

# 氣候變遷水資源風險評估與 調適決策之探討

童慶斌／國立臺灣大學生物環境系統工程學系教授

劉子明／國立臺灣大學生物環境系統工程學系博士後研究

林嘉佑、曹榮軒／國立臺灣大學生物環境系統工程學系博士候選人

李明旭／國立中央大學水文及海洋科學研究所教授

## 摘要

近年來氣候變遷議題備受矚目並影響水資源永續發展，從國家、政府單位到企業團體，無不開始著手於氣候變遷風險評估與調適策略之擬定。然而面對氣候變遷之威脅，政府單位往往不知如何才算是氣候變遷調適規劃，執行氣候變遷調適之專業團隊也可能面臨不知氣候變遷風險定義為何，以及如何評估氣候變遷或該使用那些資料才能擬訂完善之調適策略。站在學術立場，有必要以科學角度建立一套氣候變遷調適決策步驟，以利政府單位與專業團隊懂得如何評估與調適。本研究乃參考國際間針對氣候變遷所制定之調適步驟流程，擬定跨領域氣候變遷調適決策六大步驟，從問題界定與目標設定、評估與分析現況風險、評估與分析未來風險、界定與評估調適選項、規劃與執行調適路徑、到監測與修正調適路徑等六大步驟，適合所有領域面對氣候變遷之調適決策。並以水資源系統為案例，說明每一步驟之細節、使用工具與產出，以作為氣候變遷調適決策之參考。

## Abstract

In recent years, issue of climate change was highly focused and influenced sustainable development of water resources. From nation, government agencies, to business groups, all began to develop climate change risk assessment and adaptation strategies. But facing of the threat of climate change, the government agencies often do not know how we can make the adaptation

plan to climate changes, the professional team which in charge of making climate change adaptation plan may also face the problem of not knowing the definition of climate change risk and how to assess climate change or what to use of those materials in order to improve the adaptation strategies. Standing in academic position, it is necessary to establish a scientific point of view of climate change adaptation decision steps to facilitate the government agencies and professional team knows how to evaluate and develop adaptation plan. This study referenced the international climate change adaptation steps to develop the six steps of making climate change adaptation strategies, from problem definition and goal setting, current risk assessment and analysis, future risk assessment and analysis, identifying and evaluating adaptation options, planning and implementing adaptation pathway, and monitoring and adjusting adaptation pathway. It is suitable for all areas on climate change adaptation decision-making. Using water resources systems as an example, details of each step, the use of tools and outputs are explained as a reference to climate change adaptation decision-making.

## 前言

近年來，由於全球氣候變遷導致氣候異常、極端化之現象，已於全球各地誘發各式災害，臺灣亦首當其衝、難以倖免。隨著學界對於氣候變遷研究的逐漸深化，人類對於氣候變遷的態度亦由最初的懷疑開始轉向確信，各界除了了解研究氣候變遷的成因與影響，也進一步始著手研究如何面對氣候變遷，甚至如何調適氣候變遷帶來的風險。相較於世界上的其他地區，臺灣於近年來已遭受多次極端天氣帶來之嚴重衝

擊，國人累積了豐富的承災經驗後，也深刻體認到如果要因應未來可能出現的更大挑戰，勢必無法憑藉著傳統的管理方式，而需推動具有系統性、整合性的管理與調適方案。

此外，氣候變遷會導致天氣極端化，極端天氣帶來複合性災害在近年來亦備受矚目，較著名的案例如 2009 年莫拉克颱風造成土砂災害，進而影響水資源與災區公共衛生等問題。由類似案例可看出氣候變遷衝擊會因區域而異，且不同空間系統需採取調適能力建構重點也不同，應儘速建立一套有彈性的分散式調適方法予以因應，考量系統整合，以切合地方狀態與國家永續發展目標。欲進行氣候變遷之管理與調適，其當務之急在於了解關注系統之脆弱度以及所承受的可能風險。然而，「脆弱度」卻是近幾十年來，最被科學社群廣泛應用與探討卻也最為模糊的概念之一。在氣候變遷領域，學界對於脆弱度的解釋往往會參考 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 評估報告書裡的定義。然而 IPCC 對於脆弱度之定義也隨著歷代報告書的出版而有所演進與修正。

IPCC 第三次報告 (IPCC, 2001) 對脆弱度的定義為「脆弱度乃系統易受或無法處理氣候變遷 (包括氣候易變性與氣候極端事件) 負面效應影響的程度，並脆弱度為定義為暴露度 (exposure)、敏感度 (sensitivity) 和調適能力 (adaptive capacity) 的函數來評估脆弱度。接續此版報告的定義，IPCC 第四次報告 (IPCC, 2007) 進一步說明「氣候變遷脆弱度是指地球物理、生物和社會經濟系統容易受到且無法應對氣候變化的不利影響」。然而，到了 2014 年所出版的第五次報告 (IPCC, 2014)，IPCC 報告內容從過去以脆弱度評估為重心，轉移到以氣候變遷風險評估為重心，並對風險、脆弱度、暴露度重新加以解釋與定義，其內容與 AR4 以及之前的報告有所不同。IPCC AR5 對於風險定義核心概念如圖 1 所示：

由圖 1 中可看出風險 (Risk) 是 IPCC 第五版報告書中最為核心的因子，認為風險乃脆弱度 (Vulnerability)、暴露度 (Exposure) 以及危害 (Hazard) 的相互作用而產生。其中，風險代表了氣候變遷造成有價值的事物處於險境且結果不確定的可能性，且通常為危害性事件或趨勢發生的概率乘以這些事件或趨勢發生造成的後果。脆弱度表示系統容易受到負面影響的傾向與本質，包括其敏感性、容易受災特性、以及缺乏應付與適應的能力。

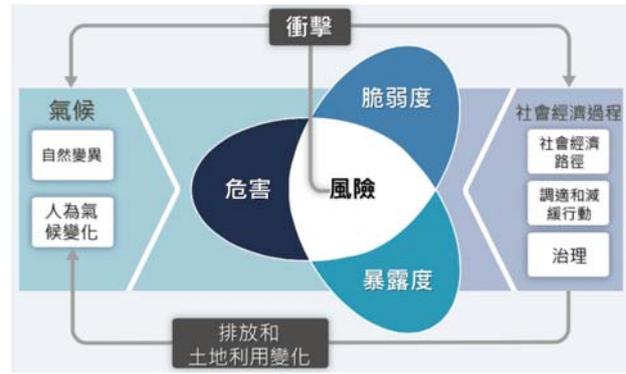


圖 1 IPCC 對於風險、脆弱度、暴露度與危害之核心概念 (IPCC, WGII, 2014)

暴露則為人類生命、生計、物種或生態系統、環境服務與資源、基礎建設、經濟、社會與文化資產處於有可能遭受不利影響的位置與設置。危害則表示可能發生的自然或人為物理事件或趨勢，或物理影響。它可造成生命損失、傷害或其它健康影響，以及財產、基礎設施、生計、服務提供、生態系統以及環境資源的損害和損失。而 IPCC 第五次報告以探討風險為主，並定義為：風險 = F (脆弱度，暴露度，危害)。

本研究將參考 IPCC 第五版對於風險的定義，發展一套系統性的氣候變遷評估調適流程。該流程將由最初的問題界定為始，並逐步評估現況與未來可能遭受之風險，進而針對風險的種類與屬性界定出適合的調適選項，並由眾多調適選項中擬定出適合之調適路徑，進而透過後續的監測以了解調適方案之執行情況，並作為未來修正之參考。

## 文獻回顧

國際間對於氣候變遷風險評估與調適擬定，不同領域一直都遵循著相同的架構與步驟進行分析。Meynecke et al. (2011) 針對漁產在氣候變遷影響議題下，界定相關問題，了解氣候變異造成的水溫劇變與降雨量的變化對澳大利亞昆士蘭州漁獲物組成、幼魚棲息地、魚群豐度的變化有相當之影響。在現況評估時則分析海水表面溫、降雨量對昆士蘭州的 7 個漁獲物種 (尖吻鱸、青蟹、烏魚、flathead、鱈魚、蝦虎、砂蝦) 的影響，未來風險評估則以降雨量、水溫與 CAE 為基礎，透過逐步迴歸模式 (forward stepwise regression model) 進行漁獲物衝擊與變動分析，並由風險分析結果，界定可行調適選項進行調適評估。Brenkert & Malone (2005) 從問題界定中了解印度人口

急速成長，氣候的多變性，在印度造成洪水及氣旋災害對印度具有相當之風險，現況風險評估了解到洪水及氣旋災害會破壞作物、財產、公共建設，對人及生物健康亦有負面影響。未來風險評估顯示山區及內陸的環境忍受度較優於海岸地區，而調適策略之擬定則建議高風險之海岸地區優先調適。

對於調適步驟之探討，Kwadijk 等人 (2010) 提出了調適決策 (The Adaptive Policymaking approach) 的概念，認為調適政策的產生應該是一個動態的過程，將該過程細分為五大步驟，包括：(1) 針對現況系統的情形進行分析，並設定目標未來的發展目標。(2) 擬定基本方案，針對步驟 1 所設定的發展目標擬定概略的達成方案。(3) 依據系統的脆弱度與機會，將步驟 2 的行動方案進一步細分為 I. 緩解措施 (actions to reduce the) II. 避險措施 (hedging actions) III. 掌握措施 (seizing actions) IV. 形成措施 (shaping actions)。(4) 設定一些追蹤用的指標 (signposts) 以了解各方案是否已滿足成功條件，以及方案面臨問題時該採行額外行動的觸發點 (triggers)。(5) 若上述的觸發點被啟動，則可採取四類不同的行動 (a) 防衛措施 (defensive actions)，釐清基本方案，確保利益並迎接外來挑戰。(b) 鄉政措施 (corrective actions)，針對既有方案進行調整。(c) 應急措施 (capitalizing action)，把握機會並改進現有方案之表現。(d) 重新評估方案 (reassessment of the plan)，計畫啟動時的分析與假設已經無效時採用。上述五大步驟中隱含了整個調適政策形成、執行以及修正概念。Haasnoot 則基於 Kwadijk 所提出的動態調適概念做延伸，提出了動態調適政策路徑 (dynamic adaptation policy pathway) 的想法。認為調適路徑的形成應包含以下流程：(1) 分析現況與不確定性；(2) 分析問題、脆弱度與可能機會；(3) 確定行動；(4) 評估前述行動的有效期限 (sell-by-date)；(5) 產生調適路徑圖；(6) 選擇偏好的調適路徑；(7) 決定調適行動計畫以及觸發時機；(8) 產生動態調適方案；(9) 實行調適方案；(10) 監測調適情形。

## 調適步驟架構研析

近年來臺灣乃至於全世界天氣誘發之災害不斷，提醒我們必須從過去衝擊評估之科學研究進展到推動調適行動之應用研究。然氣候變遷本身與其衝擊程度均具有相當高的不確定性，如何應用具有不確定性之

科學研究證據於實務調適能力建構，須發展與建立調適決策步驟之執行程序與可利用之工具、資料與方法等資訊，導引至正確調適行動。以下蒐集國際間相關之氣候變遷調適決策步驟與工具：

### UKCIP 調適精靈

英國推動的氣候衝擊計畫 (UKCIP)，於 1997 年開始推動，由環境、食品與鄉村事務部 (Defra) 委託牛津大學執行，為英國國家整體因應氣候變遷議題之上位計畫，發展出「調適精靈」(Adaptation Wizard)，其調適步驟為：開始 (Getting Started)、評估現況脆弱度 (Current Climate Vulnerability)、分析未來脆弱度 (Future Climate Vulnerability)、評估調適選項 (Adaptation Options) 及監測與回顧 (Monitor & Review)。

### UNFCCC 調適決策步驟

當前聯合國氣候變遷綱要公約 (UNFCCC) 進行全球因應氣候變遷機制與行動，以氣候變遷之減緩技術及衝擊調適為重點議題，影響未來世代之經濟、貿易、能源、環保等多面向的發展；而氣候變遷決策步驟上則建議以觀察 (Observation)、評估 (Assessment)、規劃 (Planning)、執行 (Implementation)、監測與修正 (Monitoring & Evaluation) 五步驟進行。

### UNDP-APF 氣候變遷調適政策綱領

聯合國發展規劃署 (UNDP) 與全球環境基金 (Global Environment Facility) 於 2003 年提出氣候變遷調適策略綱領 (UNDP-APF)，協助各國政府將氣候變遷調適納入國家發展政策，訂定出調適決策五步驟，分別為：「調適計畫的範圍界定與設計」、「現況脆弱度之評估」、「評估未來氣候風險」、「建構調適策略」及「執行調適，持續評估與強化調適能力」，許多國家將其列為因應氣候變遷調適政策擬定的參考依據。

### 英國 NI188 指標

英國於 2008 年提出，2010 年完成之執政者自我評估 — NI188，是 198 個國家成效指標的其中一個，主要是針對各計畫執行進度與概況進行程序上的檢核，強調各種關係人、執行程序與共識形成的相關程序。NI188 之調適步驟分別為：開始 (Getting started)、公開承諾及評估衝擊 (Public commitment and impacts assessment)、全面風險評估 (Comprehensive risk assessment)、整體調

適行動計畫 (Comprehensive action plan)、執行、監測與持續檢討 (Implementation, monitoring and continuous review)。

NI188 除可檢視國家在氣候變遷調適的執行程序完成度外，也提供給地方政府用來檢視氣候變遷調適上有那些步驟該執行或尚未執行，及步驟中的細節該如何執行與克服困難，故 NI188 不僅為調適決策步驟，也可用來檢核各層級政府調適執行程序的指標。

### Climate-ADAPT 歐洲氣候變遷調適工具

歐盟委員會 (European Commission) 於 2009 年提出歐盟層級調適做法白皮書 (Adaptation White Paper)，其中列出約 30 個應納入政策中的調適行動，如設立歐洲氣候變遷調適平台 (Climate-ADAPT)，除於平台中發布歐盟調適行動的最新資料及政策輔助工具外，還藉由 The Adaptation Support Tool，幫助使用者開發氣候變遷下的策略與計畫，該工具包含六大步驟，分別為：準備調適根據 (Preparing the Ground for Adaptation)、評估風險及脆弱度 (Assessing Risks and Vulnerabilities to Climate Change)、界定調適選項 (Identifying Adaptation Options)、評估調適選項 (Assessing Adaptation Options)、執行 (Implementation) 及監測與評估 (Monitoring and Evaluation)。

### 氣候變遷地方調適計畫

國內在國發會推動地方調適行動時，擬定氣候變遷地方調適計畫，以臺北市氣候變遷調適計畫為例，

該計畫為行政院經濟建設委員會於 2012 年委託辦理，協助臺北市延續 IPCC 氣候變遷調適基礎框架，並提出氣候變遷調適計畫推動架構作為調適步驟，其架構為：成立氣候變遷調適計畫推動工作小組、分析氣候變遷趨勢及影響、釐清氣候變遷衝擊關鍵領域與脆弱度概念、分析氣候變遷衝擊之脆弱度、分析關鍵議題、檢視既有政策與相關計畫及研提氣候變遷調適策略與行動計畫。

上述各單位之氣候變遷調適步驟彙整如表 1 所示，可以發現各單位之氣候變遷調適步驟有相同之架構與概念，但卻缺乏統一之步驟，以及切合 IPCC 第五次報告以探討氣候變遷風險來源為核心之精神。為此，本研究參考 UKCIP 的「調適精靈」(Adaptation Wizard)、UNDP 的「調適政策框架」(Adaptation Policy Framework) 及 Climate-ADAPT 的「調適支援工具」(Adaptation Support Tool)，發展出氣候變遷調適決策六大步驟，分別為：(1) 界定問題與設定目標、(2) 分析與評估現況風險、(3) 分析與評估未來風險、(4) 界定與評估調適選項、(5) 規劃與執行調適路徑、及 (6) 監測與修正調適路徑，其目的在於建立考量氣候變遷風險來源之調適決策步驟之執行程序，以提供決策者、一般民眾與執行團隊等了解氣候變遷調適該有之步驟，同時可作為檢核氣候變遷調適工作之參考依據。

### 研究方法

依循聯合國氣候變遷調適政策綱領 (UNDP APF)、英國氣候衝擊計畫的調適精靈 (UKCIP

表 1 各單位調適步驟比較

單位 步驟	UKCIP	UNFCCC	UNDP-APF	NI188	歐盟氣候調適平台	國內氣候變遷地方調適計畫
1	開始	觀察	調適計劃的範圍界定與設計	開始	準備調適的根據	成立氣候變遷調適計畫推動工作小組
2	評估現況脆弱度	評估	目前脆弱度之評估	公開承諾及評估衝擊	評估氣候變遷的風險與脆弱度	分析氣候變遷趨勢及影響
3	分析未來脆弱度	規劃	評估未來氣候風險	全面的風險評估	界定調適選項	釐清氣候變遷衝擊關鍵領域與脆弱度概念
4	評估調適選項	實施	建構調適策略	整體調適行動計畫	評估調適選項	分析氣候變遷衝擊之脆弱度
5	監測與回顧	監測與評估	持續調適過程	執行、監測和持續檢討	實施	分析關鍵議題
6					監測與評估	檢視既有政策與相關計畫
7						研提氣候變遷調適策略與行動計畫

Adaptation Wizard)、歐洲氣候調適平台的調適支援工具 (CLIMATE-ADAPT Adaptation Support Tool), 同時參考我國氣候變遷地方調適計畫, 本研究歸納之氣候變遷調適決策步驟包括: (1) 界定問題與設定目標; (2) 評估與分析現況風險; (3) 評估與分析未來風險; (4) 界定與評估調適選項; (5) 規劃與執行調適路徑; (6) 監測與修正調適路徑, 等六步驟。

## 界定問題與設定目標

主要目的在於界定氣候變遷下的關鍵議題並設定調適目標, 其下又細分為四個次步驟, 依序為: 1. 氣候變遷調適工作團隊之組成、2. 問題之界定、3. 跨領域關聯分析、4. 目標之設定, 詳細內容如後說明。

### ● 氣候變遷調適工作團隊之組成

欲組成氣候變遷調適工作團隊, 首先須確立主政部門與承辦人, 以避免後續執行時缺乏負責人主導。其次須組成負責之專業團隊, 藉由人才資料庫搜尋具備專業能力之團隊作為候選, 並藉由公開招標或遴選的方式, 組成專業團隊。建議可透過政府人才資料庫搜尋具備專業能力之團隊, 首要考量團隊是否具備具可信度之專業能力。確定負責之專業團隊後, 主政部門與承辦人須和負責之專業團隊進行權責分工以確認工作內容。最後必須組成參與的利害關係者, 後續決策時將考量利害關係者意見。籌組時可參考內部及外部利害關係者資料庫, 列出並邀請加入氣候變遷調適工作團隊; 內部利害關係者可能包含主政部門以外之其他部門, 而外部利害關係者可能包含當地居民、業者等直接受到影響者。

### ● 問題之界定

界定問題時, 首先須蒐集國內外氣候變遷關鍵議題, 包含文獻回顧及原有之規劃報告; 藉由國內外氣候變遷文獻可了解當前國內外主要關注議題及國際趨勢, 而參考原有之規劃報告可了解原有規劃內容及目標, 並依據執行成效評估是否需要修正既有規劃。建議可使用搜尋工具 (例如: TaiCCAT 知識平台) 搜尋國內外氣候變遷相關文獻, 原有規劃報告則建議參考歷年計畫或政策執行成果。其次為在地問題分析, 藉由歷史氣候災害資料庫、地方訪談、電話或民調等方式, 了解當地關心之氣候相關問題, 有助於直接解決燃眉之急。

接下來須界定擬解決的關鍵議題及系統範圍, 根據文獻回顧、在地問題分析結果, 了解規劃對象或領域之氣候變遷關鍵議題與在地關注議題, 並透過調適啟動會議來決定調適關鍵議題與系統範圍, 接著可進一步界定關鍵議題之危害、暴露與脆弱因子。專業團隊由界定之關鍵議題與系統範圍, 清楚界定出關鍵議題之危害、暴露與脆弱因子, 作為後續評估依據。

### ● 跨領域關聯分析

若欲分析之關鍵議題為跨領域範疇, 則須利用跨領域分析工具界定出關鍵議題之跨領域影響範圍, 建議可使用 TaiCCAT 跨領域系統動力模式分析各領域間關聯性。根據關鍵議題跨領域影響領域與因子, 檢討調適工作團隊之專業團隊組成名單是否具備跨領域評估能力, 以及受影響之利害關係者名單是否需要增減。

### ● 目標之設定

設定氣候變遷調適目標時, 首先須分析及檢討與關鍵議題相關之原有策略目標, 透過調適啟動會議, 回顧原有規劃及執行成效, 檢討與修正原有策略與目標, 以避免調適策略可和已有策略不連貫, 或無法妥善修正。透過與專業團隊及利害關係者會議, 有助客觀檢討原有策略目標。其次為建立策略目標之評估項目與可接受風險, 決定策略目標之評估項目、系統範圍與可接受風險後, 方能確定調適目標以及評估依據, 並藉由設定之可接受風險, 判斷調適成果是否符合預期。最後藉由策略目標之評估項目、系統範圍與可接受風險, 可確定調適目標, 並可客觀決定政策目標與目標年, 以確定達成調適目標之期限。

## 評估與分析現況風險

步驟二的主要目的是利用歷史資料與模式現況模擬結果, 評估目標領域所面臨之風險, 並探討風險之來源為何。其中分為三個次步驟, 分別為歷史事件之風險分析、評估模擬模式之驗證、利用現況氣象資料進行風險模擬。而各次步驟當中又有若干工作項目需要達成, 接下來將針對各個次步驟中的工作項目來進行介紹。

### ● 歷史事件之風險分析

欲了解現況之風險, 則必須先了解歷史事件之風險, 並進行分析與評估。評估歷史事件所需之工作項

目分為兩項，首先需蒐集關鍵議題相關之歷史事件風險評估結果。透過蒐集過去關鍵議題相關研究之風險評估結果，此結果可以是脆弱度分析、脆弱度地圖、危害分析、危害地圖，或是綜合脆弱度與危害之風險分析與風險地圖。若缺乏研究相關資料，可以地方經驗作為歷史事件之風險分析參考。在資料的蒐集上，需要歷史極端氣象災害事件資料，並建立歷史事件鑑別熱點及風險成因分析表，以利後續能夠產出歷史極端氣象災害事件風險評估陳述與結果。若無法取得關鍵議題之歷史事件風險評估結果，則無法了解歷史事件之風險，同時缺乏後續參考或佐證資料。

再來可進而鑑別熱點及風險成因（危害、暴露或脆弱度）。由過去關鍵議題相關之歷史事件風險評估結果，鑑別高風險地區（熱點），說明各熱點之風險主要來源為何？分屬危害、暴露度或脆弱度？因此需要各領域主要問題類型資料來幫助判斷歷史事件鑑別之熱點及風險成因，若是未能鑑別熱點及風險成因（危害、暴露或脆弱度），則可能在後續導致調適決策方向錯誤。

#### ● 評估模擬模式之驗證

完成關鍵議題之歷史事件風險分析與鑑別熱點及風險成因後，便能著手評估模擬模式。首先蒐集模擬模式所需之歷史觀測資料，如氣象、水文、土地利用、經驗參數以及驗證所需資料，並將後續所需之各領域評估模式進行驗證，產生經過驗證後之模式參數。接著檢定模式參數與驗證模式，利用模擬模式所需之歷史觀測資料進行檢定，最後產出通過驗證之模擬模式，若是模式未經驗證可能導致模擬結果誤差，進而影響調適之決策。

#### ● 利用現況氣象資料進行風險模擬

首先，需要定義評估之指標，回頭參考第一步驟所定義之評估項目，定義風險模擬所需之指標，如脆弱度、回復力及風險指標，如為跨領域問題，則須以被影響之領域定義評估指標。找出策略目標之評估項目、系統範圍與可接受風險，並對於評估指標有著清楚的定義，若是對評估指標沒有清楚的定義，則會缺乏風險評估之依據。接著便可將已通過驗證之模式參數代進模式當中，並輸入歷史資料進行模擬與分析。

有了現況之模擬結果，便可藉由歷史資料模擬結果，進一步分析及量化評估指標，並產出由歷史資料模擬結果與分析之量化指標結果，若是缺乏此量化指標結果則會缺乏歷史資料模擬指標可能忽視模式誤差所造成

之現況分析之不確定性。最後再利用現況資料模擬與輸出危害、脆弱度與風險地圖，鑑別空間高風險地區（熱點），說明各熱點之風險主要來源為何？分屬危害或脆弱度？並比對歷史事件與現況模擬之風險分析結果。需要根據前面產出的歷史分析量化指標來進一步找出現況分析之熱點與風險成因，因為缺乏現況分析之熱點與風險成因很有可能導致調適決策之方向錯誤。

### 評估與分析未來風險

步驟三主要的目的是利用模式與氣候情境評估基期與未來之風險，由基期與未來風險之差異探討氣候變遷所增加之風險，並探討風險來源為何。其中包含四個次步驟，分別為情境設定、評估基期風險、評估未來風險及比較基期與未來之風險差異。而各次步驟當中又有若干工作項目需要達成，接下來將針對各個次步驟中的工作項目來進行介紹。

#### ● 情境設定

氣候變遷衝擊評估由於並無未來氣象紀錄資料，故須建立未來氣候可能之情境，才能進一步探討氣候改變之衝擊。由大氣環流模式透過降尺度過程設定預設情境，輸入氣象資料合成模式產生評估模式所需要之氣象資料，最後由評估模式分析得知衝擊影響。全球大氣環流模式（General Circulation Model, 簡稱 GCM）以物理性評估大氣溫室氣體增加導致全球暖化之特性，模擬分析包括大氣、海洋、冰、陸地系統間之交互作用。而 IPCC 預測全球未來可能之經濟、人口、工業與環境的發展，提出數種可能溫室氣體排放的趨勢（即為預設情境）。

在 IPCC 第五次評估報告中，是以「代表濃度途徑」（Representative Concentration Pathways, 簡稱 RCPs）來定義四組未來變遷的情境，並以輻射強迫力在 2100 年與 1750 年之間的差異量當作指標性的數值來區分之。被命名為 RCP2.6 的情境意味著每平方公尺的輻射強迫力在 2100 年增加了 2.6 瓦，而 RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5 則代表每平方公尺的輻射強迫力分別增加了 4.5、6.0 與 8.5 瓦。在這四種情境中，RCP2.6 是個暖化減緩的情境（輻射強迫力在 2100 年呈減少趨勢）；RCP4.5 與 RCP6.0 是屬於穩定的情境（輻射強迫力的變化在 2100 年呈較為穩定狀態）；RCP8.5 則是個溫室氣體高度排放的情境（輻射強迫力在 2100 年呈持續增加趨勢）。相較於第三次評估報告與第四次評估報

告所考慮的情境，這四種情境所能涵蓋層面更廣。除了設定了逐年的溫室氣體濃度，根據整合評估模式、簡化氣候模式、大氣化學模式以及全球碳循環模式的組合計算，每個RCP可以估算出人為溫室氣體排放量，並提供土地利用變遷的空間分布以及各區域空氣污染物的排放量。雖然這些RCP情境已經涵蓋了相當廣的輻射強迫力範圍，但仍有其不足之處，特別是與氣溶膠相關的部分。

在未來氣候情境的設定上，首先必須選定適合之GCM模式，再以選定GCM之氣候情境來進行氣候變遷模擬運算。而選定的方式可分為兩種，自行分析選定或是參考國內先前與相關研究所挑選之GCM進行分析。若是自行分析選定，要先訂定挑選原則，接著分析IPCC所釋出之GCM模式的基期資料，與歷史資料進行分析，挑選其氣候特性與台灣相近之模式進行後續分析。IPCC提供40多個GCM的RCP情境，雖然

每個GCM都經過驗證，然而對於台灣氣候特性之模擬表現，並非所有的GCM都有好的模擬結果。因此，使用不適合之GCM容易增加評估結果之不確定性，唯有挑選在台灣地區模擬表現較好之GCM，才能降低GCM所造成之不確定性。

IPCC提供RCP情境中適合台灣GCM之挑選報告提及利用中央氣象局測站資料，分析同時具有RCP8.5、6、4.5、2.6的GCM與台灣降雨之相關性與模擬表現度。依照降雨季節分布特性之不同，將台灣分成七個分區，以利使用者針對其研究區域挑選適合之GCM。結果如表2所示，每個分區前五名GCM依序列如表2，表3為各GCM之所屬單位與國家，而各氣候分區對應中央氣象局測站名稱如表4所示。

選定GCM模式後，接著需要設定氣候情境。氣候情境指的是未來相對於歷史某個時期，未來氣候的改變量，而此歷史某個時期即為情境時期基準，稱為

表 2 研究區域落在台灣七個分區以及全台灣所適合之 GCM 列表

Rank	1	2	3	4	5
西北部	HadGEM2-AO	CCSM4	CSIRO-Mk3.6.0	NorESM1-ME	MIROC5
東部	CESM1-CAM5	GISS-E2-R	CCSM4	bcc-csm1.1	CSIRO-Mk3.6.0
恆春半島	MIROC5	GISS-E2-R	CCSM4	CSIRO-Mk3.6.0	HadGEM2-AO
南部	HadGEM2-AO	MIROC5	bcc-csm1.1 (m)	CCSM4	CESM1-CAM5
北部山區	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5	NorESM1-ME	HadGEM2-AO	MRI-CGCM3
中部山區	MIROC5	CCSM4	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	MRI-CGCM3
西部離島	HadGEM2-AO	MIROC5	CESM1-CAM5	bcc-csm1.1 (m)	CCSM4
台灣	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	CCSM4	MIROC5	GISS-E2-R

表 3 各 GCM 之所屬單位與國家

研發單位	國家	單位簡稱	模式
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	中國	BCC	BCC-CSM1.1 BCC-CSM1.1 (m)
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	澳洲	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0
The First Institute of Oceanography, SOA, China	中國	FIO	FIO-ESM
Institut Pierre-Simon Laplace	法國	IPSL	IPSL-CM5A-LR IPSL-CM5A-MR
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	日本	MIROC	MIROC5
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	日本	MIROC	MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM
Meteorological Research Institute	日本	MRI	MRI-CGCM3
NASA Goddard Institute for Space Studies	美國	NASA GISS	GISS-E2-H GISS-E2-R
National Center for Atmospheric Research	美國	NCAR	CCSM4
Norwegian Climate Centre	挪威	NCC	NorESM1-M NorESM1-ME
National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration	韓國	NIMR/KMA	HadGEM2-AO
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	美國	NOAA GFDL	GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M
National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research	美國	NSF-DOE-NCAR	CESM1 (CAM5)

表 4 對應分區之氣象站分區表

分區	分區包含測站
西北部	台北、淡水、新竹、梧棲、台中
東北海岸	基隆
東部	宜蘭、花蓮、成功、台東
恆春半島	大武、恆春
南部	嘉義、台南、高雄
北部山區	鞍部、竹子湖、蘇澳
中部山區	日月潭、玉山
南部山區	阿里山
北部外島	彭佳嶼
西部外島	澎湖、東吉島
東部外島	蘭嶼

基期。以 IPCC 第五次報告而言，多以 1986 ~ 2005 年為基期。氣候變遷情境可由 IPCC 資料發布中心 (Data Distribution Center) 取得，然而 IPCC 提供之情境為全球環流模式所模擬出之結果，因此包含全球各地之氣候情境，且尚未進行降尺度至臺灣的動作。我國科技部有鑑於此，乃委託國家災害防救科技中心 (NCDR) 執行 TCCIP 計畫，將 IPCC 所提供之氣候情境，利用統計降尺度至臺灣地區，並提供國內相關研究申請使用。另外，相關研究單位亦取用 IPCC 與 TCCIP 的情境，將情境資料內含在評估模式當中，使用者可以直接透過評估模式取得氣候變遷情境，相關模式如 TaiWAP (Liu et al. (2009); 劉子明 (2010); Tung, et al. (2014); TaiWAP 網站)。最後則需要確定影響未來風險之社會發展因子並設定社會經濟發展情境，如 GDP、人口、工業發展、農業發展、土地利用變化等，同時考量氣候情境以及社會經濟情境以利後續未來風險分析與評估。

#### ● 評估基期風險

以氣象合成模式合成出基期氣象資料，或利用大氣環流模式產生出較小時間尺度之基期氣象資料，並代入基期之社會經濟參數進行模擬，以分析與評估基期風險。最後再模擬與輸出危害、脆弱度與風險地圖，鑑別空間高風險地區 (熱點)，說明各熱點之風險主要來源為何。基期以氣象合成資料模擬目的在於跟未來風險比較時有相同之模式基準，避免合成模式與歷史資料之間的誤差影響結果。

#### ● 評估未來風險

評估未來風險的流程與前面評估基期風險的流程相似，一樣運用前面設定之基期統計氣候特性參數與未來氣候情境，以氣象合成模式合成出未來氣象資

料，或利用大氣環流模式產生較小時間尺度之氣象資料。產出合成的未來氣象資料，並代入未來之社會經濟參數進行模擬，以分析與評估未來風險。最後再模擬與輸出危害、脆弱度與風險地圖，鑑別空間高風險地區 (熱點)，說明各熱點之風險主要來源為何。

#### ● 比較基期與未來之風險差異

分別產生基期與未來的風險地圖之後，便可比較基期與未來風險地圖之差異，找出風險增加之區域，並說明造成風險增加之原因來自於危害、暴露或脆弱度。如為跨領域問題，則須考慮風險成因與主要影響領域之關係。經過比較基期與未來模擬指標結果，以及基期與未來的風險地圖後，便能得到未來風險差異之空間熱點，及未來風險成因 (危害、暴露或脆弱度)，作為後續調適決策之參考依據。

### 界定與評估調適選項

步驟四主要目的在於分析風險來源，擬定與評估可用之調適選項，藉此選出與排序可行之調適選項。本步驟可細分為兩個次步驟：(1) 界定調適選項、(2) 評估調適選項，詳細內容如後說明。

#### ● 界定調適選項

首先須針對風險來源蒐集可能的調適選項，建議針對可行調適選項進行對應問題或風險類型 (危害、暴露或脆弱度) 之分類，以作為調適策略之選擇依據，並藉由分析未來風險差異之空間熱點，及未來風險成因，配合調適策略列表彙整出對應風險成因之調適選項列表。此外，必須考量當地智慧調適選項，並分析其所對應解決之風險來源，建議可透過利害關係者會議蒐集在地調適選項以擴充調適選項列表。最後可依上述步驟，挑選所列調適選項進行後續評估，彙整出可行之調適選項。

#### ● 評估調適選項

於擬定調適選項評估準則時，可參考 UKCIP 所建議之評估準則，或增加團隊認為必須考慮之準則。如為跨領域問題，則建議將調適選項與其他領域之競合關係作為評估準則之一，此項作業可透過政府部門及專家學者問卷調查來決定，評估準則如跨領域影響、效用、可行性、不確定性等。接著須決定評估準則之權重，建議可參照 AHP 層級分析法或專家建議決定各評估準則之權重，以作為後續排序之加權依據。

最後依據各準則評估調適選項或組合，優選出合適之調適選項或組合。建議利用多準則排序評估法、層級分析法或其他有依據之評估、決策方法，由調適策略列表中找出適合之調適選項。若無法找出適用之調適科技、缺乏調適選選項組合，將無法產生調適路徑。

## 規劃與執行調適路徑

此步驟的目的在於規劃與制定調適選項的執行路徑，並且制定出實際執行的順序與時程，其基本的步驟可分為：(1) 規劃調適路徑、(2) 執行調適行動兩部分。

### ● 規劃調適路徑

在規劃調適路徑的過程中，首要工作乃基於調適選項之組合制定出調適路徑圖。在第四步驟中已針可能採用之調適路徑進行排序與優選，找出較佳之調適選項組合，而各種調適選項之組合，即代表後續執行調適方案時的「路徑（即可能採用之調適選項組合及其順序）」。

由於可採行的調適選項往往具備複數種類，因此可能產生的「路徑」亦可能具備多種選擇，若將可能的路徑繪製成圖，則將產生類似大眾運輸路線圖的調適路徑圖。

圖 2 為本研究參考 Haasnoot 等人之研究 (Haasnoot et al. 2013) 所繪製之調適路徑圖示意架構，該調適路徑圖由 A~D 四項調適路徑所構成，圖中的「○」符號表示調適行動方案的轉換點，而「|」符號則表示系統之臨界點。圖 2 縱軸為調適選項，橫軸為時間，若持續採行現行政策，則系統很可能將遭遇臨界點，此時氣候變遷對系統產生的衝擊將超越系統自身的調適能力，使系統面臨過大之風險。為了不使系統遭遇臨界點，可於遭遇臨界點之前轉換至 A、B、C、D 任意調適選項，以延長系統遭遇臨界點之時間。若採行調適選項 A 或調適選項 B，系統將能持續運作，若採行選項 B 獲選項 C，則系統仍會因為選項無法執行而必須再次轉換到其他策略。事實上調適路徑圖的目的在於清楚呈現所關注系統或是



圖 2 調適路徑之示意圖 (Haasnoot et al. 2013)

議題可能採取的調適選項種類，以及由不同選項組成的調適路徑，因此並未具備特定的形式或是規範。

調適路徑圖中的路徑均經過前置分析，各策略背後所包含的調適選項或是方案組合皆為可行，僅需由多條路徑中選擇其條即可付諸實行。然而，就現實執行面來說，不同的調適選項組合，其背後對於其他領域所產生的影響層面或是衝擊程度不盡相同，因此本研究建議在調適路徑的選擇階段，應再次召開利害關係者討論會議，藉由不同的觀點重新審視調適路徑途中的各種可能路徑選項，以挑選出適當之調適路徑。而一旦確立調適路徑後，為了日後能有效確保調適路徑中的各項調適方案皆能有效執行，應針對各項調適方案預先設定程序指標與成效指標。

### ● 執行調適行動

由於單一調適路徑中可能包含多項調適選項，而各選項所牽涉到的負責部門或是執行單位有可能因政府組織權責的分工而有所差異，因此本研究認為在執行調適行動階段，其首要工作乃確認各項調適選項的分工以及其執行單位。唯有預先確定各調適選項皆有負責執行的部門或單位，後續方能按照計畫逐一施行而不至產生斷層。而一旦調適選項開始依照計畫啟動時，負責各項調適選項的執行單位則需要依據所執行方案的特性擬定執行計畫，並依照執行計畫逐步完成調適選項之內容。

## 監測與修正調適路徑

監測與修正調適路徑為六大步驟的最後一個環節，其主要目的在於監測與評價調適選項之執行成果是否符合預期，是否走在原定之調適路徑上，並提出調適路徑的修正建議或方向。此步驟之細部流程可劃分為：(1) 確認氣候與環境變化趨勢、(2) 評估調適方案之執行程度、(3) 評估調適方案之執行成效、(4) 修正調適計畫。

### ● 確認氣候與環境變化趨勢

在步驟三中，為了評估系統於未來可能遭受之風險，必須先針對未來可能之氣候情境或是社會經濟情境進行假設。然而，無論是氣候變遷情境或是社會經濟情境均為相關領域學者之推定，實際上的氣候變化或是社會經濟發展未必會遵循此預測趨勢變動。因此本研究建議應定期監測氣候、環境以及社會經濟情

勢之變化情形，並與步驟三所假設之預設情境比對，一旦實際之氣候或是社會經濟變化情形偏離預設情境時，則需考慮是否重新進行未來風險分析，甚至於重新規劃調適選項與調適路徑。

#### ● 評估調適方案之執行程度

在步驟五中已針對調適路徑中的各項調適選項設定了檢核用的程序指標，而在第六步驟中由於調適選項已進入執行階段，需定期以各項調適選項的程序指標進行檢核，以了解各調適選項是否有按照原先預定的程序與進度順利執行。

#### ● 評估調適方案之執行成效

同上，利用步驟五設定檢核用的成效指標，定期檢核各項調適選項成效，以了解各調適選項是否有符合原先氣候變遷風險評估下之效用。

#### ● 修正調適計畫

若是程序與成效指標的評估結果顯示出調適選項的執行明顯不如預期，則執行團隊應進一步檢討其背後的可能原因，並設法提出修正改善計畫。綜上，調適計畫的修正可能是因為步驟三所假設之氣候變遷或是社會經濟情境已被離現實發展之趨勢，亦可能是由於程序或成效指標無法滿足檢核需求而必須做修正調整。

## 案例分析

前節所述之氣候變遷調適決策六大步驟，提供了氣候變遷調適決策的系統性流程，可協助決策者由界定問題與設定目標開始，到最後的調適路徑監測與修正，其間的所有流程均有詳細步驟與工作項目羅列說明，讓整體調適流程更加明確化與制度化，以利所有領域與部門進行氣候變遷調適之工作。本節將以高雄地區水資源供水系統為例，說明氣候變遷調適決策步驟一至四，以了解氣候變遷下水資源供水系統所面臨之風險與調適決策步驟。

### 界定問題與設定目標

#### ● 氣候變遷調適工作團隊之組成

針對高雄地區水資源供水系統面對氣候變遷之風險與調適擬定，本研究案例假設主政部門為經濟部水利署水利規劃試驗所，主要掌控我國水資源之開發與規劃，而承辦人員則為水利規劃試驗所水源課研究員。氣候變遷調適之工作由此起頭，藉由公開招標與遴

選，挑選出適合之專業團隊。再挑選與高雄地區水資源供水系統之利害關係者，以此組成工作團隊，作為後續工作推動的基本組成。水資源的利害關係者首先為不同用水需求者，分為農業用水者、民生用水者、及工業用水者，而農業用水的管理者為高雄農田水利會，民生與工業用水管理者則為台灣自來水公司，其他 NGO 單位則有中華民國自來水協會、台灣環境保護聯盟、社團法人台灣永續生態工法發展協會、綠色和平基金會等，提倡永續經營、和平發展以及節約水資源等概念加強民眾的基礎教育使得社會更和諧。

#### ● 問題之界定

本研究以高雄地區為研究區域，供水系統如圖 3 所示。主要跟供水系統有關之支流包括高屏流域的旗山溪、美濃溪、荖濃溪、濁口溪以及隘寮溪。高屏溪為臺灣流域面積最大河川，年平均逕流量 8,455 百萬立方公尺，其中豐水期 7,694 百萬立方公尺約佔總逕流量之 91%，枯水期約 761 百萬立方公尺約佔總逕流量之 9%（經濟部水利署全球資訊網）。高屏溪流域內並無水庫，只有離槽水庫 - 南化水庫屬於曾文溪流域。南化水庫上游入流河川為後堀溪，然而主要蓄水來源乃利用甲仙攔河堰越域引旗山溪水，再利用輸水管引水至坪頂淨水場，以蓄豐濟枯的方式供應大高雄地區之供水。另於下游處有高屏攔河堰引水至坪頂、澄清湖、翁公園以及拷潭淨水場供應大高雄供水。高屏溪流域背負著供給高雄地區民生與工業用水之重責大任，對水量需求十分殷切，同時亦供給高雄水利會灌區以及部分屏東水利會灌區（如圖 3 編號 11~16 圳路）（童慶斌等，2013）。

藉由文獻蒐集與分析，可了解全球溫度有上升趨勢，未來氣候變遷可能導致無法預料的降雨或極端事件影響水資源甚鉅（游保杉，2001），南部地區豐枯差異大，水資源管理困難，氣候變遷將會加劇影響（童慶斌等，2007；童慶斌等，2009；許泰文等，2009），而水資源又影響社會經濟發展、糧食系統等（童慶斌，2012）。面對此氣候變遷的威脅，在對應不同系統本身的調適能力下，需評估系統風險並制定適合的調適決策因應。

分析現有水資源系統，可以了解水資源系統所面臨的問題包括：水源不足、水需求成長、水資源設施不足、整合性管理彈性不足、及氣候變遷調適決策能力不足，各項問題類型與說明如表 5 所示。



表 6 歷史事件之衝擊與風險來源

發生時間, 事件	衝擊 (包含影響空間)	風險來源 屬危害、暴露或脆弱度?
2003 年, 旱災	2003 年 7 月, 全台 7 月份平均雨量為 53 年來最低, 缺水日漸嚴重, 南化水庫蓄水率 44%, 曾文與烏山頭水庫聯合蓄水率 12.5%, 各標的用水實施減壓供水, 停灌各期甘蔗雜作, 一期稻作採加強灌溉管理, 以通水七日間斷九日方式供應。	枯水期末水資源漸漸不足, 進入豐水期又沒有明顯補注, 乾早期距拉長, 使得用水調度困難。 危害 — 豐枯水期分配不均
2009 年 8 月 9-14 日, 莫拉克風災缺水	莫拉克颱風挾帶豪雨, 沖毀南化 - 坪頂淨水場聯通管路, 甲仙攔河堰閘門取水設施損毀, 加上南化水庫原水濁度飆高, 高屏攔河堰亦被洪水淹沒, 嚴重影響大高雄供水	極端事件造成供水系統損毀, 高濁度下處理不及以致無法正常供水。 危害 — 極端氣候 脆弱度 — 極端氣候影響供水系統
2009-2010 年, 莫拉克風災過後南部乾旱	莫拉克過後, 台南地區久未降雨, 曾文水庫因八八水災嚴重淤積, 曾文與烏山頭蓄水約兩億噸, 其中自來水公司移用 6000 萬噸, 而嘉南地區 2010 年 1 期作全面休耕, 僅春季雜作灌溉, 以確保工業及民生用水不被限制。而之後的梅雨季降雨不甚理想, 南部供水吃緊, 決定將南部 2 期稻作灌溉時間延後半個月。	枯水期末水資源漸漸不足, 進入豐水期又沒有明顯補注, 乾早期距拉長, 使得用水調度困難。 危害 — 豐枯水期分配不均 脆弱度 — 供水系統抗旱能力不足、極端氣候影響供水系統
2011 年 5 月, 乾旱	2010 年 10 月 23 日梅姬颱風侵臺後, 臺灣地區進入約半年的枯水期, 降雨偏少之地區 4 月則向南延伸至南部高雄。	乾旱發生期距拉長, 使水資源利用困難。 危害 — 豐枯水期分配不均 脆弱度 — 供水系統抗旱能力不足
2014 年 3 月, 乾旱	高雄地區則因近期降雨不佳, 影響作物生長、產量降低, 曾文 — 烏山頭水庫蓄水情形較歷年同期減少 1 億 1882 萬噸, 降雨情況不如預期, 造成水庫蓄水容量不足。	乾旱發生期距拉長, 使水資源利用困難。 危害 — 豐枯水期分配不均 脆弱度 — 供水系統抗旱能力不足
2015 年 3~5 月, 乾旱	全台降雨量不足, 由以南部地區更為嚴重。	乾旱發生期距拉長, 使水資源利用困難。 危害 — 豐枯水期分配不均 脆弱度 — 供水系統抗旱能力不足

表 7 GWLF 使用參數與驗證結果

支流	出口流量站或水庫集水區	驗證年份	CN 值	退水係數	Vs/Vo	CC
後堀溪	南化水庫	1990~2007	74	0.121	1.08	0.89
旗山溪	楠梓橋	1997~2008	72	0.092	1.18	0.77
荖濃溪	阿其巴橋	1994~2009	75	0.045	1.22	0.67

用軟體 Vensim (Vensim 網站), 建立結合曾文溪水資源系統之高屏溪水資源系統動力模式進行水資源系統模擬。利用 2001-2004 年之里嶺大橋流量 (2005-2006 年流量缺測) 進行驗證, 結果如圖 5, 里嶺大橋在經過上游取水, 以及兩大支流匯流後, 仍有不錯的模擬結果, 相關係數有 0.85。顯示本研究之高屏溪水資源系統可以合理模擬整個水資源供需水的模擬。

● 利用現況氣象資料進行風險模擬

依照現況之計畫需水量進行模擬與分析, 生活需水量採用「水資源開發利用總量管制策略推動規劃」(經濟部水利署, 民國 101 年) 之數據進行模擬與分析, 工業需水量則採用最新報告「曾文南化水庫聯通管輸水工程可行性分析」(水規所, 民國 102 年) 之計畫需水量, 農業用水則以高雄水利會民國 102 年計畫需水量

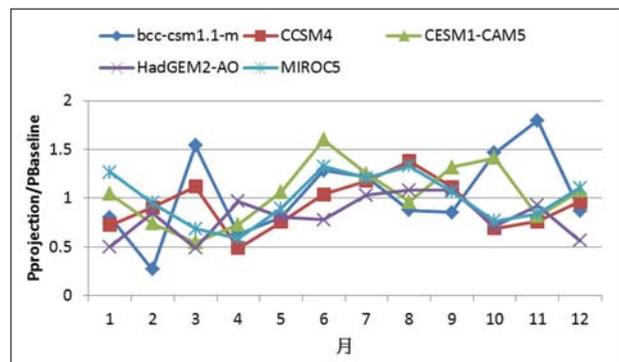


圖 5 高雄地區五個 GCM 之 RCP8.5 降雨情境 (旗山溪為例)

進行模擬。高雄地區現況水源供給能力約每日 152.8 萬噸 (水利署, 2011), 本研究推估現況之供水承載力為 152.67 萬噸, 相當接近。然而現況高雄之需水量約為每日 172 萬噸, 需水量遠超過系統可供水量, 可知高雄地區已經暴露在相當之缺水情況。以現況風險評估結果分析, 高雄地區現況主要問題在於需水量遠高於可供水量, 此風險來源雖然可視為調適能力不足引致之高脆弱度, 但以水資源總量管制的角度思考, 反而應該檢討高需水量導致之風險, 應該降低暴露於此風險下之各標的需水量, 以降低暴露度的方式降低系統風險。

## 評估與分析未來風險

### ● 情境設定

為了評估未來氣候變遷下之最大可能風險，本研究以排放情境最嚴重之 RCP8.5 進行評估，採用適合台灣南部的五個 GCM，HadGEM2-AO、MIROC5、bcc-csm1.1 (m)、CCSM4、CESM1-CAM5 (請見表 2)，並以民國 120 年為目標年，採用民國 120 年之人口預估、每人每日用水量預估、工業用水中成長等作為未來社會經濟情境。民國 120 年對應氣候情境則為 2021~2040 年之氣候情境。在此僅列旗山溪之降雨情境 (未來雨量/基期雨量) 如圖 5 所示，縱軸為未來相對於基期之降雨量倍數，亦即大於 1 表示增加，小於 1 表示減少。每個情境在豐枯水期的變化上可能影響供水系統之供水能力，然而實際影響仍需藉由模擬才能評估出來，光由降雨量之豐枯變化，是難以斷定對水資源供水之衝擊的。

### ● 評估基期風險

基期之公共用水缺水分析如表 8 所示。由於模擬過程並不考慮農田休耕以及備援供水等措施，此模擬結果乃沒有彈性之供水系統模擬結果，亦即沒有緊急與備援措施條件下之缺水分析。結果顯示，在沒有備援措施條件下，高雄地區年缺水率為 11.5%，相當於缺水指數 SI = 1.32，缺水事件之平均缺水日數為 66 日，缺水事件最大缺水率為 67.4%。以現況供水設施進行評估，當 SI 為 1 之條件下，基期供水能力為 152.03 萬噸/日，基期供水缺口約每日 20 萬噸。

表 8 基期高雄地區公共用水缺水分析

年缺水率	SI 缺水指數	平均缺水日數	最大缺水率	供水缺口 (萬噸/日)
11.5%	1.32	66	67.4%	20

### ● 評估未來風險

高雄地區未來供水能力模擬結果如表 3 所示，高雄地區在民國 120 年無氣候變遷下，生活需水量為每日 106.2 萬噸，工業需水量為每日 93.5 萬噸，換算公共需水量為 199.7 萬噸/日，供水缺口 43.37 萬噸/日，顯示現況設施無法滿足未來需水條件。氣候變遷評估中，工業需水量維持民國 120 年之計畫需水量每日 93.5 萬噸；生活需水量為每日 101.9 萬噸。承载力評估結果顯示氣候變遷影響下，供水能力為每日 145.36~163.95 萬噸，供水缺口約每日 31.45~50.04 萬噸 (表 9)。

### ● 比較基期與未來之風險差異

將有氣候變遷下之供需缺口減去無氣候變遷下之供需缺口，便可以推求出因為氣候變遷影響所造成之供需缺口，如表 9 所示。結果顯示氣候變遷影響所造成之供水缺口可達每日 6.67 萬噸，同時有結果顯示氣候變遷可增加供水能力，至多可達每日 11.92 萬噸。在風險管理與考量之下，仍以最大可能風險進行評估，而 CCSM4 評估結果為未來最負面之結果，後續將以 CCSM4 之結果來探討調適方案是否能夠因應未來氣候變遷與需水壓力。

由 CCSM4 之評估結果進行風險來源探討，得知未來水資源風險來源包括 (1) 危害度的增加，此部分即為氣候變遷所造成豐枯變化加劇，因而降低水資源系統供水能力，提高缺水風險；(2) 暴露度之增加，此部分即為需水量之增加，所造成暴露於缺水系統程度的增加。另外，對於缺水事件較敏感之工業，屬於系統較脆弱之一面，然而未來經濟發展之需求，增加工業之發展，同時也是提高系統之脆弱度。

表 9 民國 120 年考量以及未考量氣候變遷影響之供需水模擬結果 (單位：萬噸/日)

民國 120 年無氣候變遷	(1) 生活需水量	106.2				
	(2) 工業需水量	93.5				
	(3) 公共需水量 ((1)+(2))	199.7				
	(4) 供水能力	152.03				
	(5) 供需缺口 ((3)-(4))	43.37				
民國 120 年 RCP8.5 情境	GCM	Bcc-csm1.1(m)	CCSM4	CESM1-CAM5	HadGEM2-AO	MRCGCM
	(6) 生活需水量	101.9	101.9	101.9	101.9	101.9
	(7) 工業需水量	93.5	93.5	93.5	93.5	93.5
	(8) 公共需水量 ((6)+(7))	195.4	195.4	195.4	195.4	195.4
	(9) 供水能力	152.57	145.36	163.95	161.84	145.82
	(10) 供需缺口 ((8)-(9))	42.83	50.04	31.45	33.56	49.58
氣候變遷造成供需缺口 ((10)-(5))		-0.54	6.67	-11.92	-9.81	6.21

## 界定與評估調適選項

### ● 界定調適選項

我國「國家氣候變遷調適政策綱領」中水資源調適策略以「在水資源永續經營與利用之前提下，確保水資源供需平衡」為總目標。依此目標擬定之水資源調適策略包括：(1) 穩定供水能力；(2) 確保合理用水需求負荷；(3) 強化彈性管理能力；(4) 掌握水資源資訊與不確定性；(5) 集水區保育與合理土地利用規劃及 (6) 其他（社會經濟、產業與科技發展）等（經濟部水利署水利規劃試驗所，2012）。由觀察與評估的水資源問題與脆弱度，可以擬定對應之調適策略以及調適方案選項。

### ● 評估調適選項

前一節所界定之調適選項，有些目的在於降低危害度，有些是降低暴露度，有些在於降低脆弱度。依據本研究從問題界定到評估與分析現況與未來風險，了解高雄地區未來主要風險來源來自於高暴露度以及高危害度。推動節水措施雖然可以降低暴露度，但考量未來經濟發展與糧食安全問題，仍須提出降低危害度之調適方案。根據台灣南部區域水資源經理計畫（經濟部水利

署，2011），高雄地區為了補足供需缺口，擬推動高屏大湖一期與二三期，高屏大湖一期將增加每日 14 萬噸供水量。高屏大湖二三期若於民國 120 年完工，將提供每日 28.6 萬噸供水量，共增加每日 44.6 萬噸。然而在氣候變遷影響下，供水能力可能遭受影響。如表 11 的 CCSM4 結果顯示，民國 120 年在氣候變遷影響下，可能仍有每日 5.44 萬之缺口。面對氣候變遷的不確定性，未來氣候變遷可能增加供水缺口，也有可能降低缺水風險，如為了此氣候變遷可能缺口 5.44 萬噸/日，再以穩定供水能力之策略，增加水源來降低危害度，也有可能造成過度調適與資源浪費等問題。因此，面對此缺口，宜考量不後悔或環境低衝擊之調適方案，以避免因為提升水資源調適能力，反而消耗社會成本與環境資源。

## 結論與建議

永續發展為滿足當世代自身的需求，而不損及未來世代滿足其需求的能力，面對氣候變遷的風險，如何滿足當代與未來的需求，對於決策者而言充滿了許多變數，並影響原有之決策與評估方法。從 IPCC 第五次報

表 10 對應不同調適策略與降低風險方式之調適選項

調適策略	對應問題類型	降低風險方式	措施	
穩定供水能力	水源不足	降低危害度	增建水庫或蓄水設施	
			設置地下水水庫	
			水庫淤積清理	
			人工湖	
			埤塘	
			伏流水	
			雨水儲集系統	
			地下水井新增	
			地下水井復抽	
	海水淡化廠			
設施不足	提升調適能力（降低脆弱度）		淨水場供水能力增加	
確保合理用水需求負荷	加強管理	降低暴露度	生活節水方案	
			工業節水方案	
			農業節水方案	
			農業耕作制度調整	
			建立初始水權分配制度	
			建立水權轉讓制度	
	設施不足	提升調適能力（降低脆弱度）		汰換舊漏自來水管線
				降低灌溉渠道輸水損失
強化彈性管理能力	加強管理	降低暴露度	廢汙水回收、循環利用	
	設施不足	提升調適能力（降低脆弱度）	跨流域引水	
掌握水資源資訊與不確定性	加強管理	降低暴露度	加強供需情勢監測	
			非氣候因子之資料收集與分析	
集水區保育與合理土地利用規劃	加強管理	降低暴露度	土地利用改變	
			加強水庫上游集水區水土保持	
			下游生態基流量之分析	
			工業區之規劃與調整	
其他（社會經濟、產業與科技發展）	加強管理	降低暴露度	建立水資源災害保險制度	

表 11 民國 120 年加入高屏大湖一期、二期、三期後之供水模擬結果 (單位：萬噸/日)

	GCM	Bcc-csm1.1 (m)	CCSM4	CESM1-CAM5	HadGEM2-AO	MRCGCM
民國 120 年 RCP8.5 情境	公共需水量	195.4	195.4	195.4	195.4	195.4
	供水能力	197.17	189.96	208.55	206.44	190.42
	供需缺口	-1.77	5.44	-13.15	-11.04	4.98

告 (IPCC WGII, 2014) 可以了解到，氣候變遷影響下之風險來源可以歸類為暴露度、危害度以及脆弱度，唯有了解未來氣候變遷風險類型，那些來自於氣候所造成之危害度，那些來自於系統於危害下之暴露度，以及那些來自於系統本身之脆弱度，才能針對風險來源，提出適當之調適策略與方案。國際間氣候變遷調適方法雖有完整之架構，但卻缺乏一致的步驟與詳細的說明，國內在氣候變遷調適研究與工作上，也因為缺乏標準流程，以及如何由氣候變遷風險評估到調適策略擬定之詳細說明，而出現主政機關不知如何審視委託之專業團隊進行之調適規畫，以及專業團隊盲目的從廣泛與深淺不一的前人研究中，找尋適當卻不一定專業之調適研究方法。有鑑於此，本研究參考國際間主要之氣候變遷調適步驟與架構，擬定氣候變遷調適決策六大步驟，詳細說明每一步驟應使用之資料或工具，應有之產出與完成內容，並說明如何由氣候變遷風險評估結果，擬定適當之調適方案與策略，以作為國內氣候變遷調適工作推動參考。以下幾點結論與建議：

1. 必須評估氣候變遷風險才能擬定調適策略。國內地方政府調適工作報告，常見的問題在於並未真正利用模式評估氣候變遷風險，或是未利用氣候情境進行評估。這樣的氣候變遷調適結果是建立在定性的描述與假設，缺乏風險評估與分析，將無法對症下藥，以科學方式提出適當之調適策略與方案。
2. 應考量氣候變遷不確定性進行規畫。氣候變遷評估具有相當之不確定性，然而國內政府單位或是相關研究，往往希望以氣候變遷評估結果之數據做為設計依據，忽略了這些數據背後之極大假設性以及不確定性。面對氣候變遷評估不確定性，在評估上之變化趨勢結果可以作為規畫參考，例如了解到氣候變遷可能提高風險或是降低風險，而非由風險評估結果之數據當作規劃設計依據。
3. 本研究提出之六大步驟，可以做為地方政府調適工作之參考，也可以做為學術與專業團隊進行氣候變遷風險評估與調適規畫之參考，同時也可以作為關心氣

候變遷調適工作之 NGO，了解氣候變遷調適該怎麼做，以本研究方法去檢核政府單位擬定之調適計畫是否符合正確之調適規畫方法。

4. 本研究雖然以水資源供水系統為例說明調適決策步驟，但本研究提出之氣候變遷調適決策步驟可適用於其他各領域、系統或團體在氣候變遷調適決策之擬訂。

## 誌謝

本研究承蒙科技部計畫「氣候變遷調適科技整合研究計畫-跨領域脆弱度評估與回復力建構科技發展計畫 (I~III)」(NSC 101-2625-M-002-018; MOST 103-2621-M-002 -002-; MOST 104-2621-M-002 -002-) 之經費支持，以及台灣大學生物環境系統工程學系研究助理吳淑涵、趙怡璇、及彭柏文協助資料整理，特此感謝。

## 參考文獻

1. 游保杉, (2011), 氣候變遷對水旱災災害防救衝擊評估研究計畫, 經濟部水利署。
2. 許泰文、陳憲宗, (2009), 氣候變遷對乾旱早期期衝擊與調適研究, 行政院農業委員會。
3. 童慶斌、李明旭、游保杉、陳思璋, (2007), 強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力, 經濟部水利署。
4. 童慶斌, (2012), 韌性理論應用於氣候變遷對灌溉系統之影響評估, 行政院農業委員會。
5. 童慶斌, 劉子明, 李明旭, 洪念民, 宋睿唐, 林嘉佑, 曹榮軒, 2013, 氣候變遷下區域水資源供水承載力整合評估之研究。台灣水利, 61(3), 1-13
6. 經濟部水利署, 2011, 「臺灣南部區域水資源經理基本計畫」, 經濟部水利署。
7. 經濟部水利署, 2012, 「水資源開發利用總量管制策略推動規劃」, 經濟部水利署。
8. 經濟部水利署全球資訊網, 「高屏溪-經濟部水利署全球資訊網」, <http://www.wra.gov.tw/ct.asp?xItem=20007&ctNode=4550>。
9. 經濟部水利署水利規劃試驗所, 2012, 「強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究」, 經濟部水利署水利規劃試驗所。
10. 經濟部水利署水利規劃試驗所, 2013, 「曾文南化水庫聯通管輸水工程可行性分析」, 經濟部水利署水利規劃試驗所。
11. 劉子明, 2010, 「氣候變遷對區域水資源衝擊評估整合系統之研究」, 國立台灣大學生物環境系統工程學系博士論文。
12. Brenkert, A. L., & Malone, E. L. (2005). Modeling vulnerability and resilience to climate change: a case study of India and Indian states. *Climatic Change*, 72(1-2), 57-102.
13. Burton, I., & Development Programme United Nations. (2005). Ad-

- adaptation policy frameworks for climate change: developing strategies, policies and measures (p. 258). B. Lim (Ed.). Cambridge: Cambridge University Press. UNFCCC. FOCUS: Adaptation. Retrieved June 9, 2015, from <http://unfccc.int/focus/adaptation/items/6999.php>
14. Field, C. B., Barros, V. R., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Abdrabo, M. K., Adger, N., ... & Porter, J. R. (2014). Summary for policymakers. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part a: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 1-32.
  15. Forrester, J. W. (1961). Industrial Dynamics. Waltham, MA: Pegasus Communications. 464 pp.
  16. Kwadijk, J. C., Haasnoot, M., Mulder, J. P., Hoogvliet, M., Jeuken, A., van der Krogt, R. A., ... & de Wit, M. J. (2010). Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 1(5), 729-740.
  17. Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., & ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. Global Environmental Change, 23(2), 485-498.
  18. Haith, D. A., Mandel, R., & Wu, R. S. (1992). GWLF, generalized watershed loading functions, version 2.0, user's manual. Dept. of Agricultural & Biological Engineering, Cornell University, Ithaca, NY.
  19. Liu, T. M., Tung, C. P., Ke, K. Y., Chuang, L. H., & Lin, C. Y. (2009). Application and development of a decision-support system for assessing water shortage and allocation with climate change. Paddy and Water Environment, 7(4), 301-311.
  20. McCarthy, J. J. (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
  21. Meynecke, J. O., & Lee, S. Y. (2011). Climate-coastal fisheries relationships and their spatial variation in Queensland, Australia. Fisheries Research, 110(2), 365-376.
  22. Parry, M. L. (Ed.). (2007). Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 4). Cambridge University Press. Field, C. B., Barros, V. R., Mastrandrea, M.
  23. Tung, C. P., Liu, T. M., Szu-Wei, C., Kai-Yuan, K., & Ming-Hsu, L. (2014). Carrying Capacity and Sustainability Appraisals on Regional Water Supply Systems under Climate Change. British Journal of Environment and Climate Change, 4(1), 27.
  24. Climate-ADAPT. Adaptation Support Tool. Retrieved June 9, 2015, from <http://climate-adapt.eea.europa.eu/adaptation-support-tool/UKCIP>
  25. IPCC DDC 網站, 「IPCC Data Distribution Center」, <http://www.ipcc-data.org>
  26. TaiCCAT 知識平台, 「台灣氣候變遷調適科技知識平台」, <http://taiccat.ncu.edu.tw>
  27. TaiWAP 網站, 「氣候變遷下區域水資源整合評估系統 TaiWAP」, <http://sdl.ae.ntu.edu.tw/TaiWAP/>
  28. UKCIP. About the Wizard Tools portfolio. Retrieved June 9, 2015, from <http://www.ukcip.org.uk/wizard/future-climate-vulnerability/>
  29. Vensim 網站, 「Vensim」, <http://vensim.com>
  30. Your Climate. NI 188 Guidance. Retrieved June 9, 2015, from <http://www.yourclimate.org/pages/ni-188-guidance> 



社團法人  
中國土木工程學會  
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

敬邀您加入本學會會員



[www.ciche.org.tw](http://www.ciche.org.tw)

### 學會是 ...

一個凝聚產官學土木專業知識的團體  
一個國際土木組織最認同的代表團體

一個土木人務必加入的專業學術團體  
一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體

### 會員可享多項優惠 ...

申請學生獎學金  
得到國際專業組織承認  
參加國際交流活動  
免費贈送一年六期會刊

本會出版品七折優待  
本會學刊訂閱優惠  
主辦研討會優先參加及大幅優惠