

員山子分洪隧道受氣候變遷影響之脆弱度分析

The Analysis of Vulnerability for Yuan-San-Zhi Flood Division Tunnel under the Effect of Climate Changes

國立臺灣大學水工試驗所
暨綜合災害研究中心
副研究員
暨生物環境系統工程學系
兼任副教授

賴進松*

Jihn-sung Lai

經濟部水利署
正工程司兼綜合企劃組
組長

張國強

Kuo-chyang Chang

國立臺灣大學
綜合災害研究中心
特約助理研究員

潘宗毅

Tsung-yi Pan

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授
兼水工試驗所暨綜合災害
中心主任

譚義績

Yih-chi Tan

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

童慶斌

Chin-pin Tung

國立臺灣大學
生物環境系統工程學研究所
碩士班研究生

林彥廷

Yan-ting Lin

摘要

本研究分析淡水河流域受到氣候變遷之影響下，對淡水河流域重要水利防洪設施之一之員山子分洪隧道之可能影響。因氣候變遷之影響，未來除了極端氣候事件之強度可能強化之外，極端氣候事件發生之頻率亦可能因氣候變遷之影響而提昇，故為探討氣候變遷對員山子分洪設施可能之影響，本研究由蒐集大氣環流模式(GCMs)對氣候變遷之預測資料開始，以降尺度模式修正 GCMs 之預測資料，並應用降尺度模式之結果，預測未來降雨量之變化，之後以降雨—逕流模式計算未來員山子分洪隧道增加之分洪量，研究中將未來之分洪量與員山子分洪隧道之最大分洪量比較後，以脆弱度表現未來員山子分洪可能受到之衝擊程度。

由分析結果可知，臺北氣象站於未來短期內，其濕季(5-10 月)平均雨量將明顯

*通訊作者，國立臺灣大學水工試驗所副研究員，10617 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，jslai525@ntu.edu.tw

提昇；因此本研究中針對員山子分洪設施未來可能受到之衝擊進行分析，並將分析結果以「脆弱度」指標表示。其結果顯示：若未來全球經濟活動趨向 A2 情境，則應對員山子分洪設施進行中長期之調適策略規劃，若趨向 B2 情境，則應著重短期之調適策略規劃。

關鍵詞：氣候變遷，降尺度分析，洪水預報，脆弱度，員山子分洪隧道。

ABSTRACT

This study focuses on the impact of climate changes on the Yuan-Shan-Zih flood division tunnel in the upstream of the Tanshui River basin. Being one part of the flood prevention system in Tanshui River basin, the magnitude of impact on the Yuan-Shan-Zih flood division tunnel is determined herein. The study starts from collecting projection data of climate changes from global circulation models (GCMs). Then downscaling models are applied to analyze the magnitude of rainfall under the effect of climate changes. After the downscaling process, we use the downscaled data to calculate the discharge passing through the Yuan-Shan-Zih flood division tunnel, which represents the impact of the climate changes on the Yuan-Shan-Zih flood division tunnel. Finally, based on the maximum discharge of the Yuan-Shan-Zih flood division tunnel and the calculated discharge, the vulnerability index is calculated to describe the impact of climate changes on the Yuan-Shan-Zih flood division tunnel.

The results show that the rainfall will increase significantly at the Taipei rain gauge during wet season (May- October) in the future. Futhermore, we analyze the impact of climate changes on the Yuan-Shan-Zuh flood division tunnel. The result points out that the vulnerability of the Yuan-Shan-Zih flood division tunnel might reach 100% due to overloading in mid-term (2040-2069) and long-term (2070-2099) period under A2 scenario and short-term (2010-2039) period of B2 scenario. Therefore, the adaption strategy should be applied to mid-term and long-term period if the greenhouse gases emission scenario is close to A2 scenario while the adaption strategy should be applied in short-term period if the emission scenario is likely to be B2.

Keywords: Climate change, Downscaling analysis, Flood forecasting, Vulnerability, Yuan-Shan-Zih flood diversion tunnel.

一、緒 論

1.1 前言

根據「政府間氣候變遷委員會」(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於 2001 年之第三次評估報告中之預測，未來東亞及東南亞地區發生高溫之頻率逐漸升高，且夏季驟雨發生之頻率增加、雨量亦有增加之趨勢[11]，而根據

過去對於氣候變遷之相關研究，豐水期雨量(包括梅雨與颱風)在北部地區呈現增加，而中南部地區則呈現減少之現象。但降雨量之變異性(標準偏差)亦呈現北部增加而中南部地區減少之現象，顯示北部與東部地區豐水期降雨量平均值雖增加，但其降雨量變動性亦增大，故可能導致較為頻仍之旱澇災害[5]。於翡翠水庫集水區之研究亦顯示，降雨事件之發生，有逐漸增強之趨

勢，亦即未來發生較大降雨之次數增多。而模擬翡翠水庫集水區入流量時，發現七月流量將會大幅增加，而十、十一、十二月之入流量亦普遍增加，五月及六月卻為減少。豐枯水期之分界有改變之跡象[7]。為有效因應未來挑戰，有必要分析氣候變遷可能導致之災害，並發展可用之災害影響評估模式，以分析災害之影響程度及評估各項調適策略之可能功效，並協助調適策略之選擇。

淡水河系幹流全長 159 公里，流域面積 2726 平方公里，為臺灣第三大河川，由大漢溪、新店溪及基隆河三主要支流匯集於臺北盆地。盆地內屬於臺北院轄市及臺北縣等臺灣首善之區，約 500 萬人集中於中下游平原地區。由於盆地內地勢低窪，河道高程均低於海平面，淡水河流經臺北盆地之河段，感潮情況甚為明顯，每當颱風過境，挾帶大量豪雨，洪水不及宣洩，往往造成重大災害[1]。各管轄單位分別進行不同之防洪計畫，大多以築堤為主要手段、洪水平原管制及洪水預報為輔助，以期減少災害損失。過去水利設施多根據歷史水文資料分析，並假設其統計特性不變來進行設計；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，然而全球氣候變遷之影響即在改變氣候、地表水文、與海水位之特性。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，值得重新評估檢討[4]。為及早因應氣候劇變對水利防災應變之衝擊，應針對不同之水利防洪設施進行衝擊評估，並分析於各種氣候變遷情境下，對水利防洪設施之潛在衝擊，及水利防洪設施之脆弱度與調適策略。本研究以員山子分洪隧道進行探討，目的為提供未來氣候變遷對水工構造物影響相關研究之研究流程，及氣候變遷造成其脆弱度之評估方法。

1.2 文獻回顧

脆弱度之概念於 2001 年之 IPCC 第三次評估報告中，其定義為「系統無法完全調適氣候變遷之變化，因而受到此變化帶來之負面效應傷害。氣候變遷之變化包括氣候變遷帶來之氣候多變

性及極端氣候事件之強化。」[8]，而 IPCC 於 2007 年之第四次評估報告中，亦延用第三次評估報告中之脆弱度定義，並以脆弱度做為分析世界各國受氣候變遷威脅程度之指標[14]。脆弱度之概念為「表現環境系統所承受之壓力」[9]，此壓力與環境系統暴露之程度及持續時間相關[8,9]，由於目前並沒有一套標準之方法可以衡量人與環境間之互動[10]，因此脆弱度分析之目的在於提供一個在氣候變遷情境下，人與環境間互動關係之衡量指標。

Cutter *et al.* (2003)解釋脆弱度研究之重要性在於了解造成「脆弱」之原因及條件；脆弱度分析整合「風險」及「暴露量」兩個指標，提供對於災害強度及減災規劃之參考[18]。其他有關於脆弱度之定義尚有聯合國 DMTP (Disaster Management and Training Programme)定義脆弱度為「一指定元素受到指定之災害種類，及指定之災害強度之影響下，可能之受損程度。」，並建議脆弱度由 0~1 之數值或以百分比表示，以顯示所探討元素所可能受到損失之嚴重程度。由於不同型態之危害事件對目標物之毀壞風險不同。因此，大部分減災工作即著重於脆弱度之降低。為了有效降低脆弱度，決策者須要掌握已確認(identify)之主要害事件中，何種元素(element)具有被壞之最高風險。而決策者亦須嘗試將可清楚描述之脆弱度及損失量化，以幫助減災之規劃[16]。

目前對於脆弱度之相關研究有：Carter *et al.* (1994)提出脆弱度分析之七個步驟，其提出之分析步驟如圖 1 所示[13]。進行分析之第一步為定義所探討之問題。本研究所面臨之問題為：氣候變遷是否會影響員山子分洪之排洪能力？而主要影響員山子分洪隧道安全性之因素為氣候變遷之後是否造成員山子分洪隧道之分洪需求增加，故研究中之問題為：氣候變遷帶來之河川流量增加，是否造成超出員山子分洪最大負載之情況；第二步為選擇適當之評估方法，研究中之評估方法為分析氣候變遷造成之水文量變化後，將氣候變遷對員山子分洪隧道造成之衝擊已脆弱度指標轉化為 0~1 之間之脆弱度；研究中之

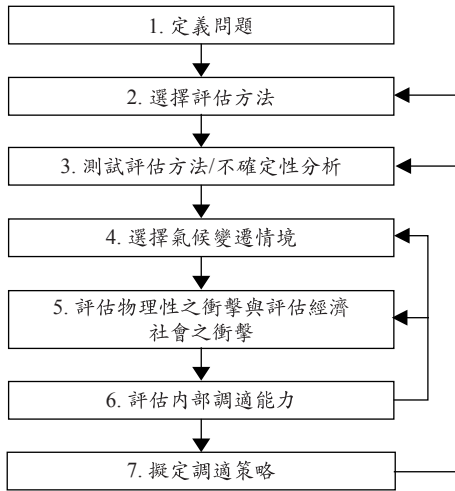


圖 1 氣候變遷衝擊之分析步驟[13]

第三步與第四步合併，由於氣候變遷本身具有高不確定性，而 IPCC 將氣候變遷之推估分為四個 SRES 情節以降低氣候變遷預測之不確定性，故不確定性分析之部分合併於氣候變遷情節之選擇中；第四步之氣候變遷情節選擇將於後段詳述；第五步中由於本研究不涉及氣候變遷對社會經濟之衝擊部分，故只討論物理性之衝擊，研究中討論氣候變遷是否造成分洪流量超過員山子分洪設施所能負荷之流量，將超出員山子分洪設計流量定義為造成「脆弱」之原因，並討論發生之可能性；由於本研究所討論之目標為「水利防洪設施」，單以「設施」而言，不具有內部調適能力，而必須由外部之操作方法改善，及對於設施之強化加以調適，而本研究中不討論關於氣候變遷之因應對策，故省略步驟六、七。

其它對於脆弱度之討論尚有：Feenstra *et al.* (1998)提出氣候變遷下環境衝擊之分析項目及分析方法，分析項目中包括氣候變遷對社會經濟之影響 [20]，其它脆弱度量之相關研究有 Vörösmarty *et al.* (2000)討論氣候變遷對全球水資源之影響，並以可支配之水資源量表示脆弱度 [28]，Luers *et al.* (2003)討論日夜溫差變化對墨西哥 Yaqui Valley 農業區造成之脆弱度，Luers 之研究中以日夜溫差之變化量換算為脆弱度，並定義調適度為調適前與調適後之脆弱度差異之函

數[24]；Ford *et al.* (2006)分析氣候變遷下加拿大 Arctic Bay 區域脆弱度之影響因子[21]。比對上述研究中所討論之脆弱度因子，可以發現各研究中所關注之造成脆弱度之因子皆有所不同，固脆弱度指標因探討之區域環境及所探討之尺度不同，可以設定不同之脆弱度計算方法及門檻值，但必須符合 Adejuwon *et al.* (2001)對於脆弱度之定義：脆弱度為一個函數，其因子包括指定系統對於氣候變遷之敏感程度，系統本身之調適能力及系統於氣候變遷造成災害中之暴露程度[8]。

本研究以淡水河流域為研究範圍，針對員山子分洪設施受極端氣候影響時研析其系統之脆弱度，以提供決策單位評估未來氣候變遷之風險進行減災規劃。由於本研究探討對象為一水利防洪設施員山子分洪隧道之脆弱度，因此研究中所計算之脆弱度係指水利防洪設施在危害事件 (hazard)中，失去作用之傾向程度(propensity)，針對一給定之危險事件等級以失效百分比或0~1間之數值表示。

二、研究方法

由於氣候變遷之原始資料尺度與水利防洪設施計算脆弱度之尺度差異極大，為進行水利防洪設施脆弱度之定量探討，其降尺度過程假設忽略其不確定性，亦假設水利防洪設施所在流域於氣候變遷後，地形、植被、土地利用皆不改變，亦不考慮水利防洪設施結構老化、人為破壞之風險。整體研究流程可以下列步驟說明：

步驟 01：蒐集全球環流模式(GCMs)針對不同溫室氣體排放情境所模擬之氣象因子變化量，包括雨量變化及海水位變化。

步驟 02：蒐集欲研析流域之歷史氣象資料，包括雨量測站、流量水位測站之觀測紀錄。

步驟 03：選擇適當之統計理論，針對全球環流模式之氣象因子(雨量)與研析流域之觀測紀錄進行時間及空間降尺度分析。

步驟 04：以研析流域之水文觀測資料進行水文、水理模式之建立(檢定及驗證)。

步驟 05：決定水利防洪設施所承受之事件情境。一般以水利防洪設施規劃之保護程度

作為探討標準，例如員山子分洪設施係以 200 年重現期之洪水為規劃原則。

步驟 06：由溫室氣體排放情境求得之氣象因子調整值及欲探討流域之洪水情境與水文條件，合成雨量站之逐時雨量變化。

步驟 07：以水文、水理模式模擬水利防洪設施周遭之水文環境。

步驟 08：將各水文量代入各水利防洪設施之脆弱度模式以求得該重現期事件下之脆弱度。

2.1 氣候變遷情境建立

本研究根據 SRES 情節模擬之未來氣候分析預設情境，SRES 情節為 IPCC 提出之溫室氣體排放情境，亦即預測全球未來可能之經濟、人口、工業與環境之發展，提出數種可能溫室氣體排放之趨勢。考量到未來可能致力於經濟發展，或是朝永續利用之目標等不同程度之可能情形，以及考慮全球性或是區域性不同發展帶來之影響。分成 A1、A2、B1、B2 四個主要情節，因四個情節是在 IPCC 之報告「Special Report on Emission Scenario」中提出，故這四個情節稱為 SRES 情節。有關此四個情節中之假設(storyline)，說明如下：

A1：代表快速之經濟成長，全球人口在 21 世紀中期時達到尖峰，之後便開始下降。並且擁有有效的科技技術。主要的主題在於實際人口減少、地區之聚合、建築物容積增加、教育增進對社會之影響。

A2：描述一個非常多變異性組成之世界。主要主題在於各國自立更生，與維持地方發展，而全球人口不斷增加。經濟成長主要為區域性成長，而每人經濟成長率及技術之改進較其他情節破碎且緩慢。

B1：如同 A1 情節，全球人口在 21 世紀中期時達到尖峰，之後開始下降，但經濟結構卻朝向一個服務與資訊之經濟結構。能源使用減少，並引用乾淨且有效率之技術。注重經濟、社會與環境的永續性，卻不考慮額外之起始氣候條件。

B2：主要描述地方性經濟、社會與環境永續性之結果。全球人口持續增加，卻比 A2 情節慢。經濟發展中等，而科技之改變比 B1、A1 較緩且更多相異性。而情節主要也以社會平等與環境之保護為目標，且發展為區域性發展 [25]。

四個情節主要差異在於經濟發展或致力於環境維護以及區域性發展或全球性發展，各情節對於未來之經濟發展情境及經濟發展型態做不同之設定。SRES 將未來發展成四個情節之後，每個情節包含數個協調之情境以及 1~4 個具不確定性之情境，組成了共 40 個情境之資料，提供研究者與各國決策者使用。四個情節的排放情形可由圖 2 看出。顯示不同之經濟、人口、環境發展將導致不同之排放情形，也因此未來之發展與調適策略將影響排放程度，而排放程度亦影響未來發展與調適策略。

根據 IPCC 對 A2 與 B2 情節之預估，A2 情節之溫室氣體排放量為四個情節中最大之排放量，而 B2 情節與 A2 相同之處在於經濟發展呈現區域性發展之情況下，各國仍注重環境保護之結果，因目前之世界經濟走向較趨向於區域性整合之方向，故 B2 情節較 B1 情節更接近目前之世界經濟發展情況，且 B2 情節之溫室氣體排放量雖較 B1 情節高，但是低於 A1 情節[15,25]，因此，本研究以大氣環流模式根據 SRES 之 A2 與 B2 情節模擬之輸出結果建立未來情境，藉此確定氣候變遷可能之影響範圍，並配合不同之全球環流模式降尺度方式，探討氣候變遷下，地面氣象測站之降雨量以及平均氣溫於未來短期內之變化情形。

2.2 全球環流模式

本研究使用為投影氣候變遷情境設計之大氣-海洋耦合氣候模式(Atmospheric-Ocean GCMs)推估未來氣候變遷之情境，全球環流模式係以大氣物理之方程式為基礎，並以數值分析方法求解三維網格上各網格點之氣象資料。研究中蒐集由各國之全球環流模式計算之氣候變遷情境推估資料，並挑選 HadCM3、CSIRO Mk2、CGCM2、

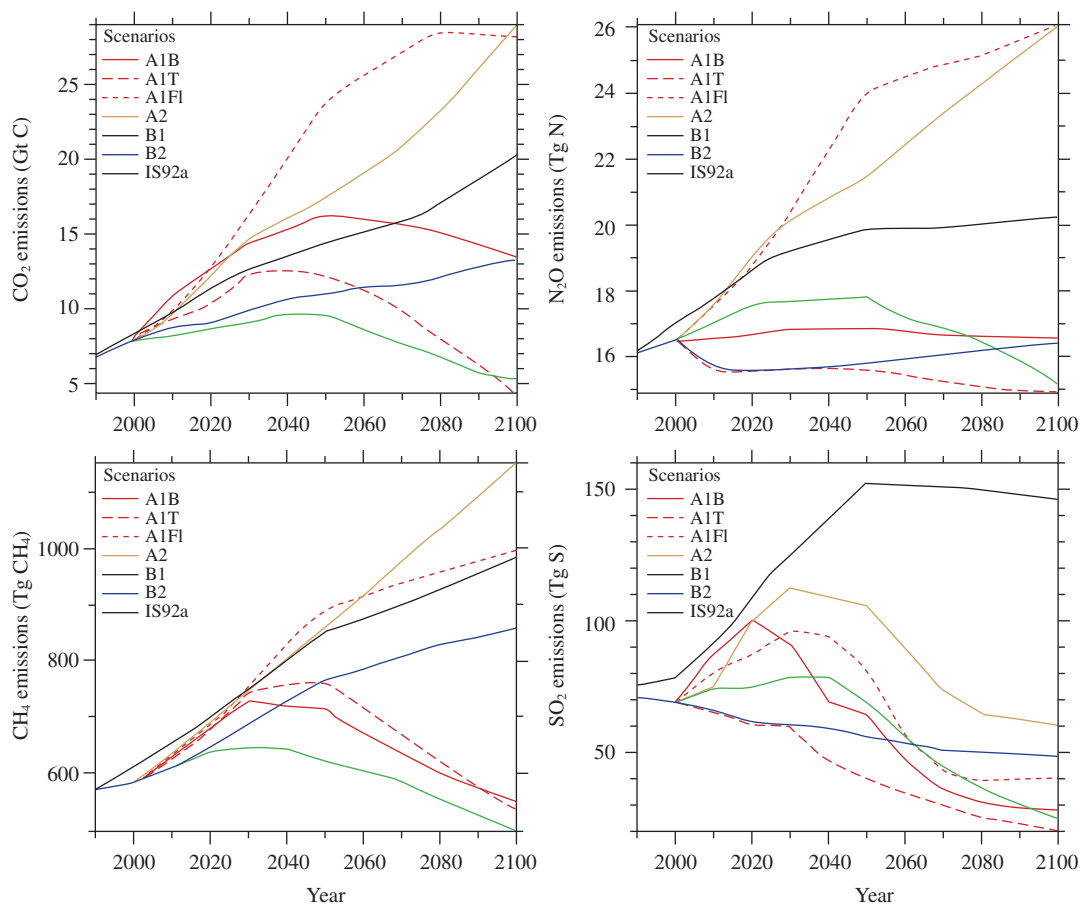


圖 2 SRES 四個情境之溫室氣體排放量差異[17]

ECHAM4 四種全球環流模式作為主要之氣候變遷推估資料，挑選此四模式之原因為四種模式資料較完整，且其推估結果較符合目前臺灣地區附近之氣候變遷型態(patter 表 1 為 n)。CGCM2、HadCM3 兩種全球環流模式於研究區域附近之網格點，A2、B2 兩個氣候變遷情節下之氣候變遷推估資料。

2.3 降尺度分析

由於 GCMs 之解析度往往大於一般應用於集水區分析之尺度，且模式之準確性在於整體型態，而非單點數值。而集水區之的模擬往往需以較小尺度以及利用單點測站資料進行模擬。因此，必須透過降尺度(downscaling)方可將大氣模式預測資料應用於集水區模擬。一般降尺度可分

為三種，第一種為物理性降尺度，利用區域環流模式，以大氣環流模式結果為邊界條件進行模擬預報。此法可求得較細之解析度，其結果雖然有不錯之型態(pattern)，然而對於集水區模擬所需測站之點資料卻仍具顯著差異，需進一步透過統計方式之降尺度方能實際建立預報資料與測站之關係。第二種為統計降尺度方法，主要乃透過地面測站資料與預報資料進行統計分析，進一步求得其關係。第三種為簡易降尺度，簡易降尺度為直接利用測站鄰近之 GCM 輸出格點預報資料，優點為方法簡單，但因 GCM 預報資料之誤差無法透過統計方式修正，因此準確性較低。

有鑒於物理降尺度為大氣科學範疇，非本研究考量。本研究於降尺度方面，採用統計降尺度方法(Statistical Downscaling Method)及簡易降尺

表 1 CGCM2、HadCM3 模式輸出之預設情境(雨量比值)

模式		CGCM2						HadCM3					
網格點		120°E			24.1°N			120°E			25.0°N		
情節		A2			B2			A2			B2		
		短期	中期	長期	短期	中期	長期	短期	中期	長期	短期	中期	長期
月份	1	1.22	1.12	1.03	1.14	1.00	0.83	1.13	0.85	0.95	0.85	0.94	0.77
	2	1.35	1.01	0.89	1.45	0.91	1.01	0.95	0.68	1.00	1.09	0.86	0.91
	3	1.30	1.03	0.88	1.18	0.97	0.95	0.95	1.07	0.92	0.99	1.08	0.85
	4	1.13	0.80	0.75	1.15	0.98	0.85	1.13	1.31	1.28	0.99	1.13	1.39
	5	1.10	0.82	0.54	0.83	0.95	0.77	1.08	1.30	1.38	0.87	1.11	1.60
	6	1.03	0.79	0.70	0.76	1.18	0.95	1.30	1.21	1.01	1.03	1.15	1.11
	7	0.92	0.93	0.70	0.96	0.97	0.97	1.14	1.10	1.37	1.30	1.20	1.04
	8	1.19	1.03	1.24	1.12	1.07	1.26	1.21	1.27	1.39	1.36	1.14	1.45
	9	1.18	0.97	1.29	1.07	1.04	1.19	1.27	0.98	1.25	1.21	1.27	1.17
	10	0.92	0.99	1.09	1.02	1.08	1.39	1.07	1.53	1.47	0.70	1.13	1.23
	11	1.10	1.24	0.80	0.82	0.94	1.00	0.85	0.80	0.91	0.78	1.20	1.09
	12	0.96	0.88	0.69	0.94	0.56	0.76	1.08	1.00	0.88	1.00	0.98	1.15

度方法(Simple Downscaling Method)。使用統計降尺度法進行降尺度分析，必須建立在以下幾點假設[29]：(1) GCMs 大尺度之格點與研究區域格點之間可以建立合適之關係式；(2)利用觀測資料與模式輸出資料建立之關係式可應用於未來之條件；(3)用以進行統計之變數及其改變量於 GCMs 中具良好結果。若以上假設均成立，透過統計降尺度之 GCMs 資料便可應用於小尺度之模式與鄰近之研究區域點。

統計降尺度之概念大致為透過迴歸分析或是類神經網路等分析方式，建立地面氣象站之觀測變數(例如溫度或降雨量等)與 GCM 輸出資料間之統計關係。再根據此關係推估地面氣象測站之資料。本研究所採用之統計降尺度方式有二，分別為臺大全球變遷中心所自行研發之統計降尺度方式，以及 SDSM (Statistical Downscaling Model)統計降尺度模式 SDSM (Statistical Downscaling Model)便是利用統計降尺度之方法產生氣候變遷情境[30]。

SDSM 為一結合隨機氣象產生器(Stochastic weather generator)以及迴歸方法之統計降尺度軟體。因為大尺度氣候因子與區域性之氣候因子可能具有一定程度之線性關係，因此可利用迴歸方法建立其相關性，並作為氣象產生器產生區域

之雨量、氣溫預測值之依據。SDSM 主要功能包括品質控制與資料轉換、預測變數篩選、模式檢定、氣象資料產生、資料分析、圖型化分析及情境產生。圖 3 為 SDSM 之降尺度分析步驟，SDSM 之分析流程係利用各測站之基線(1961-1990)資料與美國國家環境變遷預測中心 NCEP (National Center for Environmental Prediction)之各項變數資料比對，篩選出具有高相關性之因子，並建立隨機氣象產生器(Stochastic weather generator) 所需變數之迴歸關係式，以 1991 年後之測站資料進行模式校正與驗證降尺度模式之氣候變遷型態後，進一步以隨機氣象產生各種不同 GCM 模式降尺度至測站之日資料，並分別將短期(2010-2039)、中期(2040-2069)及長期(2070-2099)之結果進一步與基線(1961-1991)比較，可建立該測站變數各時期相對於基線之情境。

Randall *et al.* (2007)，整理分析氣候變遷學者對於 GCMs 不確定性之探討[27]。其中，引用 Iorio *et al.* (2004) [22]以各種不同解析度(使用之網格大小)之 GCM 模式進行比較分析，結果顯示 GCM 模式輸出之降雨變化資料，與雨量測站之實際降雨資料比較，較傾向於高估低強度降雨發生之機率，但低估高強度降雨發生之機率。但是使用高解析度(high-resolution)之 GCM 模式，得

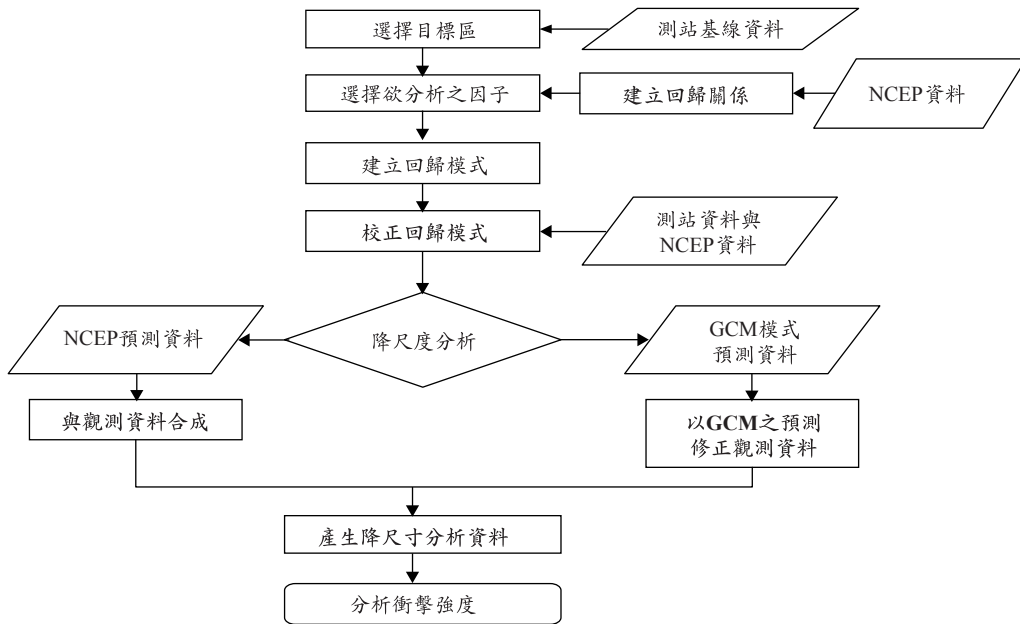


圖 3 SDSM 降尺度之分析步驟[30]

到之降雨量分佈型態較為接近歷史降雨資料之分佈型態，故本研究挑選解析度較高之 GCM 模式進行研究。而 Oouchi *et al.* (2006) 使用 MRI/JMA 之 GCM 模式，觀察其推估之氣候變遷對熱帶風暴之強度影響[26]。與歷史氣象資料比對之後，發現模式對於颱風之中心壓力及風速有低估之情形，且模式推估平均每年熱帶風暴之形成數量比起目前之年平均值減少了 30%。由於該分析結果與目前所觀察到之趨勢不吻合，進而以歷史氣象資料修正後，推估之颱風最大強度較目前歷史資料之最大強度為強。Durman (2001) 檢視 HadCM2 模式各重現期降雨之降雨頻率與 RCM (Regional Circulation Model, 區域環流模式) 模式各重現期之降雨頻率，發現 HadCM2 模式各重現降雨頻率之輸出中，低重現期降雨之出現頻率十分接近歷史降雨資料，但是高重現期之強降雨事件發生頻率明顯偏低，表示 HadCM2 模式對於低強度降雨事件之推估能力應強於高強度降雨事件之推估[19]。但上述之研究中皆提到未經歷史降雨資料校正之 GCM 模式降雨量輸出值，特別是極端降雨之情況，GCM 模式有低估其降雨量及發生頻率之傾向。故經由校正後之降雨量變化

資料，較能夠正確反應氣候變遷後之降雨量變化情況。

本研究中選擇以月資料輸出降雨量變化，係根據 Iorio *et al.* (2004)、Karin *et al.* (2005)、及 Oouchi *et al.* (2006) 之相關研究顯示，雖然並非所有 GCM 模式皆有類似之表現，然而大部分之 GCM 模式傾向於高估低強度降雨發生之頻率，而低估高強度降雨發生之頻率及強度[22,23,26]。此外，根據 Randall *et al.* (2007) 提出之結論，以季為單位之 GCM 降雨輸出值誤差較小，故本研究考量更小之時間尺度，以月尺度的降雨量輸出資料為主，利用 GCM 模式於未來各時期月平均雨量與模式其基期月平均降雨量之變化比值關係，修正氣象站之月平均雨量特性，以推估未來可能之最大降雨量[27]。目前尚未有相關研究研析氣候變遷對不同強度降雨影響幅度之定量分析，因此本研究中之降尺度部份隱含了一個假設：未來低強度降雨與高強度降雨雨量上升之幅度一致。

2.4 淡水河洪水預報模式

淡水河即時洪水預報模式係經濟部水利署

第十河川局(以下稱十河局)所研發，其目的為即時讀取十河局水文資料庫中之降雨量及水庫洩洪量資料，並且預測未來降雨量及考慮水庫洩洪。利用降雨逕流模式計算河川模式邊界點及側流點流量，以及河口天文潮及氣象潮，再輸入一維河川變量流模式，計算各河道斷面之水位及流量，最終結果以未來 1~6 小時水位及流量呈現，提供洪水預報之參考依據，其特點為即時、穩定、圖表並列、一目瞭然[2]。

基隆河員山子分洪水文演算，係由水桶模式計算出上游逕流量後，再以質量守恆、孔口及堰流公式計算員山子攔河堰及分洪堰之流量及水位。

2.5 員山子分洪隧道脆弱度分析法

根據前人針對脆弱度定性之討論[8,9,10,13]脆弱度定義為衝擊量、調適策略及暴露量之函數，如式(1)：

$$V = f(I, A, E) \quad \dots\dots\dots (1)$$

其中， V 為脆弱度，以函數 F 表示； I 為衝擊量； A 為調適策略； E 為暴露量。衝擊量、暴露量與脆弱度呈正相關，調適策略與脆弱度呈負相關。換言之，當衝擊量及暴露量越大，將使脆弱度上升；若施以適當之調適策略，將使脆弱度降低。本研究中，衝擊量 I 係為因氣候變遷造成改變之氣候條件，而暴露量 E 係指直接造成指定元素脆弱度上升之因素，包括因衝擊量增加而強化之水文條件。依照 Burton *et al.* (2003)對於暴露度 E 之定義，影響暴露度之因素包括衝擊之強度、發生頻率、延時及所探討區域之特性[12]。而 Adger (2006)認為脆弱度定義中系統對於衝擊之敏感度 Sensitivity 應獨立為一個影響因子[9]，但是本研究探討脆弱度時，發現系統之特性與系統對於衝擊之敏感度並非互為獨立因子，兩項因子間具有極高之相關性。且系統之特性與系統對於氣候變遷之敏感度共同影響系統於氣候變遷災害中之暴露度變化，故本研究將敏感度 S 合併至暴露量 E 中。暴露量 E 之計算結果於本研究中即為分洪流量之增加。而施以適當之調適策略 A 可以減少衝擊量 I 及暴露量 E 之影響，例如於上游增設滯

洪調節池，改變土地利用增加地表入滲，以及減少尖峰流量之其他策略，皆可以使 E 減少，降低脆弱度。而降低衝擊量 I 之調適策略，則必須靠世界各國共同進行溫室氣體減量，以避免氣候變遷之影響持續被強化。

根據上述脆弱度之定義，氣候變遷造成極端氣候條件係本研究所欲討論之重大危險事件；水利防洪設施係定義中受重大危險事件影響之元素。本研究中所探討之目標為員山子分洪隧道之脆弱度，因此根據脆弱度之定義，研究中之暴露量為員山子分洪隧道受氣候變遷影響而增加之分洪流量，而衝擊量為氣候變遷之速率及氣候變遷之多樣性。根據以上之定義，水利防洪設施之脆弱度量定義為在該極端氣候條件下，水利防洪設施失效之百分比。

本研究根據「水利防洪設施失效之百分比」概念，探討員山子分洪系統之脆弱度，根據 DMTP 之脆弱度定義，脆弱度為建築物於災害中之損壞程度，但本研究中，員山子分洪設施本身構造於分洪過程中受損之可能性不高，因此研究中之脆弱度係探討氣候變遷下其可能之最大負載量。而研究中當員山子分洪設施達到最大負載量而無法進行更多分洪時，脆弱度即視為達到最大值。

本研究以分洪量佔設計分洪量之比例作為脆弱度，如式(2)：

$$V_{DIVERSION} = \exp\left(\frac{\ln(a) \times \min((Q_F - Q_{max}), 0)}{Q_{200} - Q_{max}}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

其中， Q_F 為進入員山子分洪隧道之分洪流量； Q_{max} 為員山子分洪隧道最大之分洪量：1529 m³/s [3]，此為原始設計之保護標準，於脆弱度中可作為比較標準； $V_{DIVERSION}$ 代表整個員山子分洪系統之脆弱度； a 為員山子分洪 200 年重現期計畫分洪量之期望脆弱度，可視為脆弱度之敏感參數。當 200 年重現期計畫分洪量之期望脆弱度越低，代表該分洪量超過 200 年重現期計畫分洪量後脆弱度將劇烈變動。參數 a 之敏感度分析圖

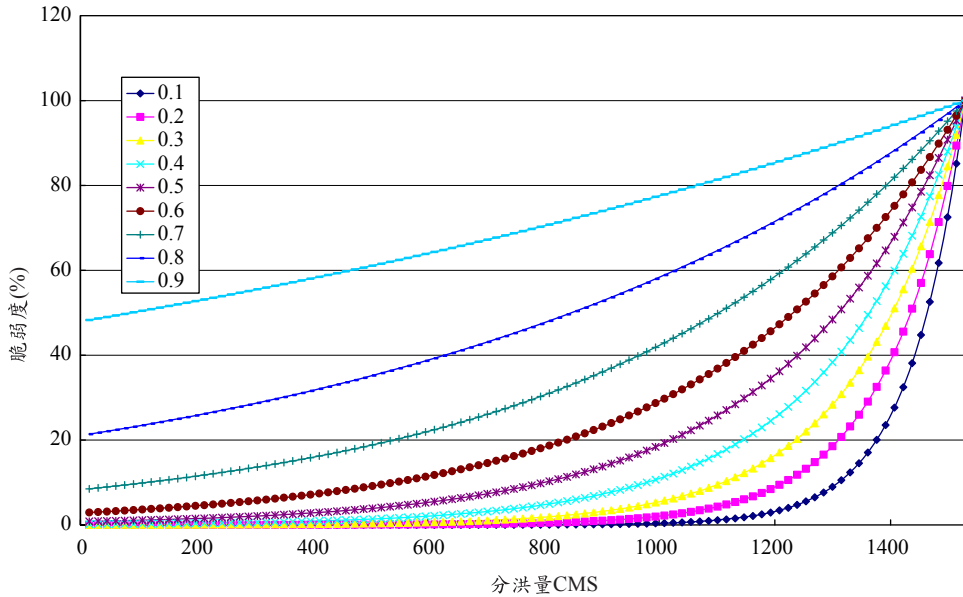


圖 4 員山子分洪脆弱度參數 a 之敏感度分析圖

如圖 4 所示， a 之測試範圍由 0.1 至 0.9，當事件到達水利防洪設施原保護標準時，其脆弱度即等於 a ，當事件超過水利防洪設施原保護標準時，脆弱度數值將由 a 至 1 間遞增。 a 值之設定對整體脆弱度之影響可見圖 4 本研究中將 a 值設為 0.3，其原因詳述於後。

三、氣象資料之合成

本研究以「水文應用手冊」中之簡單尺度不變性高斯馬可夫雨型 SSGM (Simple Scaling Gauss-Markov) 設計雨型作為研究中之降雨雨型，SSGM 為一符合隨機碎形特性與高斯馬可夫歷程之無因次雨型。此雨型以非正常性一階高階馬可夫歷程描述無因次年之最大値事件，具備馬可夫歷程特性，滿足尖峰降雨量統計特性，且具有最大概似度[6]。研究中以 200 年重現期之降雨量，以 SSGM 設計雨型分配作為輸入項，輸入淡水河即時洪水預報模式，取得每個河川斷面之河川水位及流量。

針對氣候變遷下之降雨修正，本研究目前僅針對降雨強度部份進行修正，假設氣候變遷下未來之降雨型態與目前相同，再利用以統計降尺度及簡易降尺度修正之大氣環流模式所估計之雨

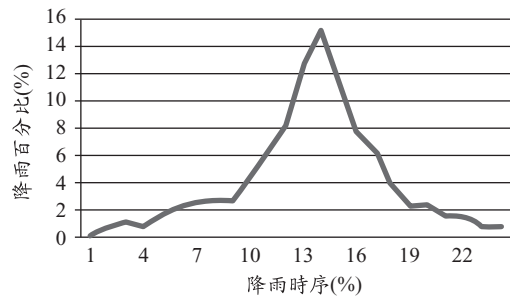


圖 5 五堵雨量站之 24 小時延時 SSGM 設計雨型

量變化，根據所選用之大氣環流模式與 SRES 情境，針對降雨量部份進行修正。以五堵雨量站之 SRES-A2 情境、CGCM2 模式為例，五堵雨量站之 200 年重現期 24 小時延時降雨量為 678.5mm，而 CGCM2 模式於 A2 情境下未來短期內，8 月份之雨量變化比值为 1.19，故可推估氣候變遷下五堵雨量站於 8 月之 200 年重現期 24 小時累積雨量為 807.4 公釐。推得累積雨量後，依照圖 5 之五堵雨量站之 SSGM 設計雨型圖，以累積雨量套用五堵雨量站之 SSGM 設計雨型，即可獲得 24 小時延時降雨分布，如圖 6。

本研究採用 SDSM 進行降雨量變化之模擬，並與簡易降尺度之合成雨量進行比較。為初

表 2 雨量修正值表

雨量調整值	A2			B2		
	短期	中期	長期	短期	中期	長期
SDSM	1.13	1.18	1.06	1.24	1.08	1.18
CGCM2 簡易降尺度	1.35	1.24	1.29	1.45	1.18	1.39
HadCM3 簡易降尺度	1.30	1.53	1.47	1.36	1.27	1.19
CSIRO Mk2 簡易降尺度	1.11	1.20	1.34	1.23	1.27	1.19

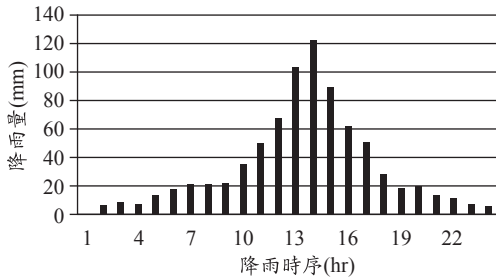


圖 6 五堵雨量站之暴雨事件 24 小時延時雨量分佈

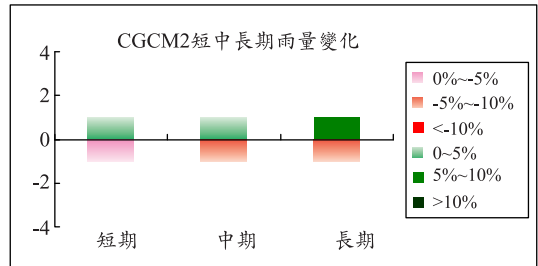


圖 8 HadCM3 短中長期雨量變化統計圖

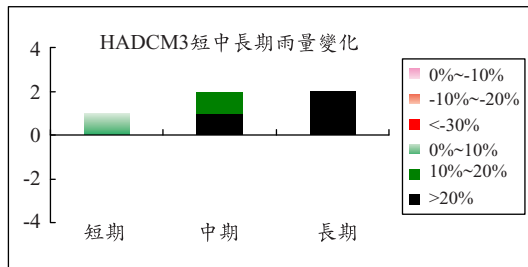


圖 7 CGCM2 短中長期雨量變化統計圖

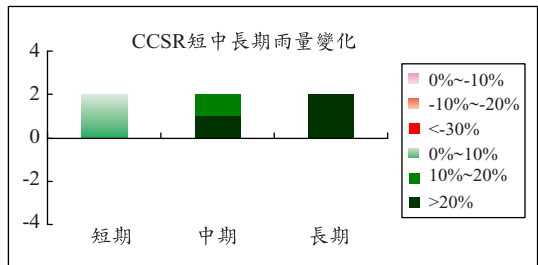


圖 9 CSIRO Mk2 短中長期雨量變化統計圖

步了解簡易降尺度之雨量變化趨勢，本研究將採用之 3 種 GCM 於汛期月份之雨量變化均值繪圖如圖 7~圖 9 所示。由圖中可知，除 CGCM2 之 A2 情境及 ECHAM4 之兩種情境外，其它模式皆顯示氣候變遷將使雨量增加之趨勢。

由於降尺度之產出為各情境下不同時期之各月雨量變化值，上述 3 張變化圖僅為汛期月份之平均值。為求得最大降雨量，本研究以各站雨量乘以集水面積做為比較，以選擇最適當之月份進行雨量調整。各模式於不同氣候變遷情境之雨量調整值如表 2 所示，三種簡易降尺度之雨量修正值係考慮離臺灣北部流域最近之網格點。雨量修正值採用 5 月~11 月間之雨量調整值，因此颱風事件已隱含於汛期之雨量調整值內。

四、脆弱度分析

員山子分洪於不同情境之分洪量如表 3 所示。由表中可知 HadCM3 模式於中期 A2 情境下，將超過目前員山子分洪最大之分洪量。SDSM 模式於中期 B2 情境下，其分洪量反而略少於現況 200 年重現期降雨所產生之分洪。主要原因為基隆河上游之控制雨量站係由 SDSM 模式中之基隆站調整，該站於中期 B2 情境之中呈現下修之趨勢，因此造成該情境之員山子分洪量小於現況之分洪量。

表 4 為員山子分洪設施於 200 年重現期洪水之脆弱度；圖 10、圖 11 為淡水河流域於 A2、B2 情節下，各時期之雨量變化趨勢圖，圖 12、

表 3 員山子分洪設施於各情境之分洪量表

分洪量(m ³ /s)	A2			B2		
	短期	中期	長期	短期	中期	長期
SDSM	1188.60	947.28	927.37	1239.19	899.97	1195.48
CGCM2 簡易降尺度	1324.54	947.28	1250.30	1440.45	1126.31	1370.69
HadCM3 簡易降尺度	1273.23	1545.36	1469.80	1344.83	1240.07	1624.01
CSIRO Mk2 簡易降尺度	1045.93	1150.02	1311.87	1188.08	1236.51	1450.38
目前最大分洪量	900.96 (m ³ /s)					

表 4 員山子分洪道於 200 年重現期洪水之脆弱度

員山子分洪設施脆弱度(%)	A2			B2		
	短期	中期	長期	短期	中期	長期
SDSM	15.39	4.08	3.66	20.33	3.15	15.98
CGCM2 簡易降尺度	32.50	4.08	21.61	61.46	10.93	41.88
HadCM3 簡易降尺度	24.51	100.0	72.22	36.33	20.42	100.0
CSIRO Mk2 簡易降尺度	7.02	12.45	30.31	33.37	13.63	55.69
平均	19.86	30.15	31.95	33.37	13.63	55.69
目前之 200 年重現期降雨	3.17(%)					

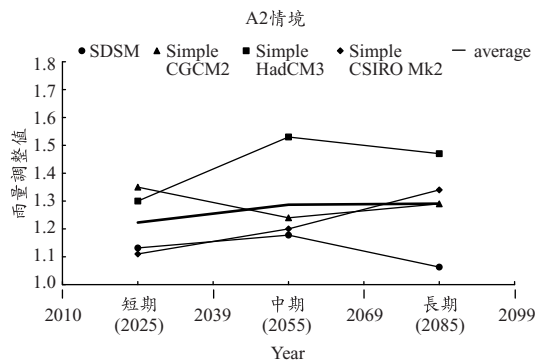


圖 10 淡水河流域 A2 情節氣候變遷雨量變化趨勢圖

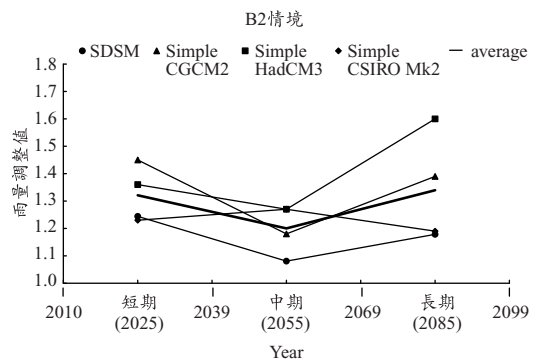


圖 11 淡水河流域 B2 情節氣候變遷雨量變化趨勢圖

圖 13 為員山子分洪設施於 A2、B2 情節下之脆弱度趨勢圖。員山子分洪道於 200 年重現期降雨發生時之脆弱度與上游集水區之降雨量相關，而根據員山子分洪設施之脆弱度評估模式，其脆弱度主要係模擬分洪量與與該分洪道之最大分洪量(1529 m³/s)及原設計 200 年重現期分洪量(1310 m³/s)之比例。而模式所得之 200 年重現期降雨所產生之分洪量為 900.96 m³/s，小於原設計 200 年重現期之分洪量，因此現況之脆弱度僅 3.17%。相對地 HadCM3 模式經簡易降尺度之雨量調整值，於 A2 情境之中期及 B2 情境之長期之雨量

調整分別為 1.53 及 1.6，造成模式演算求得之分洪量已超過員山子之最大分洪量，因此脆弱度為 100%。若以員山子分洪原設計 200 年重現期分洪量(脆弱度為 30，A2 情境之 CGCM2 短期、HadCM3 之中期及長期、CSIRO Mk2 之長期都有超過 200 年重現期分洪量之可能。由各脆弱度平均值可知，若未來全球經濟活動趨向 A2 情境，則應對員山子分洪設施進行中長期之調適策略規劃；若趨向 B2 情境，則應著重短期之調適策略規劃。

由圖 12 及圖 13 可知，根據不同之 GCM 模

表 5 員山子分洪道於 200 年重現期洪水之脆弱度

員山子分洪設施脆弱度(%)	A2			B2		
	短期	中期	長期	短期	中期	長期
SDSM	34.05	15.86	14.89	39.96	13.66	34.80
CGCM2 簡易降尺度	52.35	1.30	41.39	75.56	27.96	60.59
HadCM3 簡易降尺度	44.51	100.0	82.91	55.83	40.07	100.0
CSIRO Mk2 簡易降尺度	21.68	30.13	50.30	33.99	39.62	77.97
平均	38.15	36.82	47.37	51.34	30.33	68.34
目前之 200 年重現期降雨	13.70 (%)					

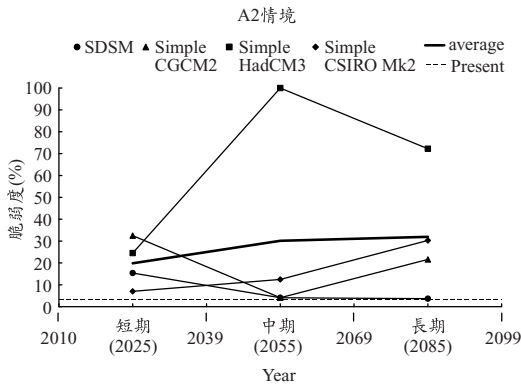


圖 12 A2 情境 200 年重現期員山子分洪脆弱度趨勢圖

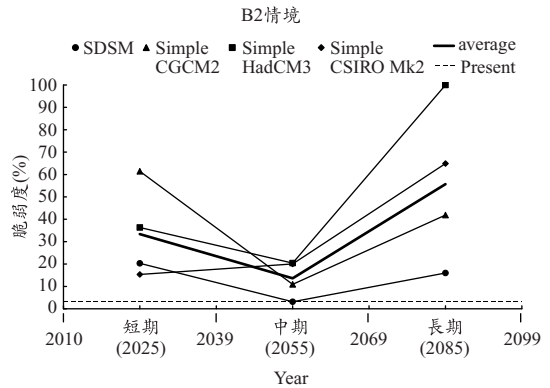


圖 13 B2 情境 200 年重現期員山子分洪脆弱度趨勢圖

式計算之脆弱度有跳動之情況，並非如同 IPCC 預設之溫室氣體排放情境一樣，隨著研究之情境越而持續遞增。例如表 5 中 A2 情節下，SDSM 降尺度之氣候變遷情境中，短期(2010-2039)之脆弱度為 15.39%，但中期(2040-2069)之脆弱度為 4.08%。由於研究中對於氣候變遷之影響只以雨量修正，因此脆弱度之變化只受到降雨量變化之影響。氣候變遷情節之假設為溫室氣體存在於大氣中之比例不斷增加，因此理論上氣候變遷之影響應為長期>中期>短期，但脆弱度分析結果卻並非持續遞增。此影響是受不同之 GCM 之設定不同造成雨量變化與氣候變遷之預測不同。由圖 10 及圖 12、圖 11 及圖 13 中可發現降雨量變化之趨勢與脆弱度之趨勢一致，此現象乃因本研究中以降雨輸入降雨—逕流模式後，再以降雨—逕流模式計算員山子分洪隧道之分洪量，因此脆弱度還受到降雨—逕流模式參數設定之影響；進行適當之調適策略會改變集水區之降雨—逕流關

係，例如集水區整治及加入其他水利設施以降低洪峰流量。這些改變會影響集水區於暴雨時之降雨—逕流歷線，造成脆弱度之變化。脆弱度之變化趨勢會與降雨之變化趨勢一致，但是藉由不同之調適策略，會改變計算而得之脆弱度值。

在本研究中，脆弱度模式使用之參數 a 定為 0.3， a 為 0.3 時，CGCM2 模式 A2 情節長期情境下，脆弱度為 21.61%，而 HadCM3 模式 A2 情節長期情境下，脆弱度為 72.22%，兩者之流量差異為 $219.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，但是當 a 為 0.5 時，則計算出之脆弱度值如表 5 所示；A2 情節長期情境下，流量差異為 $219.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 不變，但是以 CGCM2 模式資料計算之脆弱度為 41.39%，HadCM3 模式資料計算之脆弱度為 82.91%，雖然流量增加下相同，但是於 a 為 0.3 之情況下，脆弱度之增加量為 50.61%， a 為 0.5 之情況下，脆弱度之增加量為 41.52%。此參數可依照使用者之需求而調整。 a 為 0.3-0.5 之設定下，可以反映分洪量 0 至最大

分洪量之變化曲線由極低之脆弱度直至脆弱度 100%之變化。由於員山子分洪設施之結構強度會隨時間而老化降低，但目前尚未考慮氣候變遷後分洪量增加與員山子分洪設施結構強度弱化之綜合分析，因此研究中將參數 a 定為 0.3，代表以現階段之結構強度，分洪量達 200 年重現期時，脆弱度為 0.3。未來員山子分洪設施之強度逐漸弱化後，可調高脆弱度參數以反應極端氣候事件強度增強及水工構造物結構弱化之綜合影響。例如 50 年後，員山子分洪設施之結構強度與目前之結構強度相比應較為弱化，此時可考慮將參數 a 由 0.3 提昇至 0.5，代表未來之結構強度遭遇現今 200 年重現期之分洪量，其脆弱度已升至 0.5。適當保留參數 a 之彈性，可於未來適切反應員山子分洪設施因結構強度弱化而增加之脆弱度。

五、結論與建議

本研究以氣候劇變為探討重點，研究中針對水利防洪設施受氣候劇變之脆弱度提出詳盡之研究方法，利用降尺度分析及頻率分析求得未來各種情境可能發生之水文條件，並利用洪水演算模式進行脆弱度之評估，更進一步以臺灣北部重要河川之一之淡水河流域作為案例研究，分析員山子分洪設施之脆弱度。

在雨量受氣候劇變影響之分析方面，本研究利用簡易降尺度方式，針對不同情境、不同 GCM 模式於未來短、中、長期之降雨變化量進行整理工作；亦利用 SDSM 降尺度模式針對淡水河流域氣象站進行 GCM 格點資料降尺度工作。由結果均可看出，藉由 SDSM 模式所獲得之檢定結果與觀測資料吻合，而其驗證結果之趨勢也大致與該站觀測資料之歷史趨勢相符。最後，整理應用 SDSM 模式配合 HadCM3 之 A2 及 B2 氣候變遷情境，預測氣候變遷下未來短、中、長期之降雨變化情形，並與基期進行比較，計算出雨量以作為後續推估降雨變化時使用。

在脆弱度評估方面，本研究以員山子分洪受極端氣候影響時分析其脆弱度；若未來全球經濟活動趨向 A2 情境，則應對員山子分洪設施進行

中長期之調適策略規劃；若趨向 B2 情境，則應著重短期之調適策略規劃。由於氣候變遷各時期之情境推估為反應該段時期之氣候特性，例如短期之氣候變遷情境推估為反應 2010-2039 年之氣候特性，因此最嚴重之極端事件衝擊可能於 2010-2039 之任一年發生，故短期調適策略必須側重於能立即產生成效之水利設施建設，例如在河川上游增加滯洪池減少尖峰流量。而氣候變遷情境之長期指 2070-2099 年，距離目前之時間點尚有充分之時間，故應考慮結合生態、都市發展、區域發展之綜合調適計畫，同時減少氣候變遷之衝擊量及員山子分洪設施之暴露量。

本研究建議將式(2)中之敏感度參數 a 設為 0.3~0.5 之間，此設定能表示流量低至流量高時之脆弱度變化。而參數 a 可反映員山子分洪設施因時間而造成之結構弱化問題，當使用時間延長且分洪負擔加重之後，可藉由調整 a 值反映脆弱度之增加。由於水利防洪設施受氣候劇變影響評估係複雜且環環相扣之分析過程，未來應定期檢討脆弱度之評估系統，並即早建立行動預警及行動門檻值之機制，並定期調整調適策略以因應氣候變遷之衝擊。

謝 誌

本研究之完成承蒙經濟部水利署經費補助，僅致謝忱。

參考文獻

1. 王如意、許銘熙等，「臺北盆地及鹽水河流域示範區颱風災害危險度分析(三)」，經濟部水資源局，國立臺灣大學生物環境系統工程學系，2001。
2. 李戎威，「淡水河即時洪水預報模式技術參考手冊」，經濟部水利署第十辦公室，2005。
3. 謝勝彥、張耀澤、張家榮，「基隆河員山子分洪水工模型試驗(第二年)」，經濟部水利署水利規劃試驗所，2007。
4. 謝龍生，柳文成，童慶斌，「未來氣候變遷趨勢對臺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」，Journal of National

- United University, 2004。
5. 鄭克聲, 王如意等, 「因應環境變遷之水文規劃設計研究」, 經濟部水資源局委辦計畫, 臺大生物環境系統工程學系研究報告, 2003。
 6. 鄭克聲, 王如意等, 「水文設計應用手冊」, 經濟部水資源局委辦計畫, 臺大生物環境系統工程學系研究報告, 2001。
 7. 顏子豪, 「氣候變遷對於集水區入流量之衝擊評估: 以翡翠水庫集水區為例」, 國立臺灣大學碩士論文, 2008。
 8. Adejuwon J., C. Azar, W. Baethgen, C. Hope, R. Moss, N. Leary, R. Richels, J.-P. van Ypersele, “Overview of Impacts, Adaption and Vulnerability to Climate Change.,” *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Bruce, J., Walker B. (Editor), Cambridge University Press, 2001.
 9. Adger, W.N., “Vulnerability,” *Global Environmental Change*, 16(3), 268-281, 2006.
 10. Berkes, F., C. Folke (Editor), *Linking Social and Ecological Systems*, Cambridge University Press, pp. 1-25, 1998.
 11. Boer, G.J., R.J. Stouffer, M. Dix, A. Noda, C.A. Senior, S. Raper, K.S. Yap, “Projections of Future Climate Change,” *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Kim, J.-W., Stone, J. (Editor), Cambridge University Press, 2001.
 12. Burton, I., R.W. Kates, G.F. White, *The Environment as Hazard, Second ed.*, Guilford, New York, 1993.
 13. Carter, T. R., M. L. Parry, H. Harasawa, *IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations*, pp.59, University College, London. and Centre for Global Environmental Research, Japan., 1994.
 14. Carter, T.R., R.N. Jones, X. Lu, S. Bhadwal, C. Conde, L.O. Mearns, B.C. O’Neill, M.D.A. Rounsevell, M.B. Zurek, “New Assessment Methods and the Characterization of Future Conditions,” *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (Editor), Cambridge University Press, 133-171, 2007.
 15. Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, “Regional Climate Projections.,” *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (Editor), Cambridge University Press, 2007.
 16. Coburn, A.W., Spence, R.J.S., Pomonis A., *Vulnerability and Risk Assessment Guide*, Cambridge Architectural Research, 1994.
 17. Cubasch, U., X. Dai, Y. Ding, D.J. Griggs, B. Hewitson, J.T. Houghton, I. Isaksen, T. Karl, M. McFarland, V.P. Meleshko, J.F.B. Mitchell, M. Noguer, B.S. Nyenzi, M. Oppenheimer, J.E. Penner, S. Pollonais, T. Stocker, K.E. Trenberth, *Technical Summary of Climate Change 2001: The Scientific Basis*, F. Joos, A. Ramirez-Rojas, J.M.R. Stone, J. Zillman (Editor), Cambridge University Press, Figure 17, 2002.
 18. Cutter, S.L., “The vulnerability of science and the science of vulnerability,” *Annals of the Association of American Geographers*, 93(1), 1-12, 2003.
 19. Durman, C.F., “A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a

- global and a regional climate model for present and future climates,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *The*, **127**(573), 1005-1015, 2001.
20. Feenstra, J.F., I. Burton, J.B. Smith, Richard S.J. Tol (Editor), *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*, 1998.
 21. Ford, J.D., B. Smit, J. Wandel, “Vulnerability to climate change in the Arctic: A case study from Arctic Bay, Canada,” *Global Environmental Change*, **16**(2), 145-160, 2005.
 22. Iorio, J.P., P.B. Duffy, B. Govindasamy, S. L. Thompson, M. Khairoutdinov, D. Randall, “Effects of model resolution and subgrid-scale physics on the simulation of precipitation in the continental United States,” *Climate Dynamics* , **23**(3), 243-258, 2004.
 23. Kharin, V.V., F.W. Zwiers, X. Zhang, “Intercomparison of near surface temperature and precipitation extremes in AMIP-2 simulations, reanalysis and observations,” *Journal of Climate*, **18**(24), 5201-5223, 2005.
 24. Luers, A.L., D.B. Lobell, L.S. Sklar, C.L. Addams, P.A. Matson, “A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico,” *Global Environmental Change* , **13** , 255-267, 2003.
 25. Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, Bert de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Gröbler, Y. J. Tae, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, D. Zhou, *Special Report on Emissions Scenarios*, N. Nakicenovic, R. Swart. (Editor), Cambridge University Press, 2000.
 26. Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki, A. Noda, “Tropical Cyclone Climatology in a Global-Warming Climate as Simulated in a 20 km-Mesh Global Atmospheric Model: Frequency and Wind Intensity Analyses,” *Journal of the Meteorological Society of Japan* , **84**(2), 259-276, 2006.
 27. Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi, K.E. Taylor, “Climate Models and Their Evaluation.” *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* , Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Editor), Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
 28. Vörösmarty, C.J., P. Green, J. Salisbury, R.B. Lammers, “Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth,” *Science* , **289**(5477), 284-288, 2000.
 29. Wilby, R.L., T.M.L. Wigley, “Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships,” *International Journal of Climatology*, **20**(6), 641-661, 2000.
 30. Wilby, R.L., C.W. Dawson, E.M. Barrow, “SDSM— a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts,” *Environmental Modelling & Software*, **17**(2), 145-157, 2002.

收稿日期：民國 97 年 9 月 8 日
 修正日期：民國 97 年 12 月 16 日
 接受日期：民國 97 年 12 月 18 日