

# 強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(1/2)

## Strengthening Sustainable Water Resources Utilization and Adaptive Capacity to Climate Change (1/2)

主管單位：經濟部水利署水利規劃試驗所

童慶斌

台灣大學生物環境系統工程學系 成功大學水利及海洋工程學系  
教授

游保杉

教授

李明旭

中央大學水文研究所  
副教授

### 摘要

氣候變遷是指長期氣候特性改變，並可能導致短期氣候變異加劇與極端氣候頻率增加，進而導致人類社會與自然環境災害。社會經濟發展須依賴可靠的水資源供給，但氣候變遷影響水資源甚劇，故本研究的目標為評估氣候變遷對區域水資源供水系統所帶來可能之衝擊，並以永續利用為願景，探討強化水資源風險管理之調適能力，提出因應氣候變遷所帶來影響之策略。本研究將選擇臺灣北部之淡水河流域作為研究區域，根據此研究區域建立起水資源系統動力模式，並藉此模式分析各項水資源管理與規劃策略之脆弱度，包含目前水資源政策以及未來可能之規劃方案；再者，結合國內外模擬未來可能之氣候變遷之預設情境，透過長期氣候預測資料和降尺度之資料轉換，並將國內未來經濟社會發展對水資源需求之可能情境納入考量，及評估氣候變遷對淡水河流域各項水資源使用所帶來之衝擊，包括地面水量與地下水量，代入水資源系統動力模式，分析探討區域水資源永續利用可能會面臨之衝擊，並探討各項調適策略之優劣，包括區域水資源調配與增加整體供水能力等；期能由模擬與最佳化分析，進而強化淡水河流域水資源彈性調配能力及水資源規劃與管理決策，藉此計畫推動並強化未來水資源規劃與管理面對氣候變遷之調適能力。結果顯示台北供水區未來仍能符合供水需求，可以強化區域水資源調配，增加對板新與基隆之供水需求之支援。板新與桃園供水區由於流量影響，供水能力會下降，因應板新地區，台北供水區支援，相當重要。桃園供給量降低，主要原因為流量，且需水量也大增，增加新水源措施，相當重要。基隆供水區未來承载力增加，但需求大增，目前水資源利用率仍低，可強化供水設施。

關鍵詞：系統動力模式、氣候變遷、永續指標、水資源

### Abstract

Climate change may not only result in long-term gradually changing climate but also cause short-term higher climate variability and more extreme events. It could result in disasters to have great and certain impacts on human society and natural environment. Socioeconomic development depends on reliable water resources which however may be significantly influenced by climate change. Therefore, the purposes of this study are to assess

the climate change impacts on regional water supply systems and to propose response strategies strengthening adaptive capacity to achieve sustainable water uses. The system dynamics model of a water supply system of the TanHsui river watershed will be developed to evaluate the vulnerability of the water resource policy, including current implementations and future formulations. The climate change scenarios and the downscaling method will also be concerned. Future socioeconomic development for this area will also be considered in simulating climate change impacts on the water supply system of the TanHsui river watershed, including the impacts on surface water and groundwater. By using the system dynamics model, the impacts on sustainable water resource management can be analyzed and the adaptive strategies, such as re-allocation of regional water resources and increase of water supply capacity, will also be discussed. In expectation of this study is to provide the optimal management strategies for water supply system through those simulations and optimizations. Furthermore, we hope to enhance the adaptive capacity to mitigate climate change impacts on water supply system. The results show that the environmental carrying capacity in Taipei does not significantly change. BanXin and TaoYuan water supply systems are more likely affected by streamflow. The results show that the flow of TaHan river tend to increase during wet season and decrease during dry season. The KeeLung river also has the same tendency as TaHan river, but the environmental carrying capacity in KeeLung tends to rise due to more flow in KeeLung river during dry season than wet season, which is found in the historical flow data. That's why the change of the environmental carrying capacity in KeeLung is very different from others.

Keywords: system dynamics 、 climate change 、 sustainable development index 、 water resource

## 一、前言

自工業革命後，大量的溫室氣體排放增加，進而加強溫室效應，導致長期氣候變遷與短期氣候變異。2007年2月，聯合國「政府間氣候變化專門委員會」(Intergovernmental Panel on Climate Change, 簡稱 IPCC)第一工作小組 (Working Group I, WGI) 發表了《第四次氣候變化評估報告》(Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)，針對氣候變遷之科學發現提出總結報告，其報告一開始界定氣候變遷如下

Changes in the atmospheric abundance of greenhouse gases and aerosols, in solar radiation and in land surface properties alter the energy balance of the climate system. These changes are expressed in terms of radiative forcing, which is used to compare how a range of human and natural factors drive warming or cooling influences on global climate.

根據童慶斌等(2002)之研究報告顯示，全球暖化導致臺灣地區氣候與水文有極端化

之趨勢，暴雨與乾旱均將更加頻繁，全球暖化與氣候變異顯著增加對生態環境、水資源與農業環境等均會產生影響；IPCC WGI 報告指出，受到溫室效應的影響，直至 21 世紀末，全球的氣溫將上升攝氏 1.8~4 度之間。此外，由於氣溫上升導致冰原溶化，將導致海平面高度上升 18~59 公分，亦將造成北極區、南極區與一些突出於海面上的陸地縮小，許多國家的低窪地區甚至會被海水吞沒。IPCC 第二工作小組 (Working Group II, WGII) 在 4 月 6 日發表衝擊、調適、與脆弱度評估之總結報告，提出針對不同面向 (如水資源、海岸地區、生態等) 與不同區域 (亞洲、島嶼國家等) 之分析結果。上述的預測數據與評估報告對於我們而言，不僅是一個重要的警訊，亦象徵著氣候變遷影響自然環境是必須正視的嚴重議題。

## 二、文獻回顧

在氣候變遷對水文衝擊方面，如 Loukas (2002) 等人以加拿大西南部 Campell 及 Illecillewaet 兩個集水區為例，應用 CGCMA1 模式模擬集水區未來溫度及降雨量之變化潛勢，並利用 UBC 集水區水文模式模擬氣候變遷情境下集水區洪水量及發生頻率。研究結果 Campell 集水區平均洪水量及發生頻率有增加之趨勢；而相反地，Illecillewaet 集水區卻是有減少的趨勢。Wilby (2006) 等人研究氣候變遷下英國 River Kennet 之河川流量與水質所遭受之衝擊，結果顯示 River Kennet 在氣候變遷之影響下，有乾季流量減少、雨季流量增加之趨勢。氣候變遷對水資源需求衝擊方面，如 Downing et al. (2003) 在 CCDeW (Climate Change and Demand for Water) 計畫中評估英格蘭 (England) 及威爾斯 (Wales) 在氣候變遷下水資源需求的衝擊影響評估，其中提到氣候變遷對民生需水及工業需水只有少許的影響，可是在農業灌溉需水方面平均會增加 20% 的需水量，氣候變遷會對水資源需求帶來衝擊。水資源供水系統衝擊方面，如 Gleick (1986), Tung and Haith (1995) 曾就氣候變遷下在各個不同的區域，對水資源系統所造成的衝擊作相關問題之評估。水資源調適能力建構方面，根據 UNFCCC 的報告 "Climate Change- Response, Republic of Nauru Response 1ST Naional Communication-1999" 提到，由於諾魯是屬於單一小島型國家，很容易受到氣候變化及海平面上升之影響，政府當局為了能夠在環境上、經濟上、社會上持續永續發展，提出多項有關水資源調適策略，主要的有兩項，第一停止磷酸鹽的開採，第二是確實執行 National Environmental Action Plan (NEAP) 及 Rehabilitation Master Land-Use Plan (RMLP) 兩項計畫，主要目的是希望建構出水資源調適之能力，以因應氣候變遷所帶來的衝擊。水資源永續利用方面，Keyes and Palmer (1993) 之乾旱研究計畫、Matthias and Frederick (1994) 探討沿海地區海平面上升之情況、Fletcher (1998) 針對水資源缺乏時之管理系統、Simonovic and Fahmy (1999) 在埃及針對 Nile River 作長時間水資源之規劃及水資源政策的分析、Zacharias and Koussouris (1999) 探討歐洲一些水資源較匱乏之區域，由於這些區域獲得水源不易，運送水、海水淡化不符合經濟效益，因此考慮抽取地下水，而為了確保抽取量及補注量能夠符合永續性發展，便發展了許多模式作為分析工具。

### 三、研究成果

#### 3.1 現況氣候分析與未來氣候變遷之情境

##### 1. 氣象水文現況分析

淡水河流域現況水文分析，共收集 35 個雨量測站長期降雨資料進行分析，在年降雨量部份，平地測站之年降雨量多遠小於山區測站，如台北之 2181 mm/yr 小於竹子湖之 4374 mm/yr、翡翠之 3159mm/yr、池端之 3942 mm/yr，反應地形效應對降水之影響，但高程越高之測站卻不一定會有絕對較高之年降雨，這主要在於濕季之降水多來自於颱風降水，降雨多為全面性，地形效應較不明顯，而其中以池端站之乾濕季降雨相差最多(1566 毫米)。而在流域東北區域之測站，如基隆、火燒寮與太平等站，因屬東北季風之迎風面，可接受較多降水，如基隆雨量站之台灣地區乾季降雨甚至大於濕季降雨(相差約 430 公釐)。溫度變化趨勢分析針對台北、基隆、淡水、竹子湖、鞍部、淡水與石門等 6 個測站，平均氣溫之差異反應測站所在高程不同，分析結果顯示溫度上升變化率約從 0.05 oC/10-yr ~0.35 oC/10-yr 不等，其中以台北、基隆站之溫度上升趨勢較明顯，而石門站之溫度趨勢為遞減。在年雨量變化趨勢部分，大部分測站皆顯示上升趨勢，其中上升率最大者為翡翠(495 mm/10-yr)，而顯示下降者有太平、三峽、瑞芳(2)、五堵與桶後，其中下降最多者為桶後(-421 mm/10-yr)，但由於翡翠與桶後之資料年限較短，約僅有 19 年之資料，不確定性較高。在降雨強度變化趨勢部分，降雨日平均降雨強度最大者為太平與瑞芳 (25.4 mm/day)，最小者為淡水 (15.4 mm/day)，多數測站之降雨強度為上升，最大者為三光 (4.18 mm/10-yr)，而下降者僅有十三股、瑞芳、五堵、桶後。在連續不降雨日的趨勢部份，平均連續不降雨日最大者為三光 (5.7 日)，最小的是太平(2.4 日)，連續不降雨日變化趨勢大多呈現增加趨勢，最大者三峽 (0.51 day/10-yr)，而連續不降雨日趨勢減少者有竹子湖、鞍部、鞍部(1)、三光、復興、九芎根、碧湖，減少最多者為復興 (-0.16 day/10-yr)。為探討河川流量變化趨勢，進一步以淡水河流域之五個主要集水區進行分析，包含有石門水庫集水區、翡翠水庫集水區、三峽河集水區、基隆河集水區、新店溪集水區，雨量部分以徐昇式法計算後除以逕流深度，可得逕流比值，從年逕流比值距平圖分析可發現，五個主要子集水區之年逕流比值呈現下降趨勢，反應集水區之逕流產生效率變差，可能影響因子如土地利用的改變、蒸發散量的增加、降雨型態的改變等，皆會影響水文循環特性，間接影響該比值。

##### 2. 未來氣候情境

現今氣候變遷衝擊研究多採用大氣環流模式 (General Circulation Models, GCMs) 之模擬結果為主，惟 GCMs 屬於全球尺度分析，其模擬值直接應用於小區域仍有相當之不確定性。因此目前在衝擊影響評估應用上，其預測值一般只應用於設定氣候變遷預設情境，再配合氣象資料合成模式，產生評估模式所需之輸入資料。由於大氣環流模式之預測結果屬於較大尺度，因此需透過降尺度(Downscaling)過程以取得區域之氣候特性資料。圖 1 為本研究氣候變遷衝擊評估流程，透過降尺度(Downscaling) 取得區域之氣候

特性資料。配合預設情境及氣候資料合成模式，得到未來氣候變遷情境的氣象資料，再帶入評估模式後，瞭解氣候變遷所帶來的衝擊影響。另外在未來氣候情境分析方面，本研究根據國際研究標準，以 SRES 情境模擬之未來氣候分析預設情境，目前國際研究多採用 SRES 之 A2 與 B2 情境，因此本研究此次亦是以大氣環流模式根據 SRES 之 A2 與 B2 情境模擬之輸出結果建立未來情境，並配合不同的氣候模式降尺度方式，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。

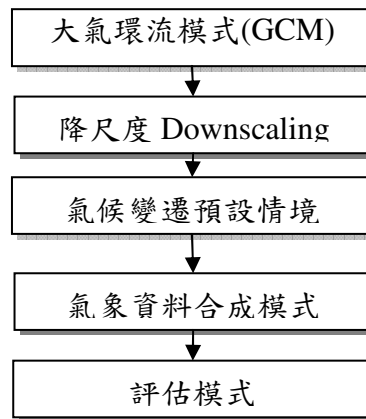


圖 1、一般氣候變遷衝擊評估流程

本研究分別針對簡易降尺度、台大全變中心統計降尺度、以及 SDSM 降尺度資料，進行基期（1961~1990）資料與未來短期（2010~2039）的比較，以整理出溫度以及雨量之變化情形。藉由上述結果，可推估氣候變遷下，未來短期內之氣溫與降雨量特性，並帶入衝擊模式中作進一步之評估工作。為進一步瞭解淡水河流域於未來短期下之可能雨量變化趨勢，本研究針對淡水河流域內的 5 個子集水區（包括北勢溪、南勢溪、大漢溪、三峽河以及基隆河），配合 GCM 模式降尺度資料，將流域內之降雨區分為枯水期（每年 11-4 月）與豐水期（每年 5-10 月），並比較受氣候變遷影響下，各測站於未來短期內之雨量變化趨勢。由於各 GCM 模式之資料上具備一定程度之不確定性，不同 GCM 模式間對於相同集水區的模擬結果可能有所不同。因此在豐、枯水期降雨變化量的表現上，本研究將相同降尺度方式下，各 GCM 模式之模擬結果以綜合表現的方式加以呈現，僅以 SRES A2、B2 情境作劃分，比較兩情境之間豐、枯水期的雨量變化趨勢之不同。

根據不同降尺度方式之預測結果來看，淡水河流域各集水區之降雨量變化趨勢可能會因為不同的降尺度方式而稍有變動，不過大致上呈現出豐水期降雨量增加，且枯水期降雨量減少的趨勢。若總合各集水區之結果而言，淡水河流域整體豐水期降雨量有明顯增加之趨勢。就枯水期降雨量方面，在全變中心統計降尺度資料的預測下，淡水河流域枯水期整體降雨減少量約為 4%，以 SDSM 模式降尺度資料的預測下，下降量則約為 8% 左右，整體而言可推斷出未來短期內淡水河之枯水期降雨量將呈現出減少的趨勢。

### 3.2 氣候變遷對河川流量之衝擊評估

本研究針對未來氣候變遷對河川流量所造成之變化與衝擊，利用不同大氣環流模式與 A2、B2 兩種溫室氣體排放情境，經降尺度後設定氣候預設情境之溫度及雨量資料，

以此時期資料為模擬基準，輸入氣象資料合成模式繁衍未來情境下之溫度及雨量資料，再由 HBV 水文模式，推估未來不同氣候變遷情境下之流量，

本研究應用修正型 HBV(Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning)模式來模擬流量序列，該模式為連續-集塊型模式，是將集水區降雨-逕流之機制概念化為上、下兩個水桶進行長期逕流量的連續模擬，時間尺度可為時、日、旬、月，本研究以日為時間演算單位。本文配合各 GCM 模式降尺度後之溫度及面積雨量繁衍資料，來推估未來情境流量，本文採用之降尺度方法有三，各降尺度方法所用之 GCM 模式及情境。以下針對不同降尺度方法所估算之面積雨量及未來情境流量推估結果，分兩小節加以探討。

### 1. 未來情境雨量

本研究將雨量繁衍結果分為月平均雨量及年平均雨量兩方面探討。繪製各 GCM 模式之月平均雨量及年平均雨量差異圖，以南勢溪為例如圖 2 所示。

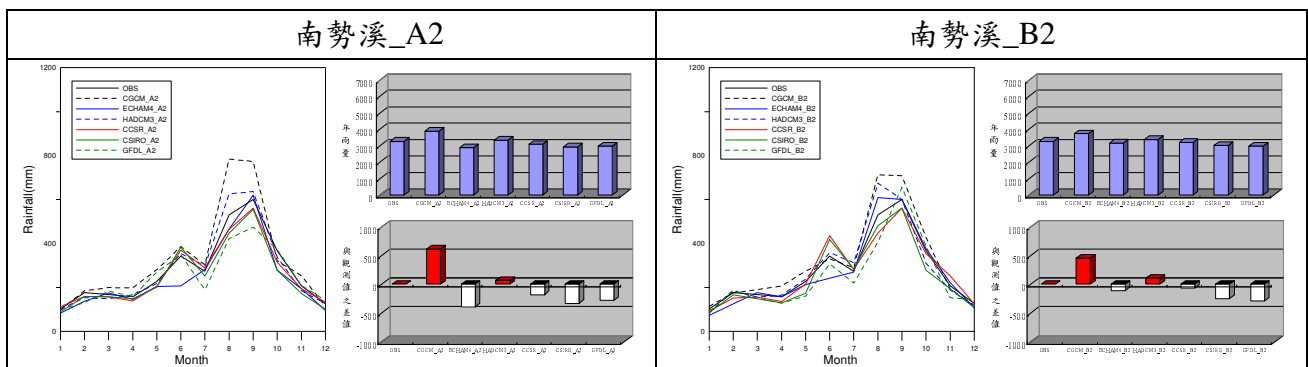


圖 2、簡易降尺度情境與實測雨量之差異圖(南勢溪)

### 2. 未來情境流量

利用流量延時曲線來探討未來情境流量之變化，繪製模擬流量(以實測雨量繁衍一百年長度的雨量所模擬之流量)與情境流量(情境雨量所模擬之流量)之流量延時曲線，如圖 3 所示(以南勢溪集水區為例)，且分別針對枯水期與豐水期繪製流量延時曲線。

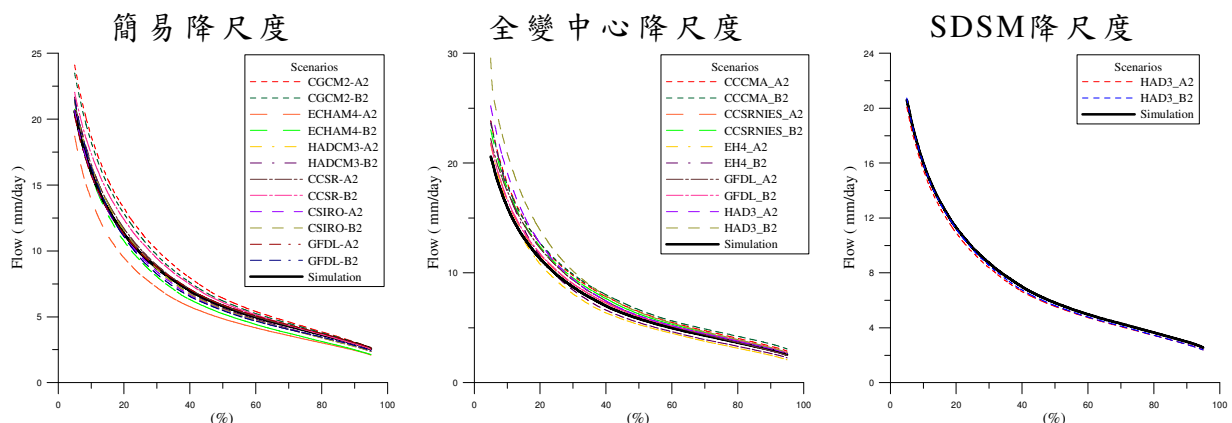


圖 3、南勢溪情境流量延時曲線

整體而言，基於各大氣環流模式及降尺度方法的條件下，研究區域所得未來短期情境流量的結果為：豐水期流量有增加趨勢，而枯水期整體流量可能有減少的趨勢，整體

未來情境流量變化偏向極端趨勢的趨勢。就簡易降尺度法模擬結果來看，豐水期基隆河約增加 1.1 至 1.4 mm/day，流量增加量最大；枯水期基隆河約減少 2.5 mm/day，流量減少量亦最大。

### 3.3 氣候變遷對地下水量之衝擊評估

本研究對淡水河流域地下水量之衝擊評估主要在探討對補注量之影響，並分成地表入滲補注與河川流量補注。地表入滲補注部分整理過去研究報告，河川流量補注部分則建立模式重新分析。

#### 1. 地表入滲補注

在氣候變遷衝擊評估部分，A2 與 B2 情境模擬結果顯示，年補注量則有減少趨勢下，在 B2 情境下，補注量減少較 A2 明顯，雖然在降雨量部分大部分皆顯示上升，但受逕流量亦增加，且蒸發散量亦因溫度上升而增加，使年補注量呈現減少趨勢。在豐水期部份，各主要水文學量變化趨勢與年總量變化趨勢相同，豐水期補注量則有減少趨勢。在枯水期部份，枯水期地水補注量有較明顯減少趨勢，由於 A2 與 B2 情境模擬結果，大多反應枯水期降雨量減少趨勢，而蒸發散量因溫度上升而些許增加，因此枯水期補注量則有較明顯減少趨勢。

#### 2. 河川流量補注

氣候變遷是指長期的氣候特性改變，並可能導致短期氣候變異加劇與極端氣候頻率增加，造成降雨與氣溫發生變化進而影響河川流量以及地下水補注量。台北盆地景美含水層受大漢溪與新店溪支流量補注，本節目的在探討氣候變遷對台北盆地景美含水層補注量之影響。本研究利用地下水模式 Processing MODFLOW (PMWIN) 建立地下水數值模型，搜集前人研究水文地質參數資料、地下水觀測水頭以及地面河川流量、與斷面資料，利用 HEC-RAS 模式模擬河川水位，並參考文獻以確立其可能之地下水補注區，應用 PMWIN 中的 RIVER PACKAGE 進行地下水補注區之建置；另外參考文獻中評估未來短期氣候變遷情境 HADCM3-A2、CGCM2-A2、GFDL-A2、HADCM3-B2、CGCM2-B2 與 GFDL-B2 等 6 種情境之下模擬未來流量與現況流量之變異，並以此變異修正歷史流量序列進而輸入台北盆地主要含水層地下水數值模型，評估氣候變遷對地下水補注量之衝擊。

圖 4 為模擬時期內，每個月河川的補注量，不過由於缺乏各流量站 2005 年 1~2 月的資料，故本研究無法進行該時期的補注量推估，於 2005 年 3~12 月，經由河川補注於台北盆地主要含水層景美層之補注總量約為 6500 萬立方公尺，而第一季 3~5 月的補注量，平均每個月為 840 萬立方公尺，平均每天 28 萬立方公尺的補注量，約為台北地區每日平均需水量 249 萬立方公尺之 11.2%，第二季 6~8 月的補注量，平均每個月為 739 萬立方公尺，每日平均為 24.6 萬立方公尺，約為台北地區每日平均需水量之 9.9%，第三季 9~11 月的補注量，每月平均為 463 萬立方公尺，每日平均為 15.4 萬立方公尺，約為台北地區每日平均需水量之 6.2%，第四季只有 12 月資料的補注量約為 253 萬立方公

尺，每日平均約 8.43 萬立方公尺，約為台北地區每日平均需水量之 3.39%。

本研究利用了 3 個不同的 GCMs 模式(HADCM3、CGCM2 與 GFDL)，配合 A2 與 B2 情境共 6 種情境，進行台北盆地主要含水層地下水補注量因不同氣候變遷情境與不同時期所受到之衝擊影響分析，期望從這 6 種不同的分析結果中得到一較為信賴的趨勢；分析表 1、2 的結果可大致上結論出，於未來短期不同氣候變遷情境下，台北盆地景美層之地下水年補注總量皆呈現大致上不受影響的狀態，其增減的幅度不論何種模式何種情境皆小於 1.5%，不過若是利用季節性分析，於枯水期末期的第一季所受到的衝擊，平均來說是為補注量減少的情形，而在豐水期的第二季則是呈現補注量增加的情形，進入豐水期末期的第三季時，補注量多呈現減少的狀態，然而枯水期的第四季則因資料缺乏，只有 12 月的分析結果，並沒有辦法提供第四季的平均特性，其補注量亦有增加或減少的情形發生。本研究擬提供台北盆地景美層地下水補注量於季節性受到氣候變遷之衝擊評估，以供決策者一參考之依據，期望決策者進一步合理分配與管理台北地區地下水資源。

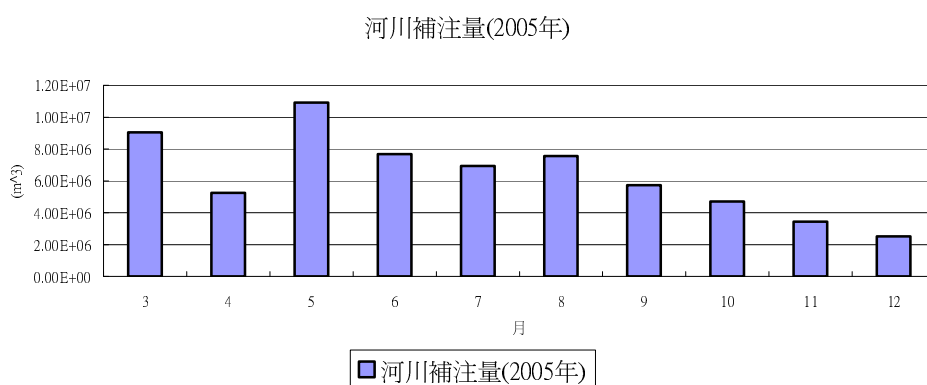


圖 4、台北盆地景美層每月河川補注量

表 1、不同 A2 氣候變遷情境之河川補注量 (單位：萬立方公尺)

	2005 年	HADCM3	變化率	CGCM2	變化率	GFDL	變化率
第 1 季(3-5 月)	840	772	-8.07%	878	4.55%	863	2.75%
第 2 季(6-8 月)	739	815	10.34%	754	2.07%	718	-2.73%
第 3 季(9-11 月)	463	448	-3.32%	441	-4.71%	454	-1.88%
第 4 季(12-2 月)	253	280	10.7%	237	-6.11%	263	4.09%
總量	637.8	638.5	0.1%	645.8	1.25%	637.1	-0.11%

表 2、不同 B2 氣候變遷情境之河川補注量 (單位：萬立方公尺)

	2005 年	HADCM3	變化率	CGCM2	變化率	GFDL	變化率
第 1 季(3-5 月)	840	823	-2.01%	873	3.87%	753	-10.32%
第 2 季(6-8 月)	739	783	5.98%	746	0.98%	792	7.21%
第 3 季(9-11 月)	463	430	-7.20%	439	-5.12%	475	2.56%
第 4 季(12-2 月)	253	254	0.35%	242	-4.44%	272	7.56%
總量	637.8	636.1	-0.27%	641.5	0.58%	633.2	-0.72%



### 3.4 氣候變遷對供水系統之衝擊評估

表 3 為水資源永續利用現況的分析，模擬的時間為 1991 年至 2001 年，分作無考慮板一計畫與考慮板一計畫兩個方案。由結果可得知，在無考慮板一計畫時，台北、桃園及基隆用水區供水是比較沒有問題的，反觀板新用水區，由結果可以看出其實板新地區的供水非常吃緊，板新地區供水情形本來就不如以新店溪為水源的台北地區那麼充足，板新地區本來是由石門水庫及鳶山堰水源供應用水，在上游處水源必須需供給桃園用水區，單單僅依賴大漢溪的水源並不足以供應板新地區之用水需求，這也說明了為什麼要有板新一期及二期計畫來增加板新地區之供水能力，以滿足其需求。

表 3、水資源永續利用現況分析(1991~2001 年) 單位：萬 CMD

用水區	無考慮板一計畫			考慮板一計畫		
	平均需水量	環境承載力	SDI	平均需水量	環境承載力	SDI
台北區	220.9	282.0	1	220.9	348.7	1
				52.6(支援板新)		
板新區	70.6	52.2	0	52.6(台北支援)	69.3	1
				18.0		
桃園區	66.8	108.9	1	66.8	108.9	1
基隆區	22.9	36.3	1	22.9	36.3	1

附註：環境承載力標準：台北地區：SI=0.1、其它地區：SI=0.5

表 4 是未來無氣候變遷水資源，永續利用是考慮板一工程完成後及板二工程的情況，本研究另外為了進一步分析板二工程對於新店溪及大漢溪系統所帶來的影響，特將未來無氣候變遷的方案分作為板一計畫及板二計畫兩種情況。板新地區供水改善計畫二期工程為區域聯通管路擴建計畫，係以板一計畫為基礎，進行支援點改善或增設支援點以達計畫目標，以提高板新供水改善計畫總調配水量為平均 101 萬 CMD(最大日為 130 萬 CMD)，因此根據板二工程的規劃，在水資源系統動力模式模擬時，將考慮台北最大可支援板新地區 101 萬 CMD 的水量。由結果可以很明顯地看出，板一計畫及板二計畫結果差別並不大，只差在板新地區的環境承載力稍微提升了，那是因為本模式有考慮到季節性的操作，因為環境承載力是由年缺水指數等於特定值時之最大可供水量所定出來的，而季節性的操作方式會影響到年缺水指數的計算，故年缺水指數受到影響，才會使得環境承載力有所不同，其它三個地區的環境承載力則是無變化。

未來需水量情境分析將以短期氣候變遷預設情境為主，並以 2021 年為需水量代表情境。另外本研究在氣候變遷預設情境將採用 IPCC Data Distribution Center(IPCC DDC)所提供之 SRES 輸出資料，以 A2 與 B2 情境為主，在簡易降尺度方面則採用了 CCSR、CGCM2、CSIRO、ECHAM4、GFDL、HADCM3 六個 GCM 模式，而由台灣大學全球變遷研究中心所提供的降尺度資料分別有 CCCMA、CCSRNIES、EHCHAM4、GFDL、HADCM3 五個 GCM 模式，以 SDSM 降尺度分析將使用 HADCM3 一個 GCM 模式。表五為無氣候變遷下之水資源利用永續性之變化。

圖 5 至圖 7 為不同降尺度下各 GCM 模式環境承載力變化趨勢分析結果。由結果可

知台北地區大致的趨勢都呈現上升的情形，仔細端詳後，發現其實台北地區環境承载力若是呈現增加的情況其比例都不會超過 5%，因為在求以年缺水指數為 0.1 的供水量時，無法很精確的讓台北供水系統每次的年缺水指數都等於 0.1，只能儘量接近，因此這 5% 可視作為本模式的誤差範圍，故台北地區的環境承载力較沒有顯著的改變。板新和桃園地區則是受到流量的變化很大影響，若是在氣候變遷衝擊下評估出來的結果是豐水期流量增加、枯水期流量減少，如此一來勢必會降低這兩地區的環境承载力，反之亦然，故板新和桃園地區的環境承载力會受到氣候變遷的衝擊影響。而基隆地區很明顯許多情況下環境承载力都是上升的情形，但不像台北地區上升的情形都是在誤差範圍內，而是真的有明顯的增加趨勢，回頭看流量的變化情形，基隆地區很符合豐水期流量增加、枯水期流量減少的典型情況，在這樣的狀況下，水資源的使用應更形艱難，何以結果與一般認知的有所出入。經歷史流量資料分析後，基隆河的趨勢是枯水期的平均水量是多於豐水期流量的情形，才會造成基隆河的環境承载力大多呈現上升的趨勢。

表 4、無氣候變遷下之水資源利用永續性之變化(2021 年)單位：萬 CMD

用水區	現況			未來(板一計畫)			未來(納入板二計畫)		
	1991-2001 年平均需水量	環境承载力	SDI	短期預設情境平均需水量	環境承载力	SDI	短期預設情境平均需水量	環境承载力	SDI
台北區	273.5	348.7	1	277.6	377.9	1	277.6	377.9	1
板新區	18.0	69.3	1	39.2	66.7	1	39.2	66.7	1
桃園區	66.8	108.9	1	145.2	127.8	0	145.2	127.8	0
基隆區	22.9	36.3	1	48.4	40.4	0	48.4	40.4	0

附註：環境承载力標準：台北地區：SI=0.1、其它地區：SI=0.5

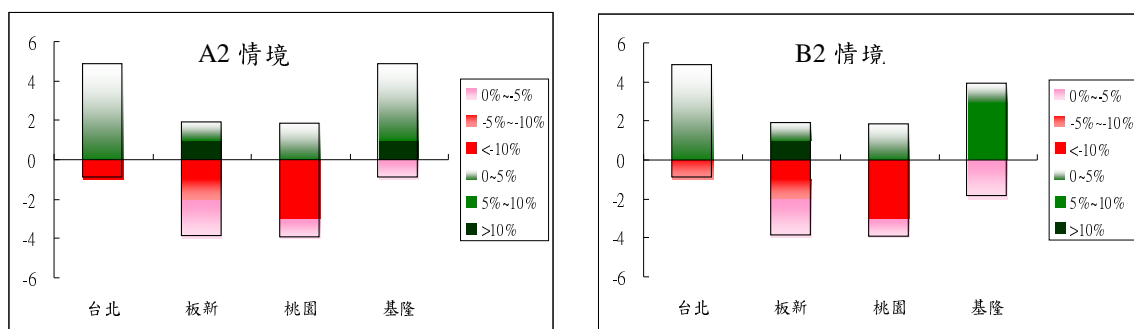


圖 5、SRES 情境資料之 A2、B2 情節簡易降尺度資料變化趨勢

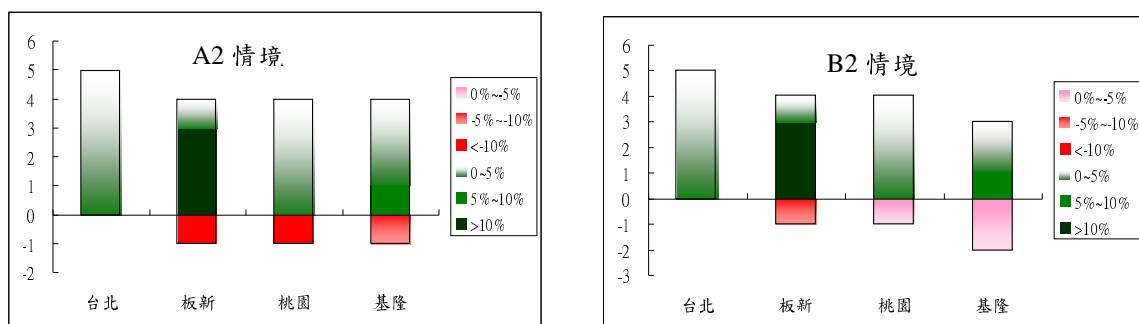


圖 6、SRES 情境資料之 A2、B2 情節全變中心資料變化趨勢

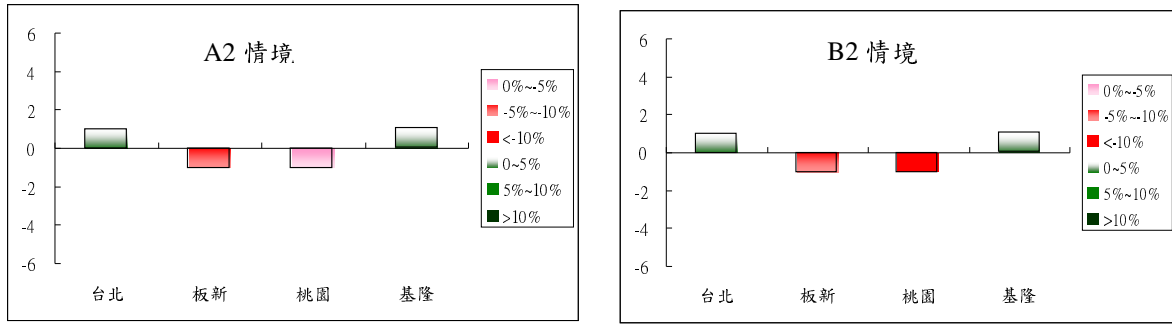


圖 7、SRES 情境資料之 A2、B2 情節 SDSM 資料變化趨勢

#### 四、後續研究

至目前為止，GCM 模式降尺度技術尚具備一定程度之不確定性，故在實際應用降尺度資料前，建議先針將降尺度方式之結果與研究區域之實際氣象資料進行比對，以確保該降尺度方式的可用性。此外，即使是相同的降尺度方式下，針對同一區域，不同 GCM 模式的降尺度資料有可能呈現初步一致的結果，故進行未來氣候情況之預測時，建議可參考多個 GCM 模式之降尺度結果，以避免對趨勢之預測有所偏頗。本研究由三個來源整理設定氣候變遷情境，然其分別具有不同優缺點。台灣大學全球環境變遷研究中心其利用之統計模式會造成降尺度後之雨量為負，然本研究團隊認為恐有違物理現象，其隱含更高之不確定性，因此，建議後續分析，如無更新資料，暫不考慮應用。目前聯合國「政府間氣候變化專門委員會」(簡稱 IPCC)第四份評估報告已新公佈，而本研究目前只採取部分沿用於第三次報告之資料，由於每種氣候情境是由不同國家利用的物理模式模擬獲得，其間存在一定程度之差異性，期望於未來能夠更進一步利用其它情境所產生的資料進行評估，並分析其衝擊影響之趨勢，以供決策者於未來氣候變遷情境下一參考之依據。

大氣環流模式的情境模擬值本身即存在不確定性，而不同降尺度方法對流量推估有其相當程度之影響，因同一大氣環流模式之資料，經不同降尺度分析後將會得到不同的情境資料，再經輸入水文模式後所產生未來情境流量自然有所差異，因此在解釋未來流量可能的變化狀況時應有此認知，以免造成誤解。在地下水量衝擊評估方面，本研究可合理評估出台北盆地景美層地下水補注量，由於其整體受氣候變遷之影響較小，未來應更進一步結合地面水資源系統，作為備用水源。然景美層地下水補注與河川流量緊密相關，後續研究需探討如何配合季節性氣候預報系統，輔助地面水資源之規劃管理。並藉由建構之地下水數值模型模擬各種不同抽水量與抽水時期下，其地下水位之變化，期望地下水資源能進行合理利用，地面水地下水聯合營運應考量成為一項因應氣候變遷之重要措施。本研究之區域水資源永續利用指標實涵蓋國家永續發展指標系統與水資源永續發展指標系統中相關指標，本研究提出指標為一綜合性指標，後續研究可將相關指標列出分析，並連結調適策略，使永續指標具有決策支援之操作性。

建議後續工作將著重於兩大部分，第一部分是將本研究架構標準化，期能藉已標準化的架構推廣至其它各供水系統，評估各供水系統的水資源永續利用情形及受氣候變遷

的衝擊影響，並將以中部供水系統為研究範圍。第二部分則是決策管理架構之建立，期能透過模擬與最佳化之分析等，規劃出長期調適策略之支援決策工具，以作為未來水資源政策之參考依據。

## 五、參考文獻

1. 童慶斌，2002，「氣候變化綱要公約國家通訊衝擊調適資料建制—氣候、水文、生態部分(一)」，行政院環保署報告書。
2. Downing, T. E., Butterfield, R. E., Edmonds, B., Knox, J. W., Moss, S., Piper, B. S. and Weatherhead, E. K.: 2003, "Climate Change and the Demand for Water, Research Report, Stockholm Environment Institute, Oxford.
3. Fletcher, E. J., 1998, "The use of system dynamics as decision support tool for the management of surface water resources." Proc., 1st Int. Conf. on New Information Technolo. For Decision-Making in Civ. Engrg., University of Quebec, Montreal, Canada, 909-920.
4. Gleick, P. H., 1986, "Method for Evaluation the regional hydrologic impacts of global climate changes" . Journal of Hydrology, 88: 97-161.
5. IPCC, Working Group I, 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
6. IPCC Working Group II, 2001. "Technical Summary: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability," Edited by Manning (New Zealand), M. and Nobre, C. (Brazil)
7. 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, Vol. 259: 163-188.
8. Palmer, R., Keyes, A.M., 1993. and Fisher, S., "Empowering stake-holders through simulation in water resources planning." Water management for the '90s, ASCE, New York, 451-454.
9. R.L. Wilby, P.G. Whitehead, A.J. Wade, D. Butterfield, R.J. Davis, G. Watts, 2006. "Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet" , UK. Journal of Hydrology 330, 204 - 220.
10. R. Matthias and P. Frederick, 1994, "Modeling spatial dynamics of sea-level rise in a coastal area" , System Dynamics Review 10 (4), pp. 375 - 389.
11. Simonovic, S. P., Fahmy, H., 1999. "A new modeling approach for water resources policy analysis" . Water Resour. Res., 35(1), 295-304.
12. Tung, C. P. and Haith, D. A. , 1995. "Global Warming Effects on New York Streamflows" , Journal of Water Resources Planning and Management 121(2): 216-225.
13. UNFCCC, 1999. CLIMATE CHANGE - RESPONSE, REPUBLIC OF NAURU RESPONSE 1ST NATIONAL COMMUNICATION - 1999.
14. Zacharias, I. and Koussouris, T., 2000. "Sustainable Water Management in the European Islands." Phys. Chem. Earth (B), Vol. 25, No.3, pp. 233-236.