

考慮颱風與西南氣流相互作用對可能最大 降水估算之影響

The Effect of Estimating Probable Maximum Precipitation by Considering Interaction Typhoon and Southwesterly Flow

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士候選人

劉正欽

Cheng-Chin Liu

國立高雄海洋科技大學
海事資訊科技研究所
教授/副教務長

陳昭銘

Jau-Ming Chen

國立成功大學
水利及海洋工程學系
副研究教授

楊道昌

Tao-Chang Yang

國立成功大學
水利及海洋工程學系
研究助理

林宥丞

Yu-Cheng Lin

國立成功大學
水利及海洋工程學系
特聘教授/工學院院長

游保杉*

Pao-Shan Yu

摘 要

本研究主要提出西南氣流放大因子(Amplification Index of Southwesterly Flow, AISF)以代表考慮颱風與西南氣流影響下，對於可能最大降水(Probable Maximum Precipitation, PMP)之影響，研究區域為曾文水庫集水區。NCEP CFSR (The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR))題供日風速與日可降水的資料，而曾文水庫鄰近的阿里山測站提供了日降雨資料，資料年限為 1979-2009 年 5-8 月。透由上述資料，在台灣西南海面上找出阿里山降雨與 NCEP CFSR 平均風速與平均可降水有顯著相關之區域，再利用 10 場西南氣流事件，經由線性回歸及交叉驗證的方法估算西南氣流降雨回歸方程式。AISF 主要研究 3 類颱風路徑之颱風事件，此 3 類颱風路徑對於研究區域有較顯著之影響。AISF 的定義為歷史最大西南氣流回歸降雨量(P_{HMS})與特定颱風事件之西南氣流回歸降雨量(P_{ST})之比值。而本研究總共選擇了 17 場颱風事件推估 AISF。結果顯示在西

*通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系特聘教授/工學院院長，70101 台南市東區大學路 1 號，yups@mail.ncku.edu.tw

南氣流的影響下，對於颱風降雨都有放大之作用(3 類路徑之平均 AISF 皆大於 1；1.18、1.07 及 1.17)，並放大率符合颱風與西南氣流輻合之相對區域。最後將 AISF 應用於暴雨移置法，與曾文水庫建議之設計 PMP 比較，前者會較為保守，對於曾文水庫會有較佳之維護性，因此針對曾文水庫之設計 PMP，需考慮西南氣流的影響，是有其必要性。

關鍵詞：西南氣流放大因子，西南氣流，可能最大降水，曾文水庫。

ABSTRACT

The purpose of this study is to make a description of what effect the southwesterly flow has on Probable Maximum Precipitation (PMP) by proposing Amplification Index of Southwesterly Flow (AISF). The catchment of Tseng-Wen Reservoir is selected as the study area. NCEP CFSR provides the daily data including wind velocity and precipitable water. The Alishan rain gauge, near the study area, provides local precipitation daily data. All data has selected from May to August, 1979 to 2009. The study finds that precipitation has significant relationship with average value of both wind velocity and precipitable water from NCEP CFSR (The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)) over the southwest ocean of Taiwan. Regression equation for predicting the southwesterly precipitation is deduced by applying linear regression method and cross validation method which using ten southwesterly flow events data. AISF is mainly proposed for researches on typhoon events among which the typhoons are formed along three typhoon routes which have a greater effect on the study area, and is defined as the ratio of historical maximum southwesterly flow precipitation (P_{HMS}) to southwesterly flow precipitation (P_{ST}). The study chooses 17 typhoon events to estimate their respective AISF. The result shows that under the effect of southwesterly flow, there occurred strong typhoons and heavy rainfalls on a larger scale. The AISFs of all typhoons are all larger than 1 and also matches the usual occurrences for a convergence region of typhoon and southwesterly flow. Finally, AISF was applied on storm transposition method to compare with the design PMP of Tseng-Wen Reservoir. Finally, AISF was applied on storm transposition method to compare with the design PMP of Tseng-Wen Reservoir. The result shows it is necessary to consider the interaction of two weather systems (in this study: typhoon and southwesterly flow) on PMP estimated.

Keywords: Amplification index of southwesterly flow, Southwesterly flow, Probable maximum precipitation, Tseng-Wen Reservoir.

一、前 言

極端降雨造成之嚴重水患為近年來全球共同面臨之重大考驗。超過歷史紀錄之降雨量似乎

一再地出現，導致嚴重之生命財產損失。由於極端降雨會在一定的延時內造成嚴重的降雨量，造成市區排水不及，河水暴漲，再加上此時水庫宣洩不及，極可能造成潰壩之危機。然而，台灣也

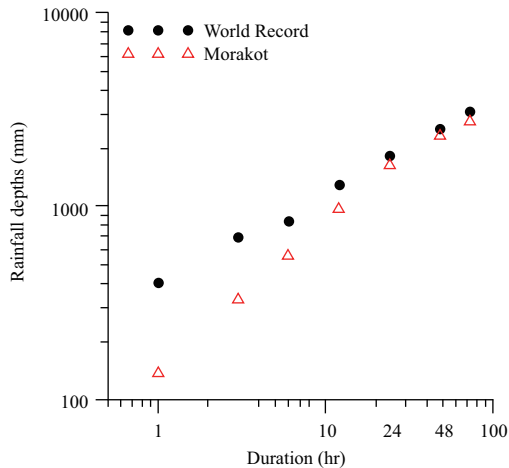


圖 1 延時降雨世界紀錄值與莫拉克(2009)颱風延時降雨之比較圖

面臨了相同的考驗。造成極端降雨的情況，在颱風期間內，除了颱風本身就有很強的降雨之外，再加上西南氣流的水汽補注，造成台灣於颱風季節期間內發生莫大的災害，尤其台灣南部之情況更顯得嚴重。

2009年8月份莫拉克颱風帶來的大量降雨集中在嘉義及高雄山區。依據水利署發佈(經濟部水利署, 2009)的資料顯示：共有15個雨量站的累積雨量超過2,000毫米，其中以阿里山站的累積雨量(8月5日至10日)達2,884毫米為最高；阿里山站的48小時最大雨量更高達2,361毫米，打破台灣的雨量紀錄，較長延時(如24至72小時)的降雨甚至與世界紀錄相差不大，如圖1。長延時且超量的極端降雨，是此次各地發生重大災害的主因。因此，此種異常極端降雨量之發生應如何解讀與因應，對洪災預防、救災、水利工程規劃設計、水庫安全評估等而言，極為重要。

依據世界氣象組織(World Meteorological Organization, WMO)之PMP推估手冊第二版(WMO, 1986)中，對PMP定義為：PMP是不考慮長期氣候趨勢的條件下，一年的某一特定時期、某一特定位置、給定暴雨面積，在氣象上可能發生的給定歷時的最大降水深度。對於PMP的推估方法，可能最大降雨估算法(WMO, 2009)

分成了六種方法(method)，分別為：(1)當地方法(The local method)、(2)移置方法(The transposition method)、(3)組合方法(The combination method)、(4)推理方法(The inferential method)、(5)概化方法(The generalized method)及(6)統計方法(The statistical method)。以下簡述台灣較常使用的方法：當地方法、移置方法、統計方法及由王時鼎(1977)等人發表的颱風模式法(Typhoon model method)。

當地方法，意旨根據設計集水區或特地地區之歷史暴雨觀測資料，進行PMP之推估。此方法有兩個限制，其一是當地要有氣象站，其二是觀測資料年限要夠長，至少能夠30年以上。而此方法的概念，最普遍使用的是水汽放大法(moisture maximization method)，在台灣地區翻譯成露點調整法。Chen and Bradley (2006)應用露點調整法在美國芝加哥區域，但先探討過往利用12小時持續露點查詢可降水量，會較實際可降水量高估，使PMP也會跟著高估，因此利用23年份的月最大可降水量及月最大12小時持續露點之資料，建立指數方程式，取代過往查表找尋可降水量的方法。研究結果之PMP較傳統方法平均高估6.9%，對此結論還需要更多的研究去輔佐。Kulkarni *et al.* (2010)利用露點調整法對印度克里斯納(Krishna)盆地流域進行PMP之推估研究，並且將研究區域分成9區，推估每1區的PMP，這樣利用露點調整加上分區的方法推估PMP，結論指出對於此研究區域之水資源項目的規劃、管理及設計有相當程度之幫助。

移置方法，意旨將鄰近區域異常地大暴雨轉移至設計區域或研究地點。這樣的移置過程中，第一步要確認暴雨移置的可能性，而暴雨移置的可能性可由三個方向判定，(1)透由確定氣象一致性區域、(2)研究此暴雨可能移置的範圍及(3)對於設計集水區條件進行仔細的分析。若經過上述三個方向，判定可使用移置方法，在移置暴雨的過程中，會根據不同的地貌及地形，對暴雨原始發生區域及設計區域進行不同的調整。移置方法被廣泛的應用，尤其是使用在高效率暴雨罕見的設計區域。運用此方法的概念，稱為暴雨移置法

(storm transposition method)，而針對暴雨移置法的計算過程中，有兩項因地形的調整，而須跟著調整的因子，分別為水汽調整因子(moisture adjustment factor)及地形調整因子(altitude adjustment factor)，將兩項因子相乘，即可求得水汽放大因子(moisture maximization factor)。Svensson and Rakhecha (1998)利用暴雨移置法，推估中國洪汝河集水區內 4 個壩址在 7 至 10 月份 1 日、2 日及 3 日的 PMP，結果顯示水汽調整因子及地形調整因子都有適當的量測，因此推估的 PMP 是值得信任的。Rakhecha *et al.*, (1999) 利用暴雨移置法推估印度區域的 PMP，由於印度超過 3000 座水壩，有些水壩區域無長時間觀測資料，不適用統計方法推估 PMP，而過往利用統計方法在上述印度區域推估之 PMP，會導致不適當的溢洪道容量，因此須利用暴雨移置法推估 PMP 會較為合理。劉正欽(2012)等人，針對曾文水庫 PMP 設計之水汽放大因子進行分析，建議選取 48 小時延時作為代表性延時及台南測站作為暴雨事件的參考測站，會使得 PMP 更加保守並符合工程安全係數的考量。

統計方法，常用的方法為 Hershfield 法，由美國的 Hershfield 學者在 1961 年發表(Hershfield, 1961)，也可稱為 WMO 統計法。統計方法推估 PMP，先選取氣象一致區內的測站資料，同時利用水文頻率分析法(hydrological frequency analysis method)與區域概化法(regional generalized method)推估 PMP，此方法適用於流域面積 1000 平方公里以下之區域。利用此方法推估 PMP 的研究，例如：Nobilis *et al.* (1991); Koutsoyiannis (1999); Desa *et al.* (2001); Desa and Rakhecha (2007); Rezacova *et al.* (2005); Casas *et al.* (2008)等研究。

颱風模式法主要將降雨分為環流雨及地形雨，先針對颱風模式法進行調整值的計算，此調整值為實際觀測總降雨與颱風模式法模擬降雨的比值。再利用歷史資料設計一最強颱風，進行 PMP 之推估。莊正育(2000)將颱風模式法需考慮之風速提出折減修正，因考慮颱風登陸台灣與遠離台灣時風速的變化。另外針對地形雨逐時的設計雨量，利用特定風向的風速推求調整係數。結

果顯示考慮風速折減與地形雨逐時設計雨量的調整係數，對於 PMP 的改變並無太大影響，但物理的基礎考量會更具合理性。

除了上述推估 PMP 方法外，還有將多重碎形(Douglas and Barros, 2003; Gheidari *et al.*, 2011)及數值模式(Abbs, 1999; Tan, 2010; Yigzaw *et al.*, 2013)概念應用於 PMP 的推估。

台灣的嚴重降水事件會受到侵台颱風與溫暖潮濕的西南氣流所影響。過去採用 PMP 之推估方法中，似乎把颱風降雨與西南氣流獨立考慮。而引發八八水災之莫拉克(2009)颱風，其極端降雨原因之一是由颱風與西南氣流共伴所產生(Chien and Kuo, 2011)，使得曾文水庫上游集水區之降雨量非常接近設計之 PMP。自莫拉克颱風產生颱風與西南氣流之共伴效應後，過去 PMP 分推估方法有重新檢討與發展之必要，此對未來台灣水庫之安全評估極為重要，亦為本研究之主要目標。

二、研究區域與資料

本研究之目的在於探討颱風與西南氣流結合時對於 PMP 的影響，而台灣受到西南氣流影響的區域為台灣中部至南部區域，又以南部區域更為首要影響區域，在台灣南部區域以曾文水庫為主要水資源之來源，因此本研究以曾文水庫集水區為主要研究區域，再搭配阿里山測站及大氣網格資料以達到本研究之目的。

2.1 研究區域

本研究主要針對曾文水庫上游集水區及阿里山測站進行研究。曾文水庫集水區位居台灣西南側山區，東經 120°30' 44"至 120°49' 27"，北緯 23°13' 01"至 23°30'之間，集水區面積 481.1 平方公里，地形呈東北向西南走向，地勢以東北向西南方向綿延，海拔最高處為 2,609 公尺之東水山，最低處在壩址河床地，標高約 100 公尺，集水區平均海拔高度約 963 公尺。曾文水庫及阿里山研究區域如圖 2。

台灣南部地區的降水主要集中在夏季。一般而言，5 月至 6 月為台灣地區的梅雨季節，西南

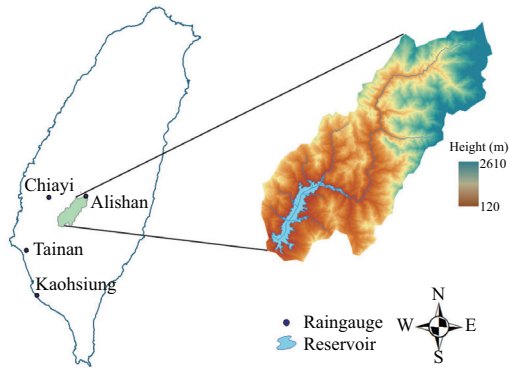
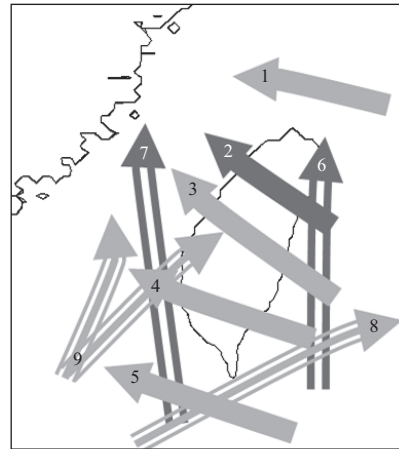


圖 2 研究區域鄰近測站與相對位置圖

氣流所帶來的豐沛水汽量可以造成台灣西南地區的迎風山區熱帶性雷雨發生。7 月至 9 月為颱風季節，颱風的對流雲帶夾帶著大量的飽和空氣造成大區域的豪雨，10 月有時會有秋颱的入侵造成豪雨。台灣每年平均會受到 3 至 4 個颱風影響，颱風的七級風暴風半徑平均約為二、三百公里，最大可達四、五百公里，因此颱風侵台時可造成全台強烈降水。颱風侵台路線不同所造成各地的災害也不同，以西行還有由南海或是巴士海峽北上的颱風影響南部地區較為嚴重。圖 3 為氣象局針對歷史上侵台的颱風所做出的路徑分類圖。其中，最常影響南部地區的侵台颱風路徑為第 2 類與第 3 類路徑，這兩類路徑的颱風影響台灣地區主要分為兩部分；第一部份為登陸的前期，颱風暴風圈直接影響北部與東部地區造成災害；第二部分則為颱風中心穿過或是繞過中央山脈時，暴風圈影響中部與南部地區，在颱風離開台灣之後有時會引進西南氣流，使得南部地區在脫離暴風圈之後持續有暴雨發生。

2.2 資料說明

本研究會使用的資料為 1979-2009 年 5-8 月之地面觀測資料與 NCEP CFSR 資料，地面觀測資料為阿里山測站日降雨資料，NCEP CFSR 資料為 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 之 Climate Forecast System Reanalysis (CFSR; Sara *et al.* 2010) 之高解析度日平均資料為大尺度環境分析資料，應用其 10-m 風速



Source: Chen *et al.*, 2013

圖 3 台灣颱風路徑分類圖

(0.32×0.32 網格點) 及可降水量 (0.5×0.5 網格點)，藉以分析台灣南部降雨所對應 AISF 之建置。更進一步應用上述資料之過程，會在研究方法中詳細說明。

而本研究目前只考慮風速及可降水量，主要原因有三項，(1) 依可能最大降雨推估手冊 (WMO, 2009) 所描述之方法，其重點的調整因子是放在可降水量 (比濕的累加)、風速及水汽通量 (比濕與風速的乘積)，而本研究有將水汽通量納入考慮 (可由本研究的回歸方程式看出)。(2) 與降雨相關的因子，比如濕及露點，皆已反應在可降水量內，因此若要取最代表性的因子估算降雨，可降水量與風速有其代表性。另外，因本研究是利用線性回歸的方法推估西南氣流對於 PMP 的影響，若是使用其它與水汽有關的因子，會造成回歸式變數的相依性，也是另一個必須避開的因素。(3) 而 Tan (2010) 利用數值模式 WRF 估算 PMP，針對大氣變數而言，也僅只考慮水汽與風速的調整，因此考慮風速與水汽就更加重要。

三、研究方法

為了考慮西南氣流的影響，因此選擇了與降雨相關的風速及可降水量兩個大氣變數，藉由兩個大氣變數做為 AISF 的基礎。以下為 AISF 估算流程。

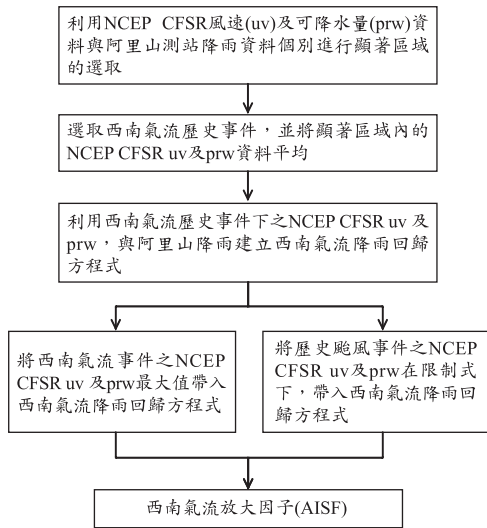


圖 4 推估西南氣流放大因子流程圖

AISF 的推估流程如圖 4，以下分為 5 個步驟，分別描述如下：

步驟 1：決定西南氣流顯著區域

選取 1979-2009 年 5 至 8 月阿里山測站之逐日降雨量及 NCEP CFSR 逐日風速及可降水量。推求阿里山站降雨與 NCEP CFSR 風速及可降水量個別之相關係數，選取相關係數較顯著的區域，設定為控制區(control region, CR)，往後西南氣流事件及颱風事件之 NCEP CFSR 風速及可降水量資料，為 CR 內的平均值。並將 NCEP CFSR 在 CR 內的平均值分別稱為 uv 及 prw。

步驟 2：選取西南氣流事件

選取 1979-2009 年 5 至 8 月期間之西南氣流降雨事件，5 至 8 月為西南氣流旺盛季節，影響台灣最為明顯。西南氣流事件的定義為 1 日降雨大於 130 公厘、2 日降雨大於 200 公厘及降雨期間內的風向為西南風。共選取 10 場西南氣流事件。

步驟 3：選取颱風與西南氣流明顯共伴事件

與西南氣流會有明顯共伴的條件：1 日降雨大於 130 公厘、2 日降雨大於 200 公厘，颱風襲

擊台灣時，台灣西南部的風向為西南風。颱風會引進西南氣流的路徑，是颱風中心在台灣北部時 (Cheung *et al.*, 2008)，另外過去台灣颱風事件中，引進旺盛西南氣流的還有敏督利(2004)颱風，因此由台灣颱風路徑分類圖(圖 3)，颱風較易引進西南氣流的路徑，分別為路徑 1、2、3 及 6。颱風事件是基於以上條件，並在 1979-2009 年 5 至 8 月期間選取，共選取 17 場颱風事件。

步驟 4：建立西南氣流降雨回歸方程式

利用西南氣流事件，透由交叉驗證的方法，各別建立阿里山氣象站降雨與 uv 及 prw 之間的西南氣流降雨回歸方程式，共建立 4 種方程式，分別為(1)至(4)式。

$$P = a * uv + C \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P = a * prw + C \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$P = a * uv + b * prw + C \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$P = a * (uv * prw) + C \quad \dots\dots\dots (4)$$

透由 F 檢定之後，再利用絕對誤差(Absolutely Error, AE)、絕對百分比誤差(Absolutely Percentage Error, APE)及均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)選擇最佳的回歸方程式。

$$AE = |P_{reg} - P_{obs}| \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$APE = \left| \frac{P_{reg} - P_{obs}}{P_{obs}} \right| \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{reg,i} - P_{obs,i})^2}{n}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

P_{reg} : 西南氣流降雨回歸值(mm)

P_{obs} : 降雨觀測值(mm)

$P_{reg,i}$: 第 i 場事件之西南氣流降雨回歸值(mm)

$P_{obs,i}$: 第 i 場事件之降雨觀測值(mm)

n : 事件總數

步驟 5：計算各場 AISF

$$AI_i = \frac{P_{HMS}}{P_{ST_i}} \dots\dots\dots(8)$$

AI_i ：第 i 場颱風事件之西南氣流放大因子。
 P_{HMS} ：歷史最大西南氣流回歸降雨量，將西南氣流事件中 prw 及 uv 最大值($uv_{sw,max}$ and $prw_{sw,max}$)，代入最佳的西南氣流降雨回歸方程式求得。

假設最佳西南氣流降雨回歸方程式為(2)式，則

$$P_{HMS} = a * prw_{sw,max} + C \dots\dots\dots(9)$$

P_{ST_i} ：第 i 場颱風與西南氣流完全結合造成的西南氣流回歸降雨量，將颱風事件之 uv 及 prw ，在限制式下，代入最佳的西南氣流降雨回歸方程式求得。限制式如下：

$$\begin{aligned} & uv \geq uv_{sw,max} & uv = uv_{sw,max} \\ \text{if } & prw \geq prw_{sw,max} & prw = prw_{sw,max} \\ & uv < uv_{sw,max} & uv = uv \\ & prw < prw_{sw,max} & prw = prw \end{aligned} \dots\dots(10)$$

由上述的限制式，假設最佳西南氣流降雨回歸方程式為(2)式，則

$$P_{ST_i} = a * prw + C \dots\dots\dots(11)$$

透由上述步驟即可求得各場颱風的 AISF。

四、結果與討論

本研究對於傳統 PMP 計算方法最大的不同，在於考慮西南氣流對於 PMP 的影響，即颱風與西南氣流的共伴效應。因此，本研究提出西南氣流放大因子，代表西南氣流對於 PMP 的影響。本章節主要分為三部分描述，第一部分(4.1節)是在西南氣流盛行季節下，選取區域氣候場變量(風速、可降水量)與阿里山測站降雨量顯著相關之區域(控制區域，CR)。第二部分(4.2節)針對西南氣流事件下，建立阿里山測站降雨與區域氣候場變量(風速、可降水量)間之降雨回歸方程式結果與討論；第三部分(4.3節)則利用 4.2 節的降雨回歸方程式，針對長延時且路徑與西南氣流較容易產生共伴之颱風事件，進行 AISF 推估。

4.1 區域氣候場選擇控制區域結果

利用區域氣候場的變量(風速、可降水量)，個別與阿里山測站降雨量進行相關係數之分析，結果如圖 5 及圖 6。

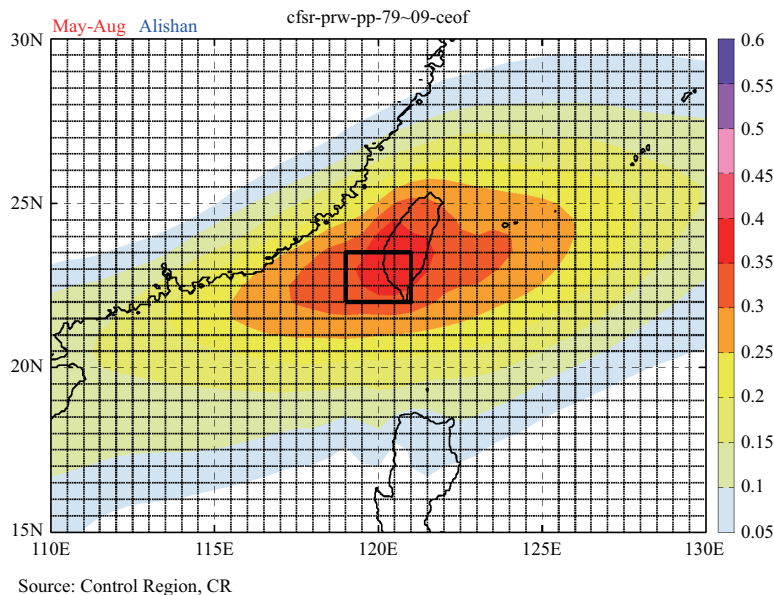


圖 5 黑色實線框為 1979-2009 年 5 至 8 月 NCEP CFSR 可降水量與阿里山氣象站降雨資料之顯著區域

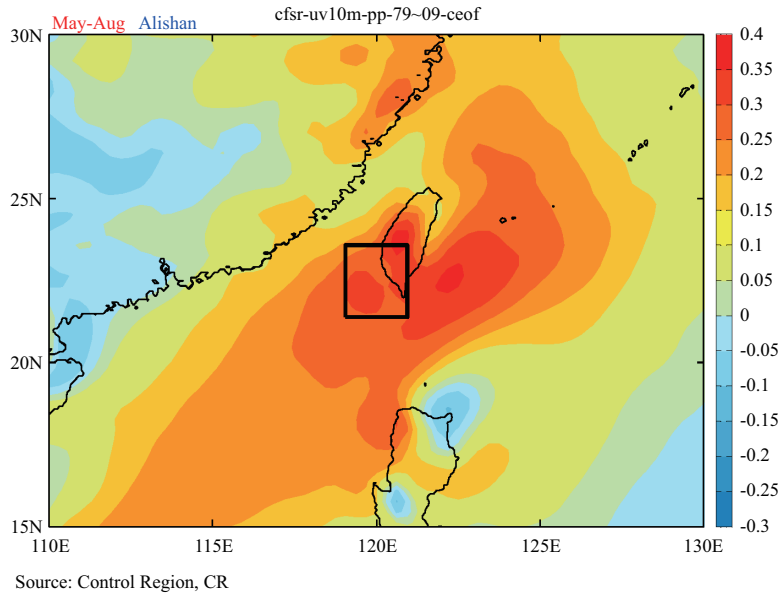


圖 6 黑色實線框為 1979-2009 年 5 至 8 月 NCEP CFSR 風速與阿里山氣象站降雨資料之顯著區域

表 1 西南氣流事件資訊(總降雨及平均降雨為阿里山測站之觀測值)

年分	降雨日期	降雨天數	總降雨(mm)	平均降雨(mm)	uv	prw
1984	5/28-5/29	2	328.7	164.35	5.84	59.07
1985	5/28-5/29	2	361	180.5	8.26	62.06
1988	5/22-5/23	2	376.6	188.3	5.99	59.94
1983	6/2-6/3	2	479.7	239.85	8.97	57.05
1991	6/23-6/24	2	683.5	341.75	9.39	63.01
1998	6/7-6/8	2	414.5	207.25	7.51	60.14
2003	6/7-6/8	2	337.5	168.75	7.07	63.22
1981	7/23-7/24	2	522.2	261.1	9.4	62.26
1989	7/26-7/27	2	543.3	271.65	8.46	62.15
1988	8/13-8/14	2	663.4	331.7	8.61	64.74

圖 5 說明在西南氣流盛行季節下，台灣西南側海域，風速與阿里山測站降雨都有顯著關係，符合西南氣流的流動方向。因此，在阿里山西側並且相關係數高於 0.4 之區域，選為顯著區域。圖 6 說明在西南氣流盛行季節下，台灣西南側海域，可降水量與阿里山測站降雨都有顯著關係，符合西南氣流的流動方向。因此，在阿里山西側並且相關係數高於 0.4 之區域，選為顯著區域。會選擇大於 0.4 主要是利用統計觀念上，當資料量達到一定程度後，0.4 的相關係數是足以代表

兩變數資料間有顯著關係。另外，過去有關颱風引進西南氣流的文獻中，也以選擇台灣西南方海域為主(徐文達，2005；林欽國，2011)，而本研究選取範圍為東經 119-121 度、北緯 22-23.5 度，與前述文獻之選擇範圍為東經 117.5-120 度、北緯 21.5-23.5 度，範圍大小相差不大，因此選此範圍大小是有其合理性。

決定控制區域後，選取 1979-2009 年西南氣流降雨事件，做為建立西南氣流回歸方程式使用。西南氣流事件相關資訊如表 1。

表 2 西南氣流降雨回歸方程式 F 檢定結果

	$F_{0.05,1,8} = 5.32$		$F_{0.05,2,7} = 4.74$	
	$P = a * uv + C$	$P = a * prw + C$	$P = a * uv + b * prw + C$	$P = a * (uv * prw) + C$
C1	11.16	0.60	4.88	11.72
C2	8.79	1.92	4.81	11.51
C3	9.90	1.93	5.53	13.51
C4	8.23	5.04	6.35	12.21
C5	8.86	1.88	4.83	11.55
C6	6.75	1.47	4.90	8.73
C7	10.55	5.31	5.01	12.06
C8	9.08	1.72	5.22	12.62
C9	13.95	2.80	9.01	20.95
C10	6.80	1.28	4.85	9.55

表 3 西南氣流降雨回歸方程式之絕對誤差(AE)及絕對百分比誤差(APE)

	$P = a * uv + C$		$P = a * uv + b * prw + C$		$P = a * (uv * prw) + C$	
	AE	APE	AE	APE	AE	APE
V1	8.55	5.2	17.8	10.8	15.21	9.26
V2	66.54	36.86	65.9	36.5	69.08	38.27
V3	26.84	14.25	30.2	16	30.58	16.24
V4	33.95	14.16	2.2	1	9.31	3.88
V5	52.11	15.25	45.4	13.3	44.87	13.13
V6	11.51	5.55	3.9	1.8	5.82	2.81
V7	33.42	19.81	50.4	29	41.5	24.59
V8	28.91	11.07	16.1	6.1	31.86	12.2
V9	17.07	6.29	13.3	4.9	14.35	5.28
V10	71.47	21.55	48.9	14.7	55.39	16.7

4.2 建立西南氣流回歸方程式

在研究方法的步驟 4 有提到利用交叉驗證的方式建立西南氣流降雨回歸方程式。交叉驗證為資料量較少時，應用建立回歸方程式的一種方法，常使用的類別為 K 次交叉驗證(K-fold cross validation)及留一驗證(Leave-one-out cross validation, LOOCV)，而本研究方程式的建立是使用 LOOCV 方法。

LOOCV 建立西南氣流降雨回歸方程式，須先建立各事件之西南氣流降雨回歸方程式，並進行 F 檢定。C1 表示將第 1 場事件挑出，由第 2 場至第 10 場西南氣流事件資料進行西南氣流降雨回歸方程式之建立，其餘 C2 至 C10 以此類推。將 C1 至 C10 先進行 F 檢定，整理如表 2，可看

出以下結果，

1. 西南氣流降雨回歸方程式 $P = a * prw + C$ ，10 場西南氣流事件都不通過 F 檢定，因此不納入此方程式考慮。
2. 西南氣流降雨回歸方程式 $P = a * uv + C$ 、 $P = a * uv + b * prw + C$ 及 $P = a * (uv * prw) + C$ ，10 場西南氣流事件全數通過 F 檢定。將各類別西南氣流降雨回歸方程式 C1 至 C10 各項係數平均，得到進行驗證之西南氣流降雨回歸方程式。

比較上述需進行驗證之西南氣流降雨回歸方程式，計算 AE、APE 及 RMSE，整理如表 3 及表 4，V1 代表第一場事件之驗證結果，V2 至 V10 以此類推，可看出以下結果，

表 4 西南氣流降雨回歸方程式之均方根誤差 (RMSE)

西南氣流降雨回歸方程式	驗證之 RMSE (mm)
$P = a * uv + c$	40.71
$P = a * uv + b * prw + c$	36.1
$P = a * (uv * prw) + c$	37.53

1. 透由 AE 之比較，西南氣流降雨回歸方程式 $P = a * uv + b * prw + C$ 有 6 場事件最低。又以 V4 及 V8 表現得比其餘西南氣流降雨回歸方程式佳。
2. 由 APE 之比較，V2 及 V7 稍大，但可以接受。而 APE 低於 10% 的事件， $P = a * uv + b * prw + C$ 及 $P = a * (uv * prw) + C$ 各有 4 場， $P = a * uv + C$ 有 3 場。
3. 再透由 RMSE 之比較，西南氣流降雨回歸方程式 $P = a * uv + b * prw + C$ 為最低。

由上述結果，最後選擇 $P = a * uv + b * prw + C$ 為最佳西南氣流降雨回歸方程式。

4.3 西南氣流放大因子(AISF)

AISF, 主要的目的是呈現西南氣流在該場颶

風事件影響降雨的最大比值。颶風事件為颶風路徑 1、2、3 及 6 路徑，上述路徑較常與西南氣流有明顯共伴效應(見第三章的步驟 3)，總共選取 17 場，如表 5。

從 4.2 節得知最佳西南氣流降雨回歸方程式為 $P = a * uv + b * prw + C$ ，因此按照第三章研究方法的步驟 5，推求表內颶風事件之 AISF。先找出 uv_{max} 及 prw_{max} 並計算 P_{HMS} ，再計算 AISF 如表 6。

由各場颶風事件之 AISF，大於 1 代表颶風引進的西南氣流降雨，較西南氣流降雨回歸最大值低，代表這一場颶風低估了西南氣流的降雨量，因此對於 PMP 的計算就要乘以此 AISF，將低估的量補足。至於限制西南氣流放大因子為 1，原因在於颶風引進西南氣流降雨，已達西南氣流降雨回歸最大值。

將各路徑颶風的 AISF 平均，颶風路徑 1 的事件過於少數，因此與颶風路徑 2 的事件一同平均。路徑 1 及 2 之平均 AISF 為 1.18，路徑 3 之平均 AISF 為 1.07，路徑 6 之平均 AISF 為 1.17。因此，西南氣流影響下，對於颶風增加的雨量在 7%至 20%間，增加的量是值得我們防範的。

表 5 設計西南氣流放大因子所需颶風事件資訊

路徑	颶風	年分	降雨日期	總降雨(mm)	平均降雨(mm)
1	尼爾森	1985	8/23-8/24	751.3	375.65
1	馬莎	2005	8/4-8/6	666	222
2	碧利斯	2006	7/13-7/15	789	263
2	卡玫基	2008	7/17-7/19	701	233.67
2	諾瑞斯	1980	8/27-8/28	595.7	297.85
2	楊希	1990	8/19-8/21	1,187	395.67
3	海棠	2005	7/18-7/20	1,226	408.67
3	鳳凰	2008	7/28-7/29	640	320
3	寶莉	1992	8/30-8/31	729.3	364.65
3	奧托	1998	8/4-8/5	414.5	207.25
3	聖帕	2007	8/18-8/20	793	264.33
6	裘恩	1981	6/20-6/21	306.3	153.15
6	歐菲莉	1990	6/23-6/24	474.5	237.25
6	亞力士	1987	7/27-7/28	697.8	348.9
6	敏督利	2004	7/3-7/5	1,725	575
6	道格	1994	8/8-8/10	1,048.5	349.5
6	萊迪	1979	8/24-8/26	741.8	247.27

表 6 西南氣流放大因子計算結果

路徑	颱風名稱	降雨天數	平均降雨(mm)	uv	prw	P _{ST} (mm)	AISF	平均
1	尼爾森	2	375.7	10.46	62.04	289.5	1.07	1.18
1	馬莎	3	222.0	9.14	56.1	235.5	1.32	
2	碧利斯	3	263.0	13.21	67.36	310.2	1.00	
2	卡玫基	3	233.7	8.07	62.28	246.7	1.26	
2	諾瑞斯	2	297.9	8.23	58.65	224.3	1.38	
2	楊希	3	395.7	12.38	69.9	310.2	1.00	
3	海棠	3	408.7	14.38	65.95	310.2	1.00	1.07
3	鳳凰	2	320.0	14.08	66.33	310.2	1.00	
3	寶莉	2	364.7	11.4	69.33	310.2	1.00	
3	奧托	2	207.3	8.2	59.38	228.8	1.36	
3	聖帕	3	264.3	11.43	65.2	310.2	1.00	
6	裘恩	2	153.2	8.12	60.56	235.2	1.32	1.17
6	歐菲莉	2	237.3	9.12	62.22	281.7	1.10	
6	亞力士	2	348.9	8.26	61.45	246.7	1.26	
6	敏督利	3	575.0	12.16	66.47	310.2	1.00	
6	道格	3	349.5	10.42	61.74	287.2	1.08	
6	萊迪	3	247.3	8.4	60.23	242.1	1.28	

P_{HMS} = 310.2 (mm)

以路徑特性觀察，颱風走路徑 3 路線，暴雨中心往往會通過曾文水庫，因此在本研究對風速及可降水量的限制下，路徑 3 平均 AISF 為最小，符合颱風為路徑 3 時資料的特性。

又颱風常與西南氣流產生輻合現象，針對颱風路徑 1 與 2 的時候，颱風中心位於台灣北部，颱風的西南側剛好會與西南氣流產生輻合現象，而產生輻合的區域會在台灣中部或西南部，因此颱風路徑為 1 與 2 時，台灣中部或西南部之颱風降雨會藉由與西南氣流輻合現象而加大。針對颱風路徑 6，颱風中心也會位於台灣北部，與颱風路徑 1 與 2 的現象一樣。至於颱風路徑 3 時，颱風也會與西南氣流產生輻合現象，但輻合區域會在台灣南方的巴士海峽，因此當颱風移動路徑為颱風路徑 3 時，西南氣流對於颱風降雨在台灣西南部的影響會較小。由以上颱風與西南氣流輻合現象與區域的概念，本研究之 AISF 呈現以上狀況，颱風路徑 3 受到西南氣流放大降雨的比值最低，因為輻合區位於巴士海峽，而颱風路徑 1、2 及 6 之放大比值相近，也較颱風路徑 3

大，也符合颱風與西南氣流輻合區的現象。故本研究之 AISF 有其合理性。因此，往後在計算曾文水庫之 PMP 時，都應考慮西南氣流的影響，將 AISF 放入計算式中。

五、AISF 應用於 PMP 之推估

由上述探討的結果，將暴雨移置法與 AISF 結合，利用劉(2012)等人對於暴雨移置法內重要因子的建議結果，代表性延時選為 48 小時，暴雨中心參考氣象站選為台南氣象站；將暴雨移置法推估的 PMP 乘以 AISF，即為考慮西南氣流影響下 PMP 的推估方法。考慮西南氣流影響下之 PMP 推估方法，會得到一放大率，此一放大率為水汽放大因子與 AISF 之乘積，此放大率可視為工程安全係數的觀念，以評估其合理性及是否過於保守。結構工程一般安全係數範圍 1.4-1.7，大地工程一般安全係數範圍 1.5-2(AI-Mamun and Hashim, 2004)，因此不會過於保守。放大率如表 7 所示(放大率只列兩場颱風的原因在於 1979 年後，台灣最強降水且符合與西南氣流作用的颱風

表 7 暴雨移置法的水汽放大因子與 AISF 結合後之放大率

颱風	水汽放大因子	西南氣流放大因子	放大率
賀伯	1.28	1.18	1.5
莫拉克	1.52	1.18	1.8

表 8 曾文水庫第四次評估報告建議設計 PMP 與本研究建議設計 PMP 之比較

PMP 推估方法	12 小時	24 小時	48 小時
颱風模式法(曾文水庫第四次安全評估報告, 未考慮西南氣流)	1,143	2,078	3,205
暴雨移置法(考慮西南氣流影響)	1,377	2,284	3,344

為賀伯及莫拉克)。

而對於曾文水庫設計 PMP 的評估，曾文水庫第四次評估報告(2011)，建議以颱風模式法推估之 PMP 作為曾文水庫之設計 PMP，但並無考慮西南氣流的影響。透由本研究考慮西南氣流影響下之 PMP 估算方法，與前者建議曾文水庫設計 PMP 之比較結果如表 8 所示。延時 12、24 及 48 小時之 PMP 分別增加 20%、9%及 4%。因此針對曾文水庫之設計 PMP，考慮西南氣流的影響，是有其必要性。

六、結論與未來工作

本研究目的在於推估 PMP 時，考慮西南氣流對其之影響，進而透由 AISF 來表現西南氣流對於 PMP 之影響。本研究先以曾文水庫集水區為研究區域，主要原因在於曾文水庫是全台最大的水庫，並位於受西南氣流影響之區域，再加上莫拉克颱風對曾文水庫造成重大災害。

本研究利用 AISF 來做為西南氣流影響的評估指標，此放大因子是由線性假設的方式推估。對於西南氣流的影響，要先決定有哪些大氣變量較為重要，透由可能最大降水推估手冊(WMO, 2009)內的方法，除了有暴雨移置法的水汽因子放大外，還有風速因子的放大(Fernando and Wickramasuriya, 2011)。因此，利用 NCEP CFSR 的風速及可降水量與阿里山測站之降雨資料進行相關性的探討。可以明確發現當阿里山測站降雨強度增加時，NCEP CFSR 的風速及可降水量在台灣海域西南側的特定範圍會有較強的顯著

相關性，與自然現象相符，並定義此範圍為 CR。將 CR 內的 NCEP CFSR 資料與阿里山氣象站降雨，進行西南氣流降雨回歸方程式之選取，選取最佳西南氣流降雨回歸方程式後，計算出西南氣流降雨最大回歸值，再搭配颱風事件的資料，就可求得 AISF。結果顯示在西南氣流的影響下，對於颱風降雨都有放大之作用(3 類路徑之平均 AISF 皆大於 1；1.18，1.07 及 1.17)，並放大率符合颱風與西南氣流輻合之相對區域。因此 AISF 有其合理性。

將 AISF 應用於劉(2012)等人之研究結果，與曾文水庫建議之設計 PMP 比較，延時 12、24 及 48 小時之 PMP 分別增加 20%、9%及 4%。考慮西南氣流的影響於 PMP 的推估，對於曾文水庫會有較佳之維護性。因此針對曾文水庫之設計 PMP，需考慮西南氣流的影響，是有其必要性。

而利用統計關係去評估大氣的物理過程，會遇到大氣物理特性一改變，導致統計關係可能無法掌握物理特性的問題。因此須利用每年的統計資料不斷進行測試。另外可將大氣物理特性改變的議題，歸納至氣候變遷，因此可考慮利用風速與可降水未來的資料，評估是否有符合過往的統計特性，但在本研究中先不討論此議題，此屬未來工作項目。

最後，本研究在限制條件下推估出之 AISF，要完全表現西南氣流對於 PMP 之影響，尚未周全，但可以確認考慮兩天氣系統之結合對於 PMP 的影響，在未來要持續探討及研究。未來建議可

用大氣數值模擬的方式推估不同天氣系統間對於 PMP 之影響，藉以更周全的符合天氣系統間的物理現象，讓 PMP 之推估結果更具合理性。

致 謝

本研究感謝國科會「極端氣候之複合性災害防治之研究專案計畫(NSC 100-2218-M-006-240)」之經費支持得以完成。

參考文獻

1. 王時鼎、劉廣英、曲克恭、林則銘、黃中威、謝維權，翡翠谷壩址最大可能暴雨研究。空軍氣象中心研究報告 13 號。1977。
2. 林欽國，利用高解析度模式探討地形高度與西南氣流水氣傳送對莫拉克(2009)颱風模擬之影響。大氣物理研究所，國立中央大學，桃園縣，2011。
3. 徐文達，伴隨敏督利颱風的強烈西南氣流引發豪大雨之個案探討。大氣物理研究所，國立中央大學，桃園縣，2005。
4. 莊正育，以颱風模式法推求水庫之 PMP。土木工程學系研究所，國立台灣大學，台北市，2000。
5. 經濟部水利署，曾文水庫第四次安全評估報告，2011。
6. 經濟部水利署，莫拉克颱風暴雨量及洪量分析報告，2009。
7. 劉正欽、楊道昌、林宥丞、游保杉，在長延時颱風下探討暴雨移置法之重要關鍵因子。台灣水利季刊，第 60 卷，第一期，1-13 頁，2012。
8. Abbs, D. J., A numerical modeling study to investigate the assumptions used in the calculation of probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, 35(3), 785-796. doi: Doi 10.1029/1998wr900013, 1999.
9. Al-Mamun, A., & Hashim, A., Generalised Long Duration Probable Maximum Precipitation (PMP) Isohyetal Map for Peninsular Malaysia. *Journal of Spatial Hydrology*, 4(1), 2004.
10. Casas, M. C., Rodriguez, R., Nieto, R., and Redano, A., The Estimation of Probable Maximum Precipitation The Case of Catalonia. *Trends and Directions in Climate Research*, 1146, 291-302. doi: DOI 10.1196/ annals.1446.003, 2008.
11. Chen, J.M., Chen, H.S, and Liu, J.S., Coherent Interdecadal Variability of Tropical Cyclone Rainfall and Seasonal Rainfall in Taiwan during October. *Journal of Climate*, 26,308-321, 2013.
12. Chen, L. C., and Bradley, A. A., Adequacy of using surface humidity to estimate atmospheric moisture availability for probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, 42(9). doi: Artn W09410, 2006.
13. Cheung, K.W., Huang, L.R., and Lee, C.S., Characteristics of Rainfall during Tropical Cyclone Periods in Taiwan. *Natural Hazards*, 8, 1463-1474, 2008.
14. Chien, F.C., and Kuo, H.C., On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009), *Journal of Geophysical Research*, V.116, D05104, doi: 10.1029/2010- JD015092, 2011.
15. Desa, M. N., Noriah, A. B., and Rakhecha, P. R., Probable maximum precipitation for 24 h duration over southeast Asian monsoon region - Selangor, Malaysia. *Atmospheric Research*, 58(1), 41-54. doi: Doi 10.1016/S0169-8095(01) 00070-9, 2001.
16. Desa M, M. N., and Rakhecha, P. R., Probable maximum precipitation for 24-h duration over an equatorial region: Part 2-Johor, Malaysia. *Atmospheric research*, 84(1), 84-90, 2007.
17. Douglas, E. M., and Barros, A. P., Probable Maximum Precipitation Estimation Using Multifractals: Application in the Eastern United States. *Journal of Hydrometeorology*, 4(6), 2003.
18. Fernando, W. C. D. K., and Wickramasuriya, S. S., The hydro- meteorological estimation of probable maximum precipitation under varying

- scenarios in Sri Lanka. *International Journal of Climatology*, 31(5): p. 668-676, 2011.
19. Gheidari, M. H. N., Telvari, A., Babazadeh, H., and Manshour, M., Estimating design probable maximum precipitation using multifractal methods and comparison with statistical and synoptically methods case study: Basin of Bakhtiari Dam. *Water Resources*, 38(4), 484-493, 2011.
 20. Hershfield, D. M., Estimating the probable maximum precipitation. *Proceedings American Society of Civil Engineers, Journal of Hydraulic Division*, 87(HY5), 99-106, 1961.
 21. Koutsoyiannis, D., A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, 35(4), 1313-1322. doi: Doi 10.1029/1999wr900002, 1999.
 22. Kulkarni, B. D., Nandargi, S., and Mulye, S. S., Zonal estimation of probable maximum precipitation rain depths over the Krishna basin in peninsular India. *Hydrological Sciences Journal- Journal Des Sciences Hydrologiques*, 55(1): p. 93-103, 2010.
 23. Nobilis, F., Haiden, T., and Kerschbaum, M., Statistical Considerations Concerning Probable Maximum Precipitation (PMP) in the Alpine Country of Austria. *Theoretical and Applied Climatology*, 44(2), 89-94. doi: Doi 10.1007/Bf00867996, 1991.
 24. Rakhecha, P. R., and Clark, C., Revised estimates of one-day probable maximum precipitation (PMP) for India. *Meteorological Applications*, 6(4), 343-350. doi: Doi 10.1017/S1350482799001280, 1999.
 25. Rezacova, D., Pesice, P., and Sokol, Z., An estimation of the probable maximum precipitation for river basins in the Czech Republic. *Atmospheric Research*, 77(1-4), 407-421. doi: DOI 10.1016/j.atmosres.2004.10.011, 2005.
 26. Sara, S., and Coauthors. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 1015-1057, 2010.
 27. Svensson, S., and Rakhecha, P. R., Estimation of Probable Maximum Precipitation for Dams in the Hongru River Catchment, China, *Theoretical and Applied Climatology*, 59, 79-91, 1998.
 28. Tan, E., Development of a methodology for probable maximum precipitation estimation over the American River watershed using the WRF model, 2010.
 29. World Meteorological Organization: Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation, 2nd edition, Operational Hydrology Report No. 1, WMO- No. 332, Geneva, ISBN 92-63-11332-2, 1986.
 30. World Meteorological Organization: Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation, 3rd edition, Operational Hydrology Report No. 1, WMO- No. 1045, Geneva, ISBN 978-92-63-11045-9, 2009.
 31. Yigzaw, W., Hossain, F., and Kalyanapu, A., Impact of Artificial Reservoir Size and Land Use/Land Cover Patterns on Probable Maximum Precipitation and Flood: Case of Folsom Dam on the American River. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(9), 1180-1190, 2012.

收稿日期：民國 102 年 11 月 5 日

修正日期：民國 103 年 2 月 27 日

接受日期：民國 103 年 5 月 11 日