

台中水資源開發模式建立與應用

劉宏仁

徐年盛

莊啟洪

鄭文明

臺灣大學水工試驗
所助理研究員

臺灣大學土木工程
系兼任教授

傑美工程顧問股份
有限公司資深經理

中興工程顧問股份
有限公司計畫主任

摘 要

台灣地區水資源蘊藏豐沛，地面水資源與地下水資源同時開發利用，且緊密地互相影響，故必須將兩者視為一體，才能對水資源做一個完整考量，故本研究目標在建立並應用水資源開發模式以評估台中地區的水資源開發可行性方案。

本研究採用三維地下水流模擬模式 MODFLOW(Modular three-dimensional groundwater flow model)以及二維河流演算套件 SFR(Stream-Flow-Routing package)建構台中地區水資源模擬模式，律定結果台中地區水資源在抽補平衡狀態下，每年南北邊界地下水流入補注 3.49 億噸、雨水及灌溉入滲補注 4.63 億噸、河道入滲補注 6.03 億噸、河道流失 6.95 億噸、隘口地下水流失 3.49 億噸、抽水量 3.71 億噸，此水文量體與現場調查及水平衡分析結果相近。

以所建立之台中地區水資源模擬模式評估大甲溪南岸水公司水井復抽地下水 3 萬 CMD 方案，若為全年穩定抽水，則水位洩降 1.00 公尺影響範圍僅有神岡和抽水井處，因為該區的地下水上游補注來源較少，所以抽水造成的變化較大，而開發方案對下游主要為影響是減少了隘口出流量 9,506CMD，為原隘口出流量的 1.0%。若僅在 5~9 月豐水期抽水，比起全年抽水的影響小許多，所以若為保守開發，可以先進行豐水期抽水，待操作穩定後再全年抽水。

一、前言

台灣地區水資源豐沛，且大量水資源蓄存於地下水含水層中，地面水資源與地下水資源同時應用，滿足了台灣的水資源需求。近年來由於工業與人口成長，水資源需求成長，但因地面水資源開發不易，所以轉嫁到地下水資源地大量抽用，而地下水又常是河川保育流量的重要來源，所以地面水資源與地下水資源其實是兩者一體，需要做一完整考量，應建立適當之水資源開發模式，並應用於開發方案的影響評估。

目前於屏東平原及濁水溪沖積扇地下水區已提出利用人工湖或滯洪池蓄水，並強化地面水入滲補注地下水，同時增加地面與地下水源。而為了進行水資源開發方案的影響評估，第一步需充分瞭解地面水與地下水系統，並建立具代表性之地面水與地下水模擬模式，以掌握該區域之水文量時空分布。奠基在正確的水資源系統與水文量下，才能正確的透過模式模擬評估該區域之可開發水量及其影響，依據科學化的模式評估結果才能提出合適的開發方案。

本研究以台中地區為研究區域，彙整該區域之水文資料、地質鑽探、地面水與地下水觀測、抽水量與補注量調查分析資料，針對台中地區水資源系統提出地層分層概念模式及水平衡概念模式，用於進行水平衡分析與地下水流數值模擬模式建置，以合理評估台中地區之水資源系統蓄水量、抽水量及補注量之時間與空間分布情形，並對地下含水層及河川底泥層之水文地質參數進行檢定，得到具有代表性的水資源模擬模式。最後應用模式模擬評估台中地區水資源開發方案對系統之影響。

二、台中地區水資源系統概述

本研究以台中地區為研究區域，區域內之地面水系統主要為大甲溪與烏溪，區域內之地下水系統主要為台中盆地，分布如圖1所示。

大甲溪是臺灣中部重要的河川，源流中央尖溪發源於南湖大山東峰，流經梨山、谷關、馬鞍等聚落，流入台中市東勢區、新社區後，逐漸進入平地，後流經大甲區及大安區，最後注入臺灣海峽，流域面積1,235平方公里，居全台第八，幹流長度124.2公里，居全台第五，平均坡度1:60。大甲溪水源豐沛，年逕流量25.21億噸，河床佈滿礫石，透水性佳。大甲溪有一段時期往南流入台中盆地，堆積了廣大的豐原沖積扇，此沖積扇之扇頂在豐原東北方，往南扇面逐漸降低。大甲溪在近期切穿大肚丘陵北緣，於溪口處堆積成大甲溪沖積扇，此沖積扇扇頂區為台中盆地主要之地下水補注區域。

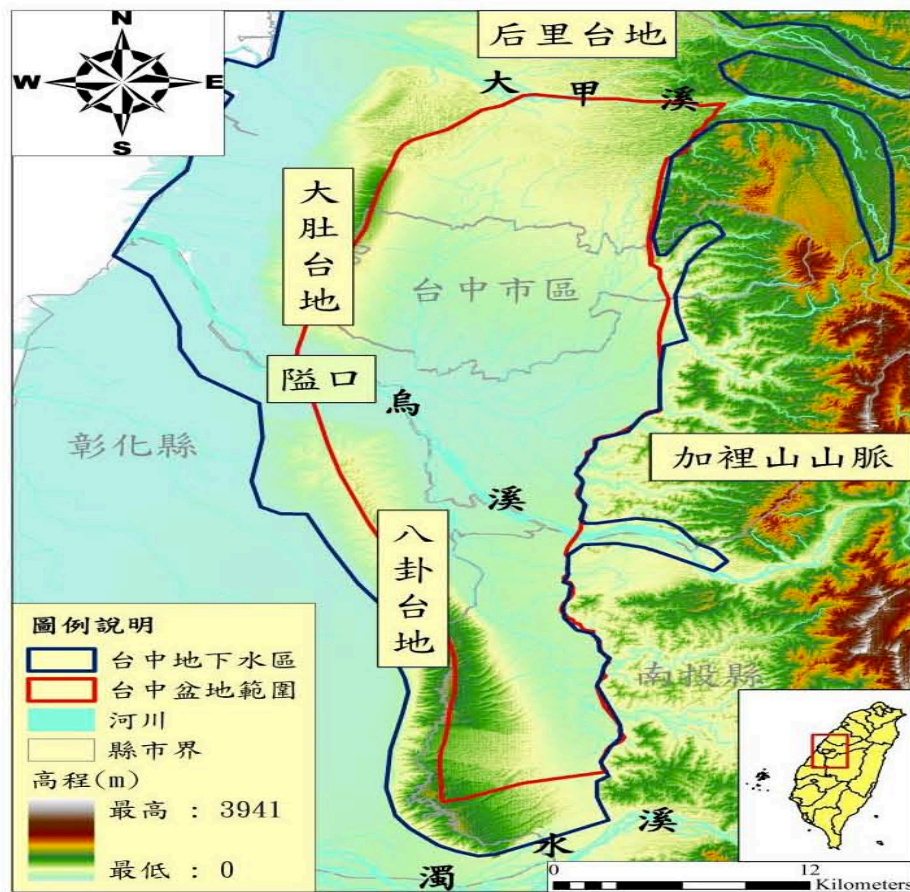


圖1 台中地區水資源系統

烏溪源於中央山脈合歡山西麓，下游河段因流經台中市大肚區，舊稱大肚溪，支流包括筏子溪、大里溪水系與貓羅溪。烏溪主流和支流交匯處，礫石多堆積形成沖積扇，於台中的辮狀流路在北邊形成豐原沖積扇，東邊有太平沖積扇，南有烏溪沖積扇。烏河流域面積 2,025平方公里，居全台第四，幹流長度119.1 公里，居全台第六，平均坡度1:92，年逕流量 35.58 億噸，河床為礫石與砂，下游處有夾雜部分泥土。烏溪於烏溪橋處流入台中盆地，再會合貓羅溪流入烏溪。烏溪亦攜帶大量泥砂，堆積於台中盆地上，形成一範圍相當大之烏溪沖積扇。

台中盆地為介於背斜構造與車籠埔斷層間之地塹，再由近期河川流入的礫石及泥沙淤積所形成之構造盆地。其周圍地形包括北側后里台地、東側加裡山山脈及西側八卦台地和大肚台地等。盆地為近期地殼活動所形成之地形區，東側麓山帶丘陵區為南北走向車籠埔逆斷層所形成，而西側大肚及八卦台地為彰化斷層(含清水斷層)向西逆衝所產生，大肚山及八卦山的背斜構造則是在同時期地殼運動中，由彰化斷層活動所產生之褶曲構造而來。流經台中盆地之河系由北而南主要為大甲溪、烏溪河系，烏溪下游大肚台地及八卦台地之隘口處為地下水主要出口。

台中盆地四周邊界東側以車籠埔斷層為界，西側為大肚山背斜及八卦山背斜，北側為大甲溪，南側為台中盆地與濁水溪沖積扇地下水區之地下水分水嶺，此邊界範圍內即為台中盆地。台中盆地南北長約48公里，東西最寬有17公里，全區面積約549平方公里。台中盆地所包含之行政區域橫跨台中市、彰化縣及南投縣等三個行政區之局部區域，其中台中市包括中區、東區、南區、西區、北區、北屯區、西屯區、南屯區、太平區、大里區、霧峰區、烏日區、豐原區、潭子區、大雅區、神岡區、大肚區、沙鹿區等18區；彰化縣包括彰化市、芬園鄉等2個鄉鎮市；南投縣包括南投市、草屯鎮、名間鄉等3個鄉鎮市，如圖2所示。



圖2 台中盆地行政區域圖

台中盆地之沖積層係以礫石層為主要組成，其中烏溪北側盆地沖積層餘近東側麓山帶處以極粗礫石為主，往西漸為中、細礫石所取代；烏溪南側之盆地沖積層則均以粗礫石為主；至於烏溪沿線之盆地沖積層呈現砂泥互層現象，粒徑變化較大。依中央地質調查所水文地質鑽井之沉積相分析結果，台中盆地環境特徵主要為沖積扇，由北而南可細分為豐原沖積扇、太平沖積扇及烏溪沖積扇等三區。

台中盆地內有水利署自記水位站井15站及普通水位站井6站分布，其水井位置主要環伺於大肚台地、盆地東側及烏溪以北之北盆地中心，相關水井分布如圖3所示，而地質剖面資料則取代表剖面繪製如圖4與圖5。其中台中盆地之東剖面(豐洲-太平-大里-霧峰-草屯-名間)其井深平均在150~220公尺的深度，為一南北連通的厚實地下水層。在豐洲井以古大甲溪沖積扇扇頂礫石為主；南至太平井、大里井為太平沖積扇之礫石層，太平沖積扇規模較小，且受河流碎屑沉積物的影響，在河流與平原交接處有數層細顆粒沉積層，但並未構成阻水效果；盆地中段的霧峰井主要以氾濫平原的細顆粒沉積物與沖積扇礫石交互出現，其細顆粒沉積物經由氬定年及碳十四定年分析，顯示其具有上下阻隔的效果；南段名間井及草屯井則以山間谷地與沖積扇扇頂礫石、粗砂所組成，且表層有一風化土壤層覆蓋。台中盆地西剖面(豐洲-大雅-烏日-草屯)之井深平均在150~220公尺的深度，其北段與南段基本上與東側剖面相似，惟中段大雅井至烏日井地區，顆粒逐漸由礫石粗砂轉變為中細砂層及氾濫平原泥層。本研究即依此水文地質調查結果建立台中地區地下水系統之地質構造概念模式。

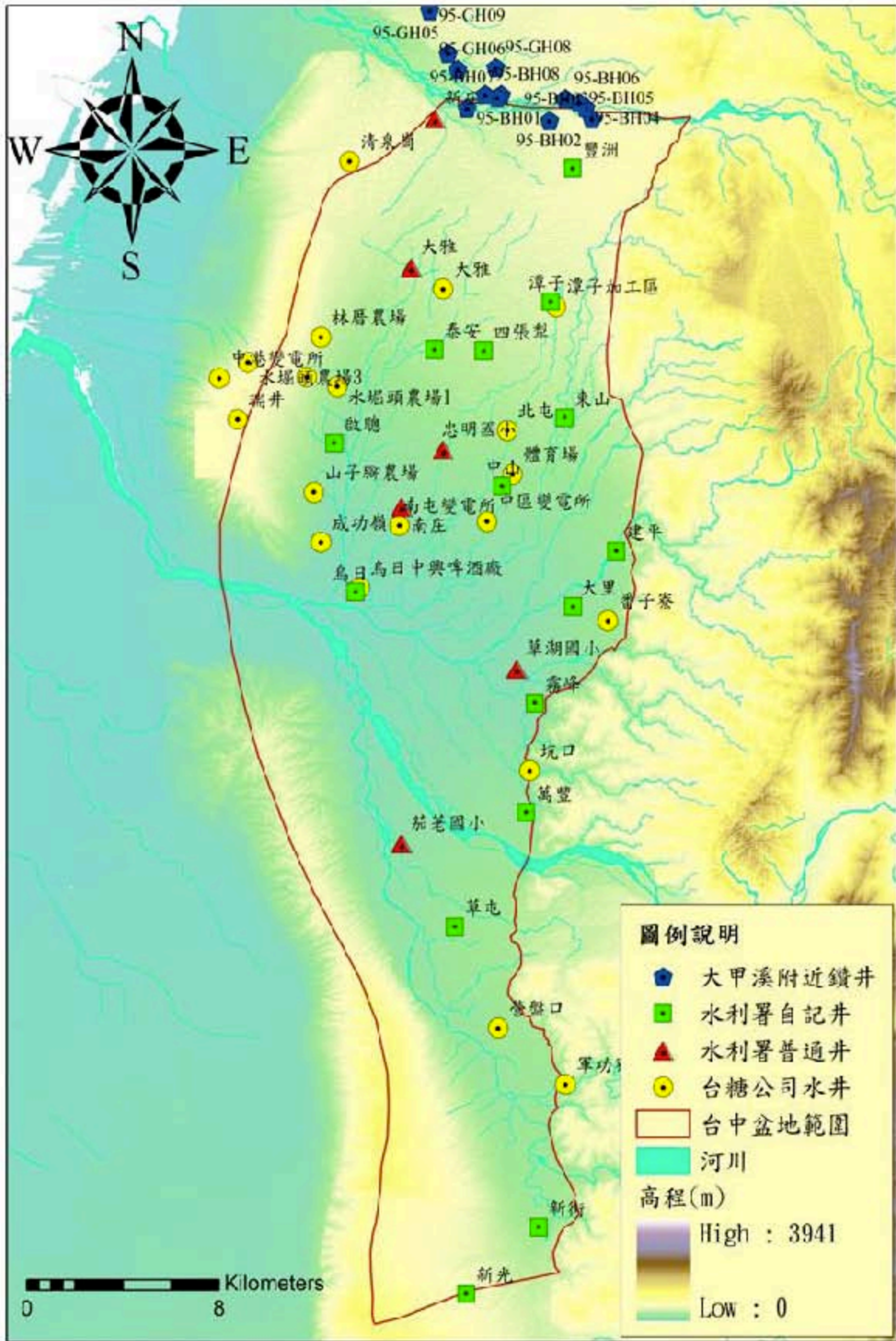


圖3 台中地區地下水觀測井分布圖

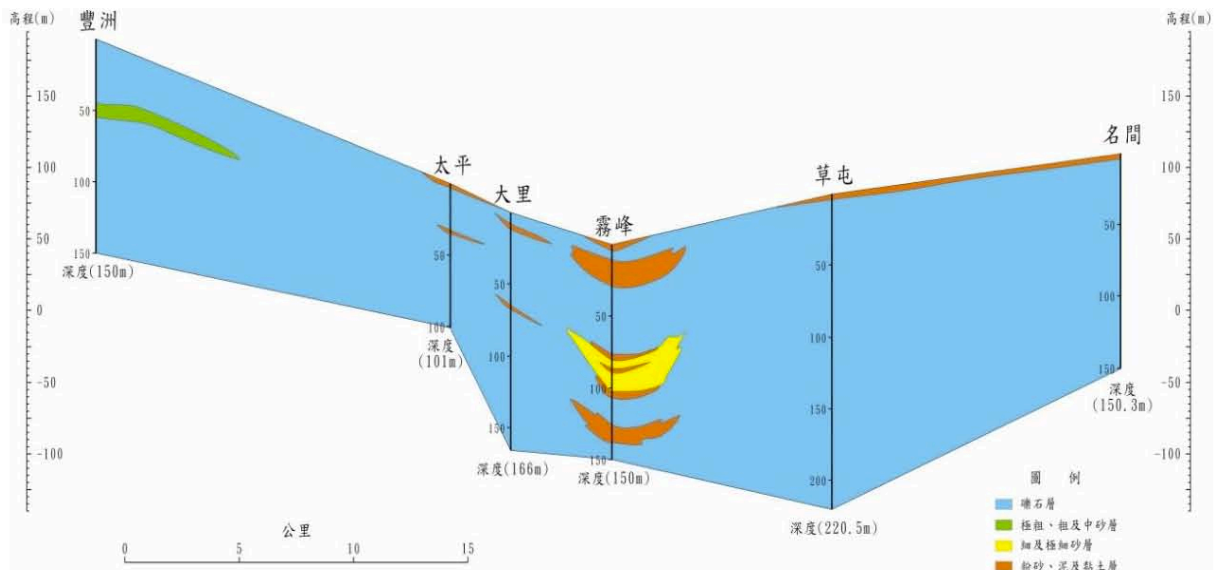


圖4 台中地區地下含水層東剖面

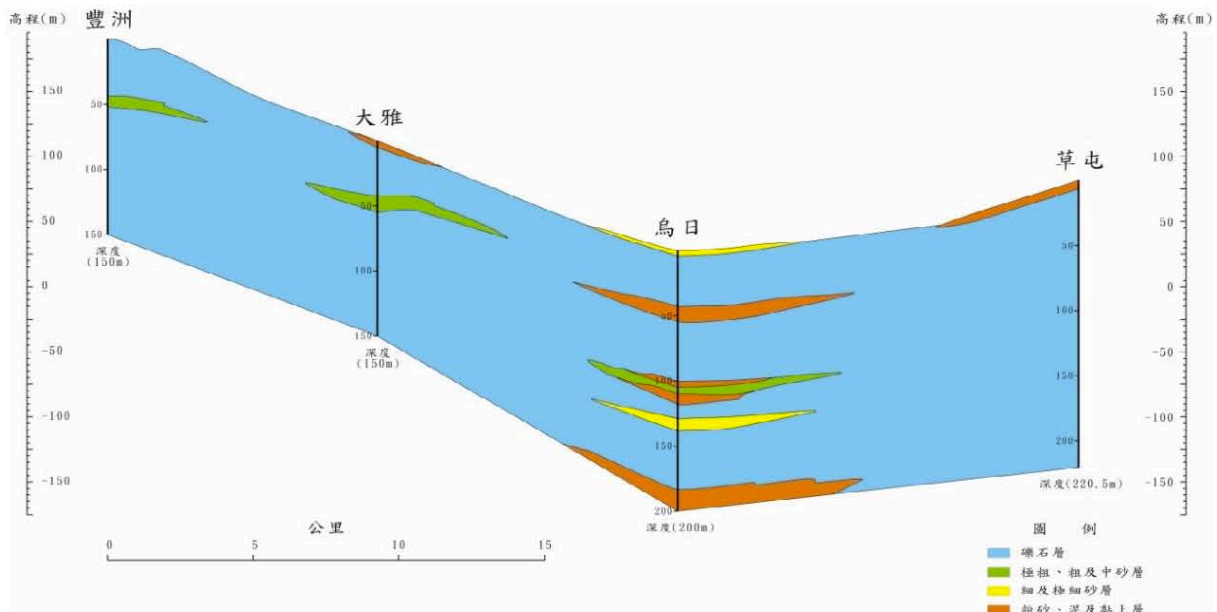


圖5 台中地區地下含水層西剖面

台中盆地地下含水層大致為礫石層單層構造，透水性相當良好，僅在盆地中段烏日、霧峰等地區明顯有分層現象產生，由地下水觀測站網針對整個盆地進行的試水試驗資料顯示，盆地地區含水層淺層之水力傳導係數(K)介於0.0012 m/min 至 0.3708 m/min 之間，大部分區域皆在0.0600 m/min 以上。而深層之水力傳導之變異則較大，啟聰、烏日、霧峰、新街及新光等站之深層地下水之水力傳導係數之範圍介於0.0006 m/min 至0.0252 m/min之間，透水性則明顯較差，而盆地內側之中山站、四張犁站、大里站之水力傳導係數介於0.0552 m/min至0.0570m/min 之間，透水性相當良好；比出水率(S_y)在0.01至0.10之間，貯水係數(S)則約為 10^{-4} ，這些實

測之水文地質參數將做為水平衡歷線分析以及地下水流數值模式參數。河床底泥透水係數(K_s)介於 5×10^{-6} cm/sec至 10^{-4} cm/sec；河床底泥厚度則設定為0.5公尺。

三、水資源模式模擬

台中地區的地下水資源緊密的與地面水資源互動，必須將兩者視為一體，對水資源做一個完整考，故本研究建立並率定台中地區模擬模式，以評估台中地區在抽水量與補注量平衡的狀態下之可開發水量。

本研究利用三維地下水流模擬模式MODFLOW結合二維河流演算套件SFR建構台中地區之水資源模擬模式，並進行模式率定以及開發方案評估。

MODFLOW為美國地質調查所(USGS)所發展的地下水流數值模式，以有限差分法FDM(Finite Difference Method)求解地下水流控制方程式，以離散計算地下水位之時空分布與變化情形。地下水流控制方程式如下所示：

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + W = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

式中 K 為水力傳導係數 [L/T]； S 為孔隙介質蓄水係數 [L^{-1}]； h 為地下水位 [L]； W 為地下水每單位體積之補注量(Sources)或抽水量(Sinks) [T^{-1}]； t 為時間 [T]。

控制方程式結合地下水系統之邊界條件及初始條件即可描述在非均質非等向性介質中之暫態三維地下水流動情形，亦即地下水位之分布 $h(x, y, z, t)$ 。由於地下水位為時空變數，因此需對連續性空間與時間進行離散後才能以數值求解。MODFLOW是以有限差分法來進行離散處理，地下水系統將以塊狀之網格(Cell)表示。

SFR乃經由給定河川流量及河道斷面後以曼寧公式進行河道演算，其控制方程式如下所示：

$$w \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial L} + q = 0$$

其中， w 為河道頂寬[L]； h_s 為河川水位[L]； Q 為河川流量[L^3/T]， n 為曼寧係數， A 為通水面積[L^2]， R 為水力半徑[L]， S 為水力坡降[L/L]； L 為河道至最下游之長度[L]； q 為單位寬度出流或入流量[L^2/T]； t 為時間[T]。

SFR以曼寧公式定義水深，在由水深加上河床底部高程得到河川水位高程。河道斷面在計算時是採用由8個點構成之複式斷面，並將斷面分為三個部分，左岸、右岸與主河道。水深、寬與濕周皆由給定8個點之河川斷面資料經再經由曼寧公式計算得到。

在地面水與地下水互動的部分是使用Darcy's Law計算其交換流量，交換量方程式如下式所示：

$$Q_L = \frac{K_s w L}{m} (h_s - h)$$

其中， Q_L 為河流與地下水流的交換流量 $[L^3T^{-1}]$ ； K_s 為河床底泥之水力傳導係數 $[LT^{-1}]$ ； w 為河寬 $[L]$ ； L 為河道與地下含水層交界之長度 $[L]$ ； m 為河床厚度 $[L]$ 。

依據相關調查資料及概念模式，建立得到台中地區水資源模擬模式如圖6所示。模式邊界設定上，北邊界大甲溪河道處給定河川流量邊界條件，而地下含水層的邊界處則為給定水頭之邊界條件，依此邊界條件模擬河道入滲補注以及區外地下水入流補注臺中盆地地下水區之情形；東邊界之車籠埔斷層處，由其附近地質材料為透水性不佳的錦水頁岩層及卓蘭砂頁岩互層，相關現地試驗結果亦顯示車籠埔斷層為一阻水邊界，故於模式中東邊界設定為零流量邊界；南邊界之名竹盆地處有地下水入流，故以邊界處之地下水監測井新光站為水位參考測站，設定為給定水頭邊界條件；西邊界在大肚背斜與八卦背斜處為板塊擠壓所造成的地層層面，會驅使地下水產生等向性，背斜稜線形成天然之地下水流分水嶺，故設定為零流量邊界條件，而中間之烏溪隘口處為臺中盆地地下水之出口，此附近之地下水位十分接近地表，且隘口處為唯一的地下水流出口，故此邊界處假設地下水位等同於河川水位，以大肚橋水位站之河川水位設定為給定水頭邊界條件。

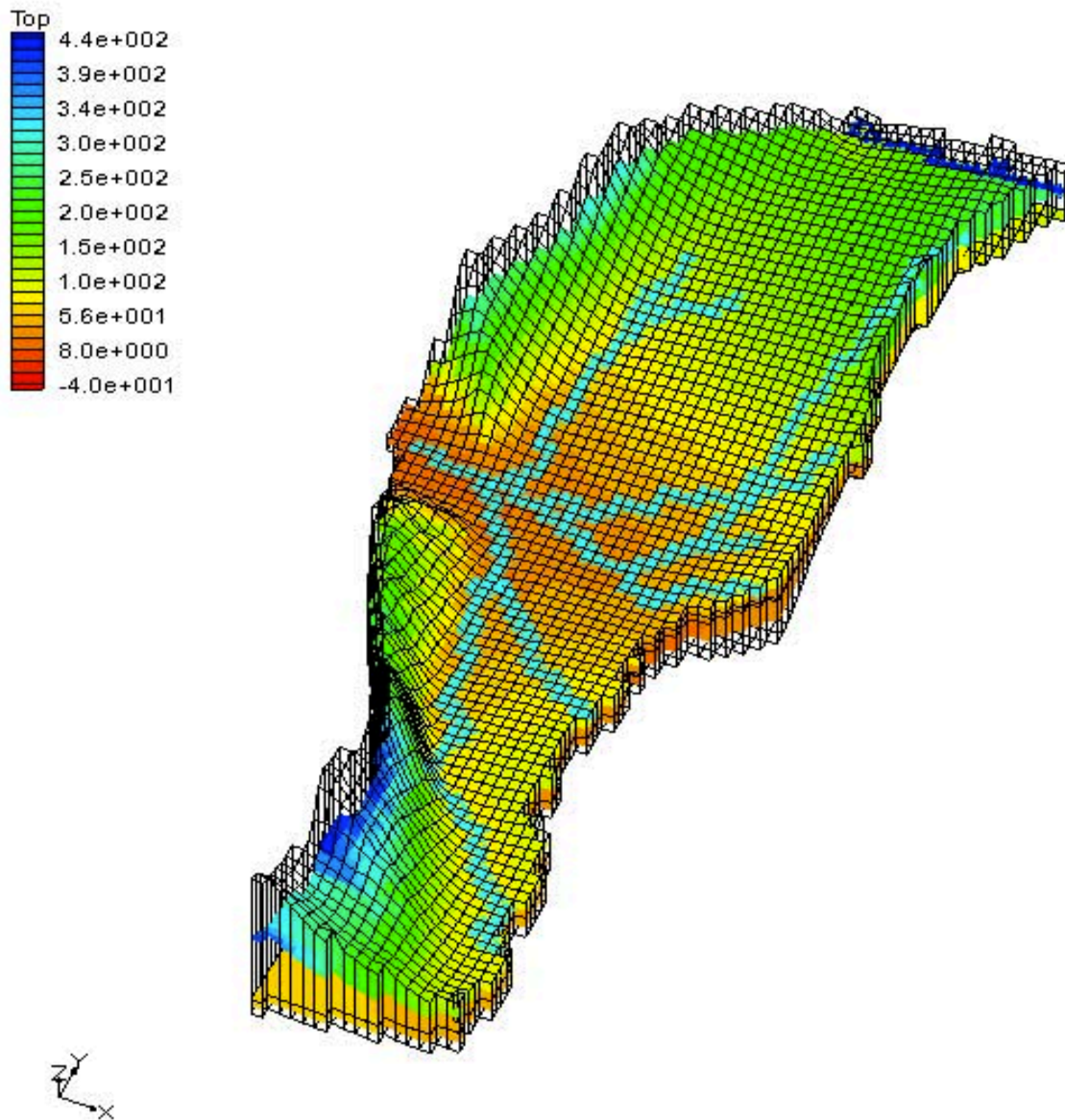


圖6 台中地區水資源模擬模式

含水層系統分層在概念上本研究將台中盆地含水層分層上分作三層，由上而下依序為含水層一、阻水層一與含水層二。其中含水層一、二涵蓋全區，但含水層一於南側軍功寮附近有局部泥層分布，其餘均為透水性良好的含水層；阻水層一僅於霧峰、烏日地區附近較為厚實發達，其於地方則無阻水效果。

含水層一之水位觀測井包括豐洲、潭子、泰安、四張犁(1)、東山、啟聰(1)、大里(1)、建平、中山(1)、烏日(1)、霧峰(1)、萬豐、草屯、新街(1)、新光(1)等15口，含水層二之觀測井包括四張犁(2)、啟聰(2)、大里(2)、中山(2)、烏日(2)、霧峰(2)、新街(2)、新光(2)等8口，由觀察同一井位但不同深度之觀測地下水位可以發現僅在霧峰及烏日井處有水位分層的現象。

水資源系統之水平衡概念模式如圖7所示，入流量部分包括北邊界河水入滲補注量及區外地下水入流補注量，南邊界處有地下水入流補注量，盆地內地表處有降雨入滲補注量及灌溉入滲補注量，而盆地內之河道處則有河床入滲補注量；出流量部分包括抽水量，盆地內河道處之地下水出滲河川量，以及隘口處之地下水出流量，此些水文量皆須透過模式模擬並結合地下水蓄水量分析結果始能合理評估。

抽水量空間分配部分，先以地下水歷線法估算之3.61億噸作為總量，並依行政區之面積大小，按比例分配各區抽水量。此抽水量僅為初始給定之合理值，後續需透過模式率定得到最佳的抽水量空間分布。



圖7 台中地區水平衡概念模式

補注量之空間分佈部分，本研究考量雨水入滲補注及灌溉入滲補注，首先雨水入滲補注的多寡取決於地表土地利用型態、土壤特性及降雨量，本研究利用美國水土保持局SCS法入滲公式中用以反映不同土地利用及土壤特性所產生的有效降雨之CN值，CN值越大代表越容易產生逕流，反之則代表入滲補注越顯著。茲將CN值分為四個等級，評分為1至4分，分數越高表補注越顯著。另本研究將臺中盆地土地利用區分為森林、綠地、農業用地、河道及不透水用地等五類，土壤特性分為砂卵礫石、砂壤土、粘土、粘壤土等四類，分別代表四類不同土壤之滲透能力。由土地利用及土壤特性結合降雨量即得到了雨水入滲補注空間權重。而灌溉入滲補注部分，考量稻田區之灌溉累積水深，水深越深補注量越大，依此可以得到灌溉入滲補注空間權重，將其乘上總補注量得到補注量的空間分布。

最後模式率定所得之平衡時之水文量，年南北邊界地下水流入補注3.49億噸、雨水及灌溉入滲補注4.63億噸、河道入滲補注6.03億噸、河道流失6.95億噸、隘口地下水流失3.49億噸、抽水量3.71億噸。模擬所得之穩態平衡條件下台中地區補注量與抽水量空間分布分別如圖8及圖9所示。補注量空間分布以北盆地較小，而南盆地較大，因南盆地雨量較大，地表透水性較佳。北盆地近東側山區及河道處之補注量大，建築用地之補注最差。對應這樣的補注條件下，個別區域可以進行不同量體的地下水開發。

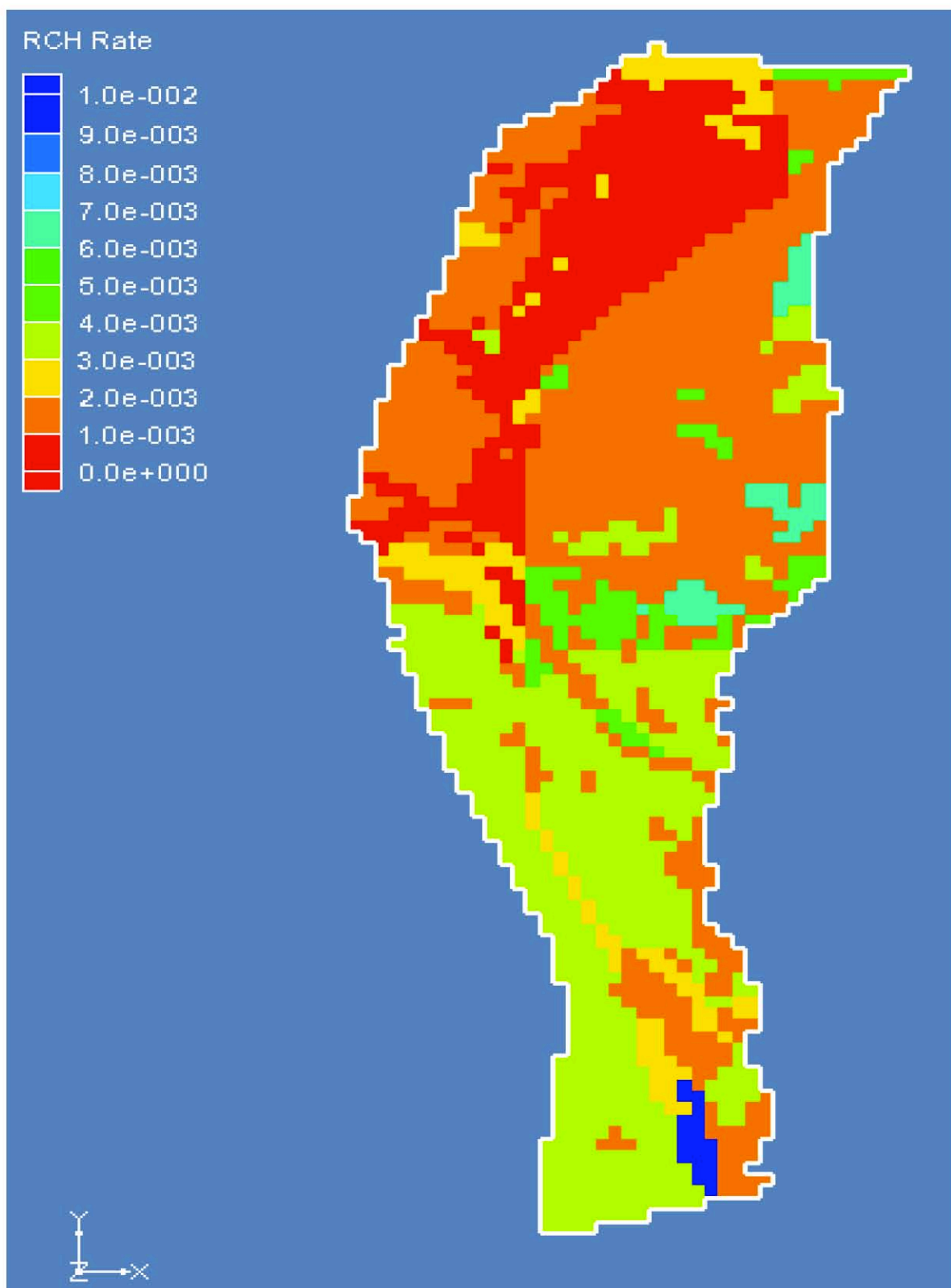


圖8 台中地區補注量空間分布

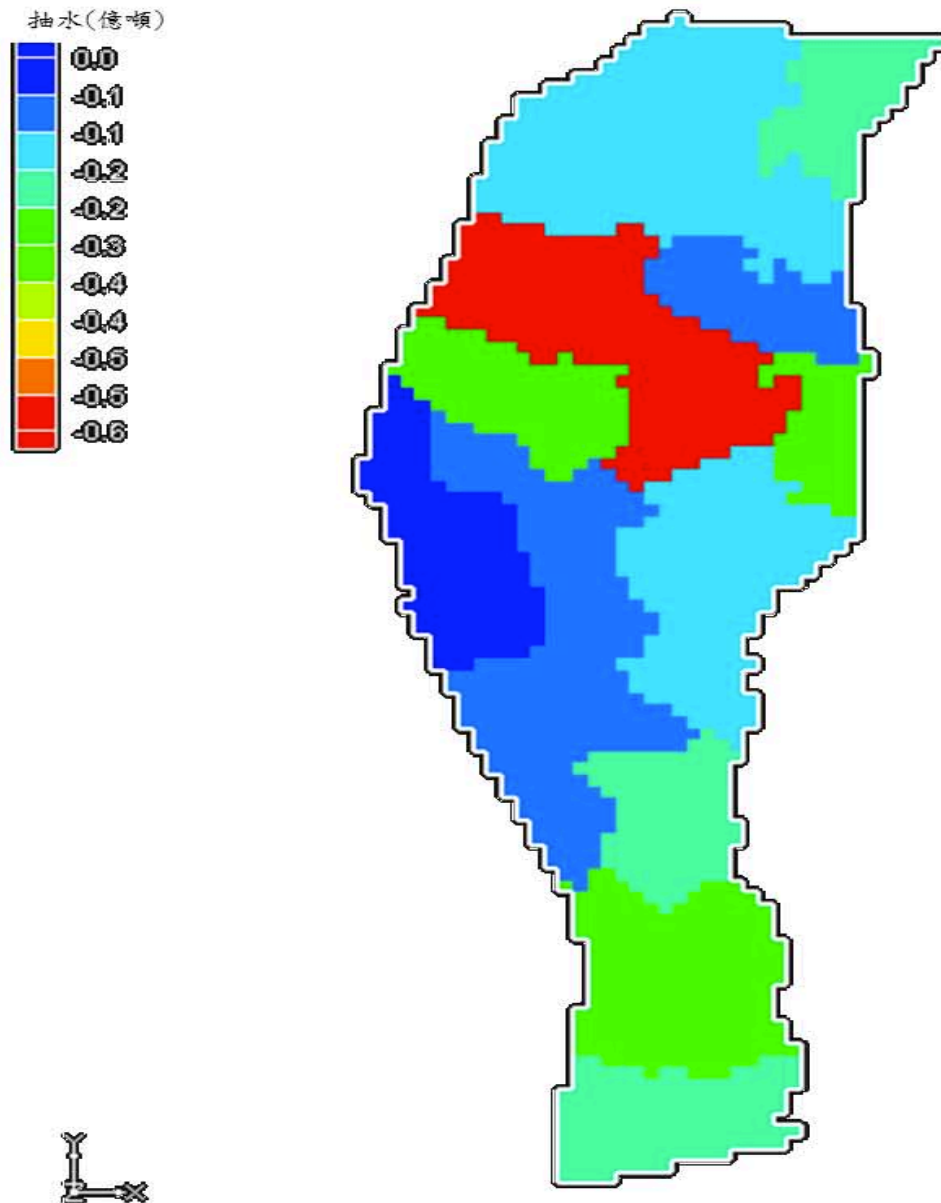


圖9 台中地區抽水量空間分布

四、水資源開發方案評估

台中盆地地下水資源利用調查評估1-3(2009-2011)建議台中地區現況淨水場包含：四民、軍功、神岡、上楓、公館、忠義等淨水場，及豐原廠加藥供水之東寶、嘉仁與大湍等水井，其中以神岡淨水場出水能力最大約2.5萬CMD。淨水場出水能力合計約6萬CMD，現況實際抽水量約1.45萬CMD，因此仍有4萬CMD餘裕水井可配合需要進行複抽；依水井出水能力，及避開台中市政府公告潭子北屯地下水污染管制區，估計可複抽水量為3萬CMD。現有水井復抽工程總工程費為新台幣2,631萬元。

大甲溪南岸水公司水井復抽地下水3萬CMD方案，首先假設為全年穩定抽水，利

用所建立之台中地區水資源模擬模式計算當抽水量較平衡狀態增加3萬CMD時對地下水位的變化影響，如圖10所示。水位洩降0.50公尺影響範圍涵蓋神岡、豐原、潭子、大雅等地區，水位洩降1.00公尺影響範圍則僅有神岡和抽水井處，其中大桶水位洩降1.46m、神岡水位洩降11.65m、上楓水位洩降1.54m、嘉仁水位洩降1.11m，以神岡影響最大，因為該區的地下水上游補注來源較少，所以抽水造成的變化較大。開發方案對下游隘口處的地下水位沒有影響，水位洩降為0。

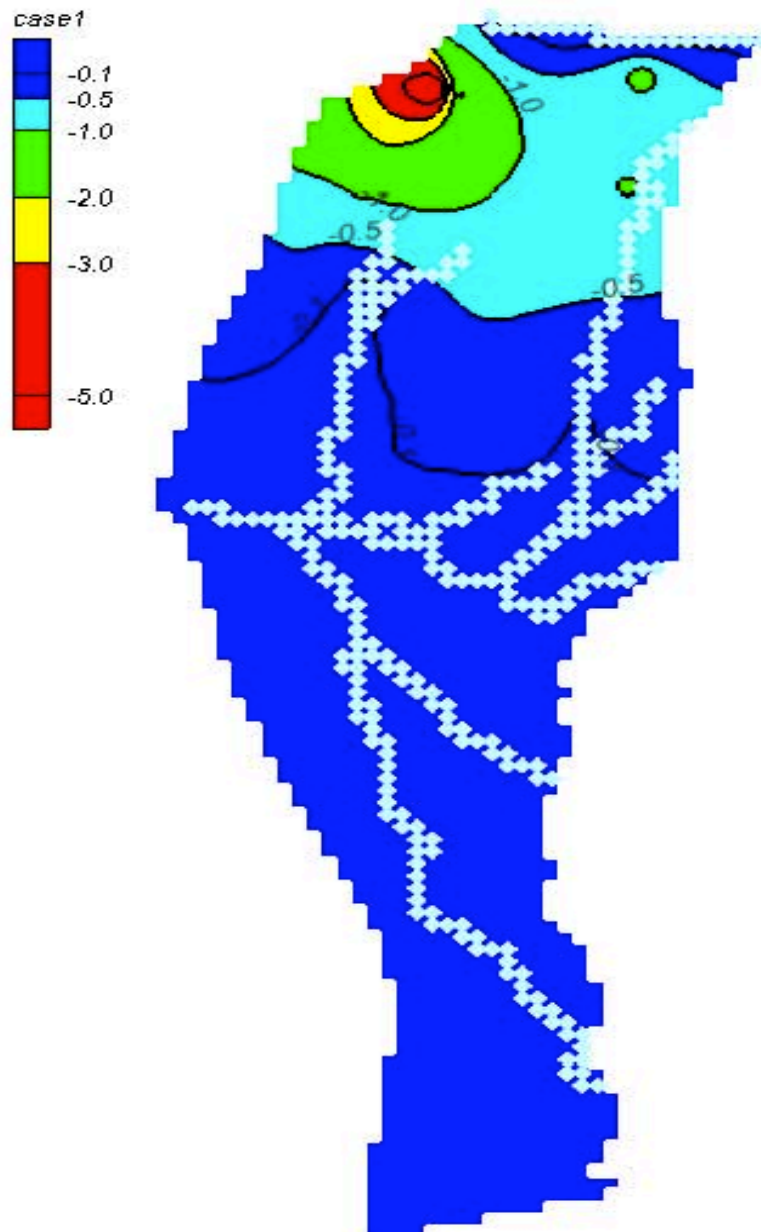


圖10 大甲溪南岸全年復抽之地下水位變化

開發抽水量3萬CMD主要為影響是減少了隘口出流量9508CMD，為原隘口出流量的1.0%，次要影響是北邊界地下水入流量增加了8412CMD，為原入流量的0.9%，大致的影響皆小於一個百分比，顯示復抽對水文量影響不大。

綜合開發案對地下水位與水文量的變化影響來看，對地下水位影響局限於水井處，對水文量的影響小，故大甲溪南岸水公司水井復抽3萬CMD為一可行之水資源開發方案。

除了全年抽水外，本研究亦考量僅在5-9月豐水期抽水，其餘時間停抽的情境，模擬的地下水位變化如圖11所示，水位洩降0.50公尺影響僅涵蓋神岡部分地區而已，而對水文量的影響則僅有0.2%，比全年抽水的影響又小了许多，所以若為保守開發，可以先進行豐水期抽水，待操作穩定後再全年抽水。

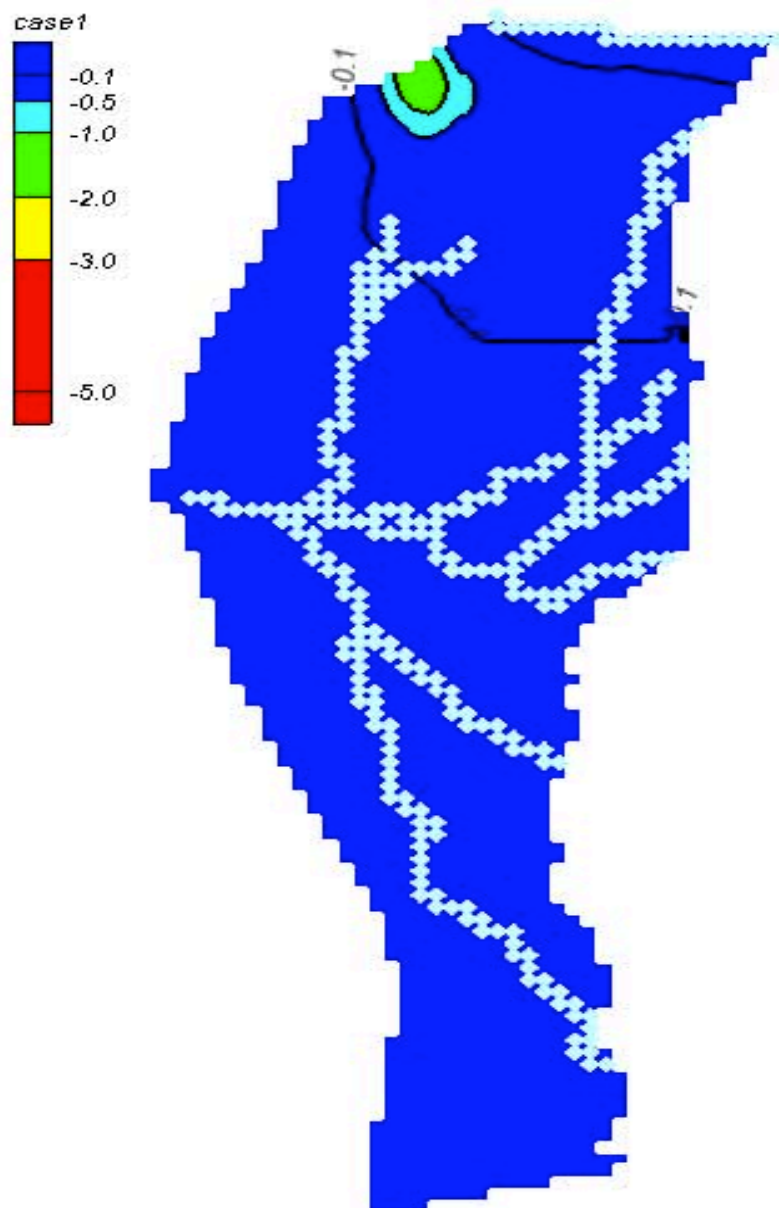


圖11 大甲溪南岸豐水期復抽之地下水位變化

五、參考文獻

1. 經濟部水利署，「臺灣地區地下水資源」，2005。
2. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，「以地下水歷線分析法評估濁水溪沖積扇之地下水收支」，經濟部中央地質調查所彙刊，第十九號，第 61-89 頁，2006。
3. 經濟部中央地質調查所，「台灣地區地下水觀測網第三期九十五年水文地質調查研究計畫--地下水穩定氫、氧同位素研究 (3-3)」，2007。
4. 交通大學防災工程研究中心，「台中盆地做為地下水庫可能性之探討」，經濟部水利署水利規劃試驗所，2007。
5. 徐年盛、江崇榮、劉振宇、黃建霖、楊艾芸，「應用地下水歷線分析與達西定律於濁水溪沖積扇水平衡分析之研究」，第七屆地下水資源及水質保護研討會，pp. B38 至 B45，2009。
6. 徐年盛、葉文工、王逸民、劉宏仁，「雲林內陸地層下陷地區地下水抽水機制之探討與評估」，水利署 99 年度委辦計畫成果發表會，pp. 3-1-1 至 8，2011。
7. 中興工程顧問股份有限公司，「台中盆地地下水資源利用調查評估(1~3)」，經濟部水利署水利規劃試驗所，2009~2011。
8. 徐年盛、江崇榮、汪中和、劉振宇、劉宏仁、黃建霖，「地下水系統水平衡分析與補注源水量推估之研究」，2012。
9. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「中部區域水資源規劃調配管理系統分析(2/2)」，2014。
10. 台中市政府，「台中市地下水資源管理及申請使用審查機制之研究」，2015。
11. McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. "A Modular Three- Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model", Technical Report, U.S. Geol. Survey, Reston, VA, 1988.
12. The Department of Defense, "Groundwater Modeling System GMS 6.0 TUTORIALS", 2005.

投稿	107.11.06
校稿	107.11.08
定稿	107.11.10