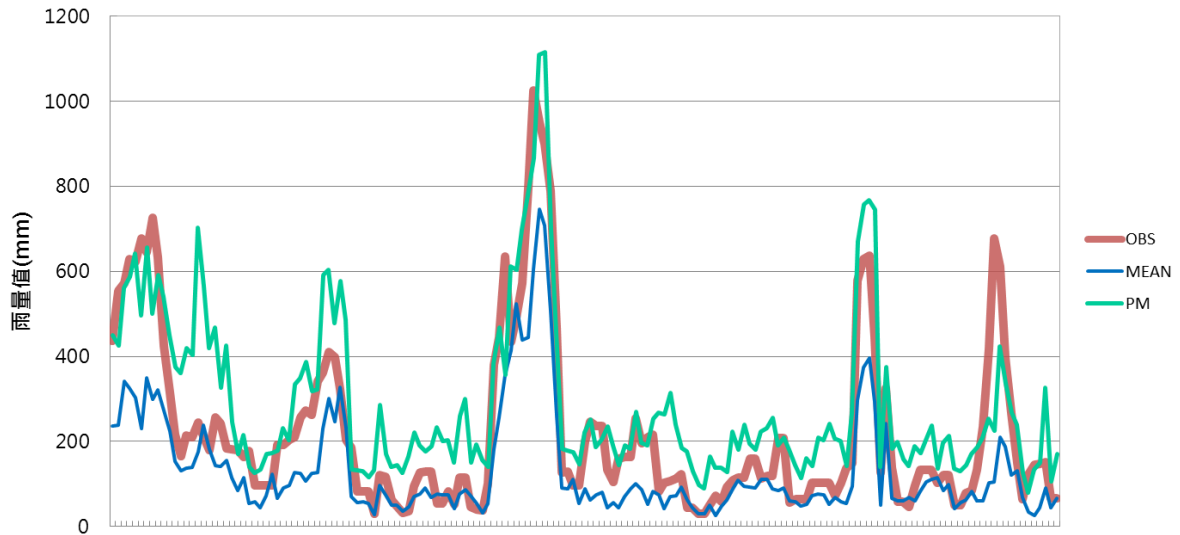


圖5、2012年每24小時全台雨量最大值比較圖(橫座標為dtg)，紅色線為觀測、藍色線為系集平均而綠色線為PM後雨量最大值。

三、颱風個案分析

本節以 PM 方法，將選取分析範圍由全台灣的範圍縮小至石門水庫集水區以及曾文水庫集水區範圍(圖 6)作為測試區域，並從 2013 年的侵台颱風中，挑選康芮颱風 (KONG-REY)及菲特颱風(FITOW)作為 2013 年 PM 方法測試的個案。分析結果分別於圖 7 及圖 8。圖 7(a)為 2013 年康芮颱風(KONG-REY)於 8 月 28 日 08 時至 8 月 31 日 08 時之 72 小時累積雨量，在台灣西南部有劇烈降雨，曾文水庫集水區 72 小時累積最大降雨為 668 mm，而北部石門水庫最大降雨為 45 mm。圖 7(b)為以初始時間 8 月 28 日 08 時模擬之系集平均結果，在曾文水庫區域最大降雨為 340 mm，與觀測誤差為 328 mm，最大值區域接近，但雨量值明顯低估。圖 7(d)則顯示經過 PM 後最大降雨提高為 443 mm，與觀測之誤差減少至 225 mm，改善系集平均之誤差值約 31.4 %。而在石門水庫集水區的最大值亦提高，但在周圍區域，PM 將破百毫米之雨量值降低約 60 mm 以下，明顯將低值降低。



圖6、石門水庫集水區及曾文水庫集水區示意圖。

2013年菲特颱風在北台灣造成劇烈降雨，圖8(a)為2013年10月03日18時至10月06日18日之72小時累積雨量，在石門水庫區域最大值為323 mm，而在曾文水庫區域雨量值約為1 mm以下。圖8(b)則是以10月03日18時為模式初始時間之系集平均結果，在石門水庫區域最大值約為139 mm，雖然最大值發生區域相近，但其雨量值明顯低估許多，經過PM後改善後(圖8(c))最大值提高為352 mm，誤差絕對值從184 mm降低為29 mm，改善約84.2%。在降雨較小之曾文水庫集水區，雖最大值將5 mm提升之8 mm，但其他區域之雨量值明顯降低至1 mm以下。兩颱風個案誤差分別改善31.4%與84.2%，雖然改善程度依個案不同而有變化，然而可發現PM方法對系集平均降雨都有正向的改善，平均誤差減少約可達到原誤差的57.8%。針對2013年之康芮與菲特颱風的測試結果顯示，此方法可顯著改善72小時累積之雨量預報；但因目前針對集水區進行分析之個案數尚少，有待未來持續進行驗證。

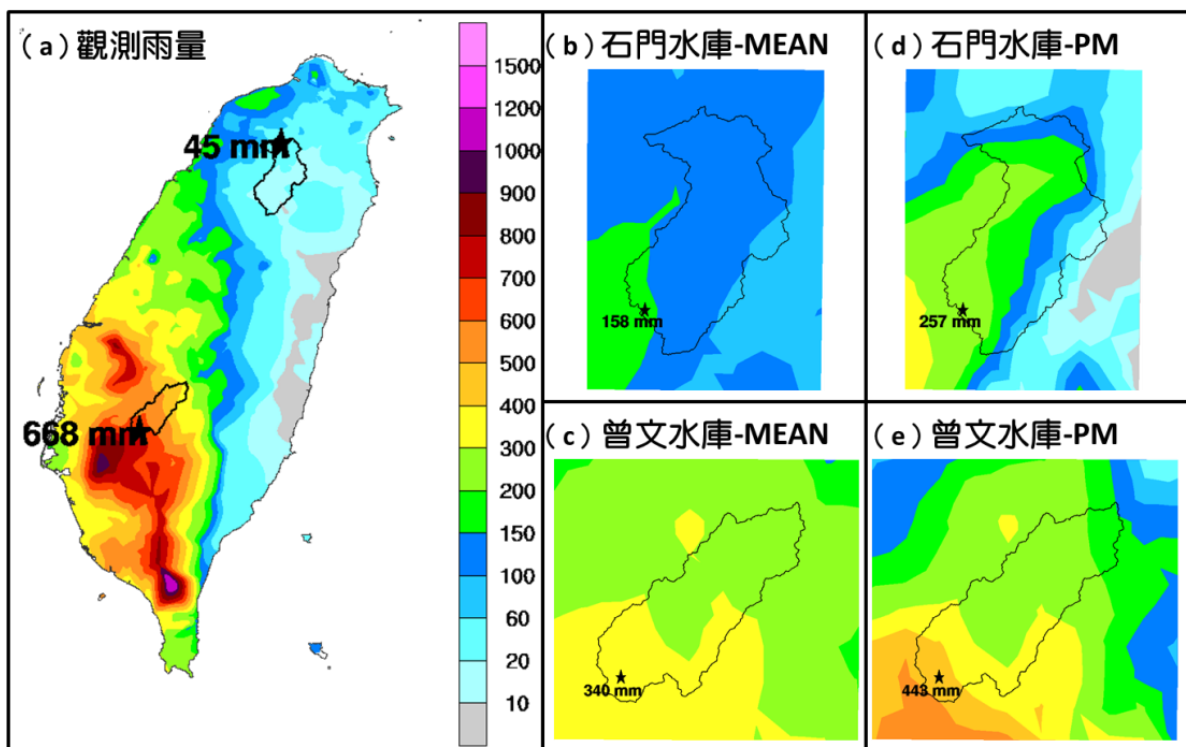


圖7、2013年康芮颱風(KONG-REY)8月28日08時至8月31日08時72小時之(a)觀測累積雨量，(b)、(c)石門水庫、曾文水庫集水區系集平均之累積雨量以及(d)、(e)石門水庫、曾文水庫集水區PM方法改良後之累積雨量。

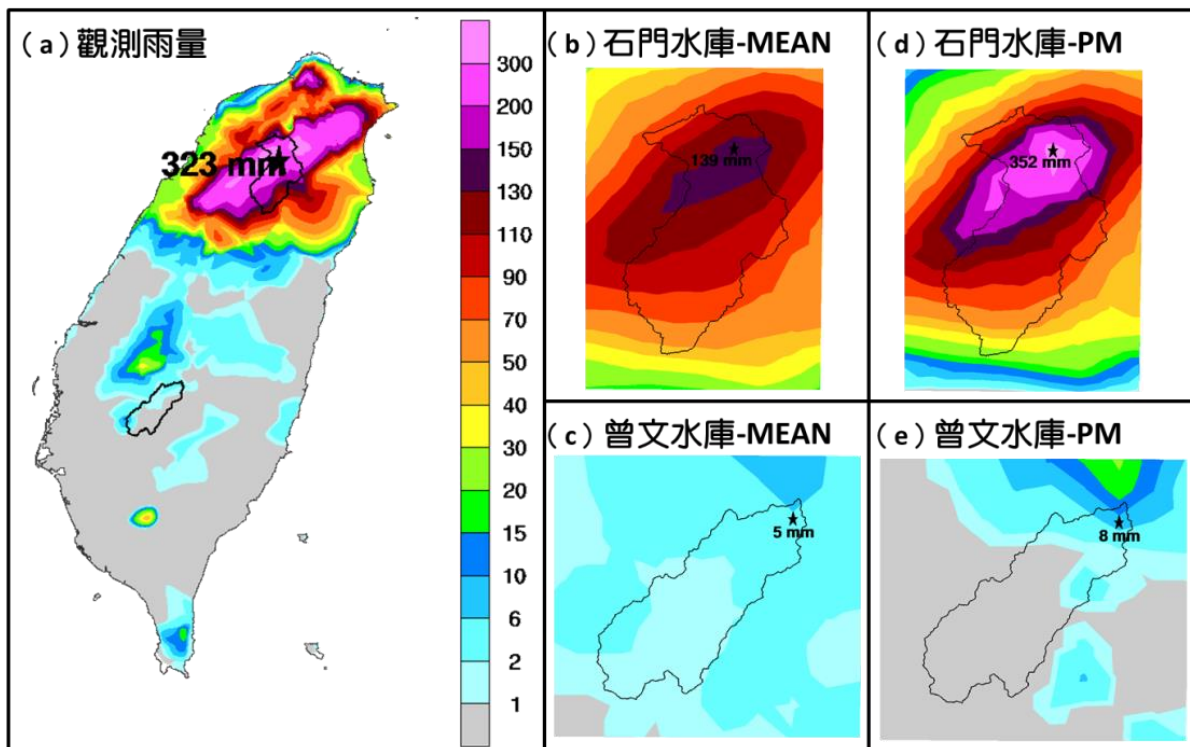


圖8、同圖7，2013年菲特颱風(FITOW)10月03日18時至10月06日18時。

四、結論與建議

本研究為增進台灣地區水庫水資源管理之效率，並針對石門水庫與曾文水庫集水區，發展小範圍、高精度之最佳化定量降雨預報技術，首先分析過去水庫集水區降雨之氣候特徵，接者利用TAPEX實驗之72小時預報雨量，發展機率撮合(probability-matched, PM)方法對短期降雨做預報，強化定量降雨系集預報實驗結果之短期定量降雨預報技術能力，以期能提供水庫管理單位於應變期間參考應用。

蒐集石門水庫與曾文水庫集水區1987至2012年共26年36個氣象局及水利署測站之時雨量資料。分析測站資料顯示，集水區內測站在平均日雨量時序列上呈現顯著的季節性變化，在集水區空間分布上則呈現一致性。進一步將降雨資料分為春季(SP, 3、4月)、梅雨季(MY, 5、6月)、颱風季(TY, 7、8、9月)及冬季(WI, 10、11、12、1、2月)，探討在各季節中集水區內季節平均日降雨年際變化及其與不降雨天數之相關性。結果顯示春、冬季降雨距平並無明顯之年際變化趨勢，而梅雨季及颱風季則呈現增加的趨勢，而降雨變化與無降雨天數的相關性則以春、梅雨季最高，呈負相關，表示過去發生乾旱事件時，春、梅雨季雨量較氣候平均值低且季節內無降雨天數較氣候平均值高。透過頻譜分析可發現春季降雨受聖嬰現象2到4年之週期影響最為顯著，可解釋大部分氣候春季降雨趨勢，跟平均日降雨資料在石門水庫集水區相關係數達到0.63、曾文水庫集水區相關係數達到0.66。

從2012年台灣定量降雨系集預報實驗(TAPEX)結果可知，系集平均在降雨預報上較各別單一成員表現來得好，可以反應降雨分布的空間特性，但在豪雨、大豪雨及超大豪

雨等強降雨事件時容易有低估的情形，而在其他系集成員中則有機會可能報到降雨之大值。因此本研究透過機率撮合(PM)方法改善系集平均降雨大值低估的情形，PM方法以系集平均的雨量空間分布為基準，重新排序、分配各系集實驗中雨量值於模式中之格點位置，以保有系集平均的雨量空間分布，並修正系集平均低估之雨量使其更接近觀測雨量大值。使用2012年194個dtg初始時間之實驗測試結果顯示PM過後的累積機率密度函數比系集平均更接近觀測，且可呈現所有系集成員雨量發生之機率分布，PM方法在發生強降雨事件之位置能有效將系集平均預報之極值提高，但在較低雨量發生之地方有略微高估的情況。

從2013年的侵台颱風中，挑選康芮颱風(KONG-REY)及菲特颱風(FITOW)作為測試PM方法的個案，康芮颱風個案為台灣西南部有較大降雨之個案，曾文水庫區域觀測72小時累積雨量(8月28日08時至8月31日08時)最大降雨量為668 mm，使用PM方法後最大降雨值提高為443 mm(系集平均最大值為340 mm)，改善系集平均之誤差值約31.4%。而2013年菲特颱風在北台灣造成劇烈降雨，觀測72小時累積雨量(10月03日18時至10月06日18時)在石門水庫區域最大值為323 mm。使用PM方法後最大降雨值提高為352 mm(系集平均最大值為139 mm)，誤差改善約84.2%。從2013年颱風個案來看，雖然改善程度依兩個案不同而有變化，PM方法可顯著改善72小時系集平均預報之累積雨量，普遍可在雨量低估處提高預報之雨量，然而本研究也發現在雨量高估處無法一致性的修低預報高估之雨量，此點因目前測試之強降雨個案數尚少，尚須進一步測試，未來除了使用PM方法測試降雨個案外，也將測試選取不同模式範圍大小進行PM方法計算之敏感度。

參考文獻

1. Ebert, E. E., 2001: Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2461–2480.
2. Fang, X., and Y.-H. Kuo, 2013: Improving ensemble-based quantitative precipitation forecasts for topography-enhanced typhoon heavy rainfall over Taiwan with a modified probability-matching technique. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3908–3932.
3. Rosenfeld, D., D. B. Wolff, and D. Atlas, 1993: General Probability-matched Relations between Radar Reflectivity and Rain Rate. *J. Appl. Meteor.*, **32**, 50–72.
4. ———, ———, and E. Amitai, 1994: The window probability matching method for rainfall measurement with radar. *J. Appl. Meteor.*, **33**, 682–693.
5. ———, E. Amitai, and D. B. Wolff, 1995: Improved Accuracy of Radar WPMM Estimated Rainfall upon Application of Objective Classification Criteria. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 212–223.