

專 論

氣候變遷對台北地下水補注之衝擊

Climate Change Impacts on Taipei Groundwater Recharge

國立台灣大學生物環境系統工程學系
博士

譚 仲 哲

Chung-Che Tan

國立台灣大學生物環境系統工程學系
教授

童 慶 斌*

Ching-Pin Tung

摘 要

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，本研究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 與 GCGM2-A2 之下模擬未來流量之變異，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。結果顯示不論是 HADCM3-A2 或是 GCGM2-A2 短期（西元 2010~2039 年）氣候變遷情境，對地下水補注全期總量的影響皆不顯著，不過針對不同季節則會產生增加或減少等不同的衝擊，且呈現豐水季補注量增加，枯水季補注量減少的現象，整體而言，HADCM3-A2 情境產生之衝擊較 GCGM2-A2 情境劇烈且顯著，然而後續研究宜納入更多未來氣候情境分析，以獲得較廣泛之資訊。

關鍵詞：氣候變遷，全球暖化，PMWIN，地下水補注量，模擬。

ABSTRACT

Climate change which indicates the variate of long-term climate characteristics may

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程系教授，10617 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，cptung@ntu.edu.tw

result in enormous effects of short-term climate trends and raising frequency of extreme climate. The precipitation and the temperature are likely effected by climate change and further induce influences of streamflow and groundwater recharge. However, the groundwater recharge of Taipei basin is mainly from DaHan and SinDian river. The climate change impact on Taipei groundwater recharge is evaluated in this study. Processing MODFLOW is used in this study to construct a groundwater numerical model of Taipei basin with all kinds of historical data. Such as the simulated river elevation derived from the HEC-RAS model with streamflow data and using the river package to simulate the groundwater recharge based on the references. The referred variate of streamflow with the climate change, HADCM3-A2 and GCGM2-A2 scenarios, are applied to evaluate the average affected groundwater recharge from 2010~2039. The results show the increasing recharge in wet seasons and the decreasing recharge in dry seasons. However, the HADCM3-A2 scenario has more apparent variation than GCGM2-A2 scenario in groundwater recharge within a year even both scenarios exhibit the unobvious changes of the yearly total recharge.

Keywords: Climate Change, Global Warming, PMWIN, Groundwater Recharge, Simulation.

一、前言

水資源是人類賴以生存的重要元素，可供利用之水資源又可分為地面與地下水資源兩大類；台灣地區降雨量雖極為豐富，但因其特殊之地理條件，降雨在時間及空間上之分佈極不平均，豐枯季節明顯，又境內河川既短且狹，以致可利用之河川流量有限，加上人口稠密與產業發達，每人年平均分配雨水量僅達世界平均之 1/7，是相對缺水的國家(經濟部水利規劃試驗所，2007)。僅僅三萬六千餘平方公里的島內雖然擁有高達四十餘座的水庫，卻無法有效儲蓄地面河川流量，提供穩定之水資源，自 2001 年以來，嚴重的水患與乾旱便接續發生於台灣，種種現象皆顯示出氣候變異所導致極端氣候的發生，也對水資源管理與調配造成了一定程度之衝擊。

除了地面水資源以外，地下水亦為重要水資源，其開發利用行之有年，全台灣地區蘊有豐富之地下水資源，其分佈面積廣且含量甚豐，主要蘊藏於海岸台地、沿階台地與沖積平原等地層，然而地下水補注量限制地下水可開發量，不當開

發使用地下水可能導致地層下陷，要如何適當地開發地下水資源是為一相當重要之議題；若能合理推估出地下水資源之蘊藏量以及流動方式，便能妥善規劃利用地下水資源之利用策略。然而地下水流之三維流動難以觀察，一般只能由地下水觀測井觀測定點之水位，然後必需藉由地下水模式來模擬其水流方向以及其它未設有觀測井位置之地下水位。但由於地下水水位的推估涉及到抽水量、地質特性及補注條件等因素，必須謹慎評估以降低模擬之不確定性。

氣候變異所導致極端氣候事件的發生，例如降雨事件的發生頻率與強度改變或是氣溫的高低變化，皆會對於河川流量造成影響，楊萬全(1983)曾指出，台北盆地地下水主要含水層之補注來源為新店溪和大漢溪，則河川流量的改變會進一步衝擊地下水補注量，所以若能及早評估分析未來氣候變遷對於地下水資源之衝擊，提供決策者一參考之依據，則是為一重要的議題。本研究即針對淡水河流域內台北盆地地下水景美含水層模擬，發展盆地地下水模式，建立淡水河流域對其地下水之補注關係，並進一步應用當淡水河流域

流量受到氣候變遷衝擊之評估結果，分析氣候變遷對台北盆地地下水補注量所造成之影響。

有關未來氣候情境分析說明與台北盆地地下水含水層水文地質情況，以及台北盆地地下水相關前人研究將於第二節進行說明；第三節介紹台北盆地地下水景美含水層數植模型之建置，並配合歷史觀測資料進行地下水位模擬，其模式驗證之結果亦於此章節呈現；另外針對地下水含水層補注量之合理性評估與計算，並參考經濟部水利規劃試驗所(2007)計畫呈現之結果，其應用物理性大氣環流模式(GCMs)預報之不同氣候情境配合氣象資料合成模式，且利用連續-集塊型降雨-逕流模式(修正型 HBV 模式)，評估氣候變遷對流量產生之變異，本研究於第四節即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影響，而在最後第五節進行結論與未來進一步發展說明。

二、未來氣候情境與台北盆地地下水相關文獻回顧

本研究應用未來短期氣候情境(2010~2039)模擬氣候變遷對台北地區地面河川流量之分析結果，進一步模擬氣候變遷對地下水補注量所造成之衝擊，在本章節中，將分別簡單介紹相關氣候變遷評估流程以及台北盆地地下水含水層及相關文獻。

2.1 氣候變遷評估流程

由於未來氣候無實際紀錄資料，氣候變遷衝擊評估之研究在設定未來情境時，則是利用假設、空間或時間類比、以及物理性大氣環流模式(General Circulation Models, GCMs)等方法進行模擬，不過現今的氣候變遷的相關研究多採用 GCMs 的模擬結果為主，若是遇到小尺度區域之應用，則需配合降尺度方法將 GCMs 的全球大網格尺度降至合適的區域性資料，並配合氣象資料合成模式產生未來小尺度區域性的氣候情境；而許多國家在利用自行發展之大氣環流模式進行模擬時，皆需採用共同之 IPCC 溫室氣體排放情境

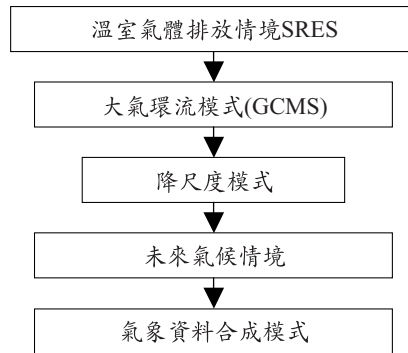


圖 1 氣候變遷衝擊評估之氣象資料合成流程(經濟部水利規劃試驗所，2007)

(SRES)來模擬未來氣候，其簡易流程如圖 1 所示。

SRES 為預測溫室氣體的排放情境，亦即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，其中考慮到未來可能致力於經濟發展，或是朝其它目標發展等不同程度的可能情形，加上全球性或是區域性之不同考量所帶來的影響，其分成了 A1、A2、B1 與 B2 四個主要情節：

- A1：其所代表快速的經濟成長、但全球人口在 21 世紀中期達尖峰後便開始走下坡。
- A2：全球人口不斷地增加，經濟成長主要為區域性成長，且每人經濟成長率及技術之改進較其它情節破碎且緩慢。
- B1：同 A1 情節，能源使用減少，並引用較乾淨且有效率之技術。
- B2：同 A2 情節，卻比 A2 情節慢，且主要以社會平等與環境的保護為目標。

而每個情節之中又包含數個協調的情境與 1~4 個具不確定性的情境，共組成了 40 個情境的資料，提供研究者與各國決策者使用，一般來說，A2 與 B2 情節所模擬之溫室氣體排放情形較 A1 與 B1 悲觀，而 A2 又比 B2 更加悲觀，目前國際研究則多採用 A2 與 B2 情境，所以本研究擬進行評估 A2 情境下，氣候變遷對地下水補注量之衝擊影響。

另外在降尺度方法，根據童慶斌(2007)之介紹，主要將降尺度方法分成三類，第一類為「簡易降尺度」，直接利用測站鄰近大氣模式輸出格

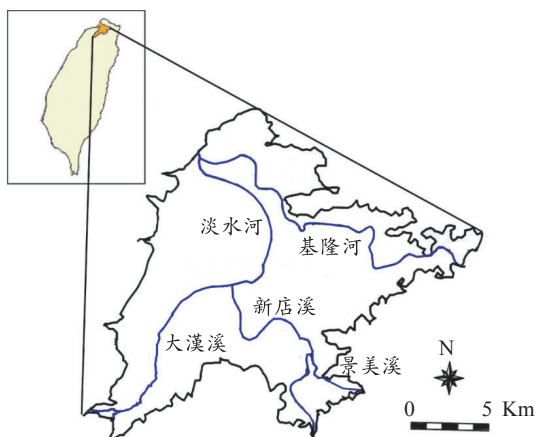


圖 2 台北盆地示意圖

點資料，假設區域內的溫度、降雨特性相同；第二類為「統計降尺度」，透過地面測站氣象資料與區域氣象資料進行統計分析求得關係，並將此關係將大尺度預報轉換成區域；第三類為「動力降尺度」，利用區域大氣動力模式，以大氣環流模式結果為邊界條件進行動力模式之降尺度分析。本研究擬利用經濟部水利規劃試驗所(2007)所評估之結果，其採用簡易降尺度所產生出來的區域性氣象資料統計特性，配合氣象資料合成模式(weather generator)產生每日降雨與氣溫等資料，如此可利用降雨-逕流模式進行淡水河流域流量模擬分析，流量變異可進一步應用於評估氣候變遷對地下水補注量之衝擊。

李明旭(2002)針對台灣不同區域分析，由區域水平衡分析，發現雖然氣候變遷下，全年降雨量增加，但由於降雨強度增強，反而可能導致地面補注量減少。馬楷威(2003)探討氣候變遷對屏東平原地下水系統之影響，以地質及水化學資料為基礎，進行屏東平原水文地質模式的建構，其結果顯示在氣候變遷條件下，屏東平原地下水受到衝擊最嚴重之區域為山麓地區，尤其是在補注地下水最多的豐水期更為明顯。

2.2 台北盆地地下水含水層及相關文獻

台北盆地處於台灣本島的北部，西有林口台地，北有大屯火山群，東南則是以西部麓山帶

表 1 台北盆地水文地質單元、地層與工程區對照表

地層區分	工程區分		水文地質單元	
松山層	松山層	第六層次	松山層	局部阻水層
		第五層次		局部含水層
		第四層次		局部阻水層
		第三層次		局部含水層
		第二層次		局部阻水層
第一層次	區域含水層*			
景美層	景美層		區域含水層*	
新莊層	新莊層			

*由五股觀測井水位記錄顯示，景美層與新莊層的水位一致，因此應屬於同一含水層。(摘自張閔翔，1996)

的丘陵為界，整個盆地略呈現三角形，如圖 2 所示，其範圍為標高 20 公尺以下為基準，盆地面積約為 240 平方公里，盆地內主要河系為東南處的新店溪、景美溪以及西南邊的大漢溪匯流成為淡水河，並在匯集東北處流入盆地內之基隆河後，從關渡流出海。

張閔翔(1996)藉助地質鑽探所記載之岩心記錄，初步分析台北盆地各含水層及隔水層分佈狀況，另外再配合捷運規劃初期所監測之水位記錄，以及前水資會、水利局之地下水位觀測紀錄，研判台北盆地整體的水文地質架構。台北盆地依照地層深度由上至下分為松山層、景美層以及新莊層，如表 1；對整個台北盆地地下水系統而言，自地面以下，一直到景美礫石層頂部為止，皆屬同一水文地質單元，亦即松山層的大部份(松山第一次層除外)應定義為隔水單元，雖然其間包含一些不甚連續之砂層，但這些砂層僅為局部含水層，就整體而言，隔水單元對於區域含水層仍具有阻隔水流的效果。而區域含水層位於隔水單元之下，主要是由透水性甚佳之礫石層或砂層所組成，除了景美礫石層之外，尚包括松山層第一次層在內。

另外，藉由岩心及地下水位記錄亦顯示，從地面至松山層底部砂層或景美層頂面之間多為泥層，其中間夾雜多個延伸範圍有限的薄砂層；砂質局部含水層具中度之透水性，其地下水多流

向附近河川或深部含水層，地下水位係隨深度而逐漸降低。松山層底部之砂層、景美層及新莊層則構成一個延伸範圍廣泛而且相當深厚的區域含水層，其主要是由透水性極佳之礫石或砂層所組成，其松山層底部的薄砂礫層與景美礫石層可併成盆地主要的區域含水層(賈儀平等，1999)，沿著新店河流域、大漢溪中、下游及盆地中心之區域皆為其分布範圍，北界僅到基隆河以南，向東到達松山區以西，故自盆地東邊的國父紀念館往西延伸至淡水河以西的範圍，區域含水層水力的側向連通性極佳，歷年水位變化趨勢一致(林燕初，1997)。

就地下水補注量來說，對靠近地面的非拘限含水層而言，只要有降雨或其他地面水體如河流、水塘、湖泊或是農田灌溉就是補注源，所以針對台北盆地地區而言，只要非不透水性結構物外，應皆為補注區；在拘限含水層方面，則補注區僅有扇頂厚礫石區。由於非拘限含水層中水質、水量變化較大，因此一般主要開發多以拘限含水層為主。張閩翔(1996)提到，在台北盆地西北部的天母、北投附近有礫石層出露或上覆薄層表土；南方的中和、永和大部分地區，即東南起於尖山、南勢角，經中和市公所，止於華中大橋，以東到新店溪之間，砂層、礫石層甚厚，為地下水天然補注區；景美小盆地附近地面土薄，到處露出砂石及礫石層，亦為台北盆地地下水重要之天然補注區(曹以松等，1985)。楊萬全(1983)則認為主要補注來源為新店溪和大漢溪，次要補注區有雙溪及其沿岸地區；新店溪補注段包括碧潭以北，秀朗橋附近以南之河道及其沿岸地區；大漢溪補注段包括山佳、頂埔一帶之浮州里附近河道及其沿岸地區。

過去三四十年來，有許多學者針對台北盆地地質及地下水含水層進行相當深入的探討，包括楊萬全(1974, 1983)、歐晉德等(1983)、曹以松等人(1985)、吳偉特(1988)、邵明忱等(1995)、楊國榮等(1995)、鄧屬于(1996)、張閩翔(1996)、闕河淵等(1997)、李志剛與秦中天(1998)、賈儀平等(1999)、能邦科技顧問股份有限公司(2000)、經濟部水利署(2003)、李振誥(2003, 2004)、徐國錦等

人(2004)、Tung and Tan(2005)、譚志豪等人(2006)以及卓腕淇(2006)等，其中多數文獻皆僅分析台北盆地之地層狀況以及觀測水位進行深開挖地下水問題、地層下陷及地下水位回升等問題之探討，其它少數學者則針對台北盆地地下水含水層建立數值模式進行模擬，例如曹以松等人(1983)、李振誥(2003, 2004)、Tung and Tan (2005)以及譚志豪等人(2006)，相關地下水模式建構之背景及其貢獻則示於表 2。

經濟部水利署從 2004 年開始重新評估台北盆地內各個地下水觀測井之適用性，並且新增數口自記式地下水觀測井，目前共有 24 口觀測井進行地下水位之量測工作，本研究擬只針對台北盆地主要地下水含水層-景美層為研究對象，擷取了當中共同連續有觀測水位紀錄最多時期之 12 口觀測井，如表 3 所示，並參考曹以松等人(1985)、李振誥(2003)與譚志豪等人(2006)所建構之地下水模式，並重新定義其邊界與邊界條件，建立一較為簡化之地下水數值模式，模擬景美層之地下水流，進而評估氣候變遷對於主要含水層地下水量之衝擊。

三、台北盆地主要含水層地下水模式及其驗證結果

就含水層的出水能力來檢視，台北盆地明顯也完整的礫石層分佈的位置，一般稱之為景美層，是屬於相當良好的含水層；本研究即針對此一含水層建立地下水數值模式模擬地下水流，並確立其地下水補注量與地面河川流量之關係，進一步評估氣候變遷對於地下水量之影響。

3.1 台北盆地主要含水層地下水模式之建構

圖 3 為台北盆地地質背景圖，其中景美層分佈的範圍及區位含括新店溪及大漢溪下游兩側的區域，包括中和、永和、板橋、新莊、三重、蘆洲以及台北市的文山區、中正區、大同區和萬華等區域(經濟部水利署，2003)，林燕初(1997)也定義景美層範圍，沿新店河流域、大漢溪中、下游及盆地中心之區域，北界僅到基隆河以南，向東到達松山區以西。

表 2 地下水模式建構背景及貢獻一覽表

模式建構學者及其年份	模式建構背景	建構模式之相關貢獻
曹以松等人 (1985)	早期所建構之台北盆地地下水數值模式，以因應當時台北盆地因抽水過量，造成地層下陷等問題發生。	地下水數值模式針對主要含水層(林口層，現為景美層)進行研究，並於盆地內多處選點做抽水試驗，提供盆地之流通係數分區值；指出大漢溪中游以及新店溪流域為主要含水層之補注來源。
李振誥 (2003)	李振誥於 2003 執行經濟部水利署專題研究計畫「台北盆地地下水管制區檢討及土壤液化評估(2/2)」	建構台北盆地地下水數值模式，其研究區域包含低透水性含水層(自由含水層，包括從地面至松山層底部砂層或景美層頂面之未固結沉積物)以及主要含水層(承壓含水層，位於低透性含水層下方之松山層底部砂層、景美層及新莊層聯合構成台北盆地主要含水層)；於盆地四周依特性不同定義不同之邊界條件，並且對不同含水層進行補注；水力傳導係數，則參考觀測井開鑿相關報告(歐晉德，1983；邵明枕，1995)；以李振誥(2002)研究報告所提出之補注量為依據，利用建構之台北盆地地下水數值模式進行水平衡分析空間上測向與垂向之補注量。
李振誥 (2004)	因應乾旱預警及水資源整合運用，李振誥於 2004 進行淡水河流域地下水源補助供水系統之研究，以進行水資源管理調配研究工作。	利用 2003 年所建構之台北盆地地下水數值模式為基礎，搜集淡水河流域氣象資料與水文地質資料，並建立水文地質資料庫，篩選資料完整之部份觀測井水位資料分別作為類神經網路與逐步高斯模擬現地水文地質參數，如水力傳導係數與貯水係數。補注量利用美國地質調查所(U.S.G.S)所發展的 UCODE (Poeter <i>et al.</i> , 1998)參數優選模式進行第一階段率定，再以人工進行第二階段率定。最後進行合適水位與合適出水量之推估，以便台北盆地之地下水補助地面水管理調配工作。
Tung and Tan (2005)	建立台北盆地主要含水層(景美層)之數值模式，期望模擬水位與觀測水位之誤差最小化。	利用財團法人農業工程中心所提供之台北盆地區域內 23 口觀測井，於 2000 年至 2001 年水位，進行模式之率定與驗證，推估辨識台北盆地地下水模式最佳水力傳導係數之空間分佈。
譚志豪等人 (2006)	建立台北盆地區域性三維水文地質模型，預測捷運新莊線道岔段群井抽水試驗期間場區內、外之水壓淺降趨勢。	針對松山層與景美層建立地下水數值模型，並參考李振誥(2003)之台北盆地地下水模式，其中將邊界條件稍做修正，以河流、斷層及地下分水嶺等天然邊界訂定定水頭或無流量等邊界條件；並依盆地各主要河流之基流分析結果輸入盆地之地下水補注量；且於盆地內設置多口虛擬抽水井以擬合 2003 年地下水觀測井之水位資料。

表 3 台北盆地觀測井一覽表(經濟部水利署網頁公告)

	井名	地下水分區	縣市	井別	TMX	TMY	記錄年份
#1	十工處(2)	臺北盆地	台北縣	自記	294178	2765326	1994~2007
#2	莊敬(2)	臺北盆地	台北縣	自記	296634	2768321	2005~2007
#3	板橋(s)	臺北盆地	台北縣	自記	295924	2766928	1986~2007
#4	二重(s)	臺北盆地	台北縣	自記	297490	2771426	1972~2007
#5	永和(2)	臺北盆地	台北縣	自記	300167	2767330	2005~2007
#6	新莊(2)	臺北盆地	台北縣	自記	294238	2770591	2005~2007
#7	清溪	臺北盆地	台北縣	自記	301944	2764119	2005~2007
#8	省民	臺北盆地	台北縣	自記	292187	2763912	2004~2007
#9	蘆洲(2)	臺北盆地	台北縣	自記	296038	2775884	2005~2007
#10	國父紀念館	臺北盆地	台北市	自記	305475	2770380	2005~2007
#11	台大(2)	臺北盆地	台北市	自記	304708	2767689	2005~2007
#12	大橋國小	臺北盆地	台北市	自記	300836	2773205	2005~2007

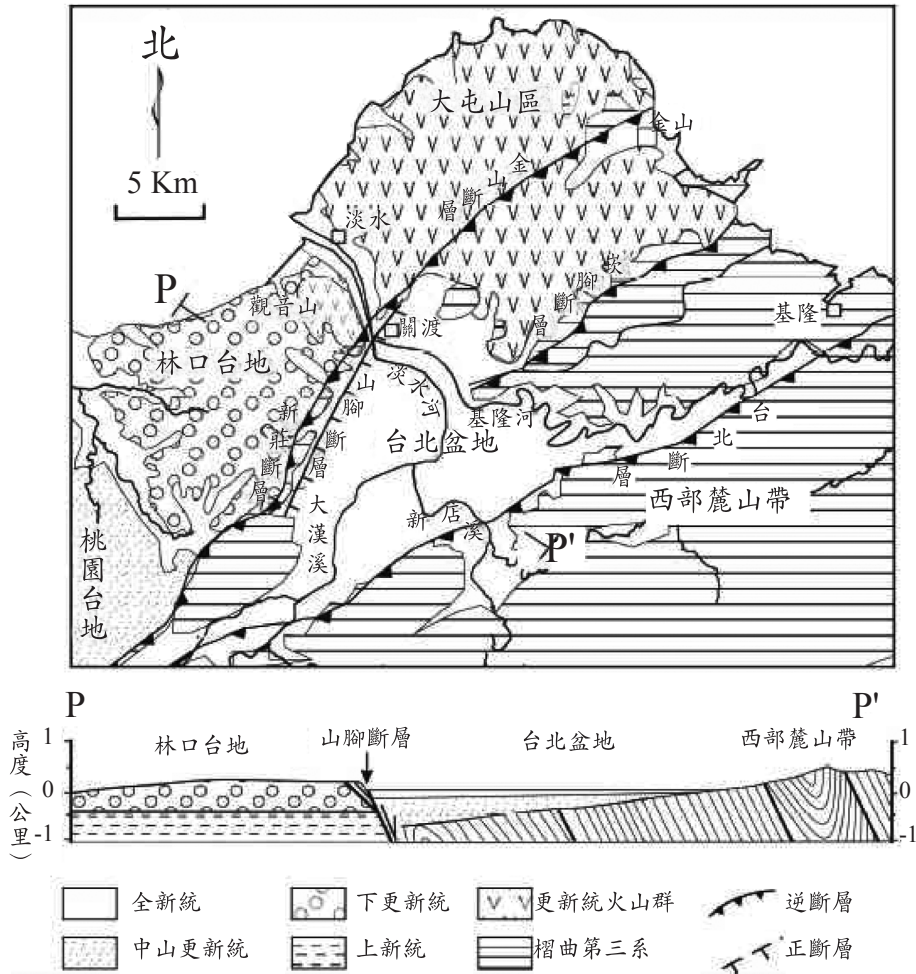


圖 3 台北盆地地質背景圖(摘自林佩儀, 2007)

本研究針對景美層建立地下水含水層數值模型，利用由 Chiang and Kinzelbach (2003)所發展出來的 Processing MODFLOW (PMWIN)套裝軟體進行模擬，其核心則是利用 U.S.G.S.所發展的 MODFLOW (Harbaugh and McDonald, 1996)進行地下水模擬，如圖 4 所示，每個網格大小為 1000m×1000m，各項水文地質參數則是參考曹以松等(1985)以及譚志豪等(2006)等文獻中所建議的合理數值進行設定，其中，含水層之厚度依照各觀測井之鑽探資料進行內插，儲水係數則設定為 0.001，流通係數則參考表 4 中，各文獻所提供之流通係數值，採用其中較大值為本研究地

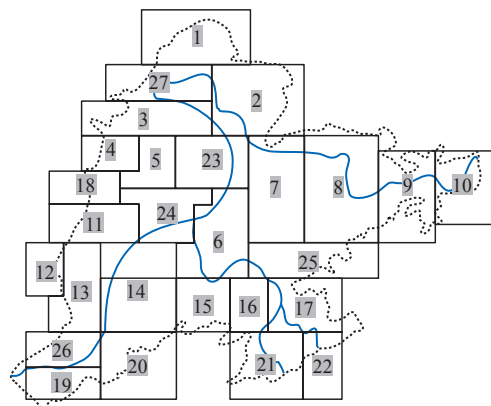


圖 4 台北盆地侷限含水層-景美層之水力參數分區 (譚志豪等人, 2006)

表 4 台北盆地侷限含水層-景美層之水力參數值一覽表

研究學者	水資會抽水試驗	楊萬全(1972)	曹以松與毛愛生(1984)	譚志豪等(2006)
分區號碼	流通係數(T)	流通係數(T)	流通係數(T)	流通係數(T)
1	218.89	185.76	218.89	220
2	402.84	700.00	402.84	400
3	820.80	820.80	825.84	800
4	1473.12	1473.12	1473.10	1500
5	155.52	1200.00	466.56	150
6	1217.50	3000.00	1217.50	1200
7	2794.30	3600.00	2794.30	2800
8	263.52	640.00	236.52	250
9	968.80	140.00	968.80	1000
10	438.48	140.00	438.48	450
11	782.64	1771.80	1771.80	800
12	1735.20	1735.20	1735.20	1750
13	712.08	2000.00	1885.96	700
14	187.42	1600.00	628.56	200
15	400.32	3000.00	400.32	400
16	400.32	3600.00	3682.80	400
17	400.32	2200.00	2225.20	400
18	1024.00	1024.00	1482.64	1000
19	190.44	1800.00	3515.00	200
20	246.72	1700.00	1953.52	200
21	151.84	4000.00	3885.96	150
22	151.84	151.84	2764.72	150
23	2794.00	1600.00	N/A	2800
24	4551.84	3551.84	N/A	4500
25	2225.20	3800.00	N/A	2200
26	519.84	2000.00	N/A	500
27	267.84	267.84	N/A	270

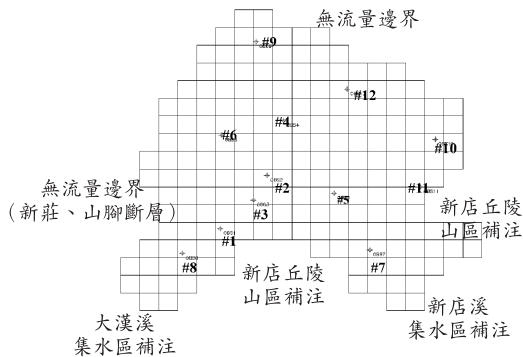


圖 5 台北盆地景美層數值模式、觀測井及邊界條件圖

下水模式流通係數之輸入值，並依照圖 4 之不同分區給予不同參數值，如下圖 4 與表 4 所示：

另外擷取盆地內 12 口觀測井之地下水位資料，其相關位置如圖 5 所示，觀測水位搜集時間從 2005 年 3 月至 12 月共 10 個月的每月平均觀測水位(參考經濟部水利署公告地下水位有紀錄連續資料)，模式所需設定之初始水位，則利用各觀測井有紀錄的 2 月地下水觀測水位，內插出整個區域所有網格的初始水位，12 口觀測井之觀測水位則如圖 6 所示；另外由於台北盆地是為地下水管制實施重點區域，近二十年來，除了維護工

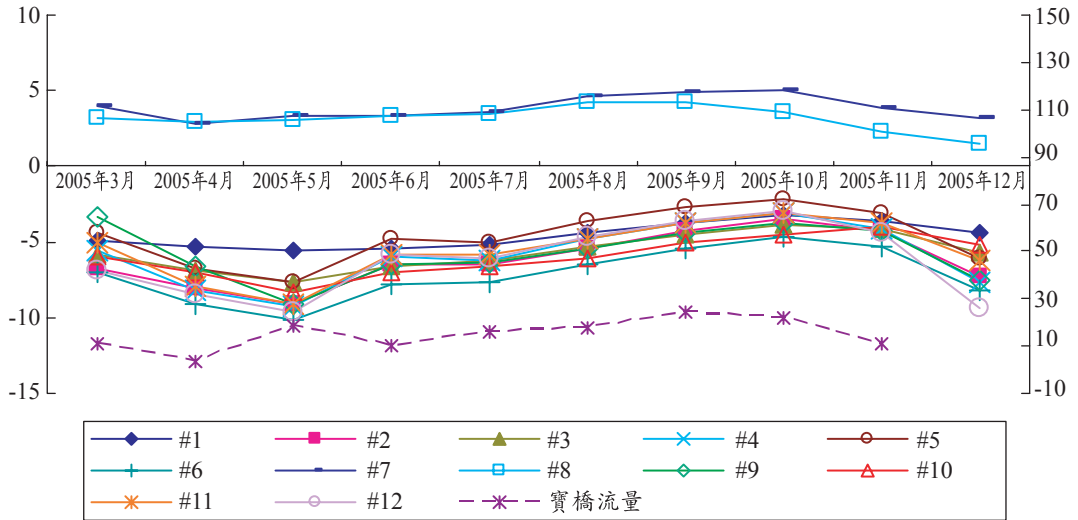


圖 6 台北盆地景美層 12 口觀測水井地下水位圖

程施行時之安全必要以及少數產業運作需要之外，例如捷運施工之抽水，鮮少進行地下水之抽取，故此區域之抽水量假設為零抽水量。

從上圖 5 與圖 6 可看出，除了觀測井#7 與#8 因為較靠近盆地邊緣，地下水位較高以外，其它各井的地下水位升降趨勢則呈現良好的相關性，如此可推估其觀測水位是顯示連通性佳之景美層所量測到的地下水總水頭；另外，觀測井#1~#12 分散分佈於整個台北盆地，三月到五月發生顯著洩降，若是單一地區之抽水事件發生，難以造成如此全面性的地下水位洩降與上升，其發生的原因應該與邊界條件或是補注區域的補注量有關，又因為景美層是為一個限含水層(受壓含水層)，其含水層亦為飽和狀態，所以若是在假設無顯著抽水事件發生於此含水層之前題下，觀測井所量測到的水位變動，應與受壓含水層所承受之壓力改變有一定程度之相關性，可能為總水頭中的壓力水頭產生變化，而非地下水位面上升下降造成高度水頭的改變；又台北盆地景美層是為一蓄水性良好之侷限含水層，文獻中並無記載明顯的地下水流出紀錄，唯一與地面連通之處應為大漢溪中下游與新店、景美河流域之河川補注區，所以其含水層壓力水頭之變化，可能是受到河川補注區之水位高低起伏所影響。

有鑑於此，再加上本研究只針對景美層進行地下水模擬，故在邊界條件設定方面，只考慮對景美層敏感之邊界條件，參考李振誥(2003)與譚志豪等人(2006)之邊界設定並加以修改，利用 PMWIN 裡的 RIVER PACKAGE 進行邊界集水區補注量的設定，根據文獻的探討，盆地西南側為大漢溪中下游集水區補注以及東南側為新店溪、景美河流域集水區補注，西側為一斷層構造，假定為無流量邊界，南側與東側為部份丘陵山區補注，北側則因為基隆河坡降較緩，於南港、士林等河道附近之沉積物組成幾乎全為泥層，阻滯了河水或雨水的下滲與補注，設定為無流量邊界，不過整個景美層地下水的主要補注來源，還是以大漢溪中下游與新店、景美河流域之河川補注區為主，丘陵山區補注則是為次要的補注來源。

由於本研究利用 PMWIN 裡的 RIVER PACKAGE 模擬河川對地下水含水層補注的影響，必需輸入河道相關的參數，於河川水力傳導係數，則是考慮其河床與景美層補注區相通，同屬於礫石所組成，而設定符合礫石組成之參數值；河川水位方面，則是利用美國工兵團(The U.S. Army Corps of Engineers)的水文工程中心(Hydrological Engineering Center, HEC)所開發的

表 5 模擬與觀測水位誤差一覽表

單位：公尺

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
均方根差 (RMSE)	0.48	1.43	0.79	1.92	1.61	1.45	0.45	0.75	1.78	1.30	1.14	2.43

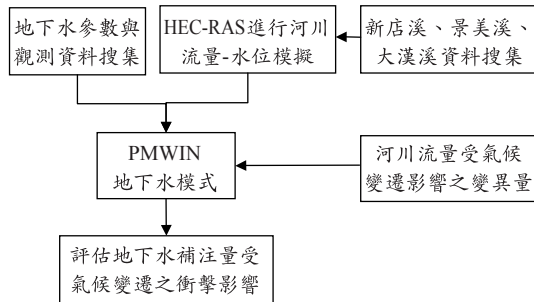


圖 7 地下水補注量之衝擊評估流程

HEC-RAS 軟體進行簡單的流量-水位模擬，有鑑於此，搜集 2005 年大漢溪中下游的三峽河流量站與三鶯橋流量站、新店溪下游的秀朗流量站以及景美溪的寶橋流量站的流量資料，經過整理配合這些河段的斷面資料輸入 HEC-RAS 模式模擬各河段各個斷面的水位，再進一步將水位資料輸入 PMWIN 的 RIVER PACKAGE，期望能夠合理地模擬地下水位，不過，實際河川水位會與地下水位有一定程度之相互影響，而此部份影響應該已經反映至實際觀測之河川流量資料，所以可合理利用觀測流量推估河川水位，進行地下水位模擬，分析主要含水層景美層之地下水補注量；另外，參考經濟部水利規劃試驗所(2007)所分析氣候變遷對淡水河流域流量衝擊之結果，評估氣候變遷造成流量之變異，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影響，其研究流程則如圖 7 所示。

3.2 模式驗證結果

本研究根據參考文獻以及歷史紀錄資料建構台北盆地主要含水層景美層之地下水數值模型，利用 PMWIN 模擬研究範圍內 12 口觀測井地下水位，其模擬水位與觀測水位比較如表 5 與

圖 8(a)-(l)所示，從表 5 與圖 8 中可以看出，離大漢溪中下游河川補注區與新店、景美溪河川補注區較近的觀測井，其受到河川水位變動所影響的程度較明顯，如#1、#2、#3、#5、#6、#7、#8、#10 與#11，而#4、#9 與#12 因為距離河川補注區較遠，所受到之影響較不顯著，且模擬誤差也較大；另外，#1、#7 與#8 因為分別位於兩個河川補注區域附近，故其水位變化除了跟河川水位趨勢一致之外，也與觀測水位呈現良好之相關性，模擬誤差也較小，卓腕淇(2006)也曾將此一區域的觀測井地下水位歸納於變化平穩，又因此區域為補注區，所以這類井之水位是為自由地下水位且與河川水位變化特徵相符。

從圖 6 與圖 8(a)-(l)來看，大約在 2005 年 5 月的時候有一個洩降最低之處，依照觀測井不同大約是一 2m~5m 的降幅，而模擬之地下水位皆無法模擬出此降幅，主要還是因為大漢溪中下游與新店、景美溪之河川水位並無法呈現出如此幅度之變化。然而於 2005 年起，大橋國小站(#12)附近因有捷運施工安全需求，針對景美層進行工程性質的抽水，而詳細相關之抽水歷程資料因無法取得，無法進行模擬，不過若是單一抽水事件發生，應亦無法造成如此廣大範圍於短時間內同時洩降，後續研究應探討是否有其他補注水源，或其亦與河川流量具有連動關係。本研究即利用現有搜集之資料，進行台北盆地景美層地下水數值模式之建立，期望合理模擬地下水位與地下水補注量，並進一步評估氣候變遷對地下水補注量所造成之衝擊。

四、氣候變遷影響下補注量之衝擊評估

在利用 PMWIN 進行地下水之數值計算時，其軟體會自動計算並且輸出 output.dat 檔案說明每個模擬時間之補注量為何，圖 9 為模擬時期

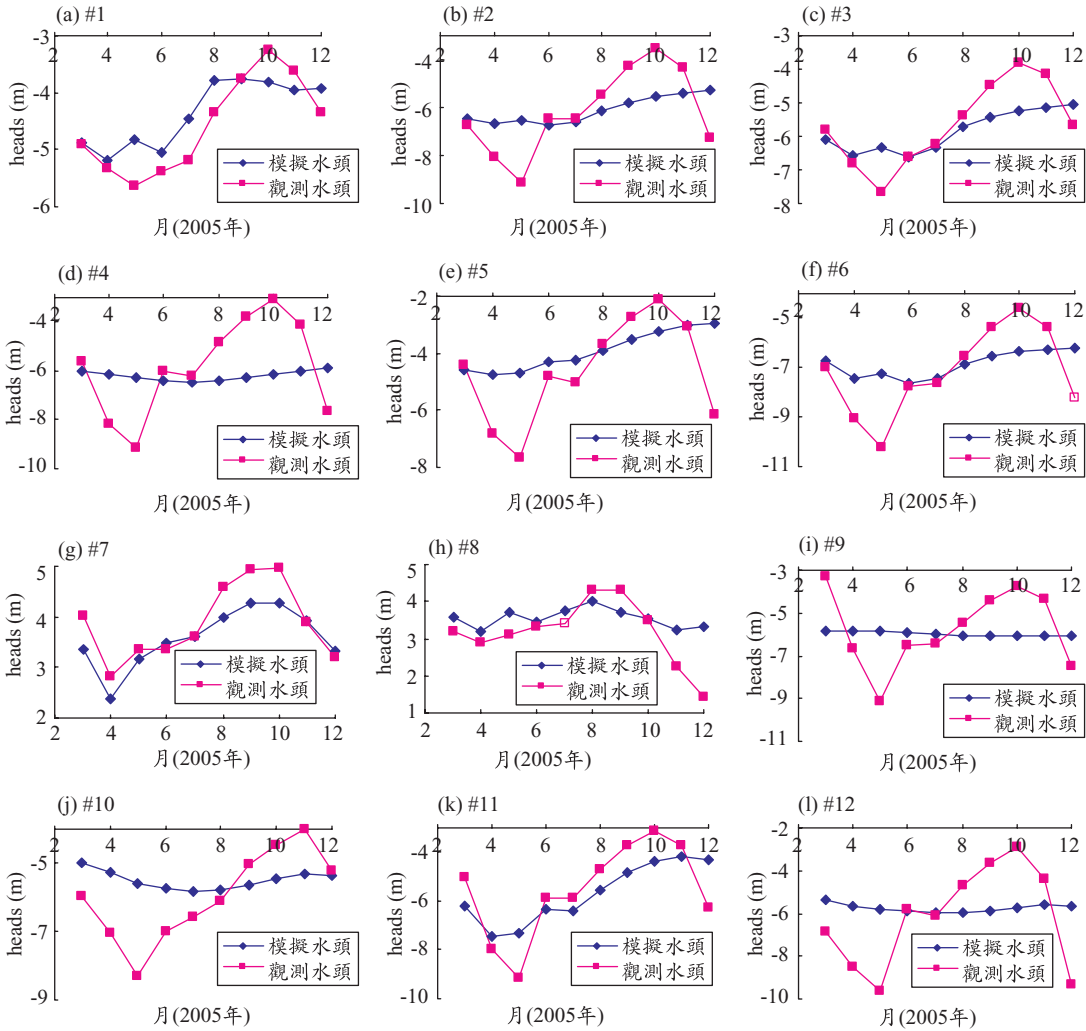


圖 8 觀測水位與模擬水位比較圖

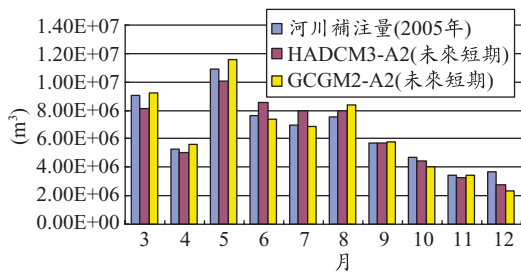


圖 9 台北盆地景美層現在與未來每月河川補注量

內，每個月河川的補注量，不過由於缺乏各流量站 2005 年 1 月與 2 月的資料，故本研究無法進行該時期的補注量推估，從圖中可以看出，於 2005

年 3 月至 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 萬噸，而第一季(3 月至 5 月)的補注量，平均每個月為 840 萬噸，平均每天 28 萬噸的補注量，約為台北地區每日平均需水量 249 萬噸之 11.2%，第二季(6 月至 8 月)的補注量，平均每個月為 739 萬噸，每日平均為 24.6 萬噸，約為台北地區每日平均需水量之 9.9%，第三季(9 月至 11 月)的補注量，每月平均為 463 萬噸，每日平均為 15.4 萬噸，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 萬噸，每日平均約 8.43 萬噸，約為台北地區每日平均需水量之

表 6 氣候情境對河川流量與地下水補注量之衝擊變異

(單位：%)

	氣候變遷對河川流量之衝擊變異				氣候變遷對地下水補注量之衝擊變異	
	HADCM3-A2		GCGM2-A2		HADCM3-A2	GCGM2-A2
	新店溪	大漢溪	新店溪	大漢溪		
1 月	-4.64	-9.49	-10.45	-8.44	N/A	N/A
2 月	-27.06	-22.61	-5.46	-6.91	N/A	N/A
3 月	-36.84	-22.32	5.75	6.15	-10.05	1.67
4 月	-23.93	-18.85	33.93	12.13	-4.24	6.76
5 月	-18.40	-10.89	43.01	28.73	-8.27	5.88
6 月	0.81	-12.89	30.88	9.00	11.16	-3.28
7 月	52.62	8.65	59.26	18.70	14.58	-1.17
8 月	29.31	15.66	77.59	56.12	5.62	10.48
9 月	6.85	15.83	39.13	50.56	-0.25	1.40
10 月	-15.82	2.51	-20.07	8.71	-5.35	-15.40
11 月	-27.02	-10.60	8.33	13.42	-5.66	-0.27
12 月	-5.45	-7.42	-13.00	-0.6	10.70	-6.11

3.39%。由此可見，第一季與第二季之河川補注量明顯較多，雖然其中以第一季的補注量最多，這可能是因為第一季開始之前的枯水期補注量相對較低，較容易發生補注，而第二季雖然流量增加，但地下水於第一季至第二季持續補注，已漸漸造成補注上的不易，故第二季的補注量反而較第一季略少；另一方面亦有可能因模式模擬時期是從 3 月份開始，而初始水位之設定，無法有效反映 1 月與 2 月的補注量，因此造成第一季模擬出較多的補注量。第三季的河川流量雖然沒有明顯低於第二季，但補注量卻相差甚多，也可能是因為河川補注從第一季與第二季以來已持續進行補注，而後來的時期補注則會越來越困難的原故。第四季則因為地面流量資料缺乏，只進行 12 月的模式模擬，不過仍然可以發現地下水補注量因為河川流量的減少而有顯著的降低。然而景美層是為一飽和的侷限含水層，理論上來說儲蓄的地下水量已達穩定，所以其補注量應採取合理之分配利用與管理，一方面可以調節地面水資源的利用，另一方面則避免景美層之壓力水頭持續上升，降低台北盆地各項開挖工程之風險。

表 6 則擷錄由經濟部水利規劃試驗所(2007)所評估之 HADCM3-A2 與 GCGM2-A2 兩種氣候情境對台北地區北勢溪以及大漢溪流量所產生

之衝擊影響，本研究則利用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，以評估當流量因氣候變遷產生變異時，對於地下水補注量之影響，其結果如表 6 所示。在表 6 中可發現在某一個月份，氣候變遷雖然對河川流量造成增加的變異，可是其補注量卻產生減少的結果，這應該是因為受到前一時期的補注量相對這一時期補注量較大所影響，反之河川流量發生減少變異時，其補注量亦有可能因前一時期補注量相對較小而產生增加的變異。

另外從表 7 可以看出，對 HADCM3-A2 情境來說，在 3 月至 5 月的第一季，其流量因為氣候影響而減少，河川補注量也從原本每個月平均 840 萬噸減少至每月平均 772 萬噸，降幅達 8.1%；在 6 月至 8 月的第二季豐水期間，其流量因為氣候變異有增有減，不過平均來說，河川補注量卻從原本每月平均 736 萬噸，增加至每月平均 815 萬噸，升幅達到 10.3%；而在進入雨量減少的第三季時，河川流量受到氣候變異亦有增有減，不過平均來說，其補注量從每月平均 463 萬噸下降至每月平均 448 萬噸，降幅較小，只有 3.3%，第四季則只有 12 月的數據，補注量從 371 萬噸下降至 280 萬噸跌幅達 24.6%。從表 6、表 7 與圖 9 可以看出，在未來短期發生 HADCM3-A2

表 7 不同氣候變遷情境之河川補注量

(單位：萬噸)

	2005 年 地下水補注量	HADCM3-A2 情境補注量	變化率	GCGM2-A2 情境補注量	變化率
第 1 季(3 月-5 月)	840	772	-8.07%	878	4.55%
第 2 季(6 月-8 月)	739	815	10.34%	754	2.07%
第 3 季(9 月-11 月)	463	448	-3.32%	441	-4.71%
第 4 季(12 月-2 月)	253	280	10.7%	237	-6.11%
總 量	650	638	-1.72%	646	-0.6%

的氣候情境會對於台北盆地主要地下水含水層景美層之河川補注量造成豐水期補注量增加，枯水期補注量減少之趨勢，雖然對總量上來說，從原本 650 萬噸的補注量些微降至 638 萬噸，降幅不到 2%，但季節補注量變化會影響季節性水資源可利用量，仍必須加以關注，並值得未來進行進一步之研究。

對 CGCM2-A2 情境來說，在 3 月至 5 月的第一季，其流量因為氣候變異增加，河川補注量也從原本每個月平均 840 萬噸增加至每月平均 878 萬噸，升幅達 4.5%；在 6 月至 8 月的第二季豐水期間，其流量因為氣候變異亦為增加，河川補注量從原本每月平均 736 萬噸，小幅增加至每月平均 754 萬噸，升幅 2.1%，其升幅縮小的原因亦有可能為第一季開始的持續補注會提高後期補注上的困難度；而在進入雨量減少的第三季時，河川流量受到氣候變異有增有減，不過平均來說，其補注量從每月平均 463 萬噸下降至每月平均 441 萬噸，降幅不大，只有 4.7%，而第 4 季則只有 12 月的數據，補注量從 371 萬噸，下降至 237 萬噸，跌幅高達 36%。不過若是暫不考慮數據缺乏之第 4 季，從表 6、表 7 與圖 9 則可以看出 GCGM2-A2 情境對於台北盆地景美層地下水補注量的影響較不顯著，補注量於豐水期稍微增加，於枯水期稍微減少，而對總量上來說，從原本的 650 萬噸的補注量些微下降至 646 萬噸，降幅不到 1%，不過其季節補注量仍因時期之不同而有增有減。

從以上分析結果可了解不論是未來短期的 HADCM3-A2 或是 GCGM2-A2 氣候變遷情境，對地下水補注總量的影響皆不顯著，這或許間接

提供地下水資源適合長期進行合理開發利用之訊息，因為其總量較不受未來短期氣候變遷所影響；不過地下水補注量還是會針對不同季產生明顯的增加或減少等不同的衝擊，例如於豐水期時補注量增加，枯水期補注量則是受到減少的影響，而且整體而言，HADCM3-A2 情境產生之衝擊較 GCGM2-A2 情境為劇烈且顯著，本研究即提出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，以供決策者一參考之依據，例如從資訊中可看出，豐水期之補注量會受到氣候變遷影響而增加，所以在豐水期來臨之前的枯水期末期，應可合理地開發較多量之地下水資源以輔助地面水資源，而缺少的地下水量則可於隨豐水期而來較多的補注量補注之下，獲得舒解。期望決策者進一步合理分配與管理台北地區地下水資源。

五、結 論

台北盆地自從嚴格施行地下水使用管制之後，其出水能力良好之景美層地下水位持續上升，而目前上升之水位，已有一定程度的影響深開挖之工程安全，所以台北盆地應穩定且適當地分配管理地下水資源；然而大漢溪、新店溪與景美溪的河川流量是為補注景美層地下水主要來源，當氣候發生變異而影響河川流量時，必需妥善評估台北盆地主要含水層補注量之衝擊，本研究根據各項歷史紀錄資料以及文獻所提供之水文地質參數建構台北盆地景美層之地下水數值模型，合理地模擬地下水位，並進一步參考物理性大氣環流模式(GCMs)預報之不同氣候情境，選擇 HADCM3-A2 與 GCGM2-A2 未來短期情境下

模擬流量與現況之模擬流量所產生之變異，利用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，以提供決策者評估當流量因氣候變遷產生變異時，對於地下水補注量之影響。

有限於台北盆地各項歷史資料紀錄部分不完整，例如流量紀錄缺測可能是因為颱風所帶來的高流量而損壞流量計，或是地下水觀測井址受到干擾而無法確實量測地下水位等，皆間接造成模擬模擬地下水位之誤差，期望未來各項資料之搜集能夠更加完整，例如增加大漢溪、新店溪中下游流量資料空間與時間上之量測，將資料所造成之不確定性降至最小；另外相關之水文地質參數也可能需要重新確立其數值之精確性，由於本研究並無針對任何模式參數進行反向率定，在未來研究方面亦可應用演算法進行參數辯識之工作，期望模擬水位與觀測水位之誤差最小，提升地下水數值模式之可信度。

從結果可以看出觀測井距離本研究設定之補注區較遠時，其地下水模擬水位的升降並無法有明顯的反應，但是其觀測水位的升降趨勢亦與其它觀測井相同，或許是因為補注區的範圍設定不夠完全，而在未來研究方面，亦可利用演算法進行補注區反向辯識，重新確立能更完整反應景美層觀測水位的補注區域。

目前聯合國「政府間氣候變化專門委員會」(簡稱 IPCC)已公佈大約二十幾種不同的未來氣候變遷情境，而本研究目前只採取其中的兩種，期望於未來能夠更進一步利用其它情境所產生的資料，進行未來氣候變遷對台北盆地主要含水層地下水補注量之衝擊評估，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，進一步合理利用與管理台北地區地下水資源。

六、參考文獻

1. Harbaugh, A. W., and M. G. McDonald, 1996, "User's documentation for MODFLOW 96 an update to the U. S. Geological Survey modular finite-difference groundwater flow model." U. S. Geol. Surv. Open File, 96-485.
2. Chiang, W.-H. and Kinzelbach, W., 2003, "3D-Groundwater Modeling with PMWIN: A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution." 1st ed. 2001. Corr. 3rd printing, XIV, Springer, 346 pp.
3. Poeter, E. P. and Hill, M. C., 1998, "Documentation of UCODE, a computer code for universal inverse modeling: U.S Geological Survey Water-Resources Investigations Report." 98-4080, 122p.
4. Tung, C. P. and C. C. Tan, 2005, "An optimal procedure for identifying parameter structure and application to a confined aquifer", *Environmental Geology*, 47,1062-1071.
5. 吳偉特，1988，「台北盆地地盤分區土壤之工程特性」，*地工技術雜誌*，第 22 期，5-27 頁。
6. 李明旭，2002，「氣候變遷對台灣地區地下水補注量衝擊評估」，第九屆台灣地區地球物理研討會，中央大學，Nov. 12-13。
7. 李志剛、秦中天，1998，「台北盆地大地工程特性」，*土木技術雜誌*，第 6 期，37-49 頁。
8. 李振誥，2003，「台北盆地地下水管制區檢討及土液化評估(2/2)」，經濟部水利署專題研究計畫。
9. 李振誥，2004，「淡水河流域水資源乾旱預警機制與風險管理策略之建立-子計畫：淡水河流域地下水源補助供水系統之研究(I)」，NSC-93-2625-Z-006-007-。
10. 林燕初，1997，「台北盆地地下水系統特性之探討」，國立台灣大學地質學研究所應用地質組碩士論文。
11. 林佩儀，2007，「晚第四紀以來台北盆地沉積物的組成特性」，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文。
12. 卓腕淇，2006，「台北盆地地下水位變遷與地盤變動」，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文。
13. 邵明枕、黃立煌、馮堯松、劉格非，1995，「礫石層水理參數探討」，*國際卵石層地下*

- 工程研討會，台灣，台北，4-29-4-38 頁。
14. 徐國錦，2004，「淡水河流域水資源乾旱預警機制與風險管理策略之建立-子計畫：淡水河流域抗旱地下水資源可利用之研究(I)」，NSC-93-2625-Z-006-006-。
 15. 能邦科技顧問股份有限公司，2000，「台灣地區地下水補注量估算」，經濟部水資源局計畫。
 16. 馬楷威，2003，「氣候變遷下屏東平原地下水資源利用之預測」，國立成功大學水利及海洋工程學研究所碩士論文。
 17. 曹以松、許榮庭，1985，「台北盆地地下水抽水量反向推求數學模式之研究(一)~(三)」，國立台灣大學農業工程研究所。
 18. 張閩翔，1996，「台北盆地地下水系統之研究」，國立台灣大學地質學碩士論文。
 19. 童慶斌，2007，「氣候變遷與環境生態講義」，台灣大學生物環境系統工程學系，第三章。
 20. 楊萬全，1972，「台北盆地地下水蘊藏量與超抽情況的研究」，台銀季刊，第 22 卷，第 4 期，235-253 頁。
 21. 楊萬全，1974，「台北盆地地下水補注問題之研究」，台灣水利，第 22 卷，第 4 期，20-37 頁。
 22. 楊萬全，1983，「地下水開發對環境的衝擊-台北盆地的個案研究」，國立台灣師範大學地理學研究報告，第 9 期，73-118 頁。
 23. 楊國榮、黃立煌、王勝男，1995，「台北盆地礫石層深開挖地下水問題」，國際卵礫石層地下工程研討會論文集，4-21-4-28 頁。
 24. 經濟部水利署，2003，「地下水觀測站井佈置檢討(台北盆地與桃園中壢台地)」，地下水觀測站井及已完成觀測井井體維護計畫(2/2)。
 25. 經濟部水利署水利規劃試驗所，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。
 26. 賈儀平、張閩翔、劉文煜、賴典章，1999，「台北盆地之水文地質研究」，經濟部中央地調所特刊，第十一號，393-406 頁。
 27. 歐晉德、李延恭、鄭在仁，1993，「淡水河流域松山層地下水位及水壓分佈對基礎工程影響」，土木水利，第 10 卷，第 3 期，89-102 頁。
 28. 鄧屬予、袁彼得、陳陪源、彭志雄、賴典章、費立沅、劉桓吉，1996，「台北盆地地下地質-新資料和新看法」，台灣之第四季第六次研討會暨台北盆地地下水質與工程環境綜合調查研究成果發表會論文集，7-10 頁。
 29. 闕河淵、黃南輝、郭金源，1997，「台北盆地地下水位分佈與施工降水影響之探討」，土工技術雜誌，第 63 期，23-32 頁。
 30. 譚志豪、冀樹勇、顧承宇、林坤霖，2006，「台北盆地區域性三維地下水流動數值模擬」，中興工程季刊，第 93 期，1-9 頁。

收稿日期：民國 96 年 10 月 30 日

修正日期：民國 96 年 11 月 21 日

接受日期：民國 96 年 11 月 23 日