

台北盆地地下水可再利用量評估

Assessment the Reusing Amount of Groundwater for Taipei Basin

國立成功大學
資源工程研究所
博士生

陳忠偉

Jung-Wei Chen

國立成功大學
資源工程研究所
博士生

謝堯煌

Hsun-Huang Hsieh

國立成功大學
資源工程研究所
教授

李振誥*

Cheng-Haw Lee

摘要

由於全球氣候變遷導致台灣氣候呈現不穩定狀態，2002 年台灣發生罕見之乾旱年，故僅靠地面水供應用水已不敷使用，而台北地區之分配用水更是捉襟見肘，因此適時適量之抽用地下水，不但能減輕地面水有限之水資源需求，更能達到地面水與地下水聯合運用之水環境永續經營目標。

本研究目的為評估台北盆地之地下水可再利用水量，由台北盆地之水文地質資料建構地下水流數值模型，以盆地內地下水位監測資料校正數值模式，使數值模式符合台北盆地含水層物理機制，利用零水位變動法與希爾法推估台北盆地地下水之合適出水量與水位，並列為管理調配方案之限制條件。本研究根據合適出水量與水位限制值、開發區域與乾旱時期水源需求等條件，進行地下水可再利用量與對地下水環境影響進行評估。

由研究成果顯示，以合適出水量與水位為限制條件，台北盆地地下水可再利用量每年約為 $58.69\sim 80.83\times 10^6\text{ m}^3$ 。若地下水位限制僅針對基隆河、新店溪與大漢溪等七個分區進行開發，評估其地下水可再利用水量每年約為 $15.66\sim 27.82\times 10^6\text{ m}^3$ ，且其最大水位洩降約 0.17 m，對地下水位影響不大。若考慮農業用水大都位於大漢溪流域，若於乾旱期間將農業用水提撥為民生與工業用水，初始之農業用水需求則可由樹林鎮與土城市之地下水支援每年約 $5.54\sim 7.61\times 10^6\text{ m}^3$ 。

關鍵詞：地表與地下水聯合運用，合適出水量，合適水位，乾旱時期。

ABSTRACT

Due to the changes of the global climate, it causes the weather in Taiwan become

*通訊作者，國立成功大學資源工程研究所教授，70101 台南市東區大學路 1 號，Leech@mail.ncku.edu.tw

unstable. In 2002, the weather was very droughty, causing the surface water become insufficient for Taipei area. However, if the groundwater can be suitably used, it can not only reduce the need of surface water, but can also jointly use the surface water and groundwater to reach the objective of sustainable operation of water environment.

This objective of this research is to evaluate the reusing water amount of the groundwater in Taipei basin. Initially, the numerical model of groundwater flow was constructed based on the hydrogeologic data of Taipei basin. Secondly, the monitoring data of groundwater level was adopted to correct the above numerical model in order to accord the numerical model with the physics mechanism of aquifer in Taipei basin. Both the zero groundwater change method and Hill method were used to evaluate the suitability yield and suitability groundwater level. In this study, the conditions of suitability yield, suitability groundwater level, exploitation area and the need for water in droughty period were considered to evaluate the reusing amount and environmental influence of groundwater.

The research results showed that, under the restricted condition of suitability yield and suitability groundwater level, the reusing amount of groundwater is about $58.69\sim 80.83\times 10^6\text{ m}^3$ per year. However, if the restricted condition is only for Keelung River, Sindian River and Dahan River, the reusing amount of groundwater is about $15.66\sim 27.82\times 10^6\text{ m}^3$ per year. Also, the maximum drawdown of groundwater level was evaluated to be 0.17 m, which has only a minor influence to groundwater level. Moreover, if we considered that the agricultural water was located at the Dahan River basin, the agricultural water can be transformed to be the civil and industrial water. The original agricultural water can be supply by the groundwater of Shulin town and Tucheng city, which is about $5.54\sim 7.61\times 10^6\text{ m}^3$ per year.

Keywords: Jointly use the surface water and groundwater, Suitability yield, Suitability groundwater level, Droughty period.

一、前言

近年來全球氣候發生變遷，台灣的氣候也呈現不穩定的狀態，發生乾旱年的機率大增(汪中和, 2005)，僅靠地面水最佳營運管理已不敷使用。2002年台灣發生罕見之乾旱，台北地區之分配用水更是捉襟見肘，因此適時適量之抽取利用地下水資源，不但能減輕地面水有限之水資源，更能達到地面水與地下水聯合營運之永續經營目標。

本研究為評估台北盆地之地下水可再利用水量，首先由台北盆地之水文地質與地層鑽探資料建構地下水流數值模型，利用地下水位監測資

料校正數值模型，使數值模式符合台北盆地含水層機制，由零水位變動法與希爾法(Hill method)推估模式網格之地下水合適出水量與地下水位，並列為管理調配方案之限制條件。本研究根據相異出水量與水位限制值、開發區域與抗旱水源需求提出 A、B 與 C 等三個方案，探討各方案之地下水可供管理與調配水量。

本研究之地下水管理調配概念模型為運用響應矩陣法(Method of Response Matrix)，結合線性規劃模式求取最佳解，利用此方法進行地下水資源管理分析為 Wattenbarger (1970)及 Deninger (1970)首先提出。Willis (1979)和 Atwood and Gorelick (1985)利用響應矩陣法地下水傳輸模式

簡化為線性，再以線性規劃求得最佳之抽水量及井位分佈。Lemoine *et al.* (1986)利用響應矩陣法，能有效的將地下水模擬與地區農業管理模型做結合。Peralta *et al.* (1991)同時以嵌入法和響應矩陣法進行最大穩態地下水出水量推估，研究成果顯示響應矩陣較佳。陳愛光等(1991)驗證嵌入法及響應矩陣法之計算，顯示兩者計算結果大致相同，僅有計算誤差上之差異。

Talahashi (1995)針對美國猶他州 Great Salt Lake 進行地下水流模擬，模擬湖泊開發水源之情形，運用線性最佳化為方案管理依據。Ting (1997)和 Gong (2000)等人應用 MODFLOW 模擬區域地下水流數值模式，於含水層中進行線性最佳化管理。劉俊達(1998)和李振誥(2000)等人針對濁水溪沖積扇進行多層含水層之地下水調配管理研究，提出最適合濁水溪沖積扇多層地下水調配管理方案。Psilovikos (1999)分別針對希臘北部盆地採用線性規劃法與混合整數規劃法進行地下水最佳化管理，研究結果顯示，當考慮水位限制及抽補水之分布時，提出線性規劃法優於混合整數規劃法。Sophocleous (2000)以 Kansas 為研究區域，利用 MODFLOW 建構地下水流數值模式，利用不同抽水方案結合地面分區配水機制，改善地面水源不足之問題。

丁澈士(2003)運用 MODFLOW 與 MODMAN，針對屏東平原林邊溪流域人工湖之入滲補注行為，進行線性規劃與管理，管理後成果可有效增加入滲補注量與提高水資源可調配量。Theodossiou (2004)利用地下水流管理模型，將地面抽水區域劃分，可降低地下水開發之操作成本。鄭遠等人(2004)以地下水連續性方程式結合地面灌溉用水圳道配置，以地下水出水量與水位洩降為限制條件，利用 MODMAN 產生響應矩與 LINDO 線性規劃軟體進行最佳解推求，評估屏東隘寮圳灌區之最大允許抽水量。Nguyen *et al.* (2006)針對日本 Shiroishi 城市，應用地下水流數值模型及蒐集地層下陷區之用水情形，考慮地質條件並建構地面與地下水聯合調配運用模式，可有效減緩地層下陷速率。本研究為管理大區域或多時段的地下水資源管理問題，響應矩陣法相形

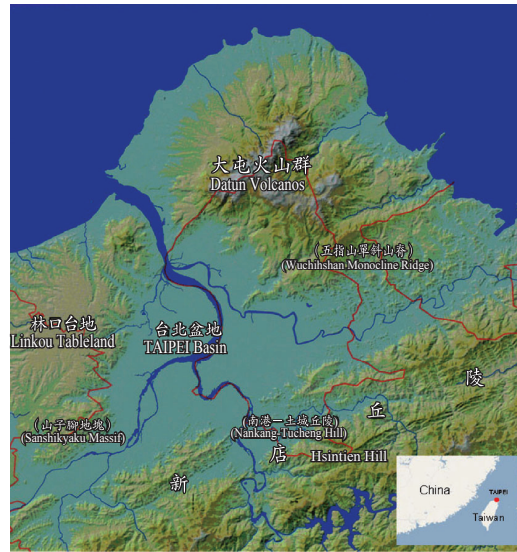


圖1 台北盆地與周圍地形區之關係(林朝宗, 2001)

之下較嵌入法具優越性，故本研究以響應矩陣法進行台北盆地抗旱時期地下水可再利用水量之管理與調配。

二、研究範圍介紹與數值模式建立

淡水河流域主體略呈一等邊三角形，三角形的三個角分別為北投(北)、南港(東)、樹林與土城(西南)，基隆河、新店溪與大漢溪分別自南港、公館、樹林等地注入淡水河流域，會合成淡水河後流向西北，經關渡水口出盆地注入台灣海峽。盆地之邊緣為丘陵、台地所圍繞，盆地表面平坦，略向西北傾斜，關渡、五股地區最低處約在海平面附近，中和、永和、公館與松山地區則可達海拔 15 至 20m 之間。盆地四週為丘陵及台地所圍繞，依據地形及地質特性可將其區分為東側及南側的新店丘陵，北側的大屯火山群及西側的林口台地，台北盆地與週遭地形之關係圖示於圖 1。

2.1 地下水流數值軟體 MODFLOW、零水位變動法與希爾法(Hill Method)介紹

本研究採用地下水流模擬軟體 PROCESSING MODFLOW 5.3，此套軟體是依據美國地質調查所(U.S.G.S.)之 MODFLOW (McDonald and Harbaugh,

1988)地下水模擬程式再行研發之軟體。MODFLOW 之地下水控制方程式為假設在固定密度下，含水層三維地下水流的流動控制方程式之偏微分式如式(1)。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t}\dots\dots\dots(1)$$

其中 K_{xx} 、 K_{yy} 和 K_{zz} 為分別為沿著 x 、 y 、 z 方向上的透水係數[L^T]; h : 水頭[L]; W : 地下水之流入或流出單位體積流通量[T⁻¹]; S_s : 比貯水率[L⁻¹]; t : 時間[T]。由式(1)結合有限差分法、反向差分法及迭代運算技巧,可推算得 MODFLOW 模擬地下水流之基本控制方程式之解。本研究將利用 MODFLOW 地下水流數值軟體,建構台北盆地之數值模型,配合零水位變動法與希爾法推估安全出水量與安全水位。

零水位變動法為在某一時間內,若開始的地下水位與終止時的地下水位相等,則不論在此時期內的水位變化過程為何,均可表示在此一時間內總抽出量與總補給量相等,本研究以起始及終止時間之水位變化為零時,求取該各網格單元之抽(補)地下水量。

希爾法為假設水井之地下水位年變化量與年抽水量有密切關係,如此區域內之補給水量相當穩定,則其平均年地下水位變化與年抽水量將呈線性變化關係,由直線上可求得該單元之水位年平均變化為零時,所對應的抽水量即為安全出水量。

2.2 水文地質概念模式建立

本研究主要為依據陳忠偉(2007)建構之數值模式,研究範圍為台北地區高程為 15m 以下地區,高程 15m 以上則視為山區,河川中上游地區則以側向補注量進行反向推估,模式建構過程與推估成果如下:

2.2.1 水文地質概念分層

綜整台北盆地鑽探資料繪製之地質剖面圖與岩性,分析其水文地質概況及地下水位紀錄,

本研究參考吳偉特(1979)及賈儀平(1999)對台北地區水文地質架構之研究,將本研究區域岩盤上方固結沉積物區分出兩個區域性之水文地質單元,分別為深處的礫石及砂質沉積物,構成本研究區域之主要含水層並視為拘限含水層,而其上方則覆蓋著一個以泥質沉積物為主的低透性含水層,視為非拘限含水層。

2.2.2 數值模式之邊界範圍、邊界條件與格網劃分
淡水河流域四週為丘陵及台地所圍繞,依據地形及地質特性可將其區分為東側及南側的新店丘陵,北側的大屯火山群及西側的林口台地,河川水系依順時針方向依序為基隆河、新店溪與大漢溪,為三主要支流匯集入淡水河內流經台北地區。

本研究區域面積約為 240 平方公里,研究範圍除淡水河出海口外,並無其他明顯之自然邊界,因此本研究於兩含水層之邊界設定皆為:(1)定水頭邊界:淡水河出海口處,(2)流量邊界(山區補注):東側、南側之新店丘陵,北側大屯火山群及西側林口台地,由蒐集資料所評估之補注量,分配至補注邊界,(3)變動水頭邊界(上游集水區補注):基隆河、新店溪與大漢溪三支流匯集口,其設定值為河川水位。

網格元素之劃分設定為東西方向分為 25 行,南北方向分為 30 列,採用 1000 m 等間距的網格元素。為邊界之設定,將盆地範圍往外擴增一格,含水層之作用網格為 360 格,研究區之網格元素劃分、邊界條件與範圍示於圖 2。

2.2.3 MODFLOW 數值模式之水文地質參數建置

MODFLOW 數值模式所需輸入水文地質資料分述以下:

(1) 水文地質參數

本研究的數值模擬為非穩態,故考慮水文地質參數應包括水平透水係數,貯水係數及垂向透水滲漏係數。歐晉德等(1983)提出地下水觀測井之相關試驗報告,台北地區非拘限含水層之透水係數約在 0.5×10^{-6} 至 6×10^{-6} m/s 之間。邵明忱(1995)指出拘限含水層之導水係數約在 0.12 至 0.18 m²/s 之間。由於透水係數與貯水係數的資料非常缺

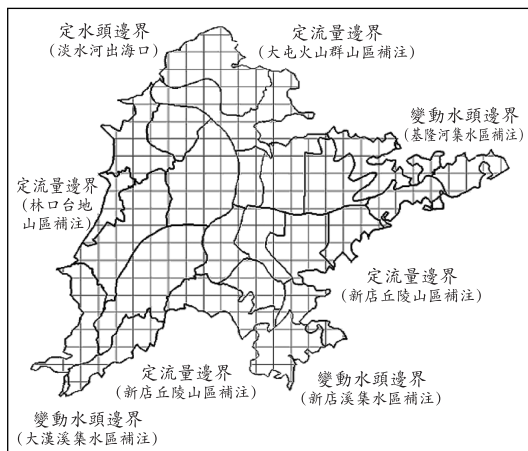


圖 2 台北盆地地下水數值模擬之網格元素與邊界條件示意圖

乏，而各分層間之資料更是寥寥可數，在資料輸入上相對困難，因此本研究引用 Chen and Lee (2006)採用類神經網路法，推估台北盆地之透水係數與貯水係數等水文地質參數值為數值模式之初始設定。

(2) 初始水位值

初始水頭值乃是根據於台北地區地下水觀測網水位觀測井及公民營抽水井之各月的水位記錄，本研究選用紀錄資料較完整之 2000 年 12 月之觀測水位作為模式之初始水位值。此水位亦視為安全出水量之初始水位標準，故本研究後續將利用零水位變化法與希爾法所推估之安全水量稱為合適出水量，將合適出水量帶回數值模式所反應之地下水位值則稱為合適水位。

(3) 地下水開發

由於台北地區自地下水管制後，尤其於標高 15m 範圍以下之區域，除靠近溫泉開發地區外，近年來已禁止抽取地下水，因此模式首先設定為無人為抽水，部分抽用水量地區可藉由模式率定時進行部分調整，以達到模式與現場情形之驗證。

(4) 地下水補注量

台北地區主要含水層的地下水補注區是在新店溪、大漢溪的中游地區，而基隆河則因坡降較緩，在汐止以西的基盤上方皆為泥層，阻滯了

河水或雨水的下滲，難以補注含水層，經由台北地區周圍山區、丘陵及台地深處岩層流向含水層的地下水則為次要補注源。能邦科技顧問公司(2000)由土地利用與土壤質地資料推估之各區塊飽和入滲率及降雨入滲係數，依入滲補注量估算公式估計出台北地區豐、平與枯水年之地下水垂向入滲補注量。若飽和入滲率以陳尚、李德茲現場試驗之建議值估算，豐、平與枯水年之垂向年入滲補注量分別為 0.66×10^9 、 0.51×10^9 與 $0.45 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。若飽和入滲率以大陸水利電力部之建議值估算，則豐、平、枯年之垂向年入滲補注量分別為 0.65×10^9 、 0.50×10^9 與 $0.44 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。李振誥等人(2002)對台北地區補注量之研究，分析基隆河、新店溪與大漢溪等三上游支流對台北地區地下水補注之貢獻量，推估其年補注量約 $1.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

綜合以上補注量推估資料顯示，能邦科技顧問公司(2000)僅依據飽和入滲率及降雨入滲係數推估台北地區之地下水垂向入滲補注量，並未推估台北地區之山區側向補注量。由於台北盆地內幾乎為建築覆蓋，天然降雨量幾乎被地表或建築物截流，透過地表逕流和建築物排水系統，直接匯入河流或海中，推估台北盆地之垂向補注量極小，故台北盆地之地下水補注量大都為側向補注，因此本研究之地下水側向補注量為參考李振誥等人(2002)，利用河川基流資料推估地下水補注量，分配至本數值模式周圍之網格，作為模式之初始補注量，各區域側向補注量則利用觀測地下水水位資料，於模式率定時再進行調整。

2.2.4 數值模式之率定與驗證

在將模式所需資料之初估值輸入而進行數值模擬後，接下來的工作便是要率定所建立模式架構的正確性。率定的目的即在確定資料收集中所描述的水文地質架構及求出模式最佳的水力參數。關於模式率定的原理，乃是將某一已知典型時段相關的水文地質資料輸入模式中，爾後調整可能影響模式的任一參數或是資料檔，直至輸出值能夠反應實際的現地狀況為止，以 MODFLOW 輸出結果來說，就是所模擬出來的計算水位應與同時期所觀測到的水位一致才是。

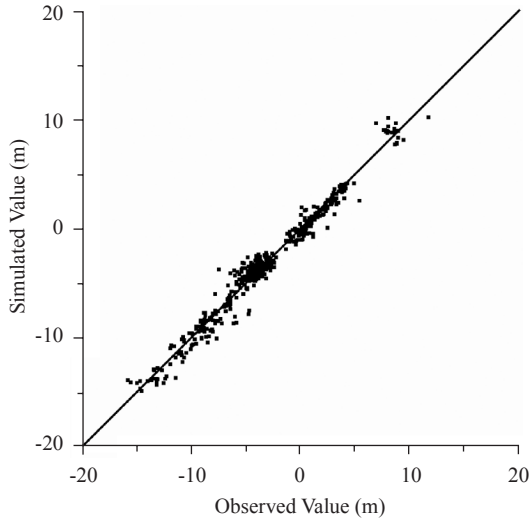


圖 3 台北盆地地下水觀測與數值模擬值擬合情況

本研究於試誤法中為便於率定工作的進行，採用平均誤差(Mean Deviation)來判斷模擬結果的正確性。

本研究模擬時段為自 2001 年 1 月至 2003 年 12 月止，以一個月為一模擬時段，共模擬 36 個時間段。模式的率定主要為穩態狀態(Steady State)與動態狀態(Transient State)。所謂的穩態狀態率定乃是指模擬含水層系統長期平均趨於穩定的狀態，此時地下水控制方程式中地下水頭變化可忽略，故水頭可視為不隨時間變化。本研究中，此階段需率定的因素有：含水層厚度、透水係數及滲漏係數。

動態狀態的率定過程中，地下水位除受空間位置影響外，短時期內亦會隨時間而變化，故主要針對抽補水量參數，而在穩定狀態下已確定的參數便不做調整。整個率定過程隨時間變化，地下水抽補量之值將隨雨季及乾季進行調整與率定。本研究數值模式率定首先利用美國地質調查所(U.S.G.S.)所發展的 UCODE 參數優選模式，針對透水係數、抽補量等參數進行第一階段率定，爾後再進行第二階段之人工率定，使模擬與觀測水位擬合更佳，各觀測井與模擬地下水位率定成果示於圖 3。

2.3 研究區域合適地下水位與合適出水量評估

由 Chen and Lee (2006)曾提出利用類神經網路法與逐步高斯模擬法所推估之水文地質場，分別藉由數值模式與線性規劃之耦合求得合適水位與合適出水量，由希爾法及哈定法求得水位與抽補量變化線性關係式，再以零水位變化法之觀念，設定 2002 年起始時間與終止時間之水位變動量為零，代入線性關係式中即可求得相對應之地下水抽補量。將此抽補量代入數值模式可求得 2002 年之合適水位其耦合推估結果示於表 1。但表 1 中之逐步高斯模擬法所推估之水文地質場所反應之地下水位，與實際觀測地下水位差異性較大，故本研究僅引用由類神經網路法所推估之合適水位與合適出水量，為本研究建立地下水資源管理與調配模式之水位與出水量限制條件。

三、地下水資源管理與調配模式

地下水資源管理模式乃是根據具體的管理問題，應用系統工程學原理所建立的最佳化決策數學模式。地下水資源管理模式其建立的方法是多樣化的，目前所使用的方法是將所建立的地下水水流模擬模式和尋求決策變量最佳值的最佳化模式近行偶合，以構成地下水資源管理模式，地下水資源管理與調配模式示於圖 4。

本研究採用的偶合方法為響應矩陣法，所謂響應矩陣法是以線性系統的迭加原理和地下水位的響應函數為基礎，以矩陣來反映地下水系統本身特徵的一系列係數，表示地下水流系統中地下水位與抽補水量間的關係式，並由地下水流數值模式求得，作為最佳化管理模式之限制條件，以實現模擬模式與最佳化模式之偶合。

3.1 響應函數之建立

在地下水系統中，抽水設為系統的輸入，輸出為地下水的水位，則以式(2)之捲積形式表示：

$$s(x_i, x_j, t) = \int_0^t Q(x_j, \tau) \beta(x_i, x_j, t - \tau) d\tau \dots (2)$$

其中 x_i, x_j 為管理點之位置座標； $Q(x_j, \tau)$ 為 τ 時刻點 x_j 的抽水量； $s(x_i, x_j, t)$ 為 x_j 點以 $Q(x_j, \tau)$ ($0 \leq \tau \leq t$)

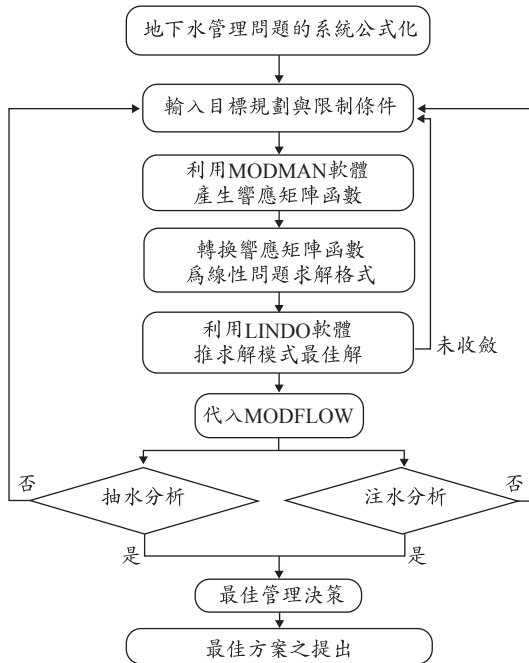


圖 4 地下水管理與調配模式方案建置流程圖

量抽水，至 t 時刻在 x_i 點所引起的水位洩降： $\beta(x_i, x_j, t-\tau)$ 為單位脈衝響應函數，表示 x_j 點在 τ 時刻以某單位流量抽水，亦即施加單位脈衝，在相隔 $t-\tau$ 時間對 x_i 點所產生的水位洩降。式(2)所表示的物理意義為 x_j 點在 τ 時刻抽水對 x_i 點於 t 時刻所產生水位洩降，等於 t 時刻以前 x_j 點抽水對 t 時刻 x_i 點所產生洩降的總和。如果同時有 m 個抽水點則

$$s(x_i, t) = \sum_{j=1}^m \int_0^t Q(x_j, \tau) \beta(x_i, x_j, t-\tau) d\tau \dots (3)$$

Maddock (1972) 將此關係式推廣到具有齊次邊界與初始條件的線性地下水系統的多井與多時段抽水，其離散形式為：

$$s(i, n) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \beta(i, j, n-k+1) Q(j, k) \dots (4)$$

其中 $s(i, n)$ 為管理區內有 m 個抽水井時， n 時段末 ($t = n\Delta t$) 在 k 井的總洩降值； $Q(j, k)$ 為 j 井在 k 時段的抽水量； $\beta(i, j, n-k+1)$ 為單位脈衝響應函數，Maddock 稱為代數技術函數 (Algebraic Technological Function)。式(4)說明在線性地下水

系統中，若有 M 個抽水井共同抽水時，在 n 時段對 i 點產生的水位總洩降值為每個井單獨抽水所產生之洩降的總和。若有 M 個抽水井， N 個抽水時段，針對一個觀測井構成 $M \times N$ 的響應矩陣，若對 L 個觀測井則形成 $M \times N \times L$ 的三維響應矩陣。

3.2 地下水資源管理模式建構

地下水資源管理模式是由目標函數和限制條件兩個主要部份所組成，以建立追求地下水系統最大開發量之管理模式為例，目標函數為使管理期內 N 個規劃階段， M 口抽水井中的地下水最大總開發量：

$$\max Z = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N Q(j, k) \dots (5)$$

限制條件則包含下列幾個考量：

- (1) 每口抽水井中在各管理階段出水能力限制：

$$Q(j, k) \leq Q_0(j, k) \dots (6)$$

- (2) 地下水總開發量指標限制(資源限制)：

$$\sum_{j=1}^M Q(j, k) \geq Q_T(k) \dots (7)$$

- (3) 水位洩降極限限制：

$$s(i, k) \leq s_0(i, k) \dots (8)$$

- (4) 地下水流狀態限制，為表示地下水系統內水位與水量之間關係的狀態方程式，這一限制可透過響應矩陣所聯繫的抽水量與地下水位洩降關係式來實現：

$$s(i, k) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N \beta(i, j, n-k+1) Q(j, k) \dots (9)$$

- (5) 非負性限制，表示各決策變量為非負：

$$s(i, k) \geq 0, Q(j, k) \geq 0 \dots (10)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, L; j = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, N$ ； L 為系統中觀測井或節點數目； $Q(j, k)$ 為第 j 口井在第 k 管理階段的抽水量； $s(i, k)$ 為第 i 個觀測井或節點從開始抽水至第 k 階段末的水位洩降值；

表 1 2002 年台北盆地各分區之合適水位與合適出水量表(Chen and Lee, 2006)

分區	以類神經網路法推估參數建模					以逐步高斯模擬法推估參數建模		
	平均水位 (m)	合適水位(m)		合適出水量(百萬噸/年)		平均水位 (m)	合適水位 (m)	合適出水量 (百萬噸/年)
		乾季	濕季	乾季	濕季			
北投區	2.00	0.92	0.68	2.60	2.79	1.43	-2.2	5.09
士林區	1.04	-0.40	-0.61	3.75	3.92	0.24	-3.25	7.54
蘆洲市	-2.36	-2.88	-3.19	0.79	0.87	-3.45	-3.43	1.69
五股鄉	-4.38	-4.87	-5.22	0.93	1.11	-5.19	-4.41	2.12
三重市	-3.36	-3.99	-4.41	2.02	2.34	-4.4	-4.47	4.45
泰山鄉	-6.41	-6.94	-7.36	0.60	0.75	-7.34	-5.5	1.78
新莊市	-6.11	-6.71	-7.18	1.97	2.40	-6.47	-4.9	6.08
板橋市	-4.92	-5.59	-6.06	2.54	3.01	-5.59	-4.94	5.81
樹林鎮	-1.20	-2.10	-2.60	1.72	1.84	-1.74	-4.96	4.06
土城市	1.55	0.70	0.20	1.92	2.13	1.06	-4.9	2.52
大同區	-3.49	-4.13	-4.56	0.72	0.85	-4.14	-4.49	1.82
中山區	-2.63	-3.23	-3.63	1.04	1.20	-1.57	-4.26	1.61
松山區	-4.53	-5.20	-5.65	1.15	1.33	-3.64	-4.16	1.83
萬華區	-4.00	-4.61	-5.08	1.05	1.29	-4.82	-4.88	2.61
中正區	-3.26	-3.92	-4.38	1.13	1.32	-2.85	-4.8	2.67
大安區	-2.36	-3.06	-3.58	1.32	1.61	-4.06	-4.59	3.02
中和市	-3.03	-3.67	-4.15	1.22	1.49	-0.35	-4.91	3.18
永和區	0.05	-0.68	-1.22	0.70	0.84	0.38	-4.85	1.56
文山區	2.85	1.08	-0.56	2.02	2.70	0.37	-3.67	5.16
新店市	4.72	3.07	1.56	3.77	5.00	3.09	-4.83	9.66
內湖區	-5.12	-5.78	-6.23	1.13	1.31	-7.61	-4.19	2.94
汐止市	-0.77	-1.83	-2.41	1.62	1.73	-0.18	-4.32	4.23
南港區	-7.49	-8.15	-8.62	0.89	1.05	-5.6	-4.39	2.08
信義區	-4.92	-5.63	-6.13	1.08	1.28	-5.91	-4.35	2.57
總計	-	-	-	81.83	-	-	-	86.08

位洩降量以推估其地下水可再開發量。其二是水位洩降值不得低於含水層底部。其三為水位洩降值不得使現有水井乾涸。

根據疊加的原理，管理區內任一點、某一時刻的水位洩降值 s_i 等於各管理亞區之格網元素 j 於同一時段以 \bar{Q}_j 量抽水在控制點 i 點所引起水位洩降值的疊加。則

$$s_i = \sum_{j=1}^m \beta_{i,j} Q_j \quad ; \quad i=1,2,\dots,251 \dots\dots\dots(15)$$

而利用式(15)將各格網元素所形成之水位洩降值改以響應矩陣和抽水量來轉換，以矩陣形式則可表示為

$$[S]=[A][Q] \quad \dots\dots\dots(16)$$

故水位的限制可示為：

$$[A][Q] \leq [S_{\max}] \quad \dots\dots\dots(17)$$

其中[A]： 某管理期的水位響應矩陣

[Q]： 某管理期各分區區之格網元素地下水開發量之矩陣

[S_{\max}]： 某管理期各控制點水位洩降極限值之矩陣

本方案中先針對不同含水層給定不同最大水位洩降值設定，初始設定值假設方案 A1 至 A5 分別為全面洩降 1、1.5、2、2.5 與 3 m 時可再開發地下水量，故方案 A1 之各分區水位洩降限制值均在 1 m 以下。

(2) 各抽水單元欲增加開發量之限制：由於本方案乃是基於原本開發狀況下再增加開發量，故對原有抽水單元的開發量作合理限制。本研究以表 1 推估各分區之合適出水量為開發限制，由表 1 中顯示所有單元之最大可再增加開發總量限制為 $81.83 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 。

表 2 方案 A 之各方案目標函數及限制式

	方案 A1	方案 A2	方案 A3	方案 A4	方案 A5
目標函數	$\max \bar{Q} = \sum_{j=1}^{215} \bar{Q}_{1j}$	$\max \bar{Q} = \sum_{j=1}^{215} \bar{Q}_{1j}$	$\max \bar{Q} = \sum_{j=1}^{215} \bar{Q}_{1j}$	$\max \bar{Q} = \sum_{j=1}^{215} \bar{Q}_{1j}$	$\max \bar{Q} = \sum_{j=1}^{215} \bar{Q}_{1j}$
限制式	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$ $\bar{Q}_j \leq \min Q_j$ $Q_j \geq 0$	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$ $\bar{Q}_j \leq \min Q_j$ $Q_j \geq 0$	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$ $\bar{Q}_j \leq \min Q_j$ $Q_j \geq 0$	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$ $\bar{Q}_j \leq \min Q_j$ $Q_j \geq 0$	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$ $\bar{Q}_j \leq \min Q_j$ $Q_j \geq 0$
輸入值	水位洩降限制： $S_{\max} \leq 1m$	水位洩降限制： $S_{\max} \leq 1.5m$	水位洩降限制： $S_{\max} \leq 2m$	水位洩降限制： $S_{\max} \leq 2.5m$	水位洩降限制： $S_{\max} \leq 3m$
	增加開採之抽水限制：依 24 分區之合適出水量為開採限制條件。	增加開採之抽水限制：依 24 分區之合適出水量為開採限制條件。	增加開採之抽水限制：依 24 分區之合適出水量為開採限制條件。	增加開採之抽水限制：依 24 分區之合適出水量為開採限制條件。	增加開採之抽水限制：依 24 分區之合適出水量為開採限制條件。

(3) 非負限制。

$$\bar{Q}_j \geq 0 \quad \dots\dots\dots(18)$$

以上方案 A 之目標函數及限制式示於表 2。由方案 A 各分區可再增加抽水量示於表 3，各分區之地下水位洩降值示於表 4。由方案 A1 至 A5 設定其不同地下水位限制值，並限制在合適出水量之條件下，評估各地區地下水可再開發水量。由表 3 中顯示，除新店市與文山區未達限制條件外，其餘分區大多於水位洩降 1.5 m 後受限而無法持續開發，故若研究區域內全面開發地下水，其水位洩降需控制於 1 至 1.5 m 以內。

4.2 方案 B：主要補注區之地下水可再利用量評估

由陳忠偉與李振誥(2008)所建立之數值模式中顯示，由基隆河、新店溪與大漢溪流入台北地區之邊界分區有大量之側向地下水補注匯入，故本研究提出方案 B 為假設僅由汐止市、南港區與內湖區(基隆河)、文山區與新店市(新店溪)和土城市與樹林鎮(大漢溪)等 7 個分區，進行地下水可再利用量推估。

本方案 B 之目標函數與方案 A 相同，水位限制則僅針對汐止市、南港區、內湖區、文山區、新店市、土城市與樹林鎮等 7 個分區進行管理，水位限制值與方案 A 相同。方案 B1 至 B5 方案之目標函數及限制式示於表 5。

表 3 方案 A 中各分區地下水可再開採量

分區	(百萬噸/年)				
	方案 A1	方案 A2	方案 A3	方案 A4	方案 A5
北投區	4.08	5.39	5.39	5.39	5.39
士林區	4.65	6.97	7.67	7.67	7.67
蘆洲市	0.87	1.66	1.66	1.66	1.66
五股鄉	1.11	2.04	2.04	2.04	2.04
三重市	4.15	4.36	4.36	4.36	4.36
泰山鄉	0.95	1.35	1.35	1.35	1.35
新莊市	4.08	4.37	4.37	4.37	4.37
板橋市	4.87	5.55	5.55	5.55	5.55
樹林鎮	2.54	3.56	3.56	3.56	3.56
土城市	3.00	4.05	4.05	4.05	4.05
大同區	1.47	1.57	1.57	1.57	1.57
中山區	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24
松山區	2.21	2.48	2.48	2.48	2.48
萬華區	2.17	2.34	2.34	2.34	2.34
中正區	2.19	2.45	2.45	2.45	2.45
大安區	2.40	2.93	2.93	2.93	2.93
中和市	2.42	2.71	2.71	2.71	2.71
永和區	1.21	1.54	1.54	1.54	1.54
文山區	1.38	2.08	2.77	3.46	4.15
新店市	2.78	4.16	5.55	6.94	8.33
內湖區	2.20	2.44	2.44	2.44	2.44
汐止市	2.04	3.06	3.35	3.35	3.35
南港區	1.72	1.94	1.94	1.94	1.94
信義區	1.95	2.36	2.36	2.36	2.36
總計	58.69	73.61	76.67	78.75	80.83

表 4 方案 A 各分區之水位洩降值

(單位：m)

分區	方案 A1	方案 A2	方案 A3	方案 A4	方案 A5
北投區	1.00	1.32	1.32	1.32	1.32
士林區	1.00	1.50	1.65	1.65	1.65
蘆洲市	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
五股鄉	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
三重市	1.00	1.05	1.05	1.05	1.05
泰山鄉	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
新莊市	1.00	1.07	1.07	1.07	1.07
板橋市	1.00	1.14	1.14	1.14	1.14
樹林鎮	1.00	1.40	1.40	1.40	1.40
土城市	1.00	1.35	1.35	1.35	1.35
大同區	1.00	1.07	1.07	1.07	1.07
中山區	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
松山區	1.00	1.12	1.12	1.12	1.12
萬華區	1.00	1.08	1.08	1.08	1.08
中正區	1.00	1.12	1.12	1.12	1.12
大安區	1.00	1.22	1.22	1.22	1.22
中和市	1.00	1.12	1.12	1.12	1.12
永和區	1.00	1.27	1.27	1.27	1.27
文山區	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
新店市	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
內湖區	1.00	1.11	1.11	1.11	1.11
汐止市	1.00	1.50	1.64	1.64	1.64
南港區	1.00	1.13	1.13	1.13	1.13
信義區	1.00	1.21	1.21	1.21	1.21

表 5 方案 B 之各方案目標函數及限制式

	方案 B1	方案 B2	方案 B3	方案 B4	方案 B5
目標函數	$\max \bar{Q} = \sum_{j=1}^{67} \bar{Q}_{1j}$	$\max \bar{Q} = \sum_{j=1}^{67} \bar{Q}_{1j}$	$\max \bar{Q} = \sum_{j=1}^{67} \bar{Q}_{1j}$	$\max \bar{Q} = \sum_{j=1}^{67} \bar{Q}_{1j}$	$\max \bar{Q} = \sum_{j=1}^{67} \bar{Q}_{1j}$
限制式	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$ $\bar{Q}_j \leq \min Q_j$ $Q_j \geq 0$	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$ $\bar{Q}_j \leq \min Q_j$ $Q_j \geq 0$	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$ $\bar{Q}_j \leq \min Q_j$ $Q_j \geq 0$	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$ $\bar{Q}_j \leq \min Q_j$ $Q_j \geq 0$	$[A][Q] \leq [S_{\max}]$ $\bar{Q}_j \leq \min Q_j$ $Q_j \geq 0$
輸入值	水位洩降值限制： $S_{\max} \leq 1m$	水位洩降值限制： $S_{\max} \leq 1.5m$	水位洩降值限制： $S_{\max} \leq 2m$	水位洩降值限制： $S_{\max} \leq 2.5m$	水位洩降值限制： $S_{\max} \leq 3m$
	增加開採之抽水限制： 汐止市：3.35 百萬噸/年 南港區：2.44 百萬噸/年 內湖區：1.94 百萬噸/年 文山區：4.72 百萬噸/年 新店市：8.77 百萬噸/年 土城市：3.56 百萬噸/年 樹林鎮：4.05 百萬噸/年	增加開採之抽水限制： 汐止市：3.35 百萬噸/年 南港區：2.44 百萬噸/年 內湖區：1.94 百萬噸/年 文山區：4.72 百萬噸/年 新店市：8.77 百萬噸/年 土城市：3.56 百萬噸/年 樹林鎮：4.05 百萬噸/年	增加開採之抽水限制： 汐止市：3.35 百萬噸/年 南港區：2.44 百萬噸/年 內湖區：1.94 百萬噸/年 文山區：4.72 百萬噸/年 新店市：8.77 百萬噸/年 土城市：3.56 百萬噸/年 樹林鎮：4.05 百萬噸/年	增加開採之抽水限制： 汐止市：3.35 百萬噸/年 南港區：2.44 百萬噸/年 內湖區：1.94 百萬噸/年 文山區：4.72 百萬噸/年 新店市：8.77 百萬噸/年 土城市：3.56 百萬噸/年 樹林鎮：4.05 百萬噸/年	增加開採之抽水限制： 汐止市：3.35 百萬噸/年 南港區：2.44 百萬噸/年 內湖區：1.94 百萬噸/年 文山區：4.72 百萬噸/年 新店市：8.77 百萬噸/年 土城市：3.56 百萬噸/年 樹林鎮：4.05 百萬噸/年

表 6 方案 B 中各分區可增加抽水量

(百萬噸/年)

分區	方案 B1	方案 B2	方案 B3	方案 B4	方案 B5
樹林鎮	2.54	3.56	3.56	3.56	3.56
土城市	3.00	4.05	4.05	4.05	4.05
文山區	1.38	2.08	2.77	3.46	4.15
新店市	2.78	4.16	5.55	6.94	8.33
內湖區	2.20	2.44	2.44	2.44	2.44
汐止市	2.04	3.06	3.35	3.35	3.35
南港區	1.72	1.94	1.94	1.94	1.94
總計	15.66	21.29	23.66	25.74	27.82

表 7 方案 B 抽水方案各分區之水位洩降值

(單位：m)

分區	方案 B1	方案 B2	方案 B3	方案 B4	方案 B5
北投區	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
士林區	0.005	0.006	0.006	0.006	0.006
蘆洲市	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007
五股鄉	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
三重市	0.005	0.006	0.006	0.006	0.006
泰山鄉	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005
新莊市	0.005	0.007	0.007	0.007	0.007
板橋市	0.006	0.009	0.009	0.009	0.009
樹林鎮	0.057	0.080	0.080	0.080	0.080
土城市	0.053	0.071	0.071	0.071	0.071
大同區	0.016	0.018	0.018	0.018	0.018
中山區	0.015	0.019	0.019	0.019	0.019
松山區	0.001	0.011	0.011	0.011	0.011
萬華區	0.008	0.010	0.010	0.010	0.010
中正區	0.010	0.013	0.013	0.013	0.013
大安區	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
中和市	0.003	0.004	0.006	0.007	0.010
永和區	0.004	0.006	0.008	0.010	0.014
文山區	0.006	0.008	0.011	0.014	0.019
新店市	0.055	0.082	0.110	0.137	0.174
內湖區	0.011	0.012	0.012	0.012	0.012
汐止市	0.051	0.076	0.083	0.083	0.083
南港區	0.068	0.076	0.076	0.076	0.076
信義區	0.013	0.014	0.014	0.014	0.014

B1 至 B5 方案中各分區可再增加地下水利用量示於表 6，由表 6 中顯示，方案 B1 至 B5 評估之地下水可再利用量約為 $15.66\sim 27.82\times 10^6\text{ m}^3/\text{year}$ 。

表 7 為 7 個分區進行水量開發後影響，由研究成果顯示，方案 B 對開發區域地下水位影響較大，其最大地下水位洩降約增加 0.17 m，其他研究分

區之整體影響並不大。

推估其原因為此 7 個分區為河川匯流處，具充分側向補注水源，故其地下水位影響範圍較小，因此本研究建議，若需進行水源開發時，可由本方案 7 個分區優先進行開發，以免因地下水開發造成台北盆地地層之不良影響。

4.3 方案 C：主要農業灌區地下水可再利用量評估

本研究範圍經查農田水利會引用水源，僅石門水庫灌區引用(陳明業，2002)。故若於乾旱期間將水質較佳之農業用水，調撥至民生與工業用水使用，原農業用水可由樹林鎮與土城市等地區適量取用地下水。

因此針對表 3 中之樹林鎮與土城市地區，其地下水可再利用量推估得樹林鎮地下水位洩降 1 m 時，可增加抽水量約為 $2.54 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ ，洩降大於 1.5 m 時，受合適出水量之限制，可增加最大抽水量約為 $3.56 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 。土城市地下水位洩降 1 m 時，可增加最大抽水量約為 $3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ ，洩降大於 1.5 m 時，受合適出水量之限制，可增加最大抽水量約為 $4.05 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 。總計樹林鎮與土城市等主要農業灌區，其地下水可再利用量約為 $5.54 \sim 7.61 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 之間，可與石門水庫供水進行調配，以增加乾旱時期之水資源可利用量。

五、結果與討論

本研究針對台北盆地地下水可再開發量進行評估，因應區域性之不同需求，分別提出 A、B 與 C 方案。由合適出水量與合適水位為限制條件，推估台北盆地整體地下水可再利用量之方案 A，其地下水可再利用量約為 $58.69 \sim 80.83 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ ，若與李振誥(2003)提出建議之可抽取水量分別為考慮安全水位與地層下陷之最大可抽取之地下水量為每年 $77 \sim 103 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ ，考慮安全水位與土壤液化之最小需抽取水量為 $53 \sim 71 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ ，本研究推估地下水可再開發量介於以上區間，故亦符合土壤壓密與液化安全區間。

方案 B 為地下水位限制僅針對汐止市、南港區、內湖區、文山區、新店市、土城市與樹林鎮

等 7 個分區進行開發，其評估地下水可再利用量約為 $15.66 \sim 27.82 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 之間，其最大水位洩降僅 0.17 m，對地下水位影響不大，可適時提供抗旱時期之緊急替代水源。

方案 C 為考慮農業用水大都位於大漢溪流域，且農業用水佔總用水量之大部分，因此若於乾旱期間需緊急開發水源時，以往由石門水庫提供灌溉之用水，可提撥為需要水質較佳之民生與工業用水，農業用水部分則可由樹林鎮與土城市之地下水可再提供約 $5.54 \sim 7.61 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 。

由於本研究並未考慮台北盆地之地下水質，故僅提供模式評估與規劃之合適地下水出水量，至於再開發水源是否可直接替代地面水源，則需做進一步之探討。本研究雖提出抗旱時期之緊急替代水源方案進行評估，但實際進行地下水源開發時，其輸送成本亦應一併考量，故需與地表供水系統進行連結，以減少開發與輸送源水成本。

本研究針對台北盆地內 24 個分區進行地下水可開發水量評估，但其大多數分區位於台北都會區，於區內進行開發將可能影響某些設施之結構安全，故進行水源開發時應盡量避免於都會區內，因此本研究建議以方案 B 進行地下水源開發。同時因應觀光與休閒產業發展，某些溫泉業者建議進行溫泉區水源開發，而北部地區之溫泉區大都位於北投區，本研究表 3 中已針對北投平原區之地下水可再開發量評估，可提供給相關單位參考。

誌謝

本研究承蒙國科會(NSC 94-2625-Z-006-005-)研究經費補助，使本研究得以順利進行，僅此誌謝。

參考文獻

1. Atwood, D. F., and S. M. Gorelick, 1985, Hydraulic gradient control for groundwater contaminant removal, *Journal of Hydrology*, 76(1-2): 85-106.
2. Chen J. and C. Lee, 2006, Estimation the Ground-

- water Safe Yield of Taipei in Taiwan, 2006 Western Pacific Geophysics Meeting, American Geophysics Union, AGU, Beijing China, pp.107.
3. Deninger, R. A., 1970, System analysis of water supply systems, *Water Resources Bulletin*, 6(4): 573-579.
 4. Don N. C., N. T. M. Hang, H. Araki, H. Yamanishi, and K. Koga, 2006, Groundwater resources management under environmental constraints in Shiroishi of Saga plain, Japan, *Environmental Geology*, 49: 601-609.
 5. Gong Huili, Li Menlou, and Hu Xinli, 2000, Management of groundwater in Zhengzhou City, China, *Water Research*, 34(1): 57-62.
 6. Lemoine, P. H., E. G. Reichard, and I. Remson, 1986, An efficient response matrix method for coupling a groundwater simulator and a regional agricultural management model", *Water Resources Bulletin*, 22(3): 417-423.
 7. McDonald, M. G., and A. W. Harbaugh, 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey, Virginia.
 8. Maddock, T., 1972, Algebraic Technological Function from a Simulation Model", *Water Resources Research*, 8(1): 129-134.
 9. Peralta, R. C., H. Azarmnia, and S. Takahashi, 1991, Embedding and response matrix techniques for maximizing steady-state ground-water extraction: computational comparison, *Ground Water*, 29(3): 357-364.
 10. Psilovikos, A. A., 1999, Optimization models in groundwater management, based on linear and mixed integer programming. An application to a Greek hydrogeological basin, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2): 139-144.
 11. Sophocleous, M., 2000, From safe yield to sustainable development of water resources-the Kansas experience, *Journal of Hydrology*, 235: 27-43.
 12. Talahashi, S., and R. C. Peralta, 1995, Optimal perennial yield planning for complex nonlinear aquifers: methods and examples, *Water Resources*, 18(1): 49-62.
 13. Ting, C. S., 1997, Groundwater Resources Evaluation and Management Studies for Pingtung Plain, Taiwan, PhD thesis, Free University Amsterdam, The Netherlands, ISBN-90-9008794-X.
 14. Theodossiou, N. P., 2004, Application of non-linear simulation and optimization models in groundwater aquifer management, *Water Resources Management*, 18(2): 125-141.
 15. Wills, R. L., 1979, A planning model for the management of groundwater quality, *Water Resources Research*, 15(6): 1305-1312.
 16. Wattenbarger, R. A., 1970, Maximizing seasonal withdrawals from gas storage reservoirs, *Journal of petroleum technology*, 22(8): 948-998.
 17. 丁澈士、黃信恩, 2003, 屏東平原地下水人工補注水資源優化管理之可行性研究-以林邊溪流域為例, 臺灣水利, 第 51 卷, 第 2 期, 第 54-61 頁。
 18. 汪中和, 2005, 全球氣候暖化臺灣永續發展的關鍵議題, 農業世界, 第 262 卷, 第 48-50 頁。
 19. 吳偉特, 1979, 臺北盆地土壤之工程特性, 土木水利, 第 5 卷, 第 4 期, 第 53 - 64 頁。
 20. 李振誥、許清荃、林俶寬, 2000, 濁水溪沖積扇多層地下水調配與管理之研究, 臺灣水利, 第 48 卷, 第 4 期, 第 41-52 頁。
 21. 李振誥、陳尉平、李如晃, 2002, 應用基流資料估計法推估台灣地下水補注量, 臺灣水利, 第 50 卷, 第 1 期, 第 69-80 頁。
 22. 李振誥, 2003, 台北盆地地下水管制區檢討及土壤液化評估(2/2), 經濟部水利署委託計畫。
 23. 邵明忱、黃立煌、馮堯松、劉格非, 1995, 礫石層水理參數探討, 國際卵礫石層地下工程研討會, 台灣台北, 第 4-29~4-38 頁。
 24. 能邦科技顧問公司, 2000, 台灣地區地下水

- 補注量估算，經濟部水資源局。
25. 陳忠偉、李振誥，2008，在環境條件限制下之台北盆地合適出水量推估，台灣公共工程學刊，第3卷，第1期，第153-163頁。
 26. 陳愛光、李慈君、曹劍鋒，1991，地下水資源管理，地質出版社，北京市。
 27. 陳明業，2002，淡水河水資源動力模式與永續管理策略之研究，國立台灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
 28. 賈儀平、張閩翔、劉文煜、賴典章，1999，淡水河流域之水文地質研究，淡水河流域地下地質與工程環境專刊，第393-406頁。
 29. 歐晉德、李延恭、鄭在仁，1983，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，第89-102頁。
 30. 劉俊達、李振誥、許惠悰，1998，彰化地區地下水資源調配與管理之研究，冶，第42卷，第3期，第87-101頁。
 31. 鄭遠、陳美惠、王裕民、李振誥，2003，地面水與地下水灌區水資源聯合運用之研究-以屏東隘寮圳灌區為例，農業工程學報，第49卷，第4期，第73-82頁。

收稿日期：民國 97 年 1 月 10 日

修正日期：民國 97 年 1 月 30 日

接受日期：民國 97 年 2 月 20 日