

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

區域性地下水系統水流模式率定方法建立與應用-以濁水溪沖

積扇為例

Development and Application of Regional Groundwater
Numerical Model Calibration Methodology, A Case Study of
Chou-Shui River Alluvial Fan

許富建

Fu-Jian Shiu

指導教授：徐年盛 博士

Advisor Prof.: Nien-Sheng Hsu, Ph.D.

中華民國 105 年 7 月

July, 2016

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

區域性地下水系統水流模式率定方法建立與應用-以濁
水溪沖積扇為例

Development and Application of Groundwater Numerical
Model Calibration Methodology, A Case Study of Chou-
Shui River Alluvial Fan

本論文係許富建君 (R03521308) 在國立臺灣大學土木工程學系
碩士班完成之碩士學位論文，於民國 105 年 07 月 22 日承下列考試委
員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

徐年盛

(指導教授)

江崇榮

張良正

劉振宇

李振誥

系主任

呂良正

徐年盛

江崇榮

張良正

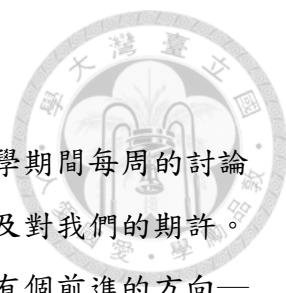
劉振宇

李振誥

呂良正

(簽名)

誌謝



承蒙徐老師的指導，才能讓我順利完成這篇碩士論文，在學期間每周的討論不僅僅只有討論計畫、研究，更多的是老師對於人生的體悟以及對我們的期許。此外也非常感謝徐門學長姊的照顧，讓我在研究所這段時間能有個前進的方向——宏仁學長總是在計畫上遇到問題時給予很大的幫助，經常給予我鼓勵以及建議，並且給我許多出差學習的機會；建霖學長在研究上給予了我相當大的幫助，每次的討論總能有非常豐富的收穫；筱玫學姊總是為我們學弟妹著想，給予我們很多的建議與關心；聖婷學姊在地下水的課程上幫助我們相當多，於研究上也給予了很大的幫助；家訓學長非常細心且有耐心地交接淡江計畫給我；振優、耀賢、瑜萱以及善元在碩一時罩我們咪聽與帶給我們歡樂，是我們努力學習的榜樣！

還有徐門一起奮鬥努力的同學們——哲廷與晨堃，一起修課做報告度過了沒有論文壓力的碩一，碩二時一起互相 cover 打氣加油，終於熬到了口試結束完成碩士論文，研究所期間能夠有你們這兩位同學一起奮鬥做研究真的很棒！徐門的學弟妹們——阿鈕、亦歡、斯文、佑鈞，感謝有你們進來徐門，不用每周泡茶訂便當真的很開心，未來一年的日子換你們成為主角了，加油！

在研究所期間能夠認識很多很棒的同學——欣宜、亭霞、志中、庭谷、勁捷、棕翰、品慶、絮晰、鈺捷、文璋、千輔等等，是我進入台大研究所最大的收穫之一。在我研究卡關時給予我相當多的鼓勵與支持、在我心情不好時給予我相當多的關心與陪伴、在我感覺到迷惘時給我方向與建議，讓我在研究所這段期間充滿著歡樂與感動，有了你們我的碩士生活才能夠過的這麼完整與充實。而在這段期間也默默地獲得了幾個稱號，參與了不少人的研究，讓我的碩士生活不會無聊，也讓我從中獲得了許多。真的，非常的感動與感謝這段期間有大家一起努力奮鬥、歡笑、抱怨以及扶持。此外還要感謝我的女朋友，在我完成碩士論文之前未曾出現，讓我能夠相當專心地完成我的研究。

最後，要感謝我的家人，總是無條件的支持我唸書，從國中、高中、大學、研究所一路上不曾給過我一定要考上哪間的壓力，而是給我選擇的機會以及強力的支持，讓我能夠無後顧之憂的完成我的碩士學位，沒有你們就沒有現在我，我愛你們！

中文摘要

本研究目的為建立一區域性地下水流模式之率定方法，以經驗正交函數法配合地下水流模式之模擬誤差歷線，快速且準確地掌握地面水補注量與水文地質參數之時間與空間分布資訊，並針對地下水系統之地面水補注量以及水文地質參數進行修正，最後將該方法應用於濁水溪沖積扇。

本研究以優選模式建立地下水流數值模式率定方法，首先設定目標函數為使模擬與觀測之蓄水量誤差百分比均方根誤差(RMSE 值)最小，其優選模式之決策變數為水平水力傳導係數、垂直滲漏係數以及地面水補注量之時空分布；限制式設定為三條：(1)地面水補注量於率定過程中須符合質量守恆；(2)地下水位之模擬結果須符合地下水流控制方程式；(3)水平水力傳導係數與垂直滲漏係數有一合理範圍之限制。求解流程首先為設定決策變數初始值，輸入地下水流模式進行地下水位之模擬，並計算其目標函數判斷是否達成停止條件，若否則計算蓄水量誤差歷線，並利用經驗正交函數分析地下水流模式之蓄水量模擬誤差歷線，計算決策變數之修正量，以進行地面水補注量與水文地質參數之修正，完成一次迭代過程，經過數次迭代求解達到停止條件後便完成地下水流參數優選模式之率定，獲得地面水淨補注量與水文地質參數之最佳時空分布。

本研究將所建立之參數率定優選模式應用於濁水溪沖積扇地下水流數值模式率定，其地下水流模式之模擬年限為 2012 年 1 月至 2014 年 12 月，以月為時間單位進行模擬，求解過程中同時針對四層含水層共 126 個水平水力傳導係數分區、96 個垂直滲漏係數分區以及 1302 個地面水補注量之時空分布進行率定計算修正量。率定結果發現，於優選模式迭代初期，其地下水位模擬誤差 RMSE 值下降幅度最大，於第 5 次迭代之後其地下水位模擬誤差 RMSE 值幾乎呈現較穩定下降狀態，最後於第 24 次迭代時而達到停止條件，完成模式率定。率定完成之水平水力傳導係數與垂直滲漏係數大多數皆在合理範圍內，其地下水流數值模式能夠準確模擬含水層(一)之水位變化趨勢與豐枯水期地下水位值；含水層(二)至含水層(四)之地下水位模擬結果亦能大致抓到水位變化之趨勢。顯示本研究方法能夠快速且準確的掌握地下水補注量與水文地質參數之時間與空間分布資訊，並反饋回地下水流數值模式中，以獲得準確且良好之地下水流數值模式。

關鍵字：濁水溪沖積扇、經驗正交函數、優選模式、參數率定

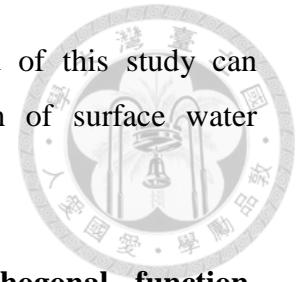
ABSTRACT

This study is aimed to develop a regional groundwater numerical model calibration method, which applies empirical orthogonal function (EOF) with simulated error hydrograph of groundwater level to quickly and accurately catch and calibrate the temporal-spatial distribution of surface water recharge and hydrogeological parameters. The established method was applied on the groundwater system of Chou-Shui River Alluvial Fan.

The proposed groundwater parameters calibration method is based on an optimization model which the objective function is minimizing the the root mean square error (RMSE) of the simulated and observed average error in groundwater storage. The decision variables are horizontal hydraulic conductivity, vertical leakance and surface water recharge. There are three constraints of the optimization model: (1) the surface water recharge of groundwater system in every iteration of calibrating process must obey the mass balance; (2) the simulated groundwater level must follow the governing equation of groundwater flow; (3) the value of horizontal hydraulic conductivity and vertical leakance are restricted to a reasonable limits. The process of the optimization model sets the initial value of decision variables first, and inputs the variables to groundwater model. Thus, the groundwater level can be simulated and the objective function will be estimated. If the objective function doesn't satisfy the stop condition, the simulated error hydrograph of groundwater level will be calculated and analyzed with EOF. Then, the modified decision variables is calculator according to the simulated error hydrograph of groundwater level end the result of EOF analysis. From iterations, the optimal temporal-spatial distribution of surface water recharge and hydrogeological parameters can be obtain.

This study applied the optimization model on the calibration of the groundwater system in Chou-Shui River Alluvial Fan. The simulated period is from January 2012 to December 2014 monthly. The total variables of hydraulic conductivity in four aquifers are 126, of vertical leakance are 96. There are 1302 the surface water recharge temporal-spatial distribution in all stress period. The result show that the RMSE is decreased dramatically in early iteration of the calibration and become smoothly after 5th iteration and finally stop at 24th iteration. The calibrated hydraulic conductivity and vertical leakance are mostly in reasonable limits. The simulated groundwater level can reflect the approximately trendance in all aquifer and can capture the peak of the

observed value in first aquifer. Hence, the established method of this study can effectively and accurately calibrate temporal-spatial distribution of surface water recharge and hydrogeological parameters.



Keywords: Chou-Shui River Alluvial Fan, Empirical orthogonal function, Optimization model, Parameters calibration

目錄



口試委員會審定書	#
誌謝	i
中文摘要	ii
ABSTRACT	iii
目錄	v
圖目錄	vii
表目錄	x
第一章 緒論.....	1
1.1 研究緣起	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究流程	2
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 地下水系統流出流入量辨識	4
2.2 地下水流數值模式	6
2.3 經驗正交函數	8
第三章 方法建立.....	9
3.1 優選模式建立	9
3.1.1 決策變數.....	10
3.1.2 限制式.....	13
3.1.3 目標函數.....	24
3.2 優選模式求解流程	24
3.2.1 設定決策變數初始值.....	25
3.2.2 地下水流數值模式模擬地下水位值.....	27
3.2.3 判斷停止條件.....	27
3.2.4 計算蓄水量誤差歷線.....	27
3.2.5 計算決策變數修正量.....	28
第四章 方法應用.....	32

4.1	研究區域概述	33
4.1.1	名竹盆地	33
4.1.2	濁水溪沖積扇	39
4.2	含水層概念分層與邊界辨識	43
4.2.1	名竹盆地	43
4.2.2	濁水溪沖積扇	46
4.3	地下水系統流出流入量辨識	49
4.3.1	名竹盆地	49
4.3.2	濁水溪沖積扇	54
4.4	地下水流數值模式建立	60
4.4.1	模擬範圍與邊界條件設定	60
4.4.2	地層分層與數值網格設定	61
4.4.3	水文地質參數分區與設定	62
4.4.4	起始水位設定	69
4.4.5	河流演算套件設定	69
4.4.6	抽水量設定	72
4.4.7	地下水系統補注量分區與初始設定	73
4.5	地下水流數值模式率定結果	80
4.5.1	名竹盆地	80
4.5.2	濁水溪沖積扇	83
第五章	結論與建議	103
5.1	結論	104
5.2	建議	104
	參考文獻	106
	附錄—用電量推估法	108

圖目錄

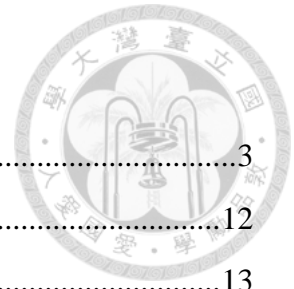


圖 1-1 研究流程.....	3
圖 3-1 兩相鄰垂向透水係數示意圖.....	12
圖 3-2 水力傳導係數與地面水補注量於水平空間分布示意圖.....	13
圖 3-3 水力傳導係數、垂直滲漏係數、以及雨水補注量於垂直空間分布示意圖.....	13
圖 3-4 多類型灌溉形式下地下水系統抽水與補注量估算流程.....	15
圖 3-5 地下水蓄水量計算方式.....	16
圖 3-6 地下水蓄水量歷線分析示意圖.....	18
圖 3-7 含水層網格化示意圖.....	22
圖 3-8 優選模式求解流程.....	25
圖 4-1 名竹盆地範圍.....	33
圖 4-2 名竹盆地附近地質圖.....	35
圖 4-3 名竹盆地觀測井與河川地質斷面鑽井位置圖.....	36
圖 4-4 名竹盆地觀測井地質柱狀圖及濾水管位置.....	37
圖 4-5 濁水溪 A 至 C 河道斷面地質柱狀圖.....	38
圖 4-6 清水溪 D、E 河道斷面地質柱狀圖.....	38
圖 4-7 濁水溪沖積扇範圍圖.....	40
圖 4-8 濁水溪沖積扇扇頂、扇央與扇尾分區.....	41
圖 4-9 名竹盆地含水層之 Voronoi Diagram 分區 ((a)第一含水層(b)第二三含水層).....	50
圖 4-10 名竹盆地 2012~2014 年地下水蓄水量歷線.....	51
圖 4-11 濁水溪沖積扇含水層一、二之 Voronoi Diagram 分區.....	54
圖 4-12 濁水溪沖積扇含水層三、四之 Voronoi Diagram 分區.....	55
圖 4-13 濁水溪沖積扇 2012~2014 年地下水蓄水量歷線.....	57
圖 4-14 濁水溪沖積扇及名竹盆地之模式範圍與邊界條件設定.....	61
圖 4-15 濁水溪沖積扇與名竹盆地地下水流數值模式三維網格分層示意圖.....	62
圖 4-16 濁水溪沖積扇與名竹盆地比出水量或儲水係數第一、二含水層分區.....	63
圖 4-17 濁水溪沖積扇與名竹盆地儲水係數第三、四含水層分區.....	63
圖 4-18 濁水溪沖積扇與名竹盆地水力傳導係數第一、二含水層分區.....	64
圖 4-19 濁水溪沖積扇與名竹盆地水力傳導係數第三、四含水層分區.....	65

圖 4-20 河流演算套件之河道路徑與分段設定.....	69
圖 4-21 名竹盆地區域河段之簡化河川斷面.....	70
圖 4-22 濁水溪沖積扇區域河段之簡化河川斷面.....	70
圖 4-23 含水層(一)各 EOF 成分解釋變異量百分比.....	75
圖 4-24 濁水溪沖積扇含水層(一)前五個 EOF 成分之特徵向量和空間分布.....	75
圖 4-25 含水層(二)各 EOF 成分解釋變異量百分比.....	76
圖 4-26 濁水溪沖積扇含水層(二)前五個 EOF 成分之特徵向量和空間分布.....	77
圖 4-27 含水層(三)各 EOF 成分解釋變異量百分比.....	78
圖 4-28 濁水溪沖積扇含水層(三)前五個 EOF 成分之特徵向量和空間分布.....	78
圖 4-29 含水層(四)各 EOF 成分解釋變異量百分比.....	79
圖 4-30 濁水溪沖積扇含水層(四)前五個 EOF 成分之特徵向量和空間分布.....	79
圖 4-31 新民(1)站地下水位模擬結果.....	81
圖 4-32 竹山(1)站地下水位模擬結果.....	82
圖 4-33 新民(2)站地下水位模擬結果.....	82
圖 4-34 竹山(2)站地下水位模擬結果.....	82
圖 4-35 含水層(一)蓄水量誤差歷線之 EOF 分析解釋變異量百分比圖.....	84
圖 4-36 含水層(二)蓄水量誤差歷線之 EOF 分析解釋變異量百分比圖.....	85
圖 4-37 含水層(三)蓄水量誤差歷線之 EOF 分析解釋變異量百分比圖.....	85
圖 4-38 含水層四蓄水量誤差歷線之 EOF 分析解釋變異量百分比圖.....	86
圖 4-39 濁水溪沖積扇模式率定過程中迭代次數與目標函數關係圖.....	87
圖 4-40 率定完成之濁水溪沖積扇年平均淨補注量空間分布圖.....	88
圖 4-41 率定完成之月平均地面水淨補注量比例結果.....	88
圖 4-42 率定完成之濁水溪沖積扇模式地下水流模式模擬地下水位之分層 RMSE 值	93
圖 4-43 東光(1)站地下水位模擬結果(含水層一).....	94
圖 4-44 東光(3)站地下水位模擬結果(含水層二).....	94
圖 4-45 東光(4)站地下水位模擬結果(含水層三).....	95
圖 4-46 東光(5)站地下水位模擬結果(含水層三).....	95
圖 4-47 虎溪(1)站地下水位模擬結果(含水層一).....	96

圖 4-48 虎溪(2)站地下水位模擬結果(含水層二).....	96
圖 4-49 虎溪(3)站地下水位模擬結果(含水層三).....	97
圖 4-50 虎溪(4)站地下水位模擬結果(含水層四).....	97
圖 4-51 箔子(1)站地下水位模擬結果(含水層一).....	98
圖 4-52 箔子(2)站地下水位模擬結果(含水層二).....	98
圖 4-53 箔子(3)站地下水位模擬結果(含水層三).....	99
圖 4-54 明德(1)站地下水位模擬結果(含水層一).....	99
圖 4-55 明德(2)站地下水位模擬結果(含水層二).....	100
圖 4-56 明德(4)站地下水位模擬結果(含水層三).....	100
圖 4-57 東和(1)站地下水位模擬結果(含水層一).....	101
圖 4-58 東和(2)站地下水位模擬結果(含水層二).....	101
圖 4-59 東和(3)站地下水位模擬結果(含水層四).....	102
圖 4-60 合興(1)站地下水位模擬結果(含水層一).....	102
圖 4-61 合興(2)站地下水位模擬結果(含水層三).....	103
圖 4-62 合興(1)站地下水位模擬結果(含水層四).....	103
圖 A-1 用電量推估濁水溪沖積扇抽水量之方法流程圖	108
圖 A-2 非大馬力水井之抽水量推估流程圖	109
圖 A-3 抽水井與鄰近觀測井之相對位置示意圖	111
圖 A-4 抽水洩降示意圖	111
圖 A-5 2012 與 2014 年試驗井用電量與抽水量分布圖	113
圖 A-6 2012 年至 2014 年試驗井實測抽水量與估計抽水量之比較圖	115
圖 A-7 倒傳遞類神經抽水特性分類模式架構圖	116
圖 A-8 倒傳遞類神經抽水特性分類模式之驗證結果比較圖	117
圖 A-9 用電量推估模式應用流程圖	119

表目錄



表 4-1 名竹盆地各類水體之氧同位素.....	39
表 4-2 濁水溪沖積扇各類水體之氧同位素.....	43
表 4-3 名竹盆地含水層概念分層與地下水位觀測井分層歸屬.....	44
表 4-4 名竹盆地觀測井之水文地質參數.....	44
表 4-5 濁水溪與清水溪河床下含水層水文地質參數.....	45
表 4-6 濁水溪沖積扇概念性分層之各觀測井高程資料.....	47
表 4-7 名竹盆地觀測井之控制面積及水文地質資料.....	50
表 4-8 名竹盆地地下水系統出流量之估計結果.....	52
表 4-9 名竹盆地地下水系統之流入量估計結果.....	53
表 4-10 名竹盆地地下水平衡分析結果.....	54
表 4-11 濁水溪沖積扇地下水位觀測井分層辨識與比出水量或儲水係數.....	55
表 4-12 濁水溪沖積扇 2012~2014 年地下水抽水量估計結果.....	58
表 4-13 濁水溪沖積扇地下水系統流入量估計結果.....	59
表 4-14 濁水溪沖積扇地下水平衡分析結果.....	60
表 4-15 濁水溪沖積扇水平水力傳導係數初始設定值.....	65
表 4-16 濁水溪沖積扇垂向透水係數初估值.....	67
表 4-17 濁水溪沖積扇與名竹盆地垂直滲漏係數分區初始設定值.....	67
表 4-18 依河床特性分類之曼寧 n 值表.....	71
表 4-19 SFR2 曼寧 n 值與河床高程設定.....	72
表 4-20 濁水溪沖積扇範圍內民井與水利會水井抽水量推估結果(用電量推估法) 73	
表 4-21 濁水溪沖積扇範圍總抽水量推估結果(蓄水量歷線分析).....	73
表 4-22 名竹盆地河流演算套件參數率定結果.....	80
表 4-23 名竹盆地水力傳導係數 K 與垂直滲漏係數 V_L 率定結果.....	81
表 4-24 率定完之名竹盆地地下水流模式水平衡計算結果.....	83
表 4-25 濁水溪沖積扇水平水力傳導係數率定結果.....	89
表 4-26 濁水溪沖積扇垂直滲漏係數率定結果.....	90
表 4-27 率定完成之濁水溪沖積扇地下水流數值模式水平衡計算結果.....	92
表 A-1 2012 年與 2014 年試驗抽水井月抽水效率分類結果.....	112

表 A-2 抽水量推估模式之參數檢定結果.....	114
表 A-3 不分類與分類月抽水量評估模式之評比結果.....	115
表 A-4 倒傳遞類神經分類模式訓練與驗證分類結果.....	117
表 A-5 分類與不分類月抽水量評估模式驗證之評比結果.....	117
表 A-6 大馬力抽水機流量及電能消耗量.....	118
表 A-7 濁水溪沖積扇之抽水井分析結果.....	120
表 A-8 用電量推估法估算濁水溪沖積扇灌溉抽水量結果.....	121
表 A-9 用電量推估法估算濁水溪沖積扇非灌溉抽水量結果	121



第一章 緒論



本研究之緒論分為研究緣起、研究目的以及研究流程等三部分分述如下。

1.1 研究緣起

台灣位於東亞沿岸亞洲大陸與太平洋的交界處，全年皆受到季風效應的影響，加上每年平均有 3 至 4 個颱風侵襲台灣，因此降雨量十分豐沛；然而因為台灣地勢陡峭與山脈阻隔之因素，降雨之時間與空間分布不平均，地面水資源攔蓄不易，因此可供使用之水資源有限，再加上台灣人口稠密與經濟發展快速，用水需求大增，地面水資源無法滿足全部用水需求，地下水便成為另一個相當重要的水資源來源，且因地下水源具有穩定、乾淨以及便利等特性，民眾與政府鑿井取用地下水之情形相當普遍。然而長年來因為地下水資源缺乏適當的管理，許多區域逐漸出現地下水超抽之情形，導致地下水位大幅下降而引發地層下陷、海水入侵等災害，對於環境、經濟以及民生安全皆造成相當大的影響。

濁水溪沖積扇係為中台灣農業發展的重要區域，隨著工業的迅速發展以及人口的增長，工業以及民生的用水需求也大量增加，濁水溪沖積扇之地面水源無法滿足用水需求，因此各標的用水皆以抽取地下水來滿足需求。在長時間大用抽取地下水而補注量又無增加之情況下，濁水溪沖積扇在扇央與扇尾部分區域出現地層下陷的情況，嚴重影響到高鐵的行車安全，使得濁水溪沖積扇地下水超抽之情形備受重視。為改善濁水溪沖積扇地層下陷問題，政府積極採取封井以及減抽之措施，並輔導農民轉作需水量較少之高經濟作物，以減少濁水溪沖積扇地下水的抽水量；此外政府也積極尋找替代水源來滿足各標的之用水需求，如規劃中的烏嘴潭人工湖以及剛完工的湖山水庫，除了這兩座地面上的蓄水設施外，位於濁水溪中游之名竹盆地被視為可開發之地下水源(中央地質調查所 2010)，在適當的規劃下應可針對名竹盆地地下水源進行開發以供應濁水溪沖積扇之用水需求。

近年來因為全球暖化的影響，台灣的氣候發生劇烈變遷，極端水文事件的發生愈趨頻繁，濁水溪沖積扇不論是在地面還是地下水資源管理變得更加困難，考量到地下水資源之永續發展，針對濁水溪沖積扇地下水超抽之改善與名竹盆地地下水源開發評估愈趨重要，為了評估各種地下水減抽策略之效果以及地下水源開發之影響，率定正確且良好之地下水流數值模式是不可缺少的，然而地下水系統



之不確定因素相當大，因此具系統性且可以準確掌握地下水系統特性之率定方法是需要的。

1.2 研究目的

本研究之目的在於建立區域性地下水流數值模式之率定方法，以經驗正交函數分析蓄水量模擬誤差歷線，得到影響模式模擬誤差之主要因素，並針對地面水淨補注量與土壤地質參數進行修正，以掌握地面水補注量與土壤地質參數正確之時間與空間分布，得到一正確且具有代表性之地下水流數值模式，最後將該率定方法應用於濁水溪沖積扇。

1.3 研究流程

本研究主要選定研究區域為濁水溪沖積扇，然而在濁水溪沖積扇頂二水隘口上游延伸處有一竹盆地，其地下水系統之流出量會經由二水隘口處流進濁水溪沖積扇頂區域，為準確模擬其隘口地下水流入量，於濁水溪沖積扇地下水流模式建立時一併建立竹盆地之地下水流模式並進行率定，作為濁水溪沖積扇隘口地下水流入量之設定。

本研究之流程主要可分為四個部分：(1)區域性地下水流率定方法建立；(2)研究區域資料蒐集與地下水系統辨識；(3)地下水流數值模式建立與初始設定；(4)區域性地下水流率定方法應用，其流程如圖 1-1 所示。茲將研究流程分為此四部份敘述如下：

- (1) 本研究以地質參數與雨水補注量之最佳化優選模式為基礎，應用經驗正交函數作為優選模式求解過程中修正量之計算方法，以建立區域性地下水流模式率定之方法，其方法須經過多次迭代以得到地質參數以及雨水補注量在空間以及時間上的最佳化分佈。
- (2) 為驗證本研究所建立方法之適用性，本研究將所建立之率定方法應用於濁水溪沖積扇與竹盆地區域，於方法應用前須先針對兩研究區域各別進行水文與地質資料之蒐集，以進行地下水系統之概念分層與邊界辨識，計算地下水蓄水量歷線，進而估算與釐訂地下水系統之各項流出量與流入量。
- (3) 將濁水溪沖積扇與竹盆地之邊界範圍、水文地質參數、含水層分層設定、地下水系統各項流出量與流入量輸入 MODFLOW 模式中，以建立濁水溪沖積扇與竹盆地之聯合地下水流數值模式，並針對竹盆地區域之地面水補注量、

地質參數與河流演算套件參數進行率定，建立正確之名竹盆地地下水流模式，以模擬濁水溪沖積扇隘口地下水流入量。

- (4) 最後將所建立之區域性地下水流數值模式應用於濁水溪沖積扇之地下水流數值模式之率定，以驗證所建立之方法之適用性，並完成濁水溪沖積扇與名竹盆地地下水流聯合數值模式之建立。

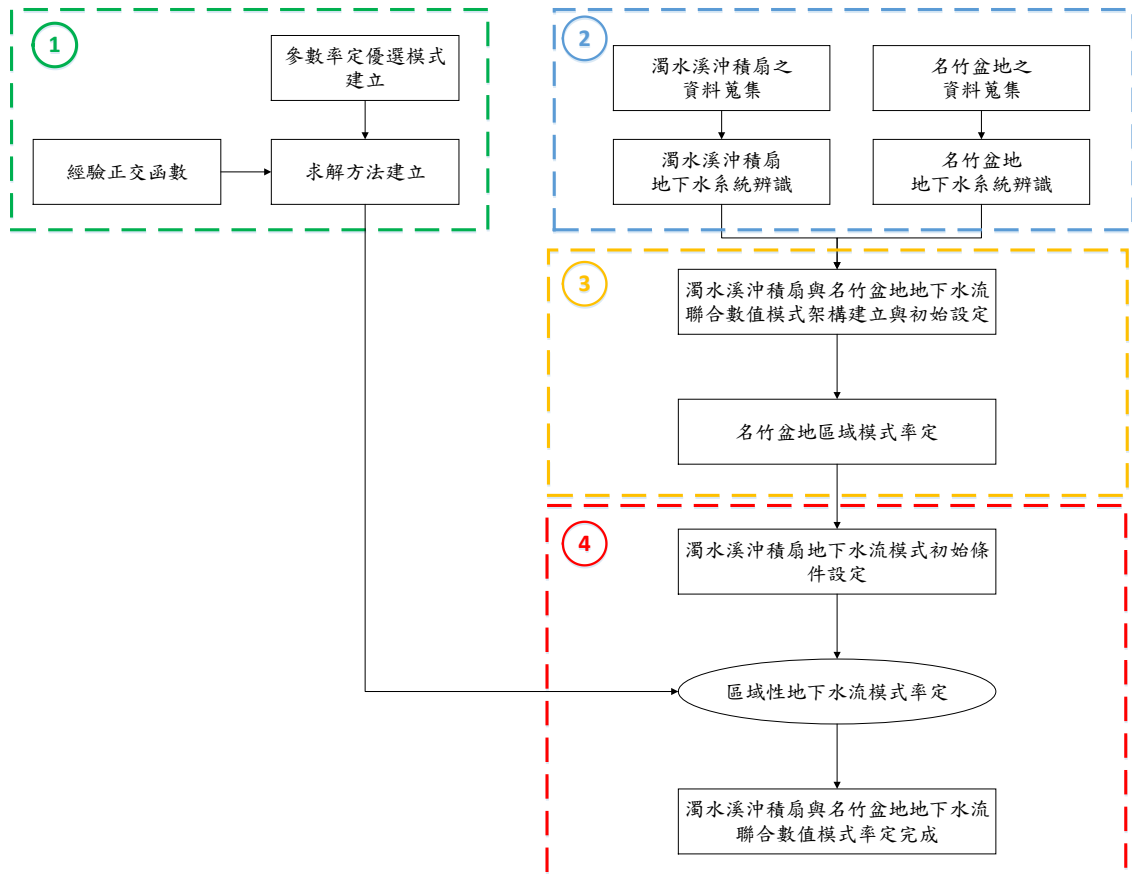


圖 1-1 研究流程

第二章 文獻回顧

本研究為建立區域性地下水流數值模式之率定方法，並應用於實際之研究區域以進行方法驗證。在建立地下水流數值模式前首先須針對該區域之地下水系統進行資料蒐集以及地下水系統之流出流入量辨識，此前置作業為提供模式建立之初始設定條件，而後選定適合之地下水流數值模式軟體以進行模式建立，最後進行模式率定，以驗證該模式具有能夠確實模擬該研究區域之地下水流特性。過去有不少關於地下水系統流出流入量辨識之研究，對於地下水流數值模式建立之設定與應用案例也有相當多的文獻可供參考，此外本研究也回顧主成分分析方法中

之經驗正交函數法於地下水系統之實際應用，茲將地下水系統流出流入量辨識、地下水數值模式以及經驗正交函數法之文獻回顧分述如下。




2.1 地下水系統流出流入量辨識

地下水系統流出流入量辨識為針對研究區域之地下水系統進行補注量、抽水量與流失量之估算，並將估算結果作為地下水數值模式之輸入項，而這些水流量為地下水系統中影響水位最直接且主要的影響，因此地下水系統流出流入量的辨識相當重要。

Arnold et al. (2000) 採用兩種分析方法估算地下水系統之補注量與流失量（河川基流量），並比較兩種方法之結果差異。第一種方法為利用 SWAT 模式 (Soil and Water Assessment Tool model) 進行土壤之水平衡分析，以得到地下水系統之補注量與流失量；而該研究假設地下水之補注量經過一段稽延時間後會成為河川基流量，視為地下水系統之流失量，因此第二種方法為從河川日流量中分離出河川基流量以獲得地下水系統之流失量，再將修正的退水曲線進行平移以估算地下水系統之補注量。該方法應用於美國密西西比河流域，結果顯示在河川基流量上兩種方法皆能抓到部分的趨勢；而補注量為最難驗證的且兩種方法所估算出來之補注量不符合，不過能夠觀察出整體的趨勢。

Healy et al. (2002) 整理過去以分析地下水位觀測資料為基礎來估計地下水補注量之方法，並指出地下水位波動法 (Water-Table Fluctuation method, WTF) 為最廣泛被應用於估計地下水系統補注量之方法 (Meinzer, 1923; Meinzer and Steams, 1929; Rasmussen and Andreasen, 1959; Gerhart 1986 and Hall and Risser, 1993) ，WTF 法假設未飽和含水層地下水位之上升是由補注量流入地下水面所造成，因此補注量可由地下水位高程變化乘上含水層之比出水量 (specific yield) 估算而得，該方法總和簡化 (gross simplification) 各種複雜的地下水流動機制，具有易於計算且能夠有效分析補注量的長時間變化趨勢。

江崇榮等 (2005) 將濁水溪沖積扇地下水系統劃分為四個分區，並利用地下水流線以及雨水、河水與地下水之氧同位素組成分佈來估算濁水溪沖積扇地下水系統各分區之雨水入滲、河水滲漏以及區外地下水補注量，研究結果顯示扇頂之總補注量佔沖積扇全區之 56.9%，其中河床滲漏補注量約佔總量之 34%，降雨入滲補注量約佔總量之 22.9%，顯示扇頂區域為濁水溪沖積扇之主要地下水補注區。



江崇榮等 (2006) 利用地下水歷線分析法估算濁水溪沖積扇地下水系統之各個水文量，首先利用濁水溪沖積扇乾季地下水位歷線之退水線估計全年穩定抽水量以及一、二期作水稻灌溉之抽水量，再將地下水歷線之乾季退水線往後延伸至上升歷線頂點下，以估算地下水補注量，最後應用簡單之水平衡公式計算出地下水之流失量。研究結果濁水溪沖積扇 1999-2001 年之平均年抽水量為 13.22 億立方公尺，平均年補注量為 15.33 億立方公尺、平均年流失量為 2.38 億立方公尺。

Lee et al. (2008) 應用兩種以水平衡為概念的方法來估算清水溪地區之地下水補注量並且進行比較，第一種方法為土壤水分收支平衡法 (soil moisture budget method)，該方法可以用來估算集水區隨時間之入滲量、逕流量、蒸發散量以及地下水補注量，並且同時考量非飽和含水層與氣候條件等兩種土壤水分特性；第二種方法為河川基流分離法，在忽略地下水蒸發散量之條件下從河川總流量中分離出河川基流量以獲得地下水系統之補注量。該研究結果顯示兩種方法所估算出來之地下水補注量相近，然而相較於土壤水分收支平衡法，河川基流分離法不需要複雜之水文模式與較詳細之土壤特性參數，也能夠得到合理之地下水補注量。

Martinez et al. (2010) 結合地下水位波動法以及地下水平衡方程式來估算地下水之抽水量，提供一個能夠較快速交叉驗證官方所調查的抽水量資料的方法，然而此方法主要的限制為除了抽水量以外的地下水平衡量體 (流出量與流入量) 必須先經過準確的量化，而該方法對於乾旱或是半乾旱之氣候區域有較高的適用性。該研究將此方法應用於西班牙 Mancha Occidental 地區，該地區從 1970 早期開始因為農業用水之需求加上年降雨量不足等因素，具有密度相當高的抽水井，結果顯示該方法所計算出來的抽水量與官方的紀錄資料有相當高的相關性 ($R^2 > 0.9$)，此外該研究也發現此方法的估計結果對於比出水量以及半變異數模型有相當高的敏感性。

Hsu et al. (2013) 將濁水溪沖積扇地下水系統之抽水量分為全年穩定之非灌溉抽水量與多類形式之各期作灌溉抽水量，應用地下水歷線配合降雨歷線與農委會所提供之歷史灌溉抽水變化，估算出各種類型之抽水量。再經由地下水歷線變化配合該時期之抽水量計算得到地下水補注量，此外該研究根據降雨歷線將補注量分為降雨日補注量與非降雨日補注量，其中降雨日補注量可藉由氧同位素分析法區分出雨水補注量與河水補助量；非降雨日補注量可藉由灌溉抽水量乘上一入滲

比例區分出灌溉補注量與區外地下水補注量，最後經由地下水平衡之公式估算出地下水系統之流失量。研究結果顯示濁水溪沖積扇地下水系統 2004 年至 2009 年之年平均非灌溉抽水量為 8.77 億立方公尺、年平均灌溉抽水量為 13.50 億立方公尺、年平均雨水補注量為 6.79 億立方公尺、年平均河水補注量為 7.53 億立方公尺、灌溉補注量為 3.42 億立方公尺以及邊界地下水流入量為 5.37 億立方公尺。

綜觀上述文獻可得知在地下水系統流出流入量之辨識上，地下水位波動法為最廣泛且發展最為完整之方法，由地下水位波動法為基礎所發展出來之地下水歷線結合同位素分析法可以準確估算出地下水系統之各類型抽水量與補注量，再經由水平衡分析可估算出地下水系統之流失量。


2.2 地下水流數值模式

國內外有許多的研究運用美國地質調查所 (USGS) 所開發之三維地下水流數值模式 MODFLOW 進行研究區域地下水流數值模式之建立，並應用於各種案例之模擬，以作為後續地下水資源規劃之參考依據。

李振誥等 (2007) 利用 MODFLOW 模式與河川套件 (River Package) 估算雲林新虎尾溪之河道滲漏量以及河道水位抬升後所增加之河道滲漏量，以評估河川水位上升後對於河道滲漏補注量之增加效益。研究結果顯示研究範圍內新虎尾溪之年河道滲漏量為 170.9 萬噸，在河道水位抬升 2.5 公尺後其河道年滲漏增加量為 26.4 萬噸。

Igboekwe et al. (2008) 採用 MODFLOW 模式與河川套件建立奈及利亞 Kwa lbo 河集水區之地下水流數值模式，以評估奈及利亞 Kwa lbo 河之河水與含水層間之交換量。該區域之地下水系統流入量包含雨水、河水補注量以及北邊界地下水入流量；而流出量包含南邊界地下水出流量以及抽水量。研究區域地下水流模式建立後主要針對含水層之透水性、補注量以及河床高程做有限度之調整以進行模式率定，並以研究區域內之地下水觀測水位作為率定之依據。其模擬結果顯示該研究區域之抽水量遠少於地下水系統之補注量，因此該地下水區域具有增加地下水開發之潛能。

Takounjou et al. (2009) 採用 Visual-MODFLOW 模式與河川套件建立喀麥隆 Anga'a 河流域之地下水流與汙染物質傳輸模式，以釐清該研究區域內河水與地下水系統之含水層之交換量，並計算汙染物從 Anga'a 河上游傳遞之下游之甚流速度



與時間，以了解該研究區域地下水資源污染之威脅。研究區域之邊界地下水流出流入量之設定上採用定水頭邊界條件，模式設定之補注量主要為雨水補注，河川補注量則由河川套件來進行模擬，在地下水流出量部分由抽水量、河川基流量、湧泉、以及蒸發散量所組成，此外該模式在模擬範圍內再劃分為兩個分區 (Zone I 與 Zone II)，此兩個分區能夠獨立計算該分區之地下水平衡以及兩個分區間之地下水系統交換量。模擬結果顯示在研究年限內之最大滲流速度為 0.19m/d，雖然滲流速度不大，但污染物經過 50 年之傳輸時間便可經由上游傳遞至下游。

王韋勳 (2012) 採用以 GMS 為介面之 MODFLOW 模式結合河流演算套件 (Streamflow-Routing Package, SFR) 建立名竹盆地地下水流數值模式，並將率定完成之模式應用於名竹盆地地下水井群抽水開發之影響。該模式藉由河流演算套件給定上游河川入流量、河床底泥厚度與底泥透水係數以模擬並計算河流與地下水間之交換量 (河道入滲量以及地下水出滲量)，此外該模式為探討名竹盆地地下水井群抽水開發對於下游濁水溪沖積扇扇頂區域地下水流入量之影響，將模式劃分為名竹盆地與濁水溪沖積扇部分扇頂區域等兩個分區 (分別為 Zone1 與 Zone2)，以計算兩分區間之地下水流出與流入量。研究結果顯示名竹盆地地下水井群開發可誘導更多河水入滲至含水層中，但井群抽水量越大對於隘口地下水流出量損失會越多。

林聖婷 (2012) 為建立濁水溪沖積扇補注量與抽水量之空間分布模式，採用以 GMS 為介面之 MODFLOW 進行模式之建立。該研究將抽水量細分為民井抽水量、自來水公司抽水量以及農田水利會抽水量，其自來水公司與水利會之抽水量量體與空間分布以官方公布之資料進行時間上與空間上之分配，而民井抽水量之量體最大且最難以估計，該研究採用雲林科技大學於彰化與雲林地區之水井清查資料進行民井抽水量空間上之分配。於補注量部分則細分為河床入滲量、降雨入滲量以及灌溉補注量，河床入滲量根據濁水溪之河床質地資料進行空間分配；降雨入滲量考量不同深度之土壤質地資料計算空間權重，以得到降雨補注量之空間分布；灌溉補注量除考慮土壤質地外亦根據耕作制度以進行空間上之分配。該研究結果顯示補注量與抽水量之設定考慮諸多因素，能夠更真確的掌握濁水溪沖積扇地下水流之流動情形，具有一定之參考價值。

綜觀上述文獻可得知以 MODFLOW 模式建立地下水流數值模式前，皆必須先

對於地下水系統進行詳細的資料蒐集與系統流出流入量辨識，釐清各水文量之時間與空間上之分布，方能較準確的掌握研究區域地下水流之狀況，此外 MODFLOW 於模式設定上也相當多元化，可以針對不同需求進行適合之模式設定以及導入所需要的套件，以正確且完整的模擬研究區域之地下水流動情形。於模式率定方面上述之文獻皆無針對率定方式做更詳細之說明，且部分模式僅針對水文地質參數進行率定，對於補注量與抽水量進行率定之文獻較少，然而以濁水溪沖積扇而言，其年降雨量相當豐沛，地下水與地面水之交換量相當可觀，且其範圍廣大，空間分布之不確定性因素相當，因此補注量也應納入模式率定所需調整變數之一。

2.3 經驗正交函數

欲對一地下水系統有深入且全面性的瞭解，其地下水位觀測資料與地質鑽探試驗資料是不可或缺的，然而在蒐集了大量之地下水位觀測資料後下一步便是針對該資料進行分析以獲得進一步有用的資訊。訊號分析方法中之經驗正交函數 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 經由數理之計算能夠辨識出造成訊號整體變化趨勢之主要影響因子，被廣泛應用於各種觀測資料以找出影響整體系統的主要因素，近年來也逐漸被應用於地下水系統之辨識上。

Moon et al. (2004) 應用主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 於南韓 62 口地下水位監測井之觀測資料，將地下水位歷線分為五種典型，Type I 歷線反映出季節性且長期之補注情形；Type II 歷線反映出降雨事件所造成地下水位迅速抬升之情形；Type III 歷線反映出融雪入滲補注至地下水之情形；Type IV 歷線反映出監測井附近抽水導致水位洩降之情形；Type V 歷線呈現平穩之狀態，僅對高強度降雨事件有抬升之情形。該研究將監測井依照上述五種典型進行分類，以改良之 WTF 法分析五種典型之監測井水位資料，以得到地下水系統之補注率。

Munoz et al. (2008) 提出一個基於設計的經驗正交函數模型，能夠藉由經驗正交函數分析已知測站時間與空間上之觀測資料，找出影響資料趨勢之主要 EOF，並估計無測站地點之觀測值。該模式應用於美國中大西洋區域 1998 年至 2002 年之 DOC (Dissolved organic carbon) 採樣資料，經過交叉驗證結果發現所提出之模式能夠準確預測未知站點之 DOC 值。

Yu et al. (2010) 將濁水溪沖積扇 66 口地下水位監測井觀測資料以經驗正交函數進行分析，並針對前五個解釋能力最高之 EOF 成分進行探討，分析結果發現

EOF1 主要反映出濁水溪沖積扇補注量之空間分佈趨勢，顯示扇頂為最全區之主要補注區域；EOF2 主要反映出抽水之情形，扇尾區域因養殖漁業人為抽水因素導致地下水位之洩降；EOF3 主要反映出局部區域降雨所造成地下水位抬升之趨勢；EOF4 主要反映出河水補注量之趨勢，其扇頂濁水溪河床區域之補注量較高；EOF5 主要反映出西港觀測站附近地下水位因抽水管制所引發之地下水位回升之情形。

Yu et al. (2015) 整合經驗正交函數分析與小波轉換分析以調查地下水系統之時間與空間補注之模式，該分析方法應用於分析 2005-2010 年屏東平原 47 個地下水位觀測井以及 27 個雨量站資料，結果顯示經驗正交函數分析有效的找出三個主要的地下水位隨時間空間變化之趨勢，而交叉小波轉換能更進一步辨識出降雨與地下水位變化之遲滯效應，延遲時間不僅會受到地下水流歷程在時間尺度上的不同而改變，也會隨著地下水區域的不同而改變。

徐年盛等(2015) 應用經驗正交函數法建立一套地下水抽補量與參數時空分布率定方法，並配合地下水流數值模式 MODFLOW 實驗，以驗證該方法於實務應用上之成效。該方法應用於屏東平原地下水系統，結果顯示應用經驗正交函數法所反推之抽補量初始時空分布具有相當高之準確度，再經過該率定方法進行模式率定後，其淨補注量與水力傳導係數之準確率可分別提升至 97.14% 與 95.11%，表示該研究所建立之率定方法能夠有效且準確的率定抽補量與參數之時空分布。

綜觀上述文獻，經驗正交函數能夠有效地辨識出影響地下水位變化之主要因素，對於地下水系統補注量於空間上分布也能夠提供一個可靠之依據，於實務上也能夠應用經驗正交函數來進行地下水流數值模式之率定。

第三章 方法建立

本研究欲建立一區域性多層結構之地下水流數值模式率定方法，主要為針對水文地質參數(水平水力傳導係數(K)與滲漏係數(V_L))以及地面水補注量(Q_r)進行空間與時間分布率定，以準確模擬地下水系統之水位變化，為一種優選模式。本研究將方法建立分為兩個部份，第一部份為優選模式建立，第二部分為優選模式求解流程，茲將此兩部份敘述如下。

3.1 優選模式建立

假設一地下水系統分為 f 層含水層以及 s 個觀測井分區，則根據此地下水系統

所建立之參數率定優選模式其目標函數、決策變數以及限制式如下所示：

$$\text{目標函數 } \underset{K_j(f,s), V_{L,j}(f,s), Q_{r,j}(s,i)}{\text{Min}} \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{f,s,i} \left[\frac{Q_s^{obs}(f,s,i) - Q_{s,j}^{cal}(f,s,i)}{\text{Max}[Q_{sto}(f,s,i)] - \text{Min}[Q_{sto}(f,s,i)]} \right]^2} \quad (3.1)$$

$$\text{限制式 } \sum_{s=1}^p \sum_{i=1}^n Q_{r,j}(s,i) = \sum_{i=1}^n Q_r^{sto}(i) \quad (3.2)$$

$$\text{Groundwater Flow Model}(h_j^{cal}(f,s,i)) \quad (3.3)$$

$$K^{LB} \leq K_j(f,s) \leq K^{UB}, V_L^{LB} \leq V_{L,j}(f,s) \leq V_L^{UB} \quad (3.4)$$

$$Q_{r,j}(s,i) \geq 0 \quad (3.5)$$

其中， $K_j(f,s)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 s 分區水平水力傳導係數(L^{-1})； $V_{L,j}(f,s)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 s 分區垂直滲漏係數(T^{-1})； $Q_{r,j}(s,i)$ 為第 j 次迭代之第 s 分區、第 i 月地面水補注量(L^3T^{-1})； m 為研究區域內各含水層觀測井之總數； n 為模式模擬總月份； $Q_s^{obs}(f,s,i)$ 第 f 含水層、第 s 分區、第 i 月由地下水觀測值所計算得到之地下水蓄水量(L^3)； $Q_{s,j}^{cal}(f,s,i)$ 第 f 含水層、第 s 分區、第 i 月由地下水位模擬值所計算得到之地下水蓄水量(L^3)； $h_j^{cal}(f,s,i)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 s 分區、第 i 月地下水位模擬值(L)； $Q_r^{sto}(i)$ 為經由蓄水量歷線分析所得到之第 i 月地面水補注量(L^3T^{-1})； K^{LB} 為水平水力傳導係數之最小值限制； K^{UB} 為水平水力傳導係數之最大值限制； V_L^{LB} 為垂直滲漏係數最小值限制以及 V_L^{UB} 為垂直滲漏係數最大值限制。

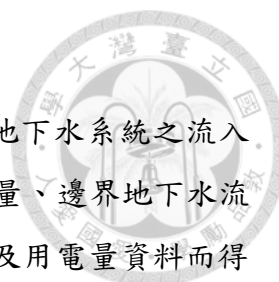
茲將優選模式建立分為決策變數、限制式以及目標函數等敘述如下：

3.1.1 決策變數

本研究選用水平水力傳導係數、地面水補注量以及垂直滲漏係數等三個變數作為模式率定之決策變數，此三個決策變數之說明如下所述：

1. 水平水力傳導係數

根據達西公式可知水力傳導係數為影響地下水位流動速度之重要影響因子之一，而此參數隨著含水層之土壤組成不同其變異性相當大，單以觀測井的抽水試驗資料難得到水力傳導係數於控制面積內正確之空間平均值，因此本研究選定此參數為模式率定之決策變數之一。



2. 地面水補注量

影響地下水系統中水位變化最直接且影響最大之來源即為地下水系統之流入與流出量，於地下水系統中流出流入量大致可分為地面水補注量、邊界地下水流入量、抽水量以及流失量。其中抽水量可藉由水井清查資料以及用電量資料而得到時間與空間上的分布狀況；邊界流入流出量會隨著不同研究區域所劃分之邊界而不同，而部份情況下邊界條件可設定已知水頭邊界，使模式自行計算其邊界流入流出量；而地面水補注量包含雨水補注量與河水補注量，為地下水系統最主要之流入來源，且其空間分布也相當難以估計，因此本研究選用地面水補注量作為優選模式之決策變數之一。

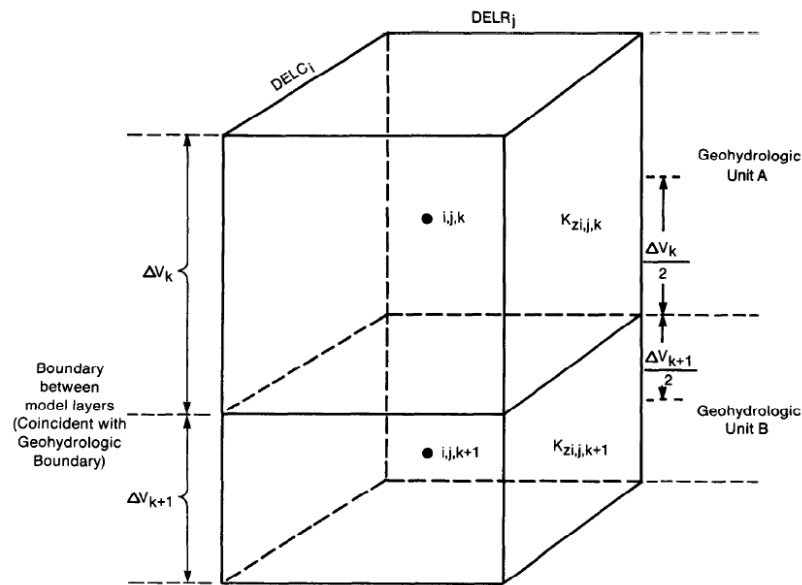
3. 垂直滲漏係數

垂直滲漏係數為 MODLFOW 模式中用於計算兩含水層間地下水的交換能力，愈大表示交換能力越強，及計算公式如下所示，其示意圖如圖 3-1 所示：

$$V_{L_{i,j,k+1/2}} = \frac{1}{\frac{\Delta V_k/2}{K_{Z_{i,j,k}}} + \frac{\Delta V_{k+1}/2}{K_{Z_{i,j,k+1}}}} \quad (3.6)$$

式中 i, j 為元素之列與行序號； $k, k+1$ 為元素之層序號； $V_{L_{i,j,k+1/2}}$ 為元素 (i, j) 處第 k 層與第 $k+1$ 層之間垂直滲漏係數 (T^{-1})； $\Delta V_k, \Delta V_{k+1}$ 為第 k 層與第 $k+1$ 層在元素 (i, j) 處之厚度 (L)； $K_{Z_{i,j,k}}, K_{Z_{i,j,k+1}}$ 為第 k 層與第 $k+1$ 層在元素 (i, j) 處之垂向透水係數 (LT^{-1})。

於多層構造地下水流系統中，第二含水層以下之地下水流系統難以受到地面水補注之直接影響，大多為第一含水層之滲漏量流至第二含水層補注地下水源，而於地下水流數值模式計算過程中主要以垂直水力傳導係數或垂直滲漏係數(由垂直水力傳導係數與含水層厚度經過加權平均後所得)，因此本研究也納入垂直滲漏係數作為第二含水層以下代表地下水補注量之地質參數作為優選模式之決策變數之一。



(資料來源：USGS，1988)

圖 3-1 兩相鄰垂直向透水係數示意圖

本研究將此三個決策變數於地下水系統中空間分布之關係繪製如所圖 3-2 示，圖 3-2 所表示之地下水系統為緊鄰地表之第一含水層，大多為非拘限含水層，其中 s 代表不同觀測井控制面積之分區，由圖 3-2 中可看出水平水力傳導係數與雨水補注量於各個觀測井控制區域皆有不同之設定值。依照圖中之 AA' 斷面繪製地下水系統之剖面圖如圖 3-3 所示，圖 3-3 中之 f 代表不同分層之含水層，由圖中可得知地表之雨水補注量僅針對第一含水層進行補注，第二含水層與第一含水層之交換量主要由垂直滲漏係數所控制，而水平水力傳導係數與垂直滲漏係數於垂直之空間分布上皆有不同之設定值。由此兩張示意圖可得知水平水力傳導係數以及垂直滲漏係數會隨不同水平(分區 s)與垂直(分層 f)之空間位置而變化；而降雨補注量僅與水平之空間上有所不同。於時間分佈上水力傳導係數與垂直滲漏係數為地質參數，因此不隨時間而改變，雨水補注量則會隨不同時間降雨量不同而改變。

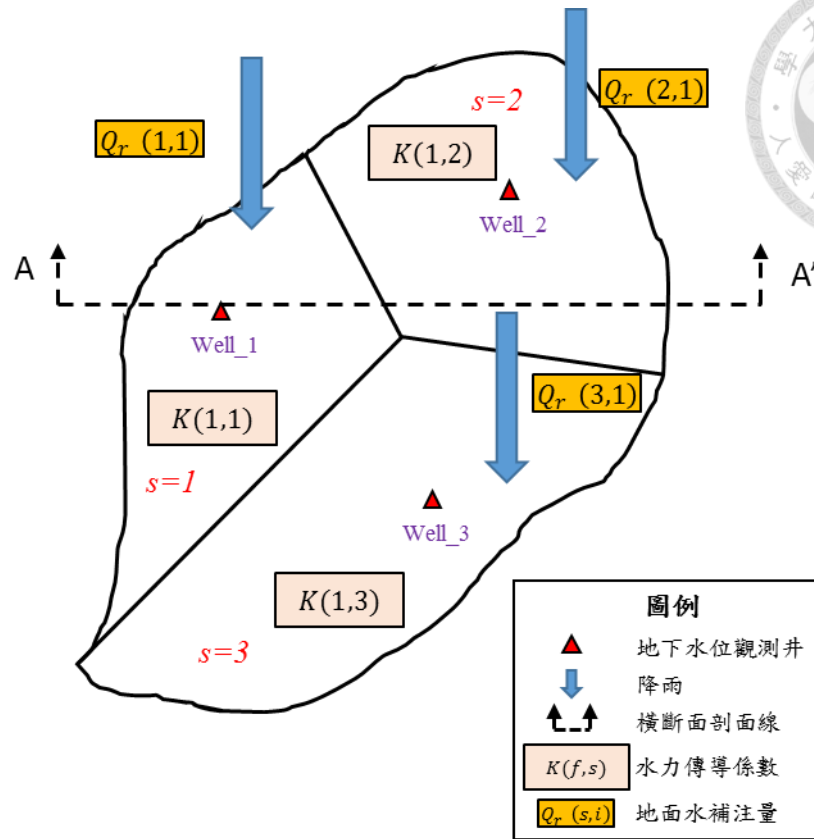


圖 3-2 水力傳導係數與地面水補注量於水平空間分布示意圖

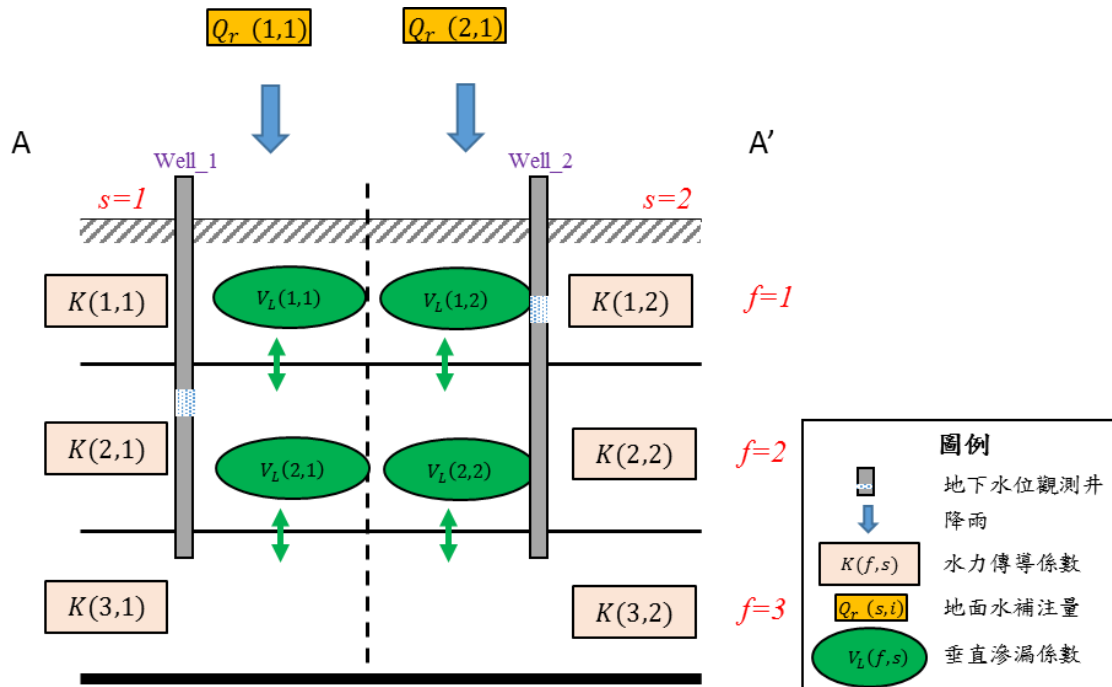


圖 3-3 水力傳導係數、垂直滲漏係數、以及雨水補注量於垂直空間分布示意圖

3.1.2 限制式

本優選模式主要有三條限制式，其一為地面水補注量之時空分布須遵守質量守



恆，其第 j 次迭代之地面水補注量總量 $(\sum_{s=1}^p \sum_{i=1}^n Q_{r,j}(s,i))$ 須等於地下水蓄水量歷線所

估計之地面水補注總量 $(\sum_{i=1}^n Q_r^{sto}(i))$ ，如式(3.2)所示；其二為地下水位之模擬結果須

遵守地下水流控制方程式，如式(3.3)，本研究以地下水流數值模式軟體計算地下水位模擬值；最後為決策變數之搜尋範圍之限制式，於水文地質參數為設定上下界，如式(3.4)，於地面水淨補注量僅訂定下界，式(3.5)。茲將限制式分為地面水總補注量估計、地下水流數值模式以及決策之限制範圍等三部份分述如下。

1. 地面水總補注量估計

地面水總補注量之估計方法主要為針對地下水系統進行流出流入量辨識，並地下水系統流入量中估算地面水總補注量。於過去之不少研究中(Arnold 等，2000；江崇榮等，2006；Lee 等，2008；Martinez 等，2010；Hsu 等 2013)皆採用地下水位波動法(WTF)分析地下水蓄水量歷線，並結合水平衡分析來估計流出量與流入量，然而根據研究區域之水文條件與地質特性不同，其估算流出量以及流入量之方法以及細分之種類也會有所不同。本研究引用 Hsu et al. (2013)所建立多類型灌溉形式下地下水系統抽水與補注量之估算方法進行地面水總補注量之估計，其流程如圖 3-4 所示，首先為利用地下水位波動法針對蓄水量歷線進行分析，以求得全年穩定退水斜率與各類型灌溉用水抽水斜率，之後分別估算地下水系統之流出量與流入量，其中地下水系統之流入量可分為降雨日補注量與非降雨日補注量，再經由氧同位素分析法得到地面水總補注量與地下水總補注量；此外地下水系統流失量可由流出量與流入量經由水平衡分析法所得到。茲將地面水總補注量估計流程分為地下水蓄水量計算、地下水系統流出量計算、地下水系統流入量計算、地面水總補注量計算以及地下水系統流失量計算等四部分說明如下。

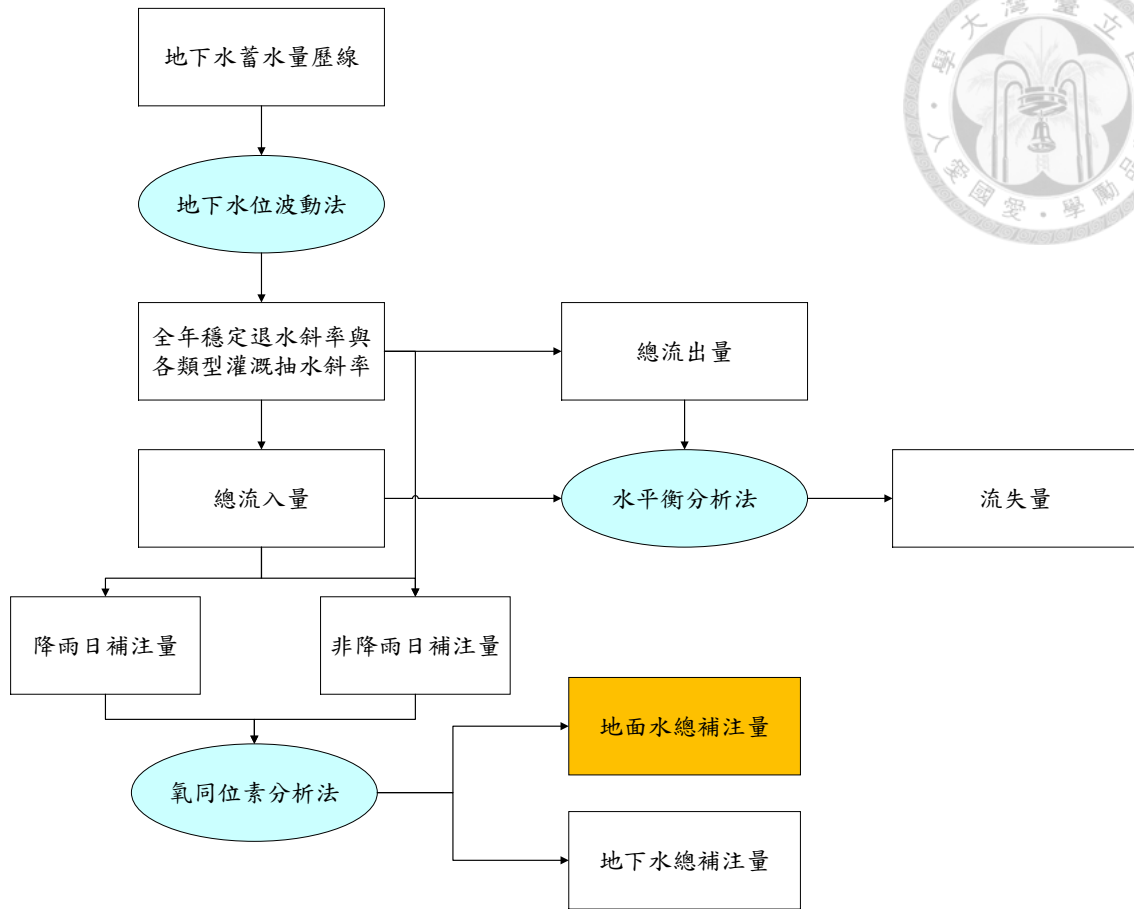


圖 3-4 多類型灌溉形式下地下水系統抽水與補注量估算流程

(1) 地下水蓄水量計算

地下水蓄水量為地下水含水層之總含水量，其計算方式依據含水層為非受壓含水層或受壓含水層而不同，如圖 3-5 所示，茲將兩種含水層之蓄水量計算方式以圖 3-5 為例進行說明。

A. 非受壓含水層

非受壓含水層之蓄水量為比出水量(Specific yield, S_y)、水深($h-H_{Bottom}$)以及控制面積之乘積，如下所示。

$$Q_s = S_y \times A_{UC} \times (h - H_{Bottom}) \quad (3.7)$$

其中， Q_s 為地下水蓄水量(L^3)； A_{UC} 為非拘限含水層之控制面積(L^2)； h 為地下水位高程(L)； H_{Bottom} 為含水層之底部高程(L)。

B. 受壓含水層

受壓含水層之蓄水量計算分為兩個部分，其阻水層上方之地下水位為受到阻水層壓力擠壓而產生，因此蓄水量之計算方式為儲水係數(Storage coefficient, S)、水

深($h-H_{Top}$)以及控制面積之乘積，如式(3.8)所示；阻水層下方之地下水位為受到重力影響所產生，因此蓄水量之計算方式為比出水量(S_y)、水深($H_{Top}-H_{Bottom}$)以及控制面積之乘積，如式(3.9)所示

$$Q_s = S \times A_C \times (h - H_{Top}) \quad (3.8)$$

$$Q_s = S_y \times A_C \times (H_{Top} - H_{Bottom}) \quad (3.9)$$

其中， A_C 為受壓含水層之控制面積(L^2)； H_{Top} 為含水層之頂部高程(L)。

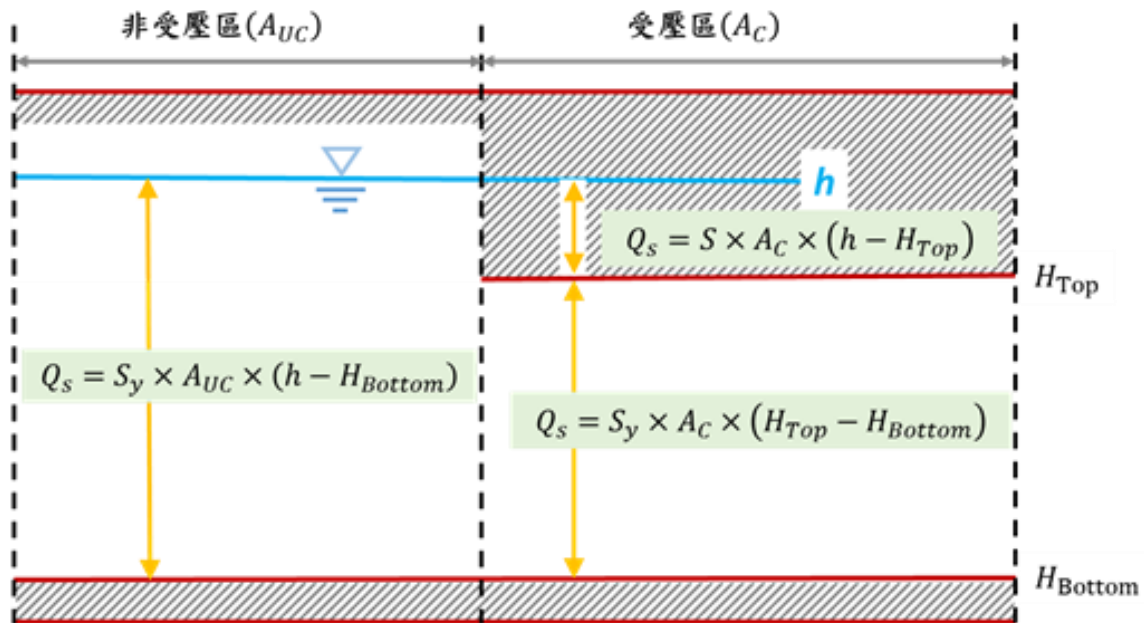


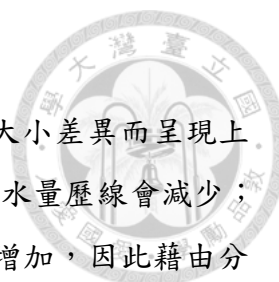
圖 3-5 地下水蓄水量計算方式

若地下水含水層有兩層以上，則第二層之蓄水量計算方式與受壓含水層之計算方式相同。將各含水層分層之各個地下水位觀測井控制面積下之地下水蓄水量計算結果累加，便可獲得研究區域內之地下水蓄水量歷線。

觀測井所控制之面積乃根據 Voronoi Diagram 方法計算，Voronoi Diagram 由蘇俄數學家 Voronoi (1907) 提出，其方法廣泛應用於地球科學領域，可通用於分析多維之空間資料分布以供進行特性分區，各分區中任一點之特性以距離最近之資料點來代表，可表示如式(3.10)所示。

$$V(p_i) = \{p \mid d(p, p_i) \leq d(p, p_j), j \neq i\} \quad (3.10)$$

其中， $V(p_i)$ 為 p_i 資料點所控制之空間； d 為距離(L)； p 為空間中任一點。於計算地下水蓄水量前需先劃定地下水觀測站之 Voronoi Diagram，以得到每口觀測井之控制面積。



(2) 地下水系統流出量計算

地下水蓄水量歷線會隨著地下水系統之流出量與流入量之大小差異而呈現上升或下降之趨勢，若該日之地下水流出量大於流入量，地下水蓄水量歷線會減少；若該日之地下水流出量小於流入量，則地下水蓄水量歷線則最增加，因此藉由分析地下水蓄水量歷線變化趨勢與研究區域降雨量資料之關係，便可計算得到地下水系統之流出量與流入量。

本研究針對地下水系統之中、末端封閉無地下水流入量與流失量，開端透水性佳且具有豐富地下水流入量補注，多類型灌溉型式抽水主要集中於扇央與扇尾之地下水系統作為研析區域，假設估水期非降雨期間，其邊界地下水流入量等於流失量，因此枯水期末降雨期間地下水蓄水量歷線退水斜率即代表地下水系統之總流出量，其退水斜率可再分為非灌溉抽水斜率與灌溉抽水斜率，非灌溉抽水斜率一般為民生、工業與畜牧養殖等用水，其全年抽水率較為穩定且不隨時間而改變；灌溉抽水率則依灌溉面積、耕種階段與降雨分布而有所不同。因此月總流出量(抽水量)等於月非灌溉抽水量加上月灌溉抽水量，如下所示：

$$Q_{out}(i) = Q_{p,L}(i) + Q_{p,A}(i) \quad (3.11)$$

其中， Q_{out} 為第 i 月地下水系統之流出量(L^3)； $Q_{p,L}(i)$ 為第 i 月非灌溉抽水量(L^3)以及 $Q_{p,A}(i)$ 為第 i 月灌溉抽水量(L^3)。

月非灌溉抽水量方面可由非灌溉抽水斜率乘上抽水天數所計算而得，如式(3.12)所示，而月灌溉抽水量方面則根據每月不同灌溉抽水量之抽水量加總所得，如式(3.13)所示。

$$Q_{p,L}(i) = S_L \times D(i) \quad (3.12)$$

$$Q_{p,A}(i) = Q_{WDA1}(i) + Q_{WDA2}(i) + Q_{DA1}(i) + Q_{DA2}(i) \quad (3.13)$$

其中， S_L 為非灌溉抽水斜率(L^3/T)； $D(i)$ 為第 i 月天數(T)； $Q_{WDA1}(i)$ 為一期稻旱混作抽水量； $Q_{WDA2}(i)$ 為第 i 月二期稻旱混作抽水量； $Q_{DA1}(i)$ 為第 i 月一期純旱作抽水量； $Q_{DA2}(i)$ 為第 i 月二期純旱作抽水量。各期作抽水量之詳細估算方式為根據 Hsu et al. (2013) 所建立之方法，於此暫不詳加介紹。

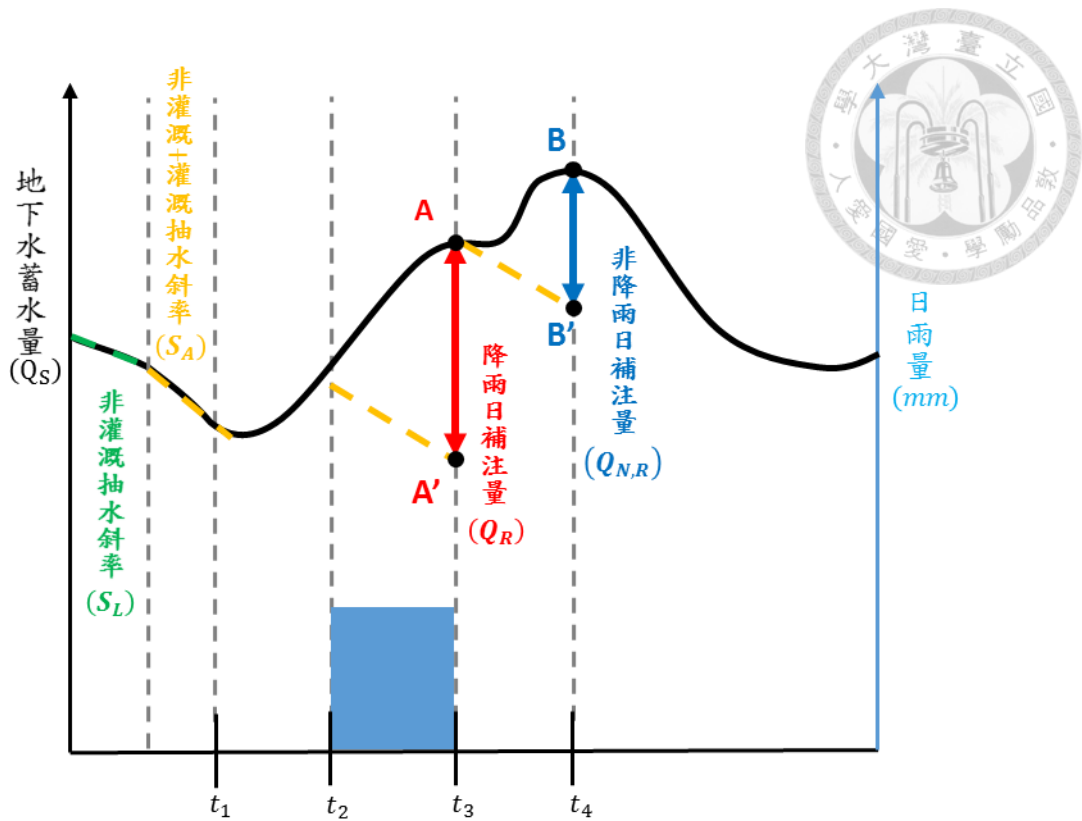


圖 3-6 地下水蓄水量歷線分析示意圖

(3) 地下水系統流入量計算

多類灌溉型式地下水系統流入量來源可分為雨水、河水、邊界地下水流入與灌溉水等，其中雨水、河水以及灌溉水之補注量統稱為地面水補注量，因此地下水系統之月流入量等於地面水月補注量加上邊界地下水流入量；而地下水系統月流入量可由降雨日補注量與非降雨日補注量估算而得，如式(3.14)所示，茲將地下水系統流入量分為降雨日補注量與非降雨日補注量分述如下。

$$Q_{in}(i) = Q_r(i) + Q_{in}^B(i) = Q_r(i) + Q_{N,R}(i) \quad (3.14)$$

其中， $Q_{in}(i)$ 第 i 月地下水系統總流入量 (L^3)； $Q_r(i)$ 為第 i 月地面水補注量 (L^3)； $Q_{in}^B(i)$ 為第 i 月邊界地下水流入量 (L^3)； $Q_{gw}^A(i)$ 為第 i 月灌溉水補注量 (L^3)； $Q_r(i)$ 為第 i 月降雨日補注量 (L^3)； $Q_{N,R}(i)$ 為第 i 月非降雨日補注量 (L^3)。

A. 降雨日補注量

一般表面植生覆蓋廣泛之地下水系統，其地面至第一非受壓含水層之距離相當近且滲透性佳，地面水入滲至第一含水層地下水位之時間不到一日，而由於區外之地面至區內含水層之距離較長，降雨後地下水蓄水量歷線抬升之反應時間遠不如區內地下水，降雨日邊界之水力坡降不大，邊界地下水流入量相對於地面水入

滲量來說不大，因此降雨日之地下水系統流入量主要為地表入滲量，而地表入滲量包含雨水入滲補注量與河水入滲補注量，可表示如式(3.15)與式(3.16)所示。

$$Q_R(i) = Q_{rain}(i) + Q_{river}(i) \quad (3.15)$$

$$Q_R(i) = \sum_{t=D_s(i)}^{D_f(i)} [Q_s(t) - (Q_s(t-1) - S_L)] \times \theta_1(t) \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} \theta_1(t) = 1, & \text{if } Q_s(t) - (Q_s(t-1) - S_L) > 0 \text{ and } (P(t) > P_t) \\ \theta_1(t) = 0, & \text{else} \end{cases}$$

其中， $Q_{rain}(i)$ 為第 i 月雨水入滲補注量 (L^3)； $Q_{river}(i)$ 為第 i 月河水補注量 (L^3)； $D_s(i)$ 為第 i 月之起始日； $D_f(i)$ 為第 i 月之結束日； $\theta_1(t)$ 為第 t 日之兩向變數； $P(t)$ 第 t 日之降雨量 (mm)； P_t 為產生地面水入滲之降雨量門檻值 (mm)。

B. 非降雨日補注量

非降雨日之地下水系統未受降雨觸發，其雨水與河水之入滲補注量甚小，僅有農業因灌溉需求抽取地下水後入滲回含水層之灌溉補注量，以及區外地下水因降雨日地下水位抬升後經一延遲時間而流入區內之邊界地下水流入量，因此非降雨日補注量為灌溉入滲補注量加上邊界地下水流入量，可表示如式(3.17)與式(3.18)所示。

$$Q_{N,R}(i) = Q_{gw}^A(i) + Q_{in}^B(i) \quad (3.17)$$

$$Q_{N,R}(i) = \sum_{t=D_s(i)}^{D_f(i)} [Q_s(t) - (Q_s(t-1) - S_p(t))] \times \theta_2(t) \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} \theta_2(t) = 1, & \text{if } Q_s(t) - (Q_s(t-1) - S_p(t)) > 0 \text{ and } (P(t) < P_t) \\ \theta_2(t) = 0, & \text{else} \end{cases}$$

其中， $Q_{gw}^A(i)$ 為第 i 月灌溉水入滲補注量； $Q_{in}^B(i)$ 為第 i 月邊界地下水流入量； $S_p(t)$ 為第 t 日之總抽水率 (非灌溉加上灌溉抽水率, (L^3/T))； $\theta_2(t)$ 為第 t 日之兩向變數。

(4) 地面水補注量計算

地面水月補注量為雨水月入滲補注量、河水月入滲補注量以及灌溉水月入滲補注量加總而成，如式(3.19)所示。灌溉水入滲補注量可由灌溉抽水量乘上一入滲比率進行估算，然而雨水入滲補注量與河水入滲補注量則需要由氧同位素分析法進行分離。

$$Q_r(i) = Q_{rain}(i) + Q_{river}(i) + Q_{gw}^A(i) \quad (3.19)$$

無論是地下水、雨水、河水或是海水其基本組成之皆為氧化氫(H₂O)，氫與氧同位素於自然界中包含多種同位素，經過水文循環與混合交換後使得不同區域之水體其同位素組成有所差異，同位素分析法便是藉由氫氧同位素之時間與空間分布情形，計算地下水系統各種流入量同位素之質量守恆，以獲得各流入量之比例。江崇榮與汪中和(2002)指出分別使用氫與氧同位素釐清地下水系統流入量來源時其兩者之結果相符，因此本研究僅採用氧同位素進行地下水系統流入量來源比例之釐定。

在同位素分析化學中採用海水所含同位素比例做為參考值，分析水樣中同位素比例與海水中同位素比例之差異，即可計算出氧同位素差異比($\delta^{18}O$)，可表示如式

$$\delta^{18}O = \frac{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right) - \left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{SMOW}}{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{SMOW}} \times 1000 \quad (3.20)$$

其中，SMOW 為標準平均海水(Standard Mean Ocean Water)。同位素差異比之單位為千分比，以顯示不同來源的水所含氧同位素之微量差異。

本研究設定雨水中所含之同位素差異比為 δ_{rain} ，河水中所含之同位素差異比為 δ_{river} ，邊界地下水流入中所含之同位素差異比為 δ_{gw}^B ，區內地下水中所含之同位素差異比為 δ_{gw} ，假設地下水之氧同位素無季節性變化、雨水及河水之氧同位素會隨豐枯水期而變化，而且地下水系統之流入量、流失量及抽水量不足以影響地下水平均氧同位素組成，來推導同位素質量守恆方程式即可得到地下水系統各流入來源所佔之比例，四者依據質量守恆應滿足式(3.21)，將各項地下水系統入流量體之估算結果以及同位素差異比帶入方程式中，便計算出公式中各項入流量之體積，以此分離出雨水入滲補注量與河水入滲補注量。

$$\delta_{gw} = \delta_{rain} \left[\frac{Q_{rain}}{Q_{in}} \right] + \delta_{river} \left[\frac{Q_{river}}{Q_{in}} \right] + \delta_{gw}^B \left[\frac{Q_{gw}^{O,B}}{Q_{in}} \right] + \delta_{gw} \left[\frac{Q_{gw}^A}{Q_{in}} \right] \quad (3.21)$$

(5) 地下水系統流失量計算

地下水系統中之各項流出量與流入量以及蓄水變化量須滿足質量守恆，即蓄水變化量為流出量、流入量以及流失量總和所造成，因此地下水系統之流失量等於流入量減去流出量再減去蓄水變化量，如下式所示：



$$Q_l(i) = Q_{in}(i) - Q_{out}(i) - \Delta Q_s(i) \quad (3.22)$$

其中， $Q_l(i)$ 為第 i 月地下水系統之流失量(L^3)； $\Delta Q_s(i)$ 為第 i 月地下水系統之蓄水變化量(L^3)。

2. 地下水流數值模式

於過去不少地下水流數值模式建立之研究中(李振誥等, 2007; Igboekwe 等, 2008; Takounjou 等, 2009; 王韋勳, 2012; 林聖婷等, 2012)皆選用 MODFLOW 模式進行地下水流模式建立, 其發展時間較長且有較多樣且完善之套件可供使用以模擬實際地下水流系統, 因此本研究採用 GMS 開發介面下之 MODFLOW 模式來建立濁水溪沖積扇與名竹盆地地下水流聯合數值模式, 此外為模擬河川與地下水之交換量, 本研究於 MODFLOW 模式中導入河流演算套件(Streamflow Routing Package, SFR2)。

GMS(Groundwater Modeling System)為由美國 Brigham Young University 環境模型研究實驗室與美軍排水工程試驗工作站共同研發, 此開發介面內建許多模擬地下水流之軟體, 包含 MODFLOW、FEMWATER 及 MODAEM, 另外該軟體提供便利的資料輸入功能, 能夠支援 ArcGIS 軟體 shapfile 中之向量屬性資料, 另有視覺化(visualization)功能辨識地下水系統。

茲將地下水流數值模式分為 MODFLOW 之控制方程式與數值計算方法以及河流演算套件之控制方程式與交換機制敘述如後。

(1) MODFLOW 之控制方程式與數值計算方法

MODFLOW 地下水流數值模式係美國地質調查所(USGS)所發展, 採用有限差分法求解地下水流控制方程式, 計算地下水水位以及地下水收支平衡, 可用於處理複雜的三維地下水問題。該模式將地下水含水層劃分為數個網格(Cell), 如圖 3-7 所示, 根據達西定律(Darcy's Law), 在固定流體密度下, 其三維地下水流流動之控制方程式可由以下偏微分方程式表示之:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.23)$$

式中 K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分別為沿 x 、 y 和 z 方向的水力傳導係數(LT^{-1})； S 為孔隙介質之蓄水係數； h 為地下水頭(L)； W 為每單位體積之補注(Sources)或流出(Sinks) (T^{-1})； t 為時間(T)。

上式(3.23)結合欲模擬現地之邊界及初始條件，即可描述在非均質非等向性介質中暫態三維地下水流。左式表含水層在 x , y 和 z 各方向之入流與水頭變化及地下水補注與抽水造成之三維地下水流動模式；在等向性穩態流(steady flow)含水層系統中，因為流率為一常數，多孔介質之蓄水量為定值，此式可簡化為 Laplace 方程式，由給定之含水層流率、初始水位狀況與邊界條件可求得解析解。惟在大多數非穩態流(unsteady flow)系統中，含水層之水位變化在整個模式中是個變數，因此需將含水層系統劃分成網格，再利用數值計算以求得滿足各網格間之解與整個系統之近似解。

MODFLOW 模式可進行穩態(Steady State)與非穩態(Unsteady State)之設定，並針對含水層分層之性質設定提供 BCF(Block Centered Flow)、LPF(Layer Property Flow)以及 HUF(Hydrogeologic Unit flow)等三種水流套件(Flow Package)進行地下水流之數值模擬，本研究乃採用 BCF 套件進行模擬。MODFLOW 模式求解矩陣方程式時共提供直接求解法(Direct Solver, DE4)、預置共軛梯度法(Preconditioned Conjugate-Gradient, PCG2)以及強隱性法(Strongly Implicit Procedure, SIP)等三種求解套件，本研究乃採用 PCG2 方法進行有方程式求解。此外 MODFLOW 亦提供許多的套件如抽水(WEL1)、地面補注(RCH)、排水(DRN)、湖(LAK3)、蒸散(EVT1)、河流(SFR2)...以模擬各種地下水進出之情形。

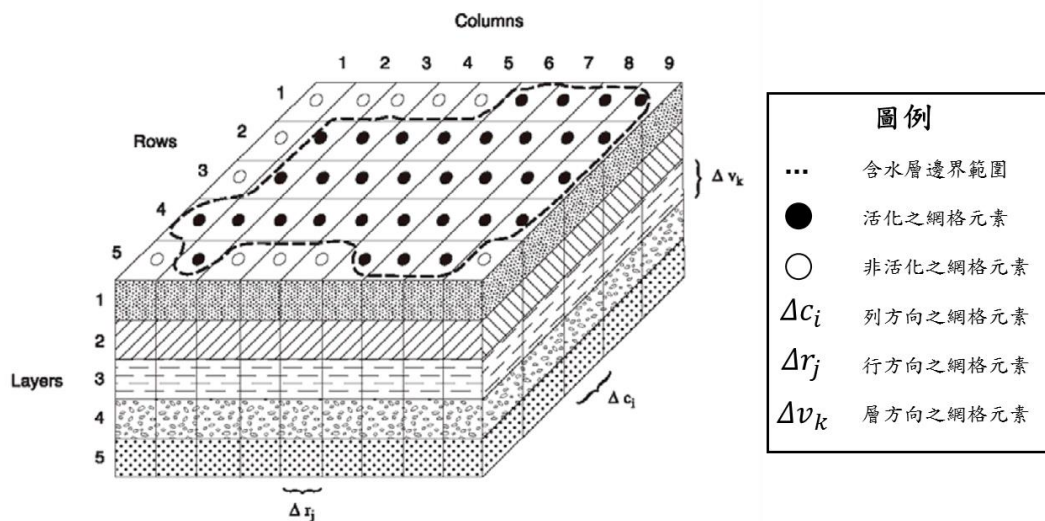


圖 3-7 含水層網格化示意圖

(2) 河流演算套件之控制方程式與交換機

河流演算套件(SFR)主要模擬流量通過河川網絡(包括河流以及其他支流匯流)

其河水與地下水之交換機制，在地下水流模式中每個時間兼具的河川流量固定，若 MODFLOW 模式中需模擬每個時間間距河道水位之變化情況，則會使求解過程更加複雜且耗時，故開發 SFR 套件以模擬一維非穩態(unsteady)流，並與 MODFLOW 連結以提供河流與地下水含水層間之交換量，其連續方程式如下所示。

$$w \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial L} + q_{out} = 0 \quad (3.24)$$

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)； L 為河道至最下游之長度(L)； q 為單寬出流量(L^2)； t 為時間(T)。

MODFLOW 模式使用達西定率計算河流與地下水的交換流量，並假設河流與地下水之交換過成為均勻流，其交換流量公式如下所示

$$Q_L = \frac{K_S w L}{m} (h_s - h_a) \quad (3.25)$$

其中， Q_L 為河流與地下水流的交換流量(L^3)； K_S 為河床底泥之水力傳導係數(LT^{-1})； m 為河床厚度(L)； h_a 為位於河床下含水層中之地下水位高程(L)。

透過上式，每日河床入滲量或是出滲量可以依據每日河道水位高程與地下水位高程計算得到。在 SFR 中，傳導項(KwL/m)是透過河床底泥之水力傳導係數(K_S)、河川長度(L)、河寬(W)以及河床厚度(m)計算得到，以上皆為 SFR 套件中所需輸入之基本參數，其餘參數如河道水位高程(h_a)則由流量輸入資料與其他基本參數資料推算而得。

此外 SFR 於計算河床滲漏量時，假設地下水位與河床底之間之不飽和含水層極薄，近乎於飽和含水層，然而當地下水位遠低於河床底時，所計算得到的河床滲漏量會不合理，故若該時間間距之地下水位低於河床底高程，則假設地下水位高程等於河床底高程，水力梯度取決於河川水位與河床底高程，以計算河川之滲漏量。

3. 決策變數之限制範圍

決策變數於優選模式求解過程中會不斷修正已得到最佳之目標函數值，本研究所採用之決策變數為水平水力傳導係數、垂直滲漏係數以及地面水補注量，其中地面水補注量則根據有無降雨其最小值需大於零，如式(3.5)所示；而水平水力傳導係數與垂直滲漏係數根據土壤組成與孔隙大小具有一限制範圍，本研究乃根據現地抽水試驗結果進行水文地質參數限制範圍之設定，現地抽水試驗結果雖無法直



接代表整個控制分區之實際平均值，但其試驗結果仍具有現地地質之組成特性，其平均值與現地試驗結果應相近，其差異應不超過一個級距，因此將現地試驗結果乘除十倍即為該水文地質參數之限制範圍。

3.1.3 目標函數

考量拘限含水層與非拘限含水層其比出水量與儲水係數之量級差異較大，相同地下水位變化其所影響之地下水蓄水量變化量體不同，為避免拘限含水層之水位變化較大但其實際蓄水量變化很小而影響整體率定之結果，因此本研究採用觀測與模擬之蓄水量誤差百分比均方根誤差值作為目標函數。均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)為計算兩筆資料之誤差平方和，再進行平均後開根號，如式(3.1)所示，RMSE 值能夠用來衡量兩筆數據間的離散程度，若均方根誤差越小則表示兩筆資料之離散程度越低，亦即兩筆資料相關性與差異越小，反之則越大，均方根誤差具有計算方便且能夠直觀判別兩組數據之差異性大小之一種評比指標。

假設地下水系統分為 f 層含水層以及 s 個觀測井分區，其地下水蓄水量模擬值與觀測值之誤差百分比均方根誤差越小，表示模式模擬之地下水位越接近地下水位觀測值，而本優選模式之目標即為找到使目標函數最小之決策變數時空分布。

3.2 優選模式求解流程

本研究所建立之優選模式求解流程如圖 3-8 所示，其率定過程中為針對決策變數，即水平水力傳導係數(K)、垂直滲漏係數(V_c)以及地面水補注量(Q_r)，進行率定，並以地下水位觀測資料作為率定是否完成之判斷依據。首先須設定決策變數之初始值，接著將決策變數初始值輸入地下水流模式中進行計算以得到地下水位模擬值，並由地下水位之模擬值與觀測值計算目標函數，判斷該次迭代是否達成停止條件，若是，則完成模式率定；若否，則由地下水位模擬值與觀測值計算蓄水量誤差歷線，並以經驗正交函數法分析蓄水量誤差歷線以計算決策變數修正量，得到下一次迭代之決策變數設定值，再重新輸入地下水流模式中，如此為一次迭代求解之流程。茲將優選模式之求解流程分為(1)設定決策變數初始值、(2)地下水流數值模式模擬地下水位值、(3)判斷停止條件、(4)計算蓄水量誤差歷線、(5)計算決策變數修正量等敘述如下。

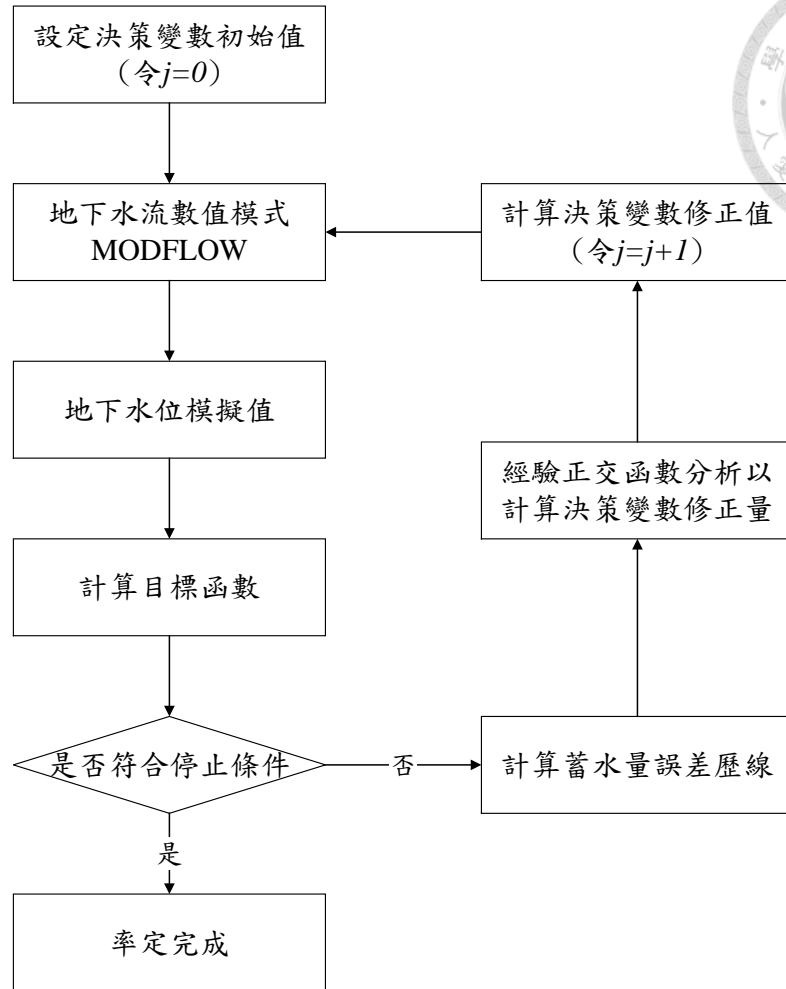


圖 3-8 優選模式求解流程

3.2.1 設定決策變數初始值

本研究之決策變數包含水平水力傳導係數、垂直滲漏係數以及地面水淨補注量等三項，其中水平水力傳導係數採用現地抽水試驗結果為初始值之設定；垂直滲漏係數則以垂直水力傳導係數為基礎，與該控制區域之含水層厚度進行計算以得到初始值；地下水補注量之初始值設定則根據地下水系統之蓄水量歷線所估算之地面水月補注量進行空間分配，其空間分配方法採用經驗正交函數分析地下水蓄水量歷線，以得地面水補注量之空間分布特徵值，進而計算得到各月之地下水補注量空間分布初始值。其經驗正交函數分析之說明如下：

經驗正交函數(EOF)為多變量分析方法的一種，其目的為從時間-空間變數中拆解出多個彼此互不相關之時間-空間之變數，用以解釋最多的原始變量。而這些拆解出來之時間-空間變數經過乘積與線性疊加後可還原成原本之時間-空間變數(Hannachi et al., 2007)，如式(3.26)所示。



$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) u_k(s) \quad (3.26)$$

其中， $X(t, s)$ 代表時間-空間變數矩陣，其維度包含空間座標以及時間序列； $u_k(s)$ 代表時間-空間變數的第 k 個空間特徵，亦即第 k 個空間變數； $c_k(t)$ 代表時間-空間變數的第 k 個時間特徵，可看作第 k 個空間變數所佔之權重(expansion coefficient)。 k 由 1 至 M 按照此 EOF 在原始資料中所佔的解釋變異量大小排列，EOF1 為原始資料中變異量最大的空間特徵，EOF2 為次大，以此類推。

在進行經驗正交函數分析之前，需先將資料整理排序為時間序列×空間座標之數值矩陣，列方向為第 1 至 p 個空間位置(於本研究為各個地下水位測站位置)，行方向為該空間位置之第 1 至 n 個時間序列(於本研究為各測站之蓄水量歷線)，其矩陣形式如下所示。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

將矩陣 X 經過正規化後計算其共變異數矩陣 $R = \frac{1}{n} X^T X$ ，並求解其特徵方程式

$$RC = C\Lambda \quad (3.28)$$

式中， Λ 為共變異數矩陣 R 之特徵值(eigenvalue)所組成之對角矩陣； C 為共變異數矩陣 R 之特徵向量(eigenvector)矩陣， Λ 與 C 之矩陣大小皆為 $p \times p$ 。

第 k 個 EOF 即為變異矩陣 R 的第 k 個特徵向量 \bar{u}_k ，其所對應之特徵值為 $\lambda_k^2, k=1, 2, 3, \dots, p$ ，表示為在 \bar{u}_k 方向的投影所解釋的變異量。通常特徵值會由大到小排列 $\lambda_1^2 \geq \lambda_2^2 \geq \dots \geq \lambda_p^2$ ，而經由 \bar{u}_k 投影的解釋變異量百分比($EV^E(k), \%$)可以表示為式(3.29)。

$$EV^E(k) = \frac{\lambda_k^2}{\sum_{k=1}^p (\lambda_k^2)} \times 100\% \quad (3.29)$$

將原始資料經由第 k 個 EOF 成分之特徵向量 $\bar{u}_k = (u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kp})^T$ 投影後得到第 k 個主成分(principal component, PC)， $X\bar{u}_k = \bar{a}_k = (a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{nk})^T$ ， \bar{a}_k 可改寫為：



$$a_{tk} = \sum_{j=1}^p x_{tj} u_{kj} \quad (3.30)$$

比較式(3.26)與式(3.30)可得 $c_k(t) = x_{tj}$ ， $u_k(s) = u_{kj}$ 。 $c_k(t)$ 即為此時空間變數的時間變量(expansion coefficient, EC)，通常亦被稱為 EOF 振幅(EOF amplitude)或 PC 得分(PC score)；而 $u_k(s)$ 則為空間變量 EOF，或是被稱為 PC 權重(PC loading)。在本研究中，將利用 EOF 分析研究區域各觀測井控制範圍內之地下水蓄水量歷線，拆解成時間與空間之 EOF 變數，將地下水蓄水量時空變動極為龐大的資料維度縮減到最重要的數個時空特徵，從中找出影響蓄水量變化最重要之地下水抽補過程。

3.2.2 地下水流數值模式模擬地下水位值

於計算地下水位模擬值之前，須先完成地下水流數值模式之建立，首先針對研究區域進行資料蒐集與概念分層，並針對地下水系統之流出流入量進行辨識，得到地下水流數值模式所需之各項水文量，將決策變數初始值以及其他參數設定與水文量設定輸入地下水流數值模式進行地下水流之模擬，以得到地下水位模擬值。

3.2.3 判斷停止條件

本研究之目標函數為地下水位觀測值與模擬值計算所得 RMSE 值，其值恆大於零，考量現實地下水系統之複雜程度，以地下水流數值模型無法完全模擬所有的不確定因素，因此本研究所設定之停止條件不以目標函數值的大小作為標準，而是以每次迭代其目標函數下降幅度為基準，若連續三次迭代其目標函數改善比率皆小於 5%，則優選模式便停止迭代，完成模式率定。

3.2.4 計算蓄水量誤差歷線

蓄水量誤差歷線之計算方式為將模擬地下水位減去觀測地下水位，再乘上控制面積與比出水量或儲水係數，其計算公式分為受壓含水層與非受壓含水層，如下式所示。

$$Q_{err,j}(f,s,i) = \begin{cases} [h_j^{cal}(f,s,i) - h^{obs}(f,s,i)] \times S_y \times A_{UC} & , \text{ for Unconfined Aquifer} \\ [h_j^{cal}(f,s,i) - h^{obs}(f,s,i)] \times S \times A_C & , \text{ for Confined Aquifer} \end{cases} \quad (3.31)$$

其中， $Q_{err,j}(f,s,i)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 s 分區、第 i 月蓄水量模擬誤差 (L^3)。



3.2.5 計算決策變數修正量

本研究引用徐年盛(2015)以經驗正交函數法進行地面水淨補注量之時空分布與參數之空間分佈率定之方法，計算優選模式三個決策變數之修正量，其中針對修正量公式稍作修改以增加收斂模式收斂的速度。茲將修正量計算方法依照三個決策變數分述如下。

1. 水平水力傳導係數

經由三維地下水流控制方程式(3.23)可得知，地下水位除了受到補注量與抽水量之影響外，還會受地下水流通量所影響，根據達西定律($V = -k[(h_2 - h_1)/L]$)，流通量主要由含水層底部高程差以及抽水補注所產生之水力坡降所造成，而含水層之水平水力傳導係數也會影響流通量之大小，水力傳導係數可由現地抽水試驗所求得，然而實務上受限於成本考量，難以得到完整與小尺度之水力傳導係數空間分佈，因此需以一系統化之方法來進行率定來得到水力傳導係數之種卻空間分佈。

第 $j+1$ 次迭代之水平水力傳導係數($K_{j+1}(f, s)$)可表示成第 j 次迭代之水平水力傳導係數($K_j(f, s)$)加上第 j 次迭代之率定修正量($\Delta K_j(f, s)$)，如式(3.32)所示。其中水平水力傳導係數之率定修正量設定如下：(1)以平均模擬誤差百分比為根據

$$\left(\frac{1}{12} \left[\sum_{i=1}^{12} \frac{Q_{err,j}(s,i)}{\text{Max}[Q_{sto}(s,i)] - \text{Min}[Q_{sto}(s,i)]} \right] \right)$$

類以及壓密程度有關，僅會隨不同空間位置之土壤組成不同而改變，並不隨時間而改變，模擬誤差越大其率定修正量會越大；(2)以數值模式所模擬計算得到之誤差歷線及其經驗正交函數(EOF)成分所代表之解釋變異量及其所對應之該分區特徵向量值為基礎，其中假設經過 EOF 特徵向量之空間分布、水文地質架構之現況與現地試驗分析後評判第 $R+1$ 至第 p 個 EOF 成分為流通量估算誤差所造成，解釋變異量越高之 EOF 時空變量代表為影響模擬誤差越大之時空分布，其率定修正量會越大。以計算得到水力傳導係數之率定修正量，如式(3.33)所示。

$$K_{j+1}(f, s) = K_j(f, s) + \Delta K_j(f, s) \tag{3.32}$$

$$\Delta K_j(f, s) = K_j(f, s) \cdot \frac{1}{12} \left[\sum_{i=1}^{12} \frac{Q_{err,j}(f, s, i)}{\text{Max}[Q_{sto}(f, s, i)] - \text{Min}[Q_{sto}(f, s, i)]} \right] \cdot \sum_{k=R+1}^p (EV_{f,j}^E(k) \cdot |u_{kfs,j}^G|) \tag{3.33}$$

其中， $K_{j+1}(f, s)$ 為第 $j+1$ 次迭代之第 f 含水層、第 s 分區水平水力傳導係數空間

變數(LT^{-1})； $K_j(f,s)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 s 分區水平水力傳導係數(LT^{-1})； $\Delta K_j(f,s)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 s 分區水平水力傳導係數修正量(LT^{-1})； $Q_{sto}(f,s,i)$ 為第 f 含水層、第 s 分區、第 i 月之地下水蓄水量(L^3)； $EV_{f,j}^E(k)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 k 個 EOF 所代表之解釋變異量百分比；以及 $|u_{kfs,j}^G|$ 為第 j 次迭代之第 k 個 EOF 所代表第 s 分區之特徵向量值。

2. 地面水補注量

地下水位之波動變化會受到區域抽水與補注量所引致之水力坡降而影響，使得觀測站控制區域之實際地面淨補注量無法由地下水蓄水量歷線直接看出來，因此需先濾除流通量所造成之雜訊以得到淨補注量正確之分佈趨勢，再將淨補注量濾除邊界出入流量以得到地面水淨補注量之時空分布。

第 $j+1$ 次迭代濾除區域流通雜訊後之淨補注量($Q_{r,j+1}^{net}(s,i)$)為第 j 次迭代之淨補注量($Q_{r,j}^{net}(s,i)$)加上第 j 次率定修正量($\Delta Q_{r,j}^{net}(s,i)$)，如式(3.34)所示。其中淨補注量之率定修正量設定如下：(1)以模擬誤差量($Q_{err,j}(s,i)$)所對應標準常態分布之機率密度($Q_{err,j}^{NorDis}$)為根據，模擬誤差越大之觀測井控制範圍其率定分配修正量越大；(2)以數值模式所模擬計算得到之誤差歷線及其各經驗正交函數(EOF)成分所代表之解釋變異量及其所對應之該分區特徵向量值為基礎(假設經過 EOF 特徵向量之空間分布、水文地質架構之現況與現地試驗分析後評判第 1 至第 R 個 EOF 成分為淨補注量估算誤差所造成，解釋變異量越高之 EOF 時空變量代表為影響模擬誤差越大之時空分布，其率定修正量會越大。以計算得到淨補注量之率定修正量，如式(3.35)所示。

$$Q_{r,j+1}^{net}(s,i) = Q_{r,j}^{net}(s,i) + \Delta Q_{r,j}^{net}(s,i) \quad (3.34)$$

$$\Delta Q_{r,j}^{net}(s,i) = \begin{cases} -Q_{err,j}(f,s,i) \cdot Q_{err,j}^{NorDis}(f,s,i) \cdot \sum_{k=1}^R EV_j^E(k) \cdot |u_{kfs,j}^G| & , \text{ for } i=1 \\ -(Q_{err,j}(f,s,i) - Q_{err,j}(f,s,i-1)) \cdot Q_{err,j}^{NorDis}(f,s,i) \cdot \sum_{k=1}^R EV_j^E(k) \cdot |u_{kfs,j}^G| & , \text{ for } else \end{cases} \quad (3.35)$$

$$Q_{err,j}^{NorDis}(f,s,i) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{\left(\frac{Q_{err,j}(f,s,i) - \mu_{err,j}(f,i)}{\sigma_{err,j}(f,i)} \right)^2}{2} \right] \quad (3.36)$$

其中， $Q_{r,j+1}^{net}(s,i)$ 為第 $j+1$ 次迭代之第 s 分區、第 i 月淨補注量 (L^3)； $Q_{r,j}^{net}(s,i)$ 為第 j 次迭代之第 s 分區、第 i 月淨補注量 (L^3)； $\Delta Q_{r,j}^{net}(s,i)$ 為第 j 次迭代之第 s 分區、第 i 月淨補注量修正量 (L^3)； $Q_{err,j}^{NorDis}(f,s,i)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 s 分區、第 i 月模擬誤差蓄水量所對應標準常態分布之機率密度； $\mu_{err,j}(f,i)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 i 月蓄水量誤差空間平均值 (L^3)； $\sigma_{err,j}(f,i)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 i 月蓄水量誤差空間標準差 (L^3)。

地下水系統淨補注量於豐水期與枯水期之組成比例不同，枯水期之補注來源以邊界入流補注為主，而豐水期之補注來源以地面水補注為主 (Hsu et al., 2013)，因此於濾除邊界出入流量以獲得地面水補注量時，分為枯水期、豐枯水期交界以及豐水期等三種情形進行計算：(1) 於枯水期時 ($\Delta Q_{sto}(s,i) < 0$)，濾除邊界入流淨補注量所反饋得到區內地面淨補注量之時空分布 ($Q_{r,j}(s,i)$) 可公式化為濾除抽補所引致區域流通量後之淨補注量時空分布 ($Q_{r,j}^{Cal}(s,i)$) 乘上 (1-區外補注比例)，如式 (3.27) 所示，經過通分後可推導如式 (3.30) 所示；(2) 於枯水期交界 ($\Delta Q_{sto}(s,i) \cong 0$) 時， $Q_{r,j}(s,i)$ 可公式化為 $Q_{r,j}^{Cal}(s,i)$ 乘上地面水補注比例，如式 (3.28) 所示，經過通分後可推導如式 (3.31) 所示；(3) 於豐水期時 ($\Delta Q_{sto}(s,i) > 0$)，因降雨所引致之補注量大，當區內地下水位抬升至高於邊界水位且地下水持續受到地面水補注時，會產生流失之情形，因此於豐水期時其地下水實際之地面淨補注量應大於地下水位實測值所反映出來之推估淨補注量， $Q_{r,j}(s,i)$ 可公式化為 $Q_{r,j}^{Cal}(s,i)$ 乘上地面水與補注過盛後而由邊界流失之補注比例，如式 (3.29) 所示，經過通分後可推導成式 (3.32) 所示。Yu 與 Chu (2010) 利用主成分分析濁水溪沖積扇地下水位歷線，以釐清影響水位變動之主要因素，結果顯示第 3 個以後之 EOF 成分分別與地面水、邊界地下水補注及其交換有關。假設造成模擬誤差之因素及來源量與影響水位波動量之因素與來源量相同，應用主成分分析月模擬誤差蓄水量歷線得到各月 EOF 之特徵值進行比



例估算，其比例資訊隱含在 EOF3 以後各鄰近 EOF 之特徵值比值歷線中，將特徵值比值歷線中之合理範圍平均以估算地面水補注與邊界地下水補注間之比例，如式(3.33)至式(3.35)所示。

$$Q_{r,j+1}(s,i) = Q_{r,j+1}^{net}(s,i) \cdot \beta_j$$

$$= \begin{cases} Q_{r,j+1}^{net}(s,i) \cdot \left[1 - \frac{Q_{r,O.R.}^{act}(s,i)}{Q_{r,surf}^{act}(s,i) + Q_{r,O.R.}^{act}(s,i)} \right], & \Delta Q_{sto}(f,s,i) < 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

$$= \begin{cases} Q_{r,j+1}^{net}(s,i) \cdot \left[\frac{Q_{r,surf}^{act}(s,i)}{Q_{r,surf}^{act}(s,i) + Q_{r,O.R.}^{act}(s,i)} \right], & \Delta Q_{sto}(f,s,i) \cong 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

$$= \begin{cases} Q_{r,j+1}^{net}(s,i) \cdot \left[\frac{Q_{r,surf}^{act}(s,i) + Q_{r,O.R.}^{act}(s,i)}{Q_{r,surf}^{act}(s,i) + Q_{r,O.R.}^{act}(s,i)} \right], & \Delta Q_{sto}(f,s,i) > 0 \end{cases} \quad (3.29)$$

$$\approx \begin{cases} Q_{r,j+1}^{net}(s,i) \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + Q_{r,surf}^{act}(s,i)/Q_{r,O.R.}^{act}(s,i)} \right], & \Delta Q_{sto}(f,s,i) < 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\approx \begin{cases} Q_{r,j+1}^{net}(s,i) \cdot \left[\frac{1}{1 + Q_{r,O.R.}^{act}(s,i)/Q_{r,surf}^{act}(s,i)} \right], & \Delta Q_{sto}(f,s,i) \cong 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\approx \begin{cases} Q_{r,j+1}^{net}(s,i) \cdot \left[\frac{1 + Q_{r,O.R.}^{act}(s,i)/Q_{r,surf}^{act}(s,i)}{1} \right], & \Delta Q_{sto}(f,s,i) > 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

$$\approx \begin{cases} Q_{r,j+1}^{net}(s,i) \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{\sum_{k=r_{s,j}}^{r_{e,j}} \left[(\lambda_{k,i,j}^E)^2 / (\lambda_{k-1,i,j}^E)^2 \right]}{r_{e,j} - r_{s,j}}} \right], & \Delta Q_{sto}(f,s,i) < 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

$$\approx \begin{cases} Q_{r,j+1}^{net}(s,i) \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{\sum_{k=r_{s,j}}^{r_{e,j}} \left[(\lambda_{k,i,j}^E)^2 / (\lambda_{k-1,i,j}^E)^2 \right]}{r_{e,j} - r_{s,j}}} \right], & \Delta Q_{sto}(f,s,i) \cong 0 \end{cases} \quad (3.34)$$

$$\approx \begin{cases} Q_{r,j+1}^{net}(s,i) \cdot \left[\frac{1}{1 / \left[1 + \frac{\sum_{k=r_{s,j}}^{r_{e,j}} \left[(\lambda_{k,i,j}^E)^2 / (\lambda_{k-1,i,j}^E)^2 \right]}{r_{e,j} - r_{s,j}} \right]} \right], & \Delta Q_{sto}(f,s,i) > 0 \end{cases} \quad (3.35)$$

其中， β_j 為第 j 次迭代之邊界補注濾除比例； $Q_{r,j+1}(s,i)$ 為第 $j+1$ 次迭代之地面水

補注量； $\Delta Q_{sto}(f,s,i)$ 為第 f 含水層、第 s 分區、第 i 月之蓄水變化量； $Q_{r,surf}^{act}(s,i)$ 為第 s 分區、第 i 月實際之地面水補注量； $Q_{O,O.R.}^{act}(s,i)$ 為第 s 分區、第 i 月地下水位過高後由邊界流失之實際淨補注量； $Q_{r,O.R.}^{act}(s,i)$ 為第 s 分區、第 i 月邊界流入之實際淨補注量)；以及 $r_{s,j}$ 與 $r_{e,j}$ 分別為第 j 次迭代之特徵值比值 $(\lambda_{k,i,j}^E)^2 / (\lambda_{k-1,i,j}^E)^2$ 歷線中合理範圍之起始與結束的 EOF 編號。

3. 垂直滲漏係數

第 $j+1$ 次迭代之垂直滲漏係數 ($V_{L,j+1}(f,s)$) 可表示成第 j 次迭代之垂直滲漏係數 ($V_{L,j}(f,s)$) 加上第 j 次迭代之率定修正量 ($\Delta V_{L,j}(f,s)$)，如式(3.36)所示。其中垂直滲漏係數之率定修正量設定如下：(1) 以平均模擬誤差百分比為根據

$$\left(\frac{1}{12} \left[\sum_{i=1}^{12} \frac{Q_{err,j}(f,s,i)}{\text{Max}[Q_{sto}(f,s,i)] - \text{Min}[Q_{sto}(f,s,i)]} \right] \right),$$

考量垂直滲漏係數僅會隨不同空間

位置之土壤組成不同而改變，並不隨時間而改變，模擬誤差越大其率定修正量會越大；(2) 以數值模式所模擬計算得到之誤差歷線及其各經驗正交函數(EOF)成分所代表之解釋變異量及其所對應之該分區特徵向量值為基礎，假設經過 EOF 特徵向量之空間分布、水文地質架構之現況與現地試驗分析後評判第 1 至第 R 個 EOF 成分為補注量估算誤差所造成，解釋變異量越高之 EOF 時空變量代表為影響模擬誤差越大之時空分布，其率定修正量會越大。以計算得到垂直滲漏係數之率定修正量，如式(3.37)所示。

$$V_{L,j+1}(f,s) = V_{L,j}(f,s) + \Delta V_{L,j}(f,s) \quad (3.36)$$

$$\Delta V_{L,j}(f,s) = V_{L,j}(f,s) \cdot \frac{1}{12} \left[\sum_{i=1}^{12} \frac{Q_{err,j}(f,s,i)}{\text{Max}[Q_{sto}(f,s,i)] - \text{Min}[Q_{sto}(f,s,i)]} \right] \cdot \sum_{k=1}^R (EV_j^E(k) \cdot |u_{f/s,j}^G|) \quad (3.37)$$

其中， $V_{L,j+1}(f,s)$ 為第 $j+1$ 次迭代之第 f 含水層、第 s 分區垂直滲漏係數 (T^{-1})； $V_{L,j}(f,s)$ 為第 j 次迭代之第 f 含水層、第 s 分區垂直滲漏係數 (T^{-1})； $\Delta V_{L,j}(f,s)$ 為第 j 次迭代之垂直滲漏係數修正量 (T^{-1})。

第四章 方法應用

本研究將所建立之優選模式應用於濁水溪沖積扇地下水流數值模式之率定，此外為模擬濁水溪沖積扇頂隘口處之地下水流入量，因此於建立濁水溪沖積扇



地下水流數值模式時一併建立名竹盆地之地下水流數值模式。茲將方法應用分為研究區域概述、含水層概念分層與邊界辨識、地下水系統流出流入量辨識、地下水流數值模式建立以及地下水流數值模式率定結果等五個部份分述如下。

4.1 研究區域概述

本研究之研究區域包含名竹盆地與濁水溪沖積扇，將兩區域之區域概述分述如下。

4.1.1 名竹盆地

名竹盆地位於南投縣名間鄉與竹山鎮之間，濁水溪由東向西流經名竹盆地，支流東埔蚋溪與清水溪分別於本區域匯流至主流濁水溪，北鄰八卦山台地，南有斗六丘陵及竹山丘陵環伺，中間則有竹山台地隆起。邊界範圍以地質斷層及地形變化為依據，東起車籠埔斷層，西至八卦山背斜與內林背斜連線，北以八卦山台地為界，南以竹山丘陵為界，總面積約 53.91 平方公里，如圖 4-1 所示。

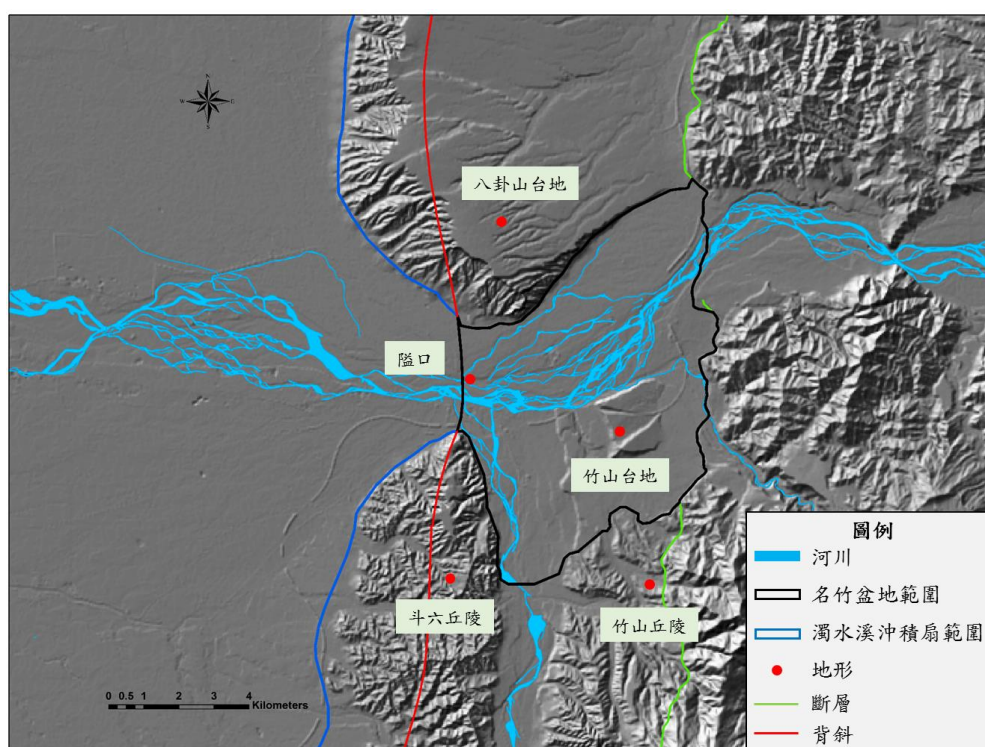


圖 4-1 名竹盆地範圍

名竹盆地區域概述分為水文特性、地文特性以及穩定氧同位素資料列述如下：

1. 水文特性

名竹盆地位於濁水溪沖積扇扇頂延伸區域，海拔高程為 100 公尺以上，研究區域附近雨量站有竹山雨量站、集集雨量站以及桶頭雨量站，其中竹山雨量站位於

名竹盆地範圍中心範圍附近，為名竹盆地最具代表性之雨量站，由 2004 年至 2012 年之降雨量資料統計顯示，名竹盆地之年降雨量平均為 2279.73mm，每年降雨量大多集中於 5 月至 10 月豐水期間。而根據中央地調所「台灣中段山區地下水資源調查與評估」之調查，顯示名竹盆地之年蒸發量約為 900~980mm。

名竹盆地內主要河川為濁水溪本流以及東南側東埔蚋溪與南側清水溪等兩條支流，其河川流量於濁水溪匯流後由下游二水鼻子頭之隘口流出。由於濁水溪上游有集集攔河堰攔蓄河川水源，因此濁水溪主流之流量乃取決於集集攔河堰之放流量，根據經濟部水利署中區水資源局所提供集集攔河堰運轉月報，2012~2014 年之年平均放流量為 116.93CMS；東埔蚋溪之流量以延平橋站之流量紀錄資料為主，年平均流量為 6.33CMS；清水溪之河川流量則以桶頭堰為代表，年平均流量為 27.26CMS；而流出名竹盆地之河川流量以隘口處附近之彰雲橋站為代表，年平均流量為 168.91CMS。

2. 地文特性

名竹盆地附近之主要岩層有沖積層、頭嵙山層火炎山段、卓蘭層、階地堆積層以及紅土台地堆積層，如圖 4-2 所示。沖積層主要分布於濁水溪主流與清水溪支流河道與兩岸河畔附近，車籠埔斷層以西的沖積層底下為頭嵙山礫岩層。八卦山台地、竹山台地以及斗六丘陵北側與東側之底部岩層主要由頭嵙山火炎山段礫石所組成，僅地表所覆蓋之岩層不同，八卦山台地與竹山台地為紅土台地堆積層覆蓋，竹山丘陵北部則是階地堆積層覆蓋，斗六丘陵除了坪頂附近有階地堆積層覆蓋外則另無其他岩層覆蓋。

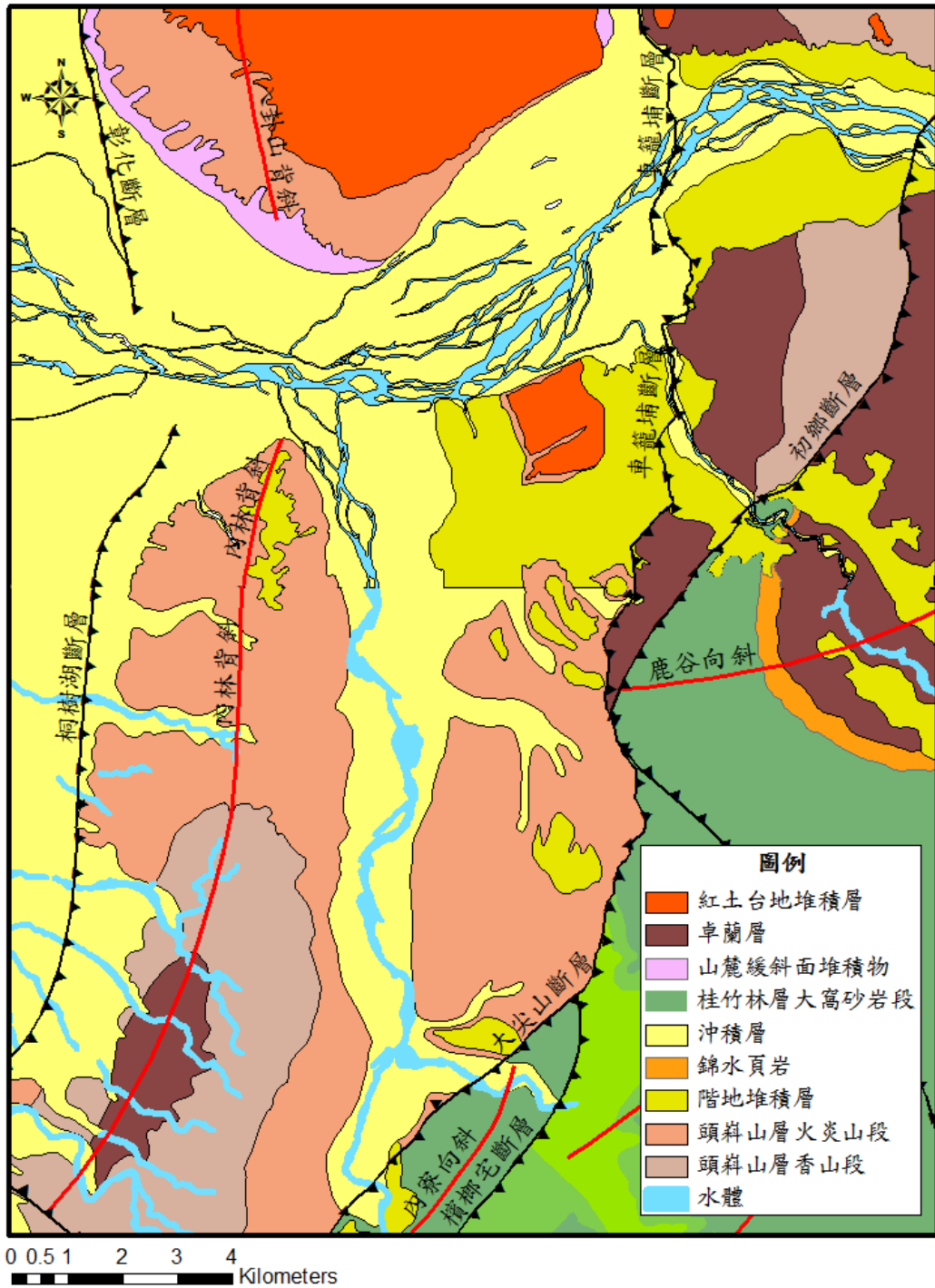


圖 4-2 名竹盆地附近地質圖

(資料來源：中央地質調查所，1996)

名竹盆地範圍附近共有 6 口地下水位觀測井以及經濟部地調所(1996)於濁水溪及清水溪河道之 20 口地質鑽探井，其位置分布如圖 4-3 所示，其中 6 口觀測井之地質柱狀圖如圖 4-4 所示，20 口地質鑽探井之地質柱狀圖如圖 4-5 與圖 4-6 所示，本研究將這些觀測井與地質鑽探井之位置與地質柱狀圖資料做為名竹盆地含水層

概念化分層之參考依據。位於河畔附近之新民與觸口兩井上層主要為沖積層，下層主要為頭嵙山礫岩，新民井多由粗礫及泥質礫組成，而觸口井由泥質礫及少數泥質薄層組成，判定為非受壓含水層；位於竹山台地上之竹山井為上層階地堆積層與下層頭嵙山火炎山段礫岩層，其中砂及泥將粗礫與泥質礫分隔為多層，為多層受壓含水層；位於斗六丘陵之坪頂與鯉魚兩井，亦為頭嵙山火炎山段礫岩層，組成由泥層將礫石層分隔為多層，為多層受壓含水層。

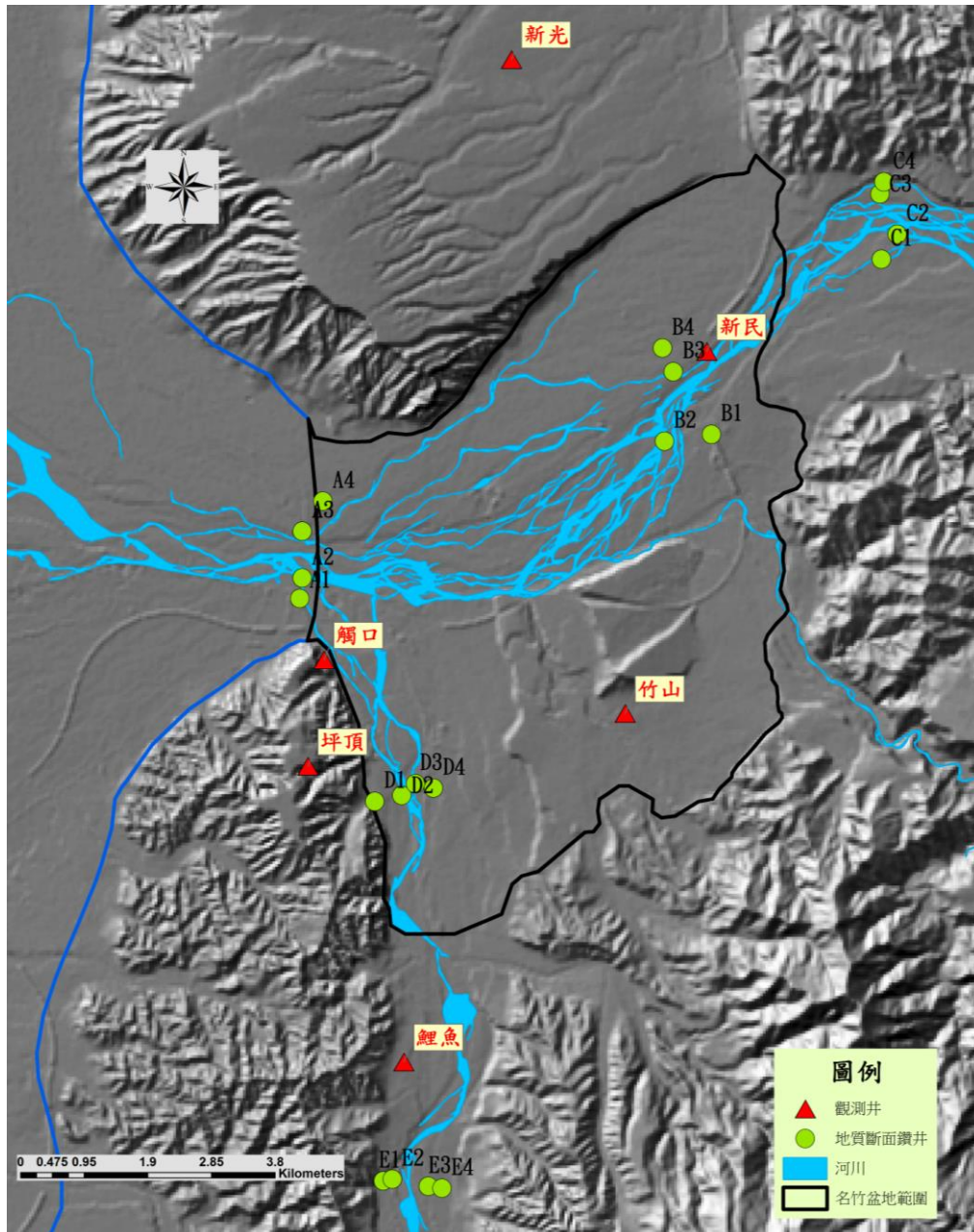


圖 4-3 名竹盆地觀測井與河川地質斷面鑽井位置圖

(資料來源：中央地質調查所，1996)

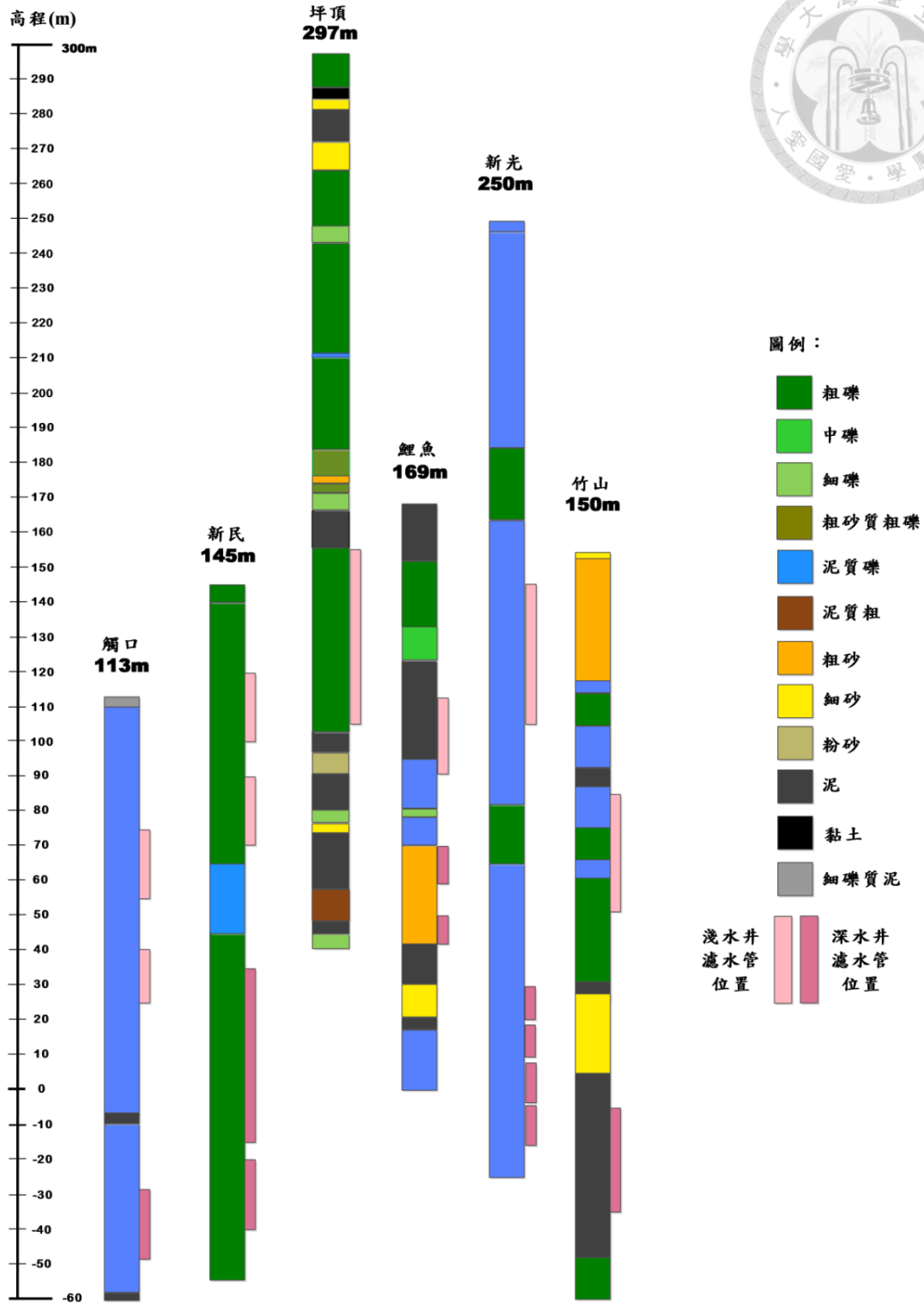


圖 4-4 名竹盆地觀測井地質柱狀圖及濾水管位置

(資料來源：中央地質調查所，1996)

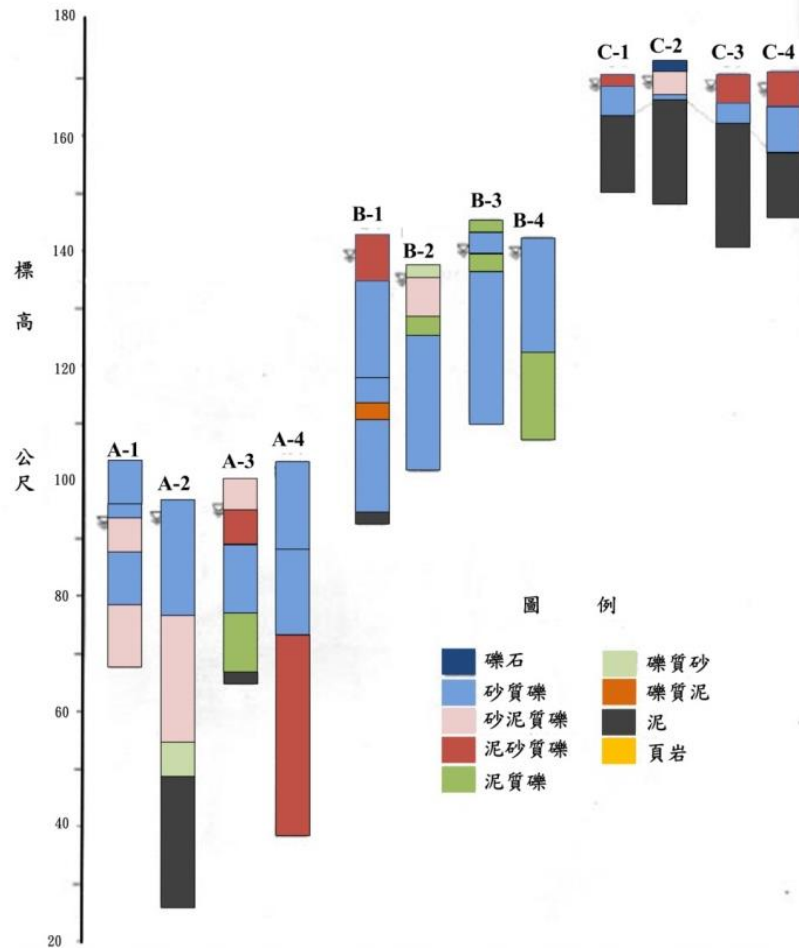
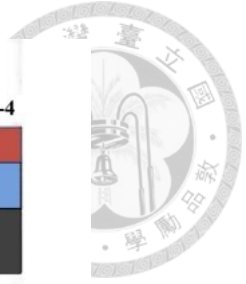


圖 4-5 濁水溪 A 至 C 河道斷面地質柱狀圖

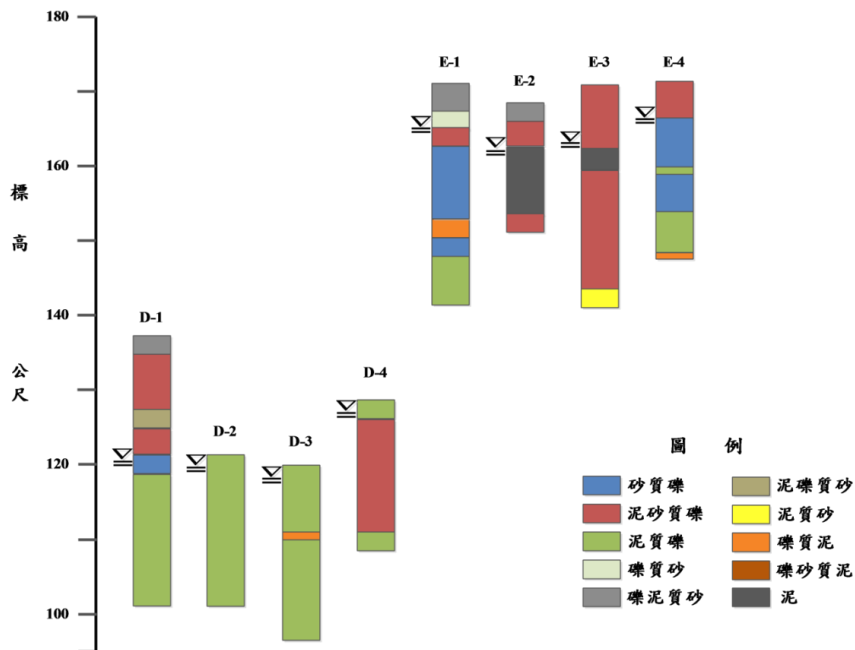


圖 4-6 清水溪 D、E 河道斷面地質柱狀圖

(資料來源：中央地質調查所，1996)



3. 穩定氧同位素資料

名竹盆地之氧同位素資料引用中央研究院地球科學研究所汪中和博士收集水樣分析後之結果，其中氧同位素隨時間變化，但在空間上不因地域不同而變化，因此本研究將地下水、雨水以及河水之氧同位素分為枯水期與豐水期各別計算之。

名竹盆地區內地下水之氧同位素採用範圍內之地下水位觀測井所採集之氧同位素平均值為代表值，包括新民(1)(2)、竹山(1)(2)與觸口(1)(2)共 6 口觀測井，其氧同位素差異比不隨時間改變，平均為-8.04‰；區外地下水之氧同位素採用名竹盆地範圍外之地下水位觀測井所採集之氧同位素平均值為代表值，包括新光(1)(2)、坪頂(1)、社寮(1)、鯉魚等 5 口觀測井為區外地下水之氧同位素代表值，其氧同位素差異比不隨時間改變，平均為 7.31‰；名竹盆地附近之雨水氧同位素採集樣本數較為缺乏，僅有竹山、二水、下水埔三處雨量站各一筆採集樣本，因此以南投縣之雨水氧同位素作為名竹盆地雨水之氧同位素代表值，於豐水期與枯水期分別為-6.90‰與-3.71‰；在河水之氧同位素方面，不同河川的氧同位素組成不同，清水溪支流豐、枯水期各代表值為-8.64‰與-8.27‰，而濁水溪之豐、枯水期各代表值為-10.06‰與-10.59‰，將濁水溪與清水溪之氧同位素值以河川流量比(0.71：0.29)為權重進行平均，作為名竹盆地河水之氧同位素代表值，茲將各類水體之氧同位素整理如表 4-1。

表 4-1 名竹盆地各類水體之氧同位素

	區內地下水		區外地下水		雨水		河水	
	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	樣本數	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	樣本數	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	樣本數	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	樣本數
豐水期	-8.04	30	-7.31	35	-6.90	218	-9.65	14
枯水期					-3.71	129	-9.91	20

4.1.2 濁水溪沖積扇

濁水溪沖積扇位於台灣西岸之中部平原，北起烏溪，南至北港溪，東以八卦山台地及斗六丘陵與平原交界處為界，西止於台灣海峽。濁水溪沖積扇主要為濁水溪經年累月以來沖積而成，涵蓋彰化縣與雲林縣，此兩縣市以濁水溪沖積扇為交界，濁水溪沖積扇之面積約為 2,079 平方公里，其範圍如圖 4-7 所示。

濁水溪沖積扇區域概述依照水文特性、地文特性、以及穩定氧同位素資料列述如下：



圖 4-7 濁水溪沖積扇範圍圖

1. 水文特性

濁水溪沖積扇之降雨量空間分布呈現由沿海至內陸逐漸增加，山區降雨量多於平地之趨勢；降雨量時間分布上，每年 5 月至 10 月為豐水期，梅雨與颱風接替帶來大量降雨，約佔年降雨量之 85%，而 11 月至隔年 4 月為枯水期降雨量較少，約佔年降雨量之 15%（經濟部水利署，2011）。統計濁水溪沖積扇 2000 年至 2014 年之降雨量資料得年平均降雨量約為 1543.61 mm。

濁水溪沖積扇內主要有三個地面水系，分別為北側之烏溪、南側之北港溪，以及中間之濁水溪，如圖 4-8 所示。茲將三個主要地面水系概述如下：

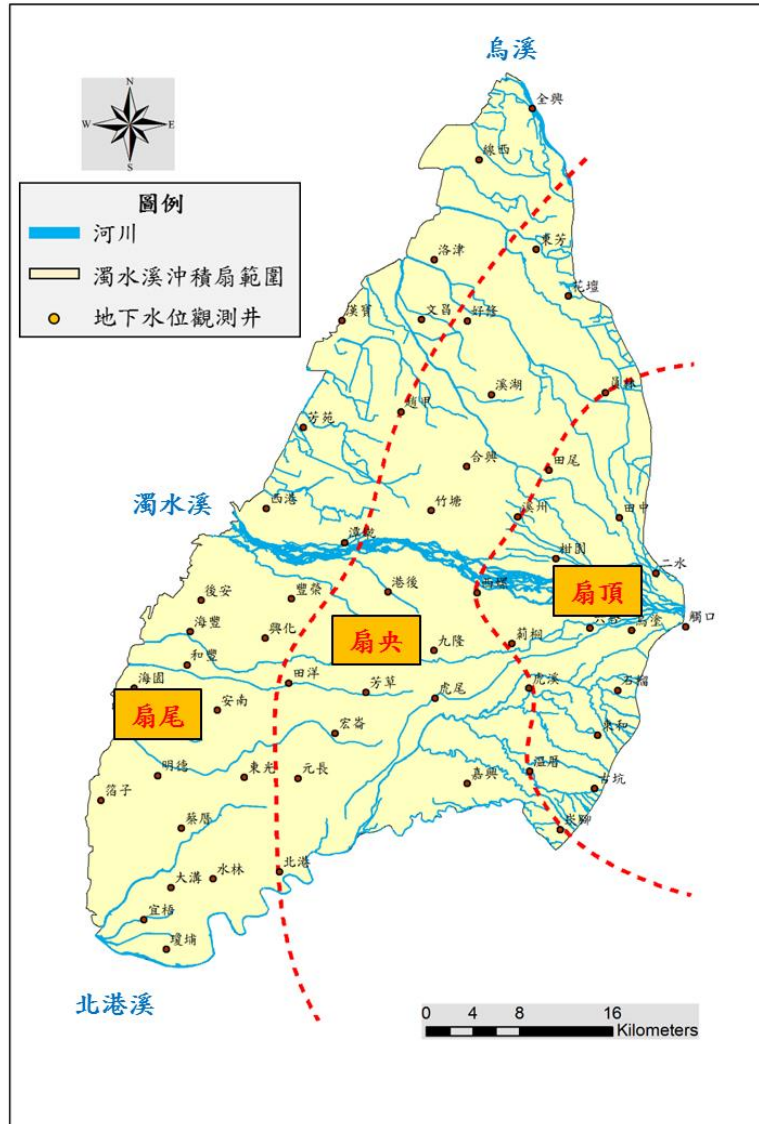


圖 4-8 濁水溪沖積扇扇頂、扇央與扇尾分區

(1) 烏溪流域

烏溪源於中央山脈合歡山西麓，下游河段因流經臺中市大肚區，舊稱大肚溪。烏溪為臺中市與彰化縣之界河，烏溪主流和支流交匯處，形成多個沖積扇，流域面積 2,025 平方公里，年逕流量 37.27 億立方公尺。河床為礫石與砂，且在中游大肚鄉之地表岩性為礫石，透水性佳。

(2) 濁水溪流域

濁水溪源於合歡山主峰與東峰間，由於其溪水夾帶大量之泥沙，以致其溪水長年渾濁而得名，主要支流有萬大溪、丹大溪、陳有蘭溪、清水溪。濁水溪主流在神龍橋附近與陳有蘭溪匯流，經集集攔河堰與名竹盆地，在二水鼻仔頭隘口處流出名竹盆地，經濁水溪沖積平原，在雲林縣麥寮鄉墘厝流入台灣海峽。流域面積



3,156 平方公里，年逕流量 60.95 億立方公尺，河床為礫石與砂，下游河床多粉土及黏土，為雲林縣重要農業灌溉水源之一。

(3) 北港溪

北港溪為台灣西部平主要河川之一，發源阿里山西麓丘陵地帶林內鄉七星嶺，其上游是虎尾溪，從虎尾平和厝以下稱為北港溪，流域面積 645 平方公里，年逕流量 6.62 億立方公尺，北港溪為蜿蜒型河川，河床質屬於砂質、礫石質河床。

2. 地文特性

濁水溪沖積扇之沉積物主要來自上游濁水溪集水區，於地層沉積的過程中歷經四次海進與四次海退，因此呈現海相與陸相犬牙交錯沉積之地層構造。陸相沉積環境包括礫石質辮狀河、砂質辮狀河及區流等環境，沉積物通常屬於礫石、粗中砂或細砂，大致歸類為含水層；海相沉積環境則包括沿岸沼澤、濱岸至淺海等環境，沉積物通常屬於細顆粒的粘土、泥或粉砂，大致可歸類為阻水層。因此，濁水溪沖積扇於海進海退循環的過程中，形成阻水層與含水層交互產生之機制，為濁水溪沖積扇含水層的主要結構基礎。

中央地質調查所（1999）依據濁水溪沖積扇地形、地質及地層材料狀況，將其分為扇頂、扇央以及扇尾三區，員林、溪州、西螺、虎溪、溫厝聯線以東為扇頂區，以西至好修、趙甲、潭墘、田洋、北港聯線為扇央區，扇尾區為扇央區以西至沿海處，如示，圖中紅色虛線為三區之分隔線。扇頂區各含水層間無明顯之阻水層存在，為濁水溪沖積扇主要之地下水補注區，河水、降雨及灌溉水等地面水源可直接入滲補注至深層地下水，並流入下游之含水層；扇央區各含水層間有明顯之阻水層存在，地面水源僅能入滲補注第一含水層，無法直接補注更深層之含水層，地層材料以砂礫材料所佔之比例較大；扇尾區存在明顯的阻水層，地層材料以粉砂、泥、及粘土所佔之比例較大，而砂礫材料所佔之比例較小。

3. 穩定氧同位素資料

濁水溪沖積扇區域內地下水之氧同位素差異比由區內地下水位觀測井所採集之資料為代表，其氧同位素組成不隨時間而改變，平均值為-7.76‰，總樣本數有 368 筆；區外地下水之氧同位素差異比由區外地下水位觀測井所採集之資料為代表，其氧同位素組成亦不隨時間而改變，平均值為-7.52‰，總樣本數有 88 筆；雨

水之氧同位素隨時間其變異性較大，因此分為豐水期與枯水期各別估算，其值分別為-6.32‰與-3.79‰，其樣本數分別為 36 和 41 筆；河水之氧同位素也分為豐水期與枯水期各別估算，其值分別為-9.13‰與-9.62‰，其樣本數分別為 40 和 43 筆。茲將各類水體之氧同位素整理如表 4-2。

表 4-2 濁水溪沖積扇各類水體之氧同位素

	區內地下水		區外地下水		雨水		河水	
	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	樣本數	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	樣本數	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	樣本數	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	樣本數
豐水期	-7.76	368	-7.52	88	-6.32	36	-9.13	40
枯水期					-3.79	41	-9.62	43

4.2 含水層概念分層與邊界辨識

含水層概念分層與邊界辨識分為名竹盆地與濁水溪沖積扇分述如下：

4.2.1 名竹盆地

於本研究之名竹盆地地下水含水層之概念分層乃根據王韋勳(2012)之研究，將名竹盆地分為三個含水層，由圖 4-4 至圖 4-6 可看出名竹盆地之礫石層與泥質礫層無深厚泥層或黏土層隔阻，故不區分阻水層。於本研究所劃分之名竹盆地範圍表層土壤大多為沖積層，因此將研究區域之沖積層定為第一含水層，厚度約 20~33m，而竹山台地之表面無沖積層覆蓋，故以階地堆積層為第一含水層，其底部約位於地表下 33.5m；第一含水層以下之地質接為頭嵙山礫石層所組成，然而目前尚無足夠深度的鑽探資料得知頭嵙山礫石層之厚度，故將第二、三含水層之厚度分別設定 50 公尺，其概念分層如所示。完成名竹盆地之概念分層後即可定義觀測水位所屬之含水層，研究範圍內之地下水位觀測站之淺水井並無位於沖積層之濾水管設置，然而本研究仍需觀測水位研析第一含水層之地下水系統，故將淺水井歸類為第一含水層，深水井歸類於二、三含水層，如表 4-3 所示。

表 4-3 名竹盆地含水層概念分層與地下水位觀測井分層歸屬

井名	地表高程 (m)	第一含水層 底部高程(m)	第二含水層 底部高程(m)	第三含水層 底部高程(m)	含水層歸屬
新民(1)	144	115.5	65.5	15.5	1
新民(2)					2、3
竹山(1)	150	116.5	66.5	16.5	1
竹山(2)					2、3
觸口(1)	113	80	30	-20	1
觸口(2)					2、3
坪頂	297	177	127	77	1

名竹盆地觀測井與經濟部地調所(1996)所鑽設之 20 河床口斷面地質鑽探井之試驗 K 值如表 4-4 與表 4-5 所示，由表中可看出沖積層之 K 值約 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ m/s，頭嵙山層之 K 值約 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ m/s。名竹盆地尚無現地試驗指出當地的比出水量與儲水係數，王韋勳(2012)依據地下水位觀測站所屬之地質岩性並引用 Johnson, A.J. (1967) 依地質材料所提出之分類，計算名竹盆地比出水量(S_y)約 0.152~0.26，儲水係數(S)約為 10^{-4} 。

表 4-4 名竹盆地觀測井之水文地質參數

站名	井深 (m)	水井效率 %	T (m ² /min)	K (m/min)	Q/S (cmh/m)
新民(1)	78	73.11	0.9864	0.01333	50.228
新民(2)	192	79.34	0.1306	0.002041	3.98
竹山(1)	102	84.24	0.0308	0.0007	1.223
竹山(2)	192	85.14	0.012	0.000218	0.818
觸口(1)	95	96.58	0.0952	0.001046	3.807
觸口(2)	180	97.37	0.02	0.00037	0.782
坪頂(1)	204	96.43	0.0018	0.000017	0.154

(資料來源：中央地質調查所，1996)

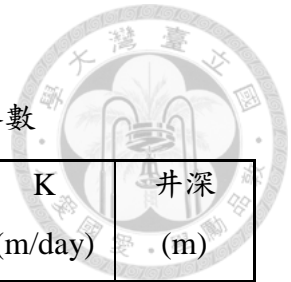


表 4-5 濁水溪與清水溪河床下含水層水文地質參數

井號	地表高程 (m)	濾管長度 (m)	T (m ² /min)	T (m ² /day)	K (m/sec)	K (m/day)	井深 (m)
A1	102.87	10.0	0.42	603.07	6.980E-04	60.31	35
A2	96.60	25.0	0.54	771.55	3.572E-04	30.86	70
A3	100.12	17.0	0.33	468.72	3.191E-04	27.57	35
A4	103.43	55.0	0.16	234.86	4.942E-05	4.27	65
B1	142.69	41.0	5.68	8174.88	2.308E-03	199.39	50
B2	136.93	30.0	0.82	1186.13	4.576E-04	39.54	35
B3	145.32	30.0	1.78	2563.92	9.892E-04	85.46	35
B4	142.23	27.0	0.36	515.81	2.211E-04	19.10	34.94
C1	170.54	5.0	0.27	384.48	8.880E-04	76.72	20
C2	172.93	5.0	0.38	548.64	1.270E-03	109.73	26.6
C3	170.66	4.0	1.58	2275.20	6.600E-03	570.24	30
C4	171.14	7.0	2.44	3513.60	5.800E-03	501.12	24.94
D1	136.47	5.0	0.00	2.71	6.270E-06	0.54	33
D2	123.69	3.5	0.00	1.24	4.110E-06	0.36	20
D3	120.83	10.0	0.16	231.84	2.680E-04	23.16	28
D4	127.59	10.0	0.38	551.52	6.380E-04	55.12	20
E1	171.59	10.0	6.07	8744.40	1.010E-02	872.64	30
E2	169.52	4.0	0.00	5.88	1.700E-05	1.47	17.3
E3	171.37	5.0	0.17	241.92	5.590E-04	48.30	30
E4	171.91	10.0	0.74	1058.40	1.230E-03	106.27	23

註：井號 A～C 剖面為濁水溪本流 3 條代表性地質剖面
井號 D～E 剖面為清水溪支流 2 條代表性地質剖面

(資料來源：中央地質調查所，1996)

名竹盆地之地下含水層邊界乃根據地質構造進行辨識，如圖 4-1 所示，北部緊鄰八卦山台地地勢較高，區外地下水由北向南流入名竹盆地內，為入流量邊界；東側為車籠埔斷層經過，阻斷地下水流流線，為無流量邊界；南方邊界緊鄰竹山台地與斗六丘陵之北側東側，有區外地下水流入名竹盆地，為入流量邊界；西側



隘口處之第二三含水層為八卦山台地與斗六丘陵背斜連接處，阻斷地下水流線，僅第一含水層之沖積層有地下水流流量由名竹盆地流出至濁水溪沖積扇，為出流量邊界。

4.2.2 濁水溪沖積扇

經濟部地調所(1999)依濁水溪沖積扇岩性進行地層比對，將濁水溪沖積扇水文地質架構分為四層含水層與三層阻水層，茲將各含水層及阻水層之岩性變化敘述如下：

1. 含水層(一)

含水層(一)位於濁水溪沖積扇地區水文地質系統之最表層，分布範圍涵蓋全區，平均厚度約 42 公尺。本層於沖積扇扇頂附近以礫石層和粗砂層為主，厚度較大；扇央及扇尾之岩性漸次相變為細砂層和泥層；表面及內部常有延展性良好之厚泥層分布，造成地下水層中局部產生受壓或分段之現象。儲水係數 S 或比出水率 S_y 在扇頂非拘限含水層部分約為 0.137 至 0.237 之間，其他拘限含水層區則在 10^{-4} 至 10^{-3} 之間；水力傳導係數 K (Hydraulic conductivity)，在非拘限含水層約為 1.51 至 151.98m/day 之間，在拘限含水層則為 0.08 至 70.27m/day 之間。

2. 阻水層(一)

阻水層一位於含水層一之下，廣泛分布於沖積扇扇央及扇尾地區，西側延伸入海，東側於離彰雲大橋十數公里處漸減；最大厚度約 39 公尺，平均厚度為 14 公尺。本層主要由黏土、泥或粉砂層組成之泥層，局部夾細砂層及少數粗砂層。

3. 含水層(二)

含水層二分布範圍遍布全區，深度約介於地表下 35 至 217 公尺之間，平均厚度約為 95 公尺，為各含水層中厚度最大者。本層在濁水溪沖積扇扇頂附近以礫石和粗砂層為主，與含水層(一)之間並無明顯之阻水層分隔；扇央及扇尾地區土壤粒徑變細，但仍有粗砂或礫石層存在，顯示本層在蓄水及供水上之重要性。此外，部分地區夾有二至三層延展範圍大之泥層，此類泥層對含水層有局部分割作用。 S 約為 10^{-5} 至 10^{-3} 之間， K 則約為 0.53 至 106.94m/day 之間。

4. 阻水層(二)

阻水層(二)位於含水層(二)之下，廣泛分布於沖積扇扇央及扇尾地區，西側延伸



入海，主要為泥層夾細砂層，局部則夾有粗砂層，最大厚度約為 46 公尺，平均厚度則約為 23 公尺。

5. 含水層(三)

含水層(三)分布範圍涵蓋全區，規模略小於含水層(二)，深度約在 140 至 275 公尺之間，厚度變異頗大，係因為濁水溪以北地區之含水層三遠比南側發達所致，全區平均厚度約 86 公尺。S 約為 5.56×10^{-5} 至 1.07×10^{-3} 之間，K 則約為 0.64 至 75.52m/day 之間。

6. 阻水層(三)

阻水層(三)在濁水溪以北的區域，厚度與分布範圍皆小；在濁水溪以南的地區較發達且完整，對含水層形成有效的分隔作用。阻水層(三)多由泥層夾細砂層所組成，平均厚度則約為 11 公尺；深度介於 238 至 293 公尺不等。

7. 含水層(四)

含水層(四)位於阻水層(三)以下，其平均深度大於 271 公尺，全區只有 14 口井超過此一深度，其中 9 口貫穿本層，5 口則未達本層底部，因而難以此少量資料對含水層四及其下之阻水層四做明確之描述。基本上扇頂附近仍以礫石層及粗砂層為主，往扇央及扇尾則漸次以細砂為主。分布深度約介於 238 至 313 公尺間，平均厚度約 24 公尺，為各含水層中厚度最小者。S 約為 5.50×10^{-5} 至 3.40×10^{-3} 之間，K 約為 0.59 至 46.79m/day 之間。

根據上述概念分層以及鑽探井資料，將濁水溪沖積扇概念性分層之分層高程、鑽探井名稱與座標整理為表 4-6 所示。

表 4-6 濁水溪沖積扇概念性分層之各觀測井高程資料

井名	TMX	TMY	F1 頂	F1 底	F2 頂	F2 底	F3 頂	F3 底	F4 頂	F4 底
國聖	205365	2665558	20.8	-9.3	-21.3	-111.3	-139.3	-230.3	-244.3	
全興	199630	2674365	5.8	-13.2	-36.2	-126.2	-143.2	-265.2	-275.2	-
線西	195062	2669966	-4.5	-23.5	-33.5	-117.5	-138.5	-259.5	-268.5	-
頂番	196281	2665147	7.8	-27.2	-34.2	-120.2	-144.2	-254.2	-261.2	-
東芳	199950	2662265	10.1	-22.9	-32.9	-124.9	-148.9	-240.9	-249.9	-
花壇	202725	2658257	9.5	-15.0	-27.0	-117.0	-145.0	-236.0	-250.0	-280.0
員林	205885	2649930	26.5	5.5	-12.5	-127.5	-139.5	-229.5	-	-
田中	207088	2639188	49.0	-2.0	-2.0	-122.0	-122.0	-237.0	-	-
漢寶	183282	2656147	3.0	-40.0	-54.0	-134.0	-160.0	-273.0	-290.0	-305.0

井名	TMX	TMY	F1 頂	F1 底	F2 頂	F2 底	F3 頂	F3 底	F4 頂	F4 底
洛津	191220	2661365	3.6	-34.4	-50.4	-127.4	-146.4	-268.4	-279.4	-
文昌	190120	2656250	2.6	-34.8	-39.8	-125.8	-144.8	-257.8	-257.8	-
好修	194052	2656100	10.0	-30.0	-35.0	-120.0	-156.0	-255.0	-255.0	-290.0
溪湖	196133	2649778	18.4	-21.6	-27.6	-121.6	-144.6	-249.6	-249.6	-
芳苑	179990	2646954	3.9	-24.1	-46.1	-145.1	-168.1	-275.0	-	-
趙甲	187624	2648441	12.0	-13.0	-35.0	-125.0	-171.0	-263.0	-	-
溪州	198371	2639267	33.4	6.4	-1.6	-101.6	-136.0	-249.0	-	-
柑園	201662	2635696	45.7	6.7	6.7	-110.0	-134.0	-242.0		
二水	210242	2634428	82.0	17.0	17.0	-120.0	-130.0	-235.0	-	-
西港	176799	2639978	4.0	-43.0	-47.0	-149.0	-156.0	-270.0	-275.0	-307.0
潭墘	182705	2637176	13.0	-31.0	-41.0	-127.0	-150.0	-265.0	-265.0	-
竹塘	190948	2639823	21.0	-13.0	-18.0	-111.0	-147.0	-257.0	-264.0	-
合興	194000	2643600	21.3	-18.7	-24.7	-110.7	-144.7	-255.7	-265.7	-
田尾	201045	2643280	23.2	-2.7	-21.7	-111.7	-131.7	-251.7	-251.7	-
海豐	170273	2629402	2.2	-38.8	-38.8	-125.8	-137.8	-250.0	-	-
後安	171197	2632096	1.1	-42.9	-48.9	-139.9	-145.9	-255.0	-	-
興化	176695	2628849	7.5	-40.5	-40.5	-135.5	-143.5	-242.0	-	-
豐榮	178954	2632222	0.5	-33.4	-47.4	-138.4	-138.4	-250.0	-	-
港後	187220	2632820	17.8	-7.2	-33.2	-122.2	-147.2	-245.0	-246.4	-270.4
九隆	191168	2627781	16.5	-1.6	-16.6	-138.6	-149.6	-232.0	-	-
西螺	194891	2632723	29.0	-11.0	-17.0	-120.0	-144.0	-242.0	-	-
荊桐	197886	2628381	37.1	-12.9	-12.9	-130.0	-150.0	-235.0	-	-
六合	204584	2629706	55.5	-1.5	-1.5	-130.0	-140.0	-234.0	-	-
烏塗	208141	2629528	71.9	5.9	5.9	-130.0	-137.0	-232.0	-	-
觸口	212782	2629816	121.0	24.9	24.9	-130.0	-135.0	-231.0	-	-
海園	165467	2624551	-15.9	-45.6	-58.6	-140.6	-147.6	-250.6	-265.0	-290.6
和豐	169999	2626544	1.5	-42.5	-47.5	-131.5	-140.5	-245.5	-261.5	-286.5
安南	172567	2622644	6.2	-44.8	-53.8	-134.8	-144.8	-234.8	-259.8	-279.8
田洋	178717	2624989	11.9	-11.8	-44.8	-131.8	-166.8	-229.8	-254.8	-266.8
芳草	185350	2624184	10.4	-5.4	-30.4	-132.4	-155.4	-220.4	-246.4	-270.4
虎尾	191285	2623689	26.6	-0.5	-15.5	-143.5	-155.5	-224.5	-247.5	-
虎溪	199331	2624542	36.2	12.2	-0.8	-145.8	-156.8	-229.8	-244.8	-280.0
石榴	206944	2624360	67.0	15.6	15.6	-137.0	-145.0	-229.0		-
箔子	162598	2614898	-24.1	-58.5	-68.5	-145.5	-165.5	-245.0		-
明德	167485	2617020	5.6	-46.4	-59.4	-135.4	-161.4	-235.0		-
元長	178788	2616961	8.9	-17.1	-50.1	-147.1	-166.1	-220.0		-
宏崙	182680	2620675	3.7	-15.9	-34.9	-147.9	-171.9	-220.0	-	-
宜梧	166296	2604660	0.9	-42.1	-54.1	-135.1	-172.1	-238.1	-251.1	-275.1
蔡厝	169500	2612504	4.5	-40.5	-57.5	-142.5	-165.5	-230.5	-239.5	-278.5

井名	TMX	TMY	F1 頂	F1 底	F2 頂	F2 底	F3 頂	F3 底	F4 頂	F4 底
東光	174905	2616870	6.5	-29.5	-46.5	-135.5	-170.5	-218.5	-231.5	-282.5
嘉興	194034	2616371	30.4	-18.6	-22.6	-150.6	-156.6	-220.0	-	-
東和	205251	2620504	75.1	-21.9	-21.9	-141.9	-149.9	-225.0	-	-
大溝	168595	2607406	1.2	-33.8	-53.8	-142.8	-172.8	-235.0	-	-
水林	172216	2608151	3.6	-26.4	-57.4	-145.4	-175.4	-230.0	-	-
北港	177919	2608767	8.2	-29.8	-45.8	-140.8	-172.8	-222.0	-	-
溫厝	199400	2617408	26.5	-13.9	-27.9	-147.0	-157.0	-224.0	-	-
古坑	204980	2615932	100.2	-14.8	-14.8	-145.0	-155.0	-224.0	-	-
東石	162790	2595720	0.6	-46.4	-70.4	-179.4	-185.4	-242.4	-247.4	-253.4
瓊埔	168219	2602115	1.0	-46.0	-71.0	-166.0	-191.0	-238.0	-249.0	-257.0
安和	178980	2601660	-8.2	-32.2	-63.2	-153.2	-188.2	-235.2	-247.2	-273.2
東榮	191545	2606340	26.5	-20.5	-40.5	-142.5	-174.5	-216.5	-238.5	-257.5
三和	196915	2611594	20.5	5.0	-34.0	-145.0	-170.0	-220.0	-	-
炭腳	202021	2612378	45.1	6.5	-19.5	-140.0	-161.0	-219.0	-	-

濁水溪沖積扇之邊界乃根據河川以及地形辨識，東部邊界北起烏溪出海口，沿著八卦山台地與沖積扇平原之交界處延伸至二水隘口處，再向南延伸至斗六丘陵與沖積扇平原交界處，邊界以東之區域為台地或丘陵地形，有地下水流入補注。南部邊界以北港溪為界，向東延伸至斗六丘陵與東邊界交接，其邊界因與地下水之等值線平行，為無流量邊界；濁水溪沖積扇之各含水層向西延展入海域後，均逐漸尖滅而封閉於阻水層中，亦為無流量邊界。

4.3 地下水系統流出流入量辨識

地下水系統流出流入量辨識分為名竹盆地與濁水溪沖積扇分述如下：

4.3.1 名竹盆地

本研究採用新民、竹山、觸口以及坪頂等四個地下水位觀測站，將名竹盆地範圍劃分 *Voronoi Diagram* 控制區域並計算其面積，如圖 4-9 所示，此外將含水層高程、比出水量(S_y)、儲水係數(S)以及控制面積整理如表 4-7。

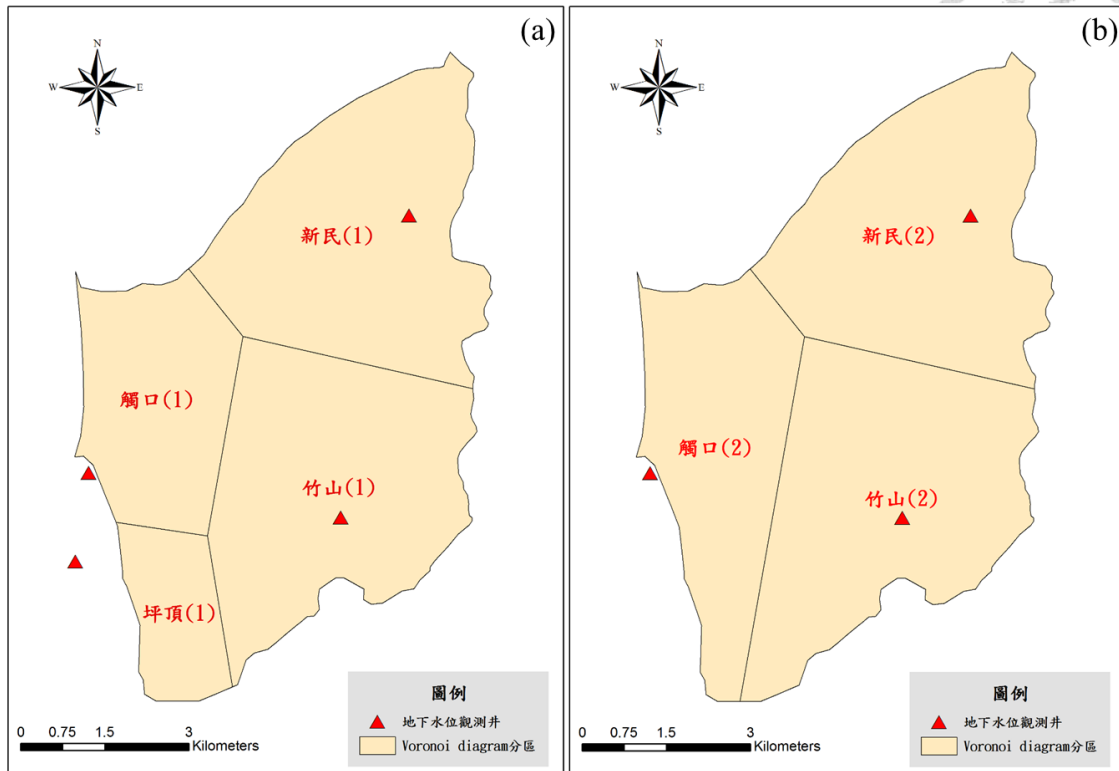


圖 4-9 名竹盆地含水層之 Voronoi Diagram 分区 ((a)第一含水層(b)第二三含水層)

表 4-7 名竹盆地觀測井之控制面積及水文地質資料

井名	地表高程 (m)	第一含水 層底(m)	第二含水 層底(m)	第三含水 層底(m)	Sy	S	控制面積 (m ²)	含水層歸 屬
新民(1)	144	115.5	65.5	15.5	0.26	/	19462018	1
新民(2)							0.00044	19462018
竹山(1)	150	116.5	66.5	16.5	0.152	/	19058077	1
竹山(2)							0.00044	20461959
觸口(1)	113	80	30	-20	0.26	/	10661524	1
觸口(2)							0.00044	13982694
坪頂(1)	297	177	127	77	0.15	/	4725051	1

本研究蒐集名竹盆地地下水位觀測井 2012 至 2014 年之觀測資料，配合表 4-7 之水文地質資料計算名竹盆地之地下水蓄水量歷線，如圖 4-10 所示。由圖中可看出名竹盆地於每年 11 月至 4 月之枯水期時，因為降雨量較少，名竹盆地地下水系統之流入量小於流出量，地下水蓄水量歷線呈現下降之趨勢；然而於每年 5 月至 10 月之豐水期時，因降雨量豐沛，其地下水系統之流入量大於流出量，地下水蓄水量歷線呈現上升之趨勢。此外由圖 4-10 可看出於 2014 年豐水期時其蓄水量歷線

上升幅度很小，其最大蓄水量低於前兩年之豐水期最大蓄水量，比對雨量資料可發現 2014 年適逢乾旱，年降雨量僅 1580(mm)，低於名竹盆地之歷年平均降雨量 (2279 mm)。



圖 4-10 名竹盆地 2012~2014 年地下水蓄水量歷線

本研究藉由分析名竹盆地 2012~2014 年之地下水蓄水量歷線可以得到地下水之流出量、流入量以及流失量，茲將此三個量體之估算結果分述如下：

1. 地下水系統流出量

地下水系統之總流出量因應各個水文年之降雨量資料以及蓄水量歷線之退水曲線而不同，本研究根據各個水文年選取該枯水期無降雨日之蓄水量歷線穩定退水段，視為該水文年之穩定退水斜率 S_L ，即為日穩定總出流量，將日穩定總出流量加總便可得到名竹盆地之年總流出量。名竹盆地之地下水邊界中，僅有隘口處有地下水流出，因此名竹盆地之地下水系統流出量組成為隘口地下水流出量以及名竹盆地內之抽水量。而根據經濟部地調所(1996)之「濁水溪中游地區地下水補注調查與評估」報告中之水井及抽水量調查，以單井平均抽水率、抽水井密度、抽水日數以及區域面積估算抽水量；另外亦有自來水公司於竹山營運所之抽用地下水出水量，經由年均日出水量以及水井口數進行估算，其年地下水出水量為 3,788,700 立方公尺，雖然歷經十餘年但顯示名竹盆地之年抽水量仍維持約四百萬立方公尺左右，故假設在此期間農業、民生與工業需水量變化不大之情況下每年之抽水量為 3,788,700 立方公尺，藉此區分出每年之抽水量，再將名竹盆地地下水



系統之總流出量減去名竹盆地之年抽水量，便可得到隘口之地下水流出量。研究年限內之地下水系統年總流出量平均為 1.03 億噸，其中下游隘口年出流量平均為 0.99 億噸，年抽水量平均為 0.04 億噸，如表 4-8 所示。

表 4-8 名竹盆地地下水系統出流量之估計結果

年份	總流出量	下游隘口出流量	抽水量
2012	1.03	0.99	0.04
2013	1.06	1.02	0.04
2014	1.01	0.97	0.04
平均	1.03	0.99	0.04
			單位：億噸

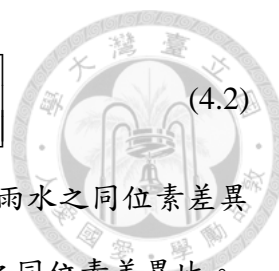
2. 地下水系統流入量

將地下水蓄水量歷線配合全年穩定退水斜率 S_L 估算名竹盆地之地下水系統流入量，再根據當日是否有降雨將地下水系統之總流入量分為降雨日流入量與非降雨日流入量。名竹盆地之北側與南側邊界皆有地下水流入，因此名竹盆地地下水系統之流入量包含雨水入滲補注量、河水入滲補注量以及區外地下水流入量，本研究假設於降雨日時，因降雨所引致之地面水入滲補注量影響相當大，遠大於區外地下水之流入量，因此於降雨日之流入量為雨水補注量與河水補注量所組成；而非降雨日時地面水之入滲補注較小，且名竹盆地內抽水之主要用途為民生用水，灌溉抽水量較少其灌溉補注量可忽略不計，地下水系統之流入量主要為區外地下水流入量為主，因此非降雨日之地下水系統流入量即為區外地下水流入量。名竹盆地之地下水系統流入量公式可由式(3.14)簡化為下式：

$$Q_{in,all}^{MZ} = Q_R^{MZ} + Q_{N,R}^{MZ} = Q_{rain}^{MZ} + Q_{river}^{MZ} + Q_{gw}^{MZ,O,B} \quad (4.1)$$

其中， $Q_{in,all}^{MZ}$ 為名竹盆地地下水系統之總流入量(L^3)； Q_R^{MZ} 為名竹盆地地下水系統之降雨日流入量(L^3)； $Q_{N,R}^{MZ}$ 為名竹盆地地下水系統之非降雨日流入量(L^3)； Q_{rain}^{MZ} 為名竹盆地地下水系統之雨水補注量(L^3)； Q_{river}^{MZ} 為名竹盆地地下水系統之河水補注量(L^3)； $Q_{gw}^{MZ,O,B}$ 為名竹盆地地下水系統之區外地下水流入量(L^3)。

本研究以氧同位素分析法釐定降雨日之補注量，根據名竹盆地之地下水來源將式(3.21)改寫為下式：



$$\delta_{gw}^{MZ} = \delta_{rain}^{MZ} \left[\frac{Q_{rain}^{MZ}}{Q_{in,all}^{MZ}} \right] + \delta_{river}^{MZ} \left[\frac{Q_{river}^{MZ}}{Q_{in,all}^{MZ}} \right] + \delta_{gw,B}^{MZ} \left[\frac{Q_{gw}^{MZ,O,B}}{Q_{in,all}^{MZ}} \right] \quad (4.2)$$

其中， δ_{gw}^{MZ} 為名竹盆地地下水之同位素差異比； δ_{rain}^{MZ} 為名竹盆地雨水之同位素差異比； δ_{river}^{MZ} 為名竹盆地河水之同位素差異比； $\delta_{gw,B}^{MZ}$ 為區外地下水之同位素差異比。

式(4.2)中 $Q_{gw}^{MZ,O,B}$ 可由非降雨日之補注量估算而得，而雨水補注量(Q_{rain}^{MZ})與河水補注量(Q_{river}^{MZ})為未知數，在此令 $\frac{Q_{rain}^{MZ}}{Q_{in,all}^{MZ}} = X$ 為未知數； $\frac{Q_{gw}^{MZ,O,B}}{Q_{in,all}^{MZ}} = B$ 為已知數，則式(4.2)

可改寫為：

$$\delta_{gw}^{MZ} = \delta_{rain}^{MZ} X + \delta_{river}^{MZ} [1 - X - B] + \delta_{gw,B}^{MZ} B \quad (4.3)$$

其中， X 為雨水補注比例， $1 - X - B$ 為河水補注比例。而 δ_{gw}^{MZ} 、 δ_{rain}^{MZ} 、 δ_{river}^{MZ} 、 $\delta_{gw,B}^{MZ}$ 可由表 4-1 所得之，求解式(4.3)後得到雨水與河水之補注比例於枯水期平均為 0.62：0.38，豐水期平均為 0.83：0.17。

由前述計算可得名竹盆地於研究年限內之地下水系統流入量及其釐定結果如表 4-9 所示，總入流量年平均為 1.45 億噸，其中區外地下水流入量年平均為 0.57 億噸、雨水補注量年平均為 0.67 億噸以及河水補注量年平均為 0.21 億噸。

表 4-9 名竹盆地地下水系統之流入量估計結果

年份	總流入量	區外地下水流入量	雨水補注量	河水補注量
2012	1.63	0.70	0.74	0.19
2013	1.66	0.40	0.85	0.42
2014	1.06	0.60	0.43	0.03
平均	1.45	0.57	0.67	0.21
單位：億噸				

3. 地下水系統流失量

地下水系統之流失量主要為地下水流失至河道之基流量所引致地下水蓄水量減少，根據前面計算所得到之名竹盆地地下水總流入量與總流出量，以及由蓄水量歷線計算得到之蓄水變化量，可由式(3.22)計算得到名竹盆地地下水系統之流失量，於研究年限內之流失量計算結果為年平均 0.47 億噸。茲將名竹盆地地下水系統之各項流入流出量辨識與計算結果整理並列於表 4-10 中。

表 4-10 名竹盆地地下水平衡分析結果

年份	雨量 (mm)	蓄水變化量	區外地下水流入量	雨水補注量	河水補注量	下游隘口流出量	抽水量	流失量
2012	3166	0.17	0.70	0.74	0.19	0.99	0.04	0.47
2013	3178	-0.05	0.40	0.85	0.42	1.02	0.04	0.70
2014	1580	-0.14	0.60	0.43	0.03	0.97	0.04	0.23
平均	2641	-0.01	0.57	0.67	0.21	0.99	0.04	0.47

4.3.2 濁水溪沖積扇

本研究採用濁水溪沖積扇之各層觀測井，劃分 Voronoi Diagram 之控制區域並計算其面積，如圖 4-11 與圖 4-12 所示。

濁水溪沖積扇各地下水位觀測井根據表 4-6 進行分層辨識，整理如表 4-11 所示。比出水率以及儲水係數採用經濟部水利署(2011)報告之現場試驗結果，無試驗資料之控制分區則以該含水層之平均值做設定，其中扇頂區域之自由含水層範圍涵蓋一至四層含水層，各層觀測井控制面積之比出水率或儲水係數整理如表 4-11 所示，其中紅色數字代表其為現地試驗值。

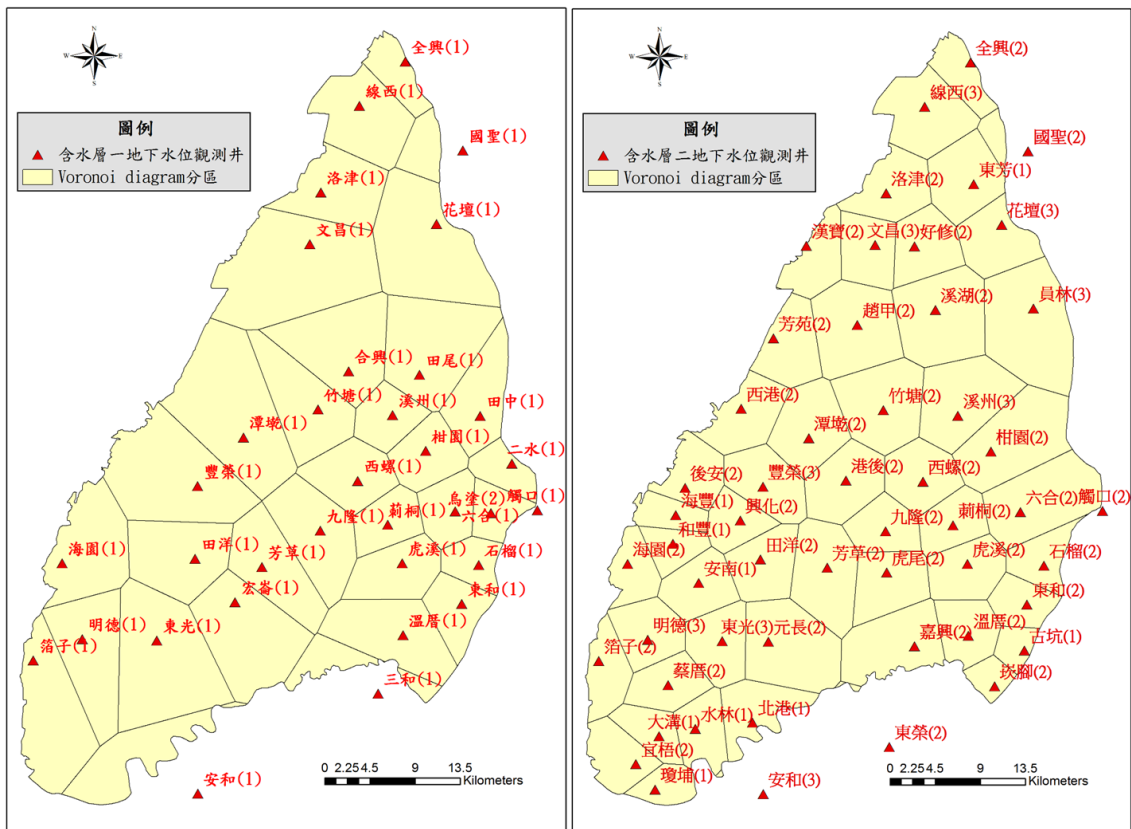


圖 4-11 濁水溪沖積扇含水層一、二之 Voronoi Diagram 分區

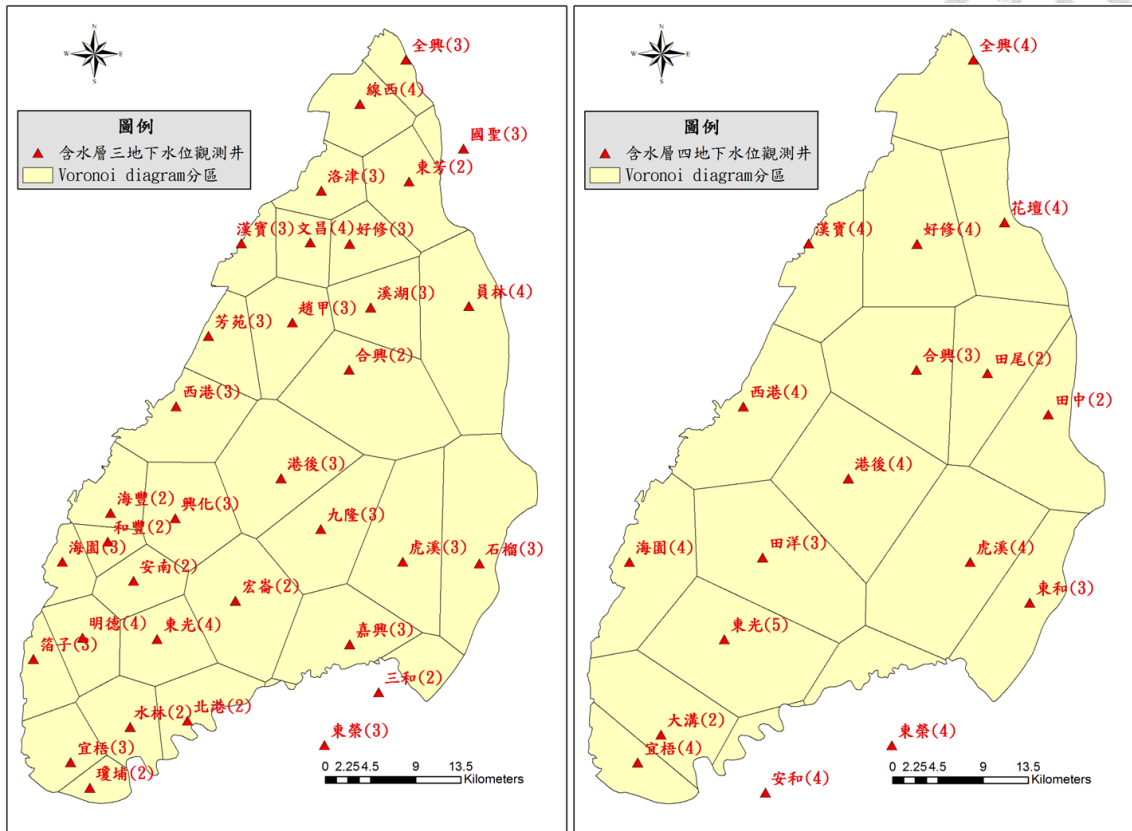


圖 4-12 濁水溪沖積扇含水層三、四之 Voronoi Diagram 分區

表 4-11 濁水溪沖積扇地下水位觀測井分層辨識與比出水量或儲水係數

含水層一		含水層二		含水層三		含水層四	
站名	Sy or S	站名	Sy or S	站名	Sy or S	站名	Sy or S
線西(1)	0.005	石榴(2)	0.216	石榴(3)	0.216	田中(2)	0.216
洛津(1)	0.216	古坑(1)	0.216	員林(4)	0.001043	東和(3)	0.000718
花壇(1)	0.001538	東和(2)	0.000718	國聖(3)	0.001043	田尾(2)	0.000624
國聖(1)	0.216	員林(2)	0.000718	三和(2)	0.001043	花壇(4)	0.000624
海園(1)	0.000173	六合(2)	0.000718	東芳(2)	0.001043	全興(4)	0.000624
田洋(1)	0.216	國聖(2)	0.000718	全興(3)	0.001043	虎溪(4)	0.000624
潭墘(1)	0.001538	崁腳(2)	0.000718	虎溪(3)	0.001043	好修(4)	0.000624
芳草(1)	0.001538	花壇(2)	0.000718	好修(3)	0.001043	合興(3)	0.000072
竹塘(1)	0.216	柑園(2)	0.000718	溪湖(3)	0.00101	東榮(4)	0.000624
九隆(1)	0.001538	溫厝(2)	0.000718	線西(4)	0.001043	安和(4)	0.000624
合興(1)	0.202	東芳(1)	0.000718	東榮(3)	0.001043	漢寶(4)	0.000624
荊桐(1)	0.23175	全興(2)	0.000718	合興(2)	0.00122	港後(4)	0.000230
溪州(1)	0.216	虎溪(2)	0.000718	文昌(4)	0.001043	安和(4)	0.000624
虎溪(1)	0.216	溪州(2)	0.00138	嘉興(3)	0.00024	田洋(3)	0.000627

含水層一		含水層二		含水層三		含水層四	
站名	Sy or S	站名	Sy or S	站名	Sy or S	站名	Sy or S
田尾(1)	0.001538	荊桐(2)	0.000718	洛津(3)	0.001043	西港(4)	0.000056
柑園(1)	0.216	好修(2)	0.00005	九隆(3)	0.001043	東光(5)	0.000624
六合(1)	0.216	溪湖(2)	0.00295	趙甲(3)	0.001043	海園(4)	0.000624
石榴(1)	0.216	西螺(2)	0.000718	港後(3)	0.000149	宜梧(4)	0.000624
田中(1)	0.216	線西(2)	0.000145	漢寶(3)	0.001043	大溝(2)	0.000624
烏塗	0.152	虎尾(2)	0.000718	芳苑(3)	0.001043		
溫厝(1)	0.001538	東榮(2)	0.000718	宏崙(2)	0.001043		
東和(1)	0.216	九隆(2)	0.000718	北港(2)	0.001043		
箔子(1)	0.001538	嘉興(2)	0.00024	興化(3)	0.001043		
明德(1)	0.216	文昌(2)	0.000718	東光(4)	0.001043		
安和(1)	0.001538	洛津(2)	0.000718	西港(3)	0.000056		
宏崙(1)	0.001538	竹塘(2)	0.000718	安南(2)	0.001043		
全興(1)	0.216	趙甲(2)	0.000718	水林(2)	0.001043		
文昌(1)	0.001538	港後(2)	0.00023	和豐(2)	0.0017		
豐榮(1)	0.001538	芳草(2)	0.000718	海園(3)	0.003403		
西螺(1)	0.216	漢寶(2)	0.000718	海豐(2)	0.001043		
二水	0.199	芳苑(2)	0.000718	瓊埔(2)	0.001043		
三和(1)	0.001538	潭墘(2)	0.000718	明德(4)	0.001043		
東光(1)	0.289	元長(2)	0.000718	宜梧(3)	0.001043		
		豐榮(2)	0.000718	箔子(3)	0.001043		
		田洋(2)	0.000627				
		北港(1)	0.000718				
		安和(2)	0.000718				
		興化(2)	0.000718				
		西港(2)	0.0009				
		東光(2)	0.000138				
		水林(1)	0.000718				
		安南(1)	0.000718				
		後安(2)	0.000718				
		和豐(1)	0.000718				
		海園(2)	0.003403				
		海豐(1)	0.000718				
		瓊埔(1)	0.000718				
		蔡厝(2)	0.00298				
		大溝(1)	0.000718				

含水層一		含水層二		含水層三		含水層四	
站名	Sy or S	站名	Sy or S	站名	Sy or S	站名	Sy or S
		明德(2)	0.000718				
		宜梧(1)	0.000718				
		箔子(2)	0.000718				

本研究蒐集濁水溪沖積扇地下水位觀測井 2012 至 2014 年之觀測資料，配合表 4-6 與表 4-11 之分層資料與水文地質資料計算濁水溪沖積扇之地下水蓄水量歷線，如圖 4-13 所示。由圖中可看出濁水溪沖積扇於每年 11 月至 4 月之枯水期時，因為降雨量較少，濁水溪沖積扇地下水系統之流入量小於流出量，地下水蓄水量歷線呈現下降之趨勢；然而於每年 5 月至 10 月之豐水期時，因降雨量豐沛，其地下水系統之流入量大於流出量，地下水蓄水量歷線呈現上升之趨勢。此外由圖 4-13 可看出於 2014 年豐水期時其蓄水量歷線上升幅度很小，其最大蓄水量低於前兩年之豐水期最大蓄水量，比對雨量資料可發現 2014 年適逢乾旱，年降雨量僅 1024(mm)，低於濁水溪沖積扇之歷年平均降雨量 1544(mm)。

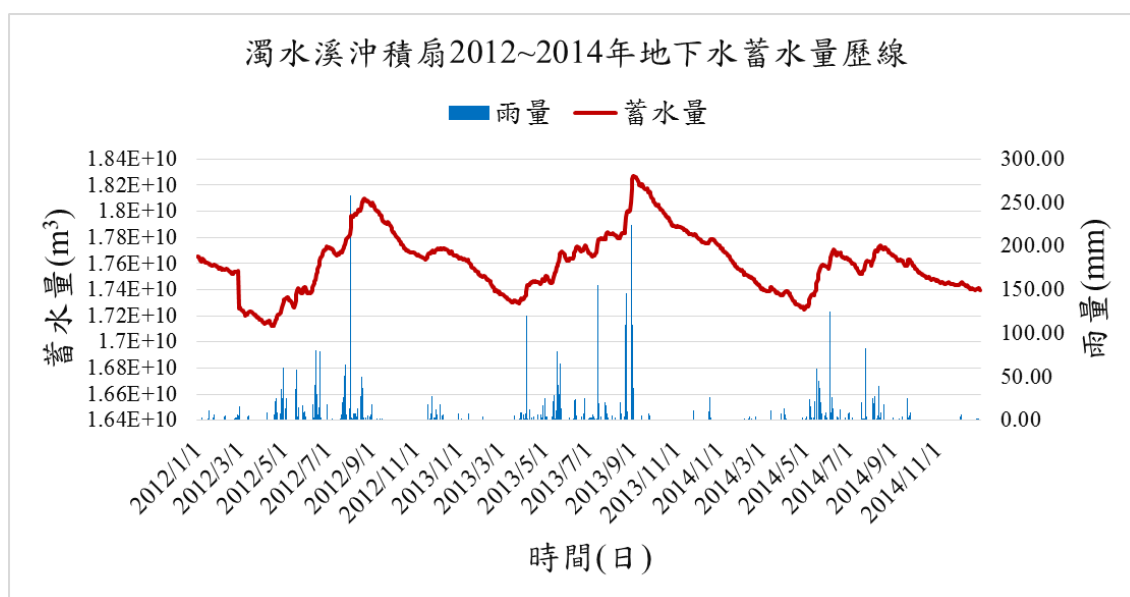


圖 4-13 濁水溪沖積扇 2012~2014 年地下水蓄水量歷線

本研究藉由分析濁水溪沖積扇 2012~2014 年之地下水蓄水量歷線可以得到地下水之流出量、流入量以及流失量，茲將此三個量體之估算結果分述如下：

1. 地下水系統流出量

根據濁水溪沖積扇之邊界辨識可得知其邊界地下水之流動方向為流向區內，因

此其地下水系統之流出量主要為抽水量組成。濁水溪沖積扇之非灌溉抽水率與一期稻旱混作、一期純旱作與二期純旱作等灌溉抽水率皆可由無降雨日之地下水蓄水量歷線退水線段所推估而得，而二期稻旱混作之灌溉抽水率須由農田水利會之灌溉抽水紀錄、各期作耕作面積比例以及一期稻旱混作之抽水量估算而得。本研究根據 2012~2014 年濁水溪沖積扇之地下水蓄水量歷線，並配合農田水利會抽水紀錄以及各期作耕作面積比例，估算濁水溪沖積扇之年非灌溉抽水量約 8.67 億噸，年灌溉抽水量約 14.90 億噸，其分年估算結果如表 4-12 所示。

表 4-12 濁水溪沖積扇 2012~2014 年地下水抽水量估計結果

年份	非灌溉 抽水量	灌溉抽水量			
		一期 稻旱混作	二期 稻旱混作	一期 純旱作	二期 純旱作
2012	8.61	6.04	7.13	0.64	0.85
2013	8.90	5.27	7.94	0.69	1.13
2014	8.50	5.54	8.06	0.55	0.71
平均	8.67	5.62	7.71	0.63	0.90

單位：億噸

2. 地下水系統流入量

濁水溪沖積扇之地下水系統流入量相當複雜，於地面水流入量部分包含雨水補注量與河水補注量，於地下水流入量部分包含區外補注量以及灌溉補注量。本研究於估算每日地下水系統流入量時根據當日降雨量歷線，將地下水系統流入量分為降雨日補注量與非降雨日補注量，降雨日之補注量主要為雨水補注量與河水補注量所組成，而非降雨日之補注量為區外地下水流入量與灌溉補注量所組成，濁水溪沖積扇之地下水系統流入量可表示如下。

$$Q_{in,all}^{LTK} = Q_R^{LTK} + Q_{N,R}^{LTK} = Q_{rain}^{LTK} + Q_{river}^{LTK} + Q_{gw}^{LTK,O,B} + Q_{gw}^{LTK,A} \quad (4.4)$$

其中， $Q_{in,all}^{LTK}$ 為濁水溪沖積扇地下水系統之總流入量(L^3)； Q_R^{LTK} 為濁水溪沖積扇地下水系統之降雨日流入量(L^3)； $Q_{N,R}^{LTK}$ 為濁水溪沖積扇地下水系統之非降雨日流入量(L^3)； Q_{rain}^{LTK} 為濁水溪沖積扇地下水系統之雨水補注量(L^3)； Q_{river}^{LTK} 為濁水溪沖積扇地下水系統之河水補注量(L^3)； $Q_{gw}^{LTK,O,B}$ 為濁水溪沖積扇地下水系統之區外地下水流入量(L^3)； $Q_{gw}^{LTK,A}$ 為濁水溪沖積扇地下水系統之灌溉補注量(L^3)。

本研究以氧同位素分析法釐定降雨日之補注量，根據濁水溪沖積扇之地下水來



源將式(3.21)改寫為下式：

$$\delta_{gw}^{LTK} = \delta_{rain}^{LTK} \left[\frac{Q_{rain}^{LTK}}{Q_{in,all}^{LTK}} \right] + \delta_{river}^{LTK} \left[\frac{Q_{river}^{LTK}}{Q_{in,all}^{LTK}} \right] + \delta_{gw,B}^{LTK} \left[\frac{Q_{gw}^{LTK,O,B}}{Q_{in,all}^{LTK}} \right] + \delta_{gw}^{LTK} \left[\frac{Q_{gw}^{LTK,A}}{Q_{in,all}^{LTK}} \right] \quad (4.5)$$

其中， δ_{gw}^{LTK} 為濁水溪沖積扇地下水之同位素差異比； δ_{rain}^{LTK} 為濁水溪沖積扇雨水之同位素差異比； δ_{river}^{LTK} 為濁水溪沖積扇河水之同位素差異比； $\delta_{gw,B}^{LTK}$ 為區外地下水之同位素差異比。

式(4.5)中 $Q_{gw}^{LTK,A}$ 可由灌溉抽水量乘上一灌溉入滲比率求得，其值在濁水溪沖積扇設定為 0.253 (Hsu et al. 2013)， $Q_{gw}^{LTK,O,B}$ 可由非降雨日灌溉補注量減去灌溉補注量得到，而雨水補注量 (Q_{rain}^{LTK}) 與河水補注量 (Q_{river}^{LTK}) 為待求解之未知數，在此令

$$\left[\frac{Q_{rain}^{LTK}}{Q_{in,all}^{LTK}} \right] = X^{LTK} \text{ 為河水補注量比例；} \left[\frac{Q_{gw}^{LTK,O,B}}{Q_{in,all}^{LTK}} \right] = B^{LTK} \text{ 為區外地下水流入量比例；}$$

$$\left[\frac{Q_{gw}^{LTK,A}}{Q_{in,all}^{LTK}} \right] = A^{LTK} \text{ 為灌溉補注量比例；則式(4.5)可改寫為下式：}$$

$$\delta_{gw}^{LTK} = \delta_{rain}^{LTK} X^{LTK} + \delta_{river}^{LTK} [1 - X^{LTK} - B^{LTK} - A^{LTK}] + \delta_{gw,B}^{LTK} B^{LTK} + \delta_{gw}^{LTK} A^{LTK} \quad (4.6)$$

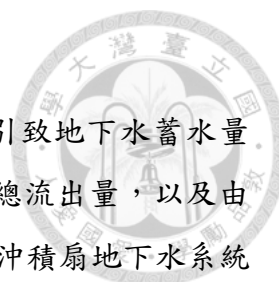
其中， $1 - X^{LTK} - B^{LTK} - A^{LTK}$ 為河水補注量比例，而 δ_{gw}^{LTK} 、 δ_{rain}^{LTK} 、 δ_{river}^{LTK} 、 $\delta_{gw,B}^{LTK}$ 由表 4-2 可得知，求解式(4.6)之質量守恆方程式後，求得濁水溪沖積扇之雨水與河水入滲補注比例於枯水期平均為 0.41：0.59；於豐水期平均為 0.60：0.40。

由前述計算可得濁水溪沖積扇於研究年限內之地下水系統流入量及其釐定結果如表 4-13 所示，總入流量年平均為 29.06 億噸，其中區外地下水流入量年平均為 9.39 億噸、雨水補注量年平均為 8.41 億噸、河水補注量年平均為 7.51 億噸以及灌溉補注量年平均為 3.77 億噸。

表 4-13 濁水溪沖積扇地下水系統流入量估計結果

年份	總流入量	區外地下水流入量	雨水補注量	河水補注量	灌溉補注量
2012	29.06	9.39	8.41	7.51	3.75
2013	28.99	8.48	9.01	7.70	3.80
2014	23.98	8.50	6.46	5.25	3.76
平均	27.34	8.79	7.96	6.82	3.77

單位：億噸



3. 地下水系統流失量

地下水系統之流失量主要為地下水流失至河道之基流量所引致地下水蓄水量減少，根據前面計算所得到之濁水溪沖積扇地下水總流入量與總流出量，以及由蓄水量歷線計算得到之蓄水變化量，可由式(3.22)算得到濁水溪沖積扇地下水系統之流失量，於研究年限內之流失量計算結果為年平均 4.85 億噸。茲將濁水溪沖積扇地下水系統之各項流入流出量辨識與計算結果整理並列於中。

表 4-14 濁水溪沖積扇地下水平衡分析結果

年份	降雨量 (mm)	總補注 量	區外補 注量	雨水補 注量	河水補 注量	灌溉補 注量	非灌溉 抽水量	灌溉抽 水量	蓄水變 化量	流失量
2012	1734	29.06	9.39	8.41	7.51	3.75	8.61	14.82	-0.53	6.16
2013	1914	28.99	8.48	9.01	7.70	3.80	8.90	15.03	-0.08	5.14
2014	1024	23.98	8.50	6.46	5.25	3.76	8.50	14.85	-2.63	3.25
平均	1557	27.34	8.79	7.96	6.82	3.77	8.67	14.90	-1.08	4.85

單位：億噸

4.4 地下水流數值模式建立

本研究所建立濁水溪沖積扇與名竹盆地 MODFLOW 地下水流數值模式模擬年限為 2012 年 1 月至 2014 年 12 月，以一個月為時間間距建立月模式進行暫態 (transient) 模擬，其模式建立過程包括模擬範圍與邊界條件設定、地層分層與數值網格設定、水文地質參數分區與設定、起始水位設定、河流演算套件設定、抽水量與設定、地下水系統補注量分區與初始設定等，將此七個部份分述如下：

4.4.1 模擬範圍與邊界條件設定

本研究所建立之地下水流數值模式範圍包括濁水溪沖積扇與名竹盆地，如圖 4-14 所示，為釐訂名竹盆地與濁水溪沖積扇間地下水流交換量，因此於 MODFLOW 模式中將名竹盆地範圍設定為 Zone1，濁水溪沖積扇範圍設定為 Zone2，模式能計算 Zone1 與 Zone2 間地下水交換量之大小。

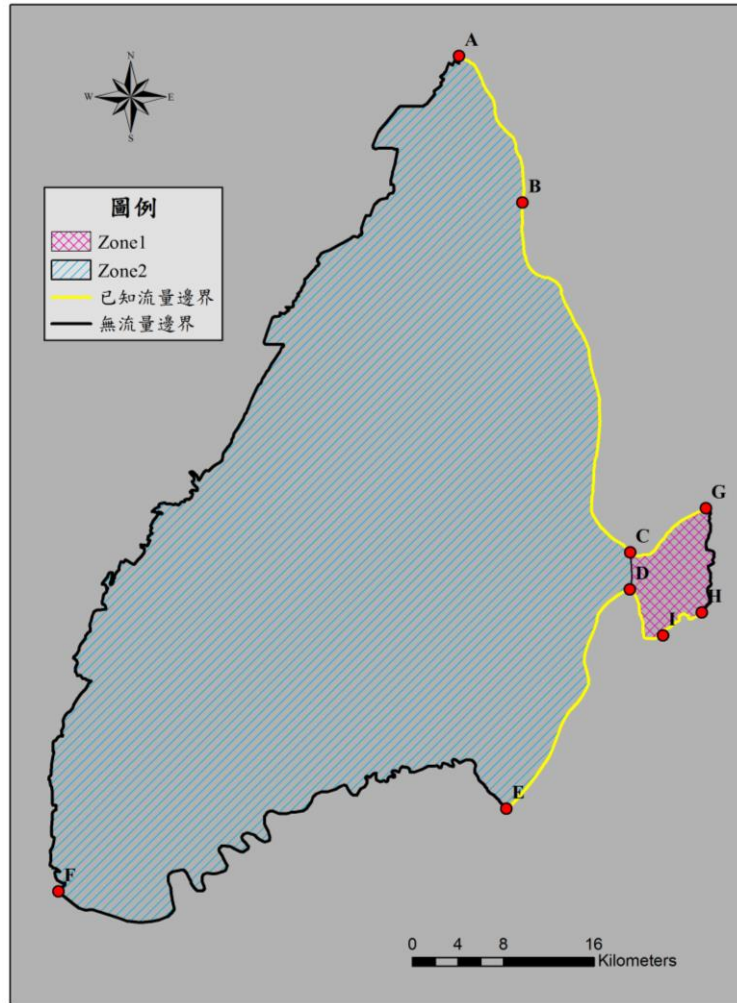


圖 4-14 濁水溪沖積扇及名竹盆地之模式範圍與邊界條件設定

於模式邊界條件設定上根據前節 4.2 所述，名竹盆地之東側因車籠埔斷層(GH 段)經過，設定為無流量邊界；北側與南側分別有八卦山台地(CG 段)與竹山台地(DH 段)之地下水流入，設定為已知流量邊界。濁水溪沖積扇範圍之東側有烏溪(AB 段)、八卦山台地(BC 段)以及斗六丘陵(DE 段)之地下水流入，設定為已知流量邊界；南側(EF 段)以及西側(AF)皆設定為無流量邊界。

4.4.2 地層分層與數值網格設定

名竹盆地與濁水溪沖積扇地層分層根據前節 4.2 所述之概念分層，名竹盆地分為三層含水層無阻水層，而濁水溪沖積扇分為四層含水層與三層阻水層，因此於模式分層設定上總共設定為七層，其中於名竹盆地範圍內將第四層含水層與三層阻水層之厚度設定為零，各含水層之底部高程與地表高層乃根據表 4-3 表 4-6 之空間分布資料，經由 MODFLOW 模式內建之內差功能所設定。

數值網格設定上主要採用邊長為 500 公尺之正方形作為離散網格之劃分，然

而於為了細部設定濁水溪沖積扇與名竹盆地交界處隘口背斜處之水力傳導係數，於隘口處之數值網格再細部分化為邊長 100 公尺之離散網格，共有 12364 個離散網格。於垂直網格劃分上以每一地層分層為一個數值網格，共有七個數值網格，其中各層數值網格高度根據地層分層之厚度所設定。整個地下水流模式總共劃分為 86548 個數值網格，其概念模型分層建立與離散網格如圖 4-15 所示。

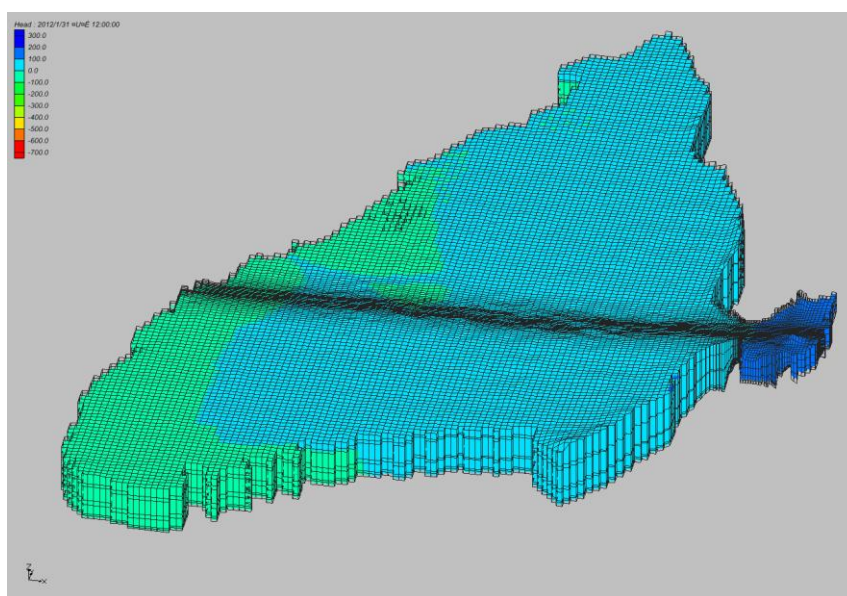


圖 4-15 濁水溪沖積扇與名竹盆地地下水流數值模式三維網格分層示意圖

4.4.3 水文地質參數分區與設定

本研究主要根據現地抽水試驗地點作為名竹盆地與濁水溪沖積扇地下水流模式參數分區之控制點，劃分各個水文地質參數所代表之控制區域，僅於部份區域進行特別劃分，茲將水文地質參數分區分為比出水量(S_y)及蓄水係數(S)、水平水力傳導係數(K)以及垂直滲漏係數(V_L)等三部份分述如下：

1. 比出水量(S_y)或儲水係數(S)

比出水量(S_y)或儲水係數(S)於濁水溪沖積扇與名竹盆地皆以控制點之 Voronoi Diagram 進行參數分區劃分，如圖 4-16 與圖 4-17 所示，名竹盆地於含水層(一)分為 4 區、含水層(二)分為 3 區；濁水溪沖積扇於含水層(一)分為 33 區，含水層(二)分為 55 區、含水層(三)分為 35 區、含水層(四)分為 18 區，其各分區之初始設定值如表 4-7 與表 4-11 所示。

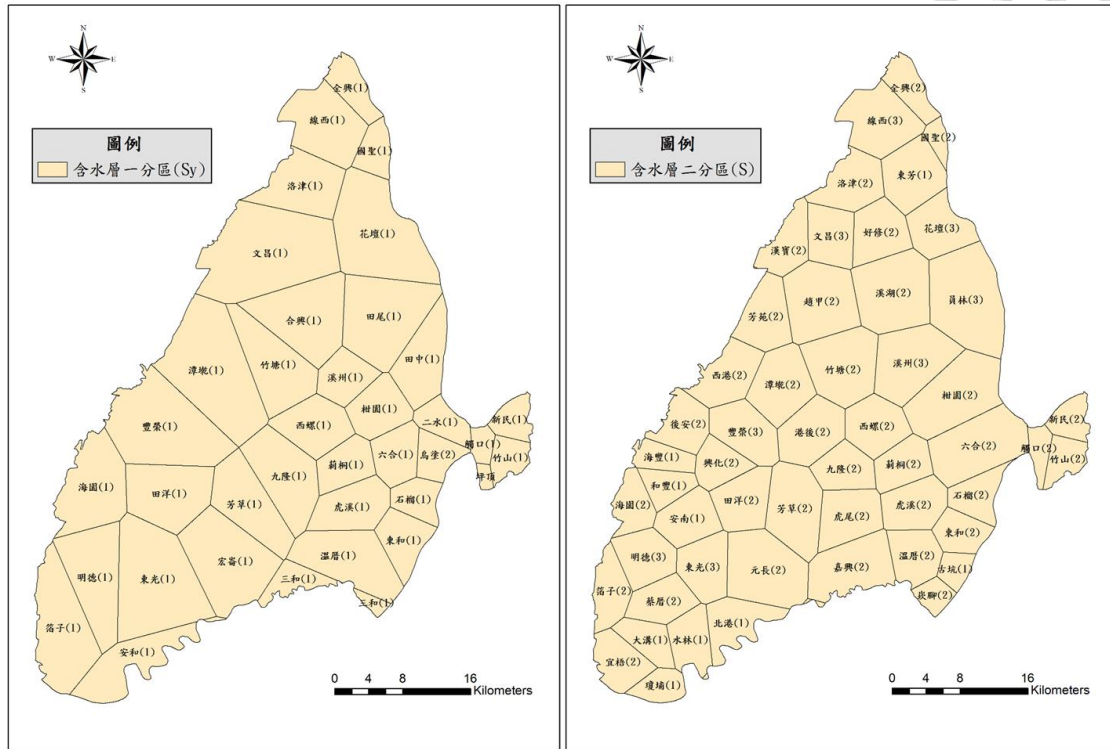


圖 4-16 濁水溪沖積扇與名竹盆地比出水量或儲水係數第一、二含水層分區

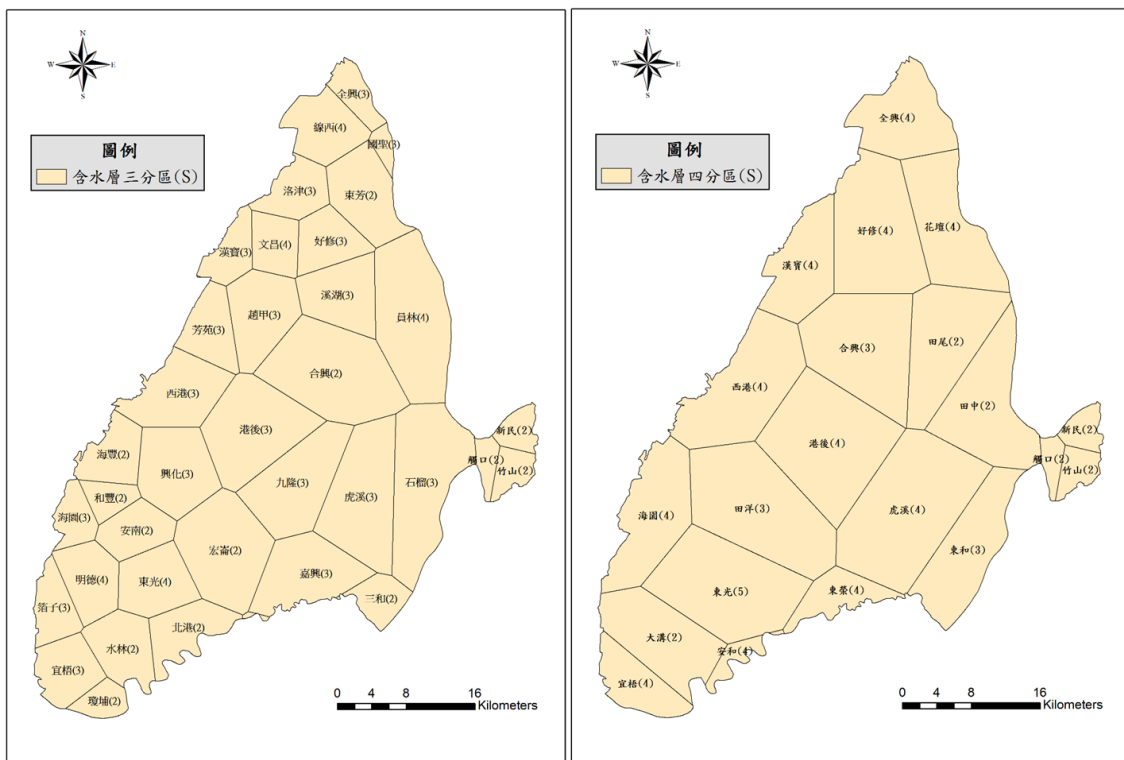


圖 4-17 濁水溪沖積扇與名竹盆地儲水係數第三、四含水層分區

2. 水平水力傳導係數(K)

水平水力傳導係數(K)於各分層之分區設定如圖 4-18、圖 4-19 所示，名竹盆地第一含水層因為表層地質組成主要分為沖積層與紅土堆積層，其地質岩性不同水平水力傳導係數之差異性較大，因此根據地質岩性以及控制點進行參數分區劃分，而濁水溪沖積扇第一含水層表層主要皆為沖積層覆蓋，因此僅以控制點進行參數分區劃分，如圖 4-18 之左圖所示；名竹盆地與濁水溪沖積扇第二至第四含水層因地質組成較單純，因此皆以控制點進行參數分區劃分，惟兩區域交界之彰雲橋隘口處有背斜經過，因此該處多劃分一不透水區域，水平水力傳導係數設定為 0 m/s，如圖 4-18 右圖中紅色區塊所示。其名竹盆地水平傳導係數分區初始設定值如表 4-4 所示；濁水溪沖積扇水平傳導係數分區初始設定值依據經濟部水利署(2011)資料，整理如表 4-15 所示。

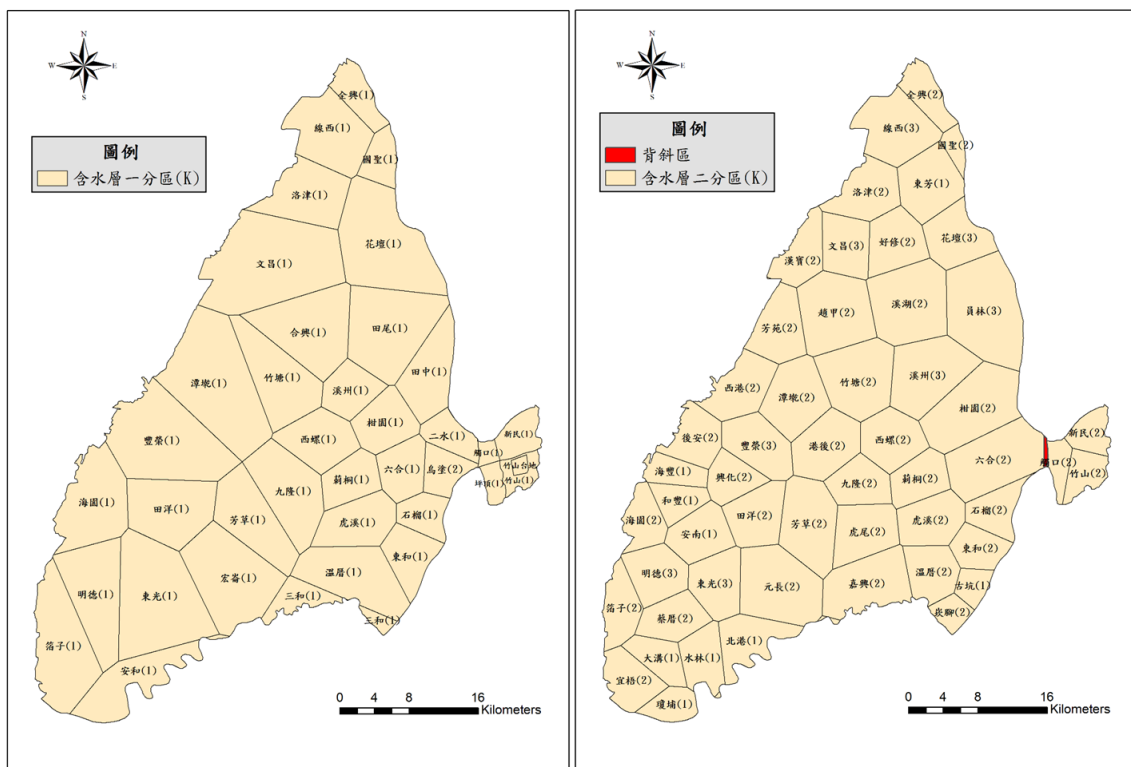


圖 4-18 濁水溪沖積扇與名竹盆地水力傳導係數第一、二含水層分區

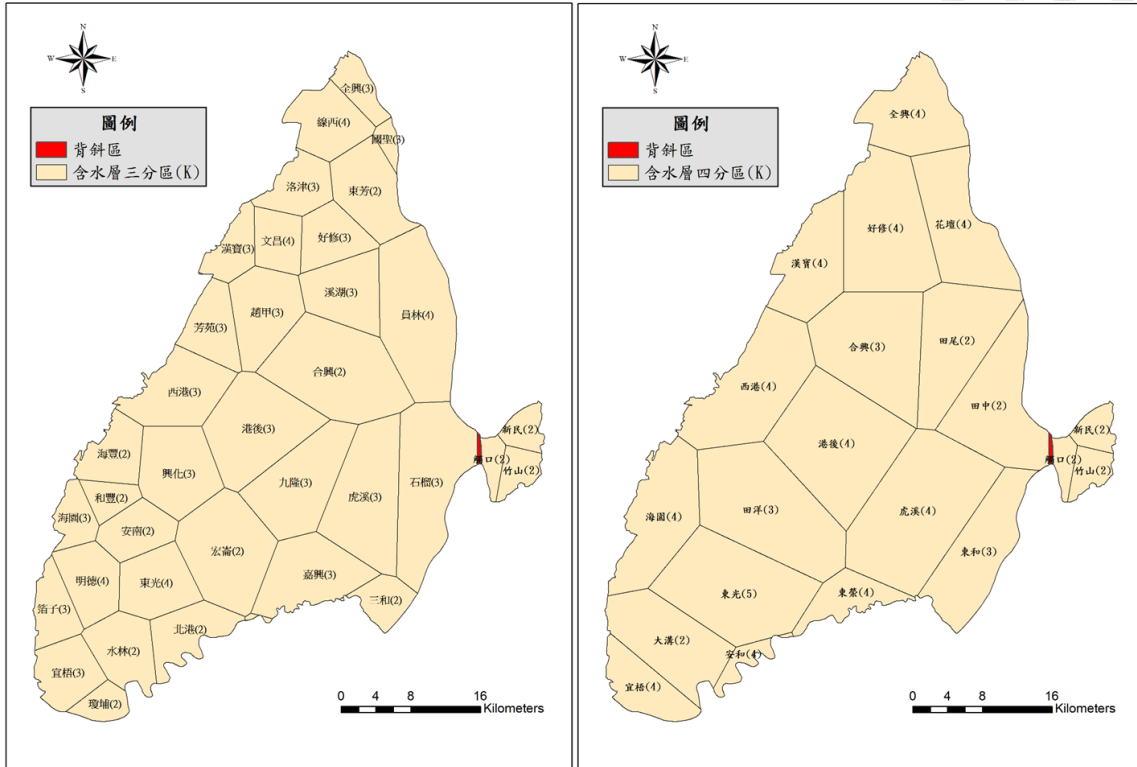


圖 4-19 濁水溪沖積扇與名竹盆地水力傳導係數第三、四含水層分區

表 4-15 濁水溪沖積扇水平水力傳導係數初始設定值

含水層一		含水層二		含水層三		含水層四	
站名	K (m/s)	站名	K (m/s)	站名	K (m/s)	站名	K (m/s)
線西(1)	18.45	石榴(2)	5.32	石榴(3)	27.57	田中(2)	106.94
洛津(1)	3.42	古坑(1)	4.71	員林(4)	21.55	東和(3)	5.97
花壇(1)	45.21	東和(2)	66.49	國聖(3)	0.64	田尾(2)	29.80
國聖(1)	11.12	員林(3)	12.52	三和(2)	27.57	花壇(4)	7.09
海園(1)	11.69	六合(2)	36.66	東芳(2)	61.01	全興(4)	32.24
田洋(1)	45.17	國聖(2)	0.96	全興(3)	47.98	虎溪(4)	38.13
潭墘(1)	11.36	崁腳(2)	16.03	虎溪(3)	27.04	好修(4)	46.79
芳草(1)	21.61	花壇(3)	46.73	好修(3)	25.19	合興(3)	7.36
竹塘(1)	124.66	柑園(2)	20.85	溪湖(3)	44.98	東榮(4)	7.57
九隆(1)	58.16	溫厝(2)	3.08	線西(4)	9.11	安和(4)	0.59
合興(1)	151.98	東芳(1)	23.41	合興(2)	27.53	漢寶(4)	17.73
荊桐(1)	78.42	全興(2)	0.81	文昌(4)	40.70	港後(4)	34.34
溪州(1)	57.39	虎溪(2)	18.99	嘉興(3)	42.99	田洋(3)	11.57
虎溪(1)	50.02	溪州(3)	38.42	洛津(3)	48.42	西港(4)	19.55
田尾(1)	59.85	荊桐(2)	29.60	東榮(3)	3.58	東光(5)	21.71
柑園(1)	104.69	好修(2)	51.12	九隆(3)	17.09	海園(4)	44.48

含水層一		含水層二		含水層三		含水層四	
站名	K (m/s)	站名	K (m/s)	站名	K (m/s)	站名	K (m/s)
六合(1)	93.38	溪湖(2)	23.54	趙甲(3)	75.52	宜梧(4)	6.67
石榴(1)	2.32	西螺(2)	63.79	港後(3)	31.42	大溝(2)	16.16
田中(1)	13.16	線西(3)	56.23	漢寶(3)	30.63		
烏塗(2)	87.78	虎尾(2)	47.34	芳苑(3)	25.20		
溫厝(1)	7.83	九隆(2)	65.93	宏崙(2)	7.38		
東和(1)	6.45	嘉興(2)	1.85	北港(2)	46.27		
箔子(1)	18.74	文昌(3)	56.57	興化(3)	72.78		
明德(1)	6.30	洛津(2)	58.00	東光(4)	40.64		
安和(1)	6.45	東榮(2)	2.02	西港(3)	27.57		
宏崙(1)	42.87	竹塘(2)	42.71	安南(2)	28.55		
全興(1)	38.30	趙甲(2)	43.91	水林(2)	7.03		
文昌(1)	23.81	港後(2)	37.19	和豐(2)	23.18		
豐榮(1)	29.50	芳草(2)	30.52	海豐(2)	27.21		
西螺(1)	45.67	漢寶(2)	30.30	瓊埔(2)	12.18		
二水	106.16	潭墘(2)	48.49	海園(3)	9.81		
三和(1)	166.90	芳苑(2)	46.70	明德(4)	7.23		
東光(1)	36.34	元長(2)	29.51	宜梧(3)	17.79		
		豐榮(3)	17.54	箔子(3)	18.22		
		田洋(2)	25.60				
		北港(1)	20.59				
		安和(3)	27.98				
		興化(2)	19.40				
		西港(2)	65.86				
		東光(3)	33.20				
		水林(1)	27.31				
		安南(1)	32.05				
		後安(2)	6.53				
		和豐(1)	19.92				
		海豐(1)	20.67				
		瓊埔(1)	18.94				
		蔡厝(2)	5.20				
		海園(2)	21.51				
		大溝(1)	55.73				
		明德(2)	15.55				
		宜梧(1)	19.25				
		箔子(2)	6.27				

3. 垂直滲漏係數(V_L)

垂直滲漏係數(V_L)於濁水溪沖積扇與名竹盆地皆以控制點之 Voronoi Diagram

進行參數分區劃分，與比出水量(S_y)或儲水係數(S)之水文地質參數分區劃分相同。垂直滲漏係數(V_L)計算公式如式(3.6)所示，於名竹盆地之初始設定上先假設垂直水力傳導係數為水平水力傳導係數之 1/10 倍，計算垂直滲漏係數初始設定值；於濁水溪沖積扇之初始設定上乃參考張良正（1996）將含水層分為扇頂、扇央與扇尾三區，其分區垂向水力傳導係數值如表 4-16 所示，由於扇頂地區無明顯阻水層存在因此故扇頂地區含水層與阻水層之垂向水力傳導係數一致，經由表 4-16 與表 4-6 各含水層與阻水層之概念分層厚度，計算第二至第四含水層頂部之垂直滲漏係數初始設定值，如表 4-17 所示。

表 4-16 濁水溪沖積扇垂向透水係數初估值

單位：m/day	含水層	阻水層
扇頂地區	9.0	9.0
扇央地區	3.0	0.001
扇尾地區	1.0	0.001

(改自：張良正，1996)

表 4-17 濁水溪沖積扇與名竹盆地垂直滲漏係數分區初始設定值

含水層二		含水層三		含水層四	
站名	V_L (1/s)	站名	V_L (1/s)	站名	V_L (1/s)
觸口(2)	0.12000	觸口(2)	0.12000	田中(2)	0.00326
新民(2)	0.08640	新民(2)	0.08640	花壇(4)	0.00014
竹山(2)	0.12000	竹山(2)	0.12000	漢寶(4)	0.00012
六合(2)	0.01110	石榴(3)	0.00128	港後(4)	0.00014
漢寶(2)	0.00008	線西(4)	0.00048	合興(3)	0.00014
文昌(3)	0.00008	趙甲(3)	0.00048	好修(4)	0.00014
好修(2)	0.00009	文昌(4)	0.00048	田尾(2)	0.00014
線西(3)	0.00008	洛津(3)	0.00048	虎溪(4)	0.00014
東芳(1)	0.00009	溪湖(3)	0.00054	海園(4)	0.00012
花壇(3)	0.00009	東芳(2)	0.00054	宜梧(4)	0.00012
溪州(3)	0.01110	國聖(3)	0.00054	大溝(2)	0.00012
芳苑(2)	0.00008	芳苑(3)	0.00048	田洋(3)	0.00014
潭墘(2)	0.00008	海園(3)	0.00048	安和(4)	0.00014
竹塘(2)	0.00047	和豐(2)	0.00048	東榮(4)	0.00014
溪湖(2)	0.00047	興化(3)	0.00048	全興(4)	0.00012
海園(2)	0.00008	西港(3)	0.00048	西港(4)	0.00012
海豐(1)	0.00008	港後(3)	0.00054	東和(3)	0.00014

含水層二		含水層三		含水層四	
站名	V_L (1/s)	站名	V_L (1/s)	站名	V_L (1/s)
後安(2)	0.00008	合興(2)	0.00054	東光(5)	0.00014
安南(1)	0.00008	虎溪(3)	0.00128		
興化(2)	0.00021	東榮(3)	0.00054		
田洋(2)	0.00023	嘉興(3)	0.00054		
豐榮(3)	0.00042	箔子(3)	0.00240		
芳草(2)	0.00023	宜梧(3)	0.00096		
港後(2)	0.00023	明德(4)	0.00096		
虎尾(2)	0.00047	瓊埔(2)	0.00002		
西螺(2)	0.01110	水林(2)	0.00048		
荊桐(2)	0.01110	安南(2)	0.00048		
虎溪(2)	0.01110	北港(2)	0.00054		
柑園(2)	0.01110	宏崙(2)	0.00054		
東和(2)	0.01110	全興(3)	0.00048		
石榴(2)	0.00009	員林(4)	0.00054		
溫厝(2)	0.00023	好修(3)	0.00054		
古坑(1)	0.01110	漢寶(3)	0.00048		
嘉興(2)	0.00009	海豐(2)	0.00048		
箔子(2)	0.00021	九隆(3)	0.00054		
宜梧(1)	0.00021	三和(2)	0.00054		
明德(2)	0.00008	東光(4)	0.00054		
瓊埔(1)	0.00021				
大溝(1)	0.00021				
蔡厝(2)	0.00008				
東光(3)	0.00023				
北港(1)	0.00023				
安和(3)	0.00009				
元長(2)	0.00023				
全興(2)	0.00008				
洛津(2)	0.00008				
國聖(2)	0.00009				
員林(3)	0.00009				
趙甲(2)	0.00008				
西港(2)	0.00008				
和豐(1)	0.00008				
九隆(2)	0.00023				
崁腳(2)	0.01110				
東榮(2)	0.00009				
水林(1)	0.00021				



4.4.4 起始水位設定

本研究設定 2011 年 12 月 31 日地下水位觀測資料為模式之起始水位設定，其地下水位觀測資料由經濟部水利署於濁水溪沖積扇地下水監測站網所取得，將觀測井之起始水位輸入 MODFLOW 後內插至各個網格得到地下水位分佈初始值。

4.4.5 河流演算套件設定

河流演算套件(SFR2)所需資料分別為河道路徑、河川流量、河川斷面、主河道及河道兩岸之曼寧 n 值、上游與下游河床高程、上游與下游河床滲漏 KS 值，上游與下游河床底泥厚度，其中上游與下游為該河段之上游端點與下游端點設定值，中間網格將由模式進行線性內插計算數值。

本研究設定河道路徑與分段如圖 4-20 所示，名竹盆地範圍內濁水溪支流東埔蚋溪與清水溪各為一個河段，濁水溪主流由名竹盆地右邊界至濁水溪沖積扇左邊界入海分為六個河段，模式中共分為八個河段進行設定。各個河川斷面資料採用經濟部水利署（2012）現地量測斷面資料，並簡化為八個點代表該斷面以符合 SFR2 模式輸入條件，其各個河段之簡化河川斷面如圖 4-21 與圖 4-22 所示。



圖 4-20 河流演算套件之河道路徑與分段設定

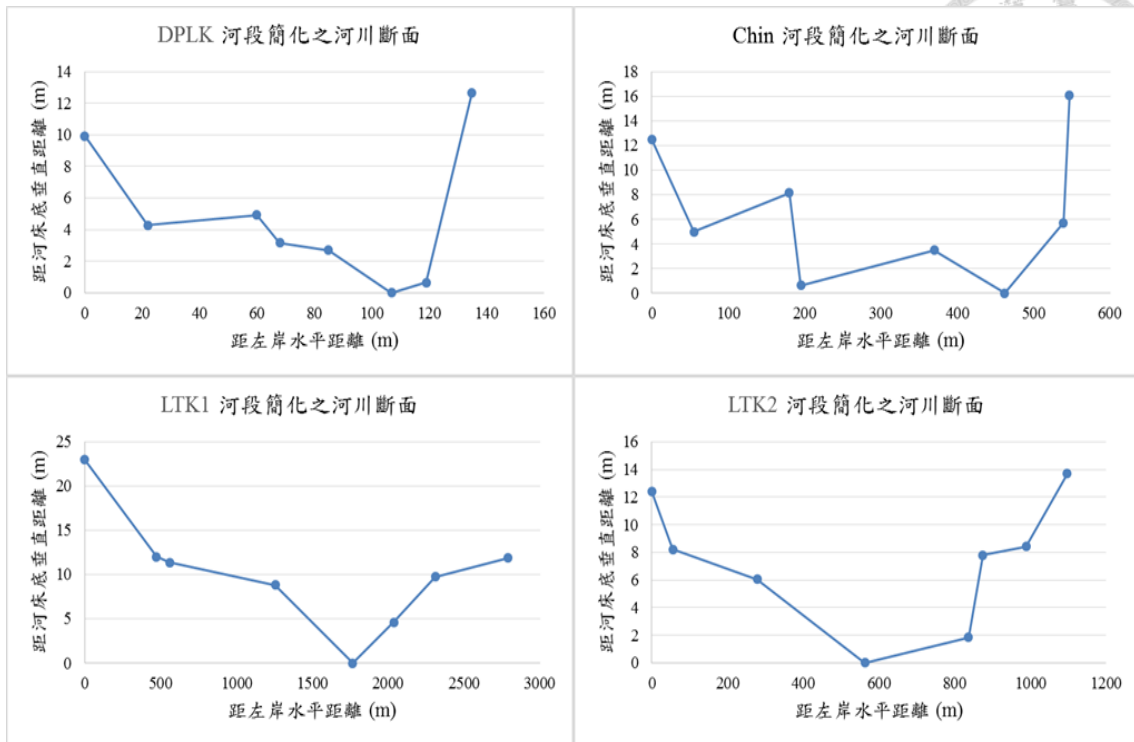


圖 4-21 名竹盆地區域河段之簡化河川斷面

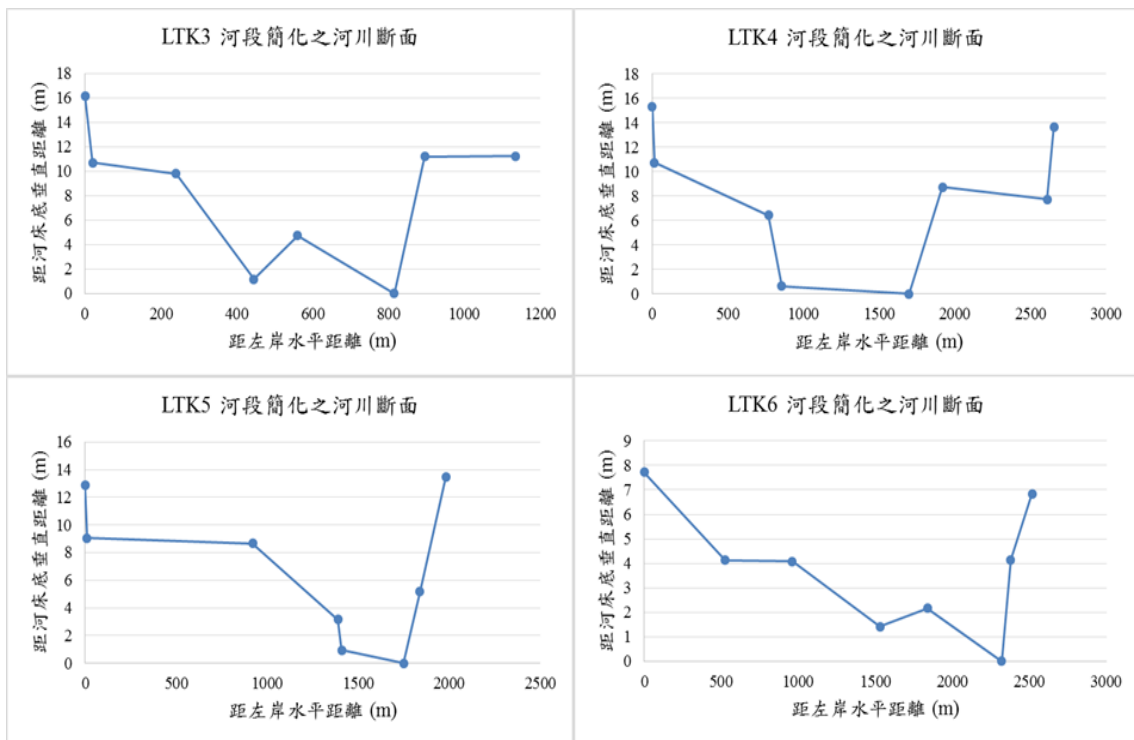


圖 4-22 濁水溪沖積扇區域河段之簡化河川斷面

河川月流量資料採用集集攔河堰放流量資料作為濁水溪第一河段(LTK1)之入流量輸入值，清水溪河段(Chin)採用龍門橋流量站紀錄作為輸入流量，東埔蚋溪河段(DPLK)則採用延平橋流量站紀錄作為輸入資料，剩餘下游河段河川流量將由模

式計算河水與地下水之交換量後所得。

曼寧 n 值設定上引用「濁水溪本流治理規劃檢討」中利用河床質調查資料以相關經驗公式推估後得到的結果，並考慮現地河床植生茂密程度、高低河槽、河床坡降等等水文與地文因素，比較周文德(1959)依河床特性所提出之分類(如表 4-18 所示)，得到 SFR2 曼寧 n 值輸入設定，如表 4-19 所示。此外上下游河床高程採用水利署於濁水溪大斷面調查資料，列於表 4-19 中。

表 4-18 依河床特性分類之曼寧 n 值表

河床特性	最大值	一般值	最小值
A.緩坡河道			
1.河道筆直、通水順暢、無滯蓄或深潭	0.025	0.030	0.033
2.與 1.同，但河道中較多石塊及雜草	0.030	0.035	0.040
3.河道通水順暢，具滯蓄、深潭及砂洲	0.033	0.040	0.045
4.與 3.同，但河道中較多石塊及雜草	0.035	0.045	0.050
5.與 3.同，河道中較多石塊及雜草，且低水位時出現較多的無效通水斷面	0.040	0.048	0.055
6.與 4.同，但河道中具更多石塊	0.045	0.050	0.060
7.河道通水因受阻而緩慢、雜草叢生、具滯蓄、深潭	0.050	0.070	0.080
8.河道雜草非常茂密、具滯蓄、深潭，或通水斷面內有厚密的樹枝殘株及水草站立	0.075	0.100	0.150
B.山澗，溪流中無植生，河岸通常陡峭，當高水位時岸邊植生會部分浸入水中：			
1.溪床粒徑以卵、礫石為主，偶有大塊石塊	0.030	0.040	0.050
2.溪床粒徑以卵石及大塊石塊為主	0.040	0.050	0.070

(資料來源：周文德，1959)

表 4-19 SFR2 曼寧 n 值與河床高程設定

河段編號	曼寧 n 值			河床高程 (m)	
	左岸	主河道	右岸	上游	下游
DPLK	0.045	0.040	0.045	147.37	116.32
Chin	0.05	0.041	0.05	146.11	99.85
LTK1	0.045	0.040	0.045	148.03	116.32
LTK2	0.045	0.040	0.045	115.32	99.85
LTK3	0.045	0.038	0.045	99.85	39.92
LTK4	0.040	0.035	0.040	39.92	10.32
LTK5	0.040	0.030	0.040	10.32	9
LTK6	0.036	0.027	0.036	9	0.61

河床底泥透水係數(K_s)，引用經濟部中央地質調查所(1996)「濁水溪中游地區地下水補注調查與評估」中針對河床底泥特性調查，於各斷面進行三軸透水試驗之結果，研究範圍內濁水溪之河床底泥透水係數介於 $4.22 \times 10^{-6} \sim 8.56 \times 10^{-4}$ cm/sec；而清水溪介於 $4.45 \times 10^{-6} \sim 1.03 \times 10^{-4}$ cm/sec，該試驗結果將做為初始輸入值，河床底泥厚度初始設定則為 1m，後續考量洪水通過對於河床質之變化於模式中將再行率定調整。

4.4.6 抽水量設定

本研究模式中所設定之抽水量主要分為三類：農田水利會抽水量、自來水公司抽水量以及民井抽水量，茲將各類抽水量設置情形分別敘述如下：

1. 農田水利會抽水量

農田水利會抽水量主要根據農委會灌溉管理情勢資料庫中，彰化與雲林農田水利會計畫與實際用水紀錄資料，並針對彰化以及雲林農田水利會抽水井位置以及抽水井深度進行農田水利會抽水量分層之空間分配。

2. 自來水公司抽水量

研究區域內之自來水源主要為抽用地下水，因此在自來水公司抽水量設定主要採用自來水公司年度生活用水量統計(經濟部水利署，2012-2014)資料作為設定，其空間分布與分層設定根據自來水公司抽水井位置與抽水井深度進行設定。

3. 民井抽水量

經濟部水利署委託雲林科技大學於 2000 至 2010 年間清查彰雲地區所有民間水

井資料，包含水井座標、馬達馬力、出水管徑以及用水標的等，本研究整理彰雲地區清查資料，根據行政院農委會(2015)所建立用電量推估模式，將濁水溪沖積扇範圍內之民井分為非大馬力水井、大馬力水井以及缺漏資料水井，計算 2012 年至 2014 年之民井月抽水量，並且依照用水標的分為非灌溉用水與灌溉用水，其計算結果如表 4-20 所示，與利用蓄水量歷線分析所估算得到之總抽水量(表 4-21)進行比較，發現估算結果相近，表示此抽水量推估結果為合理且正確，本研究將民井抽水量根據其抽水井位置以及抽水井深度進行分層與空間之分布設定。

表 4-20 濁水溪沖積扇範圍內民井與水利會水井抽水量推估結果(用電量推估法)

單位：億噸/年		1-6 月	7-12 月	全年	總和
2012	非灌溉用水	3.67	4.05	7.72	24.27
	灌溉用水	7.87	6.96	14.83	
	農田水利會	0.71	1.00	1.71	
2013	非灌溉用水	3.85	4.14	7.99	23.66
	灌溉用水	7.94	7.22	15.15	
	農田水利會	0.34	0.18	0.52	
2014	非灌溉用水	3.70	3.76	7.46	23.27
	灌溉用水	8.26	6.72	14.97	
	農田水利會	0.65	0.18	0.83	

表 4-21 濁水溪沖積扇範圍總抽水量推估結果(蓄水量歷線分析)

單位：億噸/年		1-6 月	7-12 月	全年	總和
2012	非灌溉用水	4.24	4.37	8.61	23.43
	灌溉用水	6.84	7.99	14.82	
2013	非灌溉用水	4.47	4.43	8.90	23.92
	灌溉用水	5.96	9.07	15.03	
2014	非灌溉用水	4.12	4.38	8.50	23.35
	灌溉用水	6.08	8.77	14.85	

4.4.7 地下水系統補注量分區與初始設定

本研究區域之地下水系統補注量來源主要分為三類：雨水補注量、河水補注量以及區外地下水流入量，其中河水補注量主要由河流演算套件(SFR2)進行計算模擬，因此於模式中不另外進行設定，於雨水補注量與區外地下水流入量設定上分為名竹盆地與濁水溪沖積扇敘述如下：

1. 名竹盆地補注量設定

名竹盆地範圍內之雨水補注量與區外地下水流入量之量體主要根據前節 4.3.1



之估計結果，雨水補注量之分區設定與比出水量參數分區相同，如圖 4-16 左圖所示；區外地下水流入量之分區如圖 4-14 中所示，北側邊界分為一段(CG 段)、南側邊界分為兩段(ID 段、HI 段)，而雨水補注量與區外地下水流入量之空間分布皆先採用平均分配，再於經由模式率定獲得正確之空間分布。

2. 濁水溪沖積扇淨補注量設定

濁水溪沖積扇內之雨水補注量與區外地下水流入量之量體主要根據前節 4.3.1 地下水水平衡之估計結果，於空間分布上考量濁水溪沖積扇之面積廣大，若直接以平均分配之方式進行空間分布容易造成偏估，無法捕捉地下水系統補注量實際分佈之狀況，於後續模式率定可能會造成較差的結果，然而濁水溪沖積扇之地下水水位觀測網密度很高，具有許多觀測資料可供分析，因此本研究利用 EOF 分析濁水溪沖積扇地下水蓄水量歷線來進行濁水溪沖積扇補注量空間分布之依據。

本研究於前節 4.4.6 中利用濁水溪沖積扇水井清查資料以及自來水公司與農田水利會等水井資料獲得抽水量之空間與時間分佈，其總量與地下水蓄水量歷線分析結果相近，表示其估算結果是合理且具有可信度。而根據地下水水平衡公式(3.22)移項可得知，將地下水蓄水量加上地下水抽水量以濾除抽水量之資訊後，其餘資訊即代表地下水流入量與流失量之影響，如式(4.7)所示，因此本研究將各含水層之地下水蓄水量加上該含水層之抽水量後進行 EOF 分析，以獲得其淨補注量之空間分布資訊，茲將四個含水層之 EOF 分析結果敘述如下：

$$Q_r^{net}(i) = Q_{in}(i) - Q_l(i) = \Delta Q_s(i) + Q_{out}(i) \quad (4.7)$$

其中 $Q_r^{net}(i)$ 為第 i 月地下水系統之淨補注量 (L^3)。

1. 含水層(一)

濁水溪沖積扇範圍內含水層(一)共有 33 個地下水水位測站，其淨補注量之 EOF 分析結果如圖 4-23 所示，由圖中可得知前五個 EOF 成分佔了 90% 以上解釋變異量，表示由前五個 EOF 可以得到含水層(一)其淨補注量之大多數資訊，而本研究考慮主成分分析所得到之各個 EOF 之間並非完全獨立，其各 EOF 可能同時包含各種資訊，如地面水補注量、邊界地下水補注量、地下水流失量、地下水流通量等等，因其主要影響之因素不同而分為不同 EOF 成分，因此本研究將前五個 EOF 進行疊加，以得到影響淨補注量分布之完整因素。前五個 EOF 成分之解釋變異量百分比乘上各自 EOF 成分之特徵向量後加總，得到淨補注量之空間特徵，如圖 4-24

所示，由圖中可看出濁水溪沖積扇含水層(一)之淨補注量於扇頂處有較高之特徵值，往扇尾處呈現逐漸減少之趨勢，表示濁水溪沖積扇淨補注量主要集中於扇頂部分，與經濟部地調所(2014)之調查結果相同，此外由圖 4-24 也可看出於烏溪、斗六丘陵處之地下水補注量呈現較高之趨勢，顯示有較高之邊界地下水流入量。

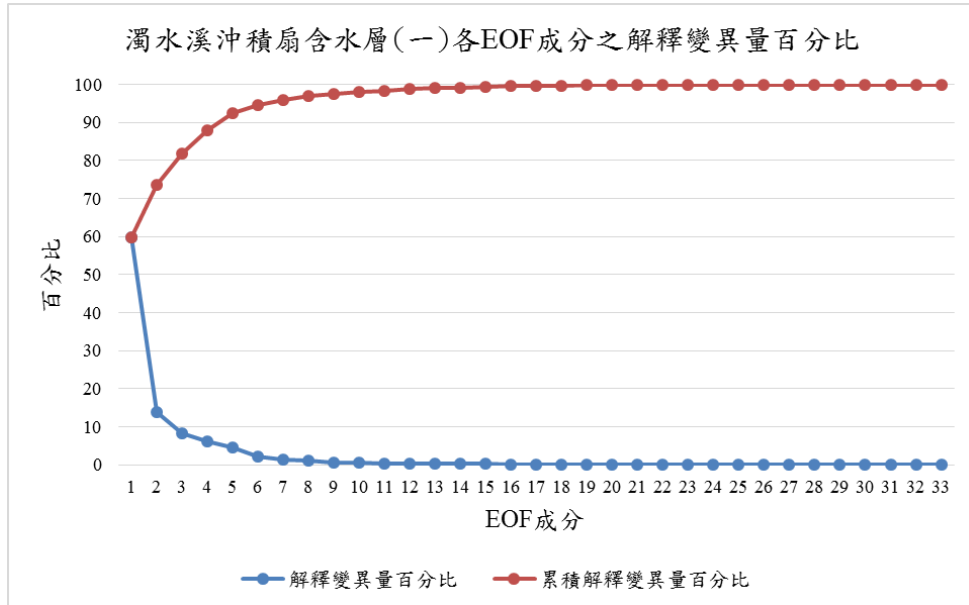


圖 4-23 含水層(一)各 EOF 成分解釋變異量百分比

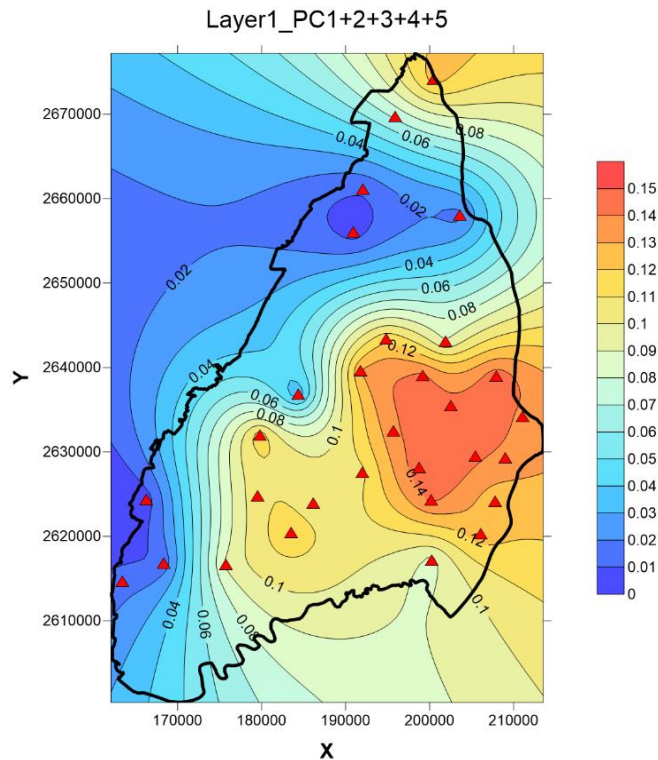


圖 4-24 濁水溪沖積扇含水層(一)前五個 EOF 成分之特徵向量和空間分布

2. 含水層(二)

濁水溪沖積扇範圍內含水層(二)共有 53 個地下水位測站，其地下水蓄水量率除抽水量後之 EOF 分析結果如圖 4-25 所示，由圖中可得知前五個 EOF 成分佔了接近 90%之解釋變異量，將前五個 EOF 成分之解釋變異量百分比乘上各自 EOF 成分之特徵向量後加總，可得到含水層(二)之淨補注量空間分布資訊，如圖 4-26 所示，由圖中可看出扇頂部分之特徵向量值依舊較高，其原因為扇頂地質多為卵礫石組成其滲透性高，由含水層(一)進入之地面水補注量可持續入滲補注至含水層(二)；於烏溪與八卦山台地處可看出其邊界地下水之流入量有較高之趨勢。

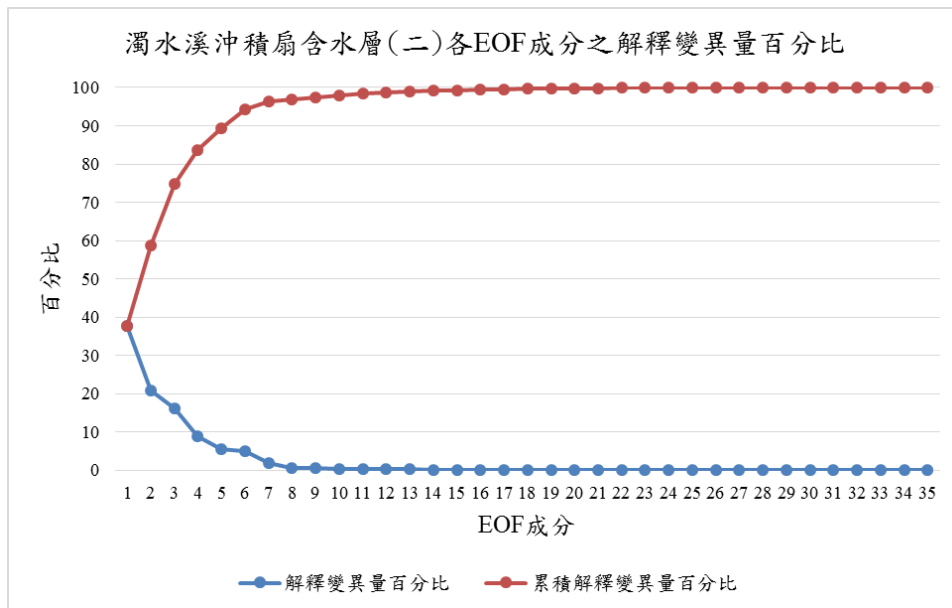


圖 4-25 含水層(二)各 EOF 成分解釋變異量百分比

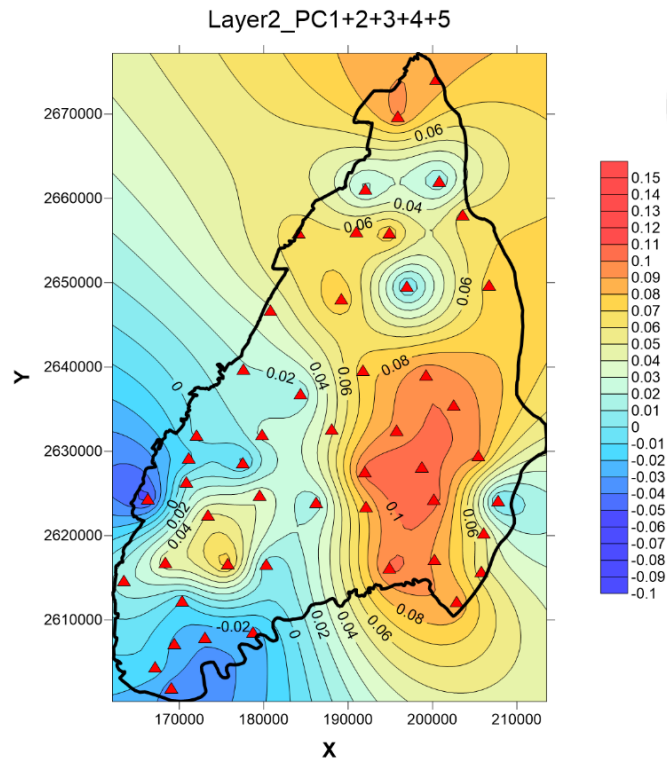


圖 4-26 濁水溪沖積扇含水層(二)前五個 EOF 成分之特徵向量和空間分布

3. 含水層(三)

濁水溪沖積扇範圍內含水層(三)共有 34 個地下水位測站，其地下水蓄水量率除抽水量後之 EOF 分析結果如圖 4-27 所示，其前五個 EOF 成分亦佔了接近 90% 之解釋變異量，取前五個 EOF 成分計算其特徵向量權重空間分布如圖 4-28 所示，由圖中可看出其淨補注量特徵向量空間分布於烏溪、八卦山台地以及斗六丘陵之比重較大，亦即含水層(三)之淨補注量來源主要為邊界地下水流入量，由含水層(三)所入滲補注之量體所佔之比例較少，而扇尾中間區域其特徵向量較高可能為該區域由含水層(三)所得到之滲漏補注量較高。

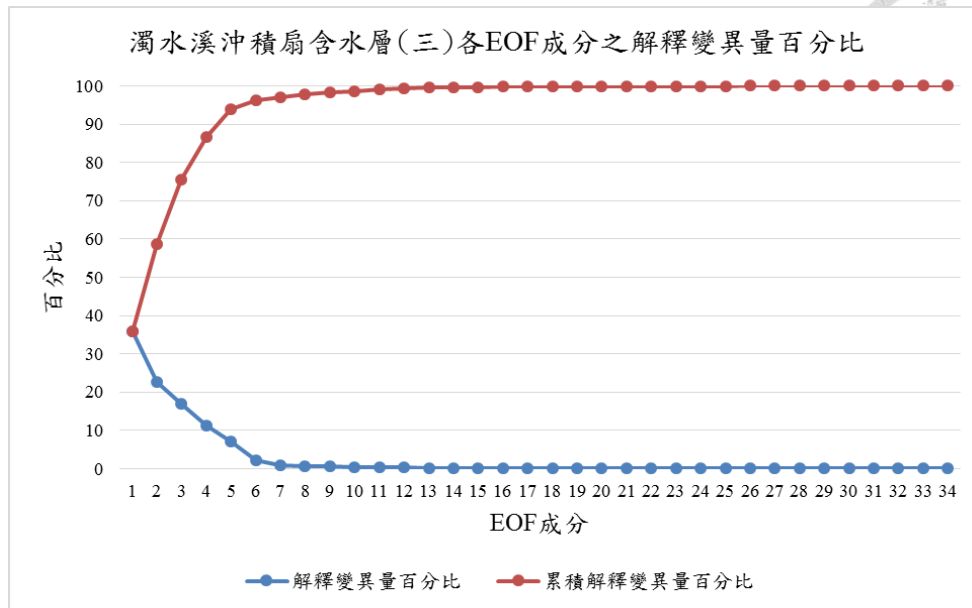


圖 4-27 含水層(三)各 EOF 成分解釋變異量百分比

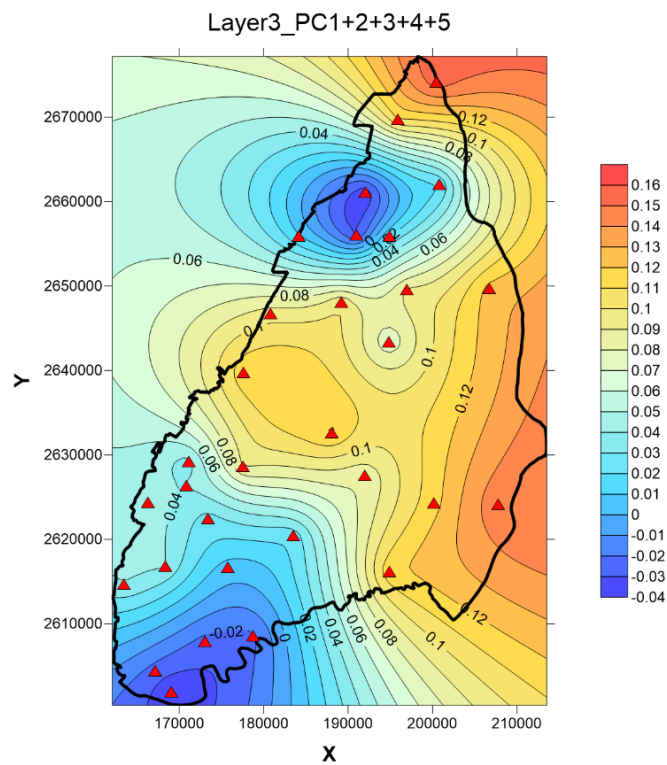


圖 4-28 濁水溪沖積扇含水層(三)前五個 EOF 成分之特徵向量和空間分布

4. 含水層(四)

濁水溪沖積扇範圍內含水層(四)共有 18 個地下水位測站，其地下水蓄水量率除抽水量後之 EOF 分析結果如圖 4-29 所示，其前五個 EOF 成分亦佔了接近 90% 之解釋變異量，將前五個 EOF 成分計算其特徵向量權重空間分布如圖 4-30 所示，由

圖中可看出其邊界地下水流入量主要分布於八卦山台地處，而含水層(三)之滲漏補注量只主要集中於扇央與扇尾之中間處。

由上述可得知由 EOF 分析可以獲得淨補注量於空間分布之大致趨勢，因此本研究雨水補注量之空間分布初始設定值乃根據圖 4-24 進行設定，而邊界地下水流入量之空間分布則根據各含水層之特徵向量空間分布進行初始值設定。

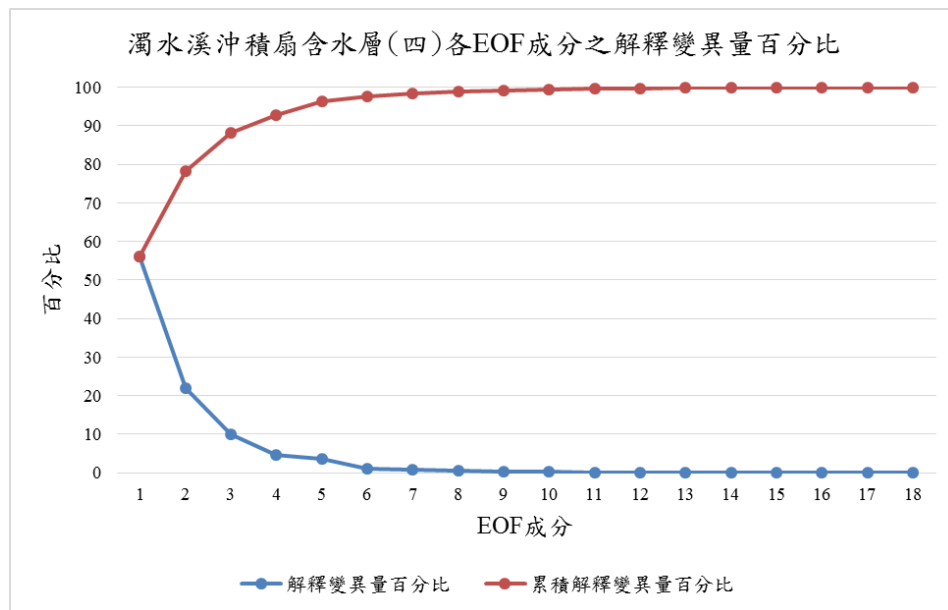


圖 4-29 含水層(四)各 EOF 成分解釋變異量百分比

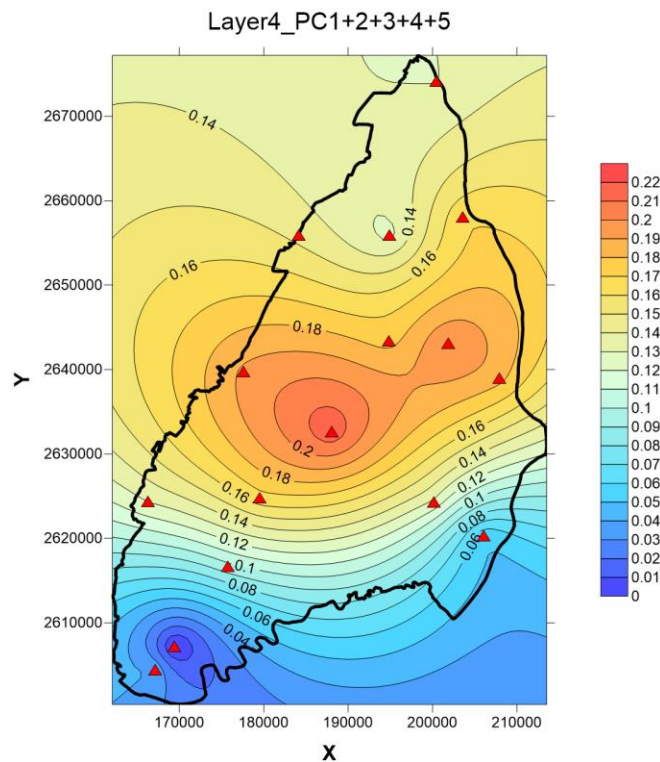


圖 4-30 濁水溪沖積扇含水層(四)前五個 EOF 成分之特徵向量和空間分布



4.5 地下水流數值模式率定結果

本研究所建立之模式率定優選方法為使用地下水位觀測井紀錄資料，與模式之模擬地下水位進行程蓄水量誤差歷線計算以進行 EOF 分析，需要多口觀測井之水位資料較能夠捕捉到完整之資訊，而位於名竹盆地範圍內之觀測井相當少，能夠用以計算蓄水量誤差歷線進行 EOF 分析之觀測井僅有新民與竹山等兩口觀測井，本研究所建立之率定優選方法難以應用於名竹盆地之地下水流模式參數率定，故於名竹盆地區域之模式率定本研究採用更新猜測值之方式進行率定。濁水溪沖積扇各含水層之觀測井皆有足夠之數量進行 EOF 分析，因此可利用本研究所建立之模式率定優選方法進行模式率定。茲將地下水流數值模式率定結果分為名竹盆地與濁水溪沖積扇分述如下。

4.5.1 名竹盆地

本研究針對名竹地地下水流數值模式率定之水文量主要有：雨水補注量、邊界地下水流入量、垂直滲漏係數 V_L 、水力傳導係數 K 值以及河流演算套件之底泥透水係數 K_s 與底泥厚度 D 等，率定之優先順序考量水文量對地下水位之影響較大且直接，因此先針對雨水補注量與邊界地下水流入量進行空間分布之率定，而河流演算套件為模擬河川水與地下水之交換量，對河流附近之觀測井新民站之影響也較大，因此第二步為率定河流演算套件之底泥透水係數 K_s 與底泥厚度，最後才進行垂直滲漏係數 V_L 與水力傳導係數 K 值等參數率定。其河流演算套件之參數率定結果如表 4-22 所示，水文地質參數率定結果如表 4-23 所示。

表 4-22 名竹盆地河流演算套件參數率定結果

河段編號	上游				下游			
	K_s (m/d)		D (m)		K_s (m/d)		D (m)	
	率定前	率定後	率定前	率定後	率定前	率定後	率定前	率定後
LTK1	0.5	0.1	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5
LTK2	0.5	1.0	1.0	0.3	0.5	1.0	1.0	0.3
DPLK	0.5	0.1	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5
Chin	0.5	0.1	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0

表 4-23 名竹盆地水力傳導係數 K 與垂直滲漏係數 V_L 率定結果

含水層一			含水層二、三			含水層二、三		
站名	K (m/d)		站名	K (m/d)		站名	V_L (1/d)	
	率定前	率定後		率定前	率定後		率定前	率定後
新民(1)	30.24	61.45	新民(2)	21.12	44	新民(2)	0.0086	0.0064
觸口(1)	30.71	199.62	觸口(2)	60	40	觸口(2)	0.0120	0.0013
坪頂	33.57	33.57	竹山(2)	6	2	竹山(2)	0.0120	0.0066
竹山(1)	28.80	32.47						
竹山台地	0.014	0.014						

名竹盆地數值模式率定後各地下水位觀測站模擬結果如圖 4-31 至圖 4-34 所示，其地下水位模擬結果之均方根誤差 RMSE 皆在 1 m 以下，能夠準確模擬觀測地下水位變化趨勢。經由模式計算所得到之各項地下水文量如表 4-24 所示，將表 4-24 與表 4-10 進行比較可得知除了河床入滲量之模式模擬結果誤差較大以外，其餘地下水系統交換量之模擬誤差皆在可接受範圍內，其中經由隘口流至濁水溪沖積扇扇頂之地下水量平均約為每年 0.85 億噸。

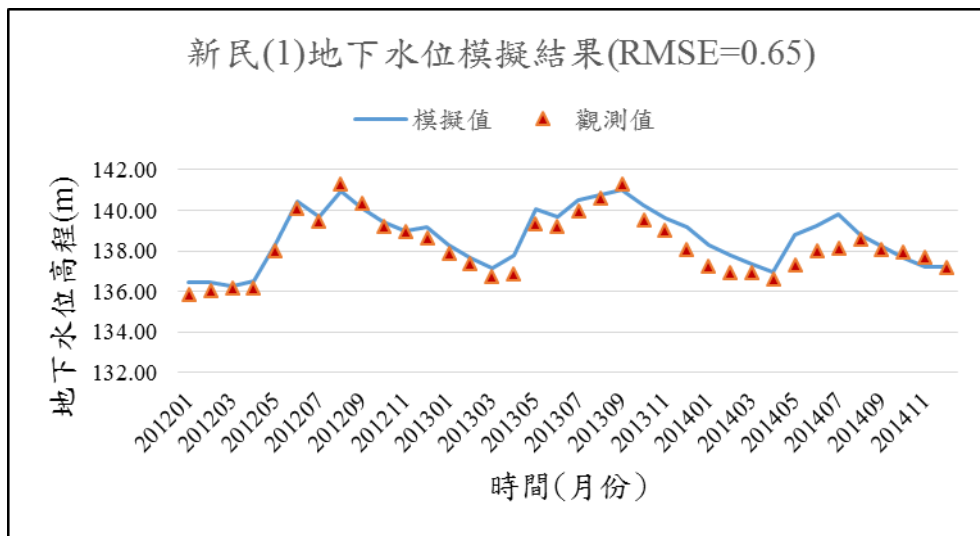


圖 4-31 新民(1)站地下水位模擬結果

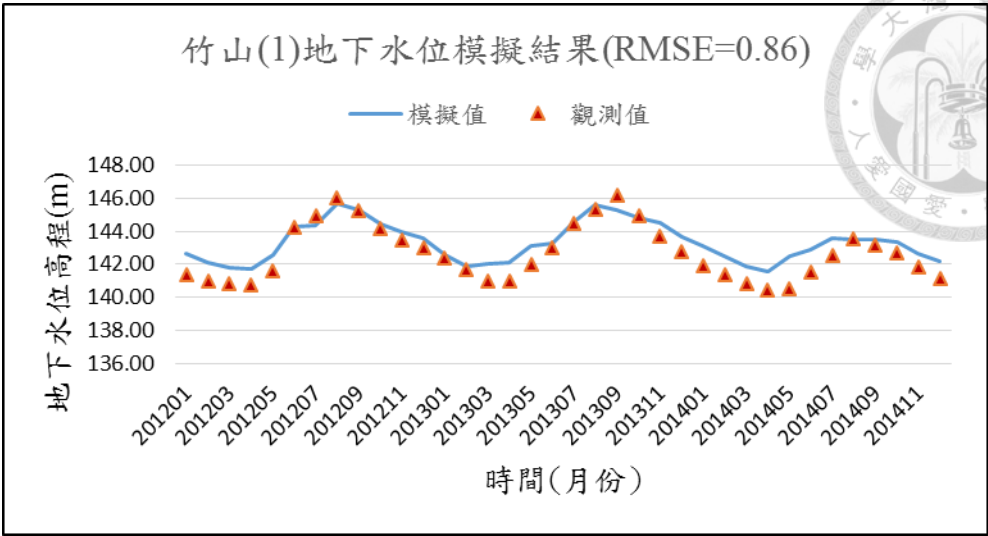


圖 4-32 竹山(1)站地下水位模擬結果

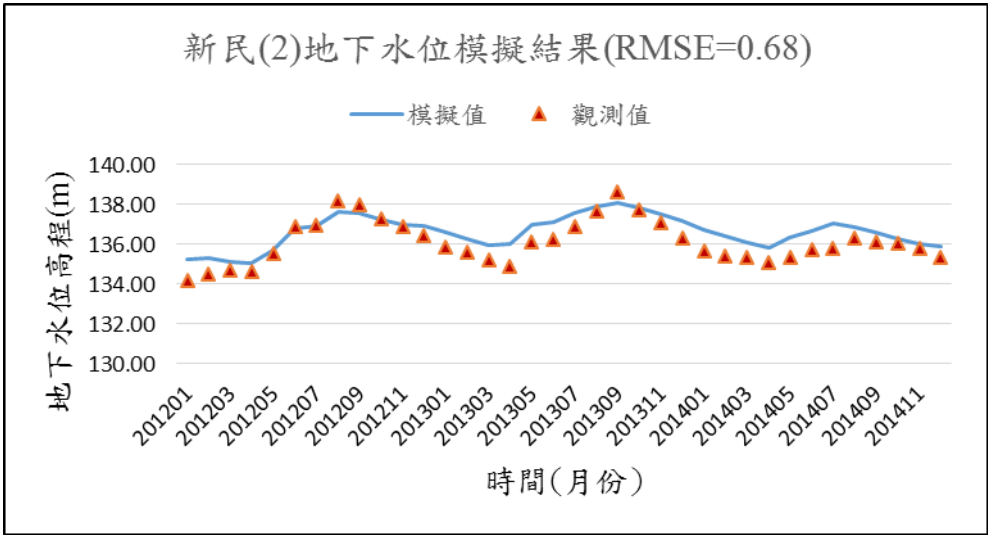


圖 4-33 新民(2)站地下水位模擬結果

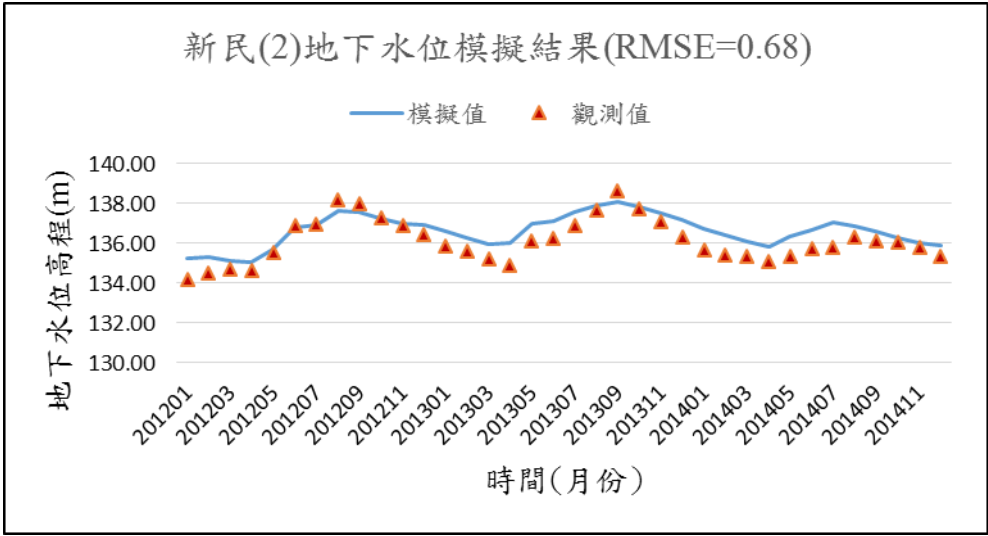


圖 4-34 竹山(2)站地下水位模擬結果



表 4-24 率定完之名竹盆地地下水流模式水平衡計算結果

	蓄水變化量	區外地下水流入量	雨水補注量	河水補注量	下游隘口流出量	抽水量	河床出滲(流失量)
2012	0.62	0.69	0.74	0.57	0.86	0.04	0.50
2013	0.09	0.40	0.84	0.41	0.83	0.04	0.72
2014	-0.21	0.59	0.43	0.30	0.87	0.04	0.65
平均	0.17	0.56	0.67	0.43	0.85	0.04	0.62

單位；億噸

4.5.2 濁水溪沖積扇

濁水溪沖積扇於含水層(一)至含水層(四)所設定之參數分區分別為 30 個、49 個、31 個以及 16 個，四層含水層共有 126 個參數分區，其中水平水力傳導係數於含水層(一)至含水層(四)皆須進行率定，共有 126 個待率定之決策變數；垂直滲漏係數僅需於含水層(二)至含水層(四)進行率定，共有 96 個待率定之決策變數；地面水補注量於空間上僅於含水層(一)進行設定，但於時間上有 36 個時間間隔(月)需進行設定，因此共有 1080 個待率定之決策變數。整個濁水溪沖積扇地下水流模式總共有 1302 個決策變數需要進行率定。

濁水溪沖積扇地下水流數值模式於率定過程中須經過多次迭代，每次迭代皆需計算蓄水量誤差歷線，並使用主成分分析蓄水量誤差歷線獲得影響誤差之主要 EOF，以計算水文地質參數空間分布修正量以及地面水補注量之時空分布修正量。茲以第 1 次迭代所計算之蓄水量誤差歷線進行說明，含水層(一)至含水層(四)皆須進行蓄水量誤差歷線 EOF 分析以計算參數率定修正量，因此將第 1 次迭代之蓄水量誤差歷線 EOF 分析分為四層含水層分述如下：

1. 含水層(一)

濁水溪沖積扇含水層(一)之蓄水量誤差歷線 EOF 分析結果如圖 4-39 所示，由圖中可看出其前兩個 EOF 成分便佔了全部 91%之解釋變異量，第三個 EOF 成分至第六個 EOF 成分解釋變異量百分比總和為 8%，其餘 EOF 成分之解釋變異量百分比總和不足 1%，因此假設前兩個 EOF 成分為代表補注量之推估誤差，第三至第六個 EOF 成分代表為水力傳導係數之設定誤差，將 $R=2$ 帶入式(3.35)， $p=6$ 帶入式(3.33)可分別計算求得淨補注量與水力傳導係數之率定修正量，其中淨補注量之率

定修正量再經由式(3.33)至式(3.35)得到每個月之地下水淨補注量率定修正量。

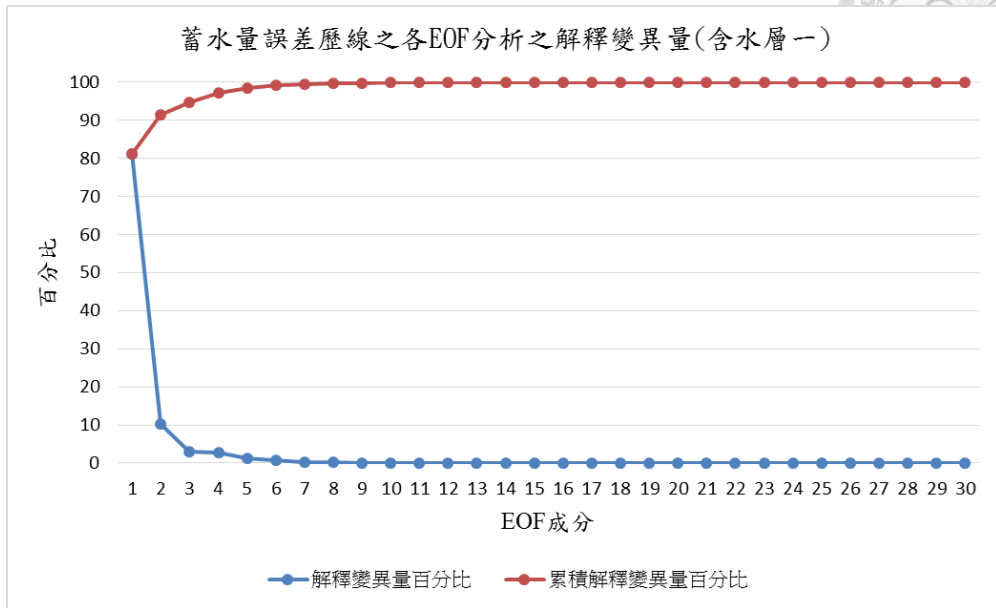


圖 4-35 含水層(一)蓄水量誤差歷線之 EOF 分析解釋變異量百分比圖

2. 含水層(二)

濁水溪沖積扇含水層(二)之蓄水量誤差歷線 EOF 分析結果如圖 4-36 所示,由圖中可看出前兩個 EOF 成分佔了 91%之解釋變異量,第三至第八個 EOF 成分佔了 8%之解釋變異量,因此將前兩個 EOF 成分視為補注量推估誤差,第三至第八個 EOF 成分視為水力傳導係數推估誤差,將將 $R=2$ 帶入式(3.37), $p=8$ 帶入式(3.33)可分別計算求得垂直滲漏係數與水力傳導係數之率定修正量。

3. 含水層(三)

濁水溪沖積扇含水層(三)之蓄水量誤差歷線 EOF 分析結果如圖 4-37 所示,由圖中可看出前兩個 EOF 成分佔了 93%之解釋變異量,第三至第七個 EOF 成分佔了 6%之解釋變異量,因此將前兩個 EOF 成分視為補注量推估誤差,第三至第七個 EOF 成分視為水力傳導係數推估誤差,將將 $R=2$ 帶入式(3.37), $p=7$ 帶入式(3.33)可分別計算求得垂直滲漏係數與水力傳導係數之率定修正量。

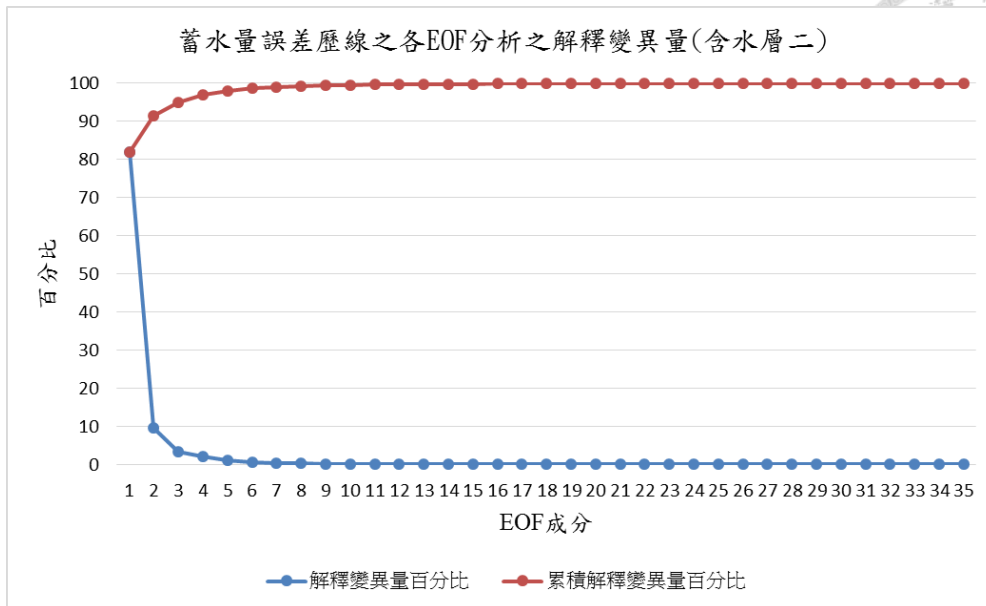


圖 4-36 含水層(二)蓄水量誤差歷線之 EOF 分析解釋變異量百分比圖

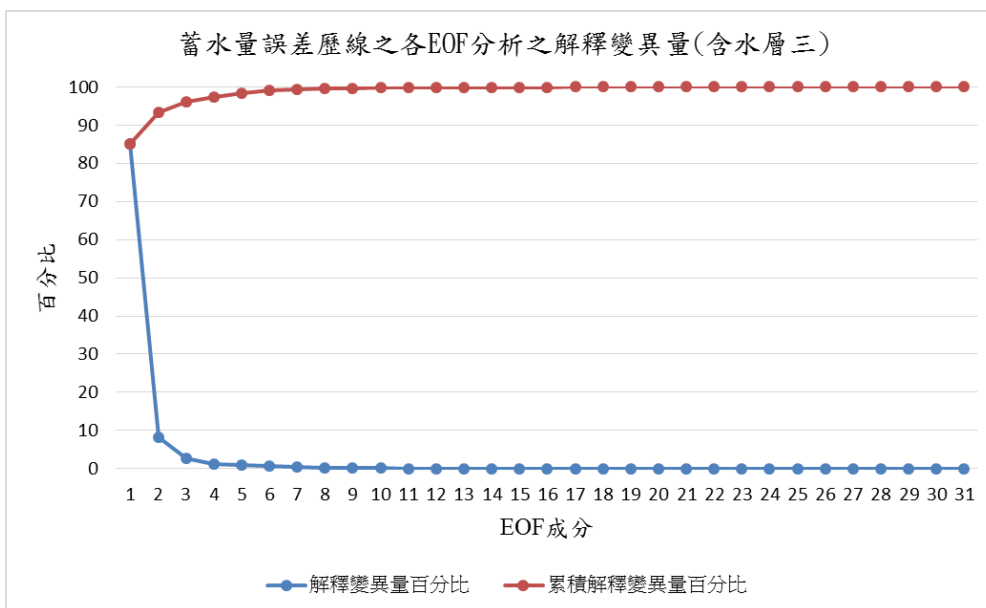


圖 4-37 含水層(三)蓄水量誤差歷線之 EOF 分析解釋變異量百分比圖

4. 含水層(四)

濁水溪沖積扇含水層(四)之蓄水量誤差歷線 EOF 分析結果如圖 4-38 所示，由圖中可看出前兩個 EOF 成分佔了 91%之解釋變異量，第三至第五個 EOF 成分佔了 8%之解釋變異量，因此將前兩個 EOF 成分視為補注量推估誤差，第三至第七個 EOF 成分視為水力傳導係數推估誤差，將將 $R = 2$ 帶入式(3.37)， $p = 5$ 帶入式(3.33) 分別計算求得垂直滲漏係數與水力傳導係數之率定修正量。

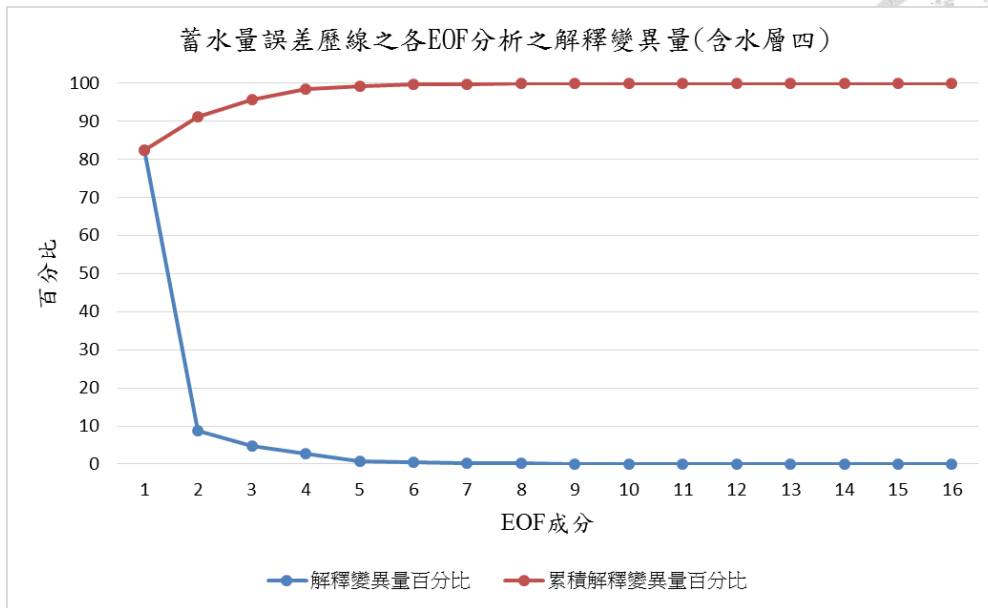


圖 4-38 含水層四蓄水量誤差歷線之 EOF 分析解釋變異量百分比圖

經由上述各含水層之地面水補注量、水力傳導係數以及滲漏係數修正量計算，可以得到水文地質參數與地面水補注量之迭代新值並帶回模式中模擬地下水位。本研究經過多次迭代後其各含水層之模擬地下水蓄水量誤差百分比變化如圖 4-39 所示，由圖中可看出經過第一次迭代後各含水層之模擬蓄水量誤差百分比皆大幅下降，其中含水層(一)之模擬蓄水量誤差百分比大於其他三層深層含水層，而隨著迭代次數的增加，各含水層之誤差百分比下降之幅度皆逐漸減少，於第 5 次迭代後含水層(一)之模擬蓄水量誤差百分比開始低於其他三層深層含水層，且各含水層之模擬蓄水量誤差百分比呈現較穩定下降之狀態，最後迭代至第 24 次時便達成停止條件，其各含水層(一)至含水層(四)之模擬蓄水量誤差百分比依序為 0.11%、23.58%、28.99% 以及 29.55%。

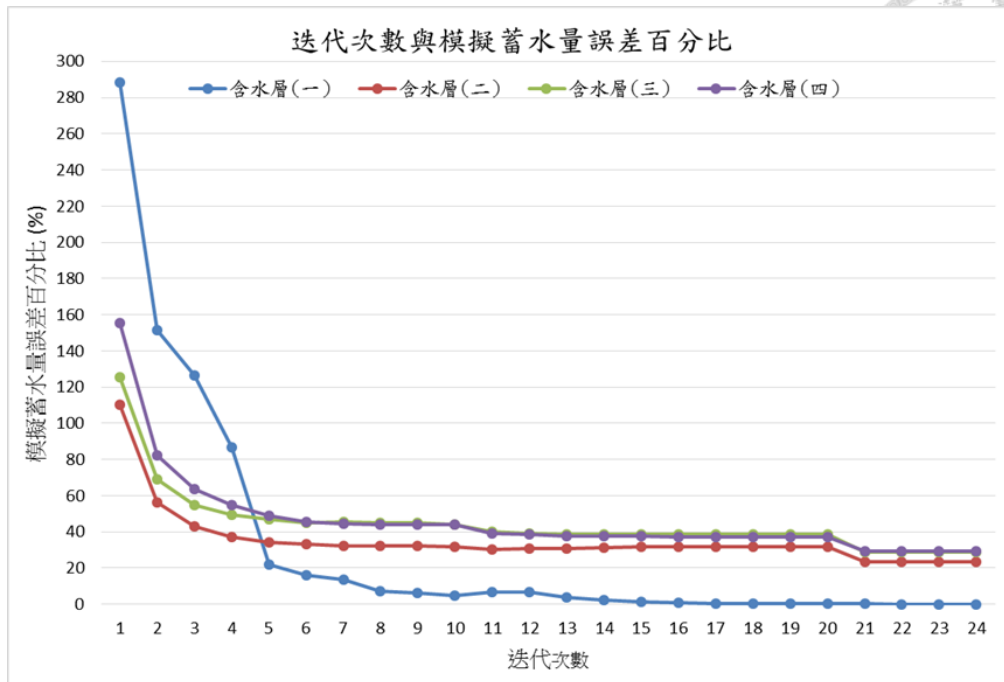


圖 4-39 濁水溪沖積扇模式率定過程中迭代次數與目標函數關係圖

濁水溪沖積扇地下水流數值模式率定結果之淨補注量年平均空間分布如圖 4-40 所示，由圖中可看出濁水溪沖積扇之地面水淨補注量於扇頂隘口處為最大，其原因為扇頂處之地質良好土壤入滲率高，雨水與河水能入快速且大量入滲補注至含水層。此外經由式(3.33)至式(3.35)所計算得到之地下水月平均淨補注量比例結果如圖 4-41 所示，其地面水淨補注量於枯水期佔淨補注量之比例較低，介於 0.184 至 0.323 之間；於豐水期則較高，介於 1.080 至 1.238 之間。

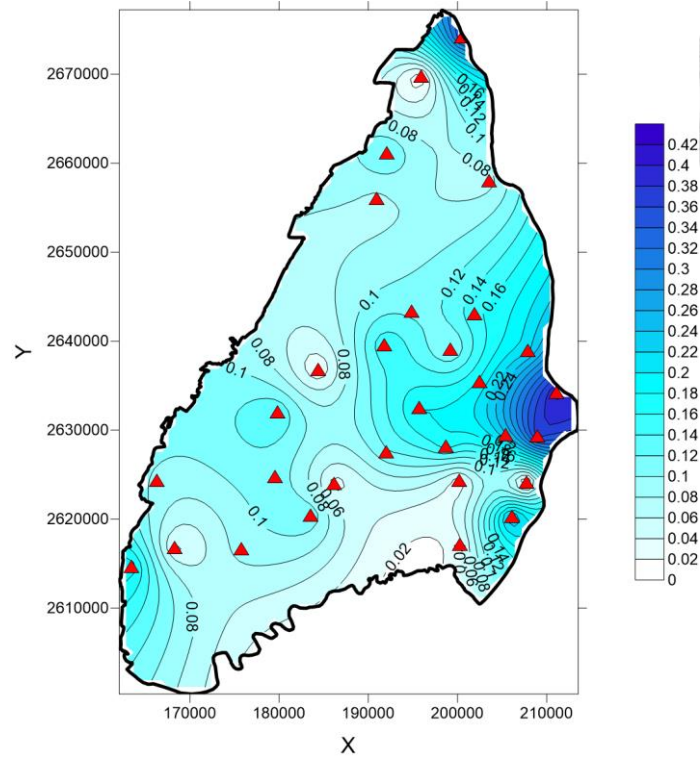


圖 4-40 率定完成之濁水溪沖積扇年平均淨補注量空間分布圖

地面水淨補注量比例之率定結果

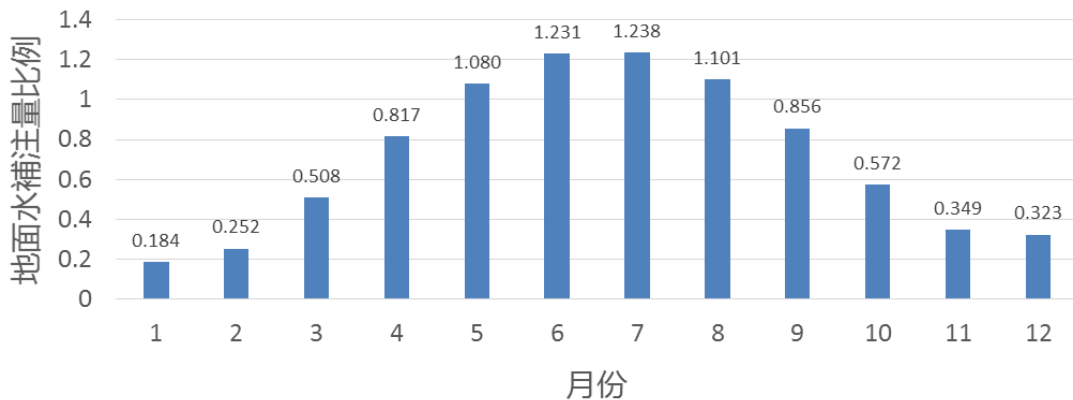


圖 4-41 率定完成之月平均地面水淨補注量比例結果

濁水溪沖積扇地下水流數值模式率定結果之水平水力傳導係數(K)如表 4-25 所示垂直滲漏係數(V_L)如表 4-26 所示，其中紅色字體為該參數之修正量已達本研究限制式所設定之上限值或下限值。由表 4-25 可發現大多數率定完成之水平水力傳導係數皆在限制式範圍內，僅有一個參數達到上限，表示其水平水力傳導係數率定結果皆在合理範圍內，而該水平水力傳導係數達到上限原因可能為初始設定

值偏離實際值太遠，導致率定過程中未求得最佳解之前便遇到限制式邊界而無法再修正；由表 4-26 可發現有較多分區率定完成之垂直滲漏係數達到設定之最大修正量，表示該垂直滲漏係數無法達到最佳率定結果，除了初始設定值所造成的可能性以外，本研究比對其中幾個參數其所在含水層分區之地下水位與其上一層含水層之地下水位發現，深層含水層之地下水位高於淺層含水層之地下水位，而本研究建立之垂直滲漏係數修正量公式是在深層含水層地下水位低於淺層含水層地下水位之條件下，即垂直滲漏係數之大小與該含水層之滲漏補注量呈正相關，因此在深層含水層之地下水位高於淺層含水層之地下水位條件下，其垂直滲漏係數之修正量會使參數往錯誤之方向修正，導致無法得到最佳之參數率定結果。

表 4-25 濁水溪沖積扇水平水力傳導係數率定結果

含水層一		含水層二		含水層三		含水層四	
站名	K (m/s)	站名	K (m/s)	站名	K (m/s)	站名	K (m/s)
線西(1)	23.02	石榴(2)	3.47	石榴(3)	27.57	田中(2)	106.94
洛津(1)	2.01	古坑(1)	4.71	員林(4)	26.73	東和(3)	6.00
花壇(1)	75.43	東和(2)	66.13	國聖(3)	0.64	田尾(2)	31.88
國聖(1)	111.12	員林(3)	12.51	三和(2)	27.57	花壇(4)	5.99
海園(1)	7.86	六合(2)	36.66	東芳(2)	33.78	全興(4)	65.32
田洋(1)	47.58	國聖(2)	0.96	全興(3)	60.50	虎溪(4)	38.15
潭墘(1)	11.36	崁腳(2)	15.19	虎溪(3)	48.34	好修(4)	46.37
芳草(1)	17.84	花壇(3)	46.75	好修(3)	38.26	合興(3)	19.45
竹塘(1)	126.71	柑園(2)	20.85	溪湖(3)	79.28	東榮(4)	7.57
九隆(1)	46.13	溫厝(2)	2.84	線西(4)	7.33	安和(4)	0.59
合興(1)	146.54	東芳(1)	23.02	合興(2)	19.65	漢寶(4)	13.26
荊桐(1)	80.25	全興(2)	0.98	文昌(4)	44.55	港後(4)	28.26
溪州(1)	52.04	虎溪(2)	19.60	嘉興(3)	27.33	田洋(3)	11.82
虎溪(1)	72.99	溪州(3)	38.36	洛津(3)	37.76	西港(4)	12.40
田尾(1)	84.76	荊桐(2)	29.33	東榮(3)	3.76	東光(5)	21.85
柑園(1)	103.05	好修(2)	51.14	九隆(3)	19.49	海園(4)	28.71
六合(1)	84.96	溪湖(2)	23.05	趙甲(3)	57.88	宜梧(4)	4.99
石榴(1)	23.24	西螺(2)	63.08	港後(3)	30.53	大溝(2)	14.27
田中(1)	48.37	線西(3)	59.32	漢寶(3)	59.26		
烏塗(2)	115.92	虎尾(2)	47.38	芳苑(3)	18.72		
溫厝(1)	28.28	九隆(2)	58.00	宏崙(2)	2.62		

含水層一		含水層二		含水層三		含水層四	
站名	K (m/s)	站名	K (m/s)	站名	K (m/s)	站名	K (m/s)
東和(1)	35.63	嘉興(2)	2.68	北港(2)	43.46		
箔子(1)	17.47	文昌(3)	40.55	興化(3)	63.68		
明德(1)	6.08	洛津(2)	53.95	東光(4)	36.98		
安和(1)	6.45	東榮(2)	2.53	西港(3)	33.45		
宏崙(1)	38.18	竹塘(2)	87.12	安南(2)	31.41		
全興(1)	63.67	趙甲(2)	25.09	水林(2)	10.44		
文昌(1)	19.07	港後(2)	55.17	和豐(2)	19.54		
豐榮(1)	28.39	芳草(2)	54.27	海豐(2)	26.77		
西螺(1)	68.93	漢寶(2)	8.21	瓊埔(2)	30.94		
二水	118.63	潭墘(2)	104.38	海園(3)	14.79		
三和(1)	166.90	芳苑(2)	46.70	明德(4)	4.13		
東光(1)	37.76	元長(2)	17.29	宜梧(3)	16.54		
		豐榮(3)	12.12	箔子(3)	14.08		
		田洋(2)	51.49				
		北港(1)	48.47				
		安和(3)	7.27				
		興化(2)	9.02				
		西港(2)	93.76				
		東光(3)	38.36				
		水林(1)	32.30				
		安南(1)	68.77				
		後安(2)	11.29				
		和豐(1)	23.30				
		海豐(1)	11.22				
		瓊埔(1)	5.49				
		蔡厝(2)	6.52				
		海園(2)	31.01				
		大溝(1)	90.40				
		明德(2)	10.36				
		宜梧(1)	16.91				
		箔子(2)	9.62				

表 4-26 濁水溪沖積扇垂直滲漏係數率定結果

含水層二		含水層三		含水層四	
站名	VL (1/s)	站名	VL (1/s)	站名	VL (1/s)
六合(2)	0.01110	石榴(3)	0.00068	田中(2)	0.03257
漢寶(2)	0.00019	線西(4)	0.00030	花壇(4)	0.00088

含水層二		含水層三		含水層四	
站名	VL (1/s)	站名	VL (1/s)	站名	VL (1/s)
文昌(3)	0.00021	趙甲(3)	0.00030	漢寶(4)	0.00149
好修(2)	0.00046	文昌(4)	0.00294	港後(4)	0.00005
線西(3)	0.00003	洛津(3)	0.00171	合興(3)	0.00019
東芳(1)	0.00094	溪湖(3)	0.00039	好修(4)	0.00005
花壇(3)	0.00004	東芳(2)	0.00580	田尾(2)	0.00007
溪州(3)	0.02373	國聖(3)	0.00054	虎溪(4)	0.00138
芳苑(2)	0.00084	芳苑(3)	0.00481	海園(4)	0.00001
潭墘(2)	0.00031	海園(3)	0.00041	宜梧(4)	0.00005
竹塘(2)	0.00062	和豐(2)	0.00060	大溝(2)	0.00005
溪湖(2)	0.00139	興化(3)	0.00429	田洋(3)	0.00010
海園(2)	0.00090	西港(3)	0.00481	安和(4)	0.00014
海豐(1)	0.00010	港後(3)	0.00540	東榮(4)	0.00014
後安(2)	0.00031	合興(2)	0.00006	全興(4)	0.00123
安南(1)	0.00004	虎溪(3)	0.00013	西港(4)	0.00005
興化(2)	0.00022	東榮(3)	0.00054	東和(3)	0.00001
田洋(2)	0.00015	嘉興(3)	0.00005	東光(5)	0.00104
豐榮(3)	0.00035	箔子(3)	0.00278		
芳草(2)	0.00016	宜梧(3)	0.00170		
港後(2)	0.00235	明德(4)	0.00214		
虎尾(2)	0.00151	瓊埔(2)	0.00004		
西螺(2)	0.01239	水林(2)	0.00203		
荊桐(2)	0.01442	安南(2)	0.00049		
虎溪(2)	0.01924	北港(2)	0.00019		
柑園(2)	0.01535	宏崙(2)	0.00032		
東和(2)	0.01008	全興(3)	0.00481		
石榴(2)	0.00038	員林(4)	0.00540		
溫厝(2)	0.00235	好修(3)	0.00140		
古坑(1)	0.00111	漢寶(3)	0.00481		
嘉興(2)	0.00001	海豐(2)	0.00039		
箔子(2)	0.00055	九隆(3)	0.00033		
宜梧(1)	0.00122	三和(2)	0.00054		
明德(2)	0.00014	東光(4)	0.00079		
瓊埔(1)	0.00022				
大溝(1)	0.00036				
蔡厝(2)	0.00009				
東光(3)	0.00016				
北港(1)	0.00012				
安和(3)	0.00009				
元長(2)	0.00060				
全興(2)	0.00001				

含水層二		含水層三		含水層四	
站名	VL (1/s)	站名	VL (1/s)	站名	VL (1/s)
洛津(2)	0.00007				
國聖(2)	0.00009				
員林(3)	0.00033				
趙甲(2)	0.00003				
西港(2)	0.00002				
和豐(1)	0.00044				
九隆(2)	0.00078				
炭腳(2)	0.00111				
東榮(2)	0.00009				
水林(1)	0.00021				

經由模式計算所得到之各項地下水水量如表 4-27 所示，其模式所計算河床入滲量與河床出滲量皆較蓄水量歷線分析之計算結果(表 4-14)小，然而若將河床入滲量與河床出滲量相減，其模式計算結果與蓄水量歷線分析結果相近，其原因為本研究建立之模式其時間距具為月，而蓄水量歷線分析之時間間距為日，月模式間無法捕捉日模式中較細微的每日河水與地下水之交換量，因此總量體會較小，然而其差異量於日模式與月模式中則會相同，因此本模式所模擬之河水與地下水交換量尚屬合理。

表 4-27 率定完成之濁水溪沖積扇地下水流數值模式水平衡計算結果

	區外地下水流入量	隘口地下水流入量	地面水補注量	河床入滲量	總抽水量	蓄水變化量	河床出滲量
2012	8.80	0.86	13.98	3.71	23.25	2.47	1.62
2013	8.20	0.83	12.66	3.50	23.19	0.42	1.58
2014	8.37	0.87	10.79	2.24	23.83	-2.66	1.09
平均	8.46	0.85	12.48	3.15	23.42	0.08	1.43

單位：億噸

將率定完成之濁水溪沖積扇地下水流數值模式所模擬之地下水位與觀測水位各別計算 RMSE 值，並依照含水層分層繪製等值線圖，如圖 4-42 所示，由圖中可看出含水層(一)之地下水位模擬結果為最好，大部分觀測站之 RMSE 在 1 m 以下，甚至接近於 0.1 m，僅有少數幾個觀測站之 RMSE 大於 1 m，而含水層(二)至含水層(四)之模擬結果普遍較含水層(一)差，其原因為深層含水層之水文地質架構之不

確定性較高，且儲水係數相當小，微小的補注量或抽水量便會對地下水位造成影響，其地下水位變化相當敏感難以準確模擬，然而整體而言含水層(二)至含水層(四)之模擬結果能夠捕捉到地下水位變化之趨勢，其率定結果亦屬良好，僅有部分測站之模擬結果較差。此外含水層(一)之 RMSE 較大之區域主要分布於扇頂與部分扇尾，其原因為扇頂之補注量與邊界地下水流入量較大，其模擬上之難度較高。含水層(二)與含水層(四)其地下水位模擬結果於扇頂部分皆較扇尾之部分佳，然而於含水層(三)則為扇尾部分模擬結果較扇頂之部分佳。

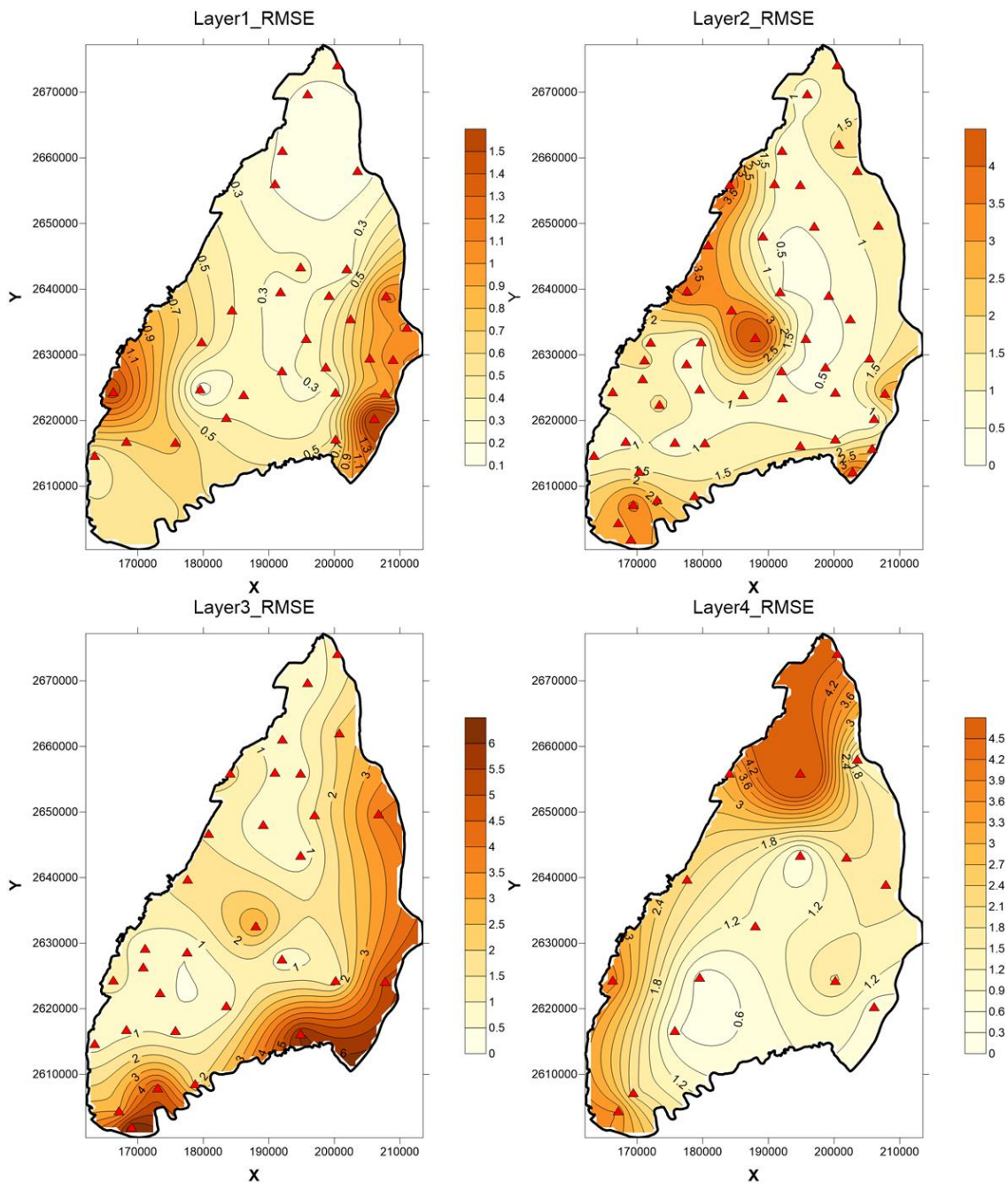


圖 4-42 率定完成之濁水溪沖積扇模式地下水流模式模擬地下水位之分層 RMSE 值

於地下水位歷線模擬結果上，因濁水溪沖積扇地下水位觀測站眾多，因此僅取部分觀測井展現其模擬結果，主要以於各個含水層皆有進行觀測之同一位置觀測井為主，如東光、虎溪、箔子、明德、東和、合興等，茲將該六個地下水位測站共 20 筆地下水位觀測資料之率定結果呈現如下：

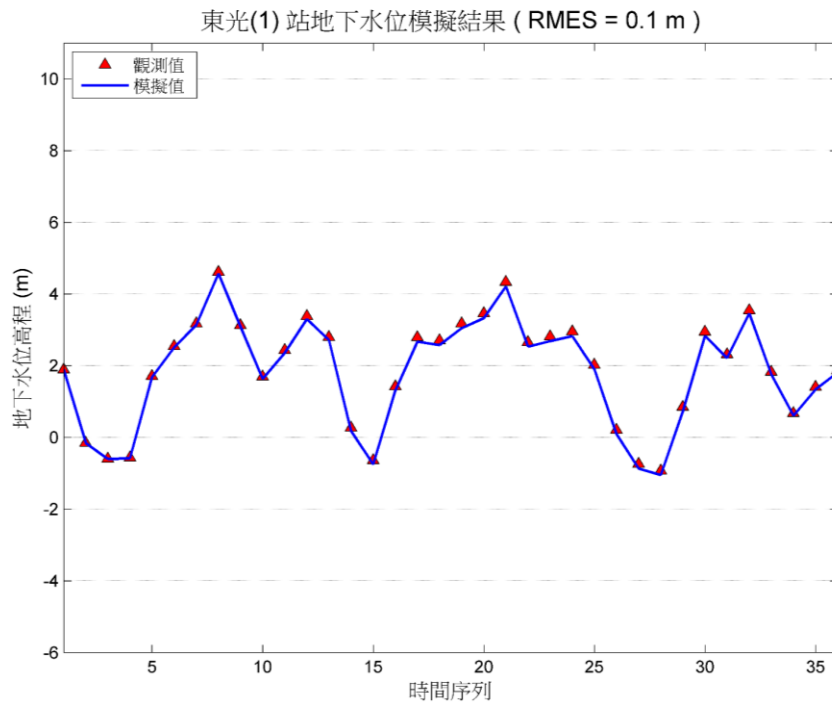
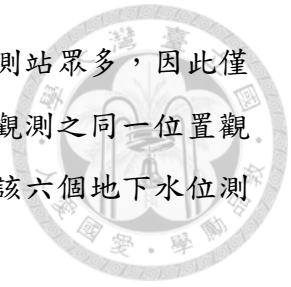


圖 4-43 東光(1)站地下水位模擬結果(含水層一)

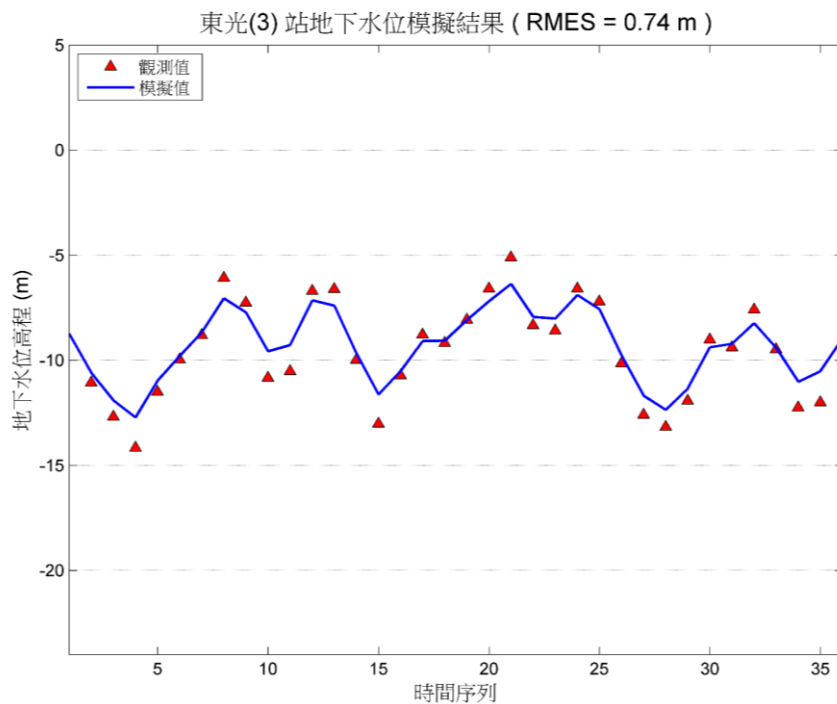


圖 4-44 東光(3)站地下水位模擬結果(含水層二)

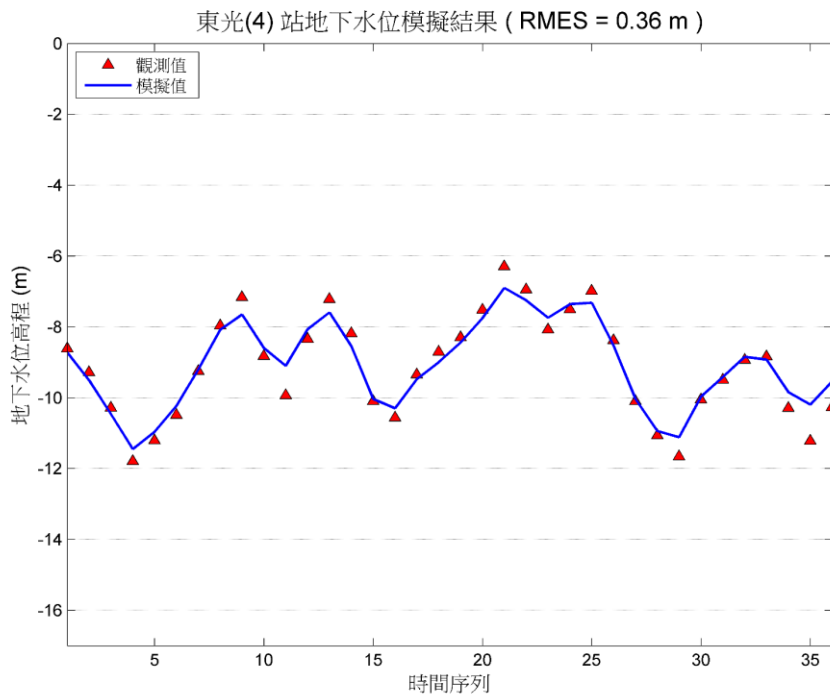
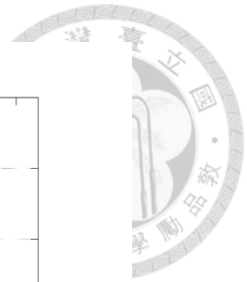


圖 4-45 東光(4)站地下水位模擬結果(含水層三)

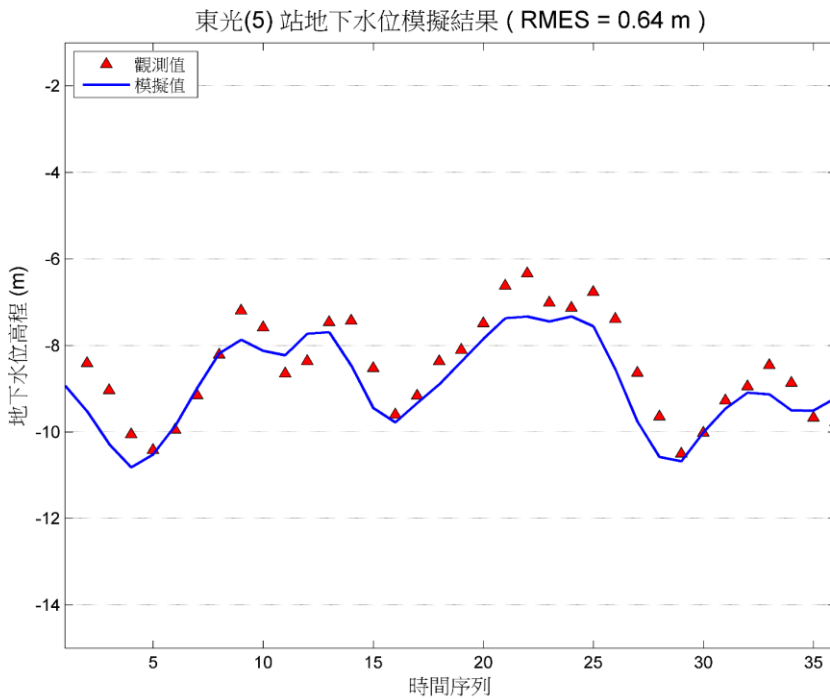


圖 4-46 東光(5)站地下水位模擬結果(含水層三)

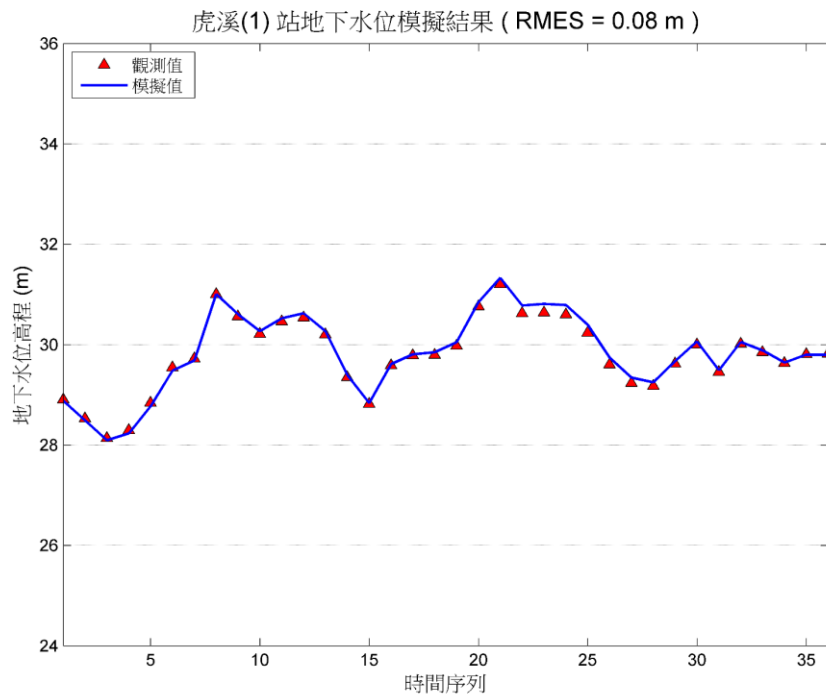


圖 4-47 虎溪(1)站地下水位模擬結果(含水層一)

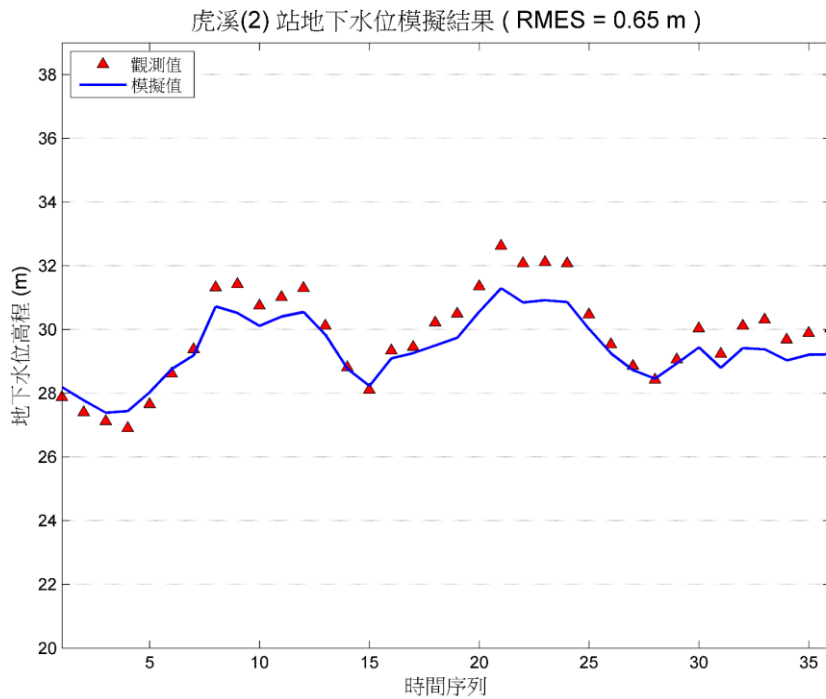


圖 4-48 虎溪(2)站地下水位模擬結果(含水層二)

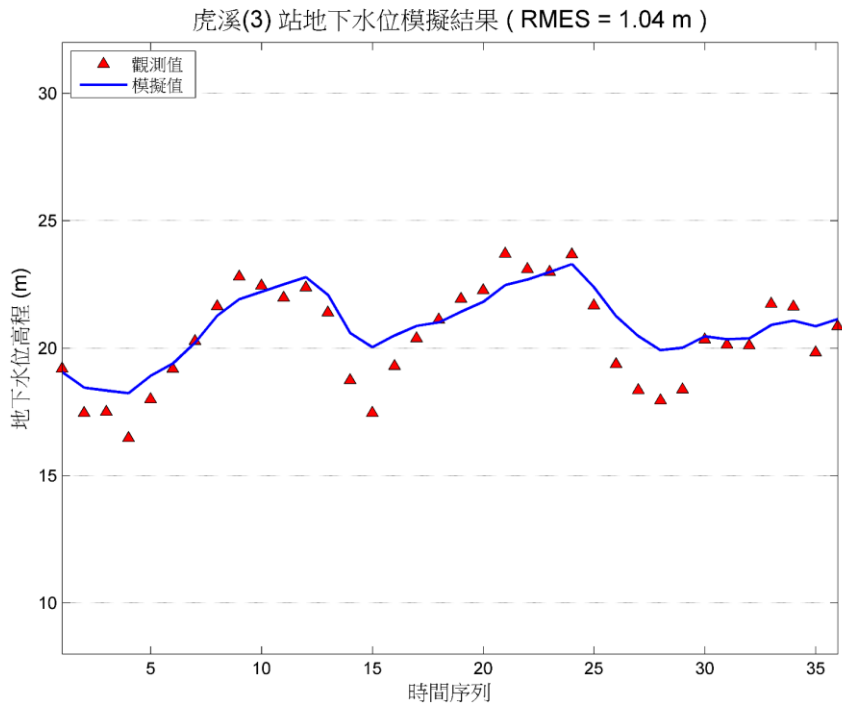


圖 4-49 虎溪(3)站地下水位模擬結果(含水層三)

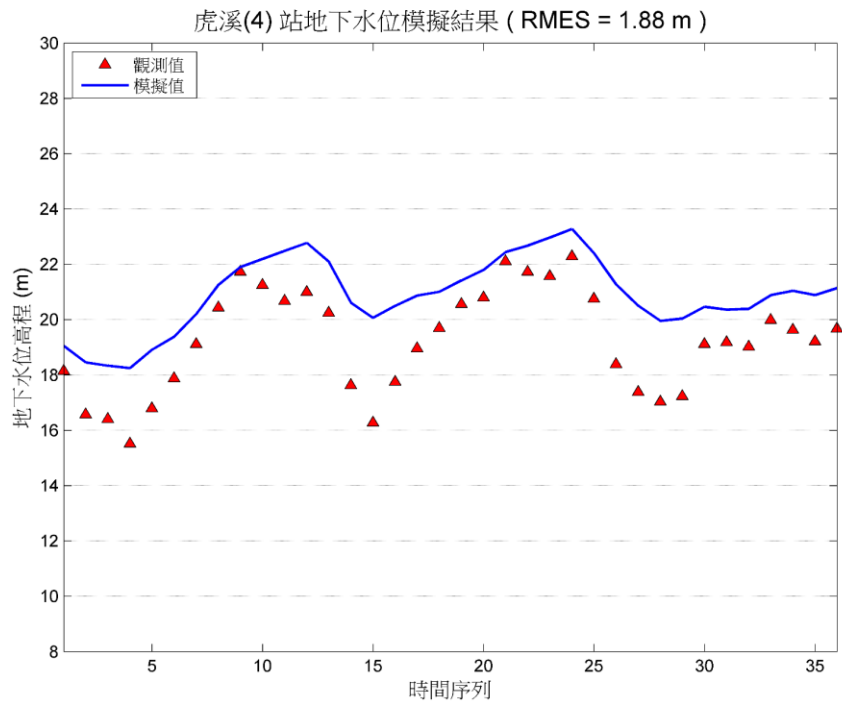


圖 4-50 虎溪(4)站地下水位模擬結果(含水層四)

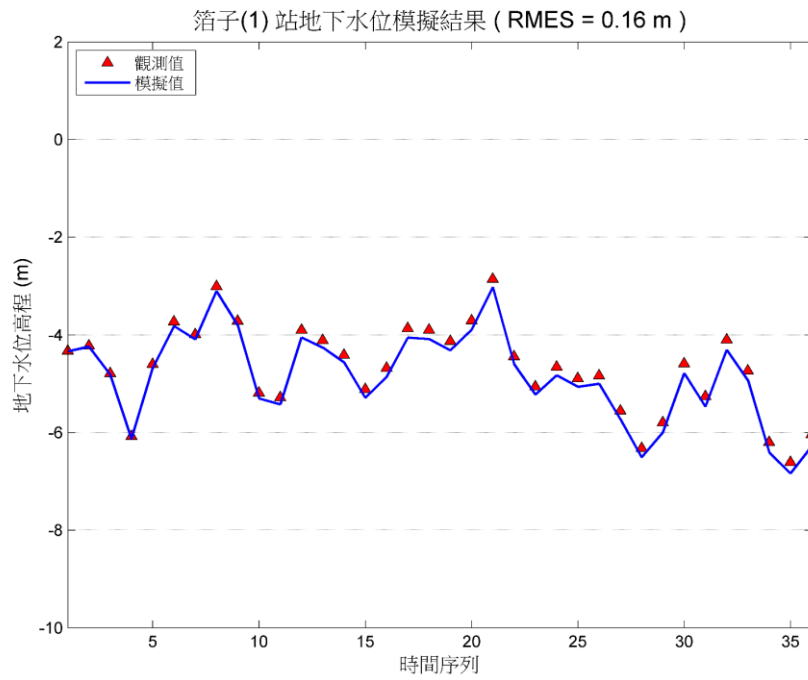


圖 4-51 箔子(1)站地下水位模擬結果(含水層一)

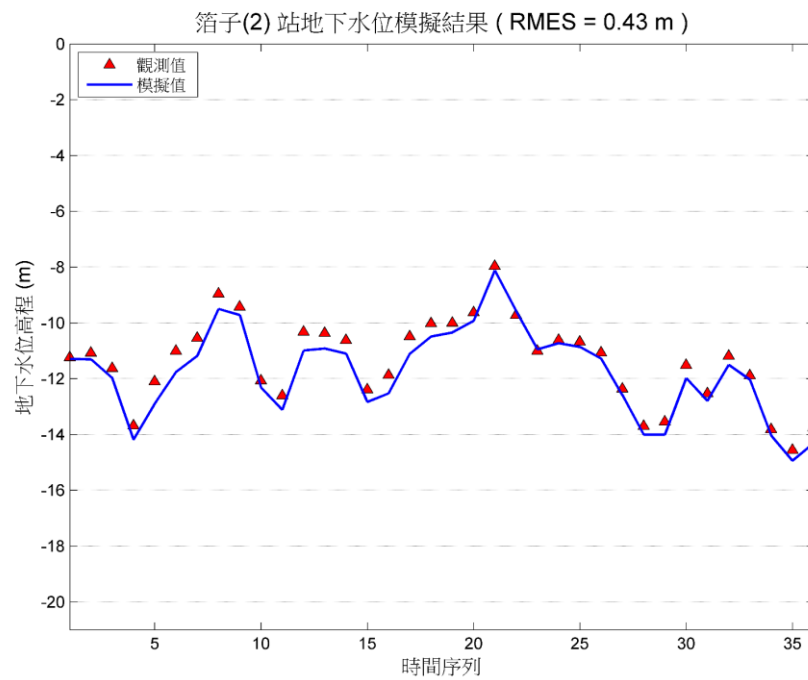


圖 4-52 箔子(2)站地下水位模擬結果(含水層二)

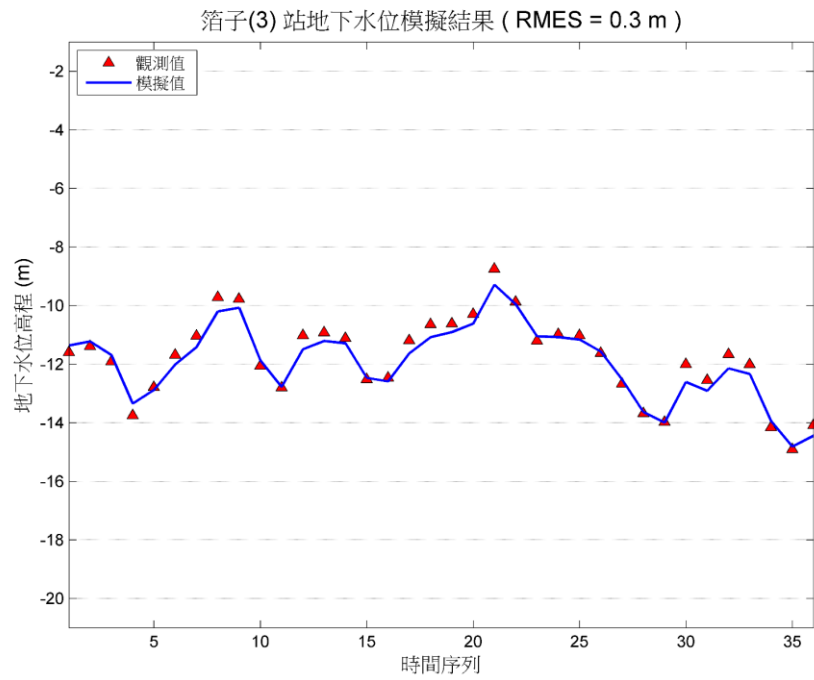
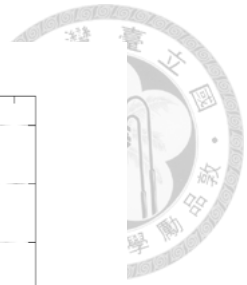


圖 4-53 箔子(3)站地下水位模擬結果(含水層三)

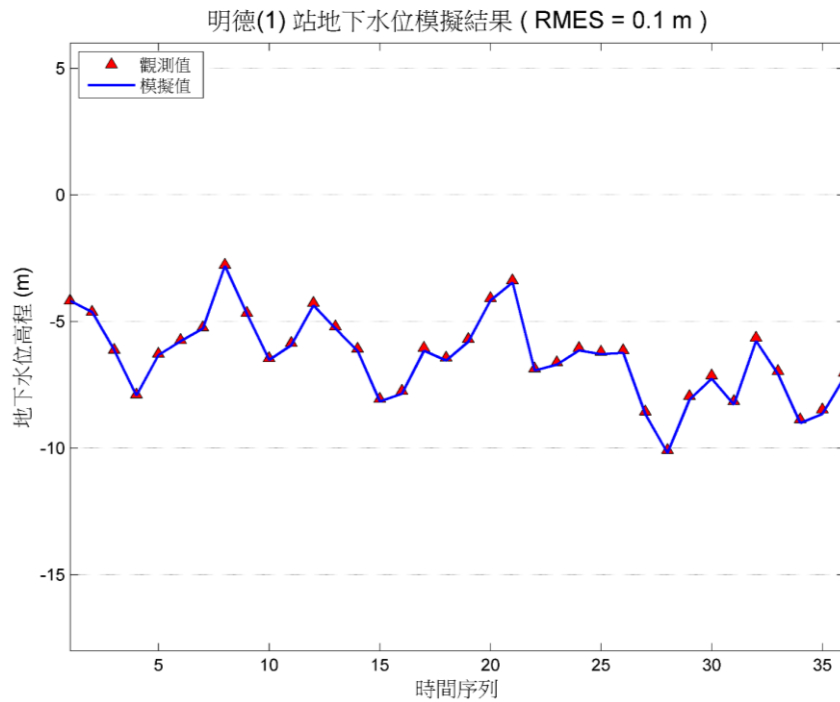


圖 4-54 明德(1)站地下水位模擬結果(含水層一)

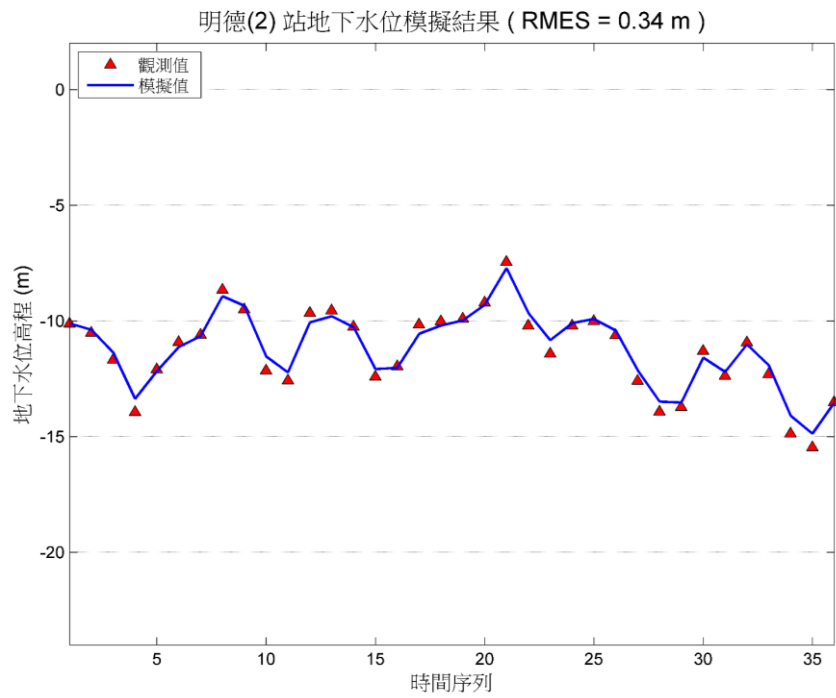
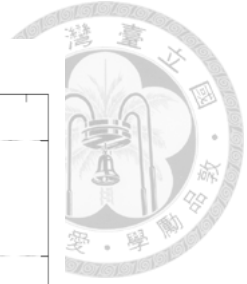


圖 4-55 明德(2)站地下水位模擬結果(含水層二)

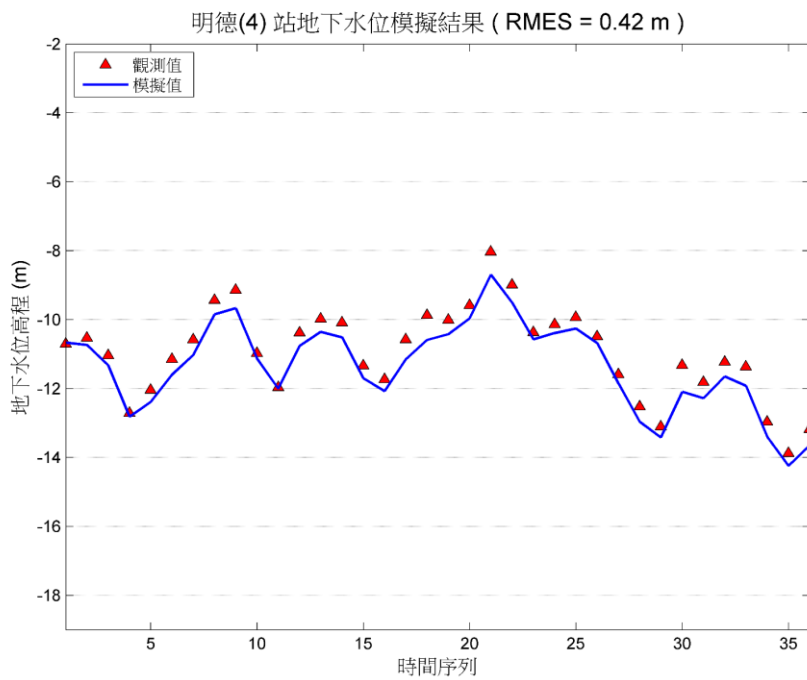


圖 4-56 明德(4)站地下水位模擬結果(含水層三)

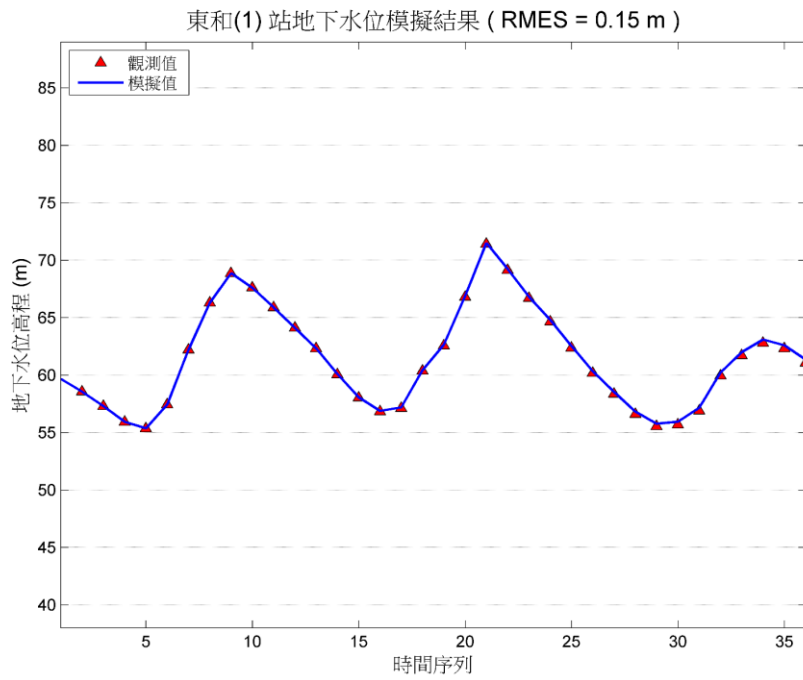
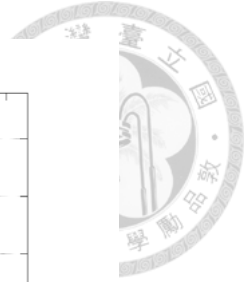


圖 4-57 東和(1)站地下水位模擬結果(含水層一)

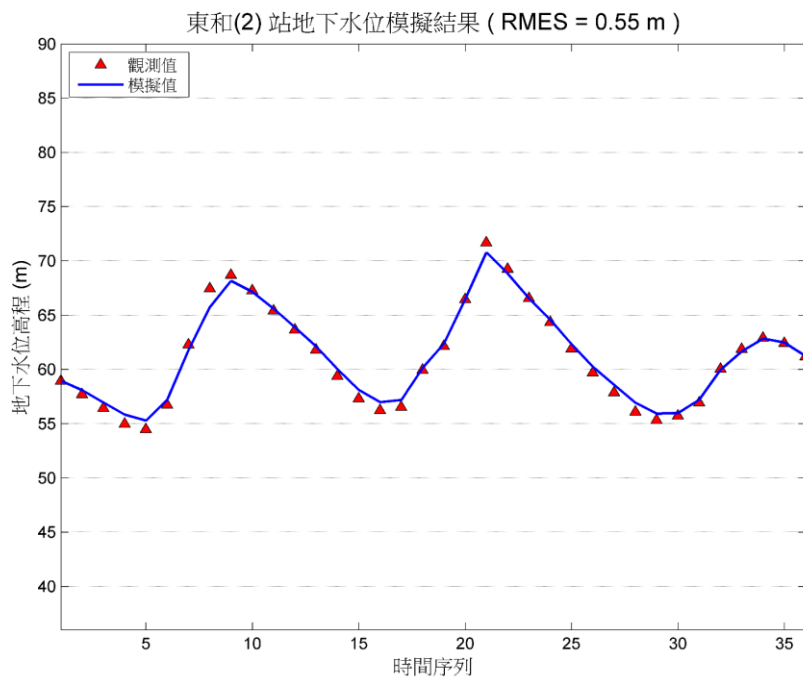


圖 4-58 東和(2)站地下水位模擬結果(含水層二)

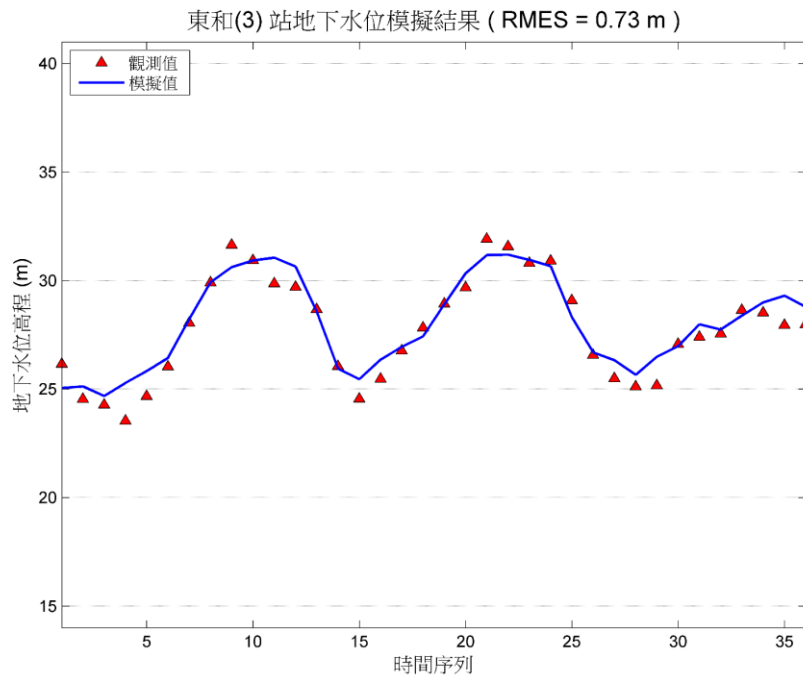


圖 4-59 東和(3)站地下水位模擬結果(含水層四)

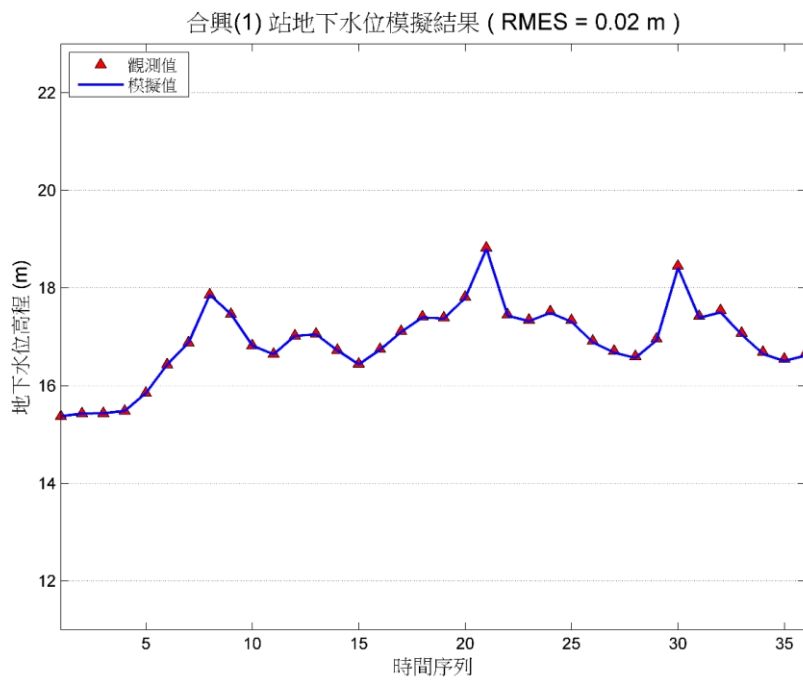


圖 4-60 合興(1)站地下水位模擬結果(含水層一)

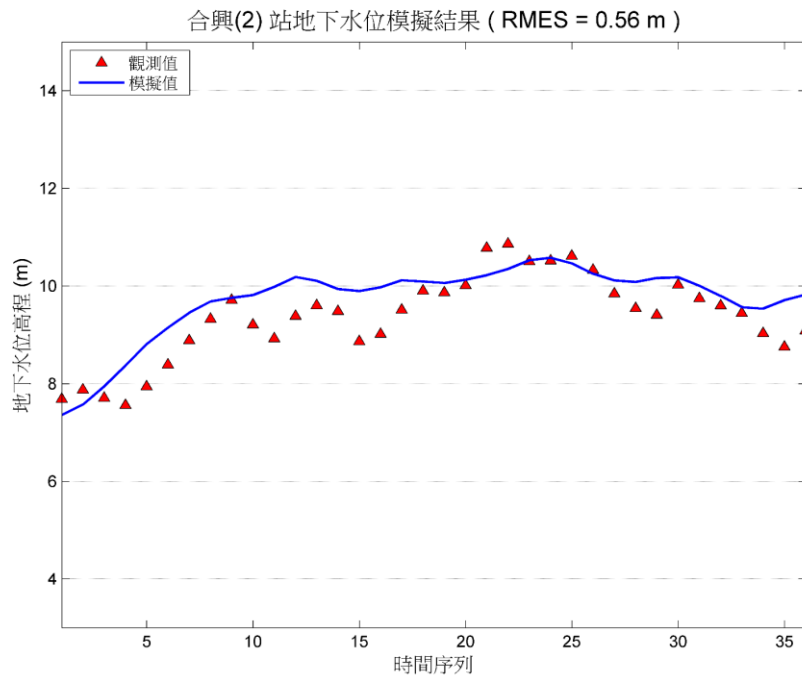


圖 4-61 合興(2)站地下水位模擬結果(含水層三)

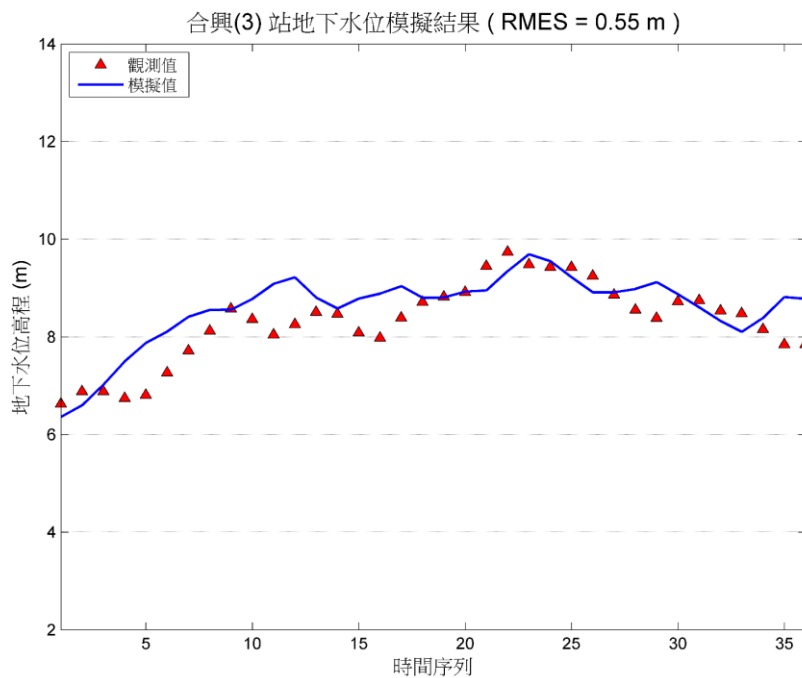


圖 4-62 合興(1)站地下水位模擬結果(含水層四)

第五章 結論與建議

本研究為建立區域性地下水系統之率定方法，並將其應用於濁水溪沖積扇之地下水流模式中，根據本研究過程與結果得到幾點結論與建議，茲將結論與建議



分別敘述如下：

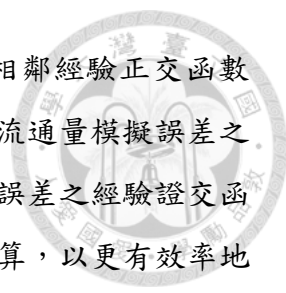
5.1 結論

本研究之結論如下：

1. 本研究應用經驗正交函數法結合地下水流模式模擬，建立一區域性地下水流模式之參數率定優選模式，以迭代方法進行求解，能夠進行龐大複雜多含水層地下水系統中，地面水補注量、水平水力傳導係數以及垂直滲漏係數之高效率求解。
2. 本研究將所建立之率定方法應用於濁水溪沖積扇地下水系統，其地下水系統中具有四個含水層，共有 126 個水平水力傳導係數、96 個垂直滲漏係數以及 1080 個地面水補注量之時間空間分布變數需進行求解。其結果顯示迭代過程中可藉由主成分分析釐清地下水流模擬誤差之原因及影響量，以快速優選得到大量地面水補注量變數及水文地質參數之最佳解，有效優化地下水位之擬合結果。
3. 本研究於濁水溪沖積扇水平水力傳導係數與垂直滲漏係數之初始設定上採用現地抽水試驗資料，並配合概念分層之含水層厚度進行計算。其參數率定結果顯示率定完成之水平水力傳導係數與垂直滲漏係數大多與現地試驗資料差異在一個量級以內，僅有少部分參數達到率定修正量之上限值。
4. 濁水溪沖積扇地下水系統之率定結果顯示，其含水層(一)之地下水蓄水量平均模擬誤差百分比為 0.11%，含水層(二)至含水層(四)在水文地質架構與不確定因素較高之情況下，平均模擬誤差百分比分別為 23.58%、28.99% 以及 29.55%，稍較含水層(一)為高，但由於含水層(二)至含水層(四)為侷限含水層，其地下水儲水係數相當小，誤差所代表之蓄水量並不大。
5. 本研究於地下水流模式中導入河流演算套件，以一個月為模擬時間間隔模擬濁水溪每月河水與地下水間之交換量，其地下水流模式模擬結果顯示河床入滲補注量與地下水出滲量將較於由觀測之地下水蓄水量歷線進行水平衡分析所得到之結果有低估之趨勢，但是其河床入滲補注量減去地下水出滲量所得之河水入滲淨補注量與觀測之地下水蓄水量歷線進行水平衡分析所得到之結果相近。

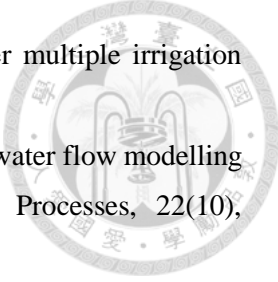
5.2 建議

本研究之建議如下所述：

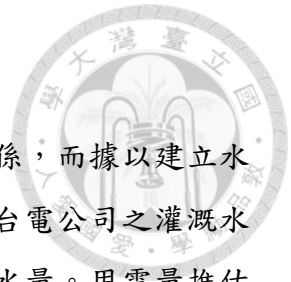
- 
1. 本研究於計算率定參數修正量時為採用蓄水量誤差歷線之相鄰經驗正交函數進行計算，其中可能包含並非影響地面水補注量模擬誤差或流通量模擬誤差之因素，建議未來可深入探討影響地下水收支變數及參數率定誤差之經驗證交函數，僅取出影響該模擬誤差之經驗正交函數進行修正量之計算，以更有效率地迭代求解得到大量變數與參數之最佳解。
 2. 本研究於計算垂直滲漏係數之修正量時尚未考慮垂直相鄰含水層間地下水位模擬誤差之聯動關係，其率定結果有部分參數達到修正量之上限值，建議未來可進一步分析此聯動關係，進行垂直滲漏係數修正量之計算，以更有效地率定垂直滲漏係數。
 3. 濁水溪沖積扇之地下水位觀測井總量雖屬眾多，但其觀測井控制點於不同含水層之空間分布不同且不平均，因此各層觀測井所劃分之控制區域於不同含水層有所差異，導致各層間地下水之交換量難以正確捕捉，建議濁水溪沖積扇可增加同一位置不同含水層之地下水位時空量測頻率，以更精準掌握各含水層間之地下水交換及流動情形。
 4. 本研究所建立之地下水流數值模式為以一個月為時間間距進行模擬，其模擬結果難以捕捉計算每日地面水與地下水之交換量體，容易具有偏估之趨勢，建議未來可以一日為時間間距進行模擬，以準確捕捉地面水與地下水之交換量變化趨勢。

參考文獻

1. 經濟部中央地質調查所，「濁水溪中游地區地下水補注調查與評估」，1996。
2. 經濟部中央地質調查所，「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總報告」，經濟部水資源局委託計畫報告，1999。
3. 江崇榮、陳瑞娥、賴慈華、黃智昭，「濁水溪沖積扇地下水區之補注水源評估」，第二屆資源工程研討會，第 86-91 頁，2005。
4. 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。
5. 中興工程顧問股份有限公司，「濁水溪沖積扇地面地下水聯合運用管理模式建立與機制評估」，經濟部水利署中區水資源局委託計畫報告，2007。
6. 謝堉煌、陳忠偉、葉信富、李振誥，「應用河道水位變化評估新虎尾溪地下水補注量之研究」，農業工程學報，第 53 卷第 2 期，第 50-60 頁，2007。
7. 經濟部水利署，「雲林內陸地層下陷地區地下水抽水機制之探討與評估期末報告」，2011。
8. 王韋勳，「名竹盆地地下水流數值模式之建立與應用」，2012。
9. 林聖婷，「濁水溪沖積扇補注量與抽水量空間分佈模式建立」，2012。
10. 經濟部水利署，「經濟部水利署水文水資源資料管理供應系統」網站，2012，
<http://gweb.wra.gov.tw/wrweb/>。
11. 經濟部中央地質調查所，「地下水補注地質敏感區畫定計畫書」，2014。
12. 徐年盛、黃建霖、劉宏仁、李冠緯，「地下水抽補量與參數時空分布率定之方法建立與數值實驗驗證」，農業工程學報，第 61 卷第 3 期，第 1-28 頁，2015。
13. 行政院農業委員會，「提升灌溉用水效率策略規劃與優化灌溉管理決策輔助機制」，2015。
14. Arnold, J. G., Mutiah, R. S., Srinivasan, R., and Allen, P. M. (2000). Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, 227(1-4), 21-40.
15. Hannachi, A., Jolliffe, I. T., and Stephenson, D. B. (2007). Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology*, 27(9), 1119-1152.
16. Healy, R. W., and Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91-109.
17. Hsu, N. S., Chiang, C. J., Wang, C. H., Liu, C. W., Huang, C. L., and Liu, H. J. (2013).

- 
- Estimation of pumpage and recharge in alluvial fan topography under multiple irrigation practices. *Journal of Hydrology*, 479, 35-50.
18. Igboekwe, M. U., Rao, V. V. S. G., and Okwueze, E. E. (2008). Groundwater flow modelling of Kwa Ibo River watershed, southeastern Nigeria. *Hydrological Processes*, 22(10), 1523-1531.
 19. Lee, C. H., Yeh, H. F., and Chen, J. F. (2008). Estimation of groundwater recharge using the soil moisture budget method and the base-flow model. *Environmental Geology*, 54(8), 1787-1797.
 20. Martinez-Santos, P., and Martinez-Alfaro, P. E. (2010). Estimating groundwater withdrawals in areas of intensive agricultural pumping in central Spain. *Agricultural Water Management*, 98(1), 172-181.
 21. Moon, S. K., Woo, N. C., and Lee, K. S. (2004). Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 292(1-4), 198-209.
 22. Munoz, B., Lesser, V. M., and Ramsey, F. L. (2008). Design-based empirical orthogonal function model for environmental monitoring data analysis. *Environmetrics*, 19(8), 805-817.
 23. Takounjou, A. F., Rao, V. V. G. S., Ngoupayou, J. N., Nkamdjou, L. S., and Ekodeck, G. E. (2009). Groundwater flow modelling in the upper Anga'a river watershed, Yaounde, Cameroon. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 3(10), 341-352.
 24. Yu, H. L., and Lin, Y. C. (2015). Analysis of space-time non-stationary patterns of rainfall-groundwater interactions by integrating empirical orthogonal function and cross wavelet transform methods. *Journal of Hydrology*, 525, 585-597.
 25. Yu, H. L., and Chu, H. J. (2010). Understanding space-time patterns of groundwater system by empirical orthogonal functions: A case study in the Choshui River alluvial fan, Taiwan. *Journal of Hydrology*, 381(3-4), 239-247.

附錄一 用電量推估法



用電量推估法為推求水井基本特性與用電量、抽水量之關係，而據以建立水井用電量與抽水量之轉換關係模式，故於模式確立後若可掌握台電公司之灌溉水井用電量及水井特性資料，即可推估特定時間與空間之灌溉抽水量。用電量推估濁水溪沖積扇抽水量之方法流程如圖 A-1 所示，其分為用電量推估模式建立與用電量推估模式應用兩部分，茲分別說明如下。

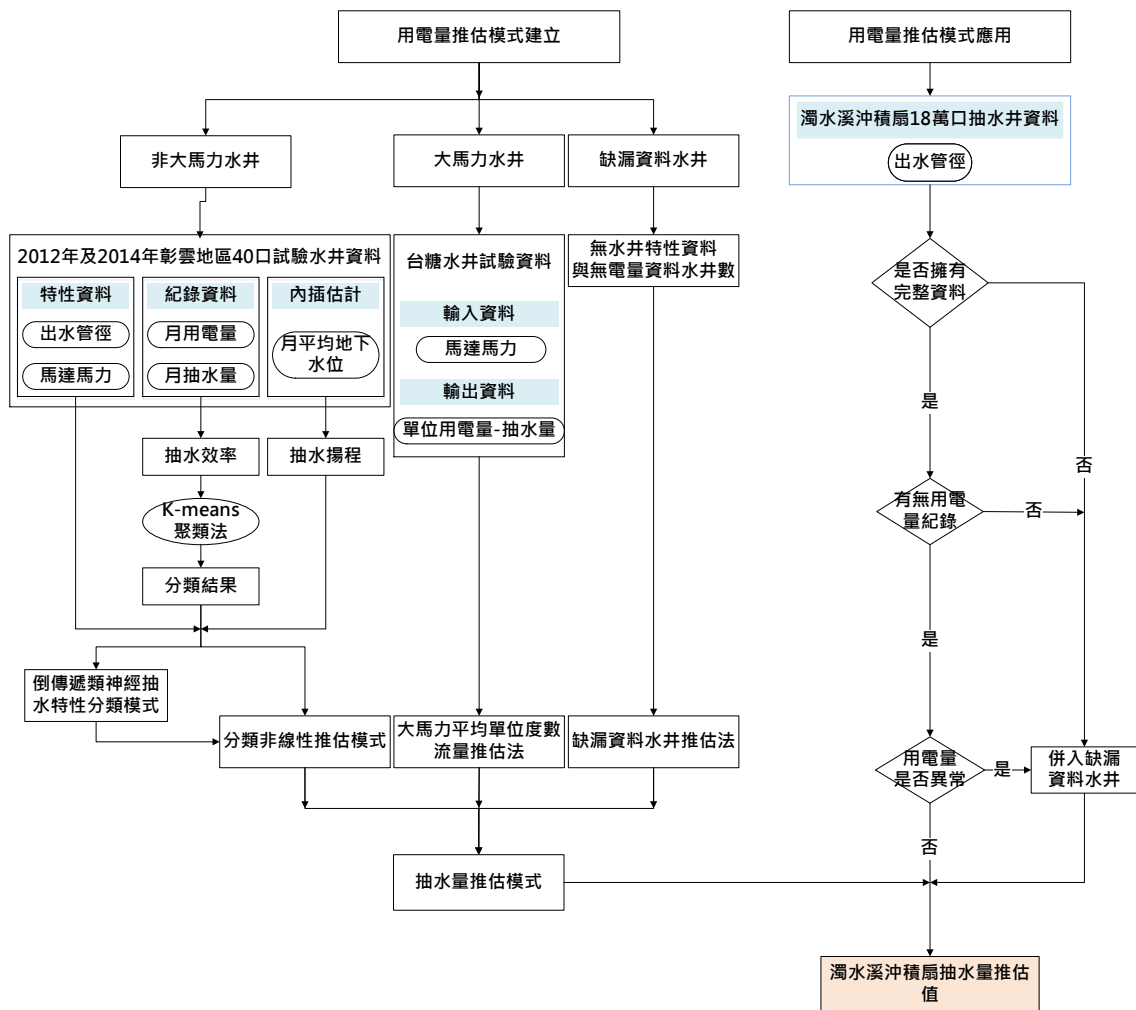
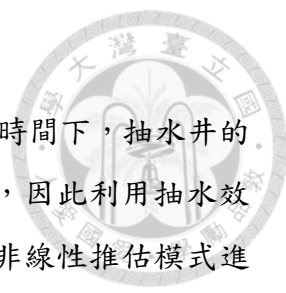


圖 A-1 用電量推估濁水溪沖積扇抽水量之方法流程圖

1. 用電量推估模式建立

本研究將抽水井分為「非大馬力水井」、「大馬力水井」以及「缺漏資料水井」三大類，分別採用不同之抽水量推估方法推算三類水井之抽水量，以下茲針對三種水井類別，就其抽水量推估方法模式及應用結果分別說明。



(1) 非大馬力水井

非大馬力水井為馬達馬力小於 7.5HP 之抽水井，考慮在不同時間下，抽水井的地下水水位與抽水馬達之不穩定性可能會導致抽水效率的差異，因此利用抽水效率先進行抽水資料之分類、再依照不同分類分別帶入該分類之非線性推估模式進行抽水量之推估，使抽水量之推估更為準確，流程圖如圖 A-2 所示。

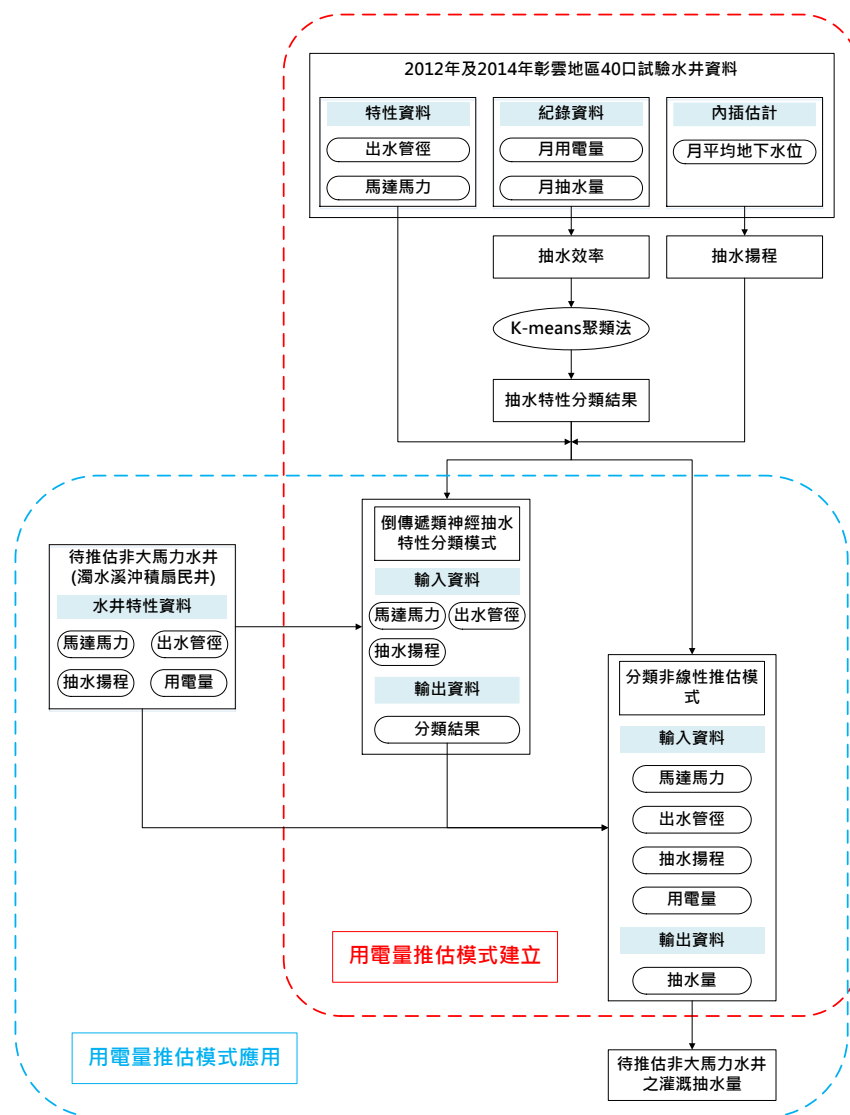


圖 A-2 非大馬力水井之抽水量推估流程圖

根據行政院農委會 2012 年與 2014 年裝設於彰化與雲林地區內共 40 口試驗抽水井之電子水表與電子電表紀錄，計算抽水效率並進行分類，再分別建立分類非線性推估模式以及倒傳遞類神經抽水特性分類模式，將適用範圍內之濁水溪沖積扇 18 萬餘口抽水井之資料先以倒傳遞類神經抽水特性分類模式進行分類，以分類結果分別應用於該類別之分類非線性推估模式，估算非大馬力水井之抽水量，過



程中也包含抽水井地下水位之內插估計以及抽水揚程之估算。茲將非大馬力水井之推估模式建立分為抽水揚程之估算與修正、抽水效率之分類、分類非線性推估模式之建立、倒傳遞類神經抽水特性分類模式，詳述如下。

A. 抽水揚程之估算

抽水揚程之定義為抽水機將水體由地下水水面抽至地表之高程差，假設抽水過程中可忽略能量損失。在計算抽水揚程前必須先取得地下水位高程，然而抽水井之地點並無觀測井，無法直接取得地下水位高程，因此去年本團隊使用抽水井附近距離最近之三個觀測井地下水位觀測值，以距離平方的反比為權重，內插抽水井之地下水位高程。圖 A-3 抽水井與鄰近觀測井之相對位置示意圖為抽水井與三口鄰近地下水位觀測井之相對位置示意圖，而根據圖 A-3 抽水井與鄰近觀測井之相對位置示意圖所得抽水井位置之地下水位高程可表示如下式。

$$H_{well} = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{1/d_i^2}{1/d_1^2 + 1/d_2^2 + 1/d_3^2} \times H_i \right) \quad (A.1)$$

上式中， H_{well} 為內插之抽水井地下水位， d_i 為第 i 個觀測井與抽水井之距離， H_i 為第 i 個觀測井之地下水位高程。

考量實際上抽水井在抽水時會造成地下水位的洩降，如圖 A-4 所示，因此在計算抽水揚程時應再減去抽水所造成之地下水位洩降以貼近現實情況，本研究參考 Bear(1979)所提出之非拘限含水層的抽水洩降公式來計算抽水井所造成的地下水位洩降，如式(A.2)所示

$$s' = \frac{Q_w}{4\pi T} W \left(\frac{r^2 S'}{4Tt} \right) \quad (A.2)$$

上式中， $s' = s - \frac{s^2}{2H_0}$ ； $S' = \frac{SH_0}{(H_0 - s)}$ ； s 為抽水洩降； Q_w 為抽水量； $T = KH_0$

為導水係數； r 為抽水井半徑； S 為儲水係數； H_0 為飽和含水層厚度。

假設抽水時所造成之抽水洩降遠小於飽和含水層厚度 ($s \ll 0.02H_0$)，則式(A.2)可簡化為式(A.3)。

$$s = \frac{Q_w}{4\pi T} W \left(\frac{r^2 S}{4Tt} \right) \quad (A.3)$$

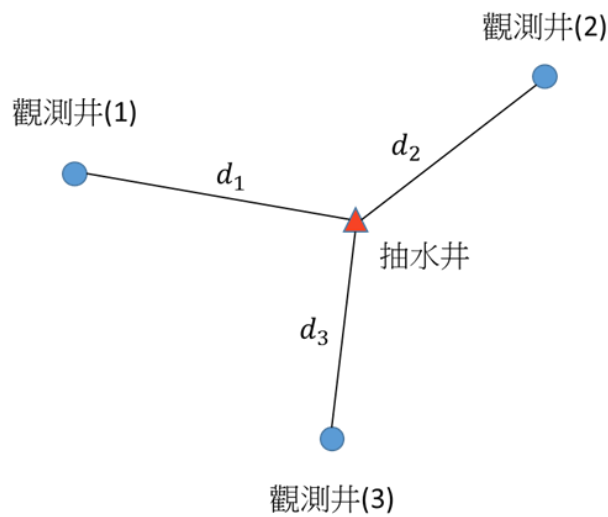


圖 A-3 抽水井與鄰近觀測井之相對位置示意圖

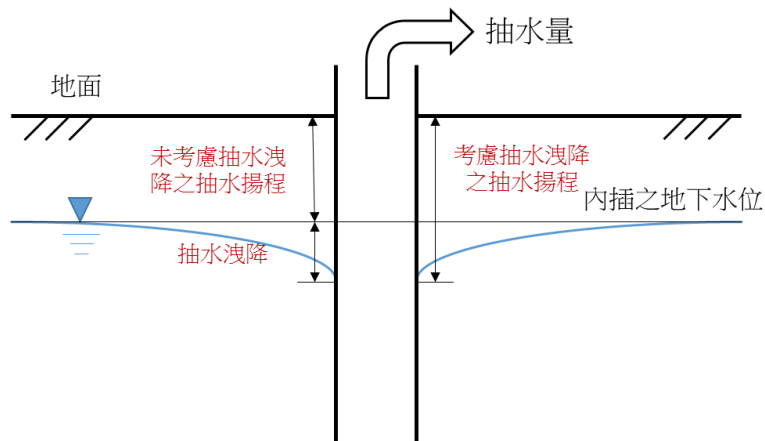


圖 A-4 抽水洩降示意圖

將試驗井地表高程減掉內插地下水位高程再減掉計算得到之抽水洩降便可得到考慮抽水洩降之抽水揚程。然而在計算抽水洩降時需要抽水量資料，但待推估水井之抽水量為待推估數值，因此先以未考慮抽水洩降之揚程來推估抽水量，再以推估所得之抽水量重新計算考慮抽水洩降之抽水揚程，重新推估抽水量。

B. 抽水效率之分類

將 2012 年與 2014 年於彰化與雲林地區共 40 口試驗抽水井之每抽水效率(Pumping Efficiency, PE)進行分類，抽水效率之定義如下：

$$PE = \frac{Q}{\Delta W} \quad (A.4)$$



上式中， Q 為抽水量； ΔW 為用電量。

抽水效率之分類方法採用 MacQueen(1967)所提出之 K-means 聚類法進行分類，K-means 聚類法之目的為將 n 個資料點劃分至 k 個聚類中，使得每個資料點都屬於離他最近之均值(即聚類中心)對應的聚類，以此作為聚類的標準，其目標函數為使各分類中之資料點與該聚類中心距離平方合為最小，即：

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - \mu_i\|^2 \quad (\text{A.5})$$

在進行聚類分析之前須先給定分類數目 k ，聚類過程中模式會依據分類數目來搜尋使目標函數值為最小值之 k 個決策變數 μ_i ，隨著分類數目 k 的增加，其分類結果之目標函數值也會隨之降低，相對的各分類之資料數也會減少，由於在完成抽水效率分類後尚須進行分類非線性推估模式之參數檢定，為了使參數檢定之結果具有代表性，因此本團隊以各分類之資料數不低於 30 筆，做為決定分類數目 k 之依據。

本研究利用 Matlab(2013a)程式之內建函式進行 2012 年與 2014 年於彰化與雲林地區內共 40 口試驗抽水井月抽水效率之 K-means 聚類分析，其分類結果如表 A-1 所示，抽水量與用電量分布如圖 A-5 所示。

表 A-1 2012 年與 2014 年試驗抽水井月抽水效率分類結果

分類	資料筆數	抽水效率(噸/度)
1	46	13.47 ~ 19.82
2	52	9.66 ~ 13.47
3	83	5.88 ~ 9.66
4	75	0.21 ~ 5.88
總和	256	-

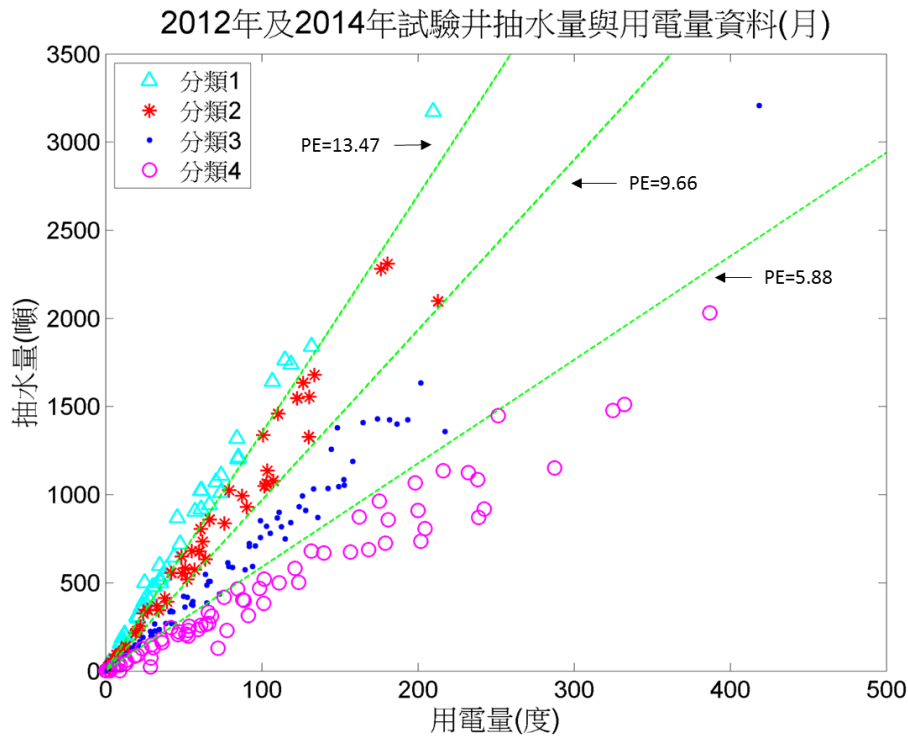
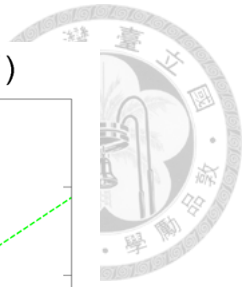


圖 A-5 2012 與 2014 年試驗井用電量與抽水量分布圖

C. 分類之抽水量非線性推估模式

本研究建立之非線性推估模式公式如所示，考量到後續推估濁水溪沖積扇抽水井之抽水量時，所採用之用電量資料為月總計資料，因此以月為單位作為時間間距，以符合後續推估濁水溪沖積扇抽水量資料之合理性。限制參數 b, c, d 之值須大於等於 0.01，即可建立非線性推估模式參數檢定之優選模式，其目標函數與限制式如下所示：

$$\text{目標函數：} \quad \underset{a, b, c, d}{\text{Min}} \sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2 \quad (\text{A.6})$$

$$\text{目標函數：} \quad \hat{Q}_i = a \cdot \frac{P^b \cdot D^c}{L_i^d} \cdot \Delta W_i, i = 1, 2, n \quad (\text{A.7})$$

$$b, c, d \geq 0.01 \quad (\text{A.8})$$

上諸式中， Q_i 為第 i 月之水井抽水量實測值(噸)； \hat{Q}_i 為第 i 月之水井抽水量估計值(噸)； L_i 為第 i 月之水井抽水揚程(公尺)； ΔW_i 為第 i 月之水井用電量(度)； n 為資料筆數。

此外為了評估模式之優劣，本團隊採用相關係數(Correlation

Coefficient, CC)、效率係數(Coefficient of Efficiency, CE)以及均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)等評比指標來進行比較, CC 值越大表示模式估計值與實測值之相關性越高, 最大值为 1; CE 值越趨近於 1 表示模式估計值與實測值越密合; RMSE 值越小表示模式估計值越準確, 上述評比指標可分別利用式(A.9)、式(A.10)及式(A.11)表示如下:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)(\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2 \sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}}_i)^2}} \quad (A.9)$$

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (A.10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{n}} \quad (A.11)$$

上諸式中, Q_i 為第 i 月之實測抽水量; \hat{Q}_i 為第 i 月之估計抽水量; n 為資料筆數。

由前述所得到之抽水效率分類結果, 針對四種分類之抽水量推估模式分別進行參數檢定, 本研究所建立之非線性推估模式參數檢定之優選模式為一非線性規劃(Non-Linear Programing, NLP)模式, 乃採用 Lingo11 套裝軟體進行求解, 得到各分類之非線性推估模式參數 a、b、c 與 d 如表 A-2 所示, 此外為了進行比較也進行不分類抽水量推估模式之參數檢定, 其模式參數為表 A-2 之最後一列。

表 A-2 抽水量推估模式之參數檢定結果

分類	資料筆數	抽水效率	a	b	c	d
1	46	13.47 ~ 19.82	14.59	0.01	0.05	0.05
2	52	9.66 ~ 13.47	5.48	0.13	0.49	0.01
3	83	5.88 ~ 9.66	8.76	0.02	0.01	0.12
4	75	0.21 ~ 5.88	4.30	0.02	0.15	0.07
不分類	256	0.21 ~ 19.82	2.98	0.01	1.07	0.23

將已完成檢定之模式參數代入分類抽水量推估模式以及不分類抽水量推估模式中計算 2012 年及 2014 年 40 口試驗井之抽水量估計值, 分別

繪製實測抽水量與估計抽水量之 45 度線比較圖，如圖 A-6 所示，實測抽水量與估計抽水量之評比指標計算結果如表 A-3 所示。由圖 A-6 之左圖可以看到不分類抽水量評估模式之估計抽水量的資料較分散，有許多估計抽水量資料偏離 45 度線，而經過分類所得到之估計抽水量較趨近於 45 度線，如圖 2.3.7 之右圖所示，表示分類抽水量評估模式的估計結果是較佳的。此外由表 2.3.3 可以看到抽水量評估模式之相關係數 CC 值在經過分類後由原本之 0.8911 增加到 0.9920，而效率係數也從原本之 0.7883 提升至 0.9840，可見先經過抽水效率之分類後的抽水量評估模式能夠更準確估計抽水量。

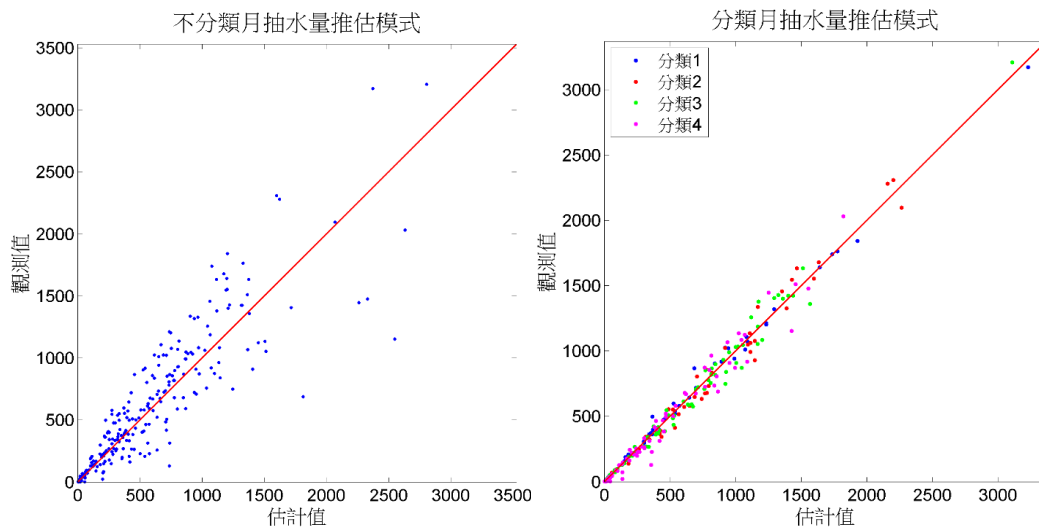


圖 A-6 2012 年至 2014 年試驗井實測抽水量與估計抽水量之比較圖

表 A-3 不分類與分類月抽水量評估模式之評比結果

評比指標	不分類月抽水量評估模式	分類月抽水量評估模式
CC	0.8911	0.9920
CE	0.7883	0.9840
RMSE(m ³)	252.71	69.57

D. 倒傳遞類神經抽水特性分類模式

分類抽水量評估模式在進行分類時必須先取得抽水量與用電量資料進而計算出抽水效率才能進行分類，然而濁水溪沖積扇的抽水井僅有月用電量資料，月抽水量資料需要經由抽水量推估模式來估算，故無法直接以 K-means 聚類法依據 18 萬口抽水井之抽水效率進行分類。由式(A.7)可知

抽水效率(PE)為馬達馬力、出水管徑、抽水揚程之函數，即：

$$PE = \frac{\hat{Q}}{\Delta W} = a \cdot \frac{P^b \cdot D^c}{L^d} = f(P, D, L) \quad (\text{A.12})$$

根據 K-means 聚類法之分類結果利用倒傳遞類神經網路建立抽水特性分類模式，模式中以馬達馬力、出水管徑、抽水揚程為輸入項，以分類之類別為輸出項，其模式架構如圖 A-7 所示，其中因為尚未估算抽水量因此輸入項之抽水揚程為未考慮抽水洩降之抽水揚程。

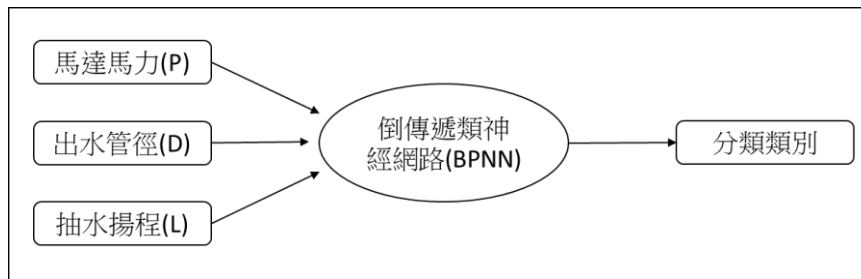


圖 A-7 倒傳遞類神經抽水特性分類模式架構圖

為了驗證倒傳遞類神經抽水特性分類模式是否能夠準確地分類出試驗水井的抽水效率類別，本研究利用 2012 年及 2014 年彰化與雲林區域內之 40 口試驗水井資料來進行倒傳遞類神經抽水特性分類模式之驗證，將其中的 2/3 筆資料作為模式之訓練，剩餘之 1/3 作為模式之驗證，模式訓練與驗證分類結果如表 A-4 倒傳遞類神經分類模式訓練與驗證分類結果所示，其中「分類正確」表示模式分類結果與實際分類結果相同之資料筆數；「鄰近分類」表示模式分類結果與實際分類結果不相同但是在相鄰的分類上，例如實際分類結果為分類 2，而模式分類結果為分類 1 或分類 3，則歸類為「鄰近分類」；「其他」表示模式分類結果與實際分類結果不同且模式分類結果也不再相鄰的分類上；正確機率為分類正確的比率。由表 A-4 倒傳遞類神經分類模式訓練與驗證分類結果之結果可知本團隊所建置之倒傳遞類神經分類模式在訓練時分類的準確率接近 77%，驗證資料的準確度也有 62%，即使是分類錯誤的資料，其中也有 85% 以上的資料會分在鄰近的分類上，在後續進行非線性推估模式計算時也不會造成太大的誤差。



表 A-4 倒傳遞類神經分類模式訓練與驗證分類結果

	訓練	驗證
資料筆數	171	85
分類正確	132	52
分類錯誤(全部)	39	33
分類錯誤(鄰近)	34	28
正確機率	77.19	61.18

將倒傳遞類神經抽水特性分類模式 85 筆驗證資料之分類結果，分別應用至今年度所建立之分類抽水量推估模式中估計抽水量，可以得到圖 A-8 之右圖之實測抽水量與估計抽水量關係圖，將相同之 85 筆驗證抽水特性資料代入未分類抽水量推估模式中估計抽水量，可以得到圖 A-8 之左圖之實測抽水量與估計抽水量關係圖，兩種方式估計結果之評比指標列於表 A-5 中。

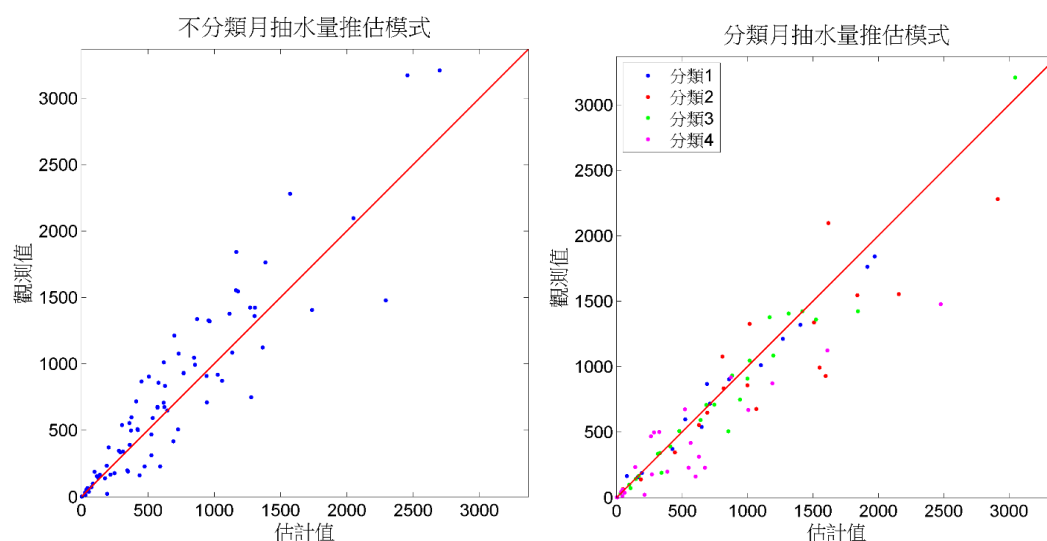


圖 A-8 倒傳遞類神經抽水特性分類模式之驗證結果比較圖

表 A-5 分類與不分類月抽水量評估模式驗證之評比結果

評比指標	不分類月抽水量評估模式	分類月抽水量評估模式
CC	0.9263	0.9565
CE	0.8420	0.9015
RMSE(m ³)	264.25	208.68

由表 A-5 可看出經過分類之抽水量評估模式之相關係數 CC 值、與效



率係數 CE 值皆較不分類抽水量評估模式大、均方根誤差 RMSE 值也較不分類之結果來的小，可以得知今年度所發展之倒傳遞類神經分類模式以及分類抽水量評估模式能夠較準確的估算抽水量。

(2) 大馬力水井

分類非線性推估模式適用範圍取決於建構模式所使用之資料，並參考水利署現地率定試驗水井資料(經濟部水利署，2006)，其模式適用範圍為馬達馬力 7.5HP 以內，若輸入之水井馬力資料超過或低於建構資料範圍，雖仍可推估但可能造成較大之誤差值。因此本團隊將馬達馬力大於 7.5HP 之抽水井歸類為大馬力水井，並沿用雲林科技大學之推估方法，採用台糖公司提供之水井定量（分級）資料，與製造銷售大馬力抽水機之泰盛公司網站公告之大馬力抽水機電能消耗資料，統計求得大馬力水井之單位度數流量，如表 A-6 所示，故彰雲地區大馬力水井之抽水量估算，將以表 A-6 中馬達馬力所對應之平均單位耗電流量乘上用電量作估算。

表 A-6 大馬力抽水機流量及電能消耗量¹

馬達馬力 (HP)	試驗流量 (cmh)	電能消耗 (KW)	平均單位度數流量 (m3/度)
7.5	82	8.76	9.36
10	45	11.05	4.07
15	71	16.76	4.24
20	224	21.56	10.39
30	252	31.63	7.97

(3) 缺漏資料水井

無完整水井特性資料與無電量資料之水井，視為缺漏資料水井推估法裡進行水井抽水量推估，以彰雲地區各鄉鎮為區分，將同一鄉鎮內缺漏資料水井數與有完整資料水井數之比例，乘上推估模式估算所得之抽水量，即為無完整資料水井之推估抽水量。

2. 用電量推估模式應用

為推估濁水溪沖積扇之抽水量，須先針對濁水溪沖積扇之抽水井資料進行整理，依照不同類型水井之用電量推估模式進行抽水量之估算，其流程圖如圖 A-9 所示。首先將濁水溪沖積扇抽水井是否具有完整特性資料、是否有用電量紀錄、

¹ 資料來源：台糖公司及泰盛公司網站

用電量是否異常、馬達馬力是否大於 7.5HP 等篩選因子，將水井區分為非大馬力水井、大馬力水井、缺漏資料水井以及非運作水井，並根據各自之用電量推估抽水量模式進行抽水量估算。茲將用電量推估模式應用分為濁水溪沖積扇之抽水井資料分析與濁水溪沖積扇抽水量推估結果分述如下。

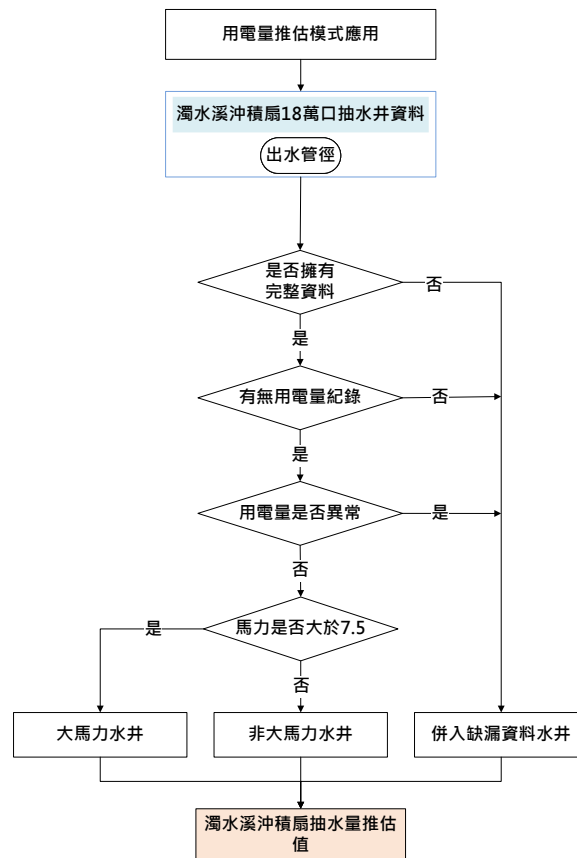


圖 A-9 用電量推估模式應用流程圖

(1) 濁水溪沖積扇之抽水井資料分析

本研究整理經濟部水利署委託雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心於 2000 至 2010 年間清查彰雲地區所有水井之資料，依照用水標的分為灌溉用水井與非灌溉用水井，而灌溉用水井中再依據水權登記分為水利會水井與非水利會水井，屬於非水利會水井之灌溉用水井再進行耕作區水井辨識篩選，判斷是否為正常運作水井。

於用電量可信度分析上參考「2012 年台灣地區用水統計年報彙編」計畫，針對農業灌溉用電量，利用常態分佈給定一個信賴區間，凡超過此限者視為異常值剔除。常態採用 99.7% 之信賴區間為標準，即 $p(|x-\mu|>3\sigma)\leq 0.003$ (x 為該筆用電量紀錄資料、 μ 為全部用電量記錄資料之平均值、 σ 為全部用電量記錄資料之標準差)，

將位於此範圍外之用電量資料視為不合理用電量，併入缺漏水井資料中。

經過上述篩選與分析機制，再搭配水井特性資料，得到濁水溪衝善共 18 萬餘口抽水井之分析結果，如表 A-7 所示，灌溉用水井約有 155,934 口，非灌溉用水井約有 30,507 口，灌溉用水井中約有 610 口為水利會水井，約有 155,324 為非水利會水井，於非水利會水井中，適用分類非線性推估模式之非大馬力水井約有 147,451 口，適用大馬力平均單位度數流量推估法之水井約有 342 口，適用缺漏資料水井推估法之水井約為 7,531 口。

表 A-7 濁水溪沖積扇之抽水井分析結果

灌溉用水井(口)				水利會水井	非灌溉用水井(口)	合計(口)
非水利會水井						
非大馬力水井	大馬力水井	缺漏資料水井	小計			
147,451	342	7,531	155,324	610	30,507	186,441

(2) 濁水溪沖積扇抽水量推估結果

本研究將分類非線性推估模式，結合台電公司所提供 2012 年 1 月至 2014 年 12 月之用電量資料，推估濁水溪沖積扇非大馬力水井、大馬力水井與缺漏水井之抽水量，其推估結果整理如表 A-8 與表 A-9 所示，由表 A-8 可得知濁水溪沖積扇之分大馬力水井灌溉抽水量年平均約為 13.9 億噸、大馬力水井灌溉抽水量年平均約為 0.2 億噸、缺漏資料水井灌溉抽水量年平均約為 0.89 億噸；由表 A-9 可得知濁水溪沖積扇之分大馬力水井非灌溉抽水量年平均約為 6.67 億噸、大馬力水井灌溉抽水量年平均約為 0.46 億噸、缺漏資料水井灌溉抽水量年平均約為 0.60 億噸；

表 A-8 用電量推估法估算濁水溪沖積扇灌溉抽水量結果

方法	灌溉抽水量(億噸)								
	2012年 1~6月	2012年 7~12月	小計	2013年 1~6月	2013年 7~12月	小計	2014年 1~6月	2014年 7~10月	小計
非大馬力水井	7.25	6.43	13.68	7.36	6.74	14.10	7.65	6.26	13.91
大馬力水井	0.16	0.12	0.28	0.11	0.05	0.15	0.12	0.05	0.17
缺漏資料水井	0.46	0.41	0.87	0.47	0.43	0.90	0.49	0.40	0.89
彰化、雲林水利會	0.71	1.00	1.71	0.34	0.18	0.52	0.65	0.18	0.83
合計	8.58	7.96	16.54	8.28	7.40	15.67	8.91	6.90	15.80

表 A-9 用電量推估法估算濁水溪沖積扇非灌溉抽水量結果

方法	非灌溉抽水量(億噸)								
	2012年 1~6月	2012年 7~12月	小計	2013年 1~6月	2013年 7~12月	小計	2014年 1~6月	2014年 7~10月	小計
非大馬力水井	3.12	3.46	6.57	3.34	3.59	6.93	3.21	3.28	6.49
大馬力水井	0.22	0.23	0.44	0.23	0.25	0.48	0.23	0.21	0.44
缺漏資料水井	0.33	0.37	0.70	0.27	0.29	0.57	0.26	0.27	0.53
合計	3.67	4.05	7.72	3.85	4.14	7.99	3.70	3.76	7.46