

乾旱時期用水分配模式之研究—子計畫：乾旱時期地面水與地下水聯合運用作業模式研發（第 2 年）

摘要

本研究主要目的為建立濁水溪沖積扇於乾旱時期之地表水與地下水系統之聯合營運方式。在不同水文情勢及需求下，將造成不同的缺水情況發生，為模擬各類缺水情況下的水資源調配情形，本研究分析民國 70 年至 99 年之 30 年間，公共用水缺水事件之超越機率，再取超越機率 10%、20% 及 30% 對應之缺水事件，作為乾旱事件分析之對象。在公共用水需求量推求上，將以民國 120 年之中成長需求模擬考量，藉以模擬不同情況乾旱發生時之地表水資源的調供能力。在地表水與地下水系統聯合運用上，由於濁水溪沖積扇屬地層下陷嚴重區域，因此本研究設定為先以地表水系統供應需求，待地表水系統無法滿足公共用水需求時，再由地下水系統供應，盡量以保存地下水為原則。在乾旱時期之地下水取用上，本研究規畫設置救旱井，在合理地考量下，取用地下水源以作為乾旱時期緊急調配水源之一，舒緩缺水情況。本計劃更進一步建立研究區域之暫態地下水水流數值模式，並加入局部網格加密技術，模擬分析地下水抽用後對於局部地下水系統之影響。

地表水模擬所得超越機率 10%~30% 之連續缺水事件所對應之缺水天數依序為 45 天，33 天及 17 天，其對應之缺水量為 689 萬噸，413 萬噸及 82 萬噸。在地表水與地下水系統聯合營運後可知，救旱井之總抽水量已可滿足地表水系統所缺之量，且由 MODTMR 局部加密模式模擬淨水場區域短期抽水的水位變化時，水位在救旱井操作抽水後，經過一段時間還是可以回復至接近原水位的，因此救旱井在本區域確可作為乾旱時期緊急水源調配之一。

關鍵字：地表地下聯合營運，濁水溪沖積扇，地下水數值模擬，系統動力學

Developing the Conjunctive Use Model of Surface and Subsurface Water for Drought Period (II)

Abstract

This study develops an approach to conjunctively use surface water and groundwater for Choushui River alluvial fan during drought periods between 1981 and 2010. The drought events that have exceedence probabilities of 10%, 20%, and 30% are selected to evaluate the operation of the water resources system. Based on an assumption of middle growth of water need, the expected public demand in year 2021 is used for the evaluation. The surface water has higher priority than the groundwater for the operation due to subsidence problem in the studied area. New wells are suggested to install for increasing water sources during drought periods. Therefore, a numerical groundwater model is developed and the refinement technique, named MODTMR, is used to locally refine the grid size. for evaluation of groundwater level distribution under the well operation. The results show that the length of drought period is 45, 33, and 17 for the exceedence probabilities of 10%, 20%, and 30% respectively. The according shortages are 6.89, 4.13, and 0.82 million tons of water. The groundwater model can simulate the groundwater level changes for the wells that pump the water during the drought periods. The results show that the suggested pumping wells can satisfy the water demands during drought periods and the groundwater level can be recovered after the drought periods.

Keywords: Conjunctive use of surface water and sub-surface water; Choushui river alluvial fan; Groundwater flow simulation; System dynamics.

目錄

壹、前言	1
貳、研究目的.....	1
參、文獻回顧.....	1
3.1 地下水管理模式	1
3.2 地表地下聯合營運模式之發展	2
3.3 地下水參數檢定	2
肆、研究方法.....	4
4.1 乾旱時期地表水系統調配分析	4
4.1.1 水資源系統架構.....	4
4.1.2 地表水可運用水源分析	5
4.1.3 水源調配模式建立.....	9
4.2 救旱井設置規畫	12
4.2.1 救旱井設置井位初步篩選	13
4.2.2 救旱井設置井位第二階段篩選.....	14
4.3 暫態數值模式建置	16
4.3.1 MODFLOW 簡介	16
4.3.2 邊界條件與格網劃分.....	16
4.3.3 模式資料輸入.....	23
4.4 局部加密模式建立	25
4.4.1 MODTMR 應用步驟：	26
4.5 地表水與地下水系統聯合營運模式建立.....	29
伍、結果與討論.....	30
5.1 地表水系統模擬成果.....	30
5.1.1 供水系統供水能力分析結果.....	30
5.1.2 乾旱事件分析結果.....	30
5.2 救旱井設置成果	31
5.2.1 救旱井設置格網篩選結果	31
5.2.2 救旱井設置格網區域排序結果.....	32
5.3 暫態數值模式模擬成果.....	34
5.3.1 模式參式檢定結果.....	34
5.4 局部加密應用模擬分析.....	36
5.4.1 救旱井設置對局部地下水系統之影響評估.....	36
5.5 乾旱時期水資源調配綜合分析	39
陸、結論與建議.....	40
柒、參考文獻.....	40

圖目錄

圖 1 濁水溪沖積扇水資源調配系統圖	5
圖 2 水資源調配系統動力模型的建構流程.....	10
圖 3 典型水資源供需示意圖.....	10
圖 4 典型水資源供需因果回饋圖.....	11
圖 5 典型水資源供需系統動力流圖.....	11
圖 6 格網篩選與格網排序流程圖.....	13
圖 7 濁水溪沖積扇淨水廠分佈圖.....	14
圖 8 濁水溪沖積扇概念分層.....	17
圖 9 濁水溪沖積扇地下水邊界之概念圖	18
圖 10 濁水溪沖積扇模式之格網劃分.....	20
圖 11 濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網劃分.....	21
圖 12 濁水溪沖積扇模式第 2~7 分層格網劃分.....	22
圖 13 濁水溪沖積扇模式 AA'段剖面圖.....	22
圖 14 含水層一徐昇氏分區.....	24
圖 15 含水層二徐昇氏分區.....	24
圖 16 含水層三徐昇氏分區.....	24
圖 17 TMR 示意圖	27
圖 18 區域模式(regional model)局部模式(local model)示意圖	27
圖 19 真實世界-區域模式-局部模式座標軸設定示意圖.....	28
圖 20 區域模式與局部模式初始水位資料處理方式圖	28
圖 21 乾旱時期地表水與地下水系統聯合營運系統圖	29
圖 22 濁水溪區域以民國 120 年中成長需求模擬所得缺水事件之超越機率圖..	30
圖 23 濁水溪沖積扇格網篩選成果圖	32
圖 24 濁水溪沖積扇平原區域排序成果圖	33
圖 25 第一分層誤差均方根等.....	35
圖 26 第三分層誤差均方根.....	35
圖 27 第五分層誤差均方根.....	35
圖 28 局部區域觀測點位置圖.....	38
圖 29 埔心淨水場區域中央點抽水前後水位變化歷線.....	38
圖 30 埔心淨水場區域中央點抽水前後水位變化歷線.....	39

表目錄

表 1 濁水溪沖積扇民國 120 年中成長之公共用水需求量	4
表 2 濁水溪水源點入流量推估	6
表 3 霧社水庫運轉規線表	7
表 4 霧社水庫高程-容量數值表	8
表 5 日月潭水庫運轉規線表	8
表 6 日月潭水庫高程-容量數值表	9
表 7 彰雲投淨水場設計處理能力表	9
表 8 濁水溪各方案超越機率 20% 下對應之連續缺水天數和公共缺水量	31
表 9 濁水溪沖積扇飲用水水源水質標準篩選合格淨水場之基本資料表	33
表 10 各乾旱情境之連續缺水天數、缺水量及乾旱井群最大可抽水量	39

壹、前言

全球氣候變遷在地球的演進中持續地發生，使得地球表面溫度逐漸上升，造成全球暖化現象，近年來也成為世界各地被廣泛討論的議題；根據聯合國政府間氣候變遷小組(IPCC)在 2007 年指出過去 100 年來(1906-2005)全球平均地表溫度呈線性增加趨勢。對台灣來說，過去數十年的氣候資料顯示，年溫差也呈現上升的趨勢，降雨特性在年平均降雨量並無太大變化，但降雨時間持續減少、降雨集中且強度越來越強，使得台灣未來很可能會面臨嚴重的乾旱危機，造成水庫蓄水不足，水資源的調度與分配更加困難，將無法滿足農業、工業與民生用水需求；因此，研擬抗旱救災因應方案，以降低乾旱所造成傷害與衝擊，此研究議題著實相當重要且迫切。本研究以台灣中部濁水溪流域為研究區域，濁水溪流域由於工商業的蓬勃發展以及科學園區的進駐，致使用水需求量有急速增加的趨勢，在此情況下現有水源設施之供水壓力將明顯提升，水資源調度將比以往面臨更嚴峻的考驗。地表水源受水文豐枯影響甚鉅，於乾旱時期常有水源不足之情況發生，而地下水源相較於地表水源而言，則相對穩定，受水文變化影響較小，因此若能將地表水與地下水聯合運用，應可有效降低乾旱時期之缺水風險。

貳、研究目的

本研究主要目的在以地表水與地下水系統整體考量的觀點，分析濁水溪沖積扇之地表水與地下水系統之基本特性與利用現況，並藉由系統分析與數值模擬方法，建立濁水溪沖積扇地表水與地下水聯合營運系統，以提升濁水溪沖積扇之水源調度能力，降低乾旱時期的缺水風險。

參、文獻回顧

3.1 地下水管理模式

傳統上，地下水管理模式中的地下水控制方程式為最重要的等號限制式，常見的處理方式可以分為兩大類 [Gorelick, 1983]，分別是嵌入法 (Embedding Method) 與響應矩陣法 (Response Matrix Method) 兩種。嵌入法乃直接將以有限差分或有限元素法等數值方法所得的數值模式，直接作為等號限制式而嵌入管理模式之中。由於嵌入法使用一個完整的地下水數值模式，因此可以較精確的描述地下水系統，惟由於管理模式需要反覆呼叫地下水數值模式，因此面對較大區域的問題時，整體計算量將急遽增加。

反之，響應矩陣法係以線性之矩陣方程式近似系統的反應而作為等號限制式，相較於嵌入法，響應矩陣之計算量遠小於地下水數值模式，較適用於較大區域問

題之模擬，然而由於其線性假設，對於非線性系統(如非拘限含水層)而言並不適用，因此響應矩陣法並不適用於非拘限含水層之地下水管理。

3.2 地表地下聯合營運模式之發展

在國外學者方面，*Randall et al.* [1997]利用整數線性規劃來建立都市用水的地表地下聯合營運模式，其地下水系統包括了地表人工補注池與井群的聯合操作，由於整數線性規劃為其解題核心，所有系統的描述包括地下水部份皆必須為線性，因此無法直接應用於非線性反應的地下水系統如非限制含水層等。*Watkins and McKinney* [1998] 建立一地表地下聯合營運的非線性規劃模式，其目標函數為地表地下相關水工結構物之固定成本(包括水庫庫容，管線容量與抽水及補注井的投資設計)與操作成本的組合。其在地下水系統的處理，乃以響應矩陣 (Response Matrix) 來描述抽水與補注對地下水的影響。由於考量非穩態系統且以非線性規劃來求解所以變數的維度將隨著演算時刻的延長而大增，而使得計算量及複雜度大為提高。此外響應矩陣為線性之假設，當遭遇非線性系統(如非拘限含水層)時將無法確切地反應其特性。*Başağaoğlu and Mariño* [1999]則以線性規劃的方式來處理地表地下聯合營運的問題，此問題的系統為由多標的水庫、河川、含水層、農地、供水設施、觀測井與人工補注井所組成，其中河川被視為地表系統與地下系統的連接機制，計算上則藉由響應矩陣來反應河川與含水層間的交換，並以此連結地表與地下系統。雖然地表與地下的系統均已涵蓋，但整個問題所有相關的方程式均為線性的定義，當遭遇非線性系統(如非拘限含水層)時將無法確切地反應其特性;在國內學者方面，*楊朝仲* [2002] 使用遺傳演算法與可微分動態規劃法於多目標地表地下聯合營運規劃上，其在地下水系統的處理方面，藉由嵌入地下水水流模擬模式 ISOQUAD 來計算抽水量及補注量與地下水位之變動關係，這樣的處理雖然能確切反應非線性之非拘限含水層之水位變化，然而當地下水系統變數過多時，與遺傳演算法結合時，求解上則會有變數過多而計算量大增難以求解之困難。*徐年盛* [1995] 結合地下水流模式與地表水水權模式而成地表水與地下水聯合營運之模擬模式，其整體模式為一以線性規劃設計為主的網流模式，目標函數為箭線總成本最小值，並以淡水河流域為例。整個問題因使用網流模式故相關目標函數與限制式僅適於線性的設計。*顏榮祥 et al.* [1998] 以線性規劃法建構南部地區水資源調配之系統模式，聯合運用地表水與地下水，考量用水效益與水利法標的優先順序及水權的優先順序，對未來研究區域在不同水文狀態下之配水情形進行初步的研究。除線性系統的假設外，其在地下水使用方面，乃以限制研究區域地下水之抽用量方式處理。

3.3 地下水參數檢定

建立暫態地下水流數值模式的過程中，參數檢定為必要且重要的一環，完成

檢定之數值模式將能反映出區域地下水系統之特性，後續之地表水與地下水聯合營運方能於此基礎上進行研究。

地下水參數檢定可分為人工檢定與自動化檢定兩類。人工參數檢定為參數檢定中最常用且最傳統之作法，惟其缺點除了推估參數過程複雜而冗長費時外，如何將專家的參數檢定知識轉移給他人也是困難的過程[K. Chau, 2006; KW Chau and Chen, 2001; Madsen et al., 2002]。有鑑於此，許多研究應用專家系統協助進行參數檢定，除了可保存專家知識外，更可進一步的運用專家知識解決問題 [Abbott, 1991; KW Chau, 2004; KW Chau and Albermani, 2002; 2003; KW Chau and Chen, 2001; Kim et al., 2007]。前述專家系統是一個仿有決策能力的人類專家之智慧型電腦系統，並且使用知識與推理的過程來解決需要專業知識才能解決的問題。使用者可以透過與專家系統的互動介面來描述問題，如此專家系統便能回答出一個有根據的答案。應用專家系統協助使用者檢定參數已有一段時間，因為此系統可以將檢定人員的個人因素減到最低，以保持參數檢定的一致性，讓初學者也可以得到與專家的同樣結果[K. Chau, 2006]。Kim et al. [2007]使用專家系統(Expert system for calibration of HSPF, HSPEXP)協助檢定水文模式(Hydrologic Simulation Program Fortran, HSPF)；Madsen et al. [2002]應用專家系統幫助檢定降雨逕流模式；[KW Chau, 2003; 2004]使用專家系統協助檢定海岸及其相關模式。惟甚少有研究以專家系統檢定地下水模式。

此外，為了解決人工檢定費時費工的問題，自動化檢定方法孕育而生，此類方法大都以優選方法為基礎進行模式之自動參數檢定[Black and Black, 2012; Hill, 1992; Madsen, 2000; Mazi et al., 2004; Taylor et al., 2012]，在電腦普及計算速度突飛猛進的現在，自動參數檢定則妥善利用此優點，達到相較於人工率定省時省力的目的。然而，應用優選法於參數檢定首先需確認並建立目標函數與限制式，相較於人工參數檢定，較不易將新的想法直接代入檢定，因此較缺乏彈性。此外，此類模式多採梯度類型之優選方法為演算法，由於梯度類型之優選方法是以參數與水位之敏感度矩陣訂定搜尋方向，為使參數檢定模式通用化，常以差分方式建立敏感度矩陣。然差分敏感度矩陣需藉由反覆呼叫模擬模式方可求得，故其計算量隨著參數維度大幅增加，因此當檢定流域尺度模式時，將因參數維度太高，而大幅增加檢定時間。此外，部分研究以伴隨狀態法解決敏感度矩陣之計算量問題，然該法需針對所解問題，以人工方式推導建構，故將減低參數檢定模式之通用性。

亦有學者將人工與優選法參數檢定結合，以改善兩者之缺點。優選方法應用於流域尺度問題或高維度問題時，其檢定結果往往不佳，因而需與人工檢定方法結合，才能求得較佳之檢定結果。如，Scanlon et al. [2003]檢定一喀斯特地形之地下水模式(fracture model)，起先以 UCODE 直接檢定而無法收斂，之後改以先進行人工檢定，檢定至一不錯之解時，再以 UCODE 精煉(refine)其解。Boyle et al. [2001]比較了以人工及優選法進行水文模式之參數檢定，並提出一方法，首先以人工參數檢定判斷參數值之合理範圍，並給定合理之初始猜值，再以優選法進行

參數檢定，增進求解效率。

傳統優選方法，需隨著參數維度增加而大幅增加計算敏感度矩陣之計算量(如 UCODE)，人工參數檢定或人工參數檢定結合優選法皆需人工參與，亦需費時費力，本研究將以第一年開發之參數檢定專家系統進行參數檢定。

肆、研究方法

4.1 乾旱時期地表水系統調配分析

本研究藉由濁水溪沖積扇長期調配模擬，分析民國 70 年至 99 年之 30 年間，公共用水缺水事件之連續缺水天數及其對應之缺水量，之後再依各缺水事件之連續缺水天數進行超越機率計算，本研究取超越機率 10%、20% 及 30% 之缺水事件，作為乾旱事件分析之對象。

地表水資源調配模式乃注重於地表水資源的調配模擬，對於地下水則以每日穩定供水水源方式模擬之，模擬時地表水資源的調配仍依循濁水溪沖積扇水源運用原則。此外，本研究在公共用水需求量推求上，參考水利署民國 98 年「臺灣地區水資源需求潛勢評估及經理策略檢討」推估成果，以民國 120 年之中成長需求(如表 1 所示)進行模擬，藉以模擬不同情況乾旱發生時之地表水資源的調供能力。本研究於模式模擬完後將可求得各缺水事件之公共用水的缺水量。

表 1 濁水溪沖積扇民國 120 年中成長之公共用水需求量

	彰化需求量 (萬 cmd)	雲林需求量 (萬 cmd)
公共用水需求(民生+工業)	42	31.6

4.1.1 水資源系統架構

本區域地表水水源之供給主要依賴濁水溪及其支流清水溪，水利署規劃未來在清水溪興建湖山水庫以引取清水溪豐水期餘水蓄存，使濁水河流域之地表水資源能發揮更大效益。

本區域之水資源系統中除考量現有水工結構物之外，並將湖山水庫及其相關之引水設施納入考量，水資源調配系統如圖 1 所示。

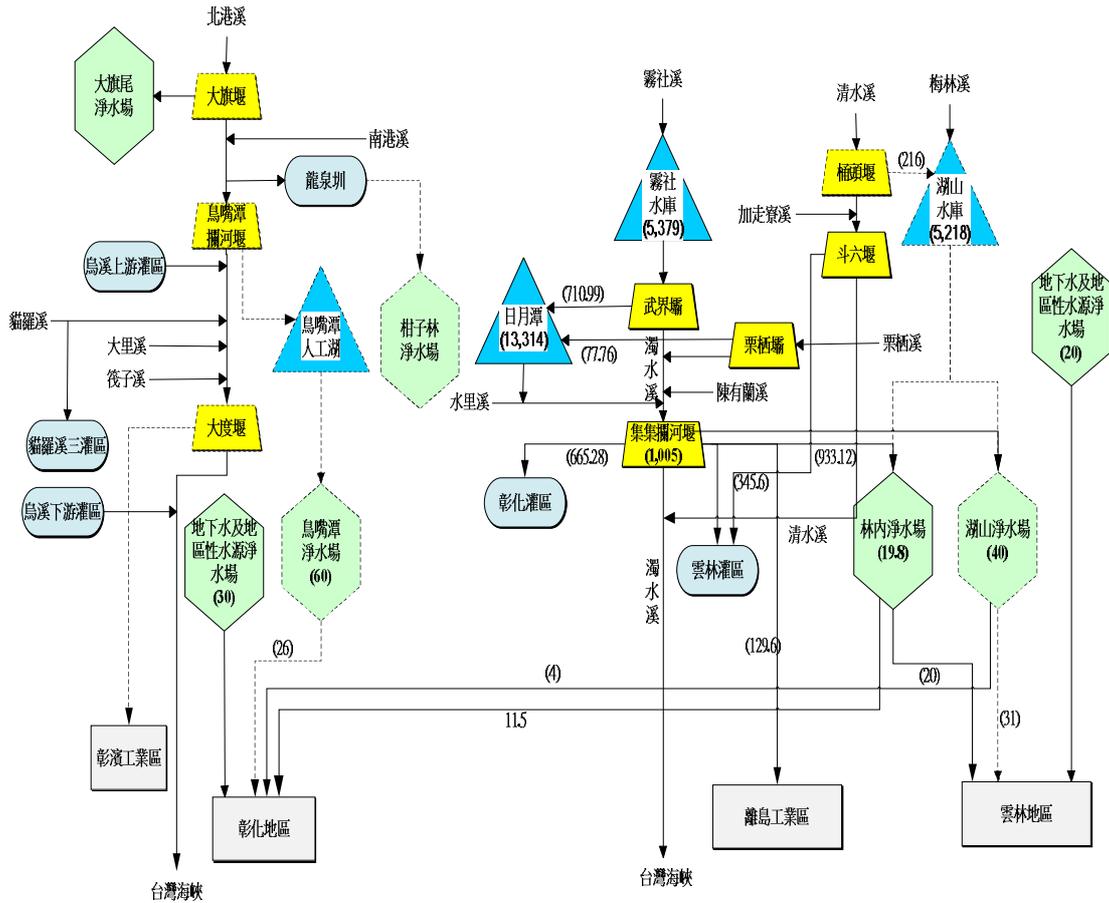


圖 1 濁水溪沖積扇水資源調配系統圖

4.1.2 地表水可運用水源分析

供水系統之供水能力，主要考量供水系統、下游農業保留水量及生態基流量等限制條件，並考量濁水溪與湖山水庫聯合運用，系統模擬原則說明如下：

- I. 模擬演算期間自民國70年至99年共30年，流量以歷史流量紀錄或推估流量(流量推估式詳見1)為之，並以「日」為模擬單位。
- II. 供水系統已納入湖山水庫共同運用。
- III. 攔河堰引水前須優先放流下游各項保留水量，若有剩餘流量，方可攔蓄引取。另集集攔河堰需優先保留離島工業區之用水量。
- IV. 各需求優先使用川流水，不足者方由水庫補充供給。
- V. 各蓄水設施之蓄水量皆採最新測量之H-A-V曲線，且水庫呆容量不計入水量運用模擬，各水庫之運轉規線及H-A-V見表3~表6。
- VI. 各蓄水設施需依照其運用要點進行放水操作。
- VII. 河道生態放流量以生態基流量與天然河川兩者取小者。
- VIII. 不考慮河道輸水損失及滲漏損失。
- IX. 模式中採用淨水場設計處理能力如表7所示。

表 2 濁水溪水源點入流量推估

名稱	河川 名稱	水工結構 物名稱	流量推估式	計算年限	參考 出處
濁 水 溪	霧社溪	霧社水庫	$Q_{\text{霧社水庫}} = 0.437 \times Q_{\text{武界站}}$	1981	註 1
			$Q_{\text{霧社水庫}} = Q_{\text{霧社水庫入流量}}$	1982-2010	註 5
	陳有蘭溪		$Q_{\text{陳有蘭溪}} = Q_{\text{苗園站}} - [\text{武界壩溢流量}]$ $- [\text{日月潭發電水量}] - Q_{\text{水里站}} - Q_{\text{栗栖溪}}$	1981-1993	註 3
			$Q_{\text{陳有蘭溪}} = Q_{\text{玉峰橋}} - [\text{武界壩溢流量}] - Q_{\text{栗栖溪}}$	1994-2001	註 3
			$Q_{\text{陳有蘭溪}} = Q_{\text{集集堰入流量}} - [\text{武界壩溢流量}]$ $- [\text{日月潭發電水量}] - Q_{\text{栗栖溪}}$	2002-2010	註 3
	栗 栖 溪	栗栖溪		$Q_{\text{栗栖溪}} = 0.063 \times Q_{\text{青雲站}}^{0.912}$	1981-2001.06
			$Q_{\text{栗栖溪}} = 0.282 \times Q_{\text{霧社溪}}^{0.843}$	2001.07-2010	註 3
清水溪		桶頭堰	$Q_{\text{清水溪}} = Q_{\text{桶頭(2)站}}$	1981-2010	註 3
加走寮溪			$Q_{\text{加走寮溪}} = 0.383 \times Q_{\text{桶頭(2)站}}$	1981-2010	註 2
水里溪			$Q_{\text{水里溪}} = 0.650 \times Q_{\text{加走寮溪}}$	1981-1993	註 1
			$Q_{\text{水里溪}} = 1.109 \times Q_{\text{水里站}}$	1994-2010	註 1
梅林溪		湖山水庫	$Q_{\text{梅林溪}} = 0.0254 \times Q_{\text{桶頭(2)站}}$	1981-2010	註 6
烏 溪	烏溪	烏溪橋	$Q_{\text{烏溪橋}} = Q_{\text{烏溪橋站}}$	1981-1999.09	註 4
			$Q_{\text{烏溪橋}} = 1.098 \times Q_{\text{乾峰橋站}} - P_{\text{阿罩霧一圳}}$ $- P_{\text{北投新圳}} - P_{\text{龍泉圳}}$	1999.10-2001	註 4
			$Q_{\text{烏溪橋}} = Q_{\text{烏溪橋站}}$	2002-2004	註 4
			$Q_{\text{烏溪橋}} = 1.098 \times Q_{\text{乾峰橋站}} - P_{\text{阿罩霧一圳}}$ $- P_{\text{北投新圳}} - P_{\text{龍泉圳}}$	2005	註 4
			$Q_{\text{烏溪橋}} = Q_{\text{烏溪橋站}}$	2006-2008	註 4
			$Q_{\text{烏溪橋}} = Q_{\text{烏溪橋站}}$	1981-2004	註 4
	大肚橋		$Q_{\text{大肚橋}} = Q_{\text{大肚橋站}}$	1981-2004	註 4
			$Q_{\text{大肚橋}} = 2.072 \times Q_{\text{乾峰橋站}} - P_{\text{阿罩霧圳}}$	2005	註 4

			—P 茄萇媽助圳 —P 北投新圳 —P 龍泉圳		
			$Q_{\text{大肚橋}} = 1.884 \times Q_{\text{烏溪橋站}} - P_{\text{阿罩霧二圳}}$ —P 阿罩霧三圳 —P 阿罩霧四圳 —P 茄萇媽助圳	2006-2008	註 4

- 註：
1. 大安溪大甲溪水資源聯合運用初步規劃報告，民國 94 年
 2. 中區水資源永續經營管理策略規劃，民國 95 年
 3. 濁水溪水系現有水庫水資源運用可行性評估(1)，民國 97 年
 4. 烏溪烏嘴潭人工湖可行性規劃(1/2)工程可行性規劃，民國 98 年
 5. 水庫營運報表
 6. 本研究面積比推估

表 3 霧社水庫運轉規線表

單位：公尺

月份	旬	發電規線	月份	旬	發電規線
1	上	1003.1	7	上	984.23
	中	1002.8		中	986.31
	下	1002.4		下	988.38
2	上	1002.1	8	上	990.46
	中	999.42		中	992.54
	下	996.74		下	994.62
3	上	994.07	9	上	996.69
	中	991.39		中	998.77
	下	988.71		下	1000.8
4	上	986.03	10	上	1002.9
	中	983.36		中	1005
	下	980.68		下	1004.7
5	上	978	11	上	1004.5
	中	978		中	1004.2
	下	978		下	1003.9
6	上	978	12	上	1003.6
	中	980.08		中	1003.4
	下	982.15		下	1003.1

(資料來源：水利署水利系統法規查詢網

(<http://wralaw.wra.gov.tw/wralawgip/index.jsp>)。)

表 4 霧社水庫高程-容量數值表

水位 (公尺)	累積容積 (萬立方公尺)	水位 (公尺)	累積容積 (萬立方公尺)
960	0	985	2357
965	7	990	3206
970	413	995	4178
975	972	1000	5309
980	1625	1005	6623

(資料來源：台灣電力股份有限公司萬大發電廠提供。)

表 5 日月潭水庫運轉規線表

單位：公尺

月份	旬	發電規線	月份	旬	發電規線
1	上	281	7	上	288.5
	中	278.5		中	291.5
	下	276		下	294.5
2	上	273.5	8	上	296.5
	中	271		中	296.5
	下	268.5		下	296.5
3	上	266	9	上	296.5
	中	266		中	296.5
	下	266		下	296.5
4	上	266	10	上	296.5
	中	266		中	295
	下	266		下	293.5
5	上	266	11	上	292
	中	266		中	290.5
	下	266		下	289
6	上	266	12	上	287
	中	273.5		中	285
	下	281		下	283

(資料來源：水利署水利系統法規查詢網頁

(<http://wralaw.wra.gov.tw/wralawgip/index.jsp>)。)

表 6 日月潭水庫高程-容量數值表

水位 (公尺)	累積容積 (萬立方公尺)	水位 (公尺)	累積容積 (萬立方公尺)
730	2452	743	9185
736	5058	744	9199
737	5069	745	9213
738	5080	746	9227
739	5092	747	9241
740	5103	748	9255
741	5114	748	9255
742	9171		

(資料來源：台灣電力股份有限公司大觀發電廠提供。)

表 7 彰雲投淨水場設計處理能力表

地區	系統名稱	淨水場名稱	淨水場或其他產水設備出水能力 (萬立方公尺/日)
彰、雲、投	國姓系統	大旗尾淨水場	5,380
	林內系統	林內淨水場	198,000

4.1.3 水源調配模式建立

依據前述模擬原則，以 Vensim 系統動力模式建立中部區域水資源調配系統，水資源調配系統動力模型的建構流程示如圖，首先確認水資源調配系統以釐清水工結構物的相對地理位置，水工結構物以節點表示，河川或供、引水管線則以線段表示之。因此水資源調配系統可由多個節點和多個線段組成，圖為一典型水資源供需示意圖，包含了入流量、河川放水量、需求供水量及未控制流量等。接著根據系統圖（圖）配合各流量的因果關係繪製因果循環圖（如圖所示），因果循環圖之變數區分為外部變數和內部變數，內部變數是指在回饋上的變數，其數值會隨著回饋環屬性而變化；外部變數是指回饋環外的其他變數，其數值不受回饋

環屬性改變。以圖為例，外部變數包含入流量、水庫庫容量、淨水場處理能力、管線限制及需求量，這些數值可由觀測資料或其他相關報告蒐集而得；內部變數則包含河川放水量，需求供水量、未控制流量以及水庫蓄水量等，其量化關係並需依序計算求得。接著進一步整合系統圖和因果循環圖，配合系統動力學的四大元件-存量、流量、輔助變數跟箭線建立系統動力流圖。最後輸入各變數間之量化數學式，即可完成水源調配系統動力模型之建置。

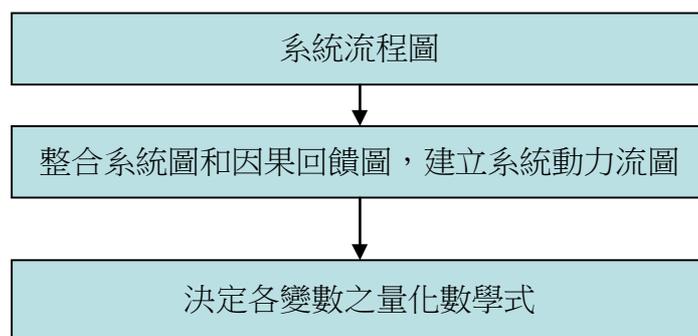


圖 2 水資源調配系統動力模型的建構流程

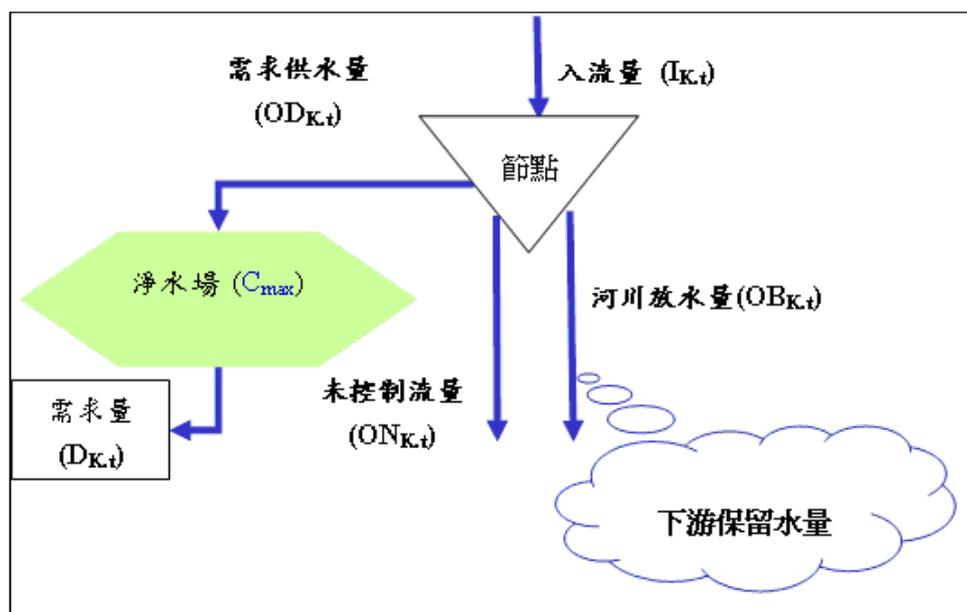


圖 3 典型水資源供需示意圖

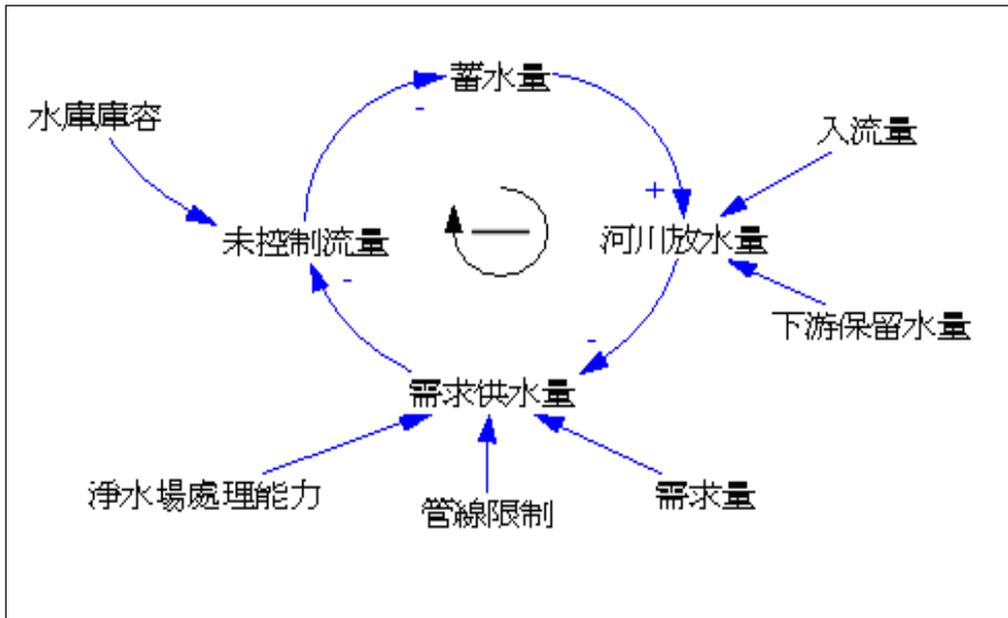


圖 4 典型水資源供需因果回饋圖

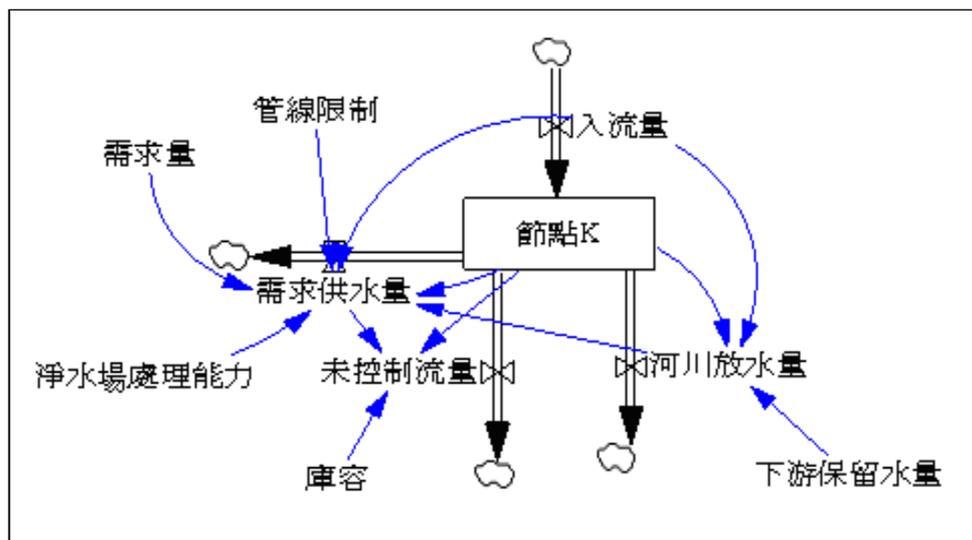


圖 5 典型水資源供需系統動力流圖

模式的計算程序與變數間之量化關係皆參考因果循環圖而得。首先計算下游河川放水量，其量化數學式可表示如下式：

$$OB_{k,t} = \min(\sum_{i \in L} I_{i,t} + S_{k,t}, R_{k,t}) \quad \text{式(1)}$$

$OB_{k,t}$ 是指在 t 時刻蓄存節點 k 之河川放水量， $I_{i,t}$ 是指 t 時刻蓄存節點 k 的入流量， $S_{k,t}$ 是 t 時刻蓄存節點 k 的蓄水量，變數的第一個結尾字母代表節點符號，第二個結尾字母代表時間狀態，L 是指所有流入蓄存節點 k 的入流線段集合， $R_{k,t}$ 表示蓄存節點 k 在 t 時刻之下游保留量，其涵蓋了生態保留水量以及下游優

先水權保留量， $R_{k,t}$ 可由下式表示

$$R_{k,t} = \sum_{i \in M} DR_{i,t} + B_{k,t} \quad \text{式(2)}$$

$DR_{i,t}$ 是下游優先水權量， $B_{k,t}$ 表示是蓄存節點 k 在 t 時刻的生態保留水量， M 是指所有下游優先於 K 點取水之需求量 ($D_{k,t}$) 的需求節點集合，生態基流量 $B_{k,t}$ 則以天然流量超越機率 95% 估算。

需求供水量可由下面方程式來計算

$$OD_{K,t} = \min \left[\sum_{i \in L} (I_{i,t}) + S_{k,t} - OB_{k,t}, \sum_{j \in N} (D_{j,t}) C_{\max k}, P_{\max k} \right] \quad \text{式(3)}$$

$OD_{k,t}$ 是指從蓄存節點 k 在 t 時刻之需求供水量， $D_{j,t}$ 是指 t 時刻於 K 點取水之目標需求量， N 是指於 K 點取水之需求節點集合， $C_{\max k}$ 是指於 K 點取水之淨水場處理能力， $P_{\max k}$ 是於 K 點取水之淨水場處理能力的管線最大輸送容量，若 K 點為非蓄水節點，則未控制流量可由下式推估。

$$ON_{k,t} = \begin{cases} \sum_{K \in L} I_{k,t} + S_{k,t} - OD_{k,t} - OB_{k,t} - S_{\max k,t}, & \text{if } \sum_{K \in L} I_{k,t} + S_{k,t} - OD_{k,t} - OB_{k,t} > S_{\max k,t} \\ 0, & \text{if } \sum_{K \in L} I_{k,t} + S_{k,t} - OD_{k,t} - OB_{k,t} \leq S_{\max k,t} \end{cases} \quad \text{式(4)}$$

若為蓄水節點，則未控制流量可由下式推估

$$ON_{k,t} = \sum_{K \in L} (I_{k,t}) - OB_{K,t} - \sum OD_{k,t} \quad \text{式(5)}$$

其中 $ON_{k,t}$ 是指蓄存節點 k 在 t 時刻的未控制流量， $S_{\max k,t}$ 是指蓄存節點 k 在 t 時刻的最大庫容體積。

蓄存節點 k 在下一時刻 ($t+1$) 的體積則由質量平衡來決定，可以下式來表示：

$$S_{k,t+1} = S_{k,t} + \sum_{i \in L} I_{i,t} - \sum_{j \in W} O_{j,t} \quad \text{式(6)}$$

$S_{k,t+1}$ 是指蓄存節點 k 在 $t+1$ 時刻的體積， $O_{j,t}$ 是指蓄存節點 k 在 t 時刻的出流量，其包含河川放水量、需求水量、未控制流量， W 是指從蓄存節點 k 所有的出流量集合，若節點 k 為非蓄水節點，則 $S_{k,t}$ 和 $S_{k,t+1}$ 為 0。

4.2 救旱井設置規畫

乾旱時期由於降雨量偏低，導致地面水源蘊含之水資源不足以滿足水資源需求，可以救旱井之方式提供不足之需求量。本研究將以淨水廠鄰近區位、區域水質標準以及地下水管制區域等作為救旱井之考量，以下分為救旱井位初步篩選與第二階段篩選兩部分進行井位篩選說明，篩選流程如圖 6 所示。而篩選出候選井位後，本研究進一步以單位洩降出水量 (Q/S , cmh/m) 決定各候選井的取用順序，將分為區域排序與局部排序部分說明。

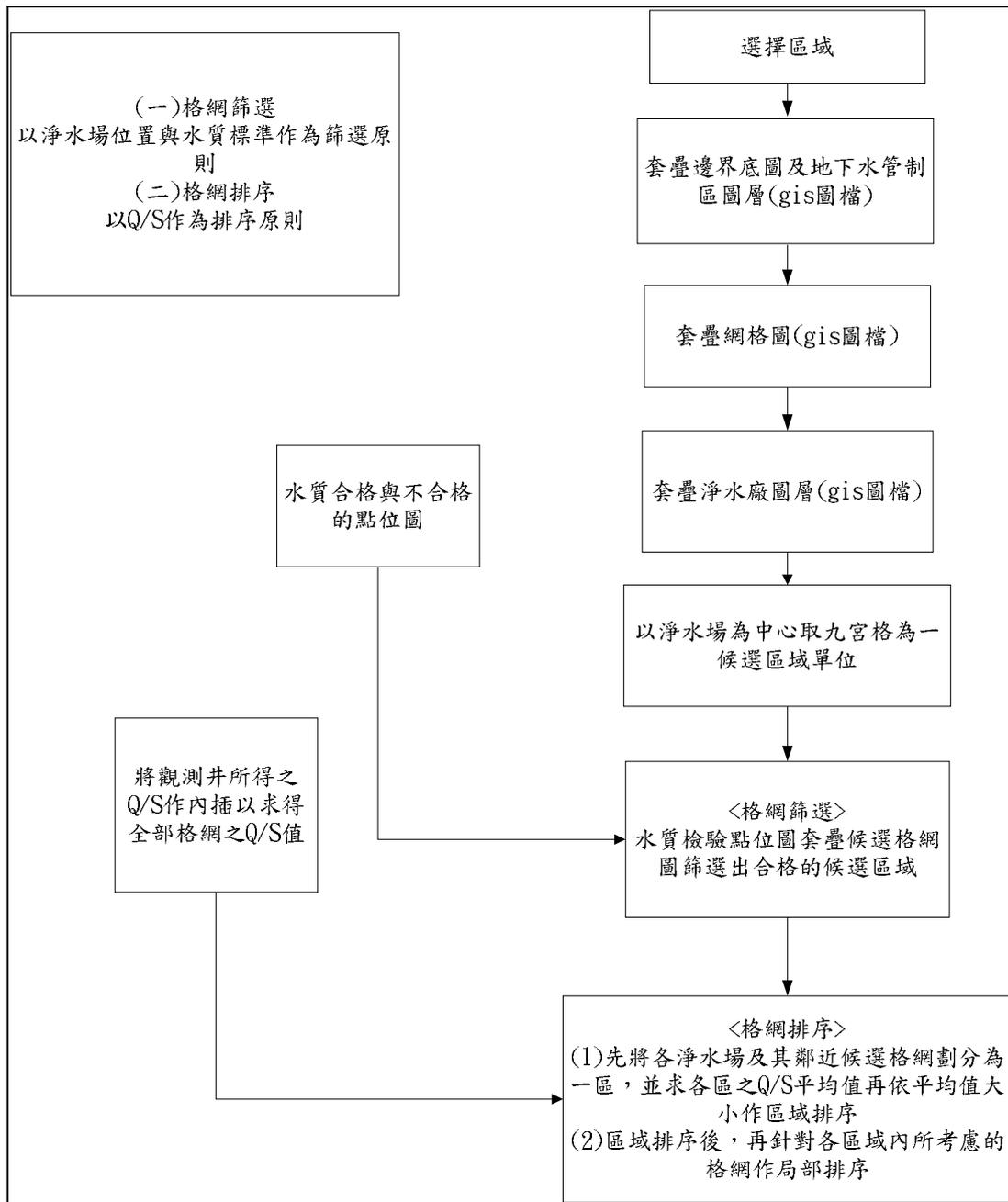


圖 6 格網篩選與格網排序流程圖

4.2.1 救旱井設置井位初步篩選

本研究在格網篩選步驟上首先為收集相關資料，包括濁水溪沖積扇邊界底圖、淨水場位置分布資料、濁水溪沖積扇地下水管制區與研究區域 1km*1km 之格網圖，如圖 7 所示。之後本研究利用地理資訊系統(GIS)將地下水區邊界底圖、地下水管制區圖層、全省淨水場位置分布圖及 1km*1km 的格網圖套疊，先排除地下水管制區之範圍，因地下水管制區域已為地下水抽超之區域，因此在救旱井設

置考量上先行排除，其餘區域為初步可設置救旱井之範圍。接著進行救旱井格網篩選。為降低抽水後將水運送至淨水場之管線架設成本，本研究將以淨水場周圍相鄰位置作為初步可設井位。在定義淨水場相鄰位置的方法上，本研究採淨水場所在網格為中心，取其相鄰九宮格，包含中心格網共九個候選網格，因此在非地下水管制區之每個淨水場，其所在之九宮格區域皆為救旱井候選井位區，其內之格網皆為救旱井初步可設井位。

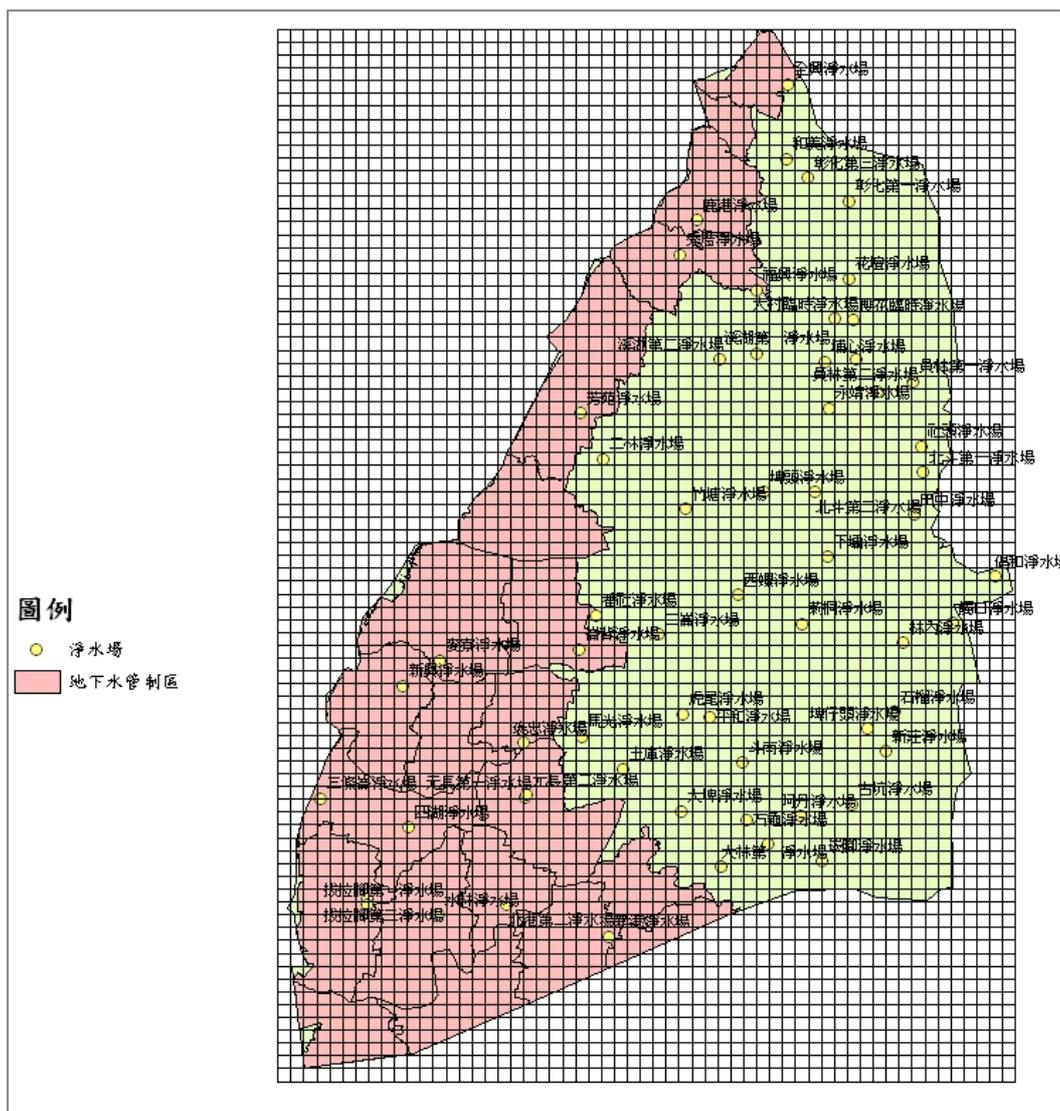


圖 7 濁水溪沖積扇淨水廠分佈圖

4.2.2 救旱井設置井位第二階段篩選

從上一小節中，已篩選出初步可設井位，而在本節中將進一步考量地下水質，以作為井位篩選條件。本研究將採用飲用水水源水質標準（行政院環境保護署 86.9.24 (86) 環署毒字第 56075 號）作為分析依據。

在此階段之井位篩選上，本研究採取嚴格的篩選標準，只要地下水分層中，

任一含水層之水質檢測一項不合格，即視為不合格。反之，各含水層水質檢測皆合格，才視為合格。因此，若在候選九宮格中包含水質不合格的觀測井，則此候選九宮格即完全排除於候選名單中，若此九宮格所包含之各觀測井水質全數合格，才可確定此九宮格範圍內之地下水質是安全無虞的。

本節主要工作即為針對篩選出來的格網進行排序。救旱井格網排序的主要依據為該格網各含水層的出水能力，本研究參考各觀測井完工試水結果之單位洩降出水量（ Q/S , cmh/m）作為該格網出水能力之參考。

各格網之 Q/S 值之推估關係到整體排序的結果，由於本研究以觀測井之 Q/S 值作為可能設井位置之排序參考依據，可利用克力金內插方法將觀測井之 Q/S 值內插至所有格網上，如此，即可求得所有格網所對應的 Q/S 值。

由於各含水層皆有其 Q/S 值，且因本研究主要為設置乾旱時期之抽水井，而抽水井抽水的對象可為所有含水層，在此考量下本研究將各格網之各層 Q/S 值加總以作為候選網格排序之參考根據。

1. 救旱井格網區域排序

救旱井格網排序為救旱井選取設置地點時的一項重要參考指標，其目的為由救旱井格網排序的順序來決定救旱井選取位置的依據。區域排序為以淨水場為中心取其周圍九宮格，再把九宮格所對應各含水層 Q/S 值加總起來即為區域之 Q/S 值，再依各淨水廠區域 Q/S 值的大小進行排序，區域排序的結果即為選取乾旱井設立位置的第一考量；區域排序名次愈前面者，愈為乾旱井選取區域之優先考量。

在規畫救旱井格網時，本研究先進行區域排序之因，在於本研究考量未來要建置救旱井時，即可依淨水場區域排序結果進行設置，而不只依格網排序結果進行設置，因此不會發生在某區選擇一個格網然後又跳到另一個區域選擇格網來設置救旱井之情形，如此規畫不僅較方便且交通成本亦較低。

2、救旱井格網局部排序

決定淨水場區域排序後，本研究更進一步的分析各淨水場區域內救旱井的設置位置，而救旱井設置依舊是以格網的出水能力為主要判斷依據。

由區域排序的結果可知各淨水場區域的排序順序，先取排序最前面淨水場周圍九宮格，依此九宮格所相對應之 Q/S 值進行各淨水場九宮格之內部排序，之後再選取排名第二的淨水場周圍之九宮格，再依此九宮格所相對應之 Q/S 值進行區域內部的排序，以下類推直至所有區域內之九宮格皆完成排序。

4.3 暫態數值模式建置

4.3.1 MODFLOW 簡介

地下水數值模擬模式自 1950 年代末期推出一維地下水模式後，即不斷推陳出新，電腦硬體效能大幅成長與數值方法不斷改進，於 1970 年代中期即發展出包括可以同時模擬非飽和層與飽和層變化之三維地下水水流數值模擬程式。

MODFLOW 是美國地質調查局(U.S.G.S)發展之地下水模擬程式，該程式可求解二維及三維之飽和層地下水流問題，含水層種類可分為自由、受壓、半受壓含水層，依地質特性分類可為均質、非均質及等向性、非等向性含水層，並可搭配 MODPATH、MOC3D、MT3D 及 MT3DMS 等水質模式，可進行水質傳輸模擬。另外，亦可搭配 MODFLOWP、PEST 及 UCODE 等參數優選模式(Inverse modeling)，藉以檢定由 MODFLOW 所建立之地下水流模式中的水文地質參數。美國地質調查局於 1983 年提出 MODFLOW 初版，至 1987 年更新為 MODFLOW 88 版本，再於 1996 年再更新 MODFLOW 96 版本，而最新版本為 MODFLOW-2005。MODFLOW 由於其程式具備概念簡明、架構具彈性、易於添加其它功能模組，以及程式源碼公開等優點，因此成為目前使用最廣之地下水流模擬程式，有多種支援其前後端資料處理的套裝軟體，其中較著名的有 PM(Processing MODFLOW)、Visual MODFLOW、Groundwater Vistas 及 GMS 等。

本研究目前使用 Groundwater Vistas 6.0 進行 MODFLOW 模式建立。Groundwater Vistas (GV)由 Environmental Simulations International (ESI)所開發，其為一套圖形使用者介面軟體，用以幫助使用者建立 3D 地下水模式，目前使用版本可支援至 MODFLOW2005。

當在 GV 上建置地下水模式後，可將 GV 的檔案格式轉換為 MODFLOW 所使用的檔案格式，並執行 MODFLOW 程式進行模擬。而 MODFLOW 的模擬結果，亦可再傳回 GV 進行後端處理，並可分析計算結果及以圖形檔案格式輸出。

以區域地下水資源的觀點而言，任何地表入滲的水量，均至少要能到達區域的淺層含水層，才是對地下水系統有效的補注量，從另一觀點而言，大部份地表補注皆需經過非受壓含水層，而欲完整描述此種流動機制與過程，必須借重地下水數值模式之模擬，因此本研究採用美國地質調查局(U.S.G.S)發展的 MODFLOW 程式，建立濁水溪沖積扇數值模式之架構，再配合分散型地下水位歷線法，推估平原之總補注量與總抽水量。

4.3.2 邊界條件與格網劃分

1. 地下分層架構

MODFLOW 模擬的設定上，可將含水層型態設定為拘限含水層或非拘限含水層，並需輸入各分層之上部和底部之高程值。本計劃參考中央地質調查所於民

國 88 年出版之「台灣地區地下水觀測網第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告」，以濁水溪沖積扇 72 站地層柱狀圖，完成平原地區水文地質剖面一至十二（深度至 300 公尺左右），再依據丘陵及河谷區之 8 站地層柱狀圖，繪製水文地質剖面十三至十五（深度約達 250 公尺左右），劃分出濁水溪沖積扇概念分層，依深度分別為含水層一、阻水層一、含水層二、阻水層二、含水層三、阻水層三及含水層四，濁水溪沖積扇模式共分為第一至七分層，如圖 8 所示。本章將含水層一視為表層含水層，含水層二以下含水層視為深層含水層。並由於含水層四之觀測井數量較少，僅有 11 口主要分布於沖積扇扇尾區域，不足以提供建模所需資料，因此本研究不將含水層四納入模擬範圍。

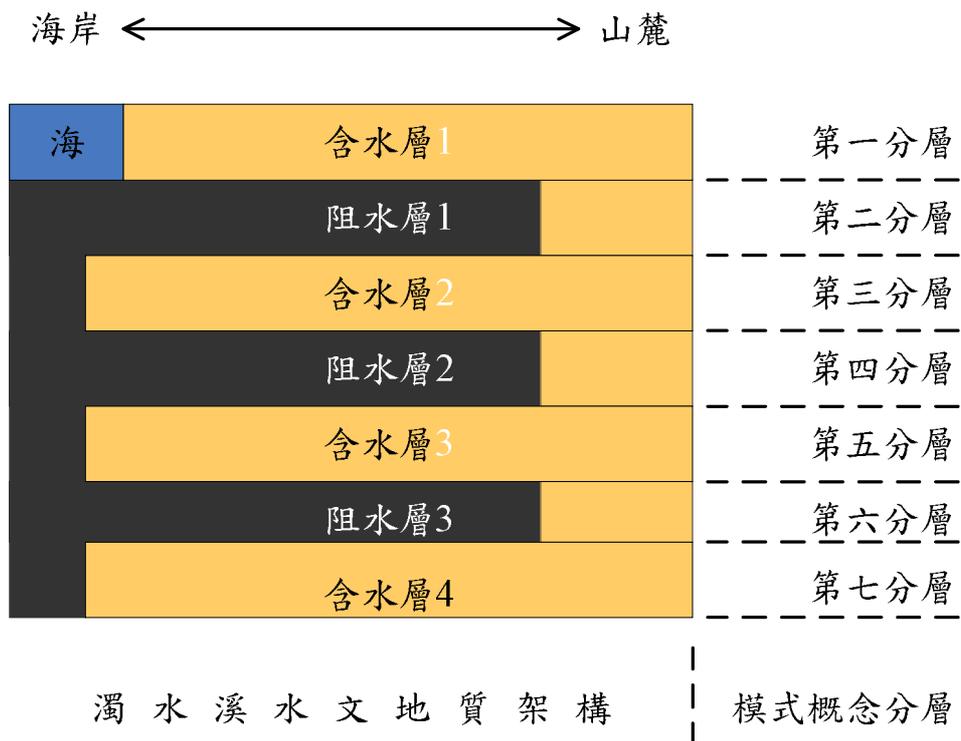


圖 8 濁水溪沖積扇概念分層

2. 模式邊界條件與格網劃分

根據中央地質調查所(1999)對於濁水溪沖積扇地下水邊界分析研判，提出概念性之邊界，如圖 9 所示。

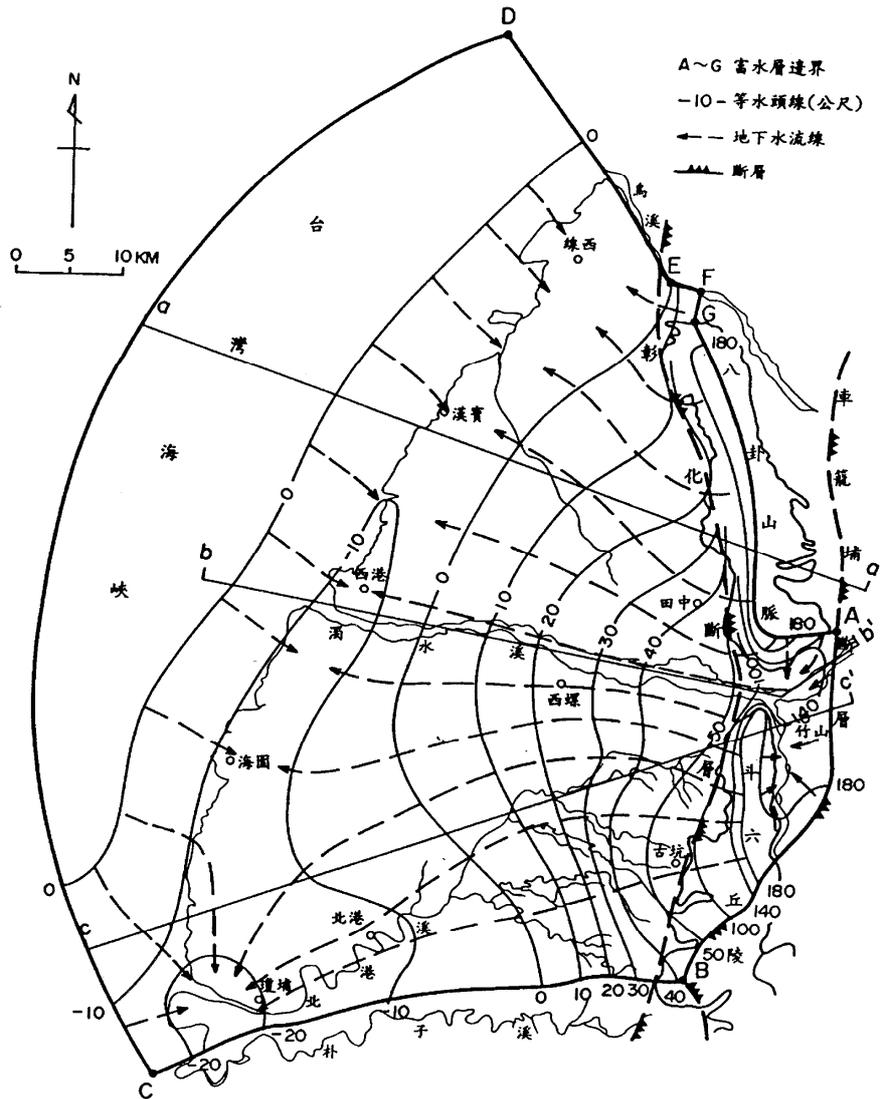


圖 9 濁水溪沖積扇地下水邊界之概念圖

a. AB 段

位於車籠埔斷層上，斷層以東除河床表層厚約 10 公尺之河道沉積礫石層有地下水伏流以外，均為透水及含水不佳之砂頁岩，屬於零流邊界(No flow boundary)；惟位於此邊界上之濁水溪和清水溪河床伏流量相當可觀，為側向補注入地下水區之點源(Pointsource)。

b. BC 段

本邊界位於濁水溪沖積扇之南側邊緣上，含水層沉積物粒徑及厚度均顯著變小，然而並未尖滅，因此無實體之阻隔為界，然而從地下水流網分布型態，顯示 BC 段與地下水流線大致平行，於本身即可認定為一條流線，故亦屬於零流邊界。海岸附近之洩降錐，其在邊界南北之形狀及大小若相當，則不影響零流邊界之假設。

c. CD 段

此段為含水層尖滅封閉於阻水層之位置，屬於零流邊界。

d. DEF 段

本段與 BC 段相似，含水層可向北延伸而與台中盆地地下水系統相接，缺乏實體之阻隔，惟與地下水流方向大致平行，故認定為零流邊界。EF 段位於和美沖積扇頂上，河水可由河床入滲補注地下水。

e. FG 段

本段邊界大致與地下水等水位線平行，隨時間之不同水位有昇降變化。

f. GA 段

本段位於頭嵙山層之中，為八卦山台地之地下水分水線 (Groundwater divide)。

綜合上述環境特性，本研究模式格網以 1 公里乘 1 公里之格網建構，南北方向 85 列與東西方向 75 行，共五層格網。而邊界條件設定於 MODFLOW 模式中，東部之八卦山地區有八卦山背斜，斗六丘陵有內林背斜及斷層經過，以此為東邊邊界，且設為零流量之邊界條件。北部邊界為烏溪，南部邊界為北港溪，各層皆為零流量之邊界，模擬區域如圖 10 所示。西邊含水層一以海岸線向外延伸兩公里設為定水頭邊界，如圖 11 所示，其餘含水層延伸 5 公里後尖滅，設為零流量之邊界條件，如圖 12 所示。圖中藍色網格為定水頭邊界，灰色網格為零流量。圖 13 所示 AA' 為剖面圖，水平向長度為垂向長度 30 倍。

東部八卦山脈與斗六丘陵部分有山區側向補注，但其多半僅能定性描述，而無法定量正向給定，故本研究將側向補注量以抽水模組(Well Package)的方式給定，數值大小則搭配參數檢定系統進一步決定。由於山區側向補注已藉由抽水模組給定，故邊界部分則設定為零流量邊界，以避免山區側向補注量重複計算。

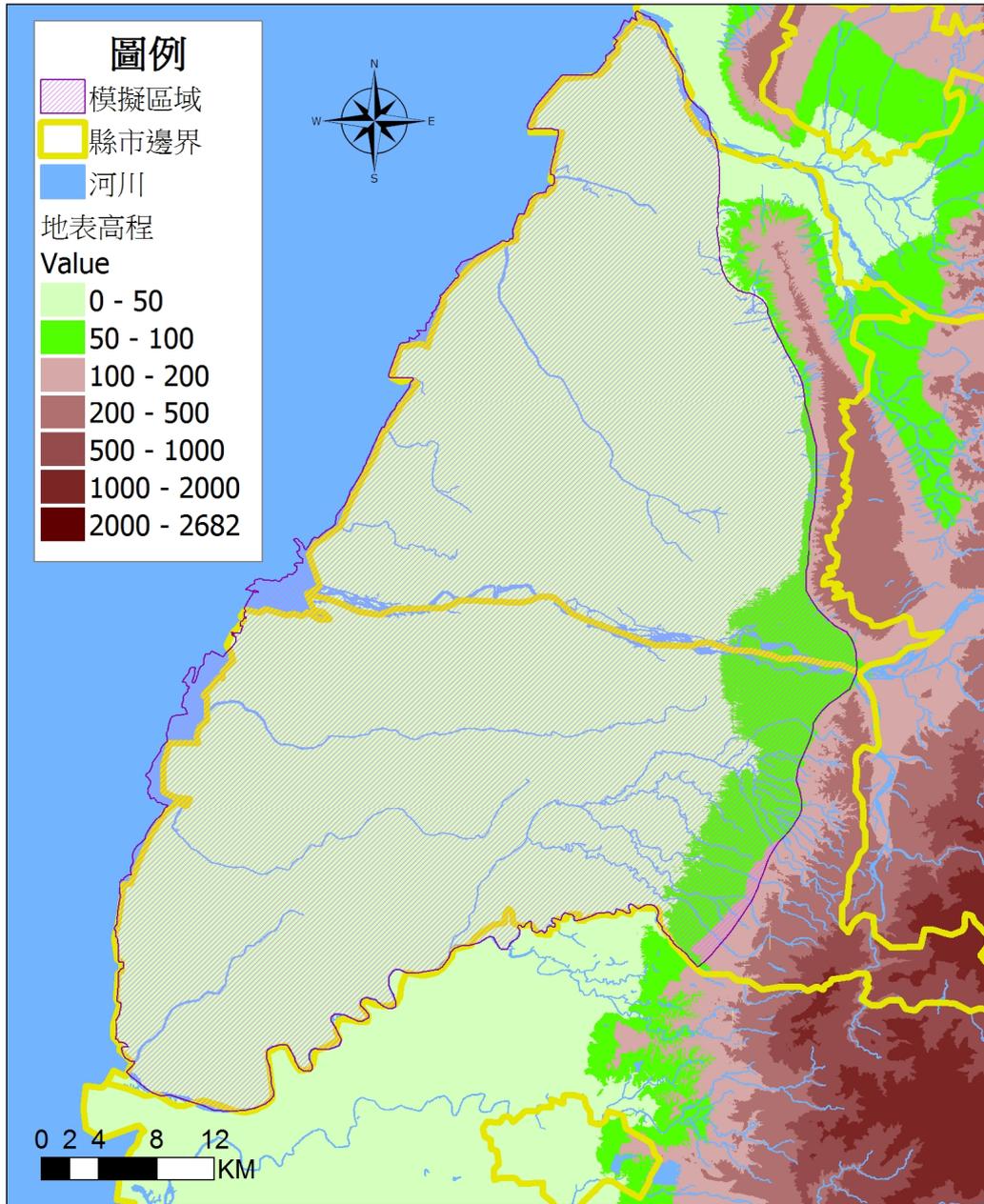


圖 10 濁水溪沖積扇模式之格網劃分

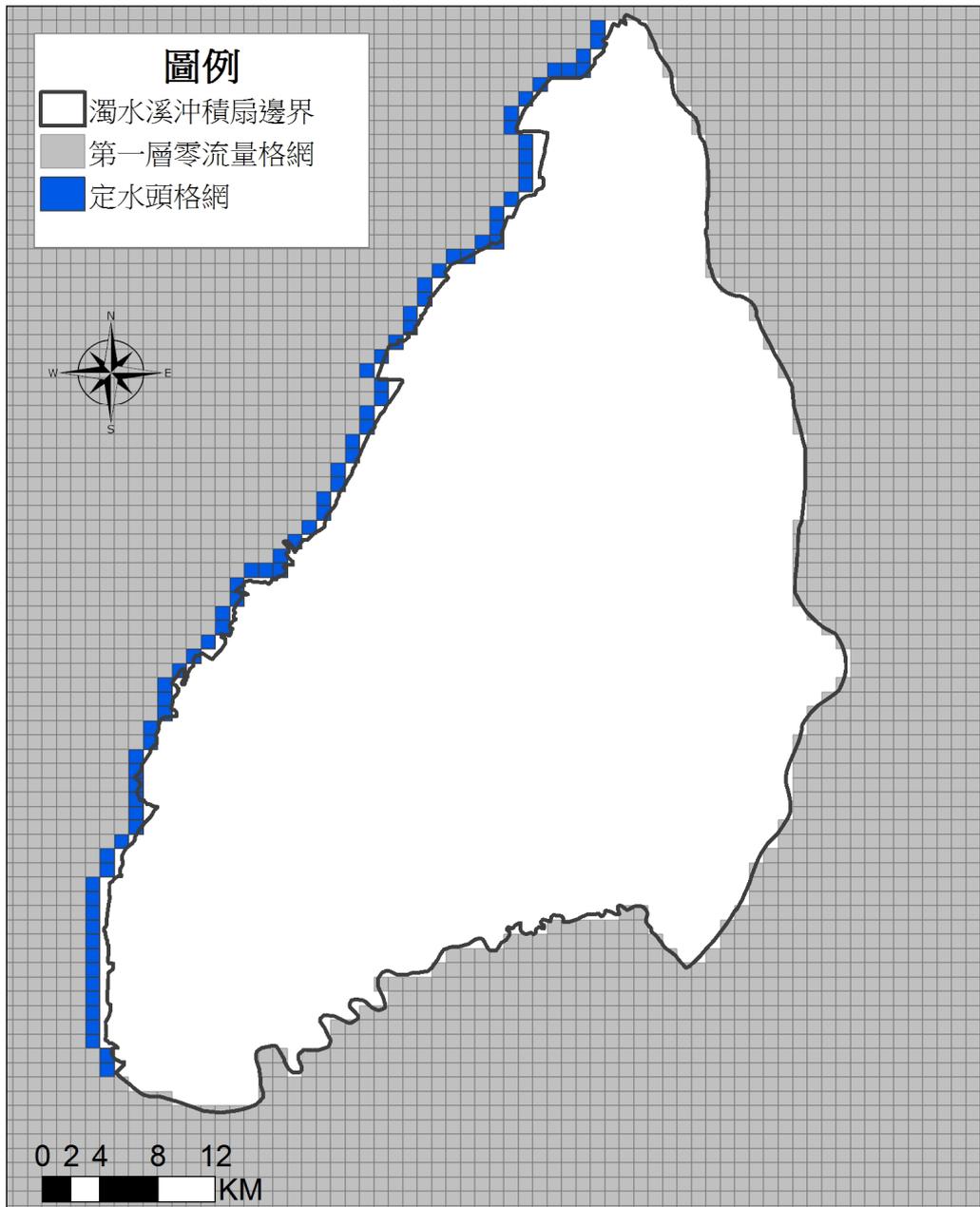


圖 11 濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網劃分

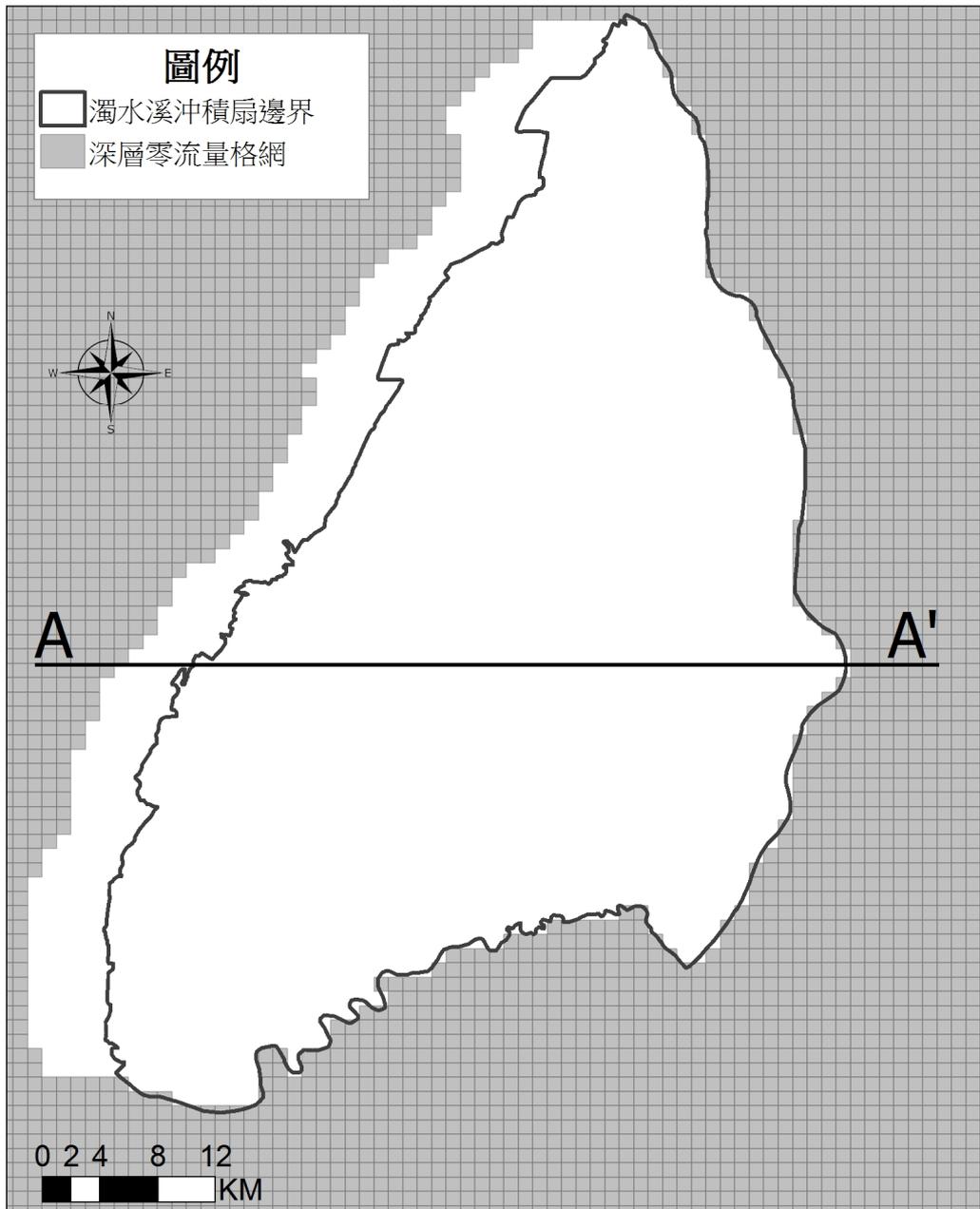


圖 12 濁水溪沖積扇模式第 2~7 分層格網劃分

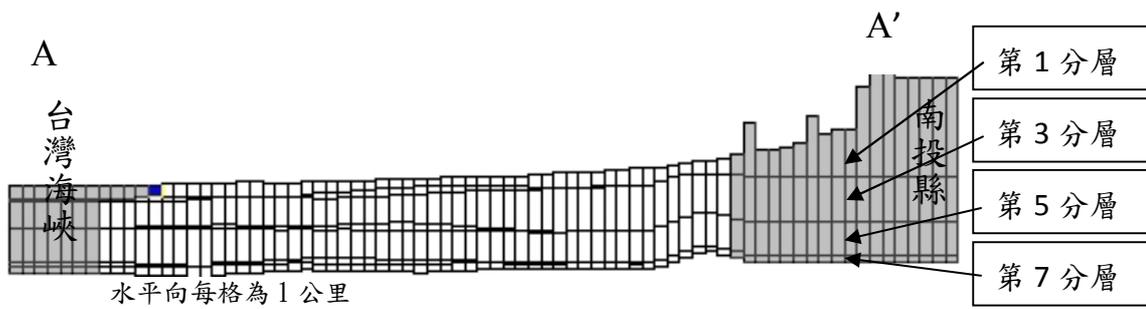


圖 13 濁水溪沖積扇模式 AA'段剖面圖

4.3.3 模式資料輸入

模式之輸入資料包括透水係數、垂向透水係數、儲水係數、起始地下水水位、補注量及抽水量等。以下將說明建置濁水溪沖積扇地下水模擬模式(MODFLOW 模式)，其模式架構所需之地下水力學參數及源匯項輸入資料。各輸入資料敘述如下：

1. 透水係數

觀測站網建置時，各觀測井必進行單井或複井抽水試驗，因此幾乎各觀測井於不同含水層均擁有其導水係數 (Transmissivity, T 值) 現地試驗值，但因 MODFLOW 模式所需參數為透水係數(Hydraulic Conductivity, K 值)，因此台灣地區地下水觀測網第一期計畫所得之導水係數，再除以含水層厚度 (b) 即可轉換求得透水係數，後續再以徐昇氏法分區將點位型式之數值推估至整個濁水溪沖積扇，圖 14~圖 16 分別為模式第 1、3 及 5 分層之徐昇氏分區圖。而概念分層中之第 2 及 4 分層為阻水層，其分布範圍位於濁水溪沖積扇中、下游區域，模式於沖積扇中、下游區域阻水層之透水係數乃參考 Fundamentals of Ground Water (Franklin W. Schwartz and Hubao Zhang, 2003) 中建議之值域，在此設定為 4×10^{-3} (公尺/天)。此外，由於抽水試驗所得結果為水平向之透水係數，本研究假設垂向透水係數為水平向之 1/50。

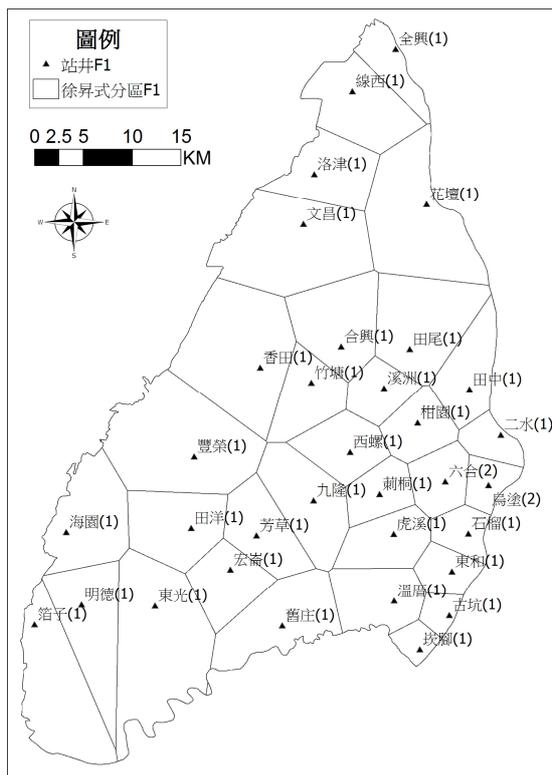


圖 14 含水層一徐昇氏分區

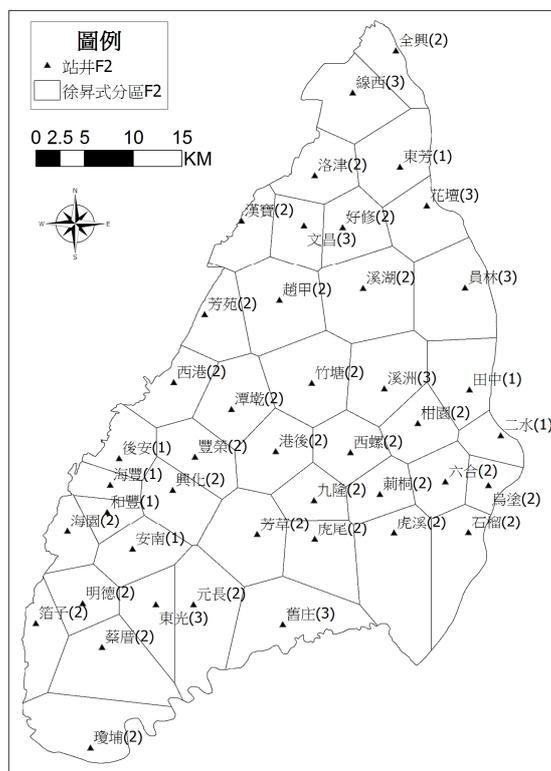


圖 15 含水層二徐昇氏分區

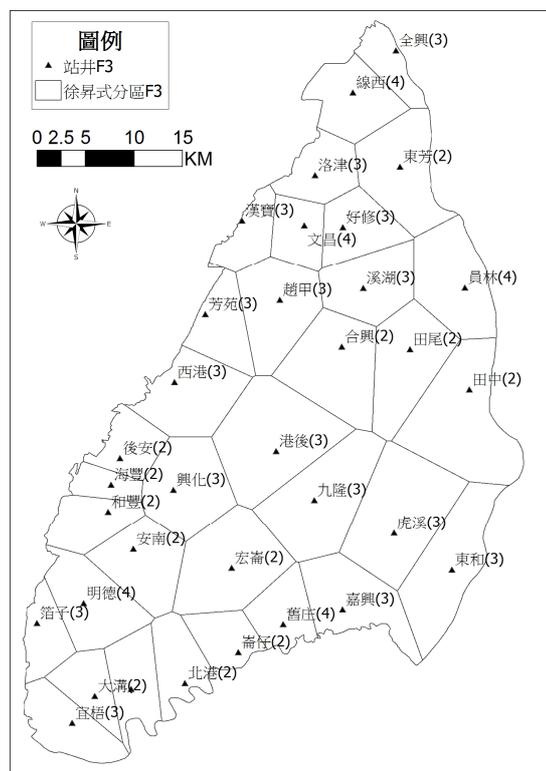


圖 16 含水層三徐昇氏分區

2. 儲水係數

由於儲水係數必須進行複井抽水試驗才能求得，因此儲水係數現地試驗數量，遠低於透水係數現地試驗數量，僅有 1/4 到 1/5 的觀測井進行複井抽水試驗，未有試驗資料之部分，將以現有資訊推估。

儲水係數輸入方式與透水係數相同，皆採用徐昇氏分區將點位型式之資料給定至整個沖積扇。在數值方面，取出同時有透水係數及儲水係數現地試驗資料之觀測井，將其分為受壓含水層及非受壓含水層，分別以透水係數對儲水係數進行線性迴歸，各得出一條回歸公式，再將所有觀測井之透水係數代入公式，即可推估出所有觀測井之儲水係數。

3. 阻水層設定

本計劃阻水層設定之依據乃藉由檢視水文地質鑽探柱狀圖、屏狀圖以及同一觀測井之分層觀測水位差，綜合分析後，予以適當之調整。調整方式說明如下所示：

首先檢視水文地質鑽探柱狀圖及屏狀圖後，若含水層內之某一範圍出現厚泥層阻隔，本研究則設定該範圍內之水力參數為阻水層等級之量值；若含水層間為砂泥互層情形，則再進一步分析該處觀測井之不同分層間的長期地下水位，若分層間之地下水位差異顯著，則代表該分層間有阻水效果，故應設定阻水層，若分層間之水位相近，幾乎一致，則此處無需設定阻水層。

4. 起始地下水水位

對於暫態模式而言，初始地下水水位代表模式之初始條件，不同初始條件影響模擬結果極巨，因此應選取適當之初始水位以得到較佳之模擬結果。本研究建置之水流模式為模擬 1996 年之地下水系統，此年為 4.1.7 節中，超越機率 10% 之乾旱事件所發生之年份。本研究設定之模擬時刻長度為月，模擬起始時刻為西元 1996 年 1 月，因此以西元 1995 年 12 月之平均水位作為起始水位。

5. 抽水量、補注量檢定

由於現地抽水量資料較不完整，且地下水補注為未知，故本研究將以參數檢定方式，檢定補注量與抽水量。

本研究設定之模擬時刻長度為月，參數檢定之依據為各觀測井之月平均水位，此外，本研究採用徐昇氏法進行參數分區，以降低參數維度。參數檢定則以本計劃第一年發展之參數檢定專家系統進行檢定。

4.4 局部加密模式建立

大區域之地下水數值模擬，由於模擬範圍較為廣泛，過小之網格往往耗用極大量之計算機資源。此外，大區域之地下水數值模擬問題主體多以整個系統為考

量，因此對於局部精度需求較低，因此，以往在建立濁水溪沖積扇地下水數值模擬，其網格大小多為 1~2 公里。然本研究之問題主體為救旱井設立之影響，欲應用數值模擬反映救旱井抽水之影響範圍與洩降程度等影響，則需極高之模擬精度，故本研究將針對救旱井所處局部區域以更精細之網格尺度進行模擬。

由於本研究以 MODFLOW 地下水數值模式進行問題探討，其為離散方法為有限差分法，受限於有限差分法之先天限制，若單純地在模擬區域局部加密區直接加密，則會使整體網格形成一個以局部加密區為中心之十字切細帶，其影響除了整個模式之計算量大增之外，亦造成部分網格長寬比例差異極大，亦是數值誤差之來源。因此需要其他方法之輔助，以便進行救旱井相鄰區域之模擬。

基於前述原因，本研究選用 USGS 所研究發展的 Telescopic Mesh Refinement(TMR)程式，作為救旱井相鄰區域局部加密模擬之解決方案。Telescopic Mesh Refinement(TMR)程式為美國陸軍工兵團(USGS)所研究發展，其中包含三個模組，分別為 MODTMR(MODFLOW Telescopic Mesh Refinement)、TMRDIFF(Telescopic Mesh Refinement Difference)及 RIVGRID，由於本計劃中僅使用 MODTMR 模組，故僅作 MODTMR 之說明。MODTMR 為 MODFLOW 程式之輔助程式，針對一個已經完成參數檢定之 MODFLOW 模式，設定好欲局部加密的區域範圍，重新建立另一局部加密 MODFLOW 模式，如圖 17 所示。

4.4.1 MODTMR 應用步驟：

- A. 針對所設定之局部加密區域，依據所設定之網格切密比例(或尺寸)，進行 MODFLOW 模式網格建立。此外，視情況所需，MODTMR 可依據不同角度之座標軸建立網格，或是針對含水層作垂直方向之加密，如圖 18 與圖 19 所示。
- B. 區域模式(regional model)已針對模擬區域之水文地質狀態設定各項水文地質參數，如各網格之 K、S 等數值，MODTMR 模組可直接讀取區域模式各網格之水文地質參數，再應用內插技術將所讀取之水文地質參數內插至加密後之各網格。
- C. 局部模式為真正模擬區域模式之一小區塊，邊界條件之給定分為兩種方式，一種為定水頭邊界條件，利用區域模式之模擬水頭值，內插至加密之後的網格上，作為局部模式定水頭邊界條件之給定；另一為定流量邊界條件，利用區域模式模擬之各網格間交換流量，可算出局部模式與相鄰區域之交換流量，以定流量邊界條件給定。
- D. 初始條件之給定共分三種方式，一為利用穩態之區域模式模擬結果內插後作為暫態局部模式之初始水位；一為利用穩態之局部模式模擬結果直接作為暫態局部模式之初始水位；另一則直接利用暫態之區域模式模擬結果內插後為暫態局部模式之初始水位，其概念如圖 20 所示

應用 MODTMR 程式後之產物為完整之 MODFLOW 局部模式之輸入檔，因此需要先應用 MODFLOW 程式計算局部模式之模擬結果，方能計算出欲進行救旱井設置分析，如：救旱井抽水之影響半徑與洩降程度等。

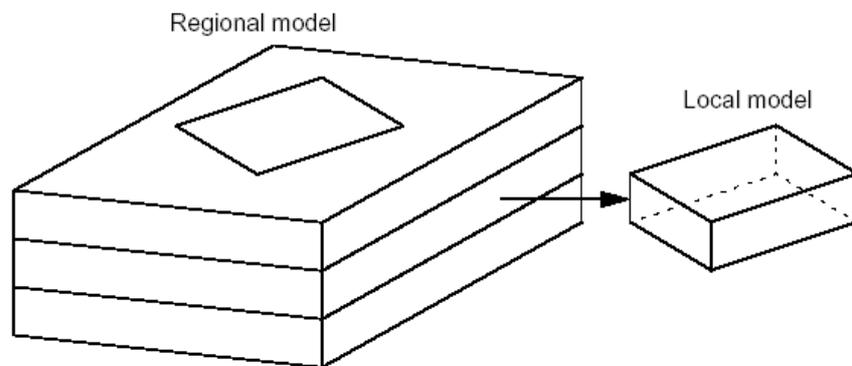


圖 17 TMR 示意圖

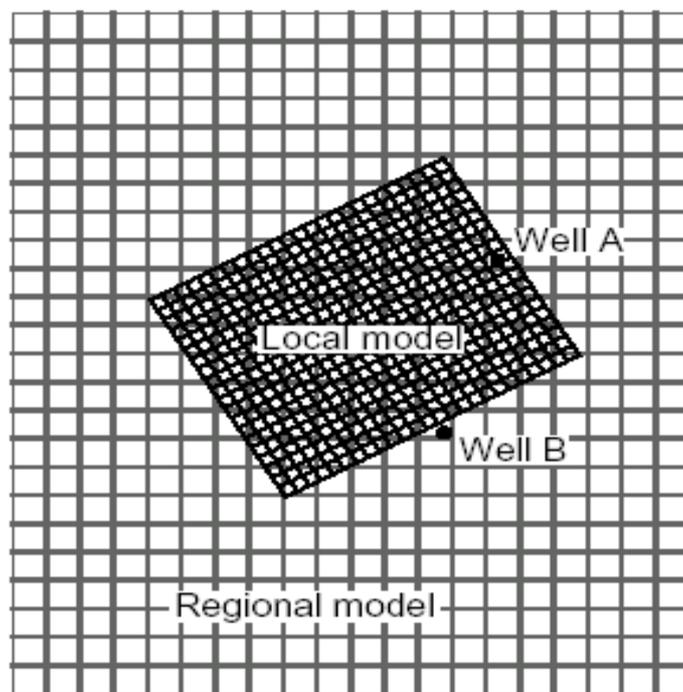


圖 18 區域模式(regional model)局部模式(local model)示意圖

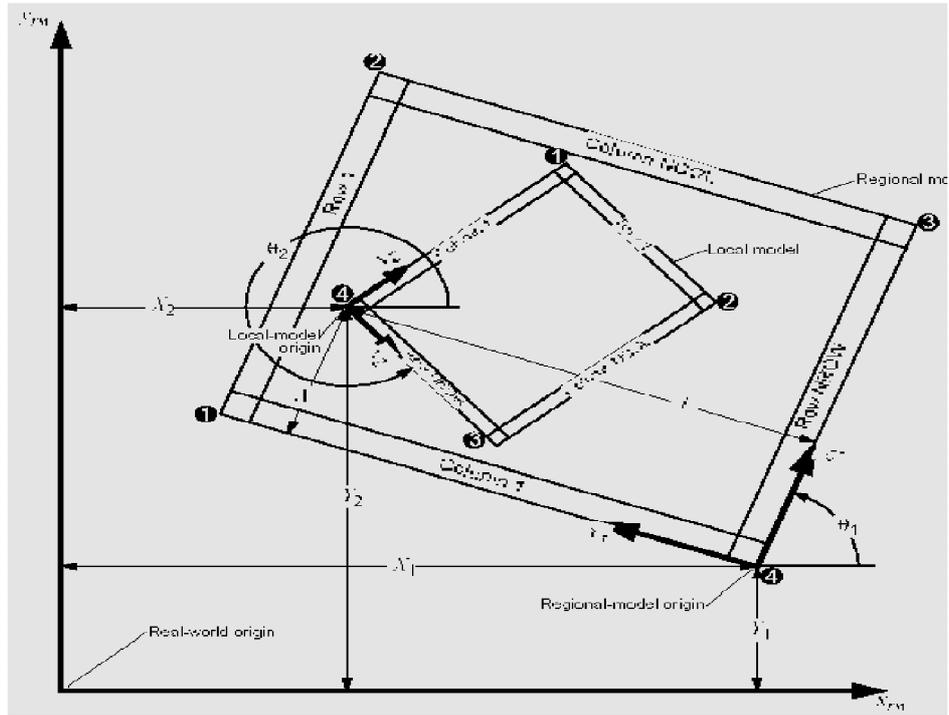


圖 19 真實世界-區域模式-局部模式座標軸設定示意圖

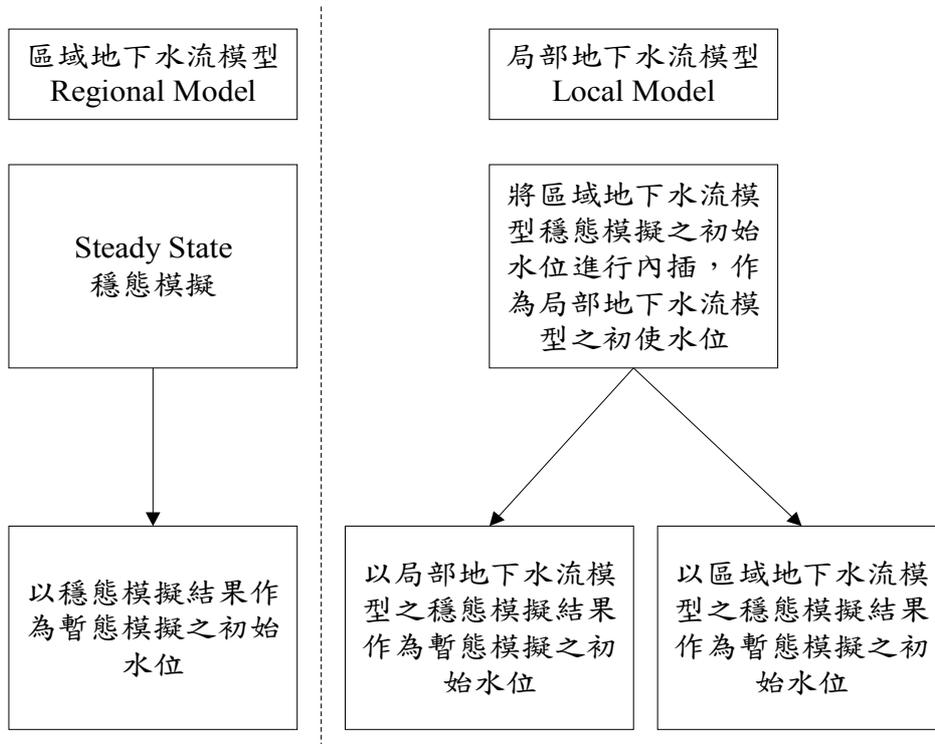


圖 20 區域模式與局部模式初始水位資料處理方式圖

4.5 地表水與地下水系統聯合營運模式建立

本研究之地表水與地下水系統之聯合營運系統如圖 21 所示，因考量濁水溪沖積扇為地層下陷嚴重區域，故在水資源之利用上，主要以地表水系統先供應需求，若地表水不足以供應，再以地下水供應，以盡量保留地下水為主要原則，而救旱井群之局部地下水量抽用上限為該區域之淨水場剩餘處理容量，地下水之水位限制則參考中興工程顧問公司於「濁水溪沖積扇地表地下聯合運用總報告」所採用之評估方法，取淨水場鄰近觀測井，以歷年資料求取平均值與標準偏差來推估安全水位與嚴重下限水位，並取其差值為本研究之容許洩降，作為水位限制。因此在井群抽水後，需先確認目前之抽水量是否滿足井群之抽水上限，若滿足，則需再確認局部地下水位是否滿足水位限制條件，若抽水量過大，則須再重新調整井群抽水量，直至水位滿足限制條件為止。接著，判斷地下水供水量是否滿足缺水量，若無法滿足需求則再挑選下一順位之淨水場區域，並重複上述限制條件之判斷，直至挑選完所有淨水場為止。

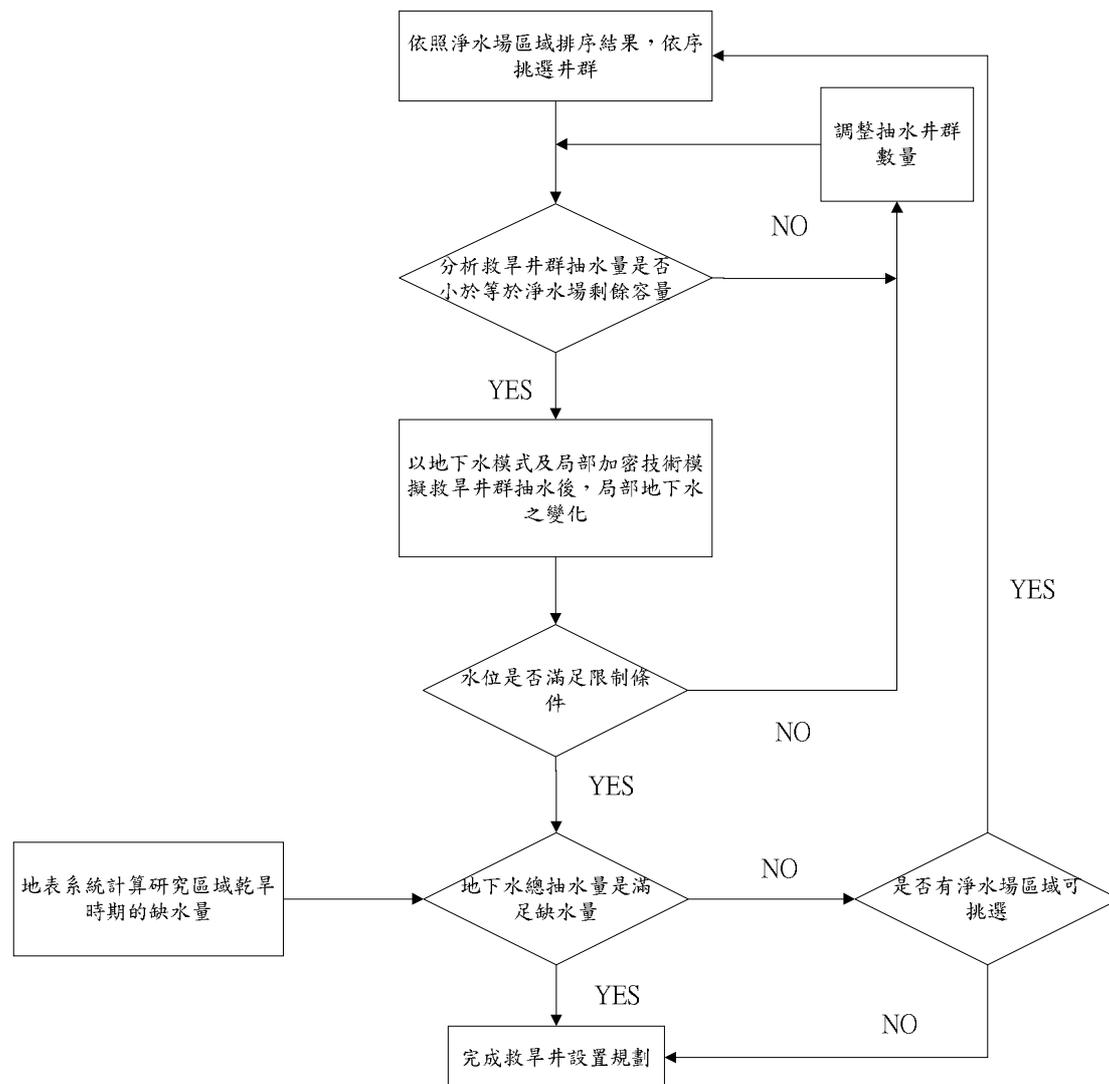


圖 21 乾旱時期地表水與地下水系統聯合營運系統圖

伍、結果與討論

5.1 地表水系統模擬成果

5.1.1 供水系統供水能力分析結果

濁水溪與湖山水庫聯合運用之供水能力為 44.3 萬立方公尺/日，與水規所 97 年「濁水溪水系現有水庫水資源聯合運用可行性評估(1)」推得 43.2 萬立方公尺/日接近，經與前期報告比對後，驗證本研究建立之水源調配模式確實可正確呈現濁水溪區域之水源調配規則。

5.1.2 乾旱事件分析結果

本研究以民國 120 年之公共用水中成長需求，分析濁水溪沖積扇民國 70 年至 99 年之 30 年間，公共用水缺水事件之超越機率，再取超越機率 10%、20% 及 30% 對應之缺水事件，作為乾旱事件分析之情境。超越機率圖如圖 22 所示，由圖可得各超越機率對應之缺水天數，再找出該機率所對應之缺水量，如表 8 所示。結果顯示乾旱時期各情境之缺水量偏高，因此需找尋替代水源以作為乾旱時期緊急應變之用，由於本區域之地下水量豐沛，因此擬設置救旱井作為乾旱時期緊急調配水源為可行方案之一。

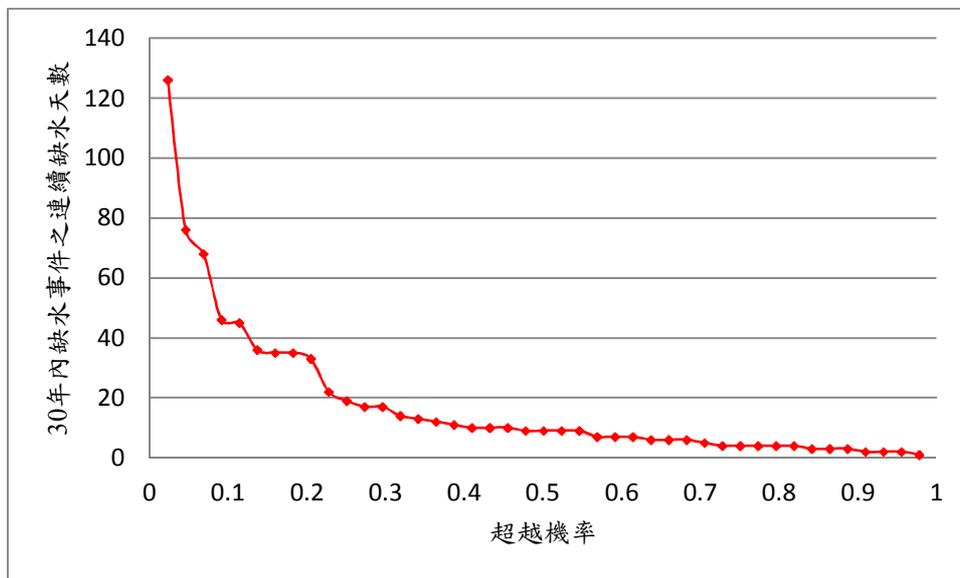


圖 22 濁水溪區域以民國 120 年中成長需求模擬所得缺水事件之超越機率圖

表 8 濁水溪各方案超越機率 20%下對應之連續缺水天數和公共缺水量

民國 120 年中成長	連續缺水天數 (天)	連續缺水量 (萬 m3)
超越機率(10%)	45	682
超越機率(20%)	33	413
超越機率(30%)	17	82

5.2 救早井設置成果

5.2.1 救早井設置格網篩選結果

因為決定水質合格與否以用飲用水水源水質標準當判定基準，且同一位置的觀測井，其中一層水質不合格就是不合格，因此圖 23 中，標紅色或綠色三角形所呈現的意義是同一觀測站中不同層次開口的觀測井的整體水質合格與否的結果。如圖 23 在濁水溪沖積扇範圍中代表水質合格的觀測站有 31 個佔全部的 48.4%，代表水質不合格的觀測站有 33 個佔全部的 51.6%。救早井設置可規劃區域的位置共有 34 個，代表水質合格的位置有 24 個佔可規劃設置救早井區域的 70.6%，佔全部的 37.5%，代表水質不合格的位置有 10 個佔可規劃區的 29.4%，佔全部的 15.6%。在地下水管制區域裡，代表水質合格的觀測站有 7 個佔整個管制區 23.3%，代表水質不合格的觀測站有 23 個佔整個管制區 76.7%，整體而言地下水管制區之水質較非地下水管制區差。

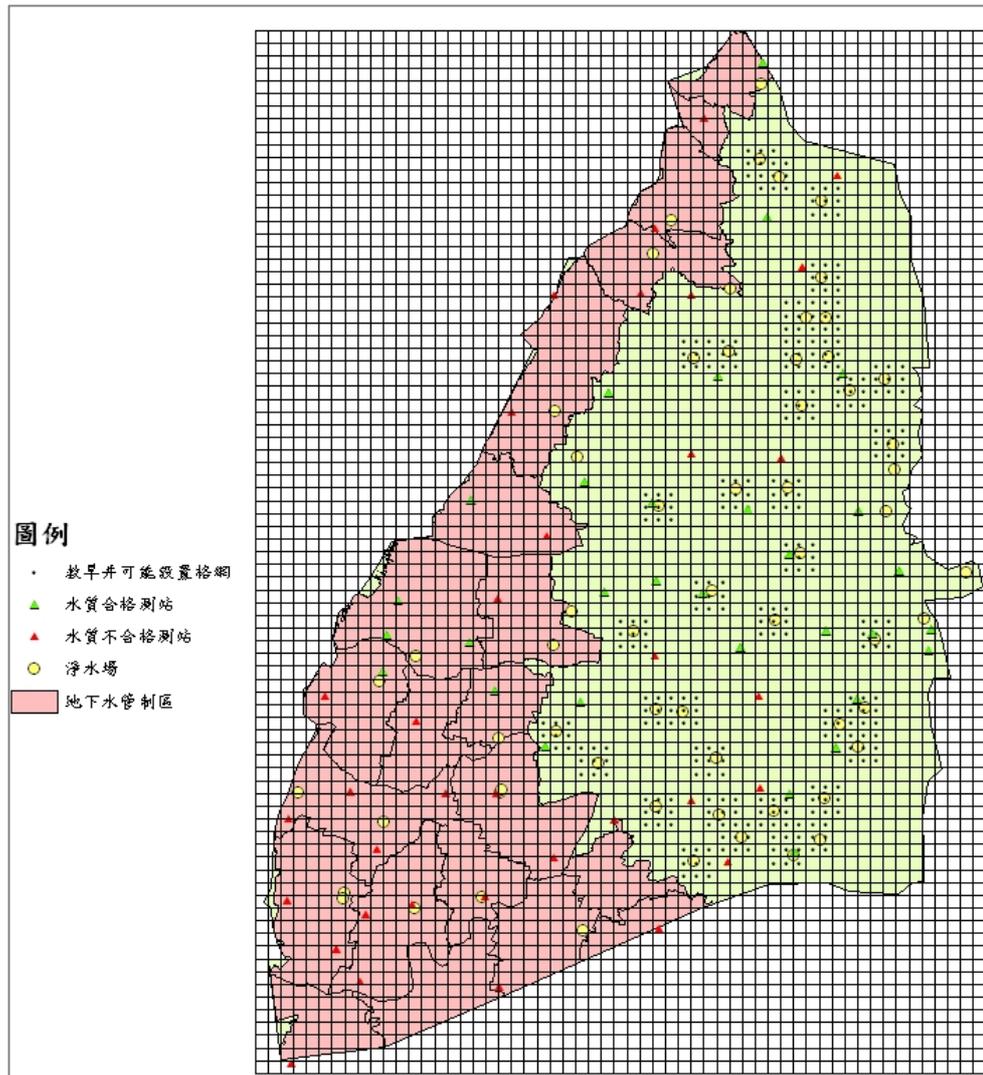


圖 23 濁水溪沖積扇格網篩選成果圖

5.2.2 救旱井設置格網區域排序結果

在本研究中，區域排序的根據為區域內九宮格之 Q/S 值之總和，所以區域排序所呈現的結果反映出了該區域的出水能力大小；區域排序愈前面者，該區域之出水能力愈大。由圖 24 及表 9 所示，濁水溪沖積扇的排序由大到小依序為：(一)下壩淨水場(二)西螺淨水場.....等共 38 個，排名較前面的幾乎都在河川的兩側，位於整個濁水溪沖積扇中間的部分。

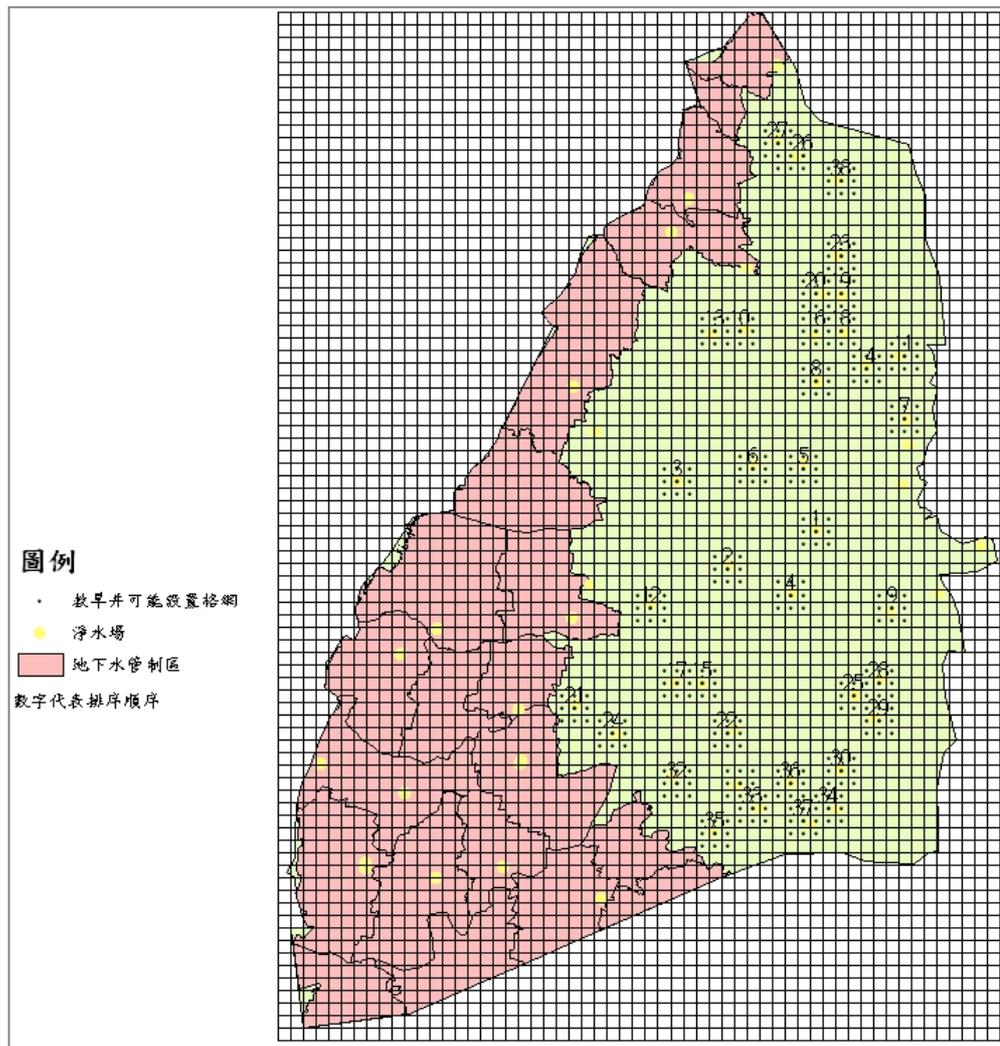


圖 24 濁水溪沖積扇平原區域排序成果圖

表 9 濁水溪沖積扇飲用水水源水質標準篩選合格淨水場之基本資料表

淨水場名稱	TM2_X	TM2_Y	淨水場設計容量 (m ³ /day)	淨水場平均處理量 (m ³ /day)	淨水場剩餘容量 (m ³ /day)	水源別	區域淨水場排序
彰化第三淨水場	200945.01	2665385.35	40000	30000	10000	地下水	26
彰化第一淨水場	204168.71	2663546.16	4000	0	4000	地下水	38
和美淨水場	199397.92	2666837.11	8000	7000	1000	地下水	27
社頭淨水場	209736.33	2644427.08	17500	11000	6500	地下水	7
大村臨時淨水場	203042.61	2654384.25	4000	3500	500	地下水	20
埔心淨水場	202262.81	2651065.86	24000	8000	16000	地下水	16
員林第二淨水場	204776.95	2651250.25	24000	24000	0	地下水	14
員林第三淨水場	206389.44	2648687.75	24000	24000	0	地下水	18
花壇淨水場	204226.07	2657497.97	20000	16500	3500	地下水	23
永靖淨水場	202647.09	2647422.71	15900	11000	4900	地下水	8

員林第一淨水場	209081.06	2649528	23000	23000	0	地下水	11
下壩淨水場	202560.59	2635813.88	16000	8000	8000	地下水	1
溪湖第二淨水場	194205.87	2651177.93	12000	10400	1600	地下水	13
溪湖第一淨水場	197026.47	2651675.97	16400	15500	900	地下水	10
竹塘淨水場	191559.6	2639570.06	5200	6000	0	地下水	3
北斗第二淨水場	201527.07	2640949.72	15200	15200	0	地下水	5
櫻花臨時淨水場	204492.5	2654303.34	4000	2600	1400	地下水	19
埤頭淨水場	197541.53	2640862.15	20000	6000	14000	地面水	6
石龜淨水場	196222.08	2615298.25	4500	2200	2300	地下水	31
大埤淨水場	191237.45	2615987.75	6600	3250	3350	地下水	32
阿丹淨水場	200472.11	2615615	17000	16700	300	地下水	36
大林第二淨水場	197937.35	2613512.75	5500	3500	2000	地下水	33
大林第一淨水場	194268.69	2611686	8000	7500	500	地下水	35
西螺淨水場	195643.92	2632869.25	27000	14500	12500	地下水	2
荊桐淨水場	200605.69	2630636.25	17500	9000	8500	地下水	4
斗南淨水場	195941.53	2619779.25	6000	4920	1080	地下水	22
平和淨水場	193401.14	2623348.5	12000	11415	585	地下水	15
虎尾淨水場	191328.33	2623607	15500	14030	1470	地下水	17
二崙淨水場	189493.52	2629775	7220	5800	1420	地下水	12
古坑淨水場	204369.28	2616562.25	12000	5700	6300	地下水	30
新莊淨水場	207059.47	2620655.25	900	480	420	地下水	29
永光淨水場	204050.58	2613313.06	5900	2405	3495	地下水	34
埤仔頭淨水場	205644.88	2622443.25	42980	33588	9392	地下水	25
土庫淨水場	186767.72	2619326.75	9800	6000	3800	地下水	24
馬光淨水場	183517.08	2621814	6600	3600	3000	地下水	21
石榴淨水場	207649.13	2623750.42	15000	0	15000	地下水	28
炭腳淨水場	202043.27	2612104.25	12000	6000	6000	地下水	37
林內淨水場	208336.91	2629117.93	0	0	0	地面水	9

5.3 暫態數值模式模擬成果

5.3.1 模式參式檢定結果

此部份主要呈現檢定誤差在空間上的分佈。圖 25~27 分別為濁水溪沖積扇第一分層、第三分層與第五分層各時刻所有模擬值之均方根誤差等值圖，等值線的間距為 0.1 公尺。圖中顯示均方根誤差皆小於 1.5 公尺，檢定成果良好。故此模式已具有描述研究區域地下水系統特性之能力。

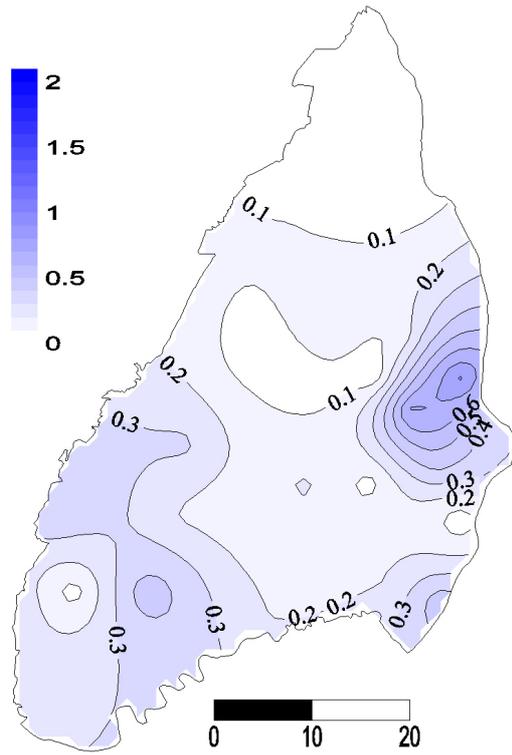


圖 25 第一分層誤差均方根等

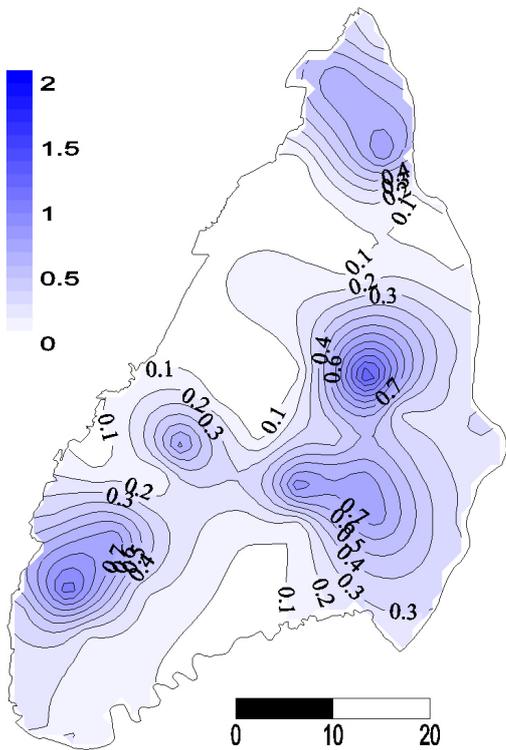


圖 26 第三分層誤差均方根

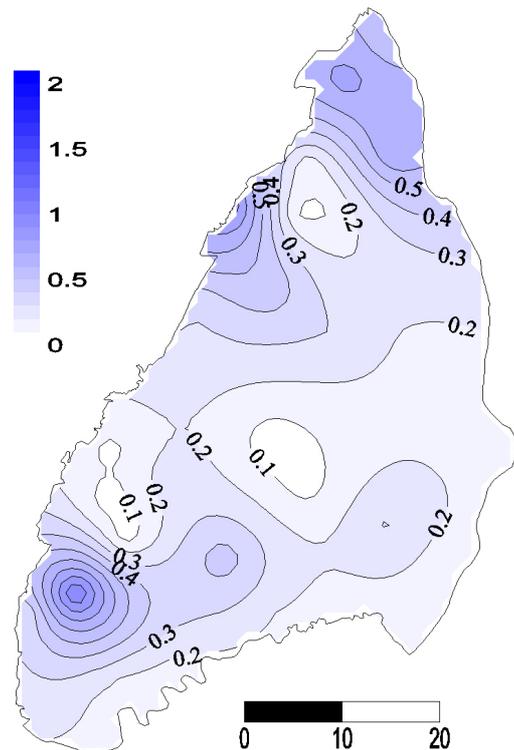


圖 27 第五分層誤差均方根

5.4 局部加密應用模擬分析

5.4.1 救旱井設置對局部地下水系統之影響評估

藉由救旱井抽出之地下原水需藉由相鄰區域之淨水場處理，方可透過與淨水場相連之輸送網路輸送至需求點，所以在淨水場九宮格區域內之救旱井額外抽水量與現有處理量之和需小於或等於淨水場的設計容量，亦即九宮格區域內之最大抽水量總和即為淨水場之剩餘容量，其中淨水場之剩餘容量即為淨水場設計容量扣除淨水場平均已處理量。淨水場九宮格區域內救旱井所抽出之原水，需送往淨水場處理，而一個淨水場所能處理的總量即為淨水場的設計容量。濁水溪沖積扇之淨水場總日剩餘處理容量為153712噸，而此抽水量即為救旱井群之抽水上限。由表8可知，超越機率為10%之乾旱程度，其缺水天數為45天，但因本研究之模擬時刻為月，故將乾旱時期抽水天數由原本的45天延長為60天，意即2個月，此條件之抽水時間更長，可更嚴格的審視抽水後之局部區域地下水位變化；模擬總期距為12個月。由超越機率10%之乾旱事件所對應之缺水量可知，缺水量約與地下水可用水量相當，因此本研究選取剩餘容量最大之埔心淨水場作為示範案例，並實際模擬依據淨水場剩餘容量(16000噸/天)抽用地下水時，救旱井相鄰區域之洩降影響，如此一來，若埔心淨水場能通過檢視時，其他剩餘容量較少之淨水場必能符合限制條件。

由於濁水溪沖積扇以第三含水層為主要抽水含水層，因此救旱井之設置規劃於含水層三抽水。實作步驟如下所示：

1. 將濁水溪沖積扇內各淨水場剩餘容量平均分攤於以各淨水場為中心之相鄰九個網格(3×3)，並藉由MODFLOW程式計算其模擬結果，即可得到在此抽水條件下網格與網格間的流動狀態。
2. 為了使局部格網模式模擬更為精確，局部格網模式模擬範圍除了救旱井抽水之九宮格外，另外向外延伸一格，亦即定義其模擬範圍為25格(5×5)，局部格網加密程式將針對二十五格區域進行局部加密動作。本研究以100×100平方公尺為局部加密後之網格大小，原本未加密之格網大小為1×1平方公里，經由局部加密後每個1×1平方公里的格網會變成100個100×100平方公尺的格網。亦即局部加密後的網格總數為2500格。
3. MODTMR格網加密程式在well package上的處理如下：

將未加密之網格抽水量，直接給在位在距離網格中心點最近的加密後網格上，換言之原本於1×1公里網格的總抽水體積，將位於100×100平方公尺的網格中，並非目前救旱井所欲設置的型態。因此，需將抽水量平均分攤給其他99

個網格。

4. 針對淨水場剩餘容量最大的淨水場區域進行加密分析的步驟：

(a)利用原始未增加救旱井抽水量之區域模式作局部加密的動作，並以 MODFLOW 程式計算該區域未額外抽水時之模擬水位值。

(b)利用前述增加救旱井抽水量之區域模式作局部加密的動作，並以 MODFLOW 程式計算該區域啟用救旱井抽水時之模擬水位值。

(c)以未增加救旱井抽水量局部格網模式之模擬水位值扣除增加救旱井抽水量之模擬水位值，即為救旱井抽水之洩降量。

5. 結果分析

濁水溪沖積扇選定埔心淨水場為該區域之模擬案例，以埔心淨水場為中心之二十五宮格區域為局部加密的模擬區域，淨水場剩餘容量為每天 16,000 噸，以該數值視為救旱井抽水量，平均分攤至以淨水場為中心之九宮格。本研究取區域中心及下游端水位最低處兩點為地下水位觀察對象，如圖 28 所示。因本研究之地下水模式為月模擬，因此無法模擬 45 天，因此模擬天數改為 60 天，即兩個月。在救旱井啟用 2 個月後，中心點洩降為 1.82 公尺，區域下游端洩降為 1.56 公尺，此後救旱井停用，到該年 12 月時，區域中心洩降為 0.36 公尺，下游端洩降為 0.37 公尺，水位已有回升之現象，如圖 29 及圖 30 所示。由於埔心淨水場屬於濁水溪沖積扇剩餘容量最大之淨水場，其剩餘容量僅 16000 噸/天，此量值尚小，因此局部區域之洩降程度偏小，單純由洩降量判斷，此區域設置救旱井短期抽水應處於安全範圍內。

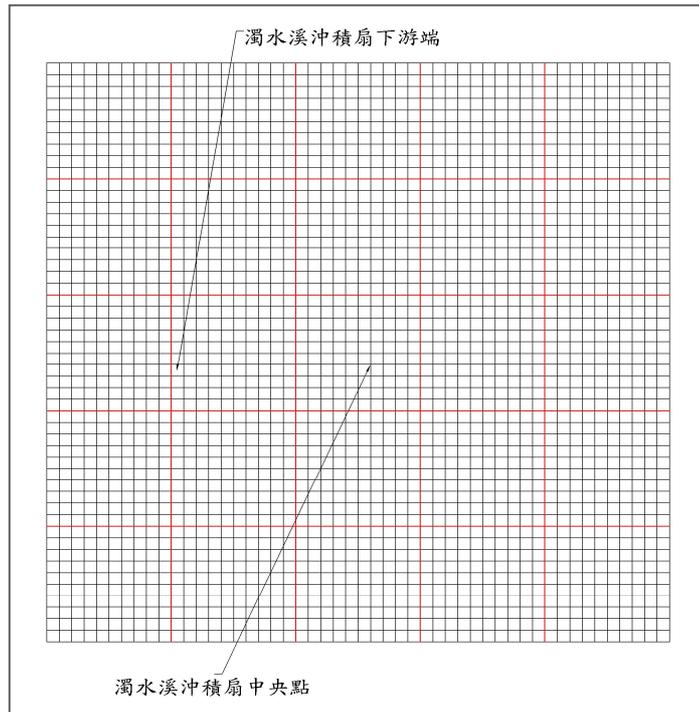


圖 28 局部區域觀測點位置圖

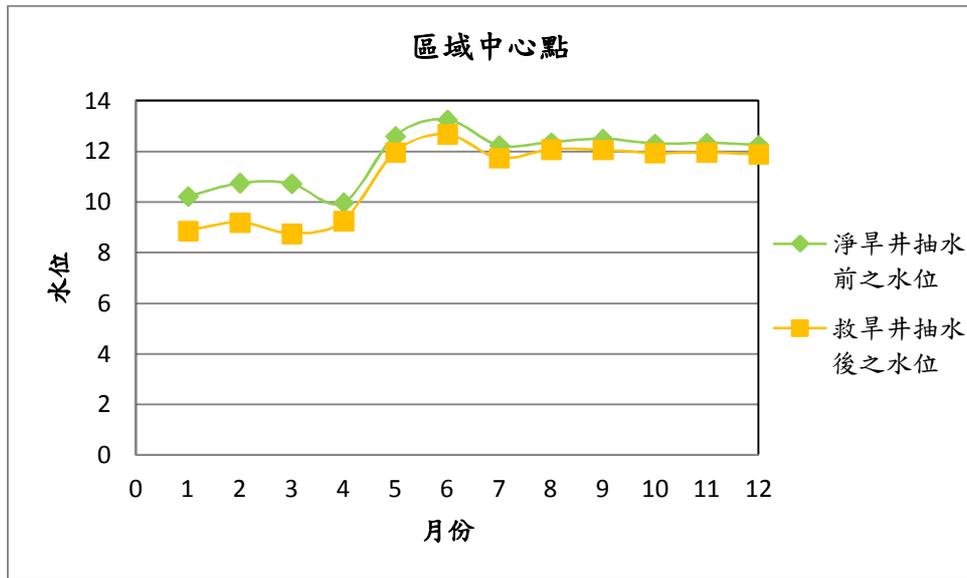


圖 29 埔心淨水場區域中央點抽水前後水位變化歷線

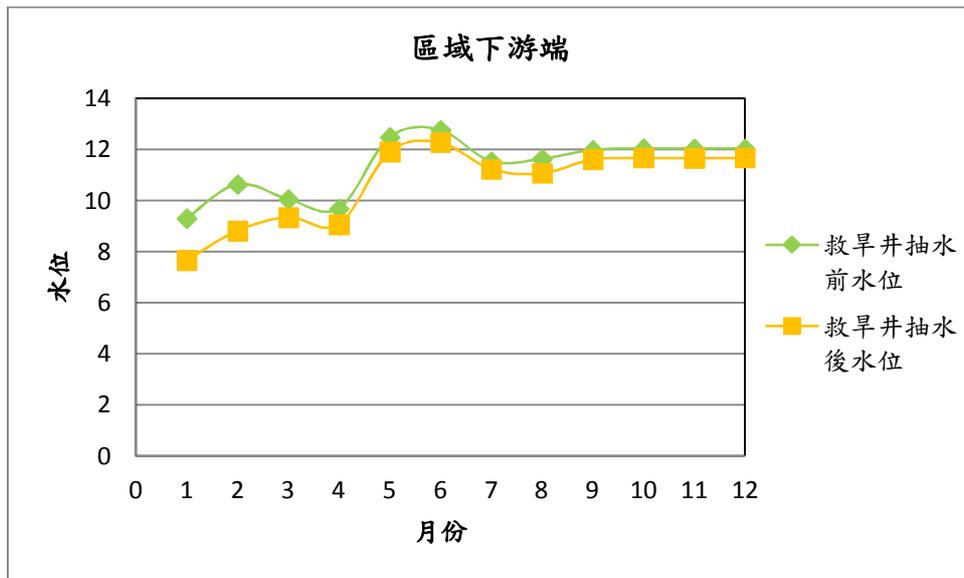


圖 30 埔心淨水場區域中央點抽水前後水位變化歷線

5.5 乾旱時期水資源調配綜合分析

由於台灣的缺水型態往往在一個颱風來臨後，便可紓解其旱象，因此連續缺水天數的考量就顯得比缺水量因素重要，因此本研究以民國 70 年至 99 年的連續缺水天數來判斷缺水的嚴重程度，並以連續缺水天數之超越機率 10%，20%與 30%所對應之乾旱事件進行情境模擬。

在前一小節透過地下水流模式模擬後，確認此區域之地下水可作為乾旱時期之緊急備用水源，而此區救旱井之供水容量上限等同總淨水廠之剩餘處理容量，經統計結果，本區域救旱井每日供水容量為 153712 噸，若以 4.1.7 節三種情境所對應之缺水天數作為乾旱井操作時間，可得此三種情境之總可抽水量如表 10 所示，由表可知救旱井之總可抽水量可滿足地表水系統之缺水量。

表 10 各乾旱情境之連續缺水天數、缺水量及乾旱井群最大可抽水量

民國 120 年中成長	連續缺水天數 (天)	連續缺水量 (萬噸)	乾旱時期救旱井之最大可抽水量 (萬噸)
超越機率(10%)	45	689	697
超越機率(20%)	33	413	507
超越機率(30%)	17	82	261

陸、結論與建議

1. 本研究提出一套完整的方法與流程進行救旱井之規劃與設置，此種作法不僅能有效地進行乾旱時期地下水之抽用分析，更易於整合為乾旱時期地下水決策支援系統之支援模組。
2. 由濁水溪沖積扇之超越機率圖顯示，在乾旱時期所對應之缺水量普遍偏高，因此需找尋替代水源以作為乾旱時期緊急應變之用，由於研究區域之地下水量豐沛，故本研究擬設置救旱井作為乾旱時期緊急調配水源。
3. 由局部加密模式(MODTMR)模擬淨水場區域短期抽水的水位變化，其抽水量則受到淨水場剩餘容量的限制；淨水場抽水區域內之洩降於抽水期間內明顯增加，但在停止抽水經過 10 個月後洩降即減少至 1 公尺以下。所以水位在短期抽水後，經過一段時間還是可以回復至接近原水位。
4. 由情境模擬結果得知，濁水溪沖積扇地表水加入救旱井調配後可滿足乾旱期間的缺水量，且由局部加密模式(MODTMR)模擬淨水場區域短期抽水的水位變化時，發現水位在救旱井操作抽水後，經過一段時間還是可以回復至接近原水位。因此救旱井確可作為乾旱時期緊急水源調配之用。

柒、參考文獻

- Abbott, M. B. (1991), *Hydroinformatics: information technology and the aquatic environment*, Avebury Technical.
- Başağaoğlu, H., and M. A. Mariño (1999), Joint management of surface and ground water supplies, *Ground Water*, 37(2), 214-222.
- Black, G., and A. Black (2012), PEST controlled: responsible application of inverse techniques on UK groundwater models, *Geological Society, London, Special Publications*, 364(1), 353-373.
- Boyle, D. P., H. V. Gupta, S. Sorooshian, V. Koren, Z. Zhang, and M. Smith (2001), Toward improved streamflow forecasts: Value of semidistributed modeling, *Water Resources Research*, 37(11), 2749-2759.
- Chau, K. (2003), Manipulation of numerical coastal flow and water quality models, *Environmental Modelling & Software*, 18(2), 99-108.
- Chau, K. (2004), Intelligent manipulation of calibration parameters in numerical modeling, *Advances in Environmental Research*, 8(3), 467-476.
- Chau, K. (2006), A review on integration of artificial intelligence into water quality modelling, *Marine pollution bulletin*, 52(7), 726-733.
- Chau, K., and F. Albermani (2002), Expert system application on preliminary design of water retaining structures, *Expert Systems with Applications*, 22(2), 169-178.
- Chau, K., and F. Albermani (2003), Knowledge-based system on optimum design of

liquid retaining structures with genetic algorithms, *Journal of Structural Engineering*, 129(10), 1312-1321.

Chau, K., and W. Chen (2001), An example of expert system on numerical modelling system in coastal processes, *Advances in Engineering Software*, 32(9), 695-703.

Gorelick, S. M. (1983), A review of distributed parameter groundwater management modeling methods, *Water Resources Research*, 19(2), 305-319.

Hill, M. C. (1992), A Computer Program(MODFLOWP) for Estimating Parameters of a Transient, Three-dimensional, Ground-water Flow Model Using Nonlinear Regression, *Available from Books and Open Files Reports Section, USGS Box 25425, Denver, CO 80225. USGS Open File Report 91-484, 1992. 358 p, 17 fig, 3 tab, 80 ref, 3 append.*

Kim, S. M., B. L. Benham, K. M. Brannan, R. W. Zeckoski, and J. Doherty (2007), Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods, *Water resources research*, 43(1), W01402.

Madsen, H. (2000), Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives, *Journal of hydrology*, 235(3), 276-288.

Madsen, H., G. Wilson, and H. C. Ammentorp (2002), Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models, *Journal of Hydrology*, 261(1), 48-59.

Mazi, K., A. Koussis, P. Restrepo, and D. Koutsoyiannis (2004), A groundwater-based, objective-heuristic parameter optimisation method for a precipitation-runoff model and its application to a semi-arid basin, *Journal of Hydrology*, 290(3), 243-258.

Randall, D., L. Cleland, C. S. Kuehne, W. George, and D. P. Sheer (1997), Water supply planning simulation model using mixed-integer linear programming "Engine", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2), 116-124.

Scanlon, B. R., R. E. Mace, M. E. Barrett, and B. Smith (2003), Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA, *Journal of Hydrology*, 276(1), 137-158.

Taylor, A., N. Martin, E. Everard, and T. Kelly (2012), Modelling the Vale of St Albans: parameter estimation and dual storage, *Geological Society, London, Special Publications*, 364(1), 193-204.

Watkins, D. W., and D. C. McKinney (1998), Decomposition methods for water resources optimization models with fixed costs, *Advances in Water Resources*, 21(4), 283-295.

徐年盛 (1995), 區域性地表水與地下水最佳聯合營運模式之研究, edited, 國家科學委員會, 台北.

楊朝仲 (2002), 應用遺傳演算法與可微分動態規畫於地表地下聯合營運之多目

標規劃，國立交通大學，新竹。

顏榮祥，周乃昉，and 陳家榮 (1998)，南部區域水資源管理調配策略之比較，
paper presented at 第九屆水利工程研討會，桃園。