

本文章已註冊DOI數位物件識別碼

▶ 太麻里溪集水區極端水文事件的頻率分析

The Frequency Analysis of Extreme Hydrological Events in the Taimali Stream Watershed

doi:10.6562/JEE.2012.28.6

工程環境會刊, (28), 2012

作者/Author：廖俊瑋(Jun-Wei Liao);葉春國(Chun-Kuo Yeh);詹仕堅(Shih-Chien Chan);劉一新(I-Hsin Liu);廖學誠(Shyue-Cherng Liaw)

頁數/Page：89-103

出版日期/Publication Date：2012/01

引用本篇文獻時，請提供DOI資訊，並透過DOI永久網址取得最正確的書目資訊。

To cite this Article, please include the DOI name in your reference data.

請使用本篇文獻DOI永久網址進行連結:

To link to this Article:

<http://dx.doi.org/10.6562/JEE.2012.28.6>



DOI Enhanced

DOI是數位物件識別碼（Digital Object Identifier, DOI）的簡稱，是這篇文章在網路上的唯一識別碼，用於永久連結及引用該篇文章。

若想得知更多DOI使用資訊，

請參考 <http://doi.airiti.com>

For more information,

Please see: <http://doi.airiti.com>

請往下捲動至下一頁，開始閱讀本篇文獻

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE



太麻里溪集水區極端水文事件的頻率分析

THE FREQUENCY ANALYSIS OF EXTREME HYDROLOGICAL EVENTS IN THE TAIMALI STREAM WATERSHED

廖俊瑋^[1]、葉春國^[2]、詹仕堅^[3]、劉一新^[4]、廖學誠^[5]
JUN-WEI LIAO^[1], CHUN-KUO YEH^[2], SHIH-CHIEN CHAN^[3],
I-HSIN LIU^[4], SHYUE-CHERNG LIAW^[5]

摘 要

頻率分析常被應用於防災規劃、水工設計及災害風險評估中，透過適當的機率分佈可推估最大降雨量或洪峰流量，有助於人們瞭解集水區內的水文特性，提升集水區經營管理之效率。本研究以台東的太麻里溪集水區作為案例，從1982年至2009年間，針對極端水文事件包括年最大日流量以及年一日最大雨量進行頻率分析，比較極端值第一型分佈、對數常態分佈、皮爾森第三型分佈及對數皮爾森第三型分佈之適切性，並據此探討近期氣候變遷之趨勢。結果顯示，研究區內年最大日流量頻率分析以極端值第一型分佈最為適切，後期(1996-2009年)的年最大日流量推估值均比前期(1982-1995年)高出許多，變動率介於37.93%至57.88%間，後期的年最大日流量平均值也比前期高出40.63%，標準差更高出67.94%。另外，年一日最大雨量頻率分析則是以極端值第一型分佈及對數常態分佈為佳，後期的年一日最大雨量推估值均比前期高，變動率介於10.27%至59.25%間，後期的年一日最大雨量平均值比前期高出16.09%，標準差則高出109.30%。整體而言，太麻里溪集水區的年最大日流量及年一日最大雨量均逐漸增高，變動率大，頻度亦增強，顯示出未來的極端水文事件將具有上升之趨勢。

關鍵詞：太麻里溪、頻率分析、極端水文事件、年最大日流量、年一日最大雨量

ABSTRACT

The frequency analysis is often applied in disaster prevention planning, hydraulic works design, and hazard risk analysis. It is possible to estimate the maximum volumes of intensive rainfall and peak discharge based on a suitable probability distribution. The frequency analysis is also helpful for people to understand the hydrological characteristics in a watershed, and to enhance the efficiency of watershed management. The

-
- [1] 國立臺灣師範大學地理學系碩士生
[2] 國立臺灣師範大學地理學系博士生
[3] 國立彰化師範大學地理學系助理教授
[4] 行政院農委會林業試驗所集水區經營組副研究員
[5] 國立臺灣師範大學地理學系教授(*通訊作者)

Taimali stream watershed is selected as a study area in this research. The extreme hydrological events are analyzed including the annual maximum daily discharge and annual one-day maximum rainfall during the period from 1982 to 2009. There are four probability distributions are compared including extreme-value type I distribution, logarithmic normal distribution, Pearson type III distribution, and logarithmic Pearson type III distribution. Moreover, the current trend of climate change is also discussed based on the frequency analysis. Results show that the extreme-value type I distribution is more suitable for the frequency analysis of annual maximum daily discharge. The estimated annual maximum daily discharges in late stage (1996-2009) are higher than that in early stage (1982-1995). Their variation is from 37.93% to 57.88%. The average of annual maximum daily discharges in late stage is bigger surpassing up to 40.63%, and the standard deviation is also exceeding up to 67.94%. In addition, the extreme-value type I distribution and logarithmic normal distribution are more suitable for the frequency analysis of annual one-day maximum rainfall. The estimated one-day maximum rainfalls in late stage are higher than that in early stage. Their variation is from 10.27% to 59.25%. The average of annual one-day maximum rainfall in late stage is bigger surpassing up to 16.09%, and the standard deviation is also exceeding up to 109.30%. In conclusion, there is an increasing trend for the annual maximum daily discharge and annual one-day maximum rainfall in the Taimali stream watershed. The variation is enhancing and the frequency is strengthening. It reveals that the occurrence probability of extreme hydrological events is rising in the further future.

Key words: Taimali Stream, Frequency Analysis, Extreme Hydrological Event, Annual Maximum Daily Discharge, Annual One-day Maximum Rainfall

一、前言

台灣降雨在時空分佈上甚為不均，78%的降雨集中在每年5到10月間，其中又以颱風豪雨居多，常易釀成災害，尤其是南部，豐枯水期的比率更高達9比1(沈少文，2011)。極端的水文事件如高強度降雨及巨大的洪峰流量已陸續造成台灣的重大衝擊及財產損失，例如1996年的賀伯颱風、2001年的納莉颱風、2009年的莫拉克颱風、以及2010年的凡那比颱風等，都為台灣帶來嚴重災情。郭純伶等(2010)曾指出，由於氣候變遷所引起的高強度降雨，不論於時間或空間分佈上都愈趨複雜，且不確定性增加，尤其是颱風所造成的「洪水複合型災害」之嚴重性日益增高。蕭政宗及黃亮芸(2007)亦指出，台灣地區由於受到氣候及地形之影響，高強度的暴雨在短時間內所帶來的降雨量往往十分驚人，若排水設施設計容量不足，極易因排水不及而淹水，造成生命及財產的嚴重損失。

近年來，台灣的極端降雨強度逐漸具有增強的趨勢，吳宜昭等人(2010)探討台灣的長期氣候變遷，發現全台平均季節的降雨強度有增高趨勢，且台灣北部較南部有明顯的季節增加特徵，不過年降雨強度的增加率則不明顯。羅俊雄等人(2002)亦指出，在颱風降雨型態與降雨總量不變之下，過去降雨延時較長的特性已轉變為降雨延時較短之型態，換言之，有降雨延時縮短、而降雨強度增加之趨勢。由於極端降雨強度也會連帶影響到洪峰流量，因此，許多學者亦指出台灣河川的豐枯水期之降雨量與逕流量已產生明顯變遷。童慶斌及楊奕岑(2004)透過GWLF(Generalized Watershed Loading Function)模式，評估全台各地河川流量受到氣候變遷之影響，發現溪流在豐水期時流量將會增加，但在枯水期時流量則會明顯地減少。同樣地，林俊成及李國忠(2000)亦應用GWLF模式，針對台灣中部畢祿溪集水區進行流量模擬，結果顯示當空氣中二氧化碳倍增時，河川流量將增加4%至25%，且豐水期的流量增加，而枯水期流量則減少。吳政霖(2009)針對大甲溪上游雨量與流量過去三十年變動情勢進行分析，發現松茂集水區在豐枯水期時雨量的增減具有季節上的差異，豐水期時雨量、流量與年變動情勢皆為顯著增加，但是在枯水期時變動趨勢則恰好相反，豐水期時流量增加將導致洪水災害的發生，枯水期時流量減少則會造成乾旱現象。另外，蘇俊明(2010)分析石門水庫降雨變遷對水資源調度之影響時指出，近10年(2000-2009年)年降雨量豐枯懸殊現象有愈來愈加劇之趨勢，枯水

期降雨逐漸減少，總降雨天數也遞減，但豐水期降雨逐漸增加，尤其是颱風季(7月至9月)的降雨量增加幅度增高33%，年水庫入流量之變化則與年降雨量變化趨勢相仿。很明顯地，在全球氣候變遷下，河川流量存在著趨於極端且季節不均的現象，乾旱與洪水頻率加大，全球勢必將面臨嚴苛的水資源問題(沈少文，2010)。

台灣東部地區河川源短流急，地質構造發達，且降雨季節分佈不均，每年均受來自太平洋之颱風侵襲，洪水及土石災害頻仍，例如2005年7月18日，海棠颱風豪雨造成太麻里溪上游土石崩塌，洪水夾帶土石造成沿岸居民房舍倒塌、土地流失及防洪設施破壞，威脅民眾財產安全，災情相當慘重。2009年8月8日，莫拉克颱風侵襲台灣，造成台東太麻里溪多處坍方，沿岸潰堤，許多水利設施遭受冲刷流失，導致農田及房舍嚴重受災，影響農戶約500戶，冲刷流失農地約300 ha以上。2010年9月19日，凡那比颱風再次侵襲台東，高強度降雨致使太麻里溪水暴漲，讓莫拉克風災後勉強應急的土堤再次潰決，台九線嚴重淹水，道路中斷，嘉蘭村民也緊急撤村，南迴鐵路太麻里段路基被淘空200 m，無法通車。顯然地，在氣候變遷下，極端降雨及洪水事件已造成台灣災情不斷，太麻里溪流域只是其中一例，因此，如何面對氣候變遷高強度降雨的威脅，作好集水區的災害風險評估，並強化當地居民救災體系的因應措施，已成為當前防救災工作的重要課題。

水文頻率分析是在研究某一地區大於或等於某特定大小的水文事件，在一定時間內可能會發生的機率，是水利工程設施在設計上的重要依據(陳儒賢等，2010)。利用頻率分析方法可以推估不同重現期的降雨量或洪水流量，以作為防洪措施規劃之參考，一般而言，常用於防洪工程的水文變數包括年一日、年二日和年三日最大雨量，以及年一日最大洪水量及低流量等(蕭政宗、黃亮芸，2007；沈少文，2011；陳儒賢等，2011)。基於上述，本研究以太麻里溪集水區作為案例，針對極端水文事件包括年最大日流量以及年一日最大雨量進行頻率分析，主要目的有二：(1)選取研究區內最佳的頻率分析機率分佈，並據此推估不同重現期的年最大日流量及年一日最大雨量；(2)分析前後期不同重現期的流量及雨量之差異，以瞭解近期氣候變遷之趨勢。

二、文獻回顧

(一)頻率分析之重要

洪水是重大的自然災害，影響到人類的生存與發展，故需要不同的因應之道，包括防洪設施、預警系統及土地利用經營管理等，而這些都必須應用洪水頻率分析以進行災害風險評估(Kidson and Richards, 2005)。Loukas (2002)也指出，洪氾平原的經營管理必須知道洪峰流量及迴歸週期，這些重要訊息可透過頻率分析得知。另外，根據聯合國政府間氣候變遷小組(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第四次評估報告得知，由於氣候變遷關係，未來高強度的降雨事件發生機率將有上升趨勢，因此，有關極端降雨的評估與預測將益加重要，而頻率分析則是重要的方法之一，對河川整治及水工防護將有甚大助益(Ishihara, 2010)。

洪水頻率分析常被應用於水工設計中，尤其著重於不同的迴歸期所伴隨的最大洪峰量，以便人們瞭解河川的流量及規模，並在安全性及經濟性的考量之下，據此規劃適當的河川工程設計，以確保人民的生命財產(Izinyon *et al.*, 2011)。Ellouze and Abida (2008)也指出，洪水頻率分析的精確與否會影響到人民安全及經費開銷，當洪水量推估過高時，會增加水工設施的支出成本，反之，當推估量過低時，則又會增加洪災風險，危及百姓的生命財產，故找出每一地區適切合宜的洪水頻率分析方式就至為關鍵。

除了水量過高所造成的洪災外，水量過少的旱災亦是極端氣候災害之一，而乾旱頻率分析則是重要的預測方法。Núñez *et al.* (2011)曾指出，全球經濟損失有7%是由乾旱直接造成，若考量到間接的損失，則比率將會更高，此外，受到自然災害所影響的人口數中有35%是由旱災所引起，並造成顯著的死亡率，因此，瞭解旱災極端事件的頻率、強度及延時就非常重要，以作為水資源規劃及水量分配之參考。Santos *et al.* (2011)亦指出，乾旱風險分析中最困難之處是針對極端旱災發生機率之評估，而頻率分析正是解決此一困難的途徑之一。另外，頻率分析也常應用在冰雹的發生週期評估上，可以事先預測、提早準備，減少經濟損失(Fraile *et al.*, 2003)。

由上述文獻可知，不論是洪水、乾旱或冰雹，為了避免災害的發生影響到人類的生存與福祉，妥適的防

洪工程、正確的水源規劃及充足的風險評估均有賴於精準的頻率分析，以提供詳實資訊作為決策之參考。

(二) 頻率分析之挑戰

雖然頻率分析之重要已普受科學界之肯定與認同，不過在進行頻率分析時，仍有許多挑戰與困難需要進一步加以克服，以求提高分析結果的精準度。Kidson and Richards(2005)曾綜合回顧洪水的頻率分析，指出頻率分析主要是以現有的水文資料去推估未來的水文變化，此過程有三大步驟，包括水文資料的擷取、機率模型的選定以及參數的最佳化等，不過在這一連串的過程中，均含有相當高的不確定性，進而影響到分析結果，未來應透過嶄新的統計方法，並佐以歷史及古洪水資料的輔助，以求更深入瞭解洪水的頻率分析。Villarini *et al.* (2009)也指出，由於受到氣候變遷、土地利用改變、都市發展及水利工程如河川溝渠化等之影響，河流的洪峰流量變化趨劇，產生不穩定的動態變化，進行水文頻率分析時將更為困難。此外，過去進行洪水頻率分析時常以年最大洪峰量作為分析基礎，由於洪水的發生受到許多不同的機制所影響，例如降雨或融雪、植物生長或休眠季節、鋒面雨或颱風雨等，若只採年最大洪峰量資料進行分析恐有失真，因此，為了獲得適切的頻率分析，除了採年最大洪峰量外，也應針對不同的季節或降雨特性之最大洪峰量進行探討(Singh *et al.*, 2005)。

另外，進行頻率分析時，水文資料的有無至為關鍵。Satyanarayana and Srinivas (2008)即指出，傳統上大多應用現有的資料進行頻率分析，不過當資料殘缺不全甚或沒有資料時，則頻率分析將會遭遇困難，預測結果也會失準。由於水文站的設置及後續的維護管理常需要大量的人力物力投入，以致於無法全面性設置水文站以收集資料進行頻率分析，普遍採取的方法是應用現有的水文站資料去推估沒有水文站地區的洪水頻率特性。雖然此種方法被普遍使用，不過Leclerc and Ouarda (2007)卻指出，隨著時間演替，受到氣候因素及集水區特性改變之影響，兩個集水區的相似度無法一成不變，因此，此種分析方式仍受到相當質疑。

除了資料問題外，尺度問題亦不可忽略，尤其是如何將氣象站點資料轉換成具有集水區代表性的面資料。Sveinsson *et al.* (2002)就曾指出，在水文及水資源工程中，最常遇到的困難之一，是以一個水文站資料，去推估區域內極端事件如暴雨或洪水的發生機率及規模，為了提高精確度，採用多點測站資料進行區域頻率分析是有其必要，並可據此作為區域同質與否之判斷基礎。另一方面，尺度問題亦包括不同的集水區大小，如何挑選適切的機率模型以進行頻率分析就頗為重要(Loukas, 2002)。

頻率分析除了應用在水量過多的洪水推估外，也可應用在水量過少的乾旱分析上，不過由於乾旱的定義眾說紛紜，以致於分析的結果也有所不同，面對不同的乾旱定義，包括氣候的、環境的、農業的及水文的乾旱，科學家也發展出不同的指標以利旱災風險評估(Santos *et al.*, 2011)。

(三) 頻率分析之應用

1. 降雨量

頻率分析是探討水文變數如降雨量或逕流量在某特定機率或迴歸期時其所達到的水量，一般而言，常用的機率分佈模型包括常態、對數常態、極端值第一型、皮爾森第三型及對數皮爾森第三型等分佈為多(Cheng *et al.*, 2007)。由於進行頻率分析的機率分佈模型甚多，彼此的操作方法及功用也不盡相同，為了尋找適合研究區的模型，大多數的研究都常採用多種機率分佈模型一同比較。Um *et al.* (2010)曾應用5種不同的機率分佈模型，配合10種不同的延時及14種不同的迴歸期，探討韓國濟州島地形雨(orographic precipitation)的分佈特性，經由適合度檢定(goodness-of-fit test)後得知，以一般化的極端值分佈最佳，其次為一般化的羅吉斯及常態分佈模型，至於皮爾森第三型分佈及一般化帕雷托分佈(generalized Pareto)則較差，另外，經由多元迴歸分析後得知，當地地形雨的分佈主要與海拔、緯度和經度最相關。Ishihara(2010)亦採用5種不同的機率分佈模型，探討日本九州鹿兒島縣的最大日降雨量，結果以對數常態分佈模型最為適切，並指出受氣候變遷影響，未來該區百年後30年迴歸期的最大日降雨量將增加18.3%。Sveinsson *et al.* (2002)則應用多種不同的機率分佈模型，分析美國科羅拉多州36個不同氣象站的降雨頻率特性，結果以一般化的極端值分佈、對數常態分佈及皮爾森第三型分佈為佳。

除了不同機率分佈模型間的比較探討外，許多研究亦透過降雨量之特性進行地理區域間之比較，分析其水文上之相異或相似，並找出最為適切的機率分佈模型。Santos *et al.* (2011)應用葡萄牙144個雨量站資

料，經由集群分析將其區分為3個相似區域，並配合5種不同的機率分佈模型進行頻率分析，其中以皮爾森第三型分佈、一般化帕雷托分佈及Kappa分佈為佳，且採用年最大值序列分析結果比部份延時序列更為適合。Satyanarayana and Srinivas (2008)亦應用集群分析，針對會影響到降雨量的氣象變數及區位變數，將印度分成數個水文相似區，再採用7種不同的機率分佈模型，分析水文相似區的降雨頻率特性，結果以對數常態分佈為佳，其次為一般化羅吉斯分佈。此外，Leonard *et al.* (2008)則應用對數常態分佈模型探討澳洲降雨的地理特性，發現熱帶、溫帶及地中海型氣候區有著顯著不同的降雨特性，並且即使在同一地區下，夏季及冬季的降雨特性也有所不同。

頻率分析除了應用在高強度降雨事件外，甚少下雨或長期不雨的乾旱事件也可加以探討。Jou *et al.* (2008)探討伊朗乾燥及半乾燥地區5個雨量站的降雨特性，由於該區年均雨量甚低，約為250 mm，且屬正偏斜特性，因此，頻率分析誤差甚大，為了克服此一困難，彼等分別採用有母數(7種)及無母數(1種)頻率分析方法，配合4種不同的參數計算方式，結果顯示有母數方法比無母數方法佳，其中以對數皮爾森第三型分佈最為適切。另外，Núñez *et al.* (2011)曾採用智利北部172個氣象站雨量資料進行當地乾旱事件的頻率分析，由於南北地區氣候特性有所不同，因此，透過Kappa分佈模型將研究區劃分成8處水文相似區域，並經由頻率分析結果得知，若設定降雨量只有平常的40%時，則北部乾燥區每4年就會發生一次，而南部濕潤區則需要22年才會發生一次。

在國內方面，有關降雨量的頻率分析相關文獻亦甚多。吳瑞賢及石棟鑫(2003)曾進行2001年侵襲台灣的納莉颱風極端降雨的頻率分析，得知台灣大部分地區所測得的暴雨事件皆符合檢定標準。謝龍生等人(2004)曾使用極端值第一型分佈進行台灣各流域100年及200年重現期之雨量計算，進而檢討氣候變遷對既有防洪體系之衝擊。盧孟明及陳佳正(2006)亦使用極端值第一型分佈進行台灣地區豪大雨頻率分析，當雨量在24小時內到達50 mm之規模時，極端值第一型分佈模擬較佳。許中立等(2007)曾進行暴雨頻率分析，採用常態分佈、二參數對數常態、皮爾森第三型分佈、對數皮爾森第三型及極端值第一型分佈等方法綜合比較，計算各重現期距之暴雨量。另外，陳文福等(2010)進行雪霸國家公園內不同集水區降雨特性分析時，指出極端值第一型分佈較為正確，但容易有高估的現象，若使用對數皮爾森第三型分佈進行計算，結果會較實際降雨量減少10%，但重現期20年之暴雨頻率分析結果則較接近實測值。謝錦志(2010)針對2009年時莫拉克颱風在曾文水庫上游的降雨強度進行頻率分析，在一日最大暴雨與二日最大暴雨分析中，以對數皮爾森第三型分佈推估最佳，但三日最大暴雨分析則以極端值第一型分佈較理想。

2. 河川流量

與降雨量的頻率分析一樣，大多數的河川流量頻率分析也常採用多種不同機率分佈模型共同比較。Villarini *et al.* (2009)應用4種不同的機率分佈模型，包括甘保氏(Gumbel)、伽馬(gamma)、對數常態及韋伯(Weibull)等分佈，進行美國北卡州都會區的洪峰流量頻率分析，發現在1960年代後，隨著都市化的擴張增加，每年的洪峰流量也隨之增高，此外，不同的集水區其所適用的機率分佈模型也有所不同。Opere *et al.* (2006)應用8種不同的機率分佈模型，進行非洲尼羅河上游的洪水頻率分析，透過坦尚尼亞(12站)及肯亞(17站)的流量資料，並配合卡方檢定及K-S檢定後得知，當頻率呈現常態分佈時以甘保氏極端值第一型機率模型為佳，不過當頻率呈現厚尾分佈時則以一般化極端值機率模型為宜。另外，Loukas (2002)研究加拿大卑斯省沿海森林地區的洪水頻率，亦發現以甘保氏極端值第一型分佈最佳。

在眾多洪水頻率分析機率模型中，對數皮爾森第三型分佈是最常被採用的方法之一。例如Izinyon *et al.* (2011)為了瞭解非洲奈及利亞的洪水規模，以利洪水防護之規劃設計，彼等利用對數皮爾森第三型分佈，進行當地洪水的頻率分析，採用7種不同的迴歸期(2-200年)，分別推算每年的最高洪水量。另外，Singh *et al.* (2005)亦採用對數皮爾森第三型分佈，分別針對美國及中國等四個區域進行洪水頻率分析，指出為了正確推估洪水量，必須仔細分析每年洪水發生過程的差異性，若是隨著季節而改變，則洪水發生的異質性必須納入考量。雖然對數皮爾森第三型分佈操作方便、應用廣泛，包括美國許多聯邦政府機關如地質調查所、陸軍兵工團及墾務局等單位，都常應用對數皮爾森第三型分佈進行洪水頻率分析，並列入作業手冊中，但由於其精確度深受研究區資料充足與否所影響，因此，使用時仍應特別留意(Griffis and Stedinger, 2009)。

此外，進行頻率分析時，常應用已知水文站的逕流特性，去預測未設水文站地區的洪水頻率。Leclerc and Ouarda (2007)應用美國及加拿大29個水文站資料，探討未設水文站集水區的洪水頻率，採用一般化

的極端值分佈，考量氣候及集水區特性等參數，並搭配相關分析及多元迴歸分析後，可以適切地推估未設水文站地區不同頻率年的最大洪水量。同樣地，Ellouze and Abida (2008)分析北非突尼西亞的洪水頻率，先將全國分成10處水文相似區，再應用5種不同的機率分佈模型進行比較，其中7處水文相似區以一般化的極端值分佈為佳，另外3處則以一般化的羅吉斯分佈較適，並據此再推估未設水文站地區的洪水頻率特性，經由相關性分析得知，其洪水量與集水區面積大小最為相關。

由於有限的資料或不同的資料選取方式均會影響到頻率分析的結果，因此，在進行頻率分析時要特別關注分析資料的適切與否。Kidson *et al.* (2005)調查泰國北部河川地形古洪水資料，經由水利模式推估古洪水流量，再應用近年來的流量資料進行頻率分析，以比較兩者之差異，結果顯示，對數常態、甘保氏極端值第一型及對數皮爾森第三型分佈等模型其推估值均有偏低現象，約為古洪水流量的一半，只有幕次法則模型推估值接近古洪水流量，此結果反映出以近代過短的水文資料去推估極端的洪水流量常會失真。同樣地，Leonard *et al.* (2008)的研究亦指出，乾濕季變化及聖嬰現象都會顯著影響到洪峰流量，因此，在處理資料時必須考慮季節間及年際間之差異，並整合於洪水頻率分析中，如此才能正確有效地進行水工設計。

在國內方面，河川流量的頻率分析亦受到相當重視，尤其是針對洪峰流量的推估。鄭皆達等(1996)利用許多不同的機率分佈，進行台灣河川中上游集水區不同重現期的流量推估，發現台灣北部、中部以及東部使用對數皮爾森第三型機率分佈時會有較高的洪峰流量推估值，但若採用常態分佈頻率分析時，則易有低估洪峰流量之現象。羅偉佑(2003)應用常態分佈、對數常態分佈、對數皮爾森第三型分佈及極端值第一型分佈等四種方法，針對台灣北部集水區不受上游引蓄水影響之水文站的洪峰流量進行頻率分析，並推估各站不同重現期的洪峰流量，結果顯示對數皮爾森第三型分佈有較佳的推估結果。蕭政宗及張雅閔(2008)針對台灣各河川不同延時下低流量進行頻率分析，分別採用通用羅吉斯分佈、通用極端值分佈、三參數對數常態分佈、皮爾森第三型分佈及通用帕雷托分佈等五種，發現台灣地區各流量站不同延時低流量的最佳機率分佈為通用羅吉斯分佈，所佔比例較高，約有36%~43%。

三、研究方法

(一)研究區域

本研究區域為台東縣太麻里溪集水區(圖1)。太麻里溪發源於中央山脈南段主峰北大武山、南大武山的東側，北隔知本溪集水區，西界林邊溪與高屏溪流隘寮溪集水區，南接金崙溪集水區，東鄰太平洋，全長36.27 km，集水區面積217.53 km²，主幹流平均坡降為6.4 %，集水區範圍包括台東縣太麻里鄉及金峰鄉(經濟部水利署，2009a)。

(二)水文資料

本研究流量資料採自經濟部水利署所出版的水文年報(經濟部水利署，2009b)，由於太麻里溪集水區只設有一處金蘭水文站，經辦單位為台灣電力公司，自1982年起開始收集資料，2009年時遭受莫拉克颱風摧毀，觀測中斷，因此，本研究只使用金蘭水文站從1982年至2009年莫拉克颱風前之流量觀測資料，至於莫拉克颱風時之流量資料及爾後的流量資料則闕如(表1)。此外，在雨量資料方面，由於農委會林業試驗所在太麻里研究中心設有氣象觀測站，自1980年起迄今有較完整的雨量資料，且有集結成冊出版(林業試驗所，2005)，因此，本研究採用此氣象站資料進行分析(表1)。為瞭解研究區內極端水文事件之特性，本研究將只針對年最大日流量及年一日最大雨量及進行分析。

另外，根據經濟部水利署「水利建設因應全球氣候變遷白皮書」(鍾文祥等，2010)指出，氣候變遷的比較皆是以過去的一段歷史基期作為預測的基準點，進行預測所採用的基期應儘量一致，否則將導致計算結果不同，其中IPCC、日本及韓國皆是採取20年基期(1980-1999年)，台灣環保署也是如此。由於本研究資料的時間長度只有28年，因此，將以1982-1995年作為歷史基期(在本文中稱之為前期)，與1996-2009年(在本文中稱之為後期)進行比較，兩時期各有14年，期距相同，在比較上較不會有偏誤。



圖1 太麻里溪集水區

表1 研究區水文站及氣象站基本資料表

資料類型	站名	觀測年份	管轄單位	備註
流量資料	金蘭水文站	1982-2009	台灣電力公司	集水面積：189.61 km ²
雨量資料	太麻里氣象站	1980-2009	農委會林業試驗所	海拔高度：90 m

(三)頻率分析

洪水與暴雨事件屬於水文現象中的極端事件，不適合使用常態分佈加以描述，其機率分佈特性多呈偏態，較常使用的機率分佈型態則有：極端值第一型分佈(extreme-value type I distribution)、對數常態分佈(logarithmic normal distribution)、皮爾森第三型分佈(Pearson type III distribution)、對數皮爾森第三型分佈(logarithmic Pearson type III distribution)，不同機率分佈可表示如下(王如意、易任，1977；徐義人，1995)：

1. 極端值第一型分佈/甘保氏分佈(Gumbel distribution)

極端值第一型分佈為Gumbel討論水文事件之極端值所創立，又稱為甘保氏機率分佈，其計算如下：

$$Q_t = M + k_t \times S$$

$$k_t = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[0.5772 + \ln \left(\ln \frac{t}{t-1} \right) \right]$$

式中， Q_t 為重現期 t 年之極端流量， M 為長期流量平均值， S 為長期流量標準差， K_t 為頻率因子即為重現期 t 年機率分佈函數。

2. 對數常態分佈

取隨機變數 X 之自然對數 $\ln X$ ，若 $\ln X$ 符合常態分佈，則可稱 X 符合對數常態分佈，即可將機率密度函數寫成：

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma X} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln X - m}{\sigma}\right)^2\right], X \geq 0$$

式中， σ 為 $\ln X$ 之標準差； m 為 $\ln X$ 之平均值。

3. 皮爾森第三型分佈

此頻率分佈型態由三參數進行討論，其機率密度函數如下：

$$f(X) = \frac{\lambda^\beta (x - \varepsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(x-\varepsilon)}}{\Gamma(\beta)}, x \geq \varepsilon$$

式中 $\lambda = \frac{\sigma}{\sqrt{\beta}}$ ， σ 為標準差； $\beta = \left(\frac{2}{C_s}\right)^2$ ； $\varepsilon = m - \sigma\sqrt{\beta}$ ， m 為平均數； C_s 則為 x 之偏態係數； $\Gamma(\beta)$ 為Gamma函數。

4. 對數皮爾森第三型分佈

對數皮爾森第三型分佈為1967年美國水資源委員會將水文資料取對數，再利用皮爾森第三型分佈分析水文頻率，其公式如下：

$$f(\ln X) = \frac{\lambda^\beta (\ln x - \varepsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(\ln x - \varepsilon)}}{\Gamma(\beta)}, \ln x \geq \varepsilon$$

式中 $\lambda = \frac{\sigma}{\sqrt{\beta}}$ ， σ 為標準差； $\beta = \left(\frac{2}{C_s}\right)^2$ ； $\varepsilon = m - \sigma\sqrt{\beta}$ ， m 為平均數； C_s 則為 $\ln X$ 之偏態係數； $\Gamma(\beta)$ 為Gamma函數。

(四)適宜性分析

由於在不同集水區環境下，適用之機率分佈亦會有所不同，因此，必須透過適當的檢定以選擇較佳之機率分佈來進行頻率分析(鄭皆達等，1995)。為比較不同頻率分析方法的適宜性，本研究以標準誤檢定(standard error test, SE)作為判斷之依據，公式如下：

$$SE = \sqrt{\left[\frac{1}{n-r} \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2 \right]}$$

式中， SE 為標準誤差， n 為資料年數， r 為機率分佈之參數個數， X_i 為實測資料由大至小排列之第 i 大值， \hat{X}_i 為超越機率推估值。

四、結果與討論

(一)年最大日流量頻率分析

1. 最適機率分佈

將金蘭水文站從1982-2009年間的年最大日流量進行四種頻率分析計算，透過標準誤檢定，結果如表2所示。由表2可知，前期(1982-1995年)以極端值第一型分佈及對數常態分佈為佳，其標準誤值最小，後期(1996-2009年)則以極端值第一型分佈最優，其標準誤值明顯地比其它三種機率分佈低出甚多，至於全部(1982-2009年)則以極端值第一型分佈及對數常態分佈較佳。整體而言，研究區內年最大日流量頻率分析以極端值第一型分佈最為適切，因此，本研究以此機率分佈推估研究區不同重現期的洪峰流量，包括前期、後期及全部年度資料，結果如表3所示。

表2 研究區年最大日流量頻率分析結果

時期	年度	資料年數	標準誤檢定(SE)			
			極端值第一型	對數常態	皮爾森第三型	對數皮爾森第三型
前期	1982-1995	14	0.97	0.97	1.18	1.18
後期	1996-2009	14	0.52	1.26	1.55	1.55
全部	1982-2009	28	1.75	1.75	2.14	2.14

表3 研究區不同重現期年最大日流量(cms)推估值

重現期(年)		2	2.33	5	10	25	50	100
前期	1982-1995	110.10	121.04	168.55	207.24	256.14	292.41	328.41
後期	1996-2009	151.86	170.23	250.02	315.00	397.12	458.03	518.49
全部	1982-2009	135.24	149.95	213.87	265.94	331.72	380.51	428.95
前後期變動率		37.93%	40.64%	48.34%	52.00%	55.04%	56.64%	57.88%

2. 前後期洪水推估量比較

在年最大日流量頻率分析中，可透過不同重現期的洪水推估，進一步瞭解前後期河川洪水流量之變化。由表3中得知，依據極端值第一型分佈所推估的最大日流量，在不同重現期中，後期均比前期高出許多，變動率介於37.93%至57.88%間，且隨著不同重現期距增加而增加，在100年重現期時，前期的最大日流量由328.41 cms增高至後期最大日流量的518.49 cms，整體上升57.88%。此外，若轉繪為圖並進行迴歸分析時，則如圖2所示。由圖2中得知，最大日流量(Y)隨著重現期(X)的增加而增加，不論是前期或後期，其 R^2 均高達0.99，不過後期迴歸方程式的常數比前期大，其係數或斜率也明顯地比前期高，換言之，後期所推估的年最大日流量均比前期高，且兩者的差異隨著不同重現期距的增加而擴大。另外，本研究進一步計算前後期年最大日流量的平均值及標準差，結果如表4所示。由表4中得知，前期年最大日流量平均值由120.96 cms增高至後期最大日流量的170.11 cms，整體提高40.63%，前期年最大日流量標準差亦由66.14 cms增加至後期最大日流量的111.07 cms，變異增加67.94%。由平均值之變化得知，後期年最大日流量增加明顯，且標準差之顯著變動也反應出後期年際間差異擴大，年最大日流量變化更加劇烈，顯示出未來年最大日流量呈現上升趨勢且更加極端。

表4 研究區前後期年最大日流量(cms)統計分析

統計量		平均值	標準差
前期	1982-1995年	120.96	66.14
後期	1996-2009年	170.11	111.07
全部	1982-2009年	149.86	88.98
前後期變動率		40.63%	67.94%

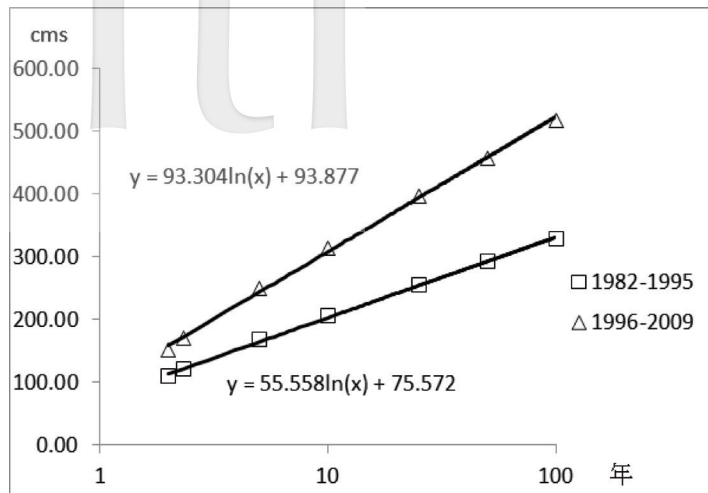


圖2 研究區不同重現期年最大日流量迴歸分析

3. 前後期不同重現期極端洪水次數比較

本研究進一步以1982-2009年全部年最大日流量資料進行頻率分析，依據極端值第一型分佈推估不同重現期的洪水量，再據此比較前後期年最大日流量達到不同重現期洪水量的次數多寡，結果如表5所示。由表5中得知，前期的年最大日流量大都分佈在重現期兩年內，共有9次占64.29%，其次為重現期2至5年，共有4次占28.57%，超過重現期10年以上的則付之闕如，表示前期的年最大日流量不高，其重現期大概在5年之內。相反地，雖然後期的年最大日流量主要分佈在重現期2至5年內，共有7次占50.00%，其次為重現期兩年內，共有4次占28.57%，不過值得注意的是，有兩次年最大日流量位於重現期10至25年內，甚至有一次超過重現期100年以上。很明顯地，後期發生較大規模的洪水次數逐漸增加，而重現期兩年內較小規模的洪水次數則逐漸減少，由前期的64.29%降至後期的28.57%。由上述分析可知，太麻里溪集水區發生極端洪水事件的頻度日益增高，將嚴重威脅到下游聚落的生命財產。

表5 前後期達到不同重現期洪水量之次數

	重現期	資料年數	2年以下	2-5年	5-10年	10-25年	25-50年	50-100年	>100年
次數	1982-1995年	14	9	4	1	0	0	0	0
	1996-2009年	14	4	7	0	2	0	0	1
比率	1982-1995年	14	64.29%	28.57%	7.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	1996-2009年	14	28.57%	50.00%	0.00%	14.29%	0.00%	0.00%	7.14%
前後期變動狀況			降低	上升	降低	上升	-	-	上升

(二)年一日最大雨量頻率分析

1. 最適機率分佈

與上述年最大日流量頻率分析相同，本研究將太麻里研究中心氣象站從1982-2009年間的年一日最大雨量進行四種頻率分析，透過標準誤檢定，結果如表6所示。由表6可知，不論是前期、後期及全部均以極端值第一型分佈及對數常態分佈為佳，其標準誤值最低。由於考量到與年最大日流量的頻率分析一致，因此，本研究以極端值第一型分佈推估研究區不同重現期的年一日最大雨量，包括前期、後期及全部三個不同時

期，結果如表7所示。

表6 研究區年一日最大雨量頻率分析結果

時期	年度	資料年數	標準誤檢定(SE)			
			極端值第一型	對數常態	皮爾森第三型	對數皮爾森第三型
前期	1982-1995	1.90	1.90	2.32	2.32	1.18
後期	1996-2009	1.51	1.51	1.84	1.84	1.55
全部	1982-2009	1.75	1.75	2.14	2.14	2.14

表7 研究區不同重現期年一日最大雨量(mm)推估值

重現期(年)		2	2.33	5	10	25	50	100
前期	1982-1995	184.26	193.09	231.46	262.72	302.20	331.50	360.58
後期	1996-2009	203.19	227.73	307.16	374.68	462.92	516.43	574.23
全部	1982-2009	194.20	208.66	271.45	322.60	387.23	435.17	482.75
前後期變動率		10.27%	17.94%	32.70%	42.62%	53.18%	55.79%	59.25%

2. 前後期降雨推估量比較

由表7中得知，依據極端值第一型分佈所推估的年一日最大雨量，在不同重現期中，後期均比前期高，變動率介於10.27%至59.25%間，且隨著不同重現期距的增加而增加。在重現期為兩年時，前後期之差異不大，其年一日最大雨量分別為184.26 mm及203.19 mm，不過當重現期為100年時，前期的年一日最大雨量則由360.58 mm增高至後期年一日最大雨量的574.23 mm，足足提高59.25%。此外，本研究將不同重現期年一日最大雨量推估值進行繪圖，並計算迴歸方程式，結果如圖3所示。由圖3可知，年一日最大雨量(Y)隨著重現期(X)的增加而增加，不論是前期或後期，其 R^2 均高達0.99，雖然後期迴歸方程式的常數略低於前期，不過後期迴歸方程式的係數或斜率則明顯比前期高，後期所推估的年一日最大雨量也均比前期大，兩者的差異隨著不同重現期距的增加而擴大。另外，本研究進一步計算前後期年一日最大雨量的平均值及標準差，結果如表8所示。由表8中得知，前期年一日最大雨量平均值由193.04 mm增高至後期年一日最大雨量的224.09 mm，總共提高16.09%，前期年一日最大雨量標準差亦由53.41 mm增加至後期年一日最大雨量的111.79 mm，整體變異也增加109.30%。由平均值之變化得知，後期年一日最大雨量增加明顯，且標準差之變動也非常顯著，反應出後期年際間之差異甚大，年一日最大雨量變化更加劇烈，呈現上升趨勢且更加極端。

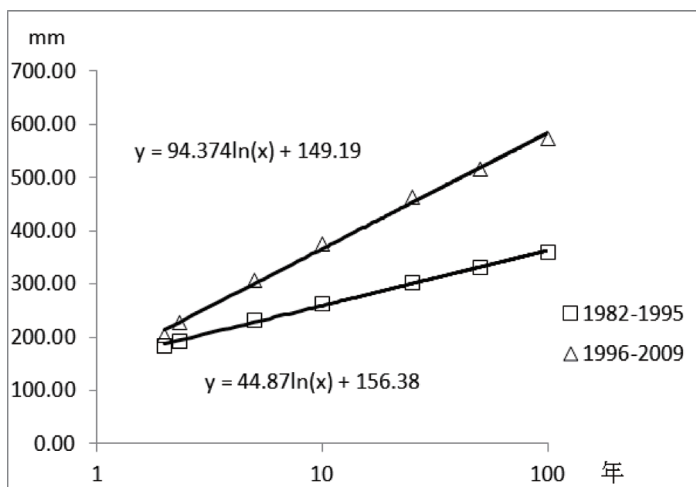


圖3 研究區不同重現期年一日最大雨量迴歸分析

表8 研究區前後期年一日最大雨量(mm)之統計分析

	統計量	平均值	標準差
前期	1982-1995年	193.04	53.41
後期	1996-2009年	224.09	111.79
全部	1982-2009年	208.56	87.41
前後期變動率		16.09%	109.30%

3. 前後期不同重現期極端降雨次數比較

本研究進一步以1982-2009年全部年一日最大雨量資料進行頻率分析，依據極端值第一型分佈推估不同重現期的降雨量，再據此比較前後期年一日最大雨量達到不同重現期降雨量的次數多寡，結果如表9所示。由表9中得知，前期的年一日最大雨量大都分佈在重現期兩年內，共有8次占57.14%，其次為重現期2至5年，共有5次占35.71%，超過重現期10年以上的則沒有，表示前期的年一日最大雨量不高，其重現期大概在5年之內。至於後期的年一日最大雨量與前期相似，主要分佈在重現期兩年內，共有9次占64.29%，不過格外特殊的是，在重現期2至5年內則沒有，反而有3次年一日最大雨量位於重現期10至25年內，甚至有一次超過重現期100年以上。很明顯地，後期發生高強度的降雨次數顯著增加，且重現期兩年內較小規模的降雨次數也漸增，至於重現期2至10年內的則只有一次，呈現兩極化分佈之趨勢。由上述分析可知，太麻里溪集水區發生極端降雨事件的頻度日益增高，澇旱災害發生機率也逐漸增強。

表9 前後期達到不同重現期年一日最大雨量之次數

	重現期	資料年數	2年以下	2年-5年	5年-10年	10年-25年	25年-50年	50年-100年	100年以上
次數	1982-1995年	14	8	5	1	0	0	0	0
	1996-2009年	14	9	0	1	3	0	0	1
比率	1982-1995年	14	57.14%	35.71%	7.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	1996-2009年	14	64.29%	0.00%	7.14%	21.43%	0.00%	0.00%	7.14%
前後期變動狀況			上升	降低	-	上升	-	-	上升

五、結論

頻率分析常被應用於防災規劃、水工設計及災害風險評估中，透過適當的機率分佈可推估不同的重現期所伴隨的最大降雨量或洪峰流量，有助於人們瞭解集水區內的水文特性，提升集水區經營管理的效率。近年來，在氣候急遽變遷情況下，台灣東部地區陸續遭受颱風侵襲，包括海棠颱風、莫拉克颱風及凡那比颱風等，洪水及土石災害頻傳，如何作好集水區的風險評估及防災規劃，已成為當前的重要課題。基於此，本研究以台東的太麻里溪集水區作為案例，從1982年至2009年間，針對極端水文事件包括年最大日流量以及年一日最大雨量進行頻率分析，所使用的機率分佈有極端值第一型分佈、對數常態分佈、皮爾森第三型分佈及對數皮爾森第三型分佈等四種，主要目的是要探討研究區內最佳的頻率分析機率分佈，分析近期氣候變遷之趨勢，並提供防救災規劃上之參考。

研究結果顯示，研究區內年最大日流量頻率分析以極端值第一型分佈最為適切，不過若再細究前後期之差異，則前期(1982-1995年)頻率分析以極端值第一型分佈及對數常態分佈為佳，後期(1996-2009年)則以極端值第一型分佈最優。在不同重現期中(2-100年)，後期的年最大日流量推估值均比前期高出許多，變動率介於37.93%至57.88%間，且隨著不同重現期距增加而增加。此外，後期的年最大日流量平均值比前期高出40.63%，標準差更高出67.94%，後期發生較高的年最大日流量次數也逐漸增加，而重現期兩年內較小的年最大日流量次數則逐漸減少。另外，在年一日最大雨量頻率分析方面，不論是前期、後期及全部均以極端值第一型分佈及對數常態分佈為佳。依據極端值第一型分佈所推估的年一日最大雨量，後期均比前期

高，變動率介於10.27%至59.25%間。此外，後期的年一日最大雨量平均值比前期高出16.09%，標準差則高出109.30%，後期發生高強度的降雨次數顯著增加，且重現期兩年內較小規模的降雨次數也漸增，呈現兩極化分佈之趨勢。綜合言之，太麻里溪集水區的年最大日流量及年一日最大雨量均隨著時間而逐漸增高，標準差之變動也日益顯著，頻度亦增強，反應出未來極端的水文事件將具有上升趨勢，且更加極端，將嚴重威脅到下游聚落的生命財產，相關部門宜及早未雨綢繆、防患未然，盡速研擬因應策略，以達防災減災之目的。

此外，水文資料的充足與否是本研究的最大限制，包括兩部份：首先，本研究區從1982年起才開始收集流量資料，由於位處偏遠，且受到自然災害及機械故障等因素所影響，因此，水文資料難免會有中斷情形發生，尤其是2009年時流量的觀測設施遭受莫拉克颱風摧毀，以致於後續的觀測資料闕如，進行頻率分析時年限較短，只有28年，且分析項目以完整的年最大日流量資料為主，至於平均流量、年逕流量及最大瞬時流量等資料則常有缺漏，無法進一步深入分析；其次，面積189.61 km²的太麻里溪集水區只設置一處流量觀測站，而擁有比較長期且完整資料的雨量站也只有林業試驗所太麻里研究中心的氣象站，因此，水文資料不論是流量或雨量在空間分佈上均略有不足，未來在進行防災規劃時，宜多加留意水文資料在時空分佈上的差異。

六、致謝

感謝農委會林業試驗所提供太麻里研究中心氣象資料，感謝台灣電力公司提供金蘭水文站流量資料，感謝行政院國家科學委員會補助研究經費(NSC 100-2621-M-003-001)，感謝二位匿名的審查委員給予的寶貴建議，本文才能充實完整、順利完成，謹致上最高謝意。

參考文獻

1. 王如意、易任 (1979) 應用水文學新編下冊，台北：茂昌圖書有限公司。
2. 沈少文 (2010) 1970-2008年花蓮地區河川流量與輸砂量之頻率分析，水保技術，5(3)：152-166。
3. 沈少文 (2011) 臺灣南部地區歷年年一日、年二日和年三日最大雨量之迴歸分析，作物、環境與生物資訊，8(2)：139-152。
4. 吳宜昭、陳永明、朱容練 (2010) 台灣氣候變遷趨勢，國研科技，25：40-46。
5. 吳政霖 (2009) 大甲溪上游集水區雨量與河川流量變動情勢之研究，國立彰化師範大學地理學系碩士論文。
6. 吳瑞賢、石棟鑫 (2003) 台灣地區極端降雨量分佈與頻率分析之研究－兼論納莉颱風事件，中國土木水利工程學刊，15(4)：747-758。
7. 林俊成、李國忠 (2000) 全球溫暖化對畢祿溪試驗集水區河川流量衝擊評估，台灣林業科學，15(1)：51-60。
8. 林業試驗所 (2005) 太麻里研究中心氣象資料1980~2004，林業試驗所出版。
9. 徐義人 (1995) 應用水文學，台北：大中國圖書公司。
10. 郭純伶、李仲卿、謝孟益 (2010) 由凡那比颱風短降雨延時極端水文事件對都市排洪能力衝擊之初探，水利，20：3-9。
11. 陳文福、黃家慶、邱滄明 (2010) 地理統計方法應用於暴雨頻率分析之研究，水保技術，5(2)：95-104。

12. 陳儒賢、陳清田、洪毓婷 (2010) 台灣地區年最大一日雨量區域頻率分析之研究：(I)理論部份，中華水土保持學報，41(1)：41-50。
13. 陳儒賢、陳清田、謝宛吟 (2011) 台灣地區區域洪水頻率分析之研究，農業工程學報，59(1)：37-52。
14. 許中立、鍾斌全、戴欣怡 (2007) 太麻里溪集水區降雨崩塌對河道淤沙之影響，坡地防災學報，7(1)：1-21。
15. 童慶斌、楊奕岑 (2004) 氣候變遷對台灣水文環境之衝擊，全球變遷通訊雜誌，44：1-8。
16. 經濟部水利署 (2009a) 太麻里溪水系治理規劃，經濟部水利署河川規劃課。
17. 經濟部水利署 (2009b) 水文年報，經濟部水利署出版。
18. 鄭皆達、蘇瑞榮、黎承偉 (1995) 臺灣地區洪峰流量特性及頻率分析之區域性研究，中華水土保持學報，26(3)：211-220。
19. 鄭皆達、黎承偉、吳輝龍 (1996)，台灣河川溪流上游集水區不同重現期洪峰流量推估方法之推導及應用，第八屆水利工程研討會論文集，655-664頁。
20. 盧孟明、陳佳正 (2005) 豪大雨之頻率分析方法，氣象學報，46(1)：45-60。
21. 蕭政宗、黃亮芸 (2007) 利用區域化法推估台灣地區未設站地點年最大一日雨量之頻率，農業工程學報，53(2)：77-94。
22. 蕭政宗、張雅閔 (2008) 台灣地區不同延時低流量最佳分佈之探討，農業工程學報，54(2)：35-51。
23. 鍾文祥、蔡文豪、龔誠山 (2010) 水利建設因應全球氣候變遷白皮書，經濟部水利署。
24. 謝龍生、柳文成、童慶斌 (2004)，未來氣候變遷趨勢對台灣流域防洪系統整體性潛在衝擊影響及其調適策略之研究，聯合學報，24：1-34。
25. 謝錦志 (2010) 曾文水庫上游集水區及莫拉克事件之降雨分析，水利，20：221-235。
26. 羅俊雄、陳亮全、許銘熙、謝龍生 (2002) 納莉颱風災因分析及綜合評估檢討報告，防災國家型科技計畫辦公室，NAPHM90-17。
27. 羅偉佑 (2003) 臺灣北部地區集水區洪峰流量特性及其頻率分析之探討，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
28. 蘇俊明 (2010) 石門水庫降雨變遷對水資源調度之影響，水利，20：49-54。
29. Cheng, K. S., J. L. Chiang and C. W. Hsu (2007) Simulation of probability distributions commonly used in hydrological frequency analysis. Hydrological Processes 21: 51-60.
30. Ellouze, M. and H. Abida (2008) Regional flood frequency analysis in Tunisia: identification of regional distributions. Water Resource Management 22:943-957.
31. Fraile, R., C. Berthet, J. Dessens and J. L. Sánchez (2003) Return periods of severe hailfalls computed from hailpad data. Atmospheric Research 67-68: 189-202.
32. Griffis, V. W. and J. R. Stedinger (2009) Log-Pearson Type 3 distribution and its application in flood frequency analysis III: sample skew and weighted skew estimators. Journal of Hydrological Engineering 14(2): 121-130.
33. Ishihara, K. (2010) Assessment for the 30-year daily precipitation change due to global

warming using regional frequency analysis. *Hydrological Research Letters* 4: 30-34.

34. Izinyon, O. C., N. Ihimekpen and G. E. Igbinoba (2011) Flood frequency analysis of Ikpoba River catchment at Benin City using Log Pearson Type III distribution. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences* 2(1): 50-55.
35. Jou, P. H., A. M. Akhoond-Ali, A. Behnia and R. Chinipardaz (2008) Parametric and nonparametric frequency analysis of monthly precipitation in Iran. *Journal of Applied Science* 8(18): 3242-3248.
36. Kidson, R. and K. S. Richards (2005) Flood frequency analysis: assumptions and alternatives. *Progress in Physical Geography* 29(3): 392-410.
37. Kidson, R., K. S. Richards and P. A. Carling (2005) Reconstructing the ca. 100-year flood in Northern Thailand. *Geomorphology* 70: 279-295.
38. Leclerc, M. and T. B. M. J. Ouarda (2007) Non-stationary regional flood frequency analysis at ungauged sites. *Journal of Hydrology* 343: 254-265.
39. Leonard, M., A. Metcalfe and M. Lambert (2008) Frequency analysis of rainfall and streamflow extremes accounting for seasonal and climatic partitions. *Journal of Hydrology* 348: 135-147.
40. Loukas, A. (2002) Flood frequency estimation by a derived distribution procedure. *Journal of Hydrology* 255: 69-89.
41. Núñez, J. H., K. Verbist, J. R. Wallis, M. G. Schaefer, L. Morales and W. M. Cornelis (2011) Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile. *Journal of Hydrology* 405: 352-366.
42. Opere, A. O., S. Mkhandi and P. Willems (2006) At site flood frequency analysis for the Nile Equatorial basins. *Physics and Chemistry of the Earth* 31: 919-927.
43. Santos, J. F., M. M. Portela and I. Pulido-Calvo (2011) Regional frequency analysis of droughts in Portugal. *Water Resource Management* 25: 3537-3558.
44. Satyanarayana, P. and V. V. Srinivas (2008) Regional frequency analysis of precipitation using large-scale atmospheric variables. *Journal of Geophysical Research* 113, D24110, 16p, doi:10.1029/2008JD010412.
45. Singh, V. P., S. X. Wang and L. Zhang (2005) Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic flood data. *Journal of Hydrology* 307: 175-195.
46. Sveinsson, O. G. B., J. D. Salas and D. C. Boes (2002) Regional frequency analysis of extreme precipitation in Northeastern Colorado and Fort Collins flood of 1997. *Journal of Hydrologic Engineering* 7(1): 49-63.
47. Um, M. J., H. Yun, W. Cho and J. H. Heo (2010) Analysis of orographic precipitation on Jeju-Island using regional frequency analysis and regression. *Water Resource Management* 24: 1461-1487.
48. Villarini, G., J. A. Smith, F. Serinaldi, J. Bales, P. D. Bates and W. F. Krajewski (2009) Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin. *Advances in Water Resources* 32: 1255-1266.