

氣候變遷對大漢溪及新店溪流域防洪系統 潛在衝擊影響之研究

A Study of the Potential Impact of Climate Change on the Flood Protect System for Da-Han Stream and Shih-Dan Stream

國家災害防救科技中心
副研究員

謝龍生

Lung-Sheng Hsieh

國立聯合大學土木與防災工程學系
副教授

柳文成

Wen-Cheng Liu

國立台灣大學生物環境系統
工程學系副教授

童慶斌

Ching-Pin Tung

摘 要

本研究之主要目的係針對研究流域防洪系統，評估未來短中長期各種可能氣候變遷情境條件下，河川洪峰流量對於集水區防洪系統之衝擊影響。於研究過程中，選取淡水河大漢溪及新店溪流域為研究區域，首先利用現況調查及觀測資料蒐集，進行流域降雨分析及建立適用於集水區之水文模式，並進一步整合氣候變遷分析之成果，以探討未來各種可能氣候變遷之預設情境對於研究區域重要控制點尖峰設計流量之變化趨勢，進一步與過去水利主管單位所公告之河川尖峰設計流量及現有堤防防洪能力進行比較，以評估其衝擊影響。研究結果顯示，不論是以平衡試驗氣候變遷預設情境，或是在 SRES 氣候變遷預設情境下，其河川流域最大保護標準洪峰流量將有增加之趨勢；針對因氣候變遷所引致河川洪水增加量對流域現有防洪系統之衝擊影響，本研究進一步從現有堤防防洪能力、法規設計標準及災害管理系統等方面進行探討，提出具體之潛在衝擊影響，惟氣候變遷影響評估具有相當高之不確定性，因此在應用上，建議採用多個 GCM 氣候變遷模式預測情境之趨勢分析，而預測變化量之參考價值相對較低，不宜直接應用於決策。此外，本研究已建立適用於氣候變遷對集水區防洪系統衝擊影響之評估方法，未來將可推廣至其他流域，以做為各種氣候變遷趨勢對全台防洪系統衝擊影響之整體性評估。

關鍵詞：氣候變遷，防洪系統，河川洪峰流量，衝擊影響，不確定性。

ABSTRACT

The main purpose of this study is to analyze and to assess the impact on flood

protection system of watershed by flood discharges under various scenarios of short, mid, and long-term climate changes. The Da-Ham Creek and Shih-Dan Creek were chosen as the study areas. Observed data in the study area such as precipitation and discharge data were collected to analyze rainfall frequency and to setup the suitable hydrology model. The results of climate change scenarios were analyzed to investigate the possible changes in flood discharges at important control points in the river systems using the hydrology model. The simulated discharges were compared with the design discharges of the Water Conservancy Department to evaluate the defense ability of the present flood control system and the potential impact on watershed. The results showed that the flood discharge consistently exhibits a rising trend under both the balance test and SRES simulation scenarios for short, mid, and long-term climate changes. For the increasing of flood situation, this study evaluated the potential impact from three aspects including present ability for flood protection, laws and regulations for design standard, and hazard management system. Because of the high uncertainty in impact assessment of climate change, we suggested that several GCM analyses be adopted in the application. The methodology to assess the impact on flood protection system caused by climate changes had been established and should be applicable to other river basins. Therefore the integrated impacts of climate changes on the flood protection system in Taiwan can be performed.

Keywords: Climate change, Flood protection system, Flood discharge, Hydrology model, Simulation.

一、前言

近年來隨著人口快速增加、科技不斷突飛猛進，人類大量地製造二氧化碳、氧化亞氮、甲烷、氟氯碳化物等溫室氣體，導致大幅提高了全球暖化現象及全球氣溫上升之趨勢。根據 IPCC (1995, 1996, 2000) (許, 2001) 科學家分析了許多資料之後，發現全球平均地面氣溫自 19 世紀末以來上升了 0.3-0.6°C，最近 40 年則上升了 0.2-0.3°C；全球平均雨量在 20 世紀增加了 1%。近年來洪水及乾旱等災害規模更加劇烈，例如 89 年象神、90 年潭美、桃芝及納莉等颱風事件、91 年之旱災缺水事件，根據對這些洪旱災害事件之事後調查分析報告指出（羅, 2001、行政院災害防救委員會, 2002），這些事件與氣候變遷因素影響有相當大之關聯性，且颱風降雨型態在降雨總量不變之下，已由過去降雨延時長轉變成降雨延時短之型態，即尖峰降雨強度變大，此種降雨型態之

改變對各河川流域之防洪系統有莫大衝擊性，例如納莉颱風期間，由於降雨量過大且延時短促，造成淡水河流域許多下水道排水系統、抽水站無法正常操作，因而加重颱風淹水災情。

由於溫室氣體含量持續升高已是不可避免的事實，因此未來勢必須面臨全球氣候變遷對河川流域防洪系統所引發之各項衝擊問題，而且問題的深度及廣度皆有增大之趨勢。因此如何在氣候變遷問題未持續擴大之前，首先預測其未來可能之變化趨勢，進而評估其對防洪系統可能之衝擊影響，並針對評估結果提出因應對策，以取未雨綢繆之效。

本研究之主要目的係針對研究流域防洪系統，評估現況及未來短中長期各種可能氣候變遷情境條件下，河川洪峰流量對於集水區防洪系統之衝擊影響。於研究過程中，首先利用現況調查及實際觀測資料，進行流域降雨分析及建立適用於集水區之水文模式，並分析探討未來各種可能

氣候變遷之預設情境對於研究區域重要河川控制點尖峰設計流量之變化趨勢，進一步與過去水利主管單位所公告之河川尖峰設計流量及現有堤防防洪能力進行比較，評估其衝擊影響以提供相關主管部門作為未來防洪政策擬定參考之依據。

二、文獻回顧

於研究過程中，首先蒐集國內外關於氣候變遷對於河川防洪系統衝擊之相關研究，探究其分析理論及研發成果，以作為本研究對於分析方法研析之參考依據。由於全球氣候變遷對於各方面影響評估，在聯合國於 1988 年成立 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)後相關研究如雨後春筍般研發產出，但大多集中於以大尺度觀點探討大氣、海洋、生態及水資源等方面之研究，甚少探討氣候變遷對河川洪水量及防洪系統之衝擊影響。茲將與本研究較有關聯之國內外重要研究成果分述如下：

Loukas (2002) 等人利用加拿大西南部 Campell 及 Illecillewaet 兩個鄰近集水區，應用 CGCMA1 模式模擬集水區未來溫度及降雨量之變化潛勢，進一步再利用 UBC 集水區水文模式考慮集水區降雨空間分布、雲覆蓋率及植被分布等因素，並套配 CGCMA1 之情境模擬結果，模擬集水區洪水量及發生頻率。研究結果顯示兩個集水區未來氣候條件比目前更加暖化。而在平均洪水量及發生頻率方面，Campell 集水區則有增加之趨勢；相反地，Illecillewaet 集水區卻有減少之趨勢。

Harrison (2002) 等人利用 WatBal 水文模式模擬 Zambezi 河受到氣候變遷影響之未來月流量變化，將此結果作為未來水力發電影響之評估依據。對於氣候變遷係利用 HadCM2、HadCM2-S 及 ECHAM4 等模式進行月平均溫度及月平均降雨量之氣候情境模擬，進一步水文模式利用水收支平衡關係，考慮集水區蒸發散量受到溫度之影響，模擬集水區未來月流量之變化情形。

Mimikou (2000) 等人利用 HadCM2 及 UKHI 氣候模式進行 Greece 中部集水區氣候情境模

擬，再將分析結果分別輸入 WBUDG 水文模式進行月流量分析及 R-Qual 水質模式進行 BOD、Do 及 NH_4^+ 之月變化量分析。研究結果顯示，氣候溫度將逐年增加，而降雨量將逐年減少，如此改變導致平均月流量減少及 BOD、Do 及 NH_4^+ 等含量減少。

Arnell (1996) 等人利用英國 21 個集水區研究氣候變遷對集水區逕流量之影響，其集水區面積大小從最小 42 平方公里至最大為 1,616.2 平方公里，所使用水文模式為機率分布 (Probability-distributed) 日流量模式 (PDM)。研究結果顯示在最溼化情況下，年逕流量至 2050 年將增加 20%；相反地，在最乾化情況下，年逕流量至 2050 年將削減 20%。

至於國內關於氣候變遷對於集水區防洪系統影響之研究尚未發現，但諸多研究僅止於全球氣候變遷對台灣集水區平均溫度、降雨量之影響，且進一步利用此結果模擬分析集水區年逕流量、月流量及日流量之變化，以評估集水區未來水資源之衝擊影響。例如洪念民等人 (1998) 利用 GCM 輸出之月溫度、降雨改變量，配合一氣候模擬模式，由月統計特性繁衍未來日溫度及降雨量序列，以作為推估氣候變遷後流域流量之改變情形，結果認為台灣降雨量豐枯不均。吳志剛等人 (2000) 研究高屏溪流域之水資源受氣候變遷衝擊時指出，高屏溪流域降雨未來可能呈現降雨強度增加，而降雨延時減少之情況。

綜觀國內外氣候變遷對於集水區水文量評估之方法，皆使用延時 (time step) 為日或月之水文模式，因此可作為水資源供需平衡或水力資源蘊藏等長期性之評估，然根據過去集水區河川治理規劃之水文分析方法，此類長延時水文分析方法對於評估氣候變遷對防洪系統影響是無法適用，例如對於淡水河流域所公告不同重現期洪水流量歷線之推估方法，於台北地區防洪計畫檢討報告之附錄一「水文研究」中指出（經濟部水資源規劃統一委員會，1970），淡水河流域內之暴雨，係以三小時為一時段之暴雨時間分布百分比，並依據淡水河主流各控制點以上不同重現期距之年最大三日暴雨量，分別按上述建議之暴

雨時間分布，計算每三小時之暴雨量，並扣除降雨損失後，再以各控制點單位流量歷線估算各種重現期距之洪水歷線；其他流域亦皆使用相類似之分析方法。由此可見，欲評估氣候變遷對防洪系統影響所使用之水文模式，必須是具有分析颱風暴雨事件短延時之水文模式，才足以與現有河川防洪系統防禦能力進行比較。

三、衝擊評估流程

在歷經國內外相關文獻回顧之後，並無類似相同之研究議題方法可供本研究參考使用，然民國 85 年起連續三年經濟部水資源局曾委託台大農工系進行人文、土地利用變遷對台北整體防洪功能之檢討計畫研究(王, 1996, 1997, 1998)，因此本研究擬參考其研究方法及分析流程，所不同之處是將人文、土地利用變遷改換成氣候變遷，如圖 1 所示，茲將重要研究流程簡述如下：

- 步驟 1：首先蒐集流域河川防洪設施及重要控制點之尖峰設計流量。
- 步驟 2：降雨分析，其主要工作重點包含應用氣候變遷模式之降雨比值輸出結果，修訂各雨量站繁衍雨量資料之頻率分析及區域雨型設計。
- 步驟 3：水文分析，其主要工作重點是建立適用於集水區之降雨－逕流水文模式。
- 步驟 4：推估各種氣候變遷影響預設情境下之流域尖峰設計流量，其係整合氣候變遷研究分析成果，將其各種未來可能之預設情境條件輸入水文模式，以推求重要控制點未來受氣候變遷影響之流域尖峰設計流量。
- 步驟 5：評估未來氣候變遷預設情境對河川流域防洪系統之衝擊影響。

且為探討本研究擬定研究方法與分析流程之適用性，因此將選取淡水河流域大漢溪及新店溪流域為研究集水區，以探討氣候變遷未來預設情境對其防洪系統之衝擊影響。參考經濟部水利署全球資訊網 (<http://www.wra.gov.tw>) 中河川治理資料指出，目前大漢溪治理原則是各河段主要治理措施在江子翠合流點至三峽河匯流點

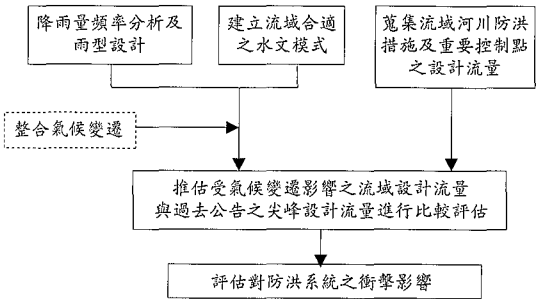


圖 1 防洪系統衝擊評估影響之工作流程圖

是依據台北防洪計畫興建 200 年重現期保護程度堤防，在新海橋 200 年重現期(保護標準)之尖峰設計流量為 13,800(立方公尺/秒)；新店溪治理原則各河段主要治理措施在江子翠合流點至中正橋河段是依據台北防洪計畫興建 200 年重現期保護程度堤防，在華江橋 200 年重現期(保護標準)之尖峰設計流量為 10,800(立方公尺/秒)。

四、降雨及水文分析

本文為探討研究區域因氣候變遷所引發河川洪水量變化趨勢對防洪系統之衝擊影響評估，因此對研究區域水文資料進行降雨頻率分析及水文逕流模擬，據以建立適用於研究集水區之評估工具。茲將所應用之理論及分析成果分述如下：

4.1 降雨分析

各種氣候變遷分析模式將繁衍(Generate)研究集水區內各雨量站控制點未來短、中、長期之日雨量資料，並配合過去歷史日雨量資料，進一步利用極端值第一類分布(Extreme value type I)統計方法分析流域各雨量站 100 年及 200 年重現期之日降雨量。

對於研究集水區雨型設計之方法，將參考經濟部水利署「水文設計應用手冊」之成果(鄭克聲, 2001)，對於台灣北部地區 24 小時合適之區域設計雨型如圖 2 所示。

4.2 降雨－逕流分析

為探討氣候變遷對研究區域河川防洪系統

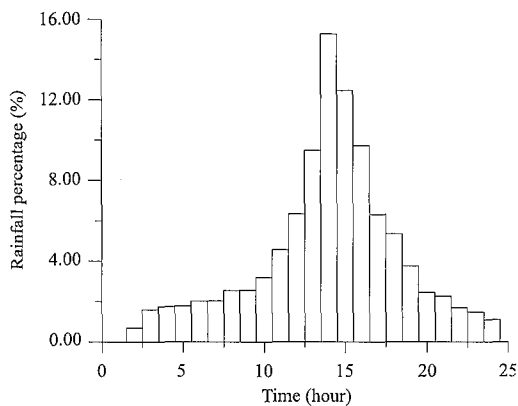


圖 2 台灣北區合適之區域設計雨型

資料來源：經濟部水利署「水文設計應用手冊」，民國 90 年。

之衝擊，因此本研究考慮研究區域內河道蜿蜒、地形複雜與受水庫放水影響等之特性，並具有物理理論基礎之水文模式，因此乃選取半分布並聯型線性水庫降雨－逕流模式(王，1996；Hsieh, 1999)作為本研究之降雨－逕流分析模式，此模式曾應用台北防洪整體檢討計畫(王，1996, 1997, 1998)、淡水河整體洪水預報系統(顏，1998)、基隆河治理方案之水理與水文評估(許，1999)及水災損失評估系統模式之建立(王，2003)，其分析結果均獲致良好之信賴度。茲將此水文模式之理論基礎簡述如下：

根據 Nash(1957)之研究結果指出，一個集水區可視為 n 個線性水庫所串聯，每一個線性水庫具有相當之蓄水常數 K 。倘若每個水庫之蓄水常數不相等，則其第 n 個線性水庫之出流歷線之通式可表示如下(Hsieh, 1999)：

$$U_n(t) = q_n(t) = \int_0^t U_{n-1}(\tau) \frac{1}{K_n} e^{-\frac{(t-\tau)}{K_n}} d\tau$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{K_1} e^{-\frac{t}{K_1}}, N=1 \\ \sum_{i=1}^N \frac{K_i^{N-2}}{\prod_{j=1, j \neq i}^N (K_i - K_j)} e^{-\frac{t}{K_i}}, N \geq 2 \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

進一步假設一單位之有效降雨量瞬間均勻地落集水區上，如圖 3 所示，則其降雨在集水區

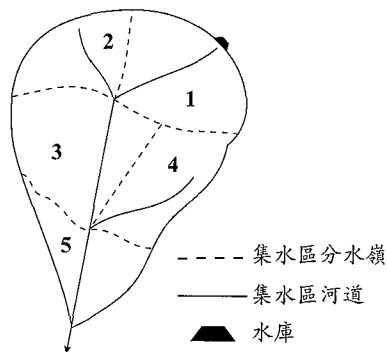


圖 3 集水區示意圖

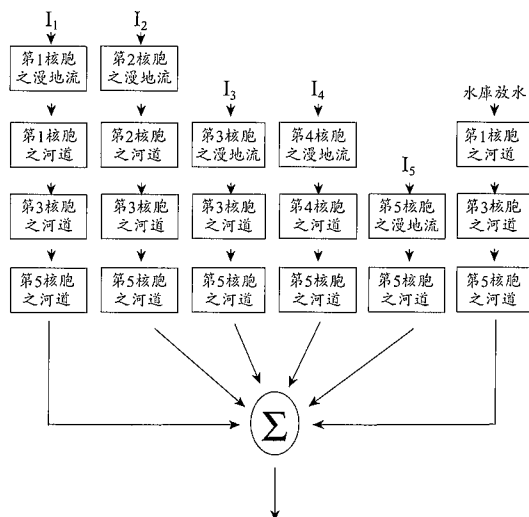


圖 4 模式結構示意圖

中遵循多條流路流達出口處(Rodriguez-Iturbe, 1979a.b)。模式中可將每一流路中之各核胞之漫地流與河渠流視為不同之狀態(state)；且將每一流路比擬為由數個不同狀態所串聯而成，而每一狀態則係利用一線性水庫予以比擬。因此，每一流路之反應是由數個不同線性水庫串聯之結果，而該集水區出口處之反應乃是由所有流路之反應並聯線性所疊加而成，如圖 4 所示。

近年來，由於人口急速增加，水資源更加寶貴，所以常在集水區之上游建造水庫以貯蓄水資源。水庫之興建，將集水區分割成兩個獨立之水文系統。對水庫上游集水區而言，降雨－逕流事件之模擬與一般集水區內水文模擬方式無異；然對水庫下游集水區內降雨－逕流事件之模擬，則

事件/日期	觀 測 值		模 擬 值				
	峰值 (cms)	峰時 (hrs)	峰值 (cms)	峰時 (hrs)	效率 係數	峰值誤差 (%)	峰時誤差 (hrs)
莫 瑞/70.07.18	839.0	47	792.4	47	0.836	-5.55	0
尼爾森/74.08.22	4607.0	40	4510.0	41	0.970	-2.10	1
韋 恩/75.08.23	1370.0	48	1451.2	48	0.920	5.93	0
弗雷特/83.08.20	1420.0	40	1352.8	40	0.900	-4.73	0
席 斯/83.10.10	2349.5	15	2289.8	16	0.936	-2.54	1
賀 伯/85.07.31	5199.7	49	4968.7	52	0.799	-4.44	3
溫 妮/86.08.17	2829.6	11	2812.5	12	0.776	-0.60	1
安 珀/86.08.27	662.0	36	646.4	36	0.748	-2.35	0
瑞 伯/87.10.15	3900.0	40	3808.8	41	0.913	-2.34	1
寶 發/89.09.08	525.0	44	471.0	44	0.871	-10.28	0
平均值					0.867	4.09*	

註：符號*表示為絕對平均值。

事件/日期	觀 測 值		模 擬 值				
	Q _p (cms)	T _p (hrs)	Q _p (cms)	T _p (hrs)	CE	EQ _p (%)	ET _p (hrs)
亞力士/76.07.27	1104.4	11	1096.1	10	0.722	-0.75	-1
傑魯得/76.09.08	1818.8	49	1859.6	50	0.831	2.24	1
莎 拉/78.09.10	1040.0	52	1062.3	53	0.863	2.14	1
楊 希/79.08.18	2675.0	39	2685.0	40	0.945	0.30	1
亞 伯/79.08.30	3085.0	19	3087.5	20	0.968	0.08	1
弗雷特/83.08.20	845.0	34	852.8	35	0.957	0.93	1
葛拉絲/83.09.01	1505.0	17	1504.4	17	0.891	-0.04	0
席 斯/83.10.09	1690.0	42	1798.3	44	0.840	0.41	2
賀 伯/85.07.31	4100.0	51	3871.9	51	0.976	-5.56	0
溫 妮/86.08.17	2025.0	35	1885.6	35	0.908	-6.88	0
象 神/89.10.31	5510.0	36	5514.1	35	0.923	0.07	-1
平均值					0.893	1.76*	

註：符號*表示為絕對平均值。

必須考慮水庫放水對下游河道之影響，因此本模式亦將水庫放水視為一條獨立之流路。最後將水庫放水歷線於水庫下游集水區出口處之流量歷線與水庫下游集水區各核胞之流路在出口處之流量歷線予以線性疊加，如此即可得水庫下游集水區出口處之總流量歷線。

利用半分布並聯型線性水庫降雨－逕流模式模擬大漢溪之三鶯橋上游集水區之模擬結果如表 1 及圖 5 所示。其平均效率係數為 0.867，

峰量誤差平均在 4.09%之內，峰時誤差時刻小於 2 小時。至於新店溪之秀朗橋上游集水區之模擬結果如表 2 及圖 6 所列。其平均效率係數為 0.893，峰量誤差平均在 1.76%之內，峰時誤差時刻小於 2 小時，由此可見檢定結果之誤差皆小於容許誤差範圍內。對於大漢溪之三鶯橋上游集水區及新店溪秀朗橋上游集水區各颱風事件所檢定完成之參數，分別取其平均值作為不同氣候變遷情境模擬設計流量歷線時之水文模式參數。



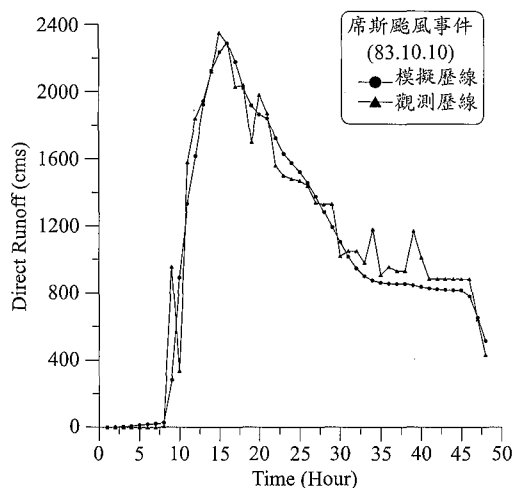


圖 5 大漢溪三鶯橋上游集水區席斯颱風逕流檢定圖

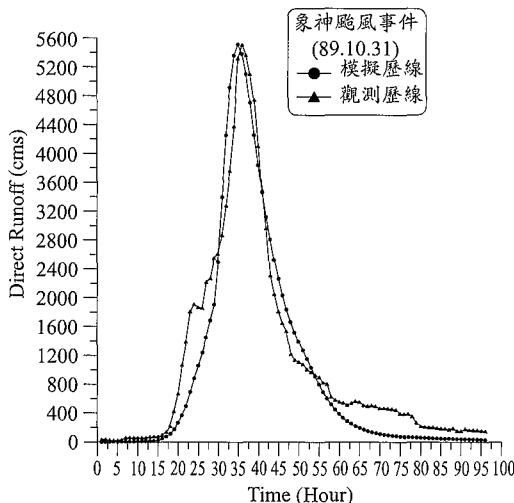


圖 6 新店溪秀朗橋上游集水區象神颱風逕流檢定圖

五、氣候變遷預設情境

氣候變遷衝擊影響評估之研究最重要在預設情境之設立。一般氣候變遷預設情境可分成下列四大類(1)大氣環流模式預測；(2)時間類比；(3)空間類比；及(4)假設。其中大氣環流模式以物理性模擬評估加強大氣溫室氣體導致全球暖化之特性，為目前最成熟之氣候變遷分析工具，故本研究以 GCM 預測資料設定氣候變遷情境。GCM

模擬試驗包括兩大類：平衡(Equilibrium)與漸變(Transition)試驗。

平衡試驗資料常採用為 US Country Studies Program 所提供之資料庫，為模擬大氣 CO₂ 濃度在 280ppm 與 560ppm 時之氣候，GCM 模式包括 CCCM、GFDL、GISS、與 UKMO 四個。平衡式試驗主要在分析 1 倍 CO₂ 與 2 倍 CO₂ 下之氣候，至於何時發生 2 倍 CO₂ 並未加以界定，如要用來設定不同時期之氣候變遷預設情境並不適合。

IPCC 2001 年之報告中，氣候變遷模擬主要為漸變試驗，其根據 SRES (Special Report on Emissions Scenarios)預設情境來模擬氣候變遷，不同於平衡試驗情境，SRES 預設情境屬於溫室氣體排放情境，亦即預測未來可能之經濟、人口、工業與環境的發展趨勢，提出可能溫室氣體排放的趨勢(IPCC 2001)，然後再以 GCMs 預測對應之氣候變化。SRES 考慮到未來可能致力於經濟發展，或是朝永續利用的目標等不同程度的可能情形，以及考慮全球性或是區域性不同發展帶來的影響。分成了 A1、A2、B1、B2 四個情節。IPCC 網站 (www.ipcc.ch) 提供三個模式輸出資料：加拿大 CCCMA (Canadian Center for Climate Modeling and Analysis)之 CGCM2、英國 HCCPR (Hadley Centre for Climate Prediction and Research)之 HADCM3、及澳洲 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)之 CSIRO-Mk2 模式，輸出資料可提供設置從 1990 年至 2100 年之氣候變化情境。

一般 GCMs 為以全球為分析尺度，其解析度往往遠大於生態環境衝擊評估之區域，因此在應用 GCM 輸出資料於衝擊影響評估研究前，必須進行降尺度(Downscaling)之工作，常見降尺度方法分述如下：

方法一：假設研究區域氣候變遷等同於 GCM 最鄰近網格點之預測，在時間之降尺度上，利用氣候變遷預測月平均特性之改變，以直接修正歷史氣象序列。值得注意的是 GCM 模式提供為不同大氣條件下之氣候預測，而非直接預測氣候變化。

表 3 各氣候模式之空間解析度

模式	解析度(緯度×經度)
RSM0	280km×280km
RSM1	50km×50km
RSM2	15km×15km
CCCM	約 3.75°×3.75°
GFDL	約 2.25°×3.75°
GISS	4.0°×5.0°
CGCM2	約 3.75°×3.75°
CSIRO-MK2	約 3.2°×5.6°
HADCM3	3.75°×2.5°

方法二：建立區域氣候與大尺度氣候間關係，再利用此關係由 GCMs 預測值推估區域之氣候變遷。

方法三：利用全球環流模式之結果為邊界條件，在利用區域模式進行降尺度之研究。台灣大學大氣系吳明進教授利用屬於全球環流模式 Global Spectral Model (GSM)_CCM3 之分析結果為邊界，然後利用區域模式 Regional Spectral Model (RSM)，並考量台灣地形因素後，進行降尺度之研究。

本文中衝擊評估之氣候變遷預設情境設立係採用第一與第三類方法，第一類方法直接從 Country Studies Program 之資料庫中選取 CCCM、GFDL、GISS 模式之預測值；第三類方法為台灣大學大氣系吳明進教授提供三個不同解析度之區域模式資料 RSM0 (280 km × 280 km)、RSM1 (50 km × 50 km)、及 RSM2 (15 km × 15 km) (行政院環境保護署，2002)。而各氣候模式之空間解析度彙整如表 3 所示，但無論利用第一或第三類降尺度方法，在空間降尺度皆假設研究區域氣候變遷等同於氣候模式分析結果最鄰近網格點之預測，再利用此預測結果修正研究區域內之繁衍資料。

六、流域洪水量境況分析

流域洪水量境況分析重點是模擬研究流域重要控制點受各種氣候變遷預設情境影響下之尖峰設計流量，並與現有防洪系統規劃設計流量

進行比較。對於氣候變遷預設情境之模擬條件，則主要分為平衡試驗情境與 SRES 預設情境兩類。平衡試驗情境包括 GCMs 之輸出資料以及 RSM 輸出資料，其中 GCMs 採用加拿大的 CCCM、美國 GFDL 與 GISS 三個模式，RSM 依解析度不同分為 RSM0、RSM1、RSM2 三個模式等，共提供六個平衡試驗情境。另外 SRES 預設情境，包括 A2 與 B2 兩種排放情境，以目前由 IPCC 提供之三個模式，分別為加拿大 CCCMA 之 CGCM2、英國 HCCPR 之 HADCM3、及澳洲 CSIRO 之 CSIRO-Mk2 模式輸出資料提供短期、中期及長期情境。利用不同氣候變遷模式情境模擬未來區域溫度變化及降雨量比值。

由於受到氣候模式本身時間解析度之限制，其所能模擬最小時間尺度為日雨量資料，因此首先將各雨量站過去歷史日雨量資料，利用蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)繁衍各雨量站之未來短中長期日雨量資料，進一步利用各種氣候模式與研究區域雨量站最鄰近網格點之降雨比值輸出結果，修訂各雨量站之短中長期日雨量資料，再利用極端值第一類分布統計方法分析各雨量站短中長期之 100 年及 200 年重現期日雨量。

各種氣候變遷預設情境尖峰設計流量之模擬方式是將流域最大保護程度標準重現期降雨總量套配區域設計雨型，然後輸入降雨－逕流水文模式從事尖峰設計流量模擬。對於淡水河大漢溪及新店溪河川流域重要控制點而言，其各種氣候模式降雨條件下之尖峰設計流量模擬結果，詳述如下：

1. 平衡試驗情境

(1) GCMs 平衡試驗

GCMs 平衡試驗預設情境是代表大氣條件達到二倍二氧化碳的氣候變化情境所示。對於研究區域之模擬結果如表 4 所示。從圖表中可知大漢溪流域對於 CCCM、GFD3、GISS 等三種氣候模式預設情境之尖峰設計流量，平均值為 18,634.2 (立方公尺/秒)，平均增量為 4,834 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 35%；另新店



表 4 GCMs 平衡試驗條件下之尖峰設計流量

流域及模式		項目	尖峰設計流量 (立方公尺/秒)	增加量 (立方公尺/秒)	增加百分比 (%)
大漢溪流域 新海橋	CCCM		19,402.0	5,602	40.6
	GFDL		16,495.0	2,695	19.5
	GISS		20,005.8	6,205	45.0
	平均值		18,634.2	4,834	35.0
新店溪流域 華江橋	CCCM		16,389.5	5,589.5	51.7
	GFDL		13,357.9	2,557.9	23.7
	GISS		15,902.5	5,102.5	47.2
	平均值		15,216.6	4,416.6	40.8

註：大漢溪流域新海橋公告規劃設計流量為 13,800(立方公尺/秒)

新店溪流域華江橋公告規劃設計流量為 10,800(立方公尺/秒)

表 5 RSM 平衡試驗條件下之尖峰設計流量

流域及模式		項目	尖峰設計流量 (立方公尺/秒)	增加量 (立方公尺/秒)	增加百分比 (%)
大漢溪流域 新海橋	RSM0		19,767.9	5,968	43.2
	RSM1		17,494.6	3,694	26.8
	RSM2		20,175.6	6,375	46.2
	平均值		19,146.0	5,345.6	38.7
新店溪流域 華江橋	RSM0		15,509.5	4,709.5	43.6
	RSM1		13,707.0	2,907.0	26.9
	RSM2		14,983.5	4,183.5	38.7
	平均值		14,733.3	3,933.3	36.4

溪流域對於三種氣候模式之平均值為 15,216.6（立方公尺/秒），平均增量為 4,416.6（立方公尺/秒），平均增量百分比為 40.8%。對研究區域整體視之，平均增量百分比為 37.9%。

(2) RSM 的平衡試驗

RSM 平衡試驗預設情境利用 NCAR-CCM3 大尺度氣候模式聯絡 RSM 區域模式進行模擬，不過其基準不同於 GCMs 的平衡試驗。RSM 的平衡試驗之一倍二氧化碳是指 355ppm，而兩倍二氧化碳 2×CO₂ 指的是 710ppm。對於研究區域之模擬結果如表 5 所示。從圖表中可知大漢溪流域對於 RSM0、RSM1 及 RSM2 等三種氣候模式預設情境之尖峰設計流量，平均值為 19,146（立方公尺/秒），平均增量為 5,345.6（立方公尺/秒），平均增量百分比為 38.7%；另新店溪流域對於三種氣候模式之平均值為 14,733.3（立方公尺/

秒），平均增量為 3,933.3（立方公尺/秒），平均增量百分比為 36.4%。對研究區域整體視之，平均增量百分比為 37.55%。

最後，對 GCMs 與 RSM 平衡試驗之情境模擬成果進行綜合評估，兩種平衡試驗之洪峰增加率相當接近，但無論是何種氣候變遷平衡試驗結果，其對研究區域河川洪峰設計流量皆有增加之影響。綜合言之，當未來二氧化碳濃度達到二倍時，研究區域河川最大保護標準洪峰流量將平均增加 37.72%。

2. SRES 漸變試驗情境

不同於平衡試驗情境，SRES 預設情境屬於溫室氣體排放情境，亦即預測未來可能之經濟、人口、工業與環境的發展趨勢，提出可能溫室氣體排放的趨勢，然後再以 GCMs 預測對

應之氣候變化。依據 IPCC 第三次報告，目前依照 SRES 排放情境所模擬出來的情境以 A2 與 B2 情節為主。所有大氣環流模式之輸出資料均可由 IPCC Data Distribution Center (IPCC DDC) (http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/asres/sres_home.html) 獲得。目前共提供六個模式輸出資料，本文之 SRES 情境擬採用多數人使用之 CCCma 之 CGCM2 模式、HCCPR 之 HADCM3 模式及 CSIRO 之 CSIRO-Mk2 模式之輸出資料。此三種模式均為 GCMs 中之大氣環流模式(AGCM)與海洋環流模式(OGCM)偶合之模式(AOGCMs)。由於 AOGCMs 模擬出之月平均氣候資料較具不確定性，因此 IPCC 建議將此資料以三十年為週期做平均，來代表未來之氣候變遷情形。以 IPCC DDC 所提供之方法為例，其 Base-line 是以 1961-1990 資料為現況資料，以 2010-2039 年資料進行平均，代表 2025 年氣候變遷資料，可做為短期氣候變遷預設情境；2040-2069 年資料進行平均，代表 2055 年氣候變遷資料，可做為中期氣候變遷預設情境；2070-2099 年資料進行平均，代表 2085 年氣候變遷資料，可做為長期氣候變遷預設情境。茲將 A2 與 B2 情節各短、中、長期之模擬結果詳述如下：

(1) A2 情節：主要描述一個非常多變異性組成的世界。

I. 短期(2025 年)：

對於研究區域之模擬結果如表 6 所示。從表中可知大漢溪流域對於 CGCM2、HADCM3 及 CSIRO-Mk2 等三種氣候模式預設情境之尖峰設計流量，平均值為 16,668.0 (立方公尺/秒)，平均增量為 2,868 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 20.7%；另新店溪流域對於三種氣候模式之平均值為 13,747.9 (立方公尺/秒)，平均增量為 2,947.9 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 27.2%。對整體視之，平均增量百分比為 23.95%。

II. 中期(2055 年)：

對於研究區域之模擬結果如表 7 所示。從表中可知大漢溪流域對於 CGCM2、HADCM3 及 CSIRO-Mk2 等三種氣候模式預設情境之尖峰設計流量，平均值為 16,450.7 (立方公尺/秒)，平

均增量為 2,650.7 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 19.2%；另新店溪流域對於三種氣候模式之平均值為 12,925.9 (立方公尺/秒)，平均增量為 2,125.9 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 19.6%。對整體視之，平均增量百分比為 19.4%。

III. 長期(2085 年)：

對於研究區域之模擬結果如表 8 所示。從表中可知大漢溪流域對於 CGCM2、HADCM3 及 CSIRO-Mk2 等三種氣候模式預設情境之尖峰設計流量，平均值為 18,752.6 (立方公尺/秒)，平均增量為 4,952.6 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 35.8%；另新店溪流域對於三種氣候模式之平均值為 15,037.1 (立方公尺/秒)，平均增量為 4,237.1 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 39.2%。對整體視之，平均增量百分比為 37.5%。

對於研究區域 A2 短、中、長期流量增加率變化趨勢而言，並無呈現固定漸變趨勢。

(2) B2 情節：主要描述地方性經濟、社會與環境永續性的結果。

I. 短期(2025 年)：

對於研究區域之模擬結果如表 9 所示。從表中可知大漢溪流域對於 CGCM2、HADCM3 及 CSIRO-Mk2 等三種氣候模式預設情境之尖峰設計流量，平均值為 17,250.0 (立方公尺/秒)，平均增量為 3,450.0 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 25.0%；另新店溪流域對於三種氣候模式之平均值為 13,692.7 (立方公尺/秒)，平均增量為 2,892.7 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 26.8%。對整體視之，平均增量百分比為 25.9%。

II. 中期(2055 年)：

對於研究區域之模擬結果如表 10 所示。從表中可知大漢溪流域對於 CGCM2、HADCM3 及 CSIRO-Mk2 等三種氣候模式預設情境之尖峰設計流量，平均值為 16,302.5 (立方公尺/秒)，平均增量為 2,502.5 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 18.1%；另新店溪流域對於三種氣候模式之平均值為 13,088.1 (立方公尺/秒)，平均增量為 2,288.1 (立方公尺/秒)，平均增量百分比為 21.2%。對整體視之，平均增量百分比為 19.65%。

表 6 SRES 試驗情境下之尖峰設計流量(A2 情節短期)

流域及模式	項目	尖峰設計流量 (立方公尺/秒)	增加量 (立方公尺/秒)	增加百分比 (%)
大漢溪流域 新海橋	CGCM2	16,806.0	3,006	21.7
	HADCM3	18,861.3	5,061.3	36.6
	CSIRO-Mk2	14,336.9	536.9	3.8
	平均值	16,668.0	2,868.0	20.7
新店溪流域 華江橋	CGCM2	13,985.0	3,185	29.4
	HADCM3	15,176.6	4,376.6	40.5
	CSIRO-Mk2	12,082.1	1,282.1	11.8
	平均值	13,747.9	2,947.9	27.2

表 7 SRES 試驗情境下之尖峰設計流量(A2 情節中期)

流域及模式	項目	尖峰設計流量 (立方公尺/秒)	增加量 (立方公尺/秒)	增加百分比 (%)
大漢溪流域 新海橋	CGCM2	13,843.5	43.5	0.31
	HADCM3	20,078.8	6,278.8	45.4
	CSIRO-Mk2	15,430.0	1,630	11.8
	平均值	16,450.7	2,650.7	19.2
新店溪流域 華江橋	CGCM2	11,110.9	310.9	2.8
	HADCM3	15,112.6	4,312.6	39.9
	CSIRO-Mk2	12,554.2	1,754.2	16.2
	平均值	12,925.9	2,125.9	19.6

表 8 SRES 試驗情境下之尖峰設計流量(A2 情節長期)

流域及模式	項目	尖峰設計流量 (立方公尺/秒)	增加量 (立方公尺/秒)	增加百分比 (%)
大漢溪流域 新海橋	CGCM2	18,739.0	4,939	35.7
	HADCM3	22,614.3	8,814.3	63.8
	CSIRO-Mk2	14,904.7	1,104.7	8.0
	平均值	18,752.6	4,952.6	35.8
新店溪流域 華江橋	CGCM2	15,507.7	4,707.7	43.5
	HADCM3	17,353.2	6,553.2	60.6
	CSIRO-Mk2	12,250.4	1,450.4	13.4
	平均值	15,037.1	4,237.1	39.2

表 9 SRES 試驗情境下之尖峰設計流量(B2 情節短期)

流域及模式	項目	尖峰設計流量 (立方公尺/秒)	增加量 (立方公尺/秒)	增加百分比 (%)
大漢 溪流 域新 海橋	CGCM2	15,939.4	2,139.4	15.5
	HADCM3	20,242.5	6,442.5	46.6
	CSIRO-Mk2	15,568.1	1,768.1	12.8
	平均值	17,250.0	3,450.0	25.0
新店溪 流域 域華 江橋	CGCM2	12,602.1	1,802.1	16.6
	HADCM3	16,074.7	5,274.7	48.8
	CSIRO-Mk2	12,401.2	1,601.2	14.8
	平均值	13,692.7	2,892.7	26.8

表 10 SRES 試驗情境下之尖峰設計流量(B2 情節中期)

流域及模式		項目	尖峰設計流量 (立方公尺/秒)	增加量 (立方公尺/秒)	增加百分比 (%)
大漢溪流域 新海橋		CGCM2	15,570.5	1,770.5	12.8
		HADCM3	18,022.4	4,222.4	30.5
		CSIRO-Mk2	15,314.6	1,514.6	10.9
		平均值	16,302.5	2,502.5	18.1
新店溪流域 華江橋		CGCM2	12,240.7	1,440.7	13.3
		HADCM3	14,615.9	3,815.9	35.3
		CSIRO-Mk2	12,407.6	1,607.6	14.8
		平均值	13,088.1	2,288.1	21.2

表 11 SRES 試驗情境下之尖峰設計流量(B2 情節長期)

流域及模式		項目	尖峰設計流量 (立方公尺/秒)	增加量 (立方公尺/秒)	增加百分比 (%)
大漢溪流域 新海橋		CGCM2	19,572.8	5,772.8	41.8
		HADCM3	22,300.6	8,500.6	61.5
		CSIRO-Mk2	16,680.7	2,880.7	20.8
		平均值	19,518.0	5,718.0	41.4
新店溪流域 華江橋		CGCM2	14,599.0	3,799	35.1
		HADCM3	17,166.5	6,366.5	58.9
		CSIRO-Mk2	13,222.9	2,422.9	22.4
		平均值	14,996.1	4,196.1	38.9

III. 長期(2085 年)：

對於研究區域之模擬結果如表 11 所示。從表中可知大漢溪流域對於 CGCM2、HADCM3 及 CSIRO-Mk2 等三種氣候模式預設情境之尖峰設計流量，平均值為 19,518.0（立方公尺/秒），平均增量為 5,718（立方公尺/秒），平均增量百分比為 41.4%；另新店溪流域對於三種氣候模式之平均值為 14,996.1（立方公尺/秒），平均增量為 4,196.1（立方公尺/秒），平均增量百分比為 38.9%。對整體視之，平均增量百分比為 40.15%。

進一步綜合比較 A2 與 B2 情境之分析成果，從表 12 可知其短、中、長期之變化趨勢相同，皆是中期(2055 年)時段流量增加率變小，而在長期(2085 年)時段流量增加率再增大，且三個時期皆以長期之流量增加率最大。由此可見，在 SRES 漸變試驗假設未來氣候變遷條件之下，於短、中、長期皆有升高之趨勢，且其洪峰流量平均增加率分別為 24.9%、19.5%及 38.8%。

表 12 SRES 漸變試驗情境於短、中、長期流量增加率彙整表

試驗情境 階段	A2	B2	平均
短期	23.95	25.9	24.9
中期	19.4	19.65	19.5
長期	37.5	40.15	38.8

從上述洪峰流量平均增加率，可知短中長期尖峰流量之變化趨勢，在中期之尖峰流量增加的百分比較小，其原因為逕流模式模擬短中長期尖峰流量，由於假設逕流模式參數、目前雨量站雨量資料統計特性及設計雨型不隨時間而變，因此尖峰流量之變化最主要是受到未來短中長期降雨量輸入多寡而影響，而此降雨量之求取係利用各種氣候模式與研究區域雨量站最鄰近網格點之降雨比值輸出結果，修訂各雨量站之短中長期日雨量資料，再利用極端值第一類分布統計方法

分析各雨量站短中長期之 100 年及 200 年重現期日雨量，進一步查詢各種氣候模式與研究區域雨量站最鄰近網格點之降雨比值輸出結果，發現於中期之降雨比值皆較短期與長期小，因此造成中期 100 年及 200 年重現期之日雨量比短期與長期 100 年及 200 年重現期之日雨量小，因而亦導致逕流模擬短中長期尖峰流量變化趨勢時，中期之尖峰流量增加百分比將減小。

至於氣候模式為何會有此趨勢，其原因是氣候變遷衝擊評估乃依據各排放情境由各模式模擬結果進行評估。排放情境只是假設未來工業、經濟與環境保護的發展情況，擬定未來各溫室氣體可能的變化情形。各模式會考慮跟氣體排放有關的物理特性的物理過程，然而每個模式對於各氣體排放所反應的物理過程並不太一樣，有些與形成降雨條件是成正關係，而有些是呈負關係，然在進行短中長期降雨變化趨勢模擬時，這些氣候模式影響因子透過假設與境況模擬，將造成降雨結果多樣性變化，不一定呈現穩定增加趨勢，亦有可能如本研究趨勢一致，短期與長期增加的百分比比中期增加的百分比大。

七、防洪系統衝擊評估

經以淡水河大漢溪及新店河流域評估未來氣候變遷條件對其集水區防洪系統之衝擊影響，彙整各種情境下設計洪水量變化趨勢如表 13 所示，其結果顯示不論是以平衡試驗氣候變遷預設情境，或是在 SRES 氣候變遷預設情境下，其河川流域最大保護標準洪峰流量將有增加之趨勢。而此一河川洪水增加量對流域現有防洪系統有何衝擊性？將從現有堤防防洪能力、法規設計標準及災害管理系統等方面進行探討，分述如下：

- (1) 可能有溢堤之潛在危機：根據過去河川治理規劃報告得知，現有堤防高程是流域最大保護程度規劃高程再加上 1.5 公尺出水高度安全係數。因此此一出水高度是否足以應付因氣候變遷所增加之河川洪水量，是值得重新評估檢討。
- (2) 河川抽水站及排水系統設計標準需重新擬

表 13 各情境下設計洪水量變化趨勢

河川流域及控制點		大漢溪 新海橋	新店溪 華江橋
情境條件及模式			
平衡試驗情境	CCCM	+	+
	GFDL	+	+
	GISS	+	+
RSM-97V	RSM0	+	+
	RSM1	+	+
	RSM2	+	+
SRES(A2)長期	CGCM2	+	+
	HADCM3	+	+
	CSIRO-Mk2	+	+
SRES(A2)中期	CGCM2	+	+
	HADCM3	+	+
	CSIRO-Mk2	+	+
SRES(A2)短期	CGCM2	+	+
	HADCM3	+	+
	CSIRO-Mk2	+	+
SRES(B2)長期	CGCM2	+	+
	HADCM3	+	+
	CSIRO-Mk2	+	+
SRES(B2)中期	CGCM2	+	+
	HADCM3	+	+
	CSIRO-Mk2	+	+
SRES(B2)短期	CGCM2	+	+
	HADCM3	+	+
	CSIRO-Mk2	+	+

註：+表示增加趨勢；-表示減少趨勢。

定：現行河川下水道排水系統大多是以五年重現期設計標準規劃設計，而其抽水站外水位是以 10 年重現期主河道水位標準進行抽水容量設計。因此未來當受到氣候變遷影響時，從本研究分析成果顯示，集水區之颱風逕流量將增加，且河川外水位亦將提高，導致這些抽排系統容量之設計標準勢必須要重新檢討。

(3) 河川整體防洪操作規則亦必須重新調整：依據結果顯示，氣候變遷將造成河川洪水量增加，因此現行河川整體防洪操作策略亦應重新修訂，例如水庫於颱風期間之操作規則，下游防洪閘門之啓閉機制修訂、抽水站之運轉規則等。

- (4) 增加新建防洪系統之投入成本：若為考慮氣候變遷對河川洪水量之影響，則所規劃新建之防洪系統，其保護程度亦應相對提高，如此將增加防洪系統工程之興建經費。
- (5) 監測站網系統需補強更新：由於氣候變遷導致集水區降雨強度增大，河川洪水量增加，因此現有監測系統可能無法達到即時監控之要求，勢必需要補強更新。
- (6) 災害規模將擴大，增加防救災管理成本：依據氣候變遷情境條件所增加之河川洪水量，將導致洪水災情更加嚴重。為因應此災情擴大可能性，整體防救災之救災物資及人員亦將增加，致使防救災管理成本亦相對增加。

然上述衝擊影響評估，由於在分析過程中隱含許多誤差來源，致使本研究分析成果具有某種程度之不確定性，其誤差來源大致可歸類如下：

1. 由於氣候預設情境所複製日雨量資料之不確定性因素。
2. 各種氣候預設情境模擬結果之不確定性。
3. 水文分析資料之不確定性。
4. 水文模式系統誤差之不確定性。
5. 過去所公告之規劃設計流量不確定性。

八、結 論

本研究經由資料蒐集、降雨及水文分析、整合氣候變遷分析成果及流域洪水量境況分析等程序，以推論氣候變遷對研究區域河川防洪系統之衝擊影響，分析成果相當豐碩，並可獲致以下之具體結論：

1. 從分析流程及模擬成果而言，本研究已建立適用於氣候變遷對集水區防洪系統衝擊影響之評估方法，未來將可推廣至其他流域，以做為氣候變遷對全台防洪系統整體性衝擊影響之評估。
2. 經以大漢溪及新店溪流域評估未來氣候變遷條件對其集水區防洪系統之衝擊影響，其結果顯示不論是以平衡試驗氣候變遷預設情境，或是在 SRES 氣候變遷預設情境下，其河川流域最大保護標準洪峰流量將有增加之趨勢。

3. 針對因氣候變遷所引致河川洪水增加量對流域現有防洪系統之衝擊影響，本研究從現有堤防防洪能力、法規設計標準及災害管理系統等方面進行探討，已提出具體之潛在衝擊影響，相信可做為相關單位未來於研擬集水區綜合治理方案上之重要參考資料。
4. 氣候變遷影響評估具有相當高之不確定性，其不確定性主要來源為大氣模式之模擬、降尺度分析、及衝擊評估模式。其中又以大氣模式之不確定性最高，不同 GCM 模式往往在量預測上有顯著差異，而在趨勢上有較相近之特性，因此在應用上，建議採用多個 GCM 模式預測值設置氣候變遷預設情境，就衝擊評估之結果進行分析，趨勢分析可信度較高，而預測變化量之參考價值相對較低，且不宜直接應用於決策，如前述尖峰流量分析確定有增加之趨勢，然平均增加率約為 33.5% 之尖峰流量不確定性則相當高，不宜直接引用於增加防洪設計標準。

致 謝

感謝行政院環境保護署委辦計畫(計畫編號：EPA-91-Fa11-03-A100)提供研究經費支助，始得完成本文之研究，在此謹致謝忱。

參考文獻

1. 王如意等人，1996，台北防洪整體檢討計劃(一)，經濟部水利署委託研究報告。
2. 王如意等人，1997，台北防洪整體檢討計劃(二)，經濟部水利署委託研究報告。
3. 王如意等人，1998，台北防洪整體檢討計劃(三)，經濟部水利署委託研究報告。
4. 王如意、謝龍生，1996，半分布並聯型線性水庫降雨—逕流模式之研究，第八屆水利工程研討會論文集。
5. 王如意等人，2003，水災損失評估系統模式之建立(2/2)，經濟部水利署委託研究報告。
6. 行政院災害防救委員會，2002，旱災中央災害應變中心總結報告。
7. 行政院環境保護署，氣候變化綱要公約國家

- 通訊衝擊調適資料建置－氣候、水文、生態部分(一)，計畫編號：EPA-91-FA11-03-A100。
8. 吳志剛、楊道昌、游保杉，2000，氣候變遷對高屏流域水資源衝擊探討，第十一屆水利工程研討會，p81-83，台北市。
 9. 洪念民、童慶斌、譚義績，1998，氣候變遷對台中水利會大安溪灌渠缺水率之影響，台灣水利，第 46 卷第 2 期，p48-59。
 10. 許晃雄，2001，台灣環境變遷與全球氣候變遷衝擊之評析-氣候變遷(III)，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
 11. 許銘熙、謝龍生、簡名毅，1999，基隆河治理方案之水利與水文評估，防災國家型科技計畫辦公室，NAPHM88-17。
 12. 鄭克聲等人，2001，水文設計應用手冊，經濟部水利署委託研究報告。
 13. 顏清連、王如意、許銘熙等人，1998，淡水河整體洪水預報系統模式之研發，國立台灣大學水工試驗所研究報告。
 14. 羅俊雄等人，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。
 15. 經濟部水資源規劃統一委員會，1970，台北地區防洪計畫檢討報告。
 16. Arnell, N. W., and Reynard, N. S., 1996, "The Effect of Climate Change due to Global Warming on River Flow in Great Britain", *Journal of Hydrology*, 183, p397-424.
 17. Harrison, G. P., and Whittington, H. W., 2002, "Susceptibility of the Batoka Gorge Hydroelectric Scheme to Climate Change", *Journal of Hydrology*, 264, p230-241.
 18. Hsieh, L. S. and Wang, R. Y., 1999, 'A Semi-Distributed Parallel-Type Linear Reservoir Rainfall-Runoff Model and Its Application in Taiwan', *Journal of Hydrological Processes*, 13, pp. 1247~1268.
 19. IPCC, WGI, 1995. Climate Change 1995: The Science of climate change: Contribution of Working Group I, Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenburg and K. Maskell (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 1996, 572pp.
 20. IPCC, 1996: *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. J.T. Houghton, L.G. Meria Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenburg and K. Maskell (eds.), Cambridge University Press, 572pp.
 21. IPCC, WGI, 2001. Climate Change 2001-The Scientific Basis: Contribution of Working Group I, to the third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. A. Johnson, 2001, Cambridge University Press, Cambridge, 2001, 881pp.
 22. Loukas, A. Vasiliades, L., and Dalezios, N. R., 2002, "Potential Climate Change Impacts on Flood Producing Mechanisms in Southern British Columbia, Canada using the CGCMA1 Simulation Results", *Journal of Hydrology*, 259, pp. 163-188.
 23. Mimikou, M. A., Baltas, E., Varanou, W., and Pantazis, K., 2000, "Regional Impacts of Climate Change on Water Reservoirs Quantity and Quality Indicators", *Journal of Hydrology*, 234, pp. 95-109.
 24. Nash, J. E., 1957, "The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph", IASH Publication No.45, Vol. 3-4, pp. 114-121.
 25. Rodriguez-Iturbe and J. B. Valdes, 1979, "The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response", *Water Resources Research*, 15(6), pp. 1409-1420.
 26. Rodriguez-Iturbe, G. Devoto and J. B. Vades, 1979, "Discharge Response Analysis and Hydrologic Similarity : The Interrelation between the Geomorphologic IUH and the

- Storm Characteristics” Water Resources Research, 15(6), pp. 1435-1444.
27. Tung, C. P. and Haith, D. A., 1995. Global warming effects on New York Stream flows. Journal of Water Resources Planning and

Management 21(2), pp.216-225.

收稿日期：民國 93 年 2 月 3 日

修正日期：民國 93 年 7 月 16 日

接受日期：民國 93 年 7 月 21 日