

計畫編號：101-5926901000-03-01

臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估
—地下水補注潛勢評估與地下水模式建置
濁水溪沖積扇

Hydrogeology Investigation and Groundwater Resource Assessment for Taiwan :
-- Groundwater Recharge Estimation and Model Simulation
Choshui River Alluvial Fan

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行單位：國立交通大學土木工程系

計畫主持人：張良正 教授

協同主持人：陳文福 副教授

協同研究員：張竝瑜 副教授、陳宇文 博士

中華民國一〇一年十二月

臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估
—地下水補注潛勢評估與地下水模式建置
濁水溪沖積扇

Hydrogeology Investigation and Groundwater Resource Assessment for Taiwan :
-- Groundwater Recharge Estimation and Model Simulation
Choshui River Alluvial Fan

編撰者：張良正、張竝瑜、陳文福、江崇榮

王詠綸、黃智昭、陳瑞娥、陳宇文

蔡瑞彬、陳祐誠、楊深惠、王雲直

中華民國一〇一年十二月

摘要

經濟部自民國 81 年起執行「臺灣地區地下水觀測網整體計畫」，於臺灣地區九個地下水區及恒春和澎湖地區，進行地下水觀測井網建置及水文地質調查研究，執行期程分三期共十七年。此計畫之執行除了建立臺灣地區之地下水觀測系統以及水文地質資料庫外，並進一步釐清了臺灣地區重要地下水區之水文地質架構，且據此初步釐訂濁水溪沖積扇和屏東平原之地下水補注區。本計畫係依據「臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估計畫」(98 年至 101 年)實施進度之規劃，分別進行濁水溪沖積扇及屏東平原地下水區之相關研究。全程計畫主要成果在完成兩地下水區之，地下水主要補注區範圍建議、區域抽水量與補注量推估、現地補充調查試驗含地電阻調查與水質調查、數值模擬與水平衡分析等。

濁水溪沖積扇地下水主要補注區範圍之建議部分，本計畫綜合高補注潛勢區、高地電阻區與高溶氧區三者，並搭配岩心鑽探柱狀圖與數位地表高程(DTM)等資訊，得出濁水溪沖積扇主要補注區分布。其主要範圍包含北斗鎮、田中鎮、溪州鄉、二水鄉、刺桐鄉、林內鄉、斗六市與古坑鄉等部分區域。

濁水溪沖積扇區域抽水量與補注量之推估部分，本計畫綜合分散型地下水歷線法與數值模式之結果，推估得濁水溪沖積扇全區之垂向補注量為 18.28 億噸，下游海岸側向流入量為 0.17 億噸，兩項總合之系統總流入量為 18.45 億噸。系統流出量方面：含水層一抽水量 7.08 億噸，含水層二抽水量 3.20 億噸，含水層三抽水量 2.30 億噸，流失量 6.07 億噸，四項總合之系統總流出量為 18.65 億噸。

在現地補充調查試驗部分，可區分為地電阻調查與水質調查兩項，其中地電阻調查於 98-99 年度完成濁水溪北岸彰化地區長度約 300 公尺之兩條短距離測線，以及濁水溪南岸雲林地區六條主要測線，合計完成 16 條測線和 3 條標準測線。濁水溪北岸高電阻區域邊界，大致由北斗一帶向南延伸至溪州一帶，南岸部分則由於虎尾溪的干擾，造成高電阻區域邊界在判斷上較為複雜。由於虎尾溪的作用，泥層(難透水層)與扇頂礫石層邊界，在虎尾河流域則往西(下游)擴張，但到了斗六以南區域，則向東(上游)內縮至接近斗六丘陵一帶。

在水質調查部分，98-99 年度調查濁水溪沖積扇地區地面水 37 處、扇頂地下水 19 口井之水質採樣與化驗。完成了溶氧帶及硝酸鹽帶的範圍，以利補注區的判斷。並於調查得知地面水及扇頂地下水大都以碳酸氫鈣水質為主，只有少數地下水偏碳酸氫鈉，且濁水溪扇頂地下水歷年導電度有明顯增加的趨勢。

關鍵字：分散型地下水歷線法、地下水模式、地下水補注潛勢與地電阻調查

目錄

摘要.....	I
目錄.....	II
圖目錄.....	IV
表目錄.....	VIII
第一章 前言	1
第二章 文獻回顧與研究流程	3
2.1 文獻回顧.....	3
2.1.1 美國華盛頓州的重要含水層補注區(Critical Aquifer Recharge Area, CARA)	6
2.1.2 喬治亞州的地下水補注區(Groundwater Recharge Area District, GRAD)	11
2.1.3 台灣的地下水保護	13
2.2 研究流程.....	17
第三章 區域概述與資料蒐集	21
3.1 區域概述.....	21
3.2 資料蒐集.....	23
第四章 現地調查與分析	35
4.1 地電阻調查與分析	35
4.1.1 二維地電阻原理及施測方式.....	35
4.1.2 施測結果與分析	39
4.2 水質調查與分析	44
4.2.1 調查方法.....	44
4.2.2 結果與分析.....	50
4.3 抽水試驗.....	87
4.3.1 抽水井鑿建與分級試水.....	87
4.3.2 複井抽水試驗方法	99
4.3.3 複井抽水試驗結果與分析.....	100
第五章 地下水主要補注區範圍評估	103
5.1 主要補注區範圍評估流程	103
5.2 補注潛勢分析	109
5.2.1 地層內因.....	109
5.2.2 水文外因.....	115
5.2.3 綜合因素.....	116
5.3 主要補注區範圍綜合分析	140
第六章 水資源評估.....	143
6.1 分散型地下水歷線法理論概述	143
6.1.1 地下水位內插.....	143

6.1.2 蓄水量計算.....	144
6.1.3 以蓄水量歷線分析主要退水線(Master Recession Curve, MRC)	145
6.2 濁水溪沖積扇之水資源評估	148
第七章 地下水數值模式建置與分析	153
7.1 地下水數值模式建置流程	153
7.2 地下水數值模式建置.....	155
7.2.1 MODFLOW 簡介.....	155
7.2.2 邊界條件與格網劃分	156
7.2.3 模式資料輸入.....	162
7.2.4 參數檢定方法	165
7.2.5 檢定誤差統計分析	170
7.3 區域水平衡分析	173
7.4 主要補注區對地下水資源影響分析.....	181
結論與建議	185
參考文獻	189
附錄 A 濁水溪沖積扇觀測水位	A-1

圖目錄

圖 2.1-1 辨別標示出井頭保護帶	7
圖 2.1-2 美國 GEORGIA 州之污染敏感圖	8
圖 2.1-3 美國 GEORGIA 州之污染敏感圖局部放大	9
圖 2.1-4 美國華盛頓州 ISSAQUAH 市之重要地下水補注保護區劃設	9
圖 2.1-5 美國華盛頓州 KING COUNTY 之重要地下水補注保護區劃設	10
圖 2.1-6 美國華盛頓州 KING COUNTY 重要地下水補注保護區劃設圖之局部放大	11
圖 2.1-7 美國喬治亞州的地下水補注區	12
圖 2.1-8 美國喬治亞州的地下水補注區局部放大圖及圖例	13
圖 2.1-9 環保署公告之飲用水水源水質保護區	14
圖 2.1-10 濁水溪沖積扇深井分布圖(經濟部, 2005)	15
圖 2.2-1 主要補注區範圍建議評估流程	18
圖 2.2-2 各工作項目之相互關係圖	19
圖 3.1-1 濁水溪海園-石榴水文地質剖面圖	22
圖 3.2-1 含水層 1(F1)42 口地下水觀測井分布圖	25
圖 3.2-4 中央氣象局雨量站位置圖	28
圖 3.2-5 水利署雨量站位置圖	30
圖 3.2-6 地下水位資料連續缺漏超過 10 天之補遺標準作業程序	33
圖 4.1-1 地電阻探測儀器示意圖	36
圖 4.1-2 電流流動示意圖	36
圖 4.1-3 溫奈排列(WENNER ARRAY)示意圖	38
圖 4.1-4 雙偶極排列(DIPOLE-DIPOLE ARRAY)示意圖	38
圖 4.1-5 二維地電阻剖面影像探測示意圖	38
圖 4.1-6 地電阻平移式陣列施測方式示意圖	39
圖 4.1-7 地電阻調查測線與判斷之彰化地區濁水溪沖積扇高電阻區域邊界	41
圖 4.1-8 地電阻調查測線與判斷之雲林地區濁水溪沖積扇高電阻區域邊界	43
圖 4.2-1 彰雲地區觀測井地下水及溪水採樣位置圖	49
圖 4.2-2 美國 IN-SITU TROLL-200 水壓水溫導電度三合一自記測棒	50
圖 4.2-3 歷年之導電度數據	59
圖 4.2-4(A) 歷年之導電度之平面分布(綠色部份為大於 750MS/CM)	59
圖 4.2-4(B) 歷年之導電度之平面分布(綠色部份為大於 750MS/CM)	60
圖 4.2-5 主要陰離子濃度分類(數據為 2010 年 5 月)	61
圖 4.2-6 主要陽離子濃度分類(數據為 2010 年 5 月)	61
圖 4.2-7 主要離子成份分類(數據為 2010 年 5 月)	62
圖 4.2-8 柑園(1)、六合(1)及荊桐(1)之歷年導電度	62
圖 4.2-9 柑園(1)、六合(1)及荊桐(1)之離子組成	63

圖 4.2-10 六合及荊桐站附近之土地利用概況	64
圖 4.2-11 雲林扇頂地面水導電度	71
圖 4.2-12 彰化扇頂地面水導電度	72
圖 4.2-13 濁水扇頂區井內水導電度井測結果	74
圖 4.2-14 斗六扇頂區井內水導電度井測結果	74
圖 4.2-15 上邊界地區井內水導電度井測結果	75
圖 4.2-16 下邊界地區井內水導電度井測結果	75
圖 4.2-17 荊桐站導電度井測 (2010 年 08 月 18 日)	76
圖 4.2-18 觀測井井管中不同水質來源之解釋	76
圖 4.2-19 導電度連續監測之井位	78
圖 4.2-20 荊桐站導電度井測 (2010 年 08 月 18 日)	79
圖 4.2-21 荊桐一井 2009 年導電度連續監測數據	80
圖 4.2-22 荊桐一井 2009-2010 年導電度監測比較	81
圖 4.2-23 六合站導電度井測 (2010 年 09 月 01 日)	81
圖 4.2-24 六合一井 2009 年導電度連續監測數據	82
圖 4.2-25 六合一井 2009-2010 年導電度監測數據	82
圖 4.2-26 柑園井導電度井測	83
圖 4.2-27 柑園一井 2009-2010 年導電度連續監測	83
圖 4.2-28 田中導電度井測結果	84
圖 4.2-29 田中站導電度連續監測結果 (監測點皆在 80M 深度)	84
圖 4.2-30 烏塗井 2010 年導電度連續監測	85
圖 4.2-31 烏塗井 2009-2010 年導電度井測	86
圖 4.2-32 六合二井 2009-2010 年導電度井測	86
圖 4.3-1 濁水溪沖積扇各站井分佈圖	88
圖 5.1-1 主要補注區劃分作業流程圖	103
圖 5.1-2 地下水補注潛勢評估作業程序	105
圖 5.1-3 地下水補注潛勢影響因子關係圖	106
圖 5.2-1 濁水溪沖積扇土地利用計畫分類圖層	111
圖 5.2-2 表層土壤種類原始圖層	112
圖 5.2-3 濁水溪沖積扇含水層一(F1)透水係數分布圖	114
圖 5.2-4 濁水溪流域河系圖	115
圖 5.2-5 平均年降雨量因子選取之雨量站	117
圖 5.2-6 本計畫選取雨量站之平均年降雨量分布圖	118
圖 5.2-7 濁水溪沖積扇地下水位站分布圖	119
圖 5.2-8 豐榮(1)地下水位上升量與各區平均降雨量線性迴歸(A)扇頂區(B)扇央區(C)扇尾區	122
圖 5.2-9 扇頂區降雨對扇頂區地下水井水位變化迴歸統計之 R^2 值比較圖	123
圖 5.2-10 扇頂區與扇央區降雨對扇央區地下水井水位變化迴歸統計之 R^2 值比較圖	123
圖 5.2-11 扇頂區、扇央區與扇尾區降雨對扇尾區地下水井水位變化迴歸統計之 R^2 值比較圖	123

圖 5.2-12 降雨與地下水位變化相關性分布圖	124
圖 5.2-13 單位蓄水量變化分布圖	127
圖 5.2-14 土地利用分數分布圖	132
圖 5.2-15 表層土壤種類分數分布圖	133
圖 5.2-16 降雨與地下水位變化相關性分數分布圖	134
圖 5.2-17 1993~2008 年平均年降雨量分數分布圖	135
圖 5.2-18 單位蓄水量變化分數分布圖	136
圖 5.2-19 透水係數分數分布圖	137
圖 5.2-20 河系密度分數分布圖	138
圖 5.2-21 地下水補注潛勢整體分數分布圖	139
圖 5.3-1 地下水主要補注潛勢分數分布區	141
圖 5.3-2 濁水溪沖積扇扇頂主要補注區分布	142
圖 6.1-1 控制點設置示意圖	144
圖 6.1-2 區域降雨歷線與地下水位歷線起伏變化示意圖	145
圖 6.2-1 濁水溪沖積扇全系統蓄水量與降雨量歷線圖	148
圖 6.2-2 濁水溪沖積扇蓄水量與蓄水量退水斜率分布圖(十月至隔年一月)	149
圖 6.2-3 濁水溪沖積扇蓄水量與蓄水量退水斜率分布圖(二月至五月)	150
圖 6.2-4 濁水溪沖積扇降雨事件累積降雨量對累積垂向補注量分布圖	151
圖 7.1-1 地下水數值模式建置與應用流程示意圖	154
圖 7.2-1 濁水溪沖積扇概念分層	156
圖 7.2-2 濁水溪沖積扇地下水邊界之概念圖	157
圖 7.2-3 濁水溪沖積扇之模擬範圍	159
圖 7.2-4 濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網與邊界條件	160
圖 7.2-5 濁水溪沖積扇模式第 2~7 分層格網與邊界條件	161
圖 7.2-6 濁水溪沖積扇模式 AA' 段剖面圖	161
圖 7.2-7 含水層一徐昇式分區	163
圖 7.2-8 含水層二徐昇式分區	163
圖 7.2-9 含水層三徐昇式分區	163
圖 7.2-10 地下水模式流量計算概念圖	165
圖 7.2-11 地下水參數檢定系統架構圖	167
圖 7.2-12 參數檢定流程	169
圖 7.2-13 第一分層誤差均方根	170
圖 7.2-14 第三分層誤差均方根	171
圖 7.2-15 第五分層誤差均方根	171
圖 7.2-16 各月份均方根誤差變化圖(1998-2003、2005-2009)	171
圖 7.2-17 模擬水位誤差主體圖(1998-2003、2005-2009)	172
圖 7.3-1 進出地下水系統各項分量概念圖	175
圖 7.3-2 分散型地下水歷線法水平衡概念圖	176

圖 7.3-3 數值模式水平衡概念圖	176
圖 7.3-4 濁水溪沖積扇年系統流出量	177
圖 7.3-5 濁水溪沖積扇年系統流入量	178
圖 7.3-6 濁水溪沖積扇年儲蓄改變量	179
圖 7.3-7 濁水溪沖積扇歷年累積儲蓄量	180
圖 7.3-8 補注量與抽水量變化圖	180
圖 7.4-1 污染物於含水層 1 之影響範圍	183
圖 7.4-2 污染物於含水層 2 之影響範圍	183
圖 7.4-3 污染物於含水層 3 之影響範圍	183

表目錄

表 2.1-1 環保署公告之雲林縣土壤及地下水污染列管場址.....	16
表 3.2-1 含水層 1(F1)42 口地下水觀測井資料列表	23
表 3.2-1 含水層 1(F1)42 口地下水觀測井資料列表(續).....	24
表 3.2-2 濁水溪沖積扇複井抽水試驗實測儲水係數	26
表 3.2-3 本計畫蒐集中央氣象局雨量站資訊.....	27
表 3.2-3 本計畫蒐集中央氣象局雨量站資訊(續).....	28
表 3.2-4 本計畫蒐集經濟部水利署雨量站資訊.....	29
表 3.2-5 本計畫蒐集圖資資訊.....	31
表 3.2-6 1997-2009 年地下水位原始資料缺漏統計表	32
表 4.2.1 彰雲扇頂補注區觀測井之基本資料	46
表 4.2.2 本計劃水質化驗項目及方法.....	47
表 4.2.3 飲用水源及灌溉用水質標準.....	48
表 4.2-4 扇頂區 2010 年 5 月水質採樣及量測結果	52
表 4.2-5 扇頂區 2010 年 9 月水質採樣及量測結果	53
表 4.2-6 扇頂區歷年地下水平均導電度(MS/CM)	54
表 4.2-7 扇頂之上下邊界歷年地下水平均導電度(MS/CM)	54
表 4.2-8 扇頂附近地下水水質評估結果.....	55
表 4.2-9 導電度 MANN-KENDALL 趨勢分析結果.....	55
表 4.2-10 扇頂區 2010 年 5 月水質分析結果(MG/L).....	56
表 4.2-11 扇頂區 2010 年 9 月水質分析結果(MG/L).....	57
表 4.2-12 柑園(1)、六合(1)、荊桐(1)之離子當量百分比.....	58
表 4.2-13 濁水溪扇頂補注區之歷年硝態氮濃度(NO ₃ -N MG/L).....	66
表 4.2-14 扇頂之地面水導電度(2010 年 1 月)	68
表 4.2-15 扇頂之地面水導電度(2010 年 9 月)	69
表 4.2-16 地面水之主要離子成份	70
表 4.3-1 濁水溪沖積扇試水成果表	89
表 5.1-1 地下水補注潛勢影響因子表	105
表 5.1-2 地下水補注潛勢影響因子權重計算表	107
表 5.2-1 圖資製作工具.....	109
表 5.2-2 95 及 96 年國土利用調查委託製作範圍表	110
表 5.2-3 各雨量站徐昇氏網格之控制面積.....	121
表 5.2-4 各井之儲水係數與單位蓄水量變化.....	126
表 5.2-5 土地利用屬性與重新分類表	129
表 5.2-5 土地利用屬性與重新分類表(續).....	130
表 5.2-6 土地利用重分類屬性代碼與因子分數表	130

表 5.2-7 表層土壤分類屬性代碼與因子分數表	131
表 6.2-1 濁水溪沖積扇水平衡分析表	151
表 7.3-1 模式檢定所得參數	173
表 7.3-2 各分層抽水量與流失量	177
表 7.3-3 垂向補注與海岸淨流入量	178
表 7.3-4 系統總流入量、總流出量與年儲蓄改變量	179
表 7.4-1 主要補注區補注量與整體補注量關係表	181
表 7.4-2 主要補注區面積及垂向補注量統計表	181

第一章 前言

地下水是台灣地區重要的水資源之一，每年約使用 60 億噸，佔整體用水量的三分之一，而就區域地下水資源的管理而言，地下水補注來源的瞭解乃是重要的課題之一，最近通過的地質法，更將重要地下水補注區列為需加強調查與管理的地質敏感區之一。地下水重要補注區範圍的界定，再配合適當的管理，除了可確保地下水補注量外，亦可避免地下水遭受汙染，從而維持地下水質與量的永續。

以往研究顯示，要明瞭各區之地下水資源，必須先掌握地下水位的變化、水文地質架構、水文地質參數、補注來源、水質地化背景及地下水流模式。經濟部水利署與中央地質調查所，自民國 81 年起共同執行「臺灣地區地下水觀測網整體計畫」，於臺灣九個地下水區、恒春與澎湖地區進行水文地質調查研究及地下水觀測井網建置，完成建立臺灣地區水文地質基本資料與地下水監測系統，開發水文地質資料庫提供儲存和處理各項調查分析結果。然而，若欲進一步界定重要的地下水補注區，則需再補充更高精度之基礎資料，以提升補注區評估之可信度。爰此，本計畫透過二維地電阻施測、水質地化調查及鑿井試驗等方法，補充調查基礎資料，接著再以此為基礎，搭配補注潛勢分析之成果，評估主要補注區之範圍。除了補注區範圍的界定，評估地下水補注區之補注量對地下水系統之影響，可使吾人對地下水補注區管理之重要性有更清楚的認識，對此本計劃先以地下水歷線法與地下水流數值模式等分析工具，量化評估進出地下水系統之各種量值，再進一步應用地下水流與水質模式，分析補注區對整體地下水水量及水質之影響。本計劃所得成果可供主管機關劃定地下水補注地質敏感區之依據，使地下水資源的管理朝向永續利用的目標前進。

第二章 文獻回顧與研究流程

本章於 2.1 節將回顧國內外補注區劃設之相關研究，接著再以國外地下水源保護區為例，說明其地下水資源保護之施行方法，最後再評估國內目前地下水資源之保護現況，借鏡國外相關研究與案例，探討可改善之處。2.2 節則說明本計畫之整體研究流程。

2.1 文獻回顧

「台灣地區地下水觀測站網建置整體計畫」兩期計畫皆已完成，以其為基礎之濁水溪沖積扇水文地質架構相關研究，亦已累積了相當的研究成果，此完備的資料為地下水資源相關研究的重要基礎，地下水補注調查評估亦是其中之一。目前，地下水補注量與補注區的探討，為地下水資源管理的重要議題之一，此方面近年來已有眾多研究應用因子分析方法計算地下水補注潛勢(Bromley et al., 1997; Chenini et al., 2010; Jasrotia et al., 2007; Mukherjee, 1996; Mondal and Singh, 2004; Mukherjee et al., 2012; Salama et al., 1994; Shaban et al., 2006; Yeh et al., 2009)，並據以描述各地區補注難易度之相對大小，然而實際上仍需降雨才能產生地下水補注，因此補注潛勢並不直接等同於補注量。

在潛勢評估相關研究方面，較早且具代表性的研究乃是以 DRASTIC 為代表的一系列以因子權重分析為基礎的研究，DRASTIC 地下水污染潛勢評估系統是美國水井協會配合美國環保署於 1985 年所提出，原本乃用以評估地區之污染潛勢，計算區域受到污染的可能性大小，高污染潛勢代表該區域客觀上較易受到污染。原 DRASTIC 模式中，乃考慮七項水文地質參數，以評估一地區受污染潛勢之相對大小，由於此七項水文地質參數均可以圖層方式表示，故可結合地理資訊系統(GIS)，將一地區之污染潛勢以圖形顯示。DRASTIC 模式除對一般性污染物提出考慮水文地質參數之權重外，尚針對農業行為提出農業權重。經由 DRASTIC 模式所得之指標值本身並無不是污染發生機會之絕對值，其只在顯示污染潛勢(發生機會)之相對大小。

前述 DRASTIC 雖然原本用以評估地下水之污染潛勢，惟其邏輯分明、架構清楚，可配合地理資訊系統有效率的進行大區域的分析，另外由於基本物理機制的相似，DRASTIC 的分析理念後續被大量應用於補注潛勢評估上，並且被進一步的改善與擴充。

Mukherjee (1996)對地下水補注潛勢評估，考量的影響因子包含地形、岩石種類、地質結構、風化程度、裂隙寬度、原生與次生孔隙率、坡度、河系、土地利用、地表覆蓋以及氣候條件等。Jasrotia 等人(2007) 利用遙感探測技術

(Remote Sensing)與地理資訊系統(Geographic information system, GIS)等技術,建構一平台做為地下水人工補注潛勢區域(Potential zone for artificial recharge)劃分之用。其劃分依據乃參考兩大類資料進行分析,第一類地表地質相關資料,大部分皆為衛星影像資料處理後得到,包含(1)岩性(Lithology)圖層、(2)地形(Geomorphology)圖層、(3)土地利用/土地覆蓋圖層(Land use/land cover)、(4)水文土壤質地(Hydrologic soil texture)圖層、(5)坡度(Slope);第二類為含水層參數,其來源為現地資料(如抽水試驗),包含(6)季風前後之地下水位深度(Depth to water table)、(7)導水係數(Transmissivity)、(8)透水係數(Permeability)、(9)儲水係數(Storativity)、(10)井之比容量(Specific capacity, Q/S)及(11)入滲能力。Jasrotia 等人 (2007)再將此兩大類資料藉由地理資訊系統(GIS)之空間分析與整合後產出地下水人工補注潛勢區圖層,配合河系網絡(Drainage network)圖層進行套疊,以此作為執行補注地下水之依據,並用以驗證此圖層之正確性。最後 Jasrotia 等人近一步將此地下水人工補注潛勢圖層之結果配合地形資料找出最適合補注的場址,並建立一最後圖層作為最終成果之展現。Mondal 與 Singh(2004)提出適用於岩石地形的地下水補注潛勢推估方法,其以降雨與地下水位深度關係得到一相關係數,並考量時間滯延的效應(一個月到四個月的時間滯延),相關係數越大者代表補注潛勢能力越佳,最後再以此地下水補注潛勢推估方法與一已完成地下水補注區劃分之區域進行比較,發現高補注區者其相關係數大於 0.6,中等補注區者其相關係數介於 0.5 到 0.6 之間,低補注區者其相關係數介於 0.4 到 0.5 之間,而補注貧乏的區域其值小於 0.4。Braun 等人 (2003)歸納出降雨(Precipitation)、溫度(Temperature)、土壤種類(Soils)、與土地覆蓋(Land cover)等四項影響地下水補注的顯著因子,再利用地理資訊系統(GIS)將上述顯著因子之圖層進行空間分析再產生三張圖層,分別為滲透(Percolation)、地表逕流(Surface runoff)與根域(Root zone)三張圖層,各圖層個別依影響地下水補注潛勢的能力分為一到十分,最後產出的地下水補注潛勢圖乃由此三張圖層的分數加總即可得到,再依此判斷與劃定研究區域之地下水補注潛勢區域。Shaban 等人(2006)以岩性(Lithology)、河系(Drainage)、線型構造(Lineaments)、土地利用/覆蓋(Land use/Land cover)、岩溶區域(Karstic domains)等五項影響地下水補注潛勢之重要顯著因子評估黎巴嫩沿海喀斯特地形山區之地下水補注潛勢及全區之補注量。Shaban 等人 (2006)依照此五個影響因子間的主要影響關係與次要影響關係訂定因子間之權重比例。Yeh 等人 (2009)歸納出岩性(Lithology)、土地利用/覆蓋(Land use/land cover)、線型構造(Lineaments)、河系(Drainage)以及坡度(Slope)等五項影響一完整流域上中下游地下水補注潛勢之重要顯著因子,其因子權重之決定方式與 Shaban 等人 (2006)近似。Yeh 等人 (2008)應用 GIS 軟體將所蒐集的水文及

地文資料數位化建立基本資料庫，並針對不同影響因子訂定適當影響分數，最後再利用空間分析功能劃分出研究地區之地下水潛勢補注區。Chenini 等人(2010)以集水區範圍(Watershed limit)、河系(Drainage)、河系密度(Drainage density)、岩性(Lithology)、破裂面露頭(fractured outcrops)、線型構造(Lineaments)、滲透係數(Permeability)及壓力水頭等八個因子透過 GIS 之空間整合與分析功能，劃分出研究區域內三個含水層可進行人工補注之範圍。國內研究方面，江等人(2005)利用氫、溶氧及硝酸態氮做為地下水之示踪劑，利用三者於水層中之濃度變化進而推估出地下水補注區之分布，其初步研究指出濁水溪沖積扇之主要補注來源，以扇頂為中心，包括八卦台地及斗六丘陵之局部，總面積約 285 平方公里，佔全地下水區面積之 13.7%。林(2000)考量八個地下水補注潛勢因子，以鄉鎮為單位推估濁水溪沖積扇內各鄉鎮之地下水補注潛勢，其中八個因子包括(1)增加一公尺水頭之補注率(2)地表入滲潛力(3)定水頭邊界流失率(4)土地利用地表透水率(5)平均年降雨量(6)稻作灌溉計畫水量(7)農業用地百分比(8)降雨日數。張(1999b)對屏東平原之地下水補注進行評估與分級，以飽和入滲率與地下水位敏感度之乘積推估地下水補注潛勢並以此結果做為屏東平原區域地下水補注分級之依據。其中飽和入滲率為利用土壤的空間分佈與土壤屬性資料(土壤分類)求得，將屏東地區各網格之地表土壤飽和入滲率分為高、中、低三類土壤飽和入滲分級。之後，進一步藉由 MODFLOW 模式計算屏東平原地下水位對於地表入滲之敏感度，並依此敏感度分析結果配合前述地表土壤飽和入滲率評估區域補注潛勢與分級。其評估方式為將地下水位敏感度之正規化值與前述地表入滲率之分級界限值之乘積分為高、中、低三級。

然前述研究僅以補注潛勢分析結果作為主要補注區範圍評估之參考，本計畫為求評估結果之客觀性與正確性，除採用補注潛勢分析主要補注區外，另外再以二維地電阻調查及水質檢測評估主要補注區範圍，所得成果再與補注潛勢分析結果互相檢驗修正。本計畫採用二維地電阻施測，乃因前人研究指出應用地表地電阻可分析出礫石與砂之分佈(Beresnev et al., 2002; Danielsen et al., 2007; Griffiths and Barker, 1993; Kilner et al., 2005; Loke, 2000; Ortega et al., 2010; Taheri Tizro et al., 2012)，而富含礫石與砂之含水層因其滲透性較高，因此較易入滲(French and Binley, 2004)。由前述文獻可知，若能找出礫砂層之分佈範圍，對於主要補注區範圍之劃定具相當之參考價值。在水質分析方面，本計畫以溶氧量作為參考指標，作為輔助檢驗補注區範圍的依據。地下水環境的氧化還原反應，首先發生於含有溶氧之水源流入地下水時，此時水中溶氧最高，往深處流動時，因無空氣接觸，缺乏氧氣補充，溶氧漸被地層及地下水中的耗氧物(例如有機碳、亞鐵離子、硫化物等)消耗用盡，此種含水層被稱為溶氧還原帶(Frencha

et al., 2004; Jackson et al., 1982; Domenico et al., 2003; Chen et al., 2003)。由此可知，當一淺層觀測井量得較高之溶氧時，可推論該處之通透性應較佳且需具備良好的補注來源，主要原因為(1)當孔隙流通性佳時，流速較快，補注水源流至觀測井濾管途中與耗氧物接觸之時間較短，所消耗之溶氧量少，故能維持較高之溶氧量。(2)若欲維持較高之溶氧量，則尚需持續的補注來源，當地下水補注的能力大於有機質消耗溶氧量之能力時，則地下水質方能呈現含有較高溶氧量的狀態。因此，當一觀測井量測之溶氧量較高時，可代表該區域具較佳之地下水補注能力，本計畫利用此特性，將溶氧量作為評量含水層入滲能力的輔助參考指標。

2.1.1 美國華盛頓州的重要含水層補注區(Critical Aquifer Recharge Area, CARA)

美國華盛頓州「重要含水層補注區」(Critical Aquifer Recharge Area, CARA)，乃為保護地下水飲用水源之水質與水量而設。法源依據為「成長管理法」(Growth Management Act)，立法之主要理由為污染前之保育比污染後之清除省錢，美國環保署估計污染後之清除費比污染前之保育費用高 5 至 200 倍(USEPA, 1995)。

「成長管理法」明訂各地方政府必需劃設「重要保護區」(Critical Areas)，其對「重要含水層補注區」(CARA, Critical Aquifer Recharge Area)的定義為：該地為飲用水源之含水層補注區域(Areas with a critical recharging effect on aquifers used for potable water)。

該含水層及補注區的劃設可經由水文地質調查為之。保護的標的不只是水質，尚包括補注水量，其措施如禁止混凝土鋪面，以避免減少降雨入滲量。保護之優先次序主要考量使用現況及未來需求，主事者需親自調查該區的現有水井，並衡量未來的開發需求，以訂出保護之優先次序。以下即為美國重要地下水資源之保護步驟(Morgan, 2005)：

(1)辨別(Identify)：調查何處擁有可用之地下水資源，現今地下水井分布及其使用情形，以及水資源現況與含水層分布。調查後針對飲用水水井，標出井頭保護帶，而井頭保護帶(Wellhead Protection Zones)即為一緩衝帶，在該水井為中心之某半徑範圍內設立保護帶。依水井之重要性，以半年、一年、五年、十年的緩衝時間設立保護範圍。其緩衝時間即為保護帶外之污染進入含水層後，移動至水井所需之時間(USEPA, 1989)。如圖 2.1-1 所示，圖中紅點為飲用水井、綠圈為井頭保護帶。依據美國「安全飲用水法」(SDWA, Safe Drinking Water Act)規定，需調查飲用水源附近之潛在污染源(Potential contamination sources)。並將公有井列為第一順位保護，而私有井(家戶使用)也加以保護。

(2)污染敏感度(Susceptibility)：指自然條件是否容易受到污染，例如地下水面、土壤層、含水層、不透水層的分布及水文參數等。區域性的地下水污染敏感圖通常可用 DRASTIC 方法產生，如圖 2.1-2 及圖 2.1-3 所示。

(3)調查(Inventory)已知的可能污染源：例如油槽、工廠、洗衣店、農業活動等。

(4)污染潛勢(Vulnerability)：指人為潛在污染源及自然條件加總之污染潛勢。

(5)劃設(Designate)重要含水層補注保護區：在地圖上明確標示範圍，如：潛在的污染區、含水層範圍及性質、飲用水源水井，並綜合說明劃設此區對飲用水源之重要性。如圖 2.1-4 所示，圖為美國華盛頓州 Issaquah 市之重要地下水補注保護區，將保護區分成三類：第一區為 1-5 年的井頭保護區、第二區為 10 年的井頭保護區、第三區為高補注區。

(6)保護(Protect)：依各地方政府之行政，進行登記、管制、檢查、處罰等作為。

(7)確實執行(Ensure)保育管理計畫。

(8)水量管理：除飲用水之抽用，應維持河川基流量，以保護河川生態。

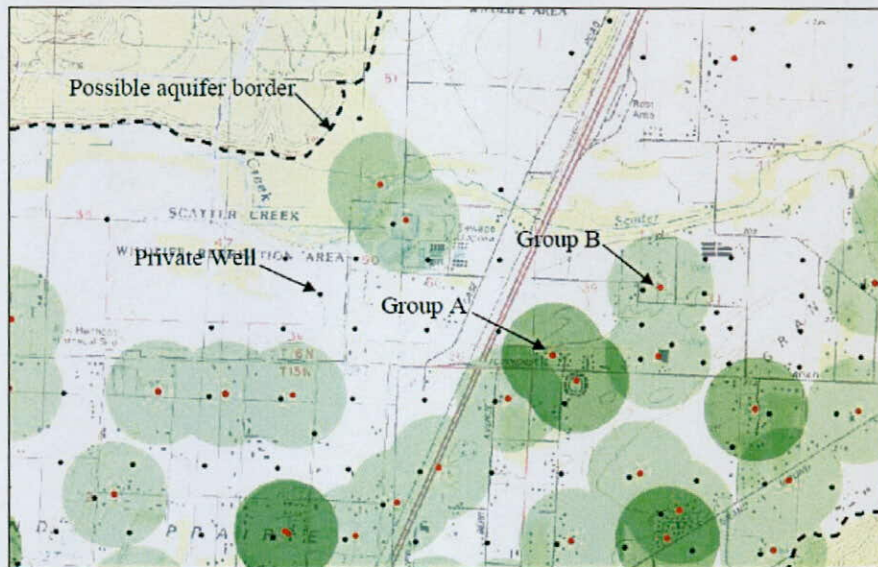


圖 2.1-1 辨別標示出井頭保護帶

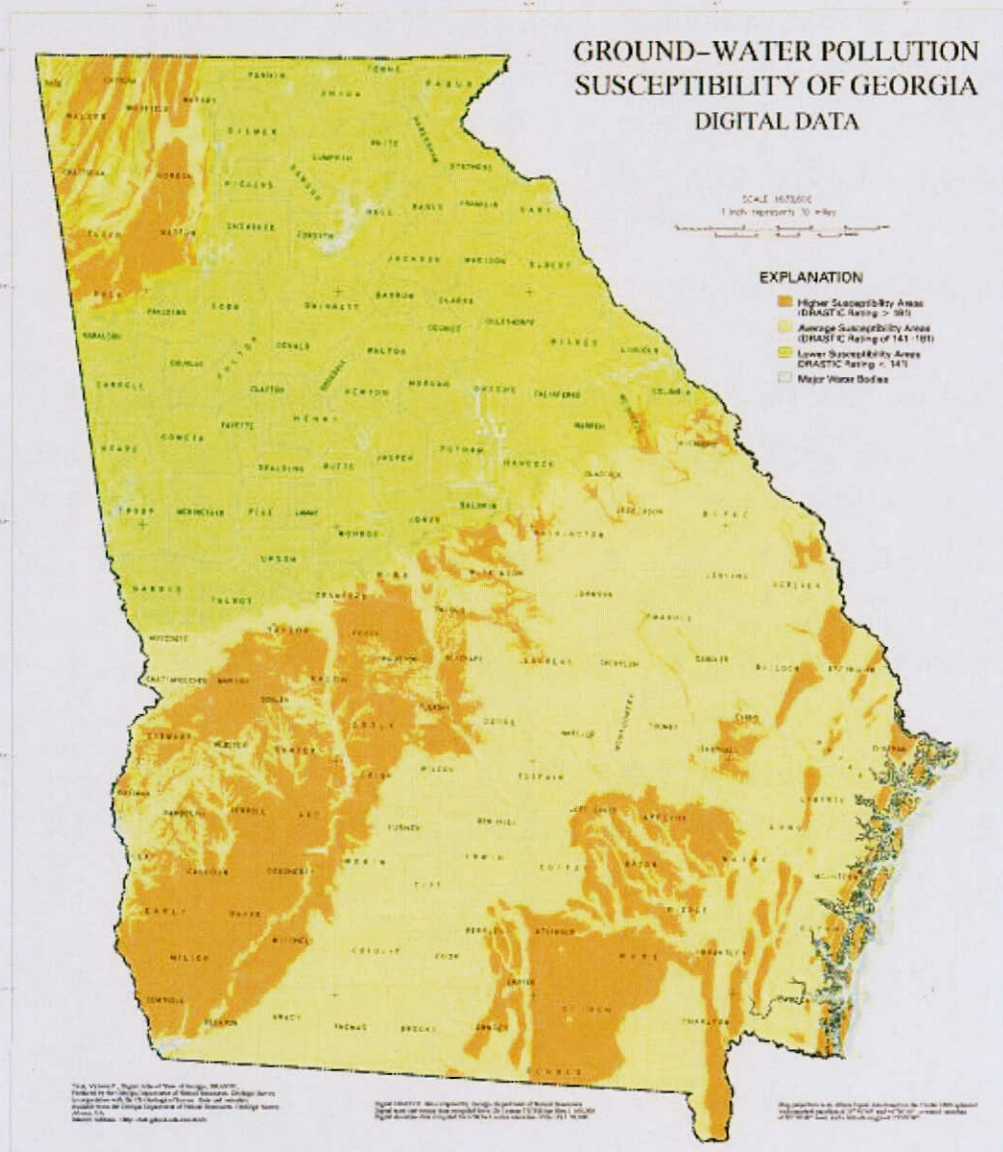


圖 2.1-2 美國 Georgia 州之污染敏感圖

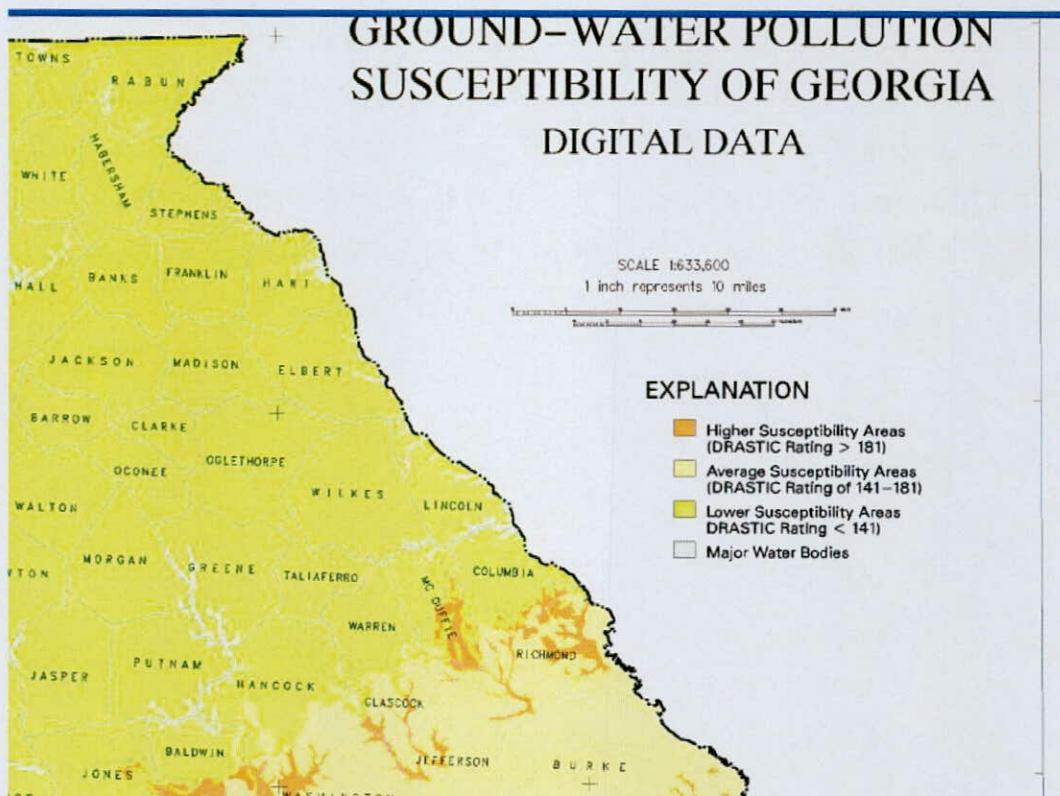


圖 2.1-3 美國 Georgia 州之污染敏感圖局部放大

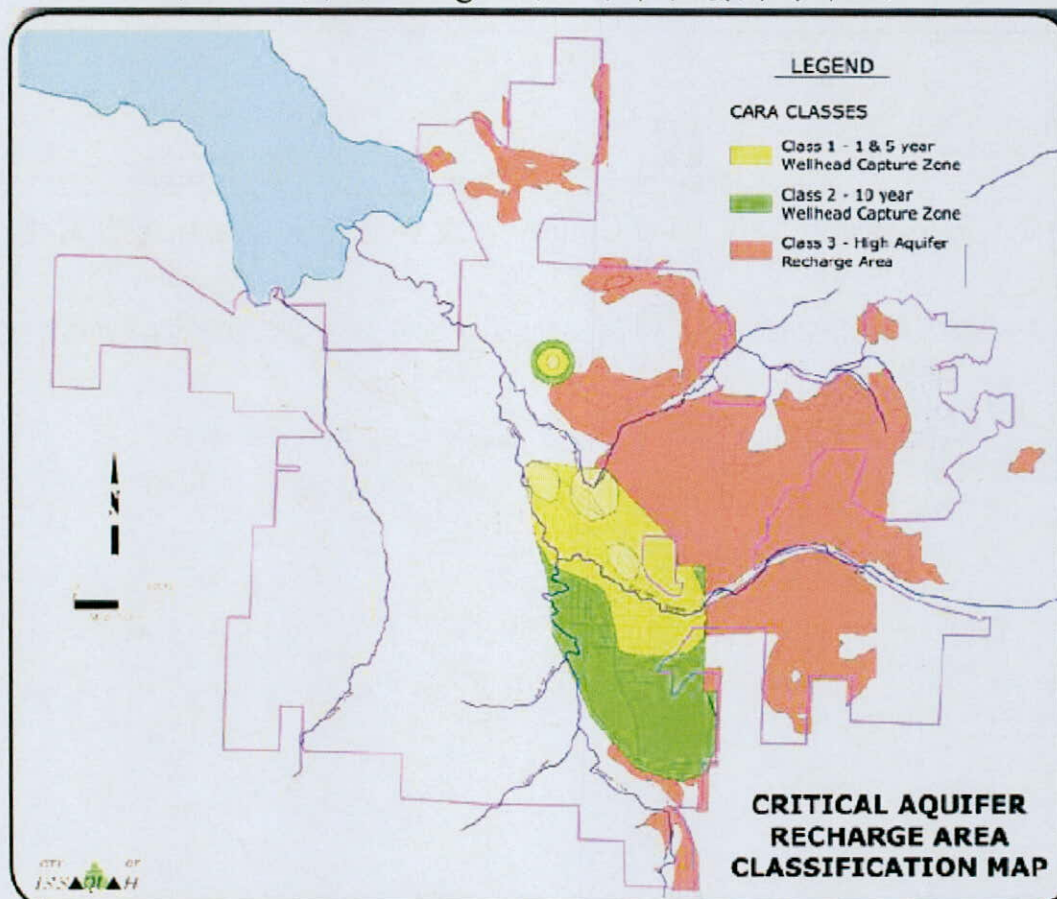


圖 2.1-4 美國華盛頓州 Issaquah 市之重要地下水補注保護區劃設

於地方政府的執行層面，其保護區劃設以華盛頓州 King County 為例，如圖 2.1-5 及圖 2.1-6 所示，為「重要地下水補注保護區」的分布圖(King County, 2010)。所有位於第一區及第二區的工商業，持有一定數量以上的危害化學物質，需擬定 BMP(Best Management Practice)計畫，載明化學物質的清單、處理方法、儲存方法、廢棄方法等(City of Issaquah, 2009)，以利地下水保護及計畫執行。

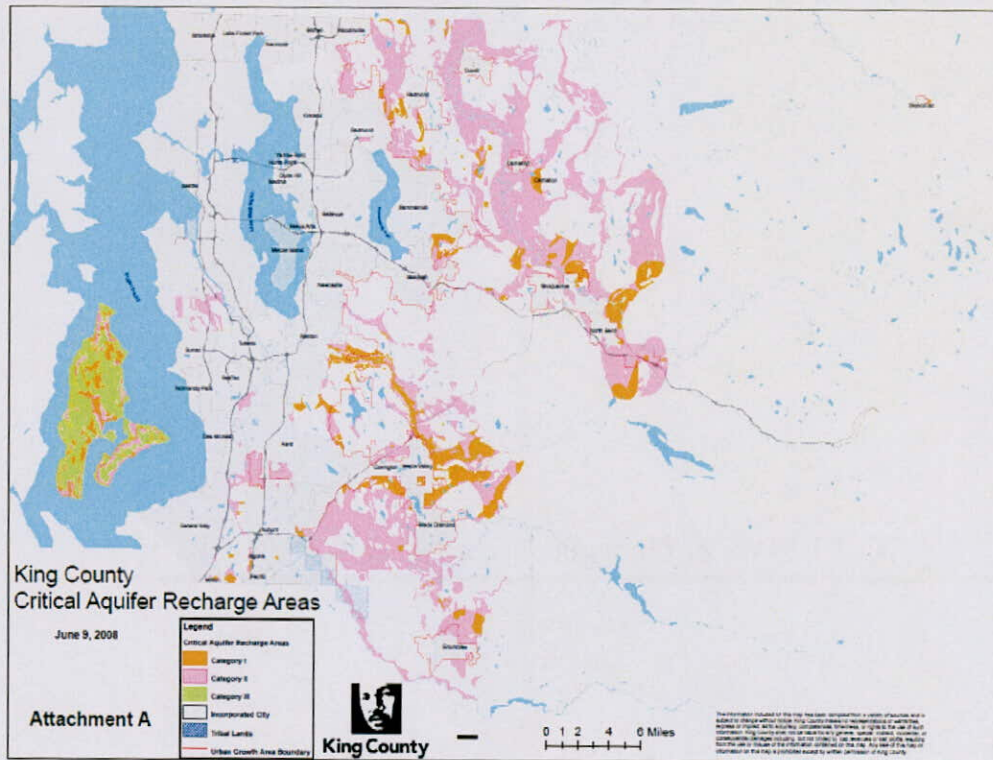


圖 2.1-5 美國華盛頓州 King County 之重要地下水補注保護區劃設

資料來源：

<http://www.kingcounty.gov/environment/waterandland/groundwater/maps-reports/maps.aspx>

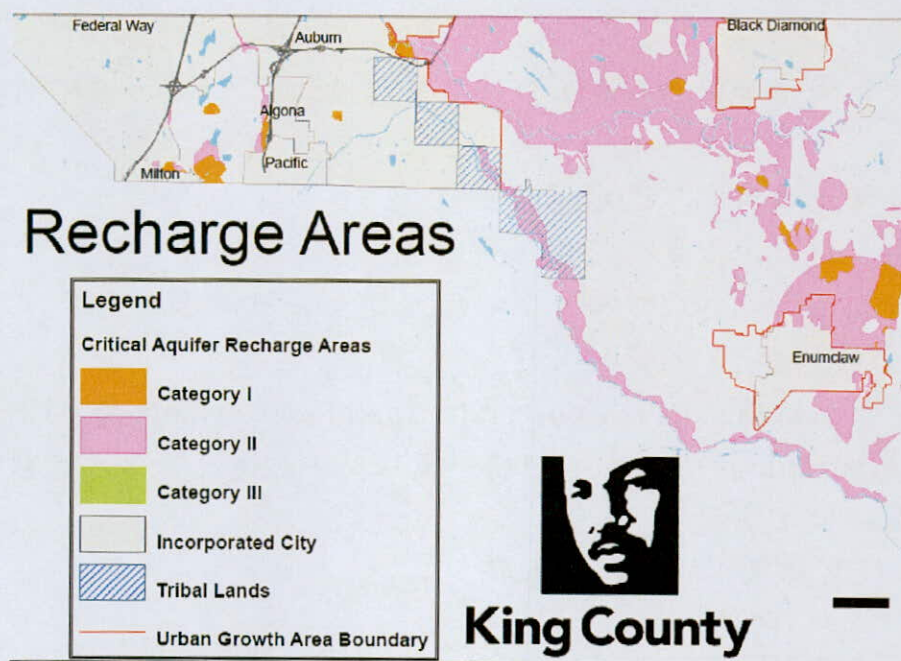


圖 2.1-6 美國華盛頓州 King County
重要地下水補注保護區劃設圖之局部放大

資料來源：

<http://www.kingcounty.gov/environment/waterandland/groundwater/maps-reports/maps.aspx>

2.1.2 喬治亞州的地下水補注區(Groundwater Recharge Area District, GRAD)

美國喬治亞州的地下水補注區屬於水資源保護區(Water Resource Districts)的一部份。該州的水資源保護區分為四類：地下水補注區、濕地、水源集水區、河流(Georgia Department of Natural Resources, 2010)。其中地下水補注區的劃設，主要依據喬治亞自然資源部的第 18 號水文圖(Hydrological Atlas 18, 1989 Edition)，根據圖上的補注範圍，如圖 2.1-7 所示，再依據第 20 號水文圖—地下水污染敏感圖(Groundwater pollution susceptibility map)如圖 2.1-8 所示，將地下水補注區分成三類：高危險、中危險及低危險。

第 18 號及第 20 號水文圖的原始比例尺為 50 萬分之一，此兩幅圖已數值化，可上網查詢喬治亞理工學院和美國地質調查所合作數值地圖，網址 <http://csat.er.usgs.gov/statewide/>。但因比例尺太小，實際上地方政府在執行時，有時邊界並不清楚，州政府建議有疑問時(引起爭議時)，地方政府應尋求專業水文地質師進行補查。

以下為該州地下水補注區之土地使用法規(Georgia Department of Natural

Resources, 2010)：

- (1)地上油槽及化學槽，超過 660 加侖，需有預備的空槽(萬一偵測到洩漏時、可緊急接替)。
- (2)農業廢棄物掩埋場需有不透水材料襯墊。
- (3)社區需設污水道及污水處理設施。
- (4)社區若沒有自設污水處理設施，需將污水送至公有污水廠處理。
- (5)污水處理若不合規定，不得核發建照。
- (6)危害物的定義依據 Resource Conservation and Recovery Act 第 312 條規定，當持有危害物(hazardous materials)超過一萬磅時，需鋪設不透水材料襯墊，並通過防洩漏及防火之法規。

新設污水廠需鋪設不透水材料襯墊。

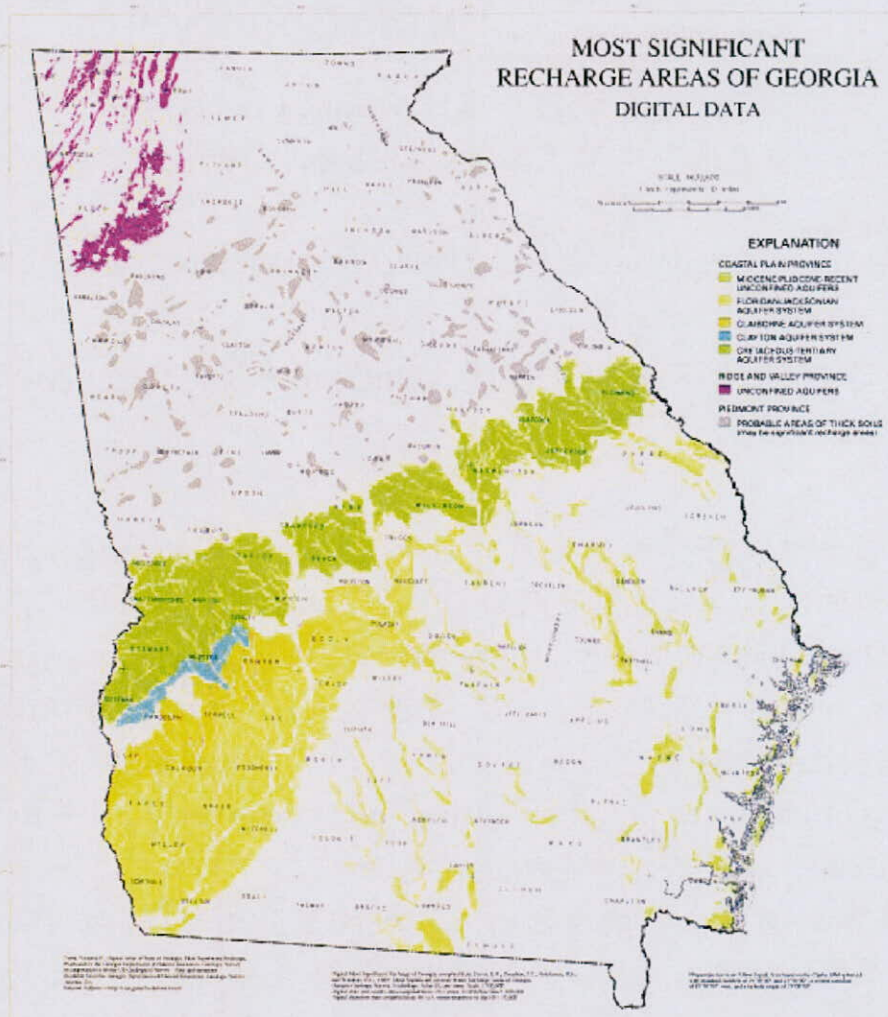


圖 2.1-7 美國喬治亞州的地下水補注區

(數值圖來源：美國地質調查所之地圖資料庫)

<http://csat.er.usgs.gov/statewide/layers/recharge.html>

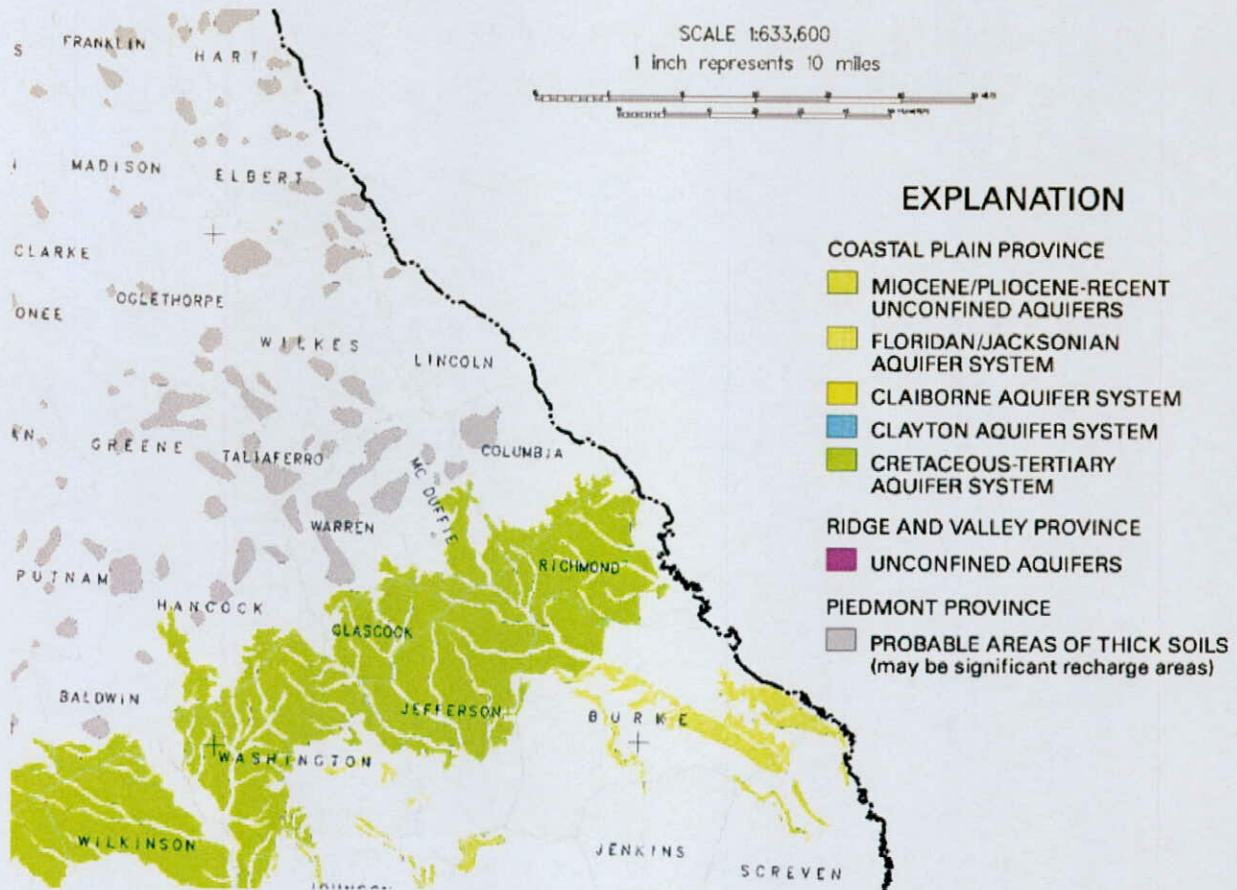


圖 2.1-8 美國喬治亞州的地下水補注區局部放大圖及圖例

(數值圖來源：美國地質調查所之地圖資料庫

<http://csat.er.usgs.gov/statewide/layers/recharge.html>)

2.1.3 台灣的地下水保護

台灣的水源保護以環保署公告之「飲用水水源水質保護區」為之，目前僅公告地面水之保護區，並未保護地下水之水源，如圖 2.1-9 所示。以濁水溪沖積扇為例，此區域地下水為彰化及雲林地區自來水主要的水源之一，全區之自來水井超過一百口以上，如圖 2.1-10 所示，可知該區自來水井分布相當密集，一旦地下水補注區遭污染，將對自來水之供應造成巨大影響。

依據濁水溪沖積扇之地質條件初判，扇頂應為全區地下水之補注來源，該處含水層由礫石及粗砂所組成，若地面之污染向下滲漏，將於短時間內影響地下水水質。然根據環保署土壤及地下水污染整治網之公告 (<http://sgw.epa.gov.tw/public/index.asp>)，雲林地區共有 7 處污染列管場址，如表 2.1-1 所示，其中位於斗六市及古坑鄉的場址，即屬於扇頂補注區的範圍，若污染物向下滲流，將對地下水水質造成相當程度之影響。

國外眾多案例已顯示，事後的清理除了曠日費時，其費用也比事前管制高

出許多，因此為保護珍貴的地下水資源，特別是飲用水水源，應儘速公告「地下水補注區」或「地下水飲用水水源水質保護區」，管制其土地利用，以防範地下水資源遭受污染。

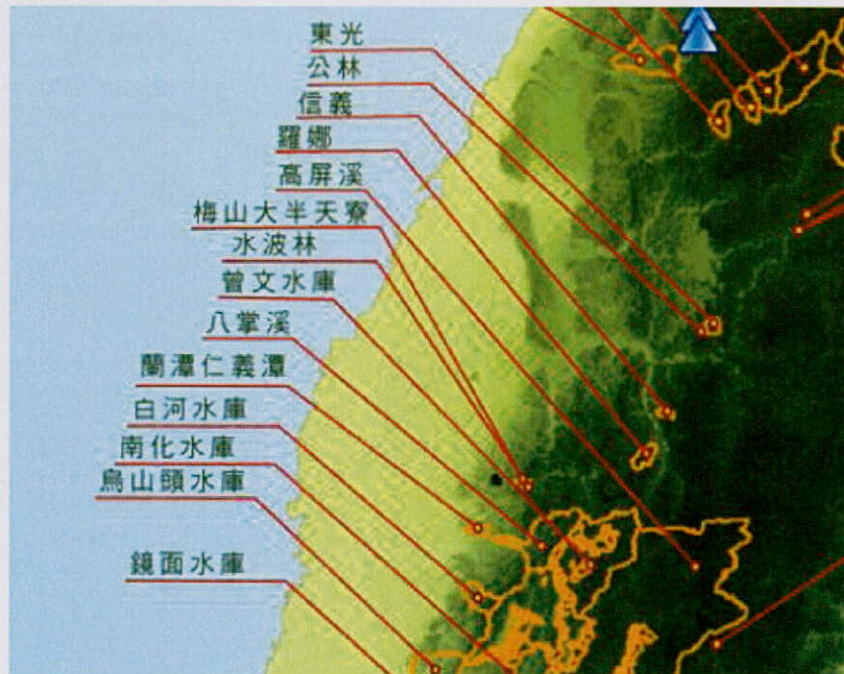


圖 2.1-9 環保署公告之飲用水水源水質保護區

(網址：<http://wsserver.epa.gov.tw/>)

表 2.1-1 環保署公告之雲林縣土壤及地下水污染列管場址

場址名稱	場址坐標	場址地址	場址種類	公告日期	土壤/地下水污染物
大學加油站	X：203894 Y：2621953	雲林縣斗六市林頭里 大學路二段二六八號	加油站	2009/4/29	總石油碳氫化合物/苯
五港加油站	X：169055 Y：2624107	雲林縣台西鄉五港路 653 號	加油站	2006/3/1	無/苯；
永光加油站	X：204010 Y：2613801	雲林縣古坑鄉永昌村 光興路 106 號	加油站	2009/12/11	總石油碳氫化合物；二甲苯/無
全民加油站	無坐標資料	雲林縣台西鄉海豐路 398 號	加油站	2009/1/16	苯；總石油碳氫化合物；二甲苯/苯
統一精工虎尾加油站	X：193030 Y：2623882	雲林縣虎尾鎮安溪里 林森路一段 96 號	加油站	2007/3/13	無/苯；
新南環路加油站	X：204769 Y：2623082	斗六市大學路 1 段 28 號	加油站	2009/4/29	總石油碳氫化合物/苯
環美環保科技有限公司所設乙級廢棄物處理場(衛生掩埋場)場址	X：205889 Y：2624355	雲林縣斗六市八德里 文化路 615 號	其他	2009/6/22	無/總酚

2.2 研究流程

本計畫研究流程主要包含五大項目，分別為「地球物理補充調查」、「地球化學補充調查」、「水文地質鑽探及抽水試驗」、「補注潛勢與地下水水平衡分析」與「地下水主要補注區評估」。前三項主要為現地補充調查與試驗，以提升地下水主要補注區基本資料之質與量，並藉由各種調查與試驗成果，做為水文地質模型建置之依據。第四項則是藉由補注潛勢分析、地下水歷線法與地下水物質模式，評估研究區域之補注潛勢空間分布，統計研究區域現況地下水資源之補注量與抽水量等量值。第五項則進行地下水主要補注區範圍之評估。以下詳述五大項目之主要執行內容。

(一)地球物理補充調查

彙整現有探勘深度，在地下水區岩層基盤以上之近地表，進行地球物理資料探勘，對調查區域水文地質架構有初步了解，再藉由一維地電阻進行補注區邊界初步劃設，最後應用二維地電阻進行補注區邊界細部確認。

(二)地球化學補充調查

針對調查區域地面水與地下水進行水質採樣與分析，藉由兩者之水質分布，檢驗區域水文地質架構之合理性。之後再針對區域內觀測井，建立地下水溫度剖面與導電度剖面，瞭解補注區的地下水來源、地化特性、時空之演變及其機制，以提供地質敏感區劃定之重要參考。

(三)水文地質鑽探及抽水試驗

於調查區域增加水文地質鑽探，藉由岩心取樣、抽水試驗等分析，進一步釐定地下水層和阻水層之垂直及水平方向的延展變化，增加對區域水文地質模型之瞭解。

(四)補注潛勢與地下水水平衡分析

補注潛勢是以各式調查結果，綜合呈現補注潛勢的空間分布。另外，本計畫應用地下水歷線法與地下水數值模式，評估研究區域歷年之水平衡變化，並計算出研究區域年補注量與抽水量之時空變化。

(五)地下水主要補注區評估

地下水主要補注區評估流程如圖 2.2-1 所示，前述各項調查與分析結果皆可作為主要補注區劃分之依據，由地電阻調查結果並搭配電阻門檻值，可劃分

出高電阻區域；由水質調查結果，可依據地下水溶氧量之高低分布，劃分出高溶氧區域；由補注潛勢分析結果，可劃分出高補注潛勢區域。依據前述三種調查分析結果，綜合三種結果並搭配數位地表地形(DTM)與岩芯柱狀圖進行綜合分析與探討，如不同調查結果有不同結論時，則需以專家知識判斷，進一步分析局部區域之邊界。

此外，並應用前述建立之地下水數值模式，搭配前述劃設之主要補注區，探討地下水主要補注區若無妥善管理下，其對整體地下水系統在水量及水質上之影響。

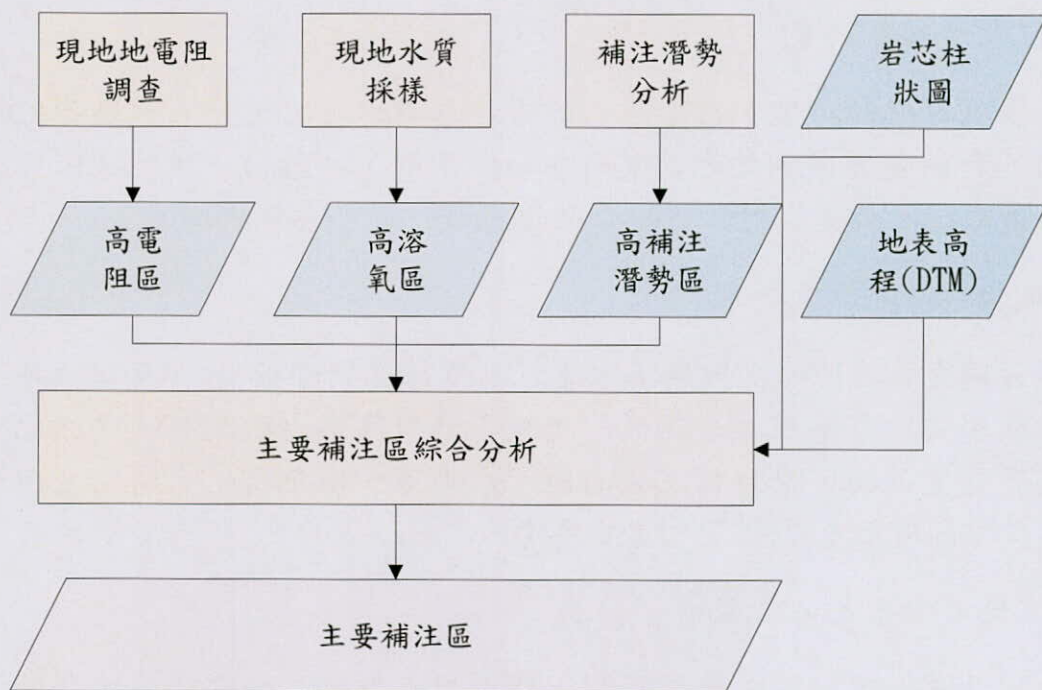


圖 2.2-1 主要補注區範圍建議評估流程

前述研究項目及相關工作細項之執行策略關係如圖 2.2-2 所示，其中「水文地質架構」為中央地質調查所於濁水溪沖積扇之調查成果，本計畫於此基礎上推動後續工作之進行，包括「地下水補注潛勢評估」、「現地補充調查試驗」、「地下水歷線法」、「數值模式建置」、「補注量及抽水量推估」、「主要補注區之初步劃設」及「地下水資源影響評估」。圖中所描述之各個方塊代表各研究項目工作細項，各項目連線尾端之箭頭代表工作細項間之執行先後順序關係。由圖可知，在執行「主要補注區初步劃設」前需先進行「地下水補注潛勢評估」及「現地補充調查試驗」兩項工作細項，其中「現地補充調查試驗」工作細項則包含「水質檢測」及「二維地電阻調查」兩種現地調查試驗項目，而二維地電阻在施測前，除參考地質調查所之水文地質架構資訊外，亦需參考「地

下水補注潛試評估」之分析成果，以規劃出合適之施測地點。之後利用上述「地下水補注潛試評估」、「二維地電阻調查」、「水質檢測」之成果，即高補注潛勢區域、高電阻區域、高溶氧區域，配合水文地質架構及地表地形，初步劃分出「主要補注區建議範圍」，詳細評估流程如圖 2.2-1。在執行「補注量及抽水量推估」時，本計畫以「地下水歷線法」推估垂向補注量、總抽水量及邊界交換量，再以「數值模式建置」建立地下水數值模式並推估淺層含水層淨補注量、深層含水層之各分層抽水量及海岸側向流入量，之後綜合分析兩方法之推估成果，求得各進出地下水系統之水量，以利後續之水平衡分析。此外本計畫利用「數值模式建置」及「主要補注區初步劃設」之分析成果，執行「地下水資源影響評估」，分析主要補注區對濁水溪沖積扇地下水量及水質之影響。

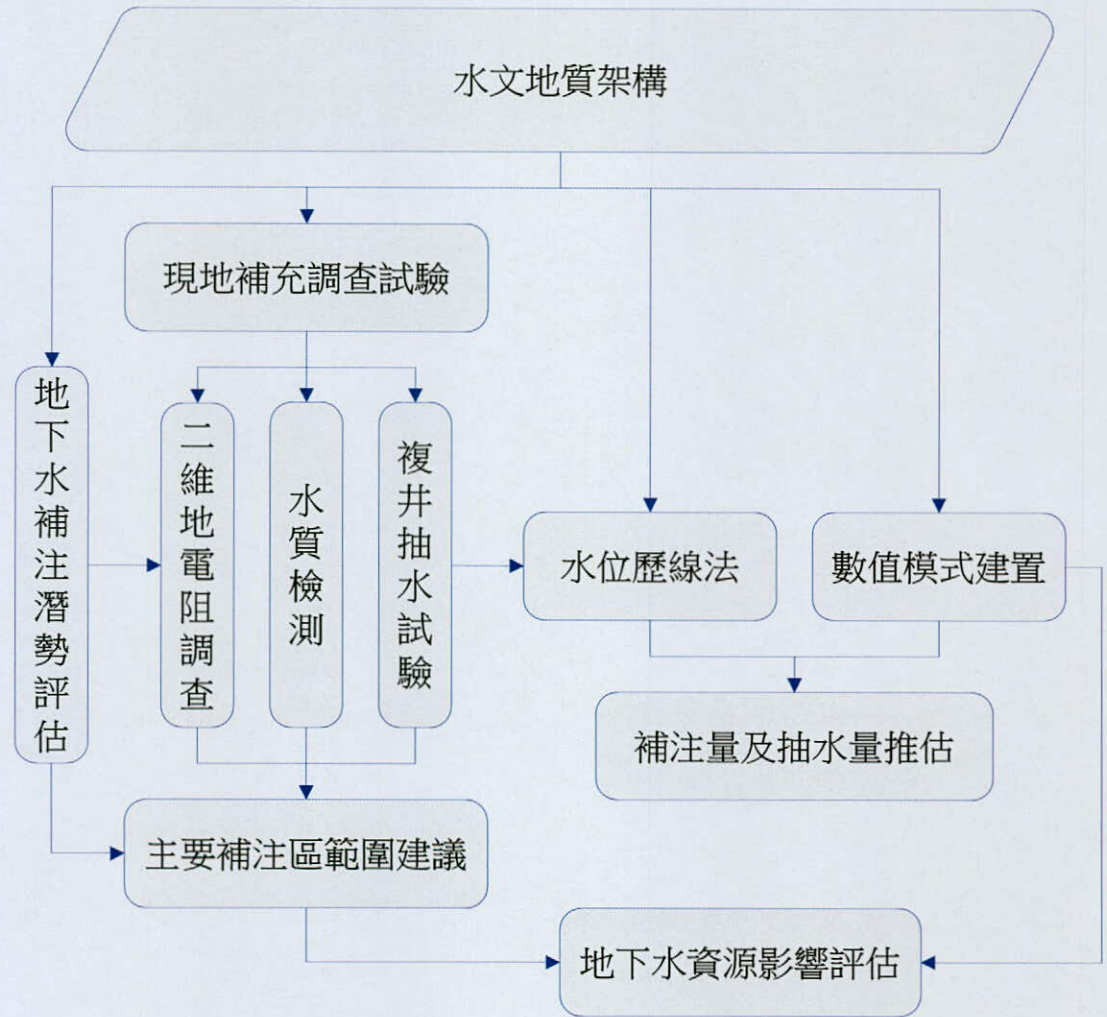


圖 2.2-2 各工作項目之相互關係圖

第三章 區域概述與資料蒐集

3.1 區域概述

本計畫期程自 98 年度至 101 年度，計完成濁水溪沖積扇與屏東平原地下水區，地下水補注區劃分及地下水流模式的建立與分析，並已於 98 及 99 年度完成濁水溪沖積扇，100 及 101 年度完成屏東平原之分析工作，以下將針對濁水溪沖積扇之地下水及水文地質進行摘要描述。

一、區域範圍

濁水溪沖積扇地下水區位於臺灣西部海岸之中段，北起烏溪，南至北港溪南岸，東以八卦台地及斗六丘陵山脊線為界，並沿兩丘陵間之隘口向東擴及竹山、名間一帶，西臨臺灣海峽，面積約 2,079 平方公里。本計畫參考中央地質調查所規劃之地下水區，沖積扇最主要之溪流為濁水溪，其主流發源自中央山脈西翼、合歡山以南與玉山山脈北側之間地區，向西切穿雪山—玉山帶、麓山帶與八卦—斗六丘陵區，在丘陵區西側形成沖積扇系統，主流流經沖積扇之中央，向西注入臺灣海峽。其他位於沖積扇之河川，自北而南尚有舊濁水溪、新虎尾溪、舊虎尾溪及北港溪等。濁水溪沖積扇地勢平緩，高程約介於海拔 0~100 公尺之間。

二、水文地質架構

中央地調所於民國 88 年完成臺灣地區地下水觀測網第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告，並以濁水溪沖積扇 72 站之地層柱狀圖，完成水文地質剖面 1 至 12，其深度達 300 公尺左右，以及丘陵及河谷區之 8 站地層柱狀圖繪製水文地質剖面 13 至 15，其深度約達 250 公尺左右；並以這些剖面為基礎劃分出濁水溪沖積扇概念分層，包括含水層一(F1)、阻水層一(T1)、含水層二(F2)、阻水層二(T2)、含水層三(F3)、阻水層三(T3)、含水層四(F4)及阻水層四(T4)。上述各分層之垂直示意圖如圖 3.1-1 所示。

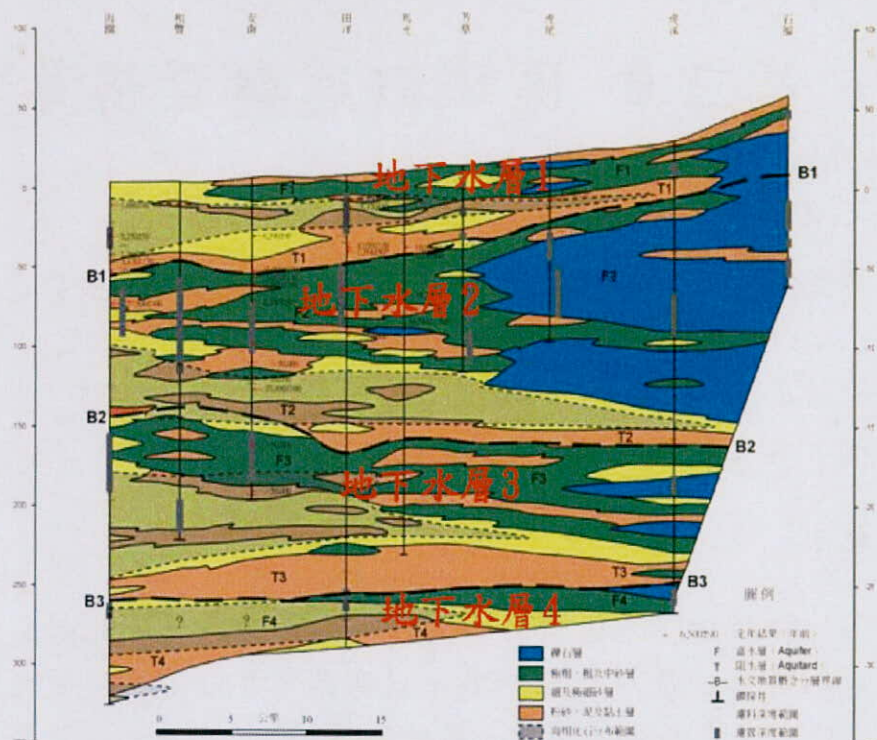


圖 3.1-1 濁水溪海園-石榴水文地質剖面圖

三、地下水觀測

濁水溪沖積扇地區上游河川與相關之地質條件不利建置水庫，仰賴地下水資源比例偏重，所以於第一階段(81 年度至 87 年度)最先實施。目前計有地下水觀測站 82 站(203 口)，抽水試驗站 28 站(55 口)，水文地質調查站 88 站。圖 1.3-2 為濁水溪沖積扇地下水觀測網分布圖。

四、水文地質參數

濁水溪沖積扇大致可區分為扇頂、扇央及扇尾區，扇頂區位於員林、溪州、西螺、虎溪、東和連線以東，各含水層間無明顯之阻水層存在，地面水可直接補注至深層，即所謂濁水溪沖積扇扇頂非受壓含水層區；扇央區位於扇頂層區以西，至好修、趙甲、潭墘、田洋、北港聯線以東，阻水層一覆於含水層一之上，各含水層間有明顯之阻水層存在，地面水無法直接補注各含水層，唯以地層材料而言，砂礫材料所佔之比例較大；扇尾區位於扇央區以西至沿海，含水層一以上亦有阻水層覆蓋，各含水層間亦如扇央區皆有明顯阻水層存在，唯其地層材料中，砂礫所佔之比例較小，而粉砂、泥、及粘土所佔之比例較大。透水係數 K 介於 $10^{-3} \sim 10^{-5} (m/s)$ 之間，導水係數 T 介於 $0.01 \sim 4.19 m^2/min$ 之間，比容量 Q/s 介於 $0.34 \sim 208.33 m^3/hr/m$ ，含水層水力特性以扇頂最佳，扇尾最差。

3.2 資料蒐集

本計畫為了對濁水溪沖積扇進行補注潛勢評估及補注量推估，蒐集濁水溪沖積扇各項資料，如地下水位、雨量、儲水係數、透水係數、硝酸鹽濃度及 GIS 圖層等相關資料，詳述如下。

一、地下水位、導水係數及透水係數資料

本計畫自臺灣地區地下水觀測網-濁水溪沖積扇地下水觀測井建置及相關試驗報告，分別蒐集位於含水層 1(F1)深度內之地下水觀測井共 42 口之導水係數、透水係數等資料，並由經濟部水利署水文水資源資料管理供應系統取得各井每日地下水位資料，整理如表 3.2-1 所示。其各井於各層空間分佈圖如圖 3.2-1 所示。

表 3.2-1 含水層 1(F1)42 口地下水觀測井資料列表

井名	Tmx	Tmy	T(m ² /min)	K(m/min)	蒐集資料區段
洛津(1)	191220	2661365	0.0356	0.00237	1994~2009
線西(1)	195062	2669966	0.2562	0.01278	1994~2009
全興(1)	199630	2674365	0.3325	0.0266	1994~2009
文昌(1)	190120	2656250	0.1488	0.01653	1994~2009
花壇(1)	202725	2658257	0.4113	0.031397	1994~2009
田中(1)	207088	2639188	1.1697	0.00912	1994~2009
二水	210242	2634428	4.18	0.05982	1993~2009
香田(1)	185725	2641405	0.2485	0.016567	1993~2009
田尾(1)	201045	2643280	0.9143	0.041559	1993~2009
合興(1)	194000	2643600	1.5831	0.10554	1993~2009
竹塘(1)	190948	2639823	1.93	0.08658	1992~2009
柑園(1)	201662	2635696	1.861	0.07266	1992~2009
溪州(1)	198371	2639267	0.837	0.0408	1992~2009
竹山(1)	217282	2629020	0.0308	0.0007	1993~2009
鯉魚(1)	213977	2623841	0.0048	0.000091	1992~2009
社寮(1)	220800	2634163	0.0318	0.00151	1994~2009
新民(1)	218500	2634400	0.9864	0.01333	1994~2009
虎溪(1)	199331	2624542	0.2779	0.024275	1994~2009
石榴(1)	206944	2624360	0.02	0.00162	1994~2009

表 3.2-1 含水層 1(F1)42 口地下水觀測井資料列表(續)

井名	Tmx	Tmy	T(m ² /min)	K(m/min)	蒐集資料區段
溫厝(1)	199400	2617408	0.1088	0.00546	1994~2009
芳草(1)	185350	2624184	0.3528	0.015	1994~2009
西螺(1)	194891	2632723	1.031	0.03168	1994~2009
九隆(1)	191168	2627781	0.6462	0.04038	1993~2009
宏崙(1)	182680	2620675	0.4168	0.029771	1997~2009
東和(1)	205251	2620504	0.1436	0.004632	1997~2009
炭腳(1)	202021	2612378	0.065	0.00222	1997~2009
古坑(1)	204980	2615932	0.183	0.00324	1997~2009
舊庄(1)	188020	2614870	0.2511	0.011414	1997~2009
六合(1)	204584	2629706	2775	0.06486	1993~1995,1999~2001,2003~2008
荊桐(1)	197886	2628381	1.3342	0.05448	1997~2009
烏塗(2)	208141	2629528	2.322	0.033	1997~2009
觸口(1)	212782	2629816	0.0952	0.00105	1997~2009
坪頂(1)	212545	2628234	0.0018	0.000017	1997~2009
豐榮(1)	178954	2632222	0.625	0.02046	1997~2009
田洋(1)	178717	2624989	0.9097	0.031369	1997~2009
海園(1)	165467	2624551	0.1543	0.00448	1997~2009
箔子(1)	162598	2614898	0.299	0.01302	1997~2009
明德(1)	167485	2617020	0.0962	0.004373	1997~2009
東光(1)	174905	2616870	0.3785	0.025233	1997~2009
三和(1)	196915	2611594	0.436	0.0291	1997~2009
東榮(1)	191545	2606340	0.0045	0.0003	1997~2009
安和(1)	178980	2601660	0.0672	0.00448	1997~2009

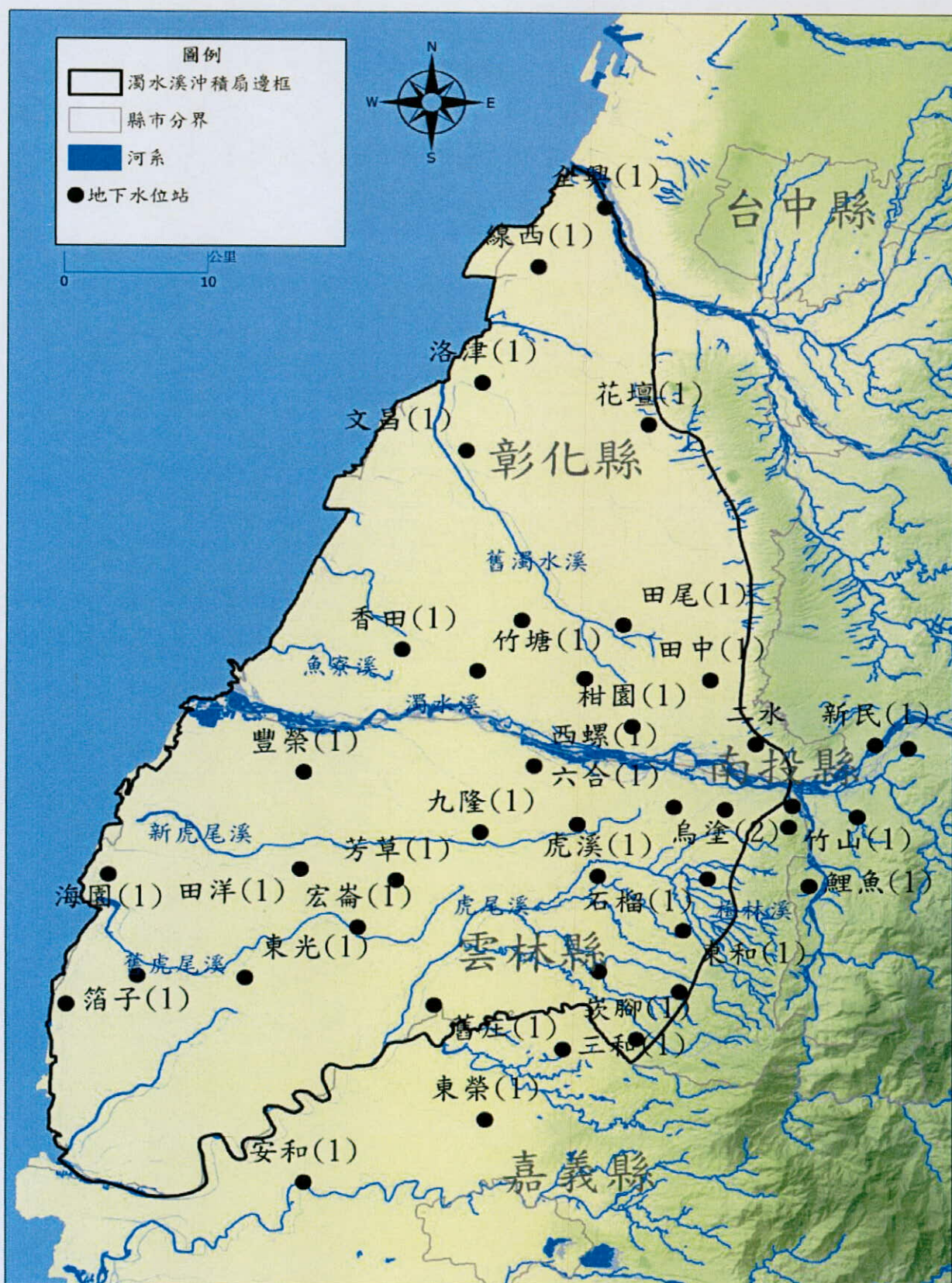


圖 3.2-1 含水層 1(F1)42 口地下水觀測井分布圖

二、儲水係數資料

本計畫參考江崇榮、黃智昭及陳瑞娥(2005)央地質調查所彙刊第十九號，濁水溪沖積扇複井抽水試驗之實測儲水係數，以及 98 年度柑園(1)及荊桐(1)所進行之複井抽水試驗分析結果，共 10 口井，如表 3.2-2 所示。其中荊桐(1)在過去文獻中皆把該井視為非受壓井，但其儲水係數實測值落在受壓含水層之範圍內，再參考本計畫地電阻調查結果，該井應視為受壓井。

表 3.2-2 濁水溪沖積扇複井抽水試驗實測儲水係數

井名	Tmx	Tmy	儲水係數
線西(1)	195060	2669970	0.00448
合興(1)	194000	2643600	0.225
溪洲(1)	198370	2639270	0.216
柑園(1)	201660	2635700	*0.120
二水	210240	2634430	0.199
海園(1)	165470	2624550	0.000191
田洋(1)	178720	2624990	0.00188
荊桐(1)	197890	2628380	*0.0007074
烏塗(2)	208140	2629530	0.152
東光(1)	174905	2616870	0.289
*柑園(1)與荊桐(1)為 98 年度計畫抽水試驗之分析結果。			

三、雨量資料

中央氣象局及經濟部水利署於濁水溪沖積扇設有許多雨量站，可提供詳細的降雨資料。其中中央氣象局於彰化縣、雲林縣、南投縣及嘉義縣北端共有雨量站約 84 站，本計畫蒐集位於濁水溪沖積扇及上游山區其中 40 站資料，如表 3.2-3 所示；經濟部水利署於濁水溪沖積扇共有 25 站，如表 3.2-4 所示，其相關位置圖如圖 3.2-4 及圖 3.2-5 所示。

表 3.2-3 本計畫蒐集中央氣象局雨量站資訊

站名	縣市	Tmx	Tmy	蒐集資料區段
昆陽	彰化縣	276965	2668682	1993~2009
彰化	彰化縣	203932	2664054	1992~2009
員林	彰化縣	207023	2649370	1993~2009
下水埔	彰化縣	205877	2635130	1992~2009
中西	彰化縣	183183	2642354	1992~2009
桶頭	南投縣	213838	2615696	1992~2008
台西	彰化縣	175837	2638698	1993~2009
鹿港	彰化縣	191248	2663701	1993~2009
溪湖	彰化縣	196138	2649622	1992~2009
草湖	彰化縣	185908	2650925	1992~2009
溪州	彰化縣	197851	2638540	1992~2009
西螺	雲林縣	193390	2633727	1992~2009
後安寮	雲林縣	171019	2632140	1993~2009
崙背	雲林縣	179748	2628372	1993~2009
虎尾	雲林縣	192135	2624318	1993~2009
土庫	雲林縣	186937	2620864	1993~2009
褒忠	雲林縣	178588	2622748	1993~2009
四湖	雲林縣	170129	2614424	1993~2009
誼梧	雲林縣	164687	2604794	1993~2003,2006~2009
北港	雲林縣	177181	2607680	1993~2009
草嶺	雲林縣	217879	2610488	1992~2009
大埔	雲林縣	208907	2615586	1993~2009
斗六	雲林縣	199834	2622721	1993~2009
阿丹	雲林縣	199362	2617462	1993~2009
廬山	南投縣	267631	2658945	1993~2008
萬大	南投縣	262579	2653003	1992~2008
武界	南投縣	254497	2645615	1992~2008
文文社	南投縣	251302	2635862	1992~2008
卡奈托灣	南投縣	258127	2628051	1997~2005
丹大	南投縣	263535	2627993	1992~2004
青雲	南投縣	243999	2633002	1993~2008
龍神橋	南投縣	236100	2630885	1993~2008
望鄉	南投縣	240079	2613101	1992~2008
信義	南投縣	233965	2620889	1992~2008

表 3.2-3 本計畫蒐集中央氣象局雨量站資訊(續)

站名	縣市	Tmx	Tmy	蒐集資料區段
溪頭	南投縣	229513	2617757	1992~2008
和社	南投縣	237837	2609934	1992~2008
集集	南投縣	226256	2636066	1993~2008
鳳凰	南投縣	227484	2625143	1992~2008
大鞍	南投縣	224671	2619672	1992~2008
竹山	南投縣	217156	2629039	1992~2008



圖 3.2-4 中央氣象局雨量站位置圖

表 3.2-4 本計畫蒐集經濟部水利署雨量站資訊

站名	縣市	Tmx	Tmy	蒐集資料區間
頭汴	彰化縣	196708	2664771	1990~2009
萬興(2)	彰化縣	189832	2650413	1990~2009
鹿港(2)	彰化縣	192167	2672633	1990~2007
六分寮	南投縣	212320	2647102	1990~2009
龍神橋	南投縣	236093	2630868	1990~2009
集集(2)	南投縣	226238	2636009	1990~2009
桶頭(2)	南投縣	214240	2615918	1990~2009
翠峰	南投縣	269429	2667093	1990~2006,2008~2009
望鄉	南投縣	241806	2613068	1990~2009
東埔	南投縣	241857	2606707	1990~2009
卡奈托灣(2)	南投縣	258508	2627420	1990~2009
關門	南投縣	267433	2624888	1990~2009
西巒	南投縣	240774	2623180	1990~2009
內茅埔(2)	南投縣	234059	2620973	1990~2009
大埔	雲林縣	209931	2614352	1990~2009
草嶺(2)	雲林縣	218105	2609212	1990~2009
北港(2)	雲林縣	177912	2608667	1990~2009
西螺(2)	雲林縣	194639	2633240	1990~2009
林內(1)	雲林縣	209670	2628180	1990~2009
褒忠(2)	雲林縣	178913	2622300	1990~2009
塭港	嘉義縣	161875	2596425	1990~2005,2007
溪口(3)	嘉義縣	187931	2609686	1990~2009
中坑(3)	嘉義縣	200270	2607743	1990~2009
樟腦寮(2)	嘉義縣	208592	2603575	1990~2009
新高口	嘉義縣	233701	2596708	1990~2009



圖 3.2-5 水利署雨量站位置圖

四、GIS 圖層資料

本計畫進行濁水溪沖積扇補注潛勢評估，需大量地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)圖資，除研究之地下水區基本圖資外，尚需依考量之補注潛勢因子蒐集對應之 GIS 圖資，部分點位資料也藉由內插至各網格製作成圖面之 GIS 圖資，本計畫蒐集之圖資來源如表 3.2-5 所示。

表 3.2-5 本計畫蒐集圖資資訊

圖層	圖資來源	數據來源
土地利用	內政部國土測繪中心 (2007 年)	內政部國土測繪中心(2007 年)
表層土壤種類	行政院農業委員會農 業試驗所(1997 年)	行政院農業委員會農業試驗所(1997 年)
降雨與地下水位 相關性	本計畫製作	降雨量：中央氣象局、經濟部水利署 地下水位：經濟部水利署
平均年降雨量	本計畫製作	中央氣象局、經濟部水利署
單位蓄水量變化	本計畫製作	地下水位：經濟部水利署 儲水係數：中央地質調查所彙刊第十九號 P.68、69，本計畫 98，99 年度現地試驗 分析結果
透水係數	本計畫製作	K 值：台灣地區地下水觀測網第一期計畫 -濁水溪沖積扇地下水觀測井建置及相關 試驗報告
河系密度	經濟部水利署	經濟部水利署
硝酸鹽濃度	本計畫製作	經濟部水利署

五、地下水位資料檢核

本計畫將資料由 1997 至 2009 年的資料進行檢驗時，發現濁水溪沖積扇各觀測站淺層水井在 1997 及 2004 普遍有長時間且連續短缺資料的情況，如表 3.2-6 所示，表中依扇尾、扇央和扇頂位置呈現各年缺漏百分比，可知 1997 及 2004 年的缺漏百分比大約在 25%以上，若直接使用原始資料進行分析，易因資料連續性不足造成分析結果誤差過大，故將分析年份縮短為 1998 至 2003 年與 2005 至 2009 年，並將缺漏資料的天數區分為兩類，以不同方法進行補遺，分別為：

(1)連續缺漏未達 10 天，以線性內插進行補遺；(2)連續缺漏超過 10 天，以標準作業程序，如圖 3.2-6 進行補遺。

表 3.2-6 1997-2009 年地下水位原始資料缺漏統計表

年份	扇尾	扇央	扇頂
1997	29.38%	33.26%	10.91%
1998	0.03%	0.00%	0.00%
1999	0.00%	0.02%	1.05%
2000	0.03%	0.27%	2.05%
2001	0.37%	1.12%	2.88%
2002	0.12%	0.82%	0.00%
2003	0.43%	1.00%	4.32%
2004	41.07%	38.40%	38.81%
2005	0.16%	0.00%	1.96%
2006	1.71%	0.00%	0.80%
2007	0.16%	0.00%	1.96%
008	7.49%	5.05%	5.27%
2009	4.02%	0.00%	2.59%

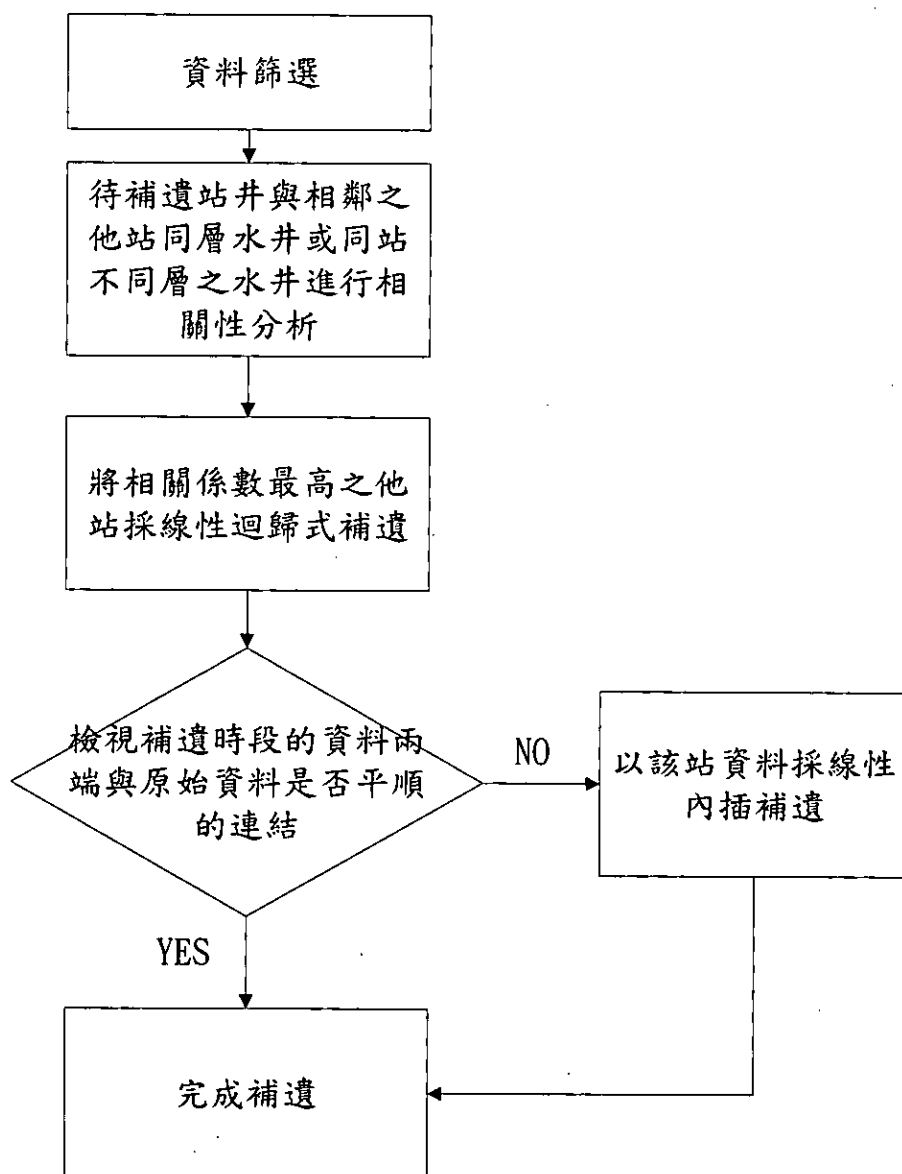


圖 3.2-6 地下水位資料連續缺漏超過 10 天之補遺標準作業程序

第四章 現地調查與分析

目前本計畫主要補注區之劃設，乃是先以補注潛勢分析，計算區域內補注潛勢空間分布上之相對大小，再以其為基礎，配合過去濁水溪沖積扇垂直一維地電阻探勘結果、地質鑽探及以往相關研究所得之水文地質架構資訊等，初步判斷主要補注區之範圍，接著再以地電阻調查對此範圍邊界進行相互驗證。

4.1 地電阻調查與分析

濁水溪沖積扇扇頂補注區地質主要為厚層之礫石層所組成，因此常形成良好之入滲通道，使得天水與地表水可沿礫石層較疏鬆之間隙而補注至淺層之非拘限含水層(Unconfined aquifer)，甚至是較深層之受壓拘限含水層(Confined aquifer)；而漸至沖積扇尾地區，近地表之沉積物則逐漸轉變為厚層之泥層，形成良好之阻水層(Aquitard)。由沉積物之導電特性來看，飽和之礫石層與泥層具有截然不同的反應，一般而言，礫石層具有較高之電阻率(約 10~100 Ohm-m)，而泥層則電阻率極低(約 1~10 Ohm-m)，由於上述礫石層與泥層之空間分佈特性，因此可以快速的由地電阻剖面上辨識出沖積層之礫石與泥層分布之情況，配合地區已有之鑽井資料，可以快速的協助判斷及確定厚層礫石所形成的補注區域的範圍，因此，地電阻調查可以為劃設補注區範圍之重要依據。

4.1.1 二維地電阻原理及施測方式

一、地電阻率測勘原理

一般影響地下地層電阻的因素有岩性、礦物組成、含水量、孔隙率、孔隙水組成及溫度等，當地層層序變化造成明顯的層間電阻率對比，或是地下有不同電阻率目標之存在，例如隧道、埋藏金屬物、未爆彈(UXO)等，就適用於地電阻方法作為探測工具。地電阻法之測勘原理，乃利用直流電或低頻交流電流經由一對電極(A、B)通入地下，於地下建立人工電場。並利用另一對電極(M、N)測量電場在 M、N 間之電位差(如圖 4.1-1)，而據此計算地層的視地電阻率(Apparent Resistivity)，進而再運用反推計算方法推求地層真實地電阻率(True Resistivity)。

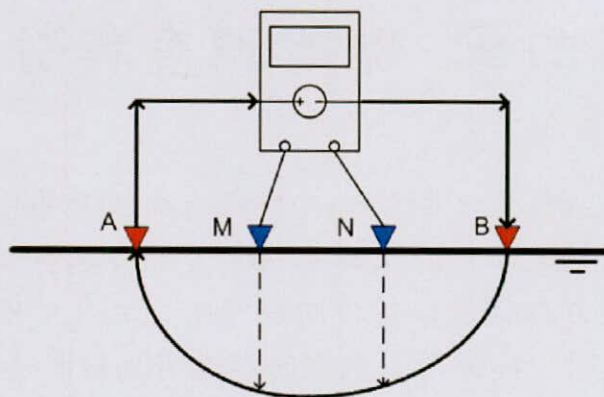


圖 4.1-1 地電阻探測儀器示意圖

根據歐姆定律，電流(I)與電壓(V)成正比，而與電阻(R)成反比

$$V = IR \dots\dots\dots (式 4.1-1)$$

當電流通過不同的地質材料時會因為電阻性質不同，而測得不同的電位差；而電阻性質的大小則又決定於電流流過地質材料之流線長度和流線之總截面積，以及物質的內部性質(即電阻率(ρ))有關，可進一步表示為

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots (式 4.1-2)$$

$$\rho = R \frac{A}{l} \dots\dots\dots (式 4.1-3)$$

上式中，R 為電阻， ρ 為電阻率， l 為電流流線的長度， A 為電流線的總截面積。在任一均質的地表通入電流強度為 I 之直流電，因為空氣為絕緣體，因此電流會同經由導入點呈放射狀向外流出，成為一個半球面(如圖 4.1-2)體。而電流是等量的分配在每一個地方，所以距通入電流 r 處，電位(V)也相等，若在均質的地表定義極薄的殼層為 dr 。

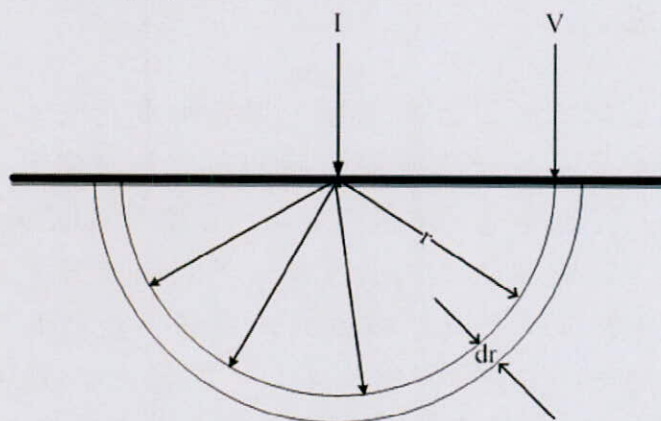


圖 4.1-2 電流流動示意圖

則透過歐姆定律(4.1)式定義電位差穿過此殼層電位差為

$$dv = I(R) = I\left(\rho \frac{l}{A}\right) = I\left(\rho \frac{dr}{2\pi r^2}\right) \dots\dots\dots (式 4.1-4)$$

故距單電流極 D 之任一點其電位為

$$V = \int_D^{\infty} dv = \frac{I\rho}{2\pi} \int_D^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho I}{2\pi D} \dots\dots\dots (式 4.1-5)$$

以上述公式為基礎，地電阻法(Geoelectric Resistivity Method)測勘之基本原理為：假設在均質的地面上任意布上四根電極(A, M, N, B)，經由一對電極(A, B)導入直流電或低頻之交流電，於地下建立人工電場；並利用另一對電極(M, N)測量電場在 M, N 間之電位差如圖 4.1-3，據此即可計算該地層的視電阻率(Apparent Resistivity)由式(4.5)推出

$$\Delta V = (V_{AM} - V_{AN}) - (V_{BM} - V_{BN}) = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]$$

$$\rho = \frac{\Delta V 2\pi}{I} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \dots\dots\dots (式 4.1-6)$$

令

$$K = 2\pi \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1}$$

式(4.1-6) 可進一步縮寫為下式：

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \dots\dots\dots (式 4.1-7)$$

其中， ΔV 為電位差 $V_{AM}, V_{BM}, V_{AN}, V_{BN}$ 為電流極對電位極的絕對電位， AM, BM, AN, BN 為電極至電極間的距離，K 為幾何排列因子(Geometric Factor)。

但往往視電阻率並不能代表地下地層的真實電阻率(True Resistivity)，而是表示在對應之電極排列下，所有小於此深度的電性地層的綜合效應，而要求得地下地層的真實電阻率及深度需經過反演計算(逆推)的軟體處理才可求得，並繪出地層的電性影像，上述的作法又稱為“地電阻率的剖面影像法”。

二、二維地電阻影像剖面方法

地電阻量測可以藉由改變上述電極排列方式以及施測之位置與順序，以測得不同解析度、不同測深範圍之地電阻率剖面。常見的地電阻測勘的電極排列法甚多，各有其探測上的優點與限制，野外施測所選定使用的方法，則視欲探測目標及施測地點的地形而異。一般基本之常用電極排列有：施蘭卜吉排列(Schlumberger Array)、溫奈排列(Wenner Array)、雙偶極排列(Dipole-dipole Array)及雙極排列(Pole-pole Array)等。

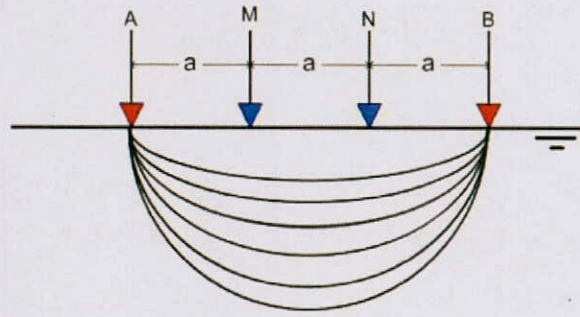


圖 4.1-3 溫奈排列(Wenner Array)示意圖

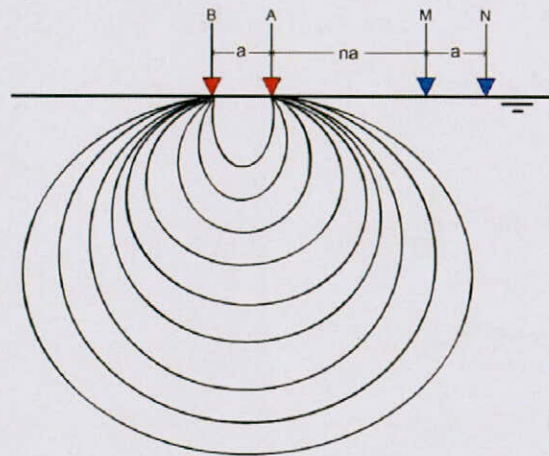


圖 4.1-4 雙偶極排列(Dipole-dipole Array)示意圖

目前一般現地地電阻測量方式則是運用上述之電極排列法，於地表沿一直線測線，順序改變電極間距與電極位置，如此可以測得沿測線之不同深度、不同位置之視電阻率分佈，此種方法稱之為(二維)地電阻影像剖面法(Resistivity Image Profiling, RIP)。由於地電阻影像剖面法需逐次移動電流與電位之電極，因此施測上往往極為耗費時間。對於中小範圍的環境監測與地下測勘，可以於地表以一定間距佈設電極，運用地電阻儀器內建之自動調變頻道功能，依預先選定之順序，逐次選用不同位置之四處電極分別作為電流與電位極，如此可大幅減少移動電極之時間，另外由於可以運用反饋疊加訊號，因此可減少訊號中之雜訊並提高解析度與增加施測深度，大幅提高影像解析度。



圖 4.1-5 二維地電阻剖面影像探測示意圖

本計畫所採用的儀器為美國 Advanced Geosciences, INC.(AGI) 公司之 SuperSting R1/IP 地電阻儀，並連接可由電腦程式控制調變頻道之 SmartCable 系統，此系統可選用特製之水下電極進行湖盆或海底地電阻探測，最多可以同時接連 256 根電極，進行快速、高密度之地電阻影像剖面量測。本計畫所採用的反演算數值軟體為 AGI 所開發出之二維地電阻影像逆推反算程式 EarthImager 2DTM。EarthImager 2D/3D 之反算程式可根據各種不同電極排列，與施測位置順序等資料，自動反推計算出半球面空間中的二維地電阻模型，並可根據已知資料如透地雷達測勘資料等，設定起始模型，最後產生地電阻影像剖面模型。

4.1.2 施測結果與分析

目前本計畫主要補注區之劃設，乃是先以補注潛勢分析，計算區域內補注潛勢空間分布上之相對大小，再以其為基礎，配合過去濁水溪沖積扇垂直一維地電阻探勘結果、地質鑽探及以往相關研究所得之水文地質架構資訊等，初步判斷主要補注區範圍之大致分佈區間，再以其為基礎進行二維地電阻調查與相互驗證。現地二維地電阻調查時，乃先於初判邊界的一側選定適當地點施作地電阻，如果施測結果出現連續低電阻反應(連續泥層)代表此測線位於扇尾的低電阻(非補注區)範圍，第二條測線施測地點移至預測邊界東側，結果若為高電阻值反應(砂或礫石)，則代表此測線位於高電阻(扇頂的補注區)範圍，第三條測線則再選定於第一條和第二條測線間進行施測，如此反覆進行夾擠施測，藉以找出高電阻區域邊界(砂泥漸變帶)的詳細範圍。

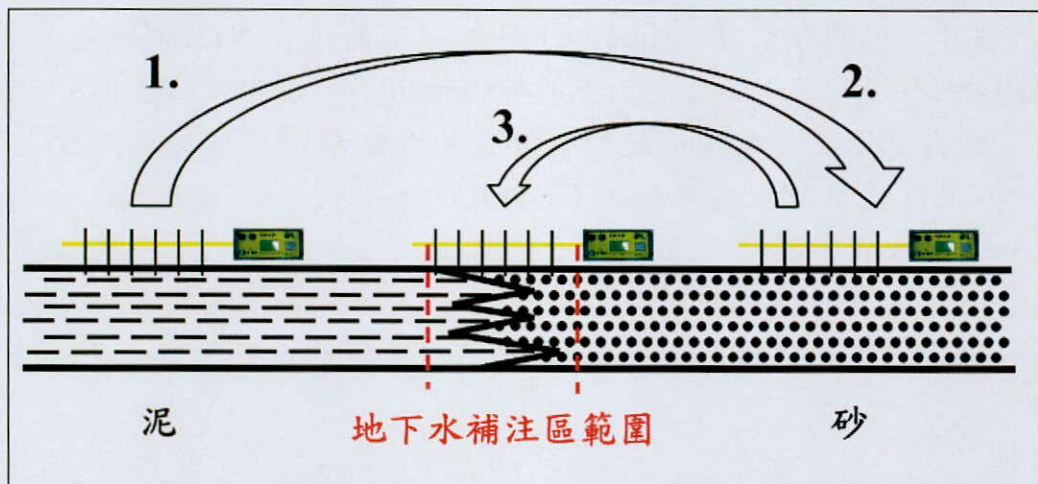


圖 4.1-6 地電阻平移式陣列施測方式示意圖

本計畫中的測線所使用最多 40 個電極，電極間距 10 公尺，每一條單獨測線最長可達到 400 公尺長，在選擇單一施測場址上，盡量選擇直線可達 400 多

公尺的地方，並避開可能造成資料干擾的物體，如人造建築、水井、金屬網、電線桿、高壓電塔等，但由於實際上不太可能避開所有可能干擾物，因此另將測線上可能造成干擾的物體，記錄在筆記上供後續資料處理時移除干擾參考。

本計畫 98 年度於濁水溪北岸的彰化地區，完成柑園觀測井、竹塘觀測井附近長度約 300 公尺之兩條短距離測線，比對岩心紀錄及井測資料，作為長距離測線研判分析邊界位置之用。並於柑園，溪洲，北斗，社頭四區域(如圖 4.1-7)，以過去濁水溪沖積扇地球物理探測與地層對比報告(工研院能源與資源研究所，1996)中，由垂直地電阻探勘結果所研判之邊界可能位置作為起點，進行長距離(1 公里以上)地電阻施測，共完成柑園(N10、N11)、溪洲(N8、N9)、北斗(N6、N7)、社頭東西向(N1)，以及社頭南北向 (N2~N5)等五條長測線。

由完成之地電阻剖面影像對比後發現，藉由高解析度(電極間距 10 公尺)左右所進行之側向長距離地電阻施測，可以有效協助高電阻區域之邊界判釋。由沉積學上來說，分隔深淺含水層之泥層並非延伸性良好的”單層”水平層，而應可能為不斷重疊出現或局部尖滅之凸鏡體狀構造。由各處長測線之結果來看，低電阻率所代表之泥層也有類似上述之局部尖滅或重疊出現之構造。因此就剖面影像解析度而言，大致上反映了地質分佈之狀況。也因此印證利用地電阻剖面影像描繪阻水層分佈之可能性。

由 N11 測線水平相對距離 1000-1200 公尺之泥層低電阻分佈範圍逐漸有不連續之情形，加上 N10 測線水平距離約 150 公尺後之泥層連續性逐漸變差，以及出現頻率變少，而在測線水平距離約 240-600 公尺處，反應泥層之低電阻率分布幾乎消失。顯示應已完全進入高電阻區域範圍內。因此本計畫研判高電阻區域之邊界，並非一個明顯的界線(boundary line)，而是應在 N11 測線之 1000-1200 公尺到 N10 測線 150 公尺間之一個邊界帶(boundary zone)。而在 N8 測線 1120 公尺以東，也出現泥質低電阻層延續性變差，且斷續出現之頻率減少之情形，相同的在 N6 測線左側測線尾端約 1160 公尺向東，至左側測線 150 公尺處，判斷也同為一過渡漸變邊界帶，而在此一邊界帶以西，泥層已幾乎很少出現，判斷應已完全進入高電阻區域範圍。經檢視各剖面之高電阻區域帶分佈位置，本計畫可以研判其分布範圍位置，約在圖 4.1-7 綠色線之位置。

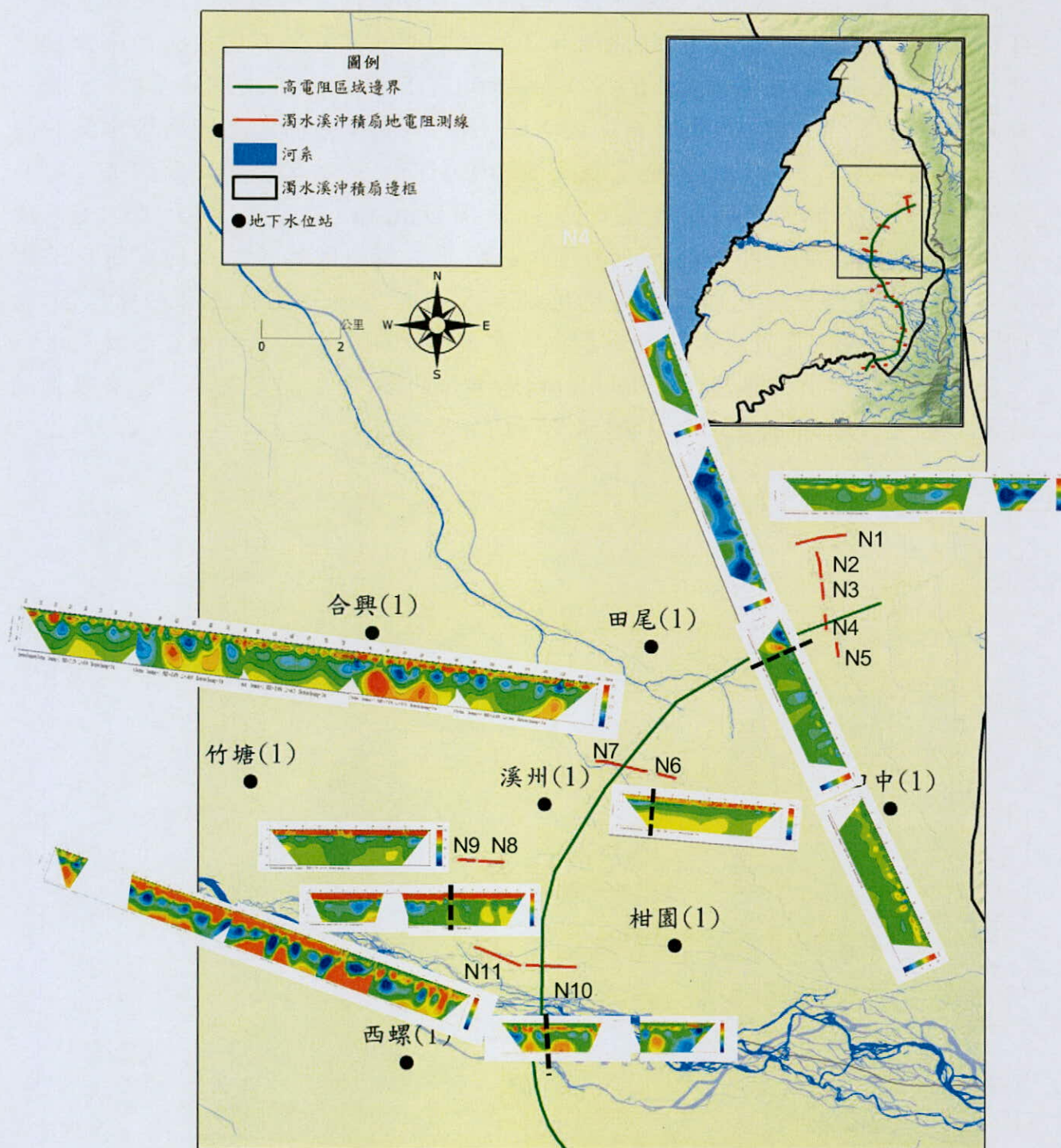


圖 4.1-7 地電阻調查測線與判斷之彰化地區濁水溪沖積扇高電阻區域邊界

本計畫 99 年度於雲林地區之濁水溪沖積扇，完成六個主要測線區域用以夾擠出可能之邊界位置，共完成 16 條測線和 3 條標準測線。五個測區由北向南分別為荊桐測區(S1~S5)、虎溪測區(S6、S7)、斗六測區(S8、S9)、斗南測區(S10、S11)、崁腳北測區(S12、S13)、崁腳南測區(S14~S16)，測線分佈雲林地區濁水溪沖積扇全區(圖 4.1-8)。依據二維地電阻反演影像剖面對比結果發現：荊桐區測線具有低電阻值的阻水層地層訊號大多約為 1~10 Ohm-m，深度約 14-55 公尺處。比較荊桐區、虎溪區、斗六區、斗南區、崁腳北區與南區測線二維地電阻反演影像剖面後即可發現，遠離濁水溪的區域如斗南區、崁腳區的阻水泥層厚度(約 10 - 15 m)普遍比靠近濁水溪的荊桐區、虎溪區之測線，經二維地電阻反演之影像剖面中所顯示出的厚度(約 20 - 40 m)還要薄的多；且在垂直深度上也有變淺的跡象，由地表深處(約 15-20 m)遞減至(約 5 - 15 m)。

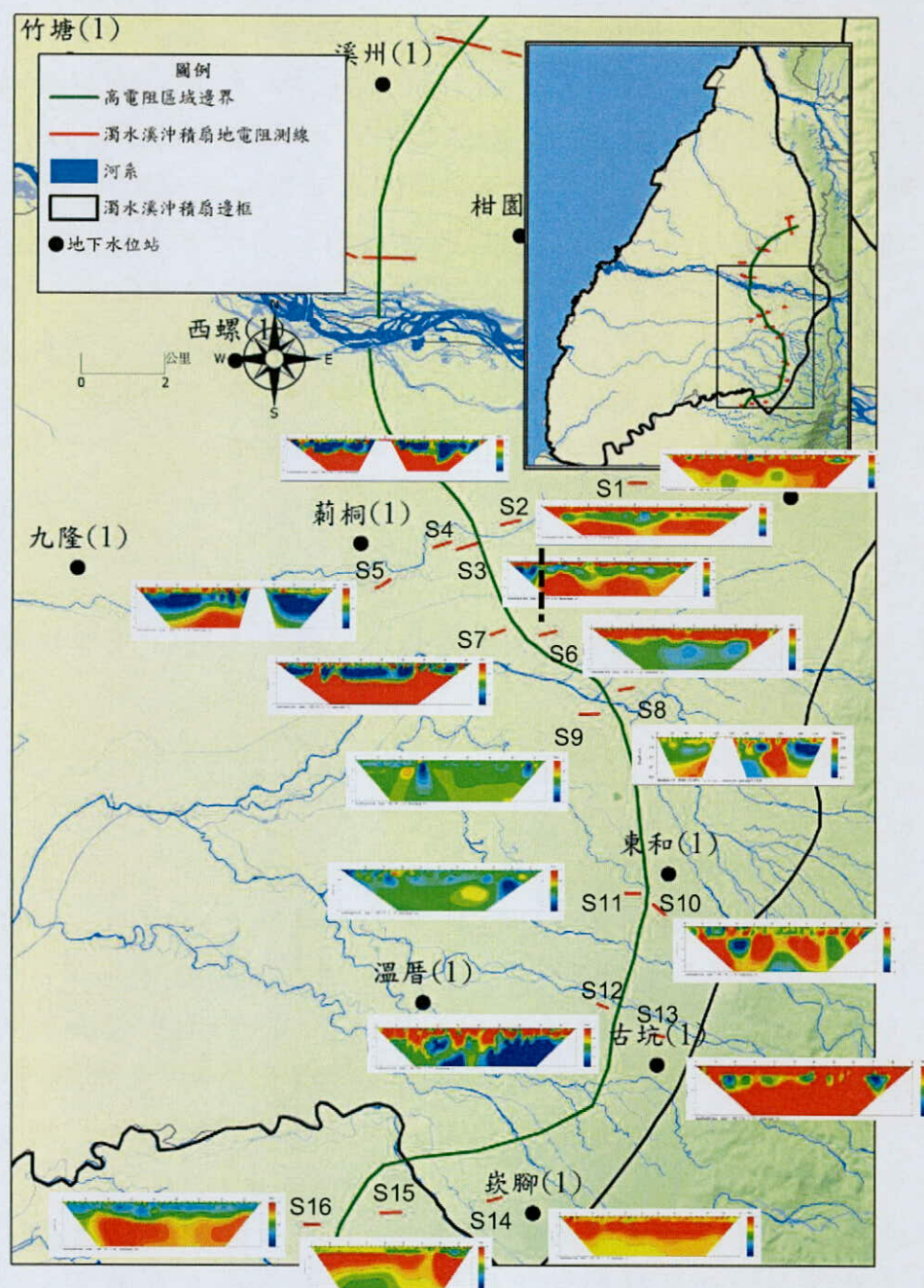


圖 4.1-8 地電阻調查測線與判斷之雲林地區濁水溪沖積扇高電阻區域邊界

綜合前述分析可知，由於虎尾溪的作用，造成濁水溪南岸的補注區邊界在判斷上較北岸彰化地區更複雜。泥質(難透水層)的分布，因為虎尾溪的作用，泥層(難透水層)在虎溪區域的分布比起荖桐區測線還要稍稍往西，但到了斗六以南則向東內縮至接近斗六丘陵一帶(如圖 4.1-8 綠線所示之邊界)。

4.2 水質調查與分析

為了配合地下水補注潛勢研究，增加補注計算及補注區劃定的精度，本項工作補調查扇頂補注區的水質，探討水質地化背景，瞭解補注區的地下水來源、地化特性、時空之演變及其機制，以提供地下水水質保護區劃定的重要參考。

本項工作之主要四項工作目標：(1)調查扇頂區的地下水水質現況及趨勢，例如導電度、主要離子成份等，以了解是否有鹽化的趨勢？(2)地下水中的硝酸鹽污染之持續監測，以了解其污染現況。(3)調查扇頂區地面水的水質現況及趨勢，例如導電度、主要離子成份、硝酸鹽等，是否有污染的情況？是否影響地下水？(4)導電度之連續監測，以了解是否因降雨而改變。

4.2.1 調查方法

研究方法為文獻資料收集與統計分析、水質採樣分析、水質連續監測、及水質地化理論探討等。

一、地面水及地下水採樣與化驗

本計畫的採樣點，主要為台灣地區地下水觀測網之觀測井，為了瞭解補注區的水質變化，扇頂採樣點共計 19 口井(經濟部中央地質調查所，1995，1999；台糖公司地下水中心，1999-2004)。地面水採樣 3 處溪水(彰雲大橋、名竹大橋及南雲大橋)及沿扇頂區之主要水系及灌溉渠道，彰化區約 21 點，雲林區約 16 點，所有樣本皆量測其導電度，其中 10 點化驗離子成份。此外，調查頻率為旱雨季各調查一次(圖 4.2-1 及表 4.2.1)。

水質分析項目分為現場量測及室內分析。現場量測項目：溫度、導電度、pH、溶氧、氧化還原電位。實驗室化驗項目：主要離子有氯離子、碳酸氫根、硫酸根、鈣、鎂、鈉、鉀等陽離子；微量成份有硝態氮、銨離子等(表 4.2.2)。採樣頻率為旱雨季各一次，採樣時間為五月(枯水期)及九月(豐水期)。水樣以貝勒管下至濾管深度採取，水樣以冰桶保存，於 24 小時內送回化驗室。初步的水質數據評估，參考環保署飲用水源水質標準及灌溉用水水質標準(表 4.2.3)。

導電度值隨著溫度上升而增加，因此國際慣例上，都校正為 25°C 時之導電度(APHA, 1998)。沒有校正前的導電度稱為「視導電度」(apparent conductivity)，校正後的稱為「比導電度」(specific conductivity)。在不同溫度時量測的「視導電度」，可用以下公式校正為「比導電度」：

$$EC = EC_m / (1 + 0.019(t - 25))$$

EC 比導電度；

EC_m 視導電度；

t 測量時之水溫

舉例說明：廬山溫泉某溫泉井湧水時溫度為 85℃，此時量得導電度 4300 μS/cm，代入上式求得比導電度應為 2009 μS/cm，差異達兩倍以上。

二、趨勢分析

本計畫使用 Mann-Kendall 法(Kendall, 1975)分析水質導電度之變化趨勢，其中顯著值 S 以式(4.2-1)定義之：

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \dots \dots \dots (\text{式 4.2-1})$$

$$\text{Sign}(X_j - X_k) = 1 \quad \text{若 } X_j - X_k > 0$$

$$\text{Sign}(X_j - X_k) = 0 \quad \text{若 } X_j - X_k = 0$$

$$\text{Sign}(X_j - X_k) = -1 \quad \text{若 } X_j - X_k < 0$$

其中 X_j 為時間 j 之數值， X_k 為時間序列之數值(共 n 個值)。若顯著值 S 為正值，表示為遞增之趨勢；若為負值，則表示為遞減之趨勢。其顯著性之分布機率 f(z) 可由標準化後之統計值(Z 值)及變異數 VAR(S) 來推算：

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \dots \dots \dots (\text{式 4.2-2})$$

n 為數據個數、g 群組數、 t_p 為第 p 個群組之數據個數。標準化後之統計值(Z 值)：

$$\text{若 } S=0 \text{ 則 } Z=0$$

$$\text{若 } S>0 \text{ 則 } Z=(S-1)/[\text{VAR}(S)]^{1/2}$$

$$\text{若 } S<0 \text{ 則 } Z=(S+1)/[\text{VAR}(S)]^{1/2}$$

$$\dots \dots \dots (\text{式 4.2-3})$$

分布機率 f(z)

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \dots \dots \dots (\text{式 4.2-4})$$

一般以 90—95% 為顯著水平，本計畫以 90% 判斷是否具顯著趨勢。

三、水質連續監測

本計畫使用自記式水質測棒進行連續監測，檢測項目為水位、水溫及導電度等三項，使用儀器為美國 In-Situ 公司的 Troll-200 型(圖 4.2-2)，溫度範圍-20—80℃、準確度 0.1℃、解析度 0.01℃；水壓範圍 0—100m、準確度 0.25%、解析度 0.005%；導電度範圍 5—100000 μ S/cm、準確度 0.5%、解析度 0.1 μ S/cm；自記頻率預定為半小時一筆。

表 4.2.1 彰雲扇頂補注區觀測井之基本資料

井名	濾管起 m	濾管止 m	靜水位 m	X(m)	Y(m)	地表高程(m)
炭腳(1)	78	102	53.62	202021	2612378	110.11
古坑(1)	66	102	47.52	204980	2615932	100.67
溫厝(1)	14	32	7.54	199400	2617408	48.65
溫厝(2)	78	96	12.74	199400	2617408	48.65
東和(1)	21	57	14.43	205251	2620504	75.66
石榴(1)	9	15	7.37	206944	2624360	66.57
烏塗(1)	40	94	29.26	208141	2629816	72.31
六合(1)	24	54	17.21	204584	2629706	56.18
荊桐(1)	14	32	6.45	197886	2628381	37.62
西螺(1)	20	38	4.82	194891	2632723	29.49
社寮(1)	9	18	9.16	220800	2634163	176.07
竹山(1)	66	96	6.36	217282	2629020	150.95
新光(1)	78	120	53.1	215584	2638740	222.106
二水	72	108	39.15	210242	2634428	82.44
柑園(1)	14	32	9.4	201662	2635696	46.69
溪洲(1)	4	28	4.56	198371	2639267	34.18
田中(1)	98	134	11.48	207088	2639188	49.56
田中(2)	243	266	14.29	207088	2639188	49.56
田尾(1)	12	30	7.07	201045	2643280	32.55

靜水位指井口下之深度。座標為二度分帶。

表 4.2.2 本計劃水質化驗項目及方法

項	目	檢 驗 方 法	偵測極限	單位
1	T(水溫)：溫度計法	現地檢測 NIEA W217.50 A	靈敏度 0.1	℃
2	pH：電極法	現地檢測 NIEA W424.50 A	靈敏度 0.01	
3	DO：電極法	現地檢測 APHA(20th) 4500 OG	0.20	mg/L
4	EC：導電度計法	現地檢測 NIEA W203.51 B	靈敏度 0.01	μS/cm
5	Alkalinity：滴定法	NIEA W449.00 B	15	mg/l
6	Cl ⁻ ：	NIEA W415.51 B	0.50	mg/l
7	SO ₄ ²⁻ ：離子層析法		0.50	mg/l
8	NO ₃ ⁻ -N：		0.05	mg/l
9	Ca：EDTA 滴定法	APHA(20th) 3500-Ca B	0.50	mg/l
10	Mg：EDTA 滴定法	NIEA W208.50 A	0.30	mg/l
11	Na：鍍光光度計法	APHA(19th) 3500-Na D	0.50	mg/l
12	K：鍍光光度計法	APHA(19th) 3500-K D	0.45	mg/l
13	NH ₃ -N：納氏比色法	NIEA W416.50 A	0.025	mg/l

NIEA 為台灣環保署公告之標準檢測方法；APHA 為美國公共健康協會公告之標準檢測方法。

表 4.2.3 飲用水源及灌溉用水質標準

檢測項目	單位	環保署飲用水水源水質標準 甲	環保署飲用水水源水質標準 乙	灌溉用水水質標準
1. 水溫 T	℃	-----	-----	<35
2. 氫離子濃度 pH	-----	-----	-----	6.0-9.0
3. 氧化還原電位 ORP	mV(at25℃)	-----	-----	-----
4. 溶氧 DO	mg/L	-----	-----	>3
5. 甲烷氣 CH ₄	ppm	-----	-----	-----
6. 導電度 (at25℃) EC	μS/cm	-----	-----	750
7. 大腸桿菌群 Coliform	CFU/100 ml	20000(消毒) 50(未消毒)	6(乙1) 50(乙2)	-----
8. 總溶解固體 TDS	mg/L	-----	500	-----
9. 鈣 Ca	mg/L	-----	-----	-----
10. 鎂 Mg	mg/l	-----	-----	-----
11. 硬度 Hard	mg/L	-----	-----	-----
12. 鉀 K	mg/L	-----	-----	-----
13. 鈉 Na	mg/L	-----	-----	-----
14. 總鹼度 Alk.	mg/L	-----	-----	-----
15. 氯鹽 Cl ⁻	mg/L	-----	250	175
16. 硫酸根 SO ₄ ⁻²	mg/L	-----	250	200
17. 硝酸鹽氮 NO ₃ ⁻ -N	mg/L	-----	10.0	-----
18. 氨氮 NH ₃ ⁻ -N	mg/L	1	0.1	總氮 3.0
19. 砷 As	mg/L	0.05	0.05	0.05
20. 鐵 Fe	mg/L	-----	0.3	5.0
21. 錳 Mn	mg/L	-----	0.05	0.2
22. 鋅 Zn	mg/L	-----	5.0	2.0
23. 銅 Cu	mg/L	-----	1.0	0.2
24. 鉻 Cr	mg/L	0.05	0.05	0.1
25. 總有機碳 TOC	mg/L	4	-----	-----
26. 硫化物 Sulfide	mg/L	-----	-----	-----
27. 鎘 Cd	mg/L	0.01	0.005	0.01
28. 鉛 Pb	mg/L	0.05	0.05	0.1

*甲類：自來水、簡易自來水

乙類：乙1：盛裝水、公共飲用之連續供水

乙2：社區自設公共給水、包裝水

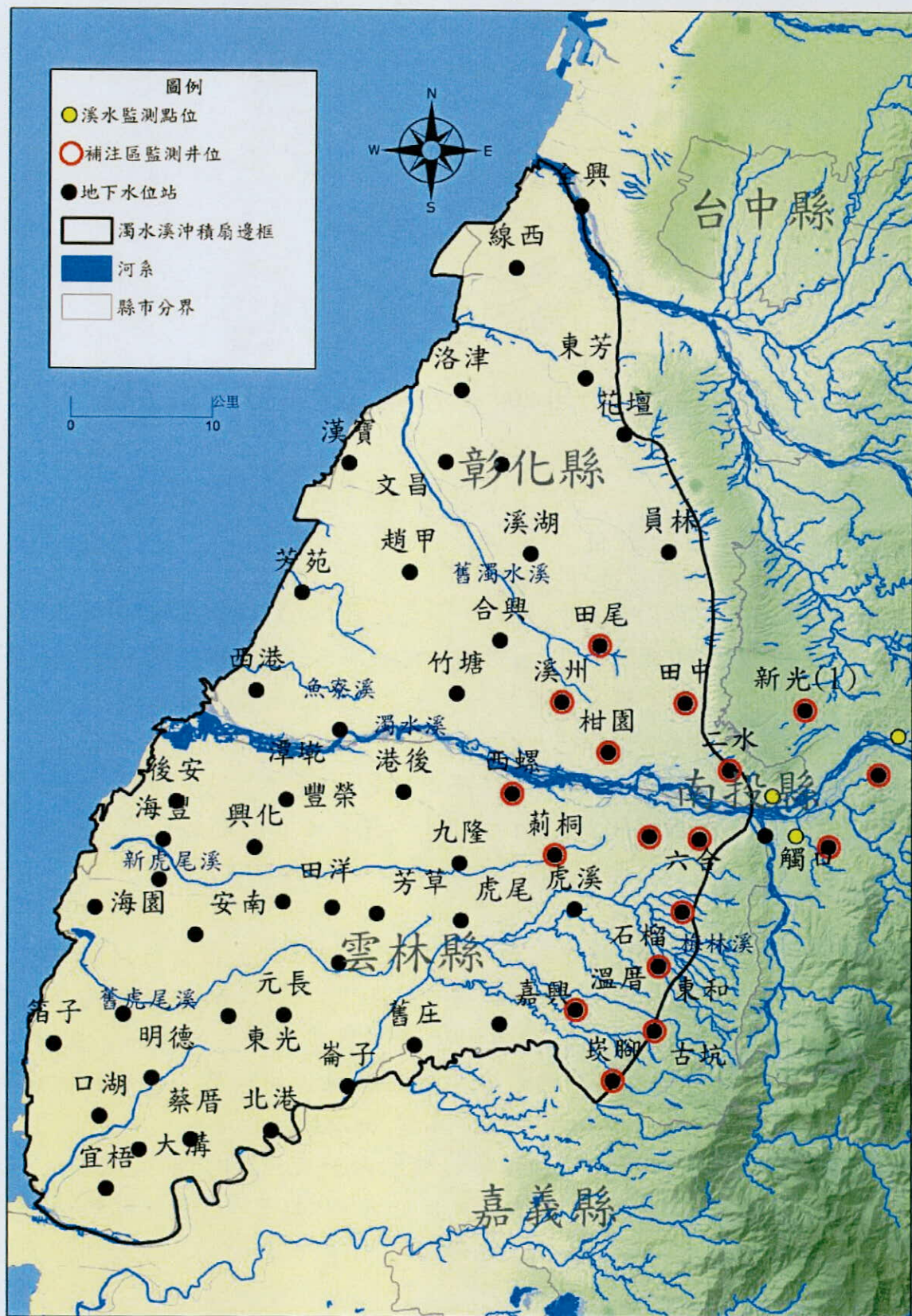


圖 4.2-1 彰雲地區觀測井地下水及溪水採樣位置圖



圖 4.2-2 美國 In-situ Troll-200 水壓水溫導電度三合一自記測棒

4.2.2 結果與分析

一、扇頂區的地下水水質現況及趨勢

歷年導電度：採樣結果如表 4.2-4 及表 4.2-5 所示，歷年的數據比較如表 4.2-6 及表 4.2-7 所示。若以灌溉用水標準評估，大約三至四成的水樣，其導電度大於 $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ (表 4.2-6)，超過標準的水樣，大都分布於濁水溪沖積扇之扇頂區，如烏塗、六合、柑園、田中、荊桐、西螺及田尾等站(圖 4.2-3)。1997 年之前，只有 1-2 口井的導電度大於 $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，2003 年已有 6 口井超過此標準，至 2010 年已有 8 口井超標。而濁水溪沖積扇之扇頂區，除了二口水井外，已全部超過標準(圖 4.2-4(a)、4.2-4(b))。

本計畫以 Mann-Kendall 法進行導電度趨勢分析統計，由分析結果可知，16 口井中有 5 口井有明顯的導電度升高趨勢，只有 1 口井(二水)為下降趨勢，其餘班 10 口井在統計上並無明顯趨勢(表 4.2-9)。5 口導電度升高的井分別為：六合、古坑、石榴、荊桐及西螺，其中古坑及石榴位於斗六沖積扇，雖然目前導電度仍低於 $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，但有持續升高的趨勢，需加以注意。

主要離子濃度：2010 年 5 月的水質檢驗結果如表 4.2-10 所示，陰離子以碳酸氫根為主、硫酸根次之，氯離子濃度大都低於 10%(圖 4.2-5)。陽離子以鈣及鎂離子為主，鈉及鉀離子濃度大都低於 40%以下(圖 4.2-6)。本區大部份的地下水都屬於碳酸氫鈣或鎂之分類(圖 4.2-7)。

荊桐(1)、六合(1)及柑園(1)歷年導電度有上升的趨勢(圖 4.2-8)。荊桐(1)地下水的成份，陰離子以碳酸氫根及硫酸根為主、陽離子以鈣離子為主(圖 4.2-9 及表

4.2-11)。比較 1999 年及 2009 年的離子組成，1999 年的導電度 $863 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、2009 年上升為 $1094 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，增加約 20%。碳酸氫根的比例變化較大，約從 59% 降為 40%；硫酸根則從 36% 增為 56%；但氯離子沒有明顯的變化。前述硫酸根的濃度變化偏高，介於 20-56% 之間。硫酸根是化肥的主要成份之一，可能土壤中的化肥，被雨水溶解，進入含水層，因此導電度增加。

六合(1)井 1999 年的導電度 $643 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、2009 年上升為 $907 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，增加約 30%。但碳酸氫根的比例變化不大，約為 62-61%；硫酸根只有些微的增加，從 33% 增為 36%。陽離子的鈣離子有些微下降，從 67% 降為 63%；鎂離子輕微上升，從 25% 增加為 29%(表 4.2-12)。導電度增加約 30%，但各離子變化都不大，顯示可能為蒸發作用，只有水分被蒸發，造成離子濃度升高。依導電度變化及離子濃度比例變化，柑園一可能也是類似的作用。

表 4.2-4 扇頂區 2010 年 5 月水質採樣及量測結果

站名	導電度	pH	水溫	溶氧	氧化還原電位
	$\mu\text{S}/\text{cm}$		$^{\circ}\text{C}$	mg/l	mV
炭腳(1)	203	6.95	24.42	<0.50	-82
古坑(1)	395	6.82	24.18	5.67	105
溫厝(1)	342	7.53	23.95	<0.50	-145
溫厝(2)	385	7.14	24.62	<0.50	-56
東和(1)	192	7.21	24.35	0.92	-124
石榴(1)	430	6.82	24.12	<0.50	-187
烏塗(1)	782	7.15	24.35	3.85	136
六合(1)	970	7.28	24.14	5.88	95
荊桐(1)	1043	7.20	24.55	<0.50	-175
西螺(1)	1286	7.06	24.62	<0.50	-166
社寮(1)	1697	6.95	23.85	<0.50	-51
竹山(1)	578	6.98	25.35	3.54	65
新光(1)	296	6.84	23.42	<0.50	134
二水	176	6.85	24.70	5.67	104
柑園(1)	1017	7.52	24.52	3.85	79
溪洲(1)	1082	7.44	24.16	<0.50	-152
田中(1)	838	7.36	24.77	1.87	170
田中(2)	808	7.15	24.36	3.24	162
田尾(1)	1110	7.22	24.57	<0.50	-202
名竹大橋	533	7.64	24.32	6.52	163
南雲大橋	334	7.72	25.78	7.16	172
彰雲大橋	604	7.52	25.87	7.57	151
雨水	48	6.65	27.95	7.34	177

表 4.2-5 扇頂區 2010 年 9 月水質採樣及量測結果

站名	導電度	pH	水溫	溶氧	氧化還原電位
	$\mu\text{S}/\text{cm}$		$^{\circ}\text{C}$	mg/l	mV
炭腳(1)	216	6.84	24.58	<0.50	-142
古坑(1)	443	6.70	24.38	4.57	215
溫厝(1)	387	8.55	23.24	0.68	-276
溫厝(2)	403	7.79	24.62	4.78	303
東和(1)	334	7.32	24.73	0.55	-24
石榴(1)	509	7.20	24.52	0.49	-269
烏塗(1)	831	7.69	24.53	4.83	308
六合(1)	884	7.52	24.41	4.27	311
荊桐(1)	1186	7.66	24.55	0.78	-120
西螺(1)	1088	7.92	24.26	6.37	-310
社寮(1)	9528	3.64	23.42	2.44	587
竹山(1)	486	7.66	25.25	4.52	220
新光(1)	309	7.08	23.24	4.99	252
二水	231	8.90	24.07	3.92	221
柑園(1)	948	7.51	24.25	4.57	237
溪洲(1)	663	7.42	24.61	0.63	-179
田中(1)	853	7.53	24.77	4.82	181
田中(2)	793	7.48	24.63	4.71	201
田尾(1)	1174	7.42	24.47	0.11	-258
名竹大橋	145	7.03	24.53	4.35	237
南雲大橋	405	8.07	25.57	4.56	186
彰雲大橋	270	7.03	25.48	1.37	217
雨水	21	7.25	27.55	5.09	264

表 4.2-6 扇頂區歷年地下水平均導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)

	濁水溪扇						斗六扇				
	烏塗	六合	二水	柑園	田中	平均	炭腳	古坑	東和	石榴	平均
46 年	391	308	211	817	309	407	277	277	198	232	246
86 年度	696	620	389	721	601	605	197	366	346	216	281
88 年度	766	707	490	1014	842	764	319	366	390	308	346
89 年度	707	655	497	1069	846	755	244	367	429	325	341
90 年度	748	861	432	942	826	762	378	379	539	290	397
91 年度	780	748	372	862	1009	754	242	360	261	313	294
92 年度	728	733	320	821	804	681	244	359	248	359	303
93-4	699	1010	234	1083	1418	889	260	402	337	390	347
93-8	800	761	222	913	557	651	235	378	459	389	365
94-5	756	675	361	789	277	572	233	371	249	367	305
94-10	641	857	379	769	384	606	322	388	495	417	406
98-6	903	982	215	1073	898	814	233	438	342	435	362
98-9	621	907	217	1087	881	743	203	435	347	467	363
99-5	782	970	176	1017	838	757	203	395	192	430	305
99-9	831	884	231	948	853	749	216	443	334	509	375

表 4.2-7 扇頂之上下邊界歷年地下水平均導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)

	下邊界					上邊界			
	荊桐	西螺	溪洲	田尾	平均	竹山	新光	社寮	平均
46 年	603	680	631	708	656				
86 年度	800	761	580	1642	946	347	548	431	442
88 年度	941	1177	1376	1114	1152	602	228	781	537
89 年度	895	919	1272	1154	1060	668	180	807	552
90 年度	612	855	1554	1077	1025	636	217	846	566
91 年度	891	730	1250	1046	979	490	178	595	421
92 年度	804	871	1422	1078	1044	422	174	644	413
93-4	1062	1076	1756	1002	1224	438	229	639	435
93-8	938	881	1476	952	1062	378	202	600	393
94-5	985	683	1018	1213	975	358	205	563	375
94-10	959	917	975	1033	971	432	213	1137	594
98-6	1182	1308	1192	1209	1223	653	149	638	480
98-9	1094	1392	581	1246	1078	599	246	599	481
99-5	1043	1286	1082	1110	1130	578	296	1697	857
99-9	1186	1088	663	1174	1028	486	309	9528	3441

表 4.2-8 扇頂附近地下水水質評估結果

項目	評估標準*	超過個數			
		2009 年 6 月	2009 年 9 月	2010 年 5 月	2010 年 9 月
導電度	750 $\mu\text{S}/\text{cm}$	8	6	10	9
氯離子	175 mg/l	0	0	1	0
硫酸根	200 mg/l	1	3	2	3

*灌溉用水水質標準；地下水水樣總數 19 樣

表 4.2-9 導電度 Mann-Kendall 趨勢分析結果

井名	數據量	最小值	最大值	S	Z	機率	趨勢
烏塗	13	391	903	13	0.74	0.46	無
六合	13	308	1010	44	2.62	0.009	高
二水	13	211	497	-28	-1.65	0.099	低
柑園	13	721	1087	14	0.79	0.43	無
田中	13	277	1009	8	0.43	0.67	無
炭腳	13	197	378	-22	-1.29	0.20	無
古坑	13	277	438	45	2.69	0.007	高
東和	13	198	539	12	0.67	0.50	無
石榴	13	216	467	64	3.84	0.0001	高
荊桐	13	603	1182	48	2.87	0.004	高
西螺	13	680	1392	30	1.77	0.077	高
溪洲	13	580	1756	-4	-0.18	0.85	無
田尾	13	708	1642	6	0.30	0.76	無
竹山一	12	347	668	-4	-0.21	0.84	無
新光一	12	149	548	-10	-0.62	0.54	無
社寮	12	431	1137	-6	-0.34	0.73	無

數據時間：1957—2009

S 統計值(Mann Kendall Statistic)

Z 標準化(Normalized Test Statistic)

趨勢判定：90%顯著區間(level of significance)

表 4.2-10 扇頂區 2010 年 5 月水質分析結果(mg/l)

站名	碳酸氫根	氯離子	硫酸根	鈣離子	鎂離子	鈉離子	鉀離子
炭腳(1)	100	3.1	0.91	14.06	3.52	13.89	2.52
古坑(1)	150	10.66	50.8	29.18	11.63	22.14	1.56
溫厝(1)	200	6.28	1.84	34	11.94	17.75	1.7
溫厝(2)	150	8.08	64.37	38.41	9.44	20.31	1.56
東和(1)	100	6.62	7.64	15.32	5.35	12.79	0.71
石榴(1)	95	29.32	76.08	36.15	12.52	21.4	0.97
烏塗(1)	390	8.96	136.5	128.2	22.64	15.41	2.53
六合(1)	355	12.26	164.4	133.1	17.93	26.04	2.78
荊桐(1)	275	16.52	263.2	137.3	22.3	37.14	3.65
西螺(1)	305	30.17	310	187.3	20.91	43.27	2.88
社寮(1)	1100	289.1	79.26	48.91	326.6	7.93	5.35
竹山(1)	280	12.33	48.51	72.37	21.09	9.83	1.56
新光(1)	150	9.54	0.85	12.19	23.52	8.25	1.29
二水	95	5.99	25.6	7.21	21.52	0.24	4.73
柑園(1)	400	7.29	180	155.4	16.03	27.8	3.04
溪洲(1)	610	20	140	147	62	15.8	3.92
田中(1)	300	11.1	136	119.6	16.92	22.52	2.11
田中(2)	275	8.76	136.2	106.3	14.42	21.39	1.93
田尾(1)	500	24.02	154.4	150.9	34.59	29.73	7.02
名竹大橋	125	0.89	126.3	58.02	12.41	16.15	2.08
南雲大橋	175	3.96	35.81	31.37	20.84	7.23	1.93
彰雲大橋	165	2.37	132.1	70.52	13.22	18.05	2.57
雨水	40	1.84	5.32	11.93	1.03	2.35	1.62

表 4.2-11 扇頂區 2010 年 9 月水質分析結果(mg/l)

站名	碳酸氫根	氯離子	硫酸根	鈣離子	鎂離子	鈉離子	鉀離子
1. 炭腳(1)	130	4.45	1.00	14.00	8.75	15.00	2.00
2. 古坑(1)	175	11.00	60.00	41.25	16.54	21.54	2.00
3. 溫厝(1)	190	9.05	13.03	45.93	10.80	13.89	1.14
4. 溫厝(2)	145	8.61	64.85	45.36	12.52	16.51	0.94
5. 東和(1)	135	6.00	50.00	42.51	8.74	11.32	1.00
6. 石榴(1)	135	25.79	91.60	65.20	14.25	9.36	0.14
7. 烏塗(1)	305	40.00	80.00	76.35	38.21	15.24	1.00
8. 六合(1)	250	15.63	170.39	125.00	24.40	7.66	3.08
9. 荊桐(1)	250	12.61	305.27	160.09	36.30	3.20	2.66
10. 西螺(1)	245	26.01	277.10	119.79	39.81	3.73	1.67
11. 社寮(1)	300	1100	103.55	127.18	50.00	42.38	3.53
12. 竹山(1)	250	9.27	36.49	54.92	20.00	14.41	0.73
13. 新光(1)	120	10.11	1.77	13.99	10.00	17.52	0.96
14. 二水	110	11.41	31.14	14.35	15.00	16.41	3.91
15. 柑園(1)	200	9.16	183.93	118.08	20.00	5.85	1.51
16. 溪洲(1)	350	30.04	68.55	67.16	50.00	5.90	3.62
17. 田中(1)	225	11.95	135.31	106.07	15.00	6.26	1.23
18. 田中(2)	185	9.05	139.49	95.53	13.00	5.46	0.92
19. 田尾(1)	430	21.56	194.64	146.35	50.00	4.83	2.19
20. 名竹大橋	90	8.00	10.88	18.45	10.00	2.29	0.88
21. 南雲大橋	110	10.97	60.08	35.97	12.00	12.17	1.45
22. 彰雲大橋	130	6.00	120.00	60.00	13.00	15.00	2.00
23. 雨水	5	1.22	3.46	0.29	0.06	0.58	0.07

表 4.2-12 柑園(1)、六合(1)、荊桐(1)之離子當量百分比

時間	站名	導電度	碳酸氫根	氯離子	硫酸根	鈣離子	鎂離子	鈉離子
1999/6/1	六合(1)	643	62%	5%	33%	67%	25%	7%
	荊桐(1)	863	59%	5%	36%	69%	23%	7%
	柑園(1)	911	56%	4%	39%	72%	23%	5%
2009/6/1	六合(1)	982	61%	3%	36%	65%	28%	7%
	荊桐(1)	1182	70%	10%	20%	83%	12%	4%
	柑園(1)	1073	59%	3%	38%	65%	27%	6%
2009/9/1	六合(1)	907	61%	3%	36%	63%	29%	7%
	荊桐(1)	1094	40%	4%	56%	60%	32%	7%
	柑園(1)	1087	61%	2%	37%	70%	25%	5%

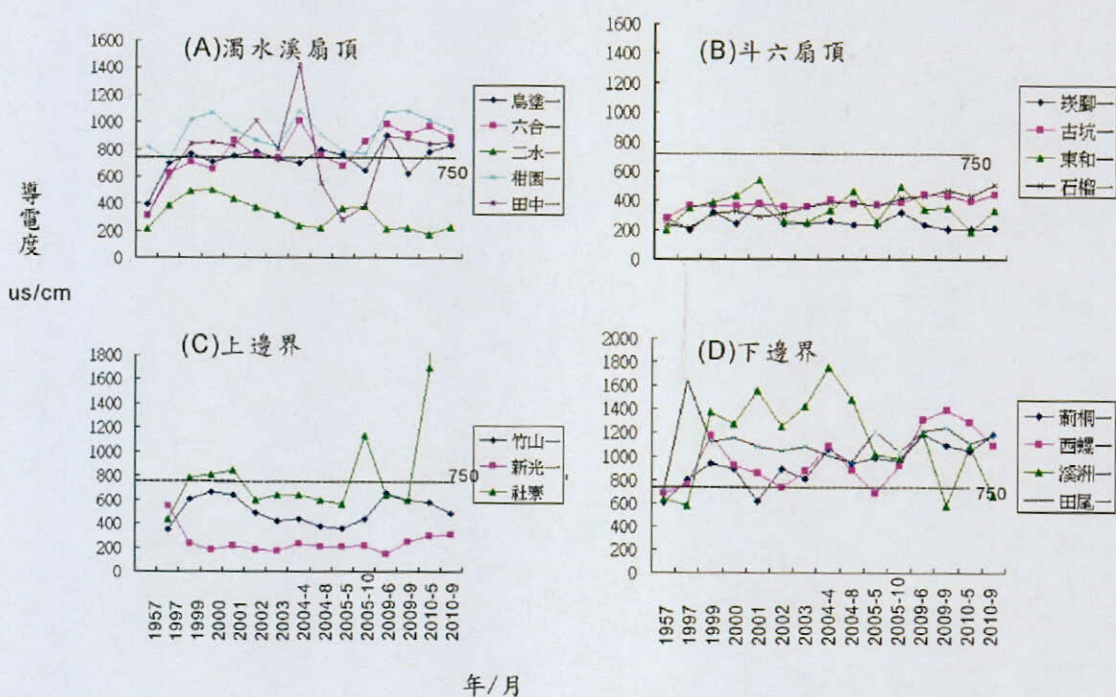


圖 4.2-3 歷年之導電度數據

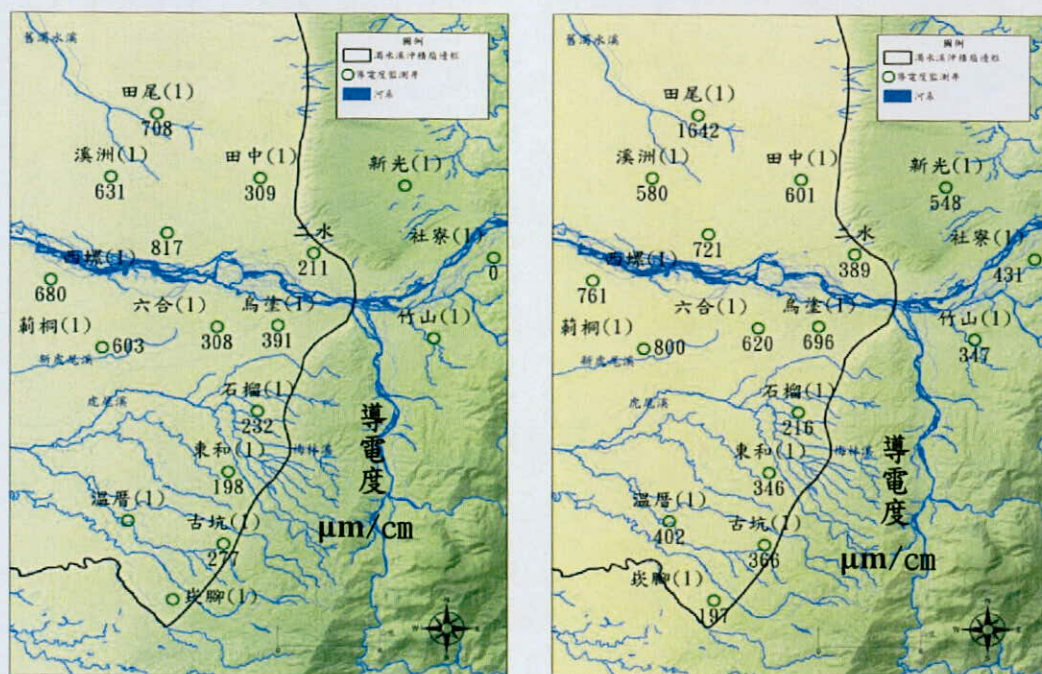


圖 4.2-4(a) 歷年之導電度之平面分布(綠色部份為大於 $750\mu\text{S}/\text{cm}$)

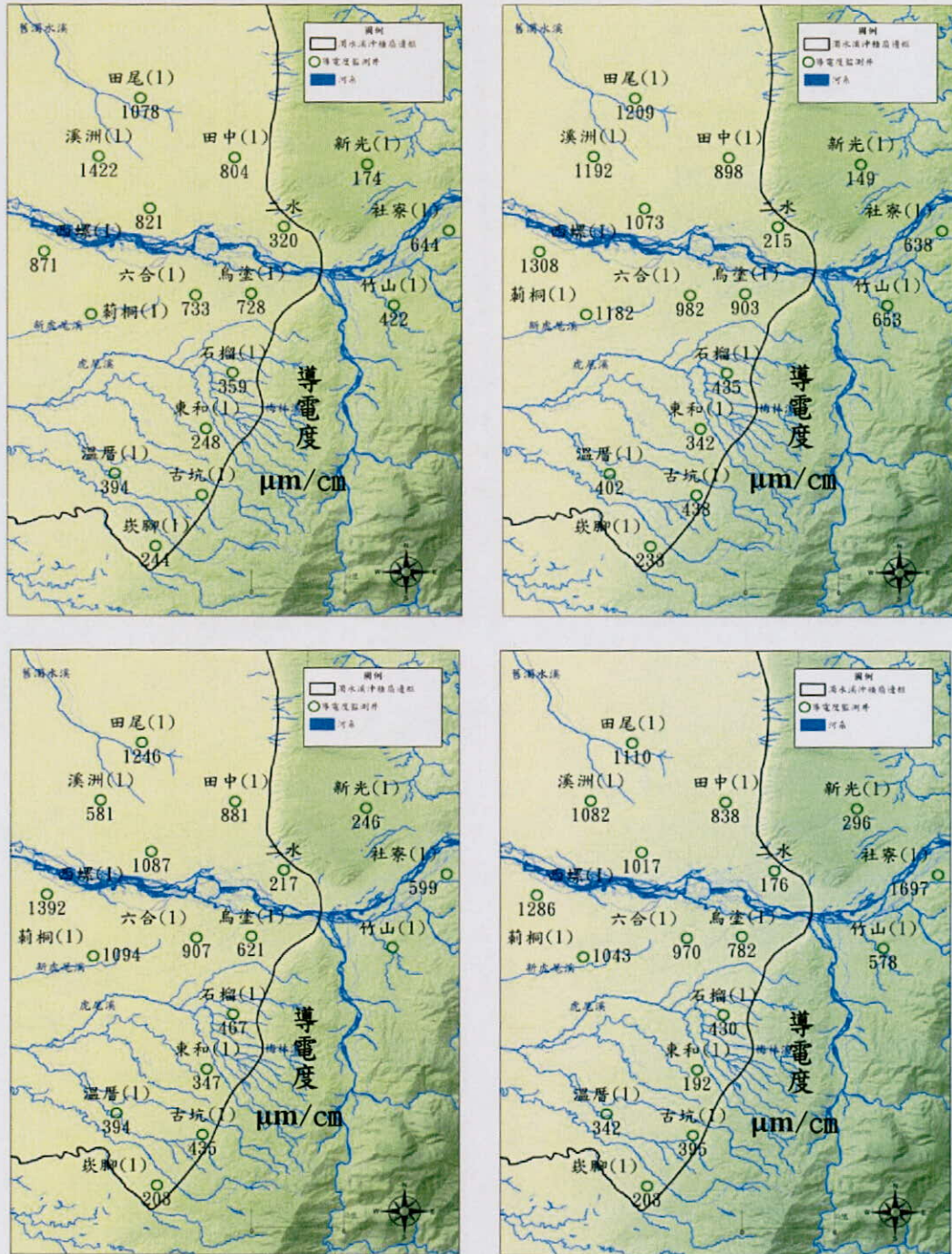


圖 4.2-4(b) 歷年之導電度之平面分布(綠色部份為大於 $750\mu\text{S}/\text{cm}$)

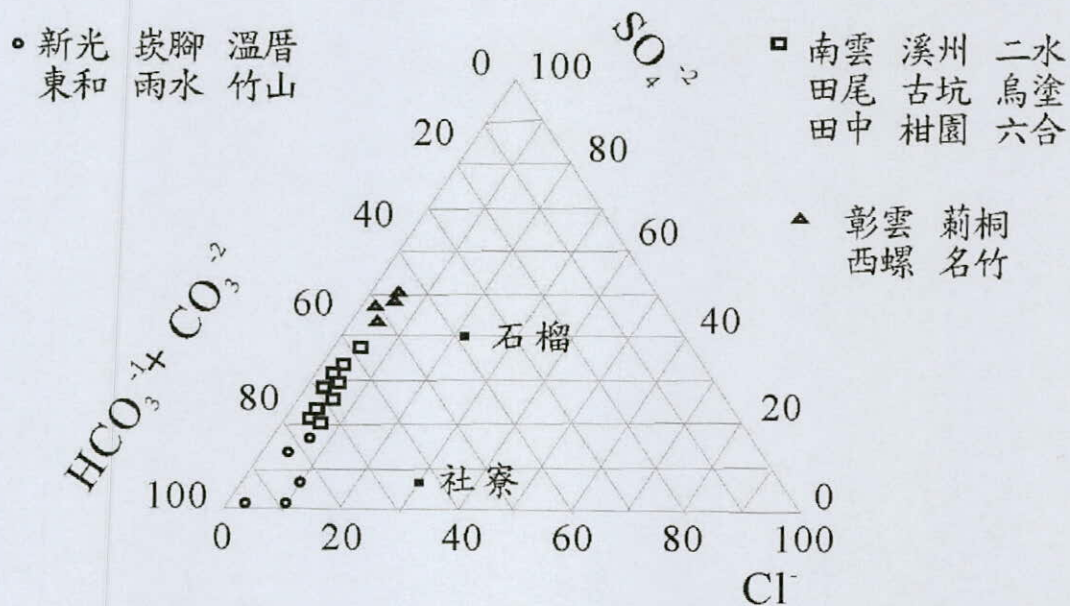


圖 4.2-5 主要陰離子濃度分類(數據為 2010 年 5 月)

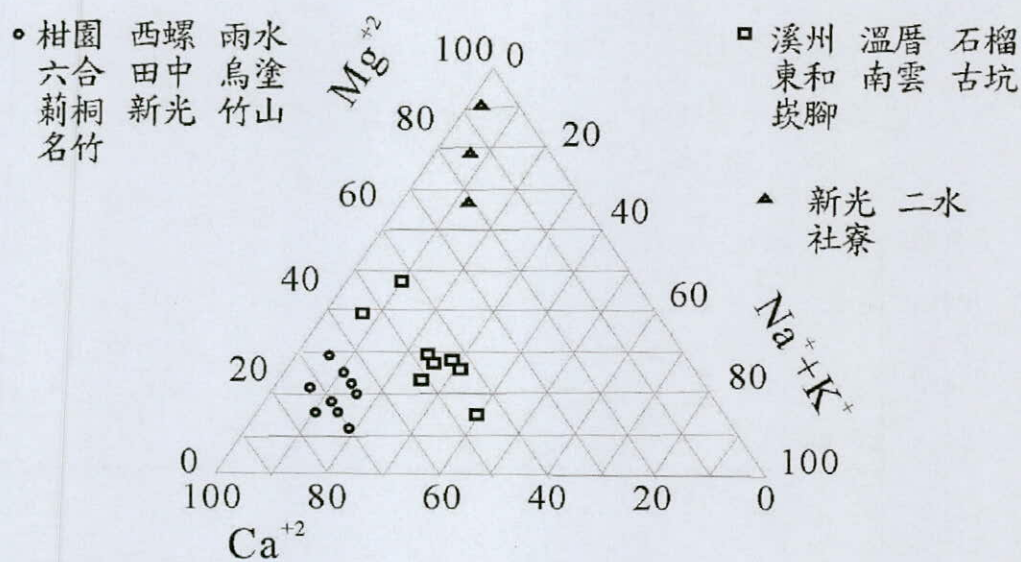


圖 4.2-6 主要陽離子濃度分類(數據為 2010 年 5 月)

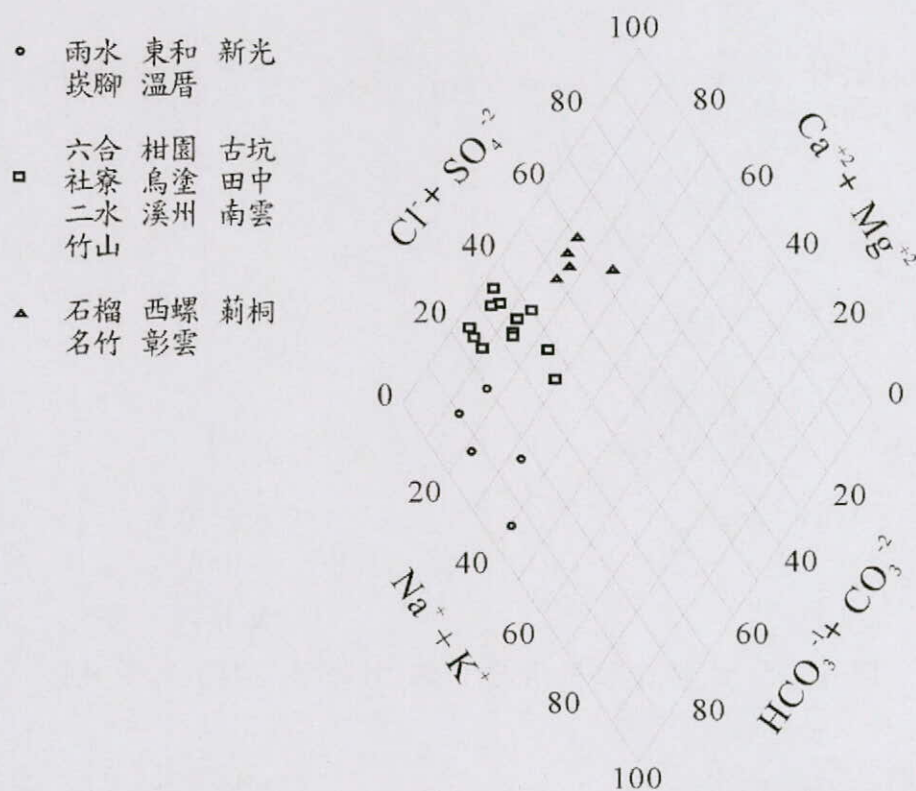


圖 4.2-7 主要離子成份分類(數據為 2010 年 5 月)

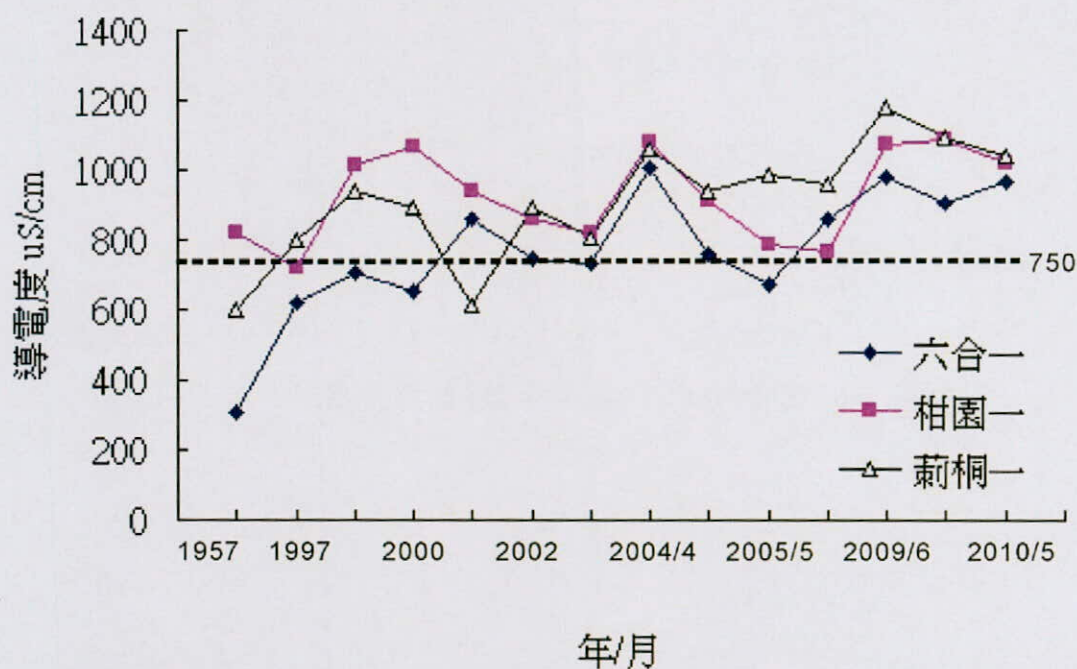


圖 4.2-8 柑園(1)、六合(1)及荖桐(1)之歷年導電度

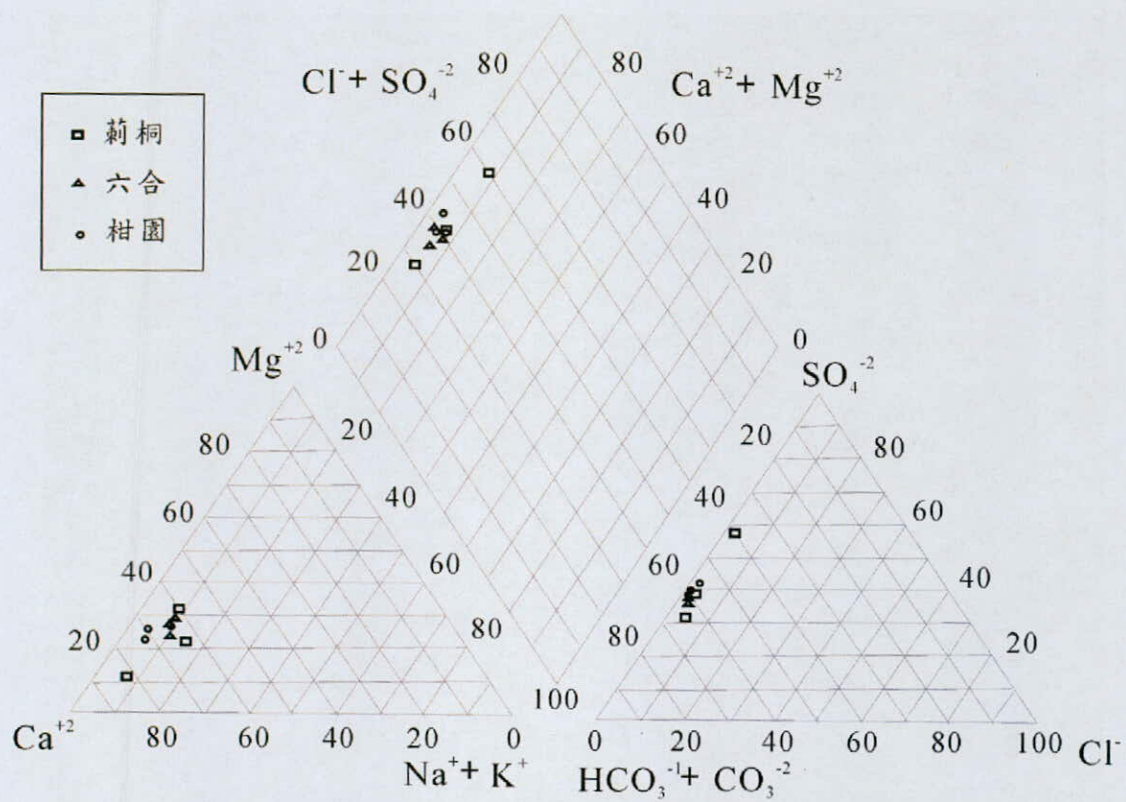


圖 4.2-9 柑園(1)、六合(1)及蔞桐(1)之離子組成

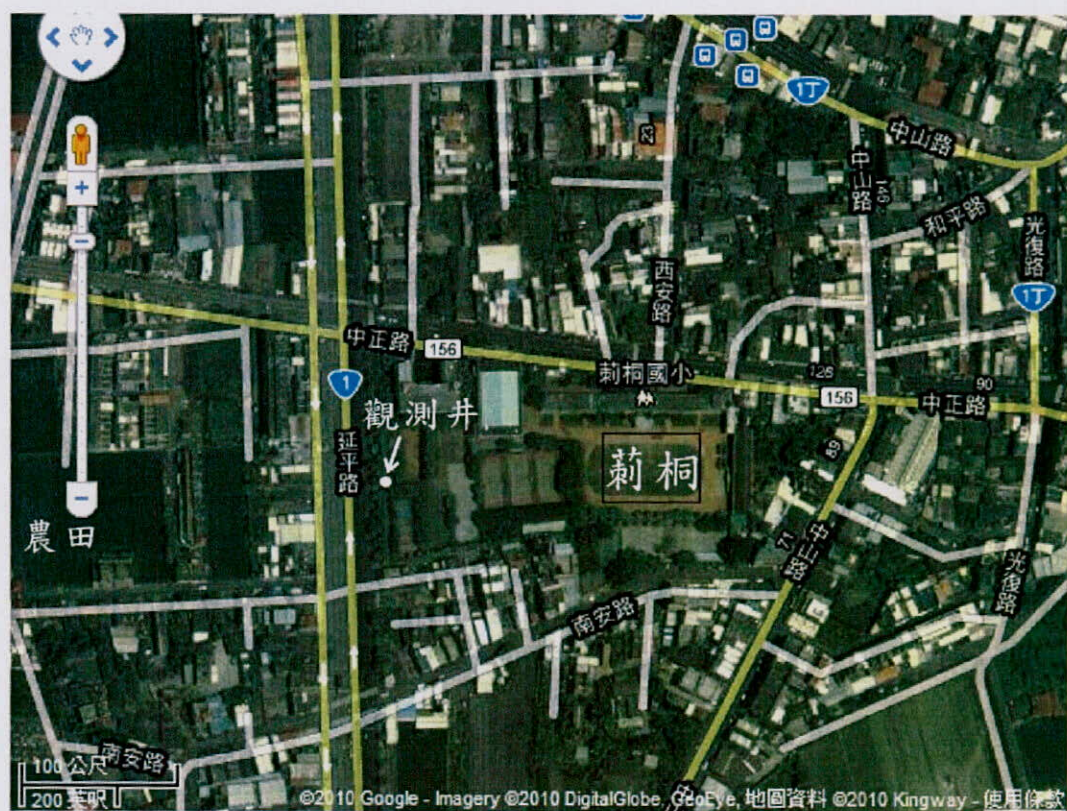


圖 4.2-10 六合及荊桐站附近之土地利用概況

二、扇頂區的硝酸鹽濃度

前人研究指出，補注區中較重要的微量元素污染為硝酸鹽。硝酸鹽的濃度除了受氧化還原作用影響外，濃度有時也會有季節變化。雨季時、降雨及河川水的補注，因稀釋而使硝酸鹽濃度降低，但在乾季時、因土壤水份蒸發，造成淺層地下水的硝酸鹽濃度升高。地下水往中下游流動，硝酸鹽因脫硝作用，濃度降低至檢測下限以下(陳文福等，2003；陳文福與呂學諭，2009)。

彰雲扇頂 1997—2010 年地下水監測顯示，約 10% 觀測井的硝態氮濃度偏高，多位於扇頂補注區。曾超過環保署飲用水限值 10 mg/l 之觀測井包含東和、坪頂、社寮、古坑、二水、新光、田中等 7 口，其中又以新光及古坑井超過限值的次數最多，2010 年此兩口井亦超過限值。溪水的硝酸鹽濃度量測地點包含名竹大橋、南雲大橋及彰雲大橋，量測結果顯示，除一次未超過限值外，其餘量測結果皆大於 1mg/l，因此這些區域是否遭受農業汙染，值得注意。

表 4.2-13 濁水溪扇頂補注區之歷年硝態氮濃度(NO3-N mg/l)

井名	1997	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2007	2009 6 月	2009 9 月	2010 5 月	2010 9 月
炭腳(1)	2.45	0.66	0.38	1.18	0.37	0.72	0.77	1.73	0.54	0.19	<0.05	1.48	1.50
古坑(1)	3.15	7.41	12.20	17.80	10.46	12.63	13.70	14.77		6.57	12.9	15.4	13.5
溫厝(1)	0.18	0.24	0.20	0.23	0.31	0.36	0.15	0.23	0.11	0.69	<0.05	1.61	1.85
溫厝(2)	1.14	3.10	2.32	1.82	1.57	2.43	1.69	2.54	2.91	1.63	3.21	4.92	4.15
東和(1)	13.76	0.10	3.57	3.91	0.34	0.23	0.34	0.29	0.10	0.07	<0.05	0.37	<0.05
石榴(1)	0.08	0.14	0.26	0.05	0.07	0.12	0.10	0.12	0.24	0.05	<0.05	0.16	<0.05
烏塗(1)	2.12	7.05	6.87	4.01	2.84	0.31	3.90	2.36		2.75	0.51	3.19	2.05
六合(1)	6.46	3.46	7.99	4.15	5.02	5.82	4.58	8.52	8.67	5.06	5.28	11.4	6.35
荊桐(1)	0.02	0.10	0.13	1.27	0.06	0.03	0.10	0.11	1.92	<0.05	<0.05	0.08	<0.05
西螺(1)	0.74	0.10	0.17	0.57	0.09	0.26	0.10	0.12	0.17	<0.05	<0.05	0.46	<0.05
社寮(1)	0.47	2.13	13.40	14.10	6.74	6.4	9.33	2.36		3.07	2.39	0.41	<0.05
竹山(1)	0.02	7.24	7.05	7.81	3.09	2.29	1.44	2.27	9.77	5.34	5.82	5.26	2.15
新光(1)	1.55	8.99	9.94	10.20	9.77	11.35	14.50	18.59	23.2	0.59	14.4	24.2	15.4
二水	3.65	8.47	12.70	3.32	3.21	1.24	0.10	0.33		0.50	<0.05	2.33	3.75
柑園(1)	1.99	4.80	5.30	0.72	0.59	1.35	2.37	0.59	6.07	<0.05	4.88	4.55	5.42
溪洲(1)	0.16	0.26	0.18	0.66	0.14	0.11	0.10	0.10	0.04	<0.05	<0.05	0.36	<0.05
田中(1)	2.36	6.79	5.75	5.96	6.61	10.47	3.29	2.08	7.65	6.66	5.90	7.04	7.25
田中(2)	0.06	7.16	2.95	2.95	2.31	5.18	3.09	5.02	8.02	6.62	6.57	6.29	7.15
田尾(1)	0.10	0.12	0.14	0.10	0.37	0.15	0.10	0.10	0.03	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
名竹大橋										3.21	1.37	0.35	4.35
南雲大橋										2.78	0.83	2.52	2.18
彰雲大橋										3.26	1.33	0.94	8.10
雨水										<0.05	<0.05	0.79	<0.05

1. 2003—2004 年數據為每月加總之年平均值。
2. 2007 年數據引自農業工程研究中心(2007)，空白：無採樣。
3. 2009-2010 年本計畫採樣。

三、地面水水質監測

濁水溪沖積扇扇頂地面水調查，大致可分為灌溉渠道及排水渠道。灌溉渠道的水源引自濁水溪，導電度約 $400-600\ \mu\text{S/cm}$ 。排水渠道則較上游，靠近山邊，導電度較小，約 $300-400\ \mu\text{S/cm}$ ；越往下游，導電度變大，約 $500-700\ \mu\text{S/cm}$ (表 4.2-14、圖 4.2-11 及圖 4.2-12)。

雲林扇頂調查結果，以靠近斗六工業區的竹圍 3 號橋水質最差，導電度達 $1714\ \mu\text{S/cm}$ ，水質有臭味、並偏紅色。烏塗及六合地下水的導電度約 $806-861\ \mu\text{S/cm}$ ，但臨近的地面水導電度約 $519-709\ \mu\text{S/cm}$ ，可能因灌溉過程的蒸發作用，約有 25% 的水份蒸發，使地下水的導電度變高。彰化地區的田中和柑園也可能為相同的作用。

二水站的地下水導電度則明顯偏低、約 $217\ \mu\text{S/cm}$ ，鄰近的灌溉水為 $400-500\ \mu\text{S/cm}$ ，因此地下水的補注水源應來自八卦台地，而非濁水溪的灌溉水。二水站北方的柳坑至復興，都為乾溪無水，但更北邊的清水橋導電度約 $306\ \mu\text{S/cm}$ 。八卦台地上的新光站地下水約 $149-296\ \mu\text{S/cm}$ ，導電度與二水站接近，應可證明此一解釋。

表 4.2-14 扇頂之地面水導電度(2010 年 1 月)

雲林			彰化		
編號	橋名	比導電度	編號	橋名	比導電度
1	乾溪	321	1	八寶	395
2	林內	851	2	惠民	511
3	頂庄	444	3	柳坑	無水
5	仁愛	519	4	有水	無水
6	烏塗	624	5	合和	無水
7	和興	522	6	大樹	無水
8	湖子	636	7	復興	無水
9	東興	522	8	和平	480
10	竹園	709	9	清水	306
11	萬年	612	10	崙雅	490
12	竹園 2	528	11	太平	512
13	竹園 3	1714	12	田中	475
14	梅林	540	13	大社	505
15	大湖	472	14	溪底	574
16	湖本	434	15	四腳亭	613
			16	烏橋	522
			17	秋永	656
			18	過圳	643
			19	國小	520
			20	大庄	511
			21	大港	565

比導電度為校正 25℃之值

表 4.2-15 扇頂之地面水導電度(2010 年 9 月)

雲林			彰化		
編號	橋名	比導電度	編號	橋名	比導電度
1	乾溪	260	1	八寶	565
2	林內	845	2	惠民	550
3	頂庄	438	3	柳坑	無水
5	仁愛	513	4	有水	無水
6	烏塗	548	5	合和	無水
7	和興	484	6	大樹	無水
8	湖子	463	7	復興	191
9	東興	440	8	和平	485
10	竹園	584	9	清水	285
11	萬年	725	10	崙雅	510
12	竹園 2	517	11	太平	530
13	竹園 3	1260	12	田中	515
14	梅林	1020	13	大社	481
15	大湖	429	14	溪底	580
16	湖本	307	15	四腳亭	585
			16	烏橋	520
			17	秋永	460
			18	過圳	563
			19	國小	575
			20	大庄	490
			21	大港	479

比導電度單位 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 為校正 25°C 之值

表 4.2-16 地面水之主要離子成份

站名	碳酸氫根	氯離子	硫酸根	鈣離子	鎂離子	鈉離子	鉀離子
1 月							
清水地	150	6.07	9.33	30.05	8.12	14.72	1.17
清水泉	150	5.87	9.23	29.29	7.93	14.4	1.09
太平灌	145	1.7	140	60.4	17.69	13.17	2.36
太平排	135	2.18	142.5	59.72	16.95	15.71	3.14
田中灌	150	1.89	143.9	68.21	17.19	13.35	2.47
竹園三	255	89.66	366.6	38.87	36.86	218.3	3.48
梅林	155	50.73	25.99	21.53	4.05	64.91	9.27
竹園二	95	4.23	91.79	43.92	10.55	11.74	4.05
六合溝	185	2.21	124.8	71.27	15.35	14.83	2.88
六合橋	145	2.85	131.9	60.63	16.3	14.96	2.97
9 月							
14.梅林	300	115	68.85	148	10.15	20.76	6.74
10.竹園	150	35.14	110	40.77	30.59	25.9	0.7
1.乾溪	85	4.88	38.18	29.02	4.66	5.98	1.77
9.東興	100	1.76	106.6	48.49	12.73	7.66	1.43
6.烏塗	95	7.2	131.6	58.5	13.21	2.96	0.37
9.清水	105	4.93	12.25	22.87	5.54	8.14	0.73
12.田中橋	85	1.56	119.7	48.51	9.25	7.25	1.4
11.太平	75	1.81	116.3	48.78	9.5	7.77	1.92
19.國小	75	1.18	108.5	48.78	9.45	7.35	1.29
5.含瑄	85	5.64	14.36	9.92	4.22	20.92	1.38
1.八寶	125	4.38	101.8	62.48	11.5	4.98	1.55

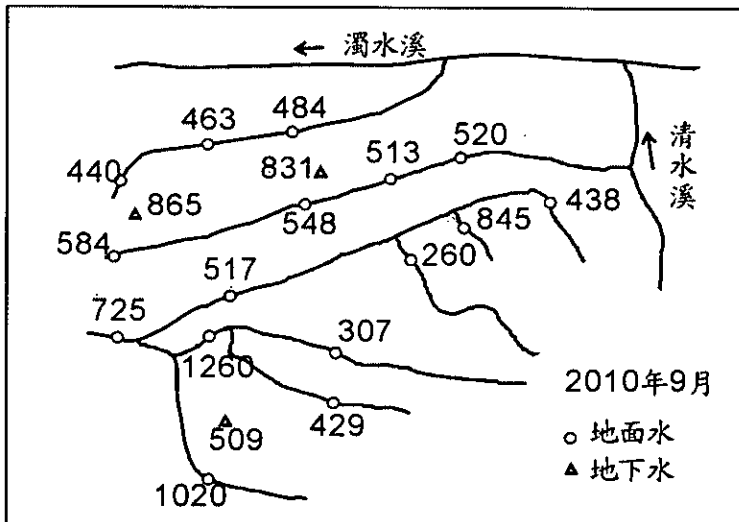
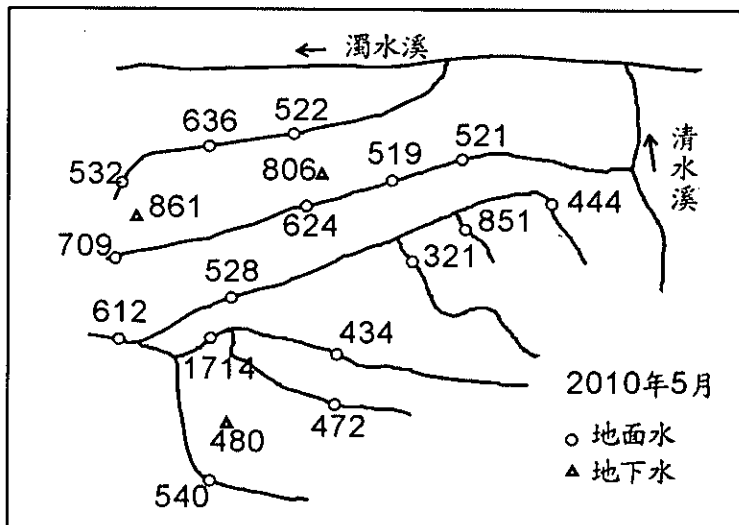
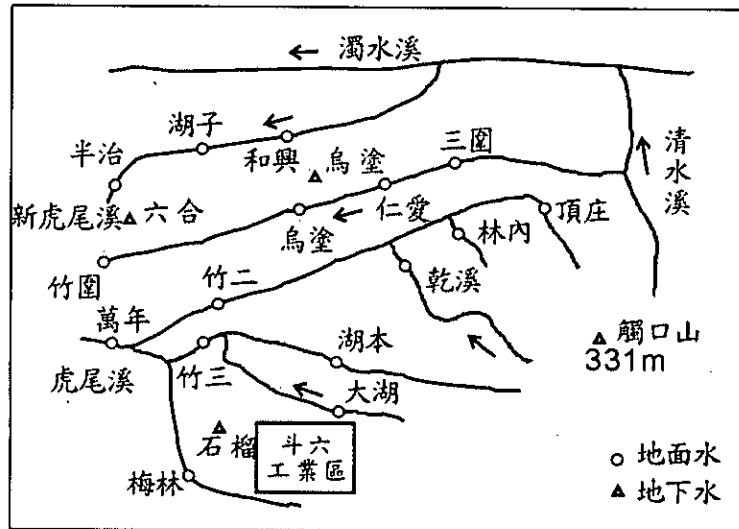


圖 4.2-11 雲林扇頂地面水導電度

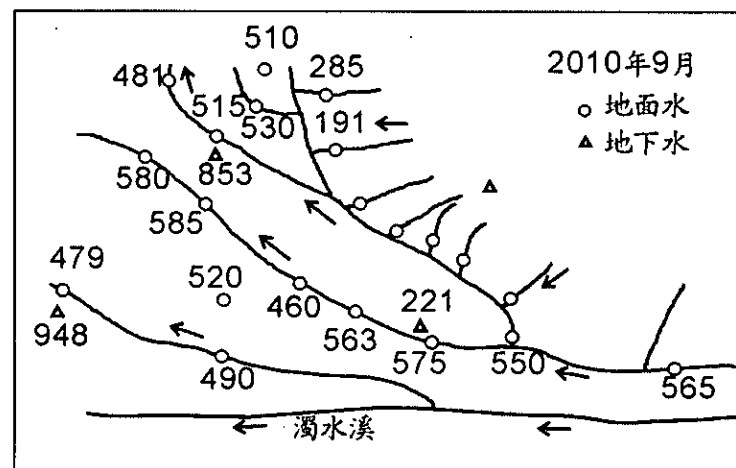
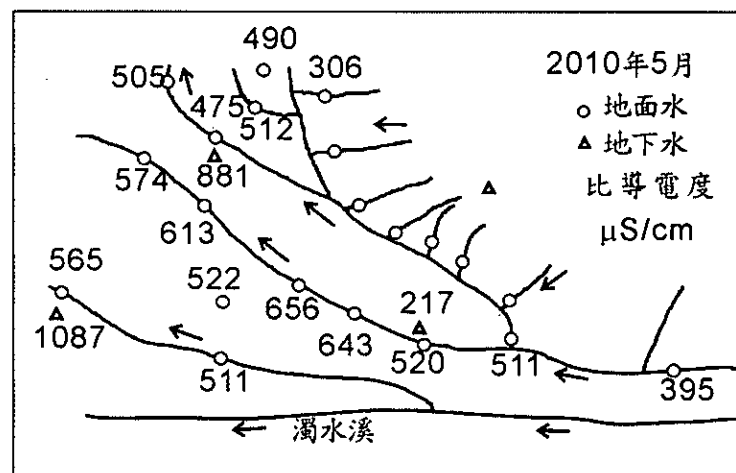
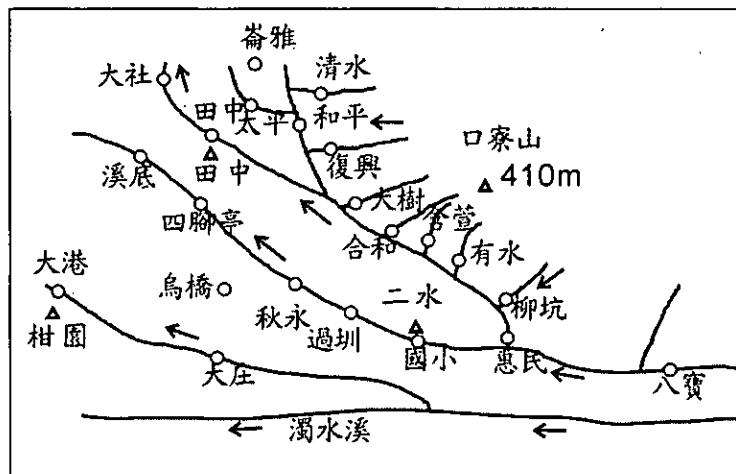


圖 4.2-12 彰化扇頂地面水導電度

四、導電度之連續監測

井內導電度垂向分布：本計畫發現，調查區的觀測井，井內水的導電度有明顯的垂向差異。例如二水及柑園井(圖 4.2-13)，二水井的上部導電度只有 $200 \mu\text{S/cm}$ ，但下部約有 $400\text{-}450 \mu\text{S/cm}$ ，兩層導電度相差一倍；柑園井上部約 $250\text{-}800 \mu\text{S/cm}$ ，下部約 $900 \mu\text{S/cm}$ ，兩層相差可達三倍。其餘井分層較明顯的有：古坑(圖 4.2-14)、竹山(圖 4.2-15)、荊桐及西螺(圖 4.2-16)。

井內上下層水導電度不同的原因，可能有三：(1)上層井管有破漏，淺層水經由破漏處入滲(國外的研究案例如 Michalski, 1989)；(2)流入井內水為不同密度，因此低密度往上浮、高密度者往下沉(Britt, 2005)；(3)井管內的停滯水發生化學變化。

以荊桐站為例，可證明井管破漏的可能性不大。荊桐二的上層水導電度有變小的趨勢，深度 10m 處導電度約 $650 \mu\text{S/cm}$ ，如果井管破漏，深度 7-20m 處的地層水滲入，根據荊桐一的水質，此層的導電度應約為 $1000\text{-}1200 \mu\text{S/cm}$ ，不應只有 $650 \mu\text{S/cm}$ (圖 4.2-17)。

井管內的停滯水發生化學變化的可能性也不大。例如(1)井管水的蒸發作用：但此作用，會使井內水導電度變大、而非變小。(2)硫酸根還原作用：但二水及柑園井為氧化環境，不利硫酸根還原。(3)溶解之二氧化碳散失：有可能損失部份碳酸氫根，但不致於使導電度相差一倍以上。

最有可能之原因，應為流入井內之水的密度不同，因此低密度往上浮、高密度者往下沉。國外的實驗顯示，流入井內的水，密度差約 10-5 即會產生分層，高密度者向井管下方流動、低密度者向上流(Britt, 2005)。

扇頂補注區的地下水有許多不同的來源，例如：河川、降雨、人為排水(生活污水及其它污染物)、深層補注(頭嵙山層側向來源)等，經過部份混合及地化作用，流入井內時，若沒有充份混合，仍有不同水質之分層，即可能進入井管後，產生不同密度分流之狀況(圖 4.2-18)。

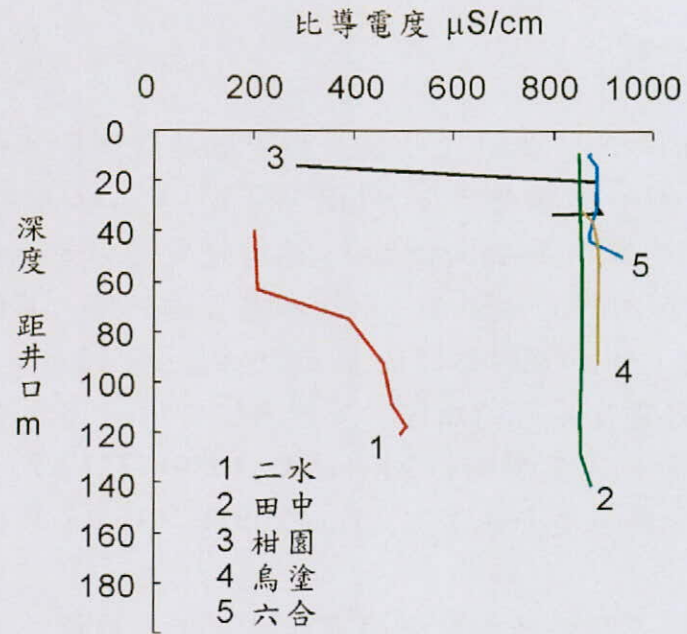


圖 4.2-13 濁水溪沖積扇扇頂區井內水導電度井測結果

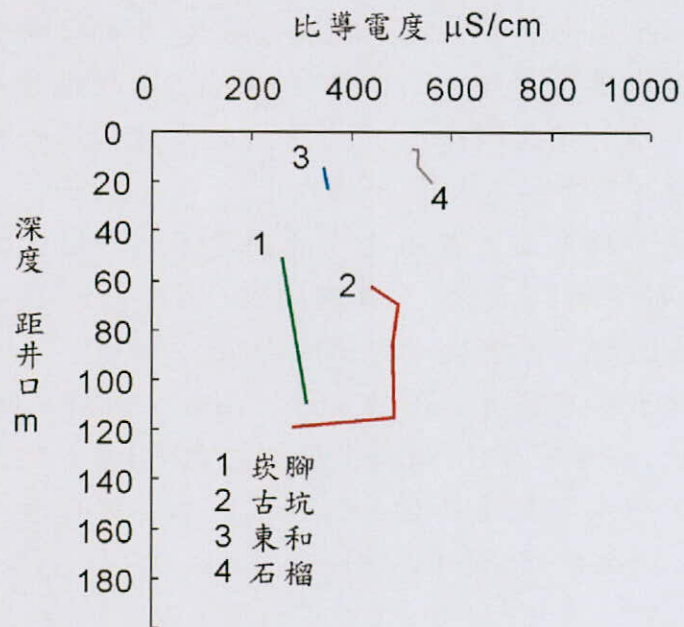


圖 4.2-14 斗六扇頂區井內水導電度井測結果

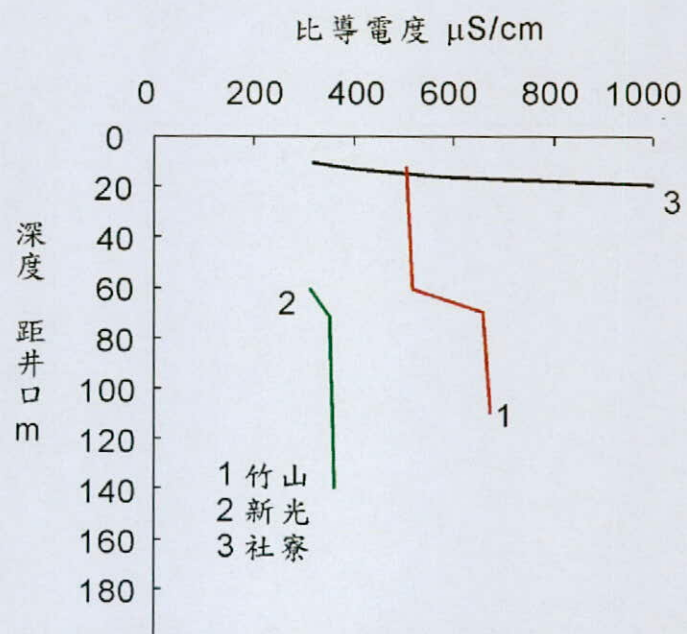


圖 4.2-15 上邊界地區井內水導電度井測結果

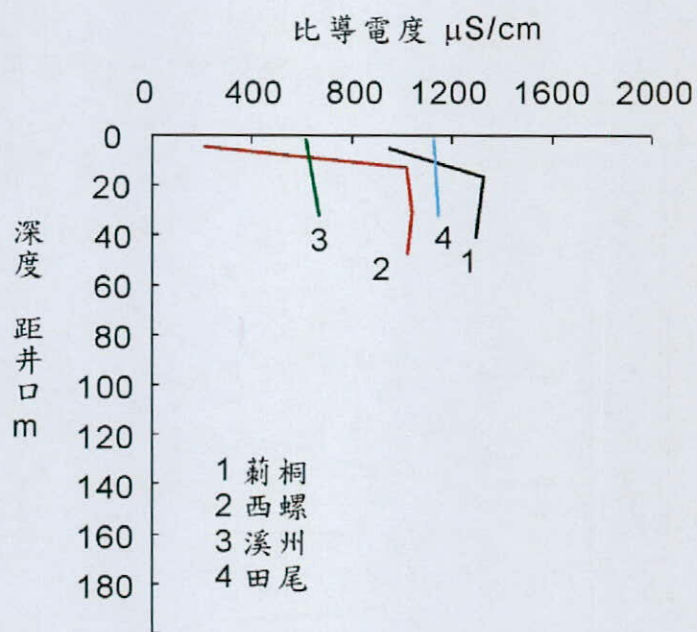


圖 4.2-16 下邊界地區井內水導電度井測結果

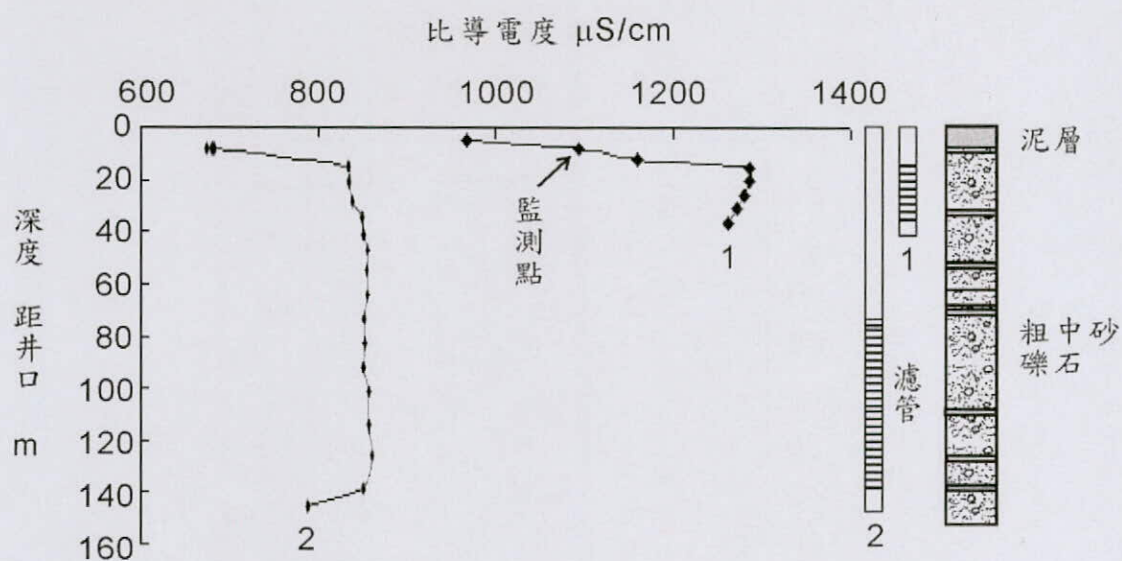


圖 4.2-17 荊桐站導電度井測(2010 年 08 月 18 日)

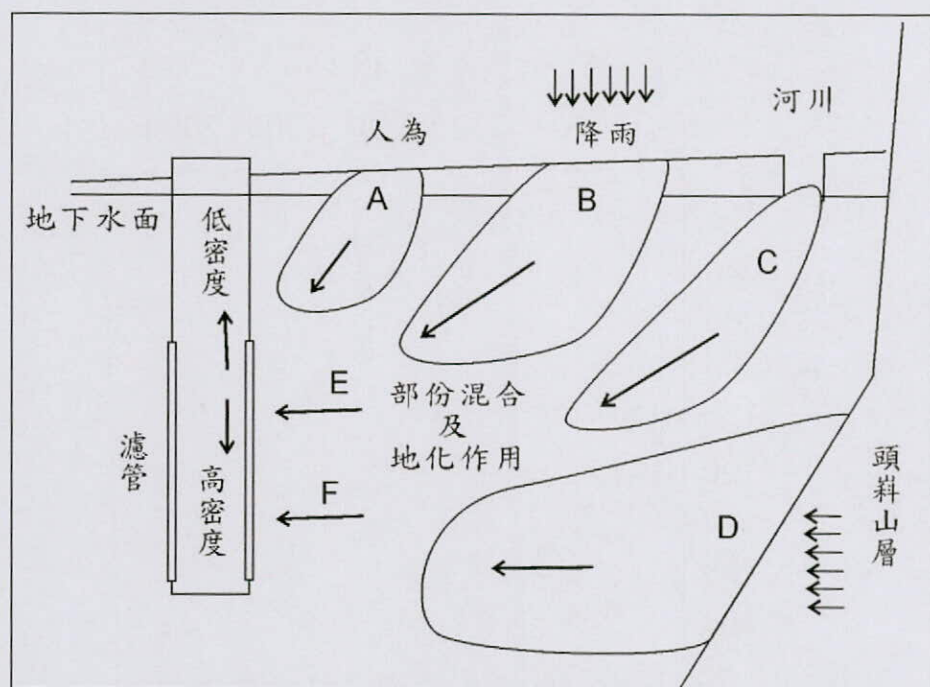


圖 4.2-18 觀測井井管中不同水質來源之解釋

導電度連續監測：荊桐一、六合一及柑園一於 2009 年開始監測，2010 年加入二水、田中及烏塗等井(圖 4.2-19)。導電度連續監測目的在瞭解地下水是否有短期的變化？是否會受到降雨的影響？

有些觀測井的井內水質有明顯的分層，當分層間之導電度差異較大時，監測測點又位於分層之間，水位短暫的起伏，將造成導電度明顯改變。例如荊桐一井，井內水質在不同深度有相當的差異，濾管深度的導電度約 $1300\ \mu\text{S/cm}$ ，但深度 20m 以上，卻遞減至 $950\ \mu\text{S/cm}$ (圖 4.2-20)。此井的監測點約在井口下 12.5m 處，導電度約為 $1100\ \mu\text{S/cm}$ ，即此兩層水之漸變帶。當五月初水質採樣抽水時，上層水被抽掉、井內水都經由濾管的水補充，導電度都為 $1300\ \mu\text{S/cm}$ ，但抽水後，監測點的導電度開始緩降，至八月初、又降回約 $1100\ \mu\text{S/cm}$ (圖 4.2-20)，推測應有較淡的地下水補充。

荊桐一受到 2009 年四月的春雨及兩次降雨比較多的颱風(6/22 蓮花及 8/9 莫拉克)影響，含水層的導電度約在兩週內顯著升高(圖 4.2-21)。春雨的單日雨量雖然不多(都在 50mm 以下)，但含水層導電度明顯上升，約從 $1050\ \mu\text{S/cm}$ 增加至 $2000\ \mu\text{S/cm}$ ，接著導電度在一週內又回到背景值。莫拉克颱風雖然單日降雨可達 400mm，但導電度的增加幅度並不大，約從 $1200\ \mu\text{S/cm}$ 增加至 $1400\ \mu\text{S/cm}$ 。

荊桐一井上覆約 9m 的泥層(圖 4.2-20)，理論上雨水應不至於很快進入含水層中，但監測數據卻顯示導電度隨著降雨而變化，推測是降雨造成水位上升，井內下層水往上移，而下層水導電度比較高，所以監測的導電度變高。

荊桐一井之導電度 2009-2010 年的變化如圖 4.2-21，2009 年平均約 $1200\ \mu\text{S/cm}$ ，2010 年明顯較低、約 $1100\ \mu\text{S/cm}$ 。

六合一井的井內水質也有明顯的分層，由上往下可分成 4 層：(a) $840\text{--}870\ \mu\text{S/cm}$ ；(b) $870\ \mu\text{S/cm}$ ；(c) $840\text{--}870\ \mu\text{S/cm}$ ；(d) $840\text{--}950\ \mu\text{S/cm}$ (圖 4.2-23)。監測點約在深度 25m 處、位於 ab 層的交界。2009 年 4 月春雨期間導電度明顯下降，從 $850\ \mu\text{S/cm}$ 降至 $790\ \mu\text{S/cm}$ ，約一週後又恢復正常(圖 4.2-24、4.2-25)。推測因為下方 c 層水較淡，降雨期間此層水往上升，造成監測點的導電度變小。

柑園一井的井內水質分層與荊桐一類似，導電度上層小($300\text{--}900\ \mu\text{S/cm}$)、下層較大($900\ \mu\text{S/cm}$)。監測點約在深度 15m，上下水層導電度差異很大(圖 4.2-26)，所以水位變動，也造成導電度明顯的變化。2009 年 6 月的蓮花颱風及 8 月的莫拉克颱風，降雨皆造成導電度上升，從 $770\ \mu\text{S/cm}$ 升至 $850\ \mu\text{S/cm}$ ，然後緩降、經數月後降至 $760\ \mu\text{S/cm}$ (圖 4.2-27)。推測與荊桐一相同，因下層導電度大，水位上升，下層水往上移動，所以導電度變大。2010 年導電度在旱季比較低、雨季較高。

田中一的導電度垂向變化不大，但田中二的變化比稍大，兩井的監測點皆

在深度 80m 處，整體之導電度變化皆不大(圖 4.2-28 及圖 4.2-29)。

烏塗井的監測點約在井口下 70m 處，導電度有緩慢上升的趨勢(圖 4.2-30)，從 2009 年 6 月至 2010 年 9 月的垂向導電度數據發現，導電度也有上升的趨勢(圖 4.2-31)。六合二井從 2009 年 4 月至 2010 年 9 月的垂向導電度，也有上升的趨勢(圖 4.2-32)。

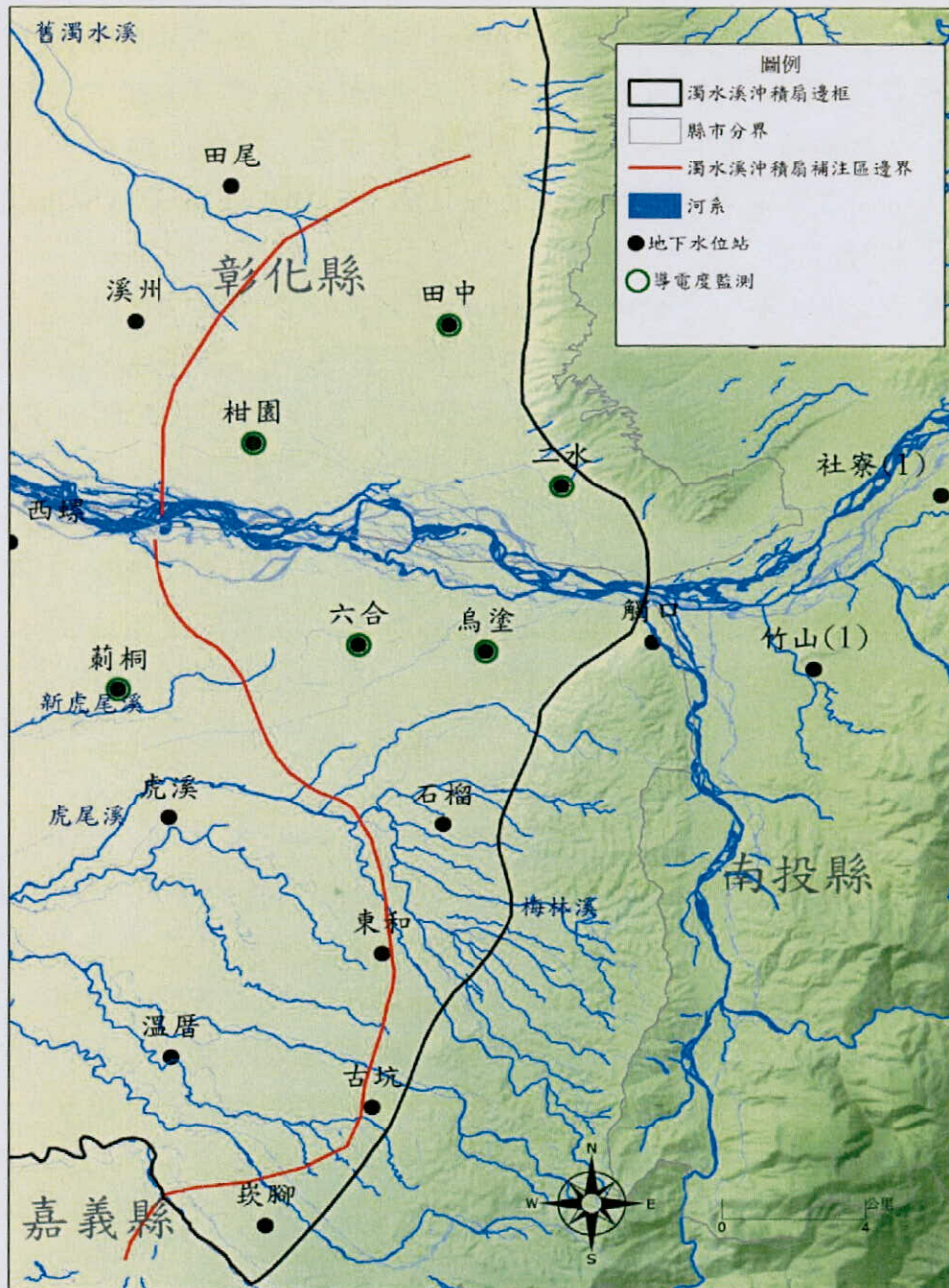


圖 4.2-19 導電度連續監測之井位

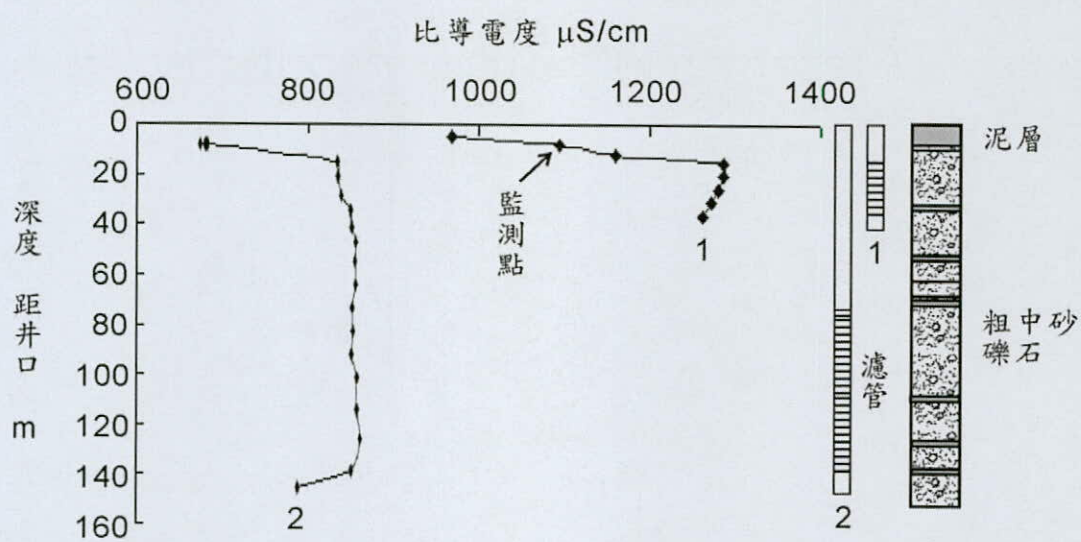


圖 4.2-20 荊桐站導電度井測(2010 年 08 月 18 日)

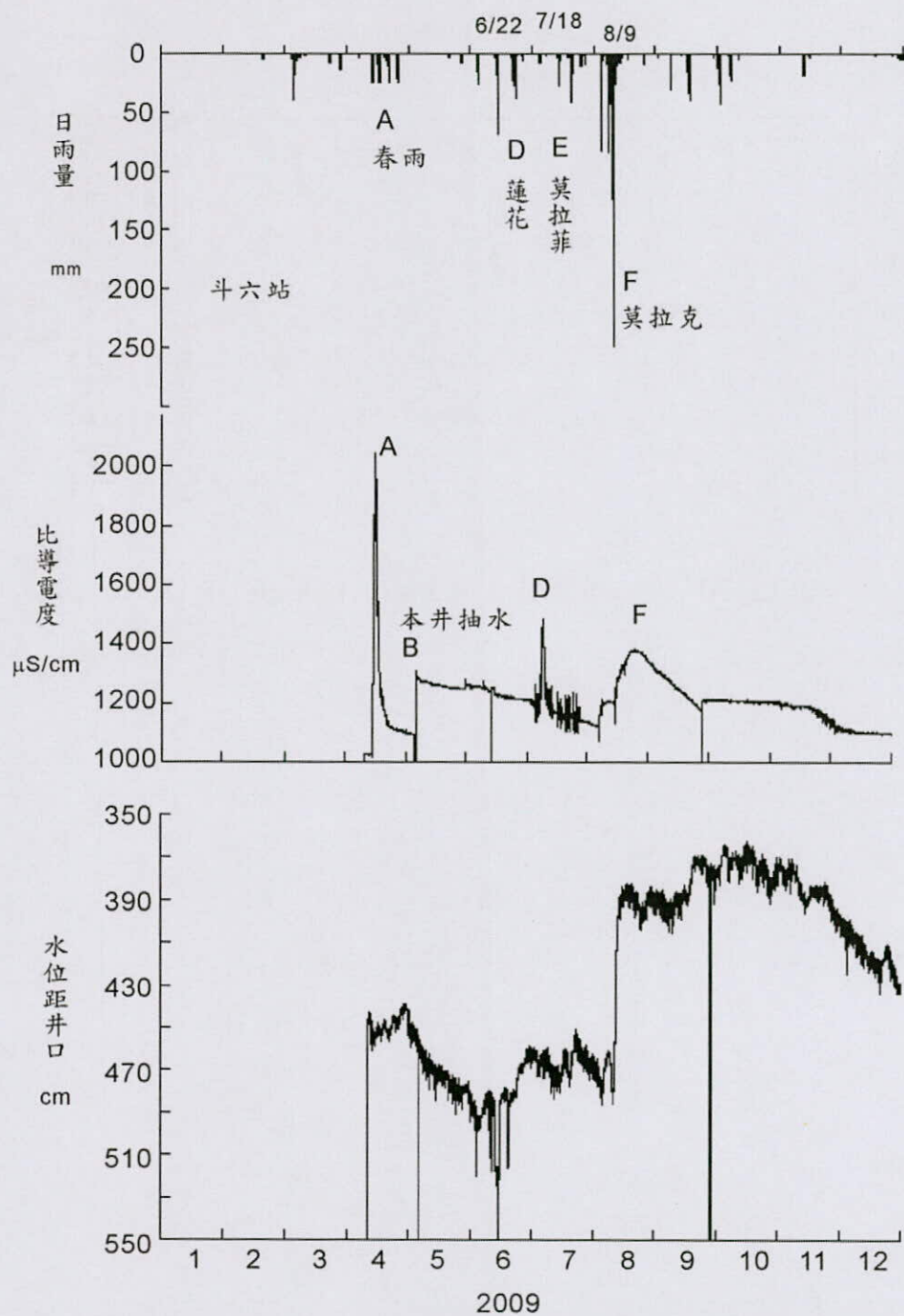


圖 4.2-21 荊桐一井 2009 年導電度連續監測數據

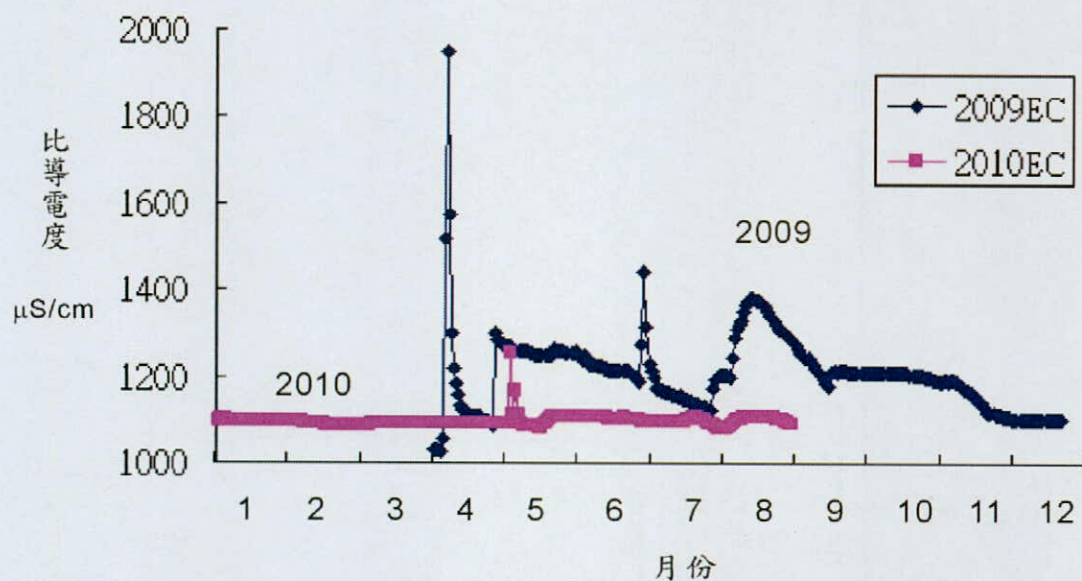


圖 4.2-22 荊桐一井 2009-2010 年導電度監測比較

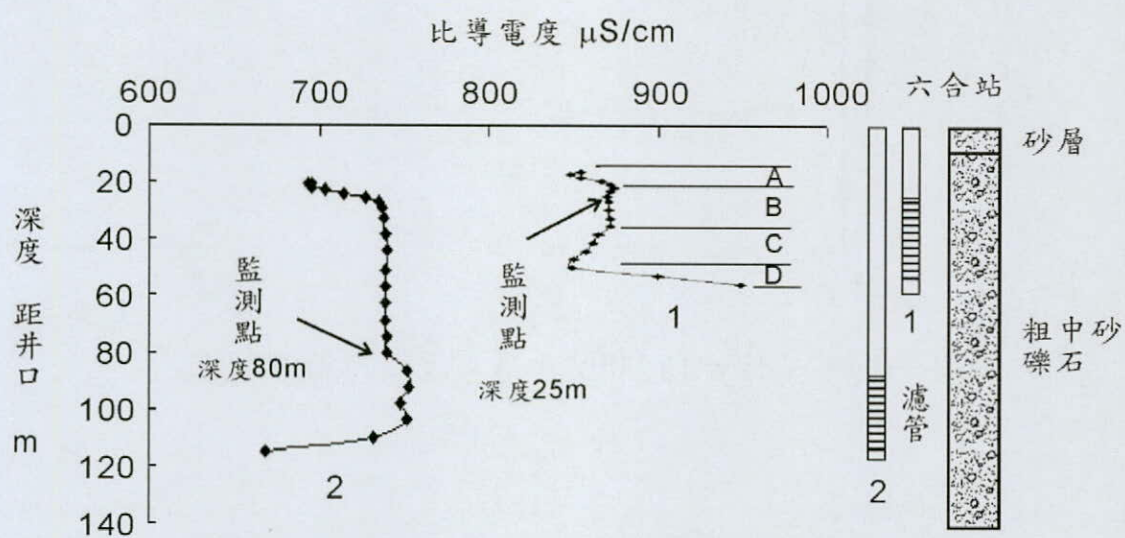


圖 4.2-23 六合站導電度井測(2010 年 09 月 01 日)

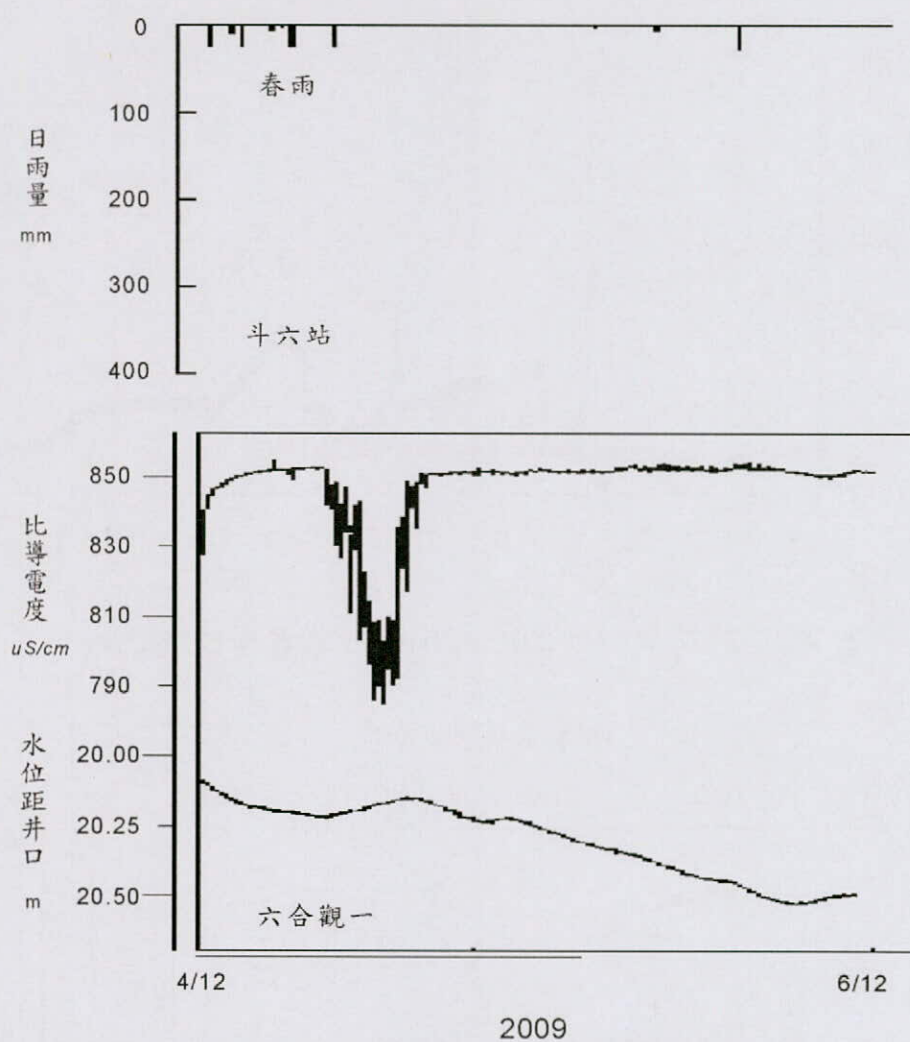


圖 4.2-24 六合一井 2009 年導電度連續監測數據

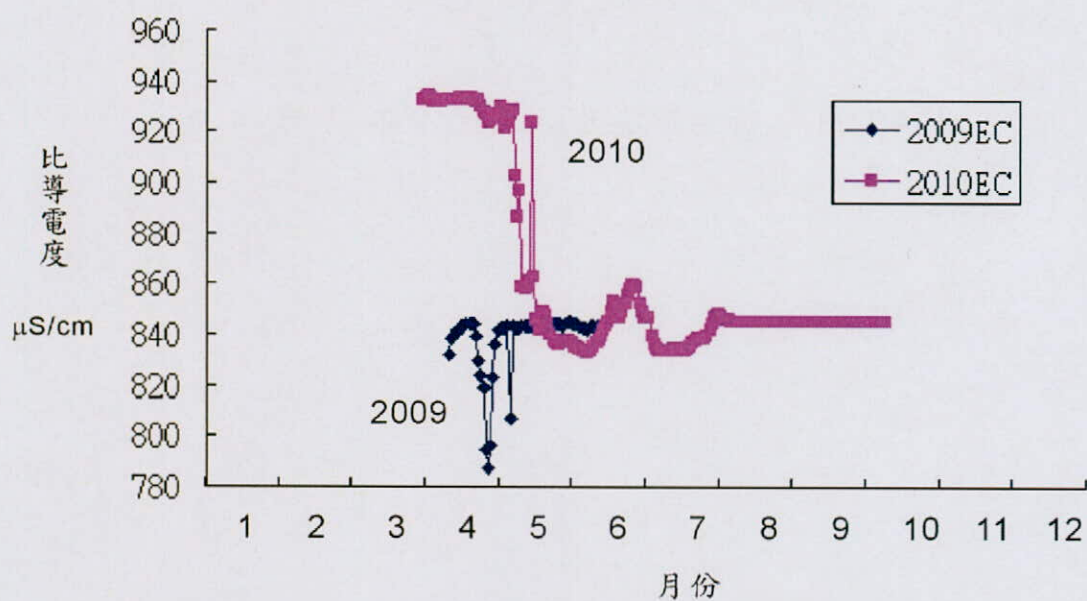


圖 4.2-25 六合一井 2009-2010 年導電度監測數據

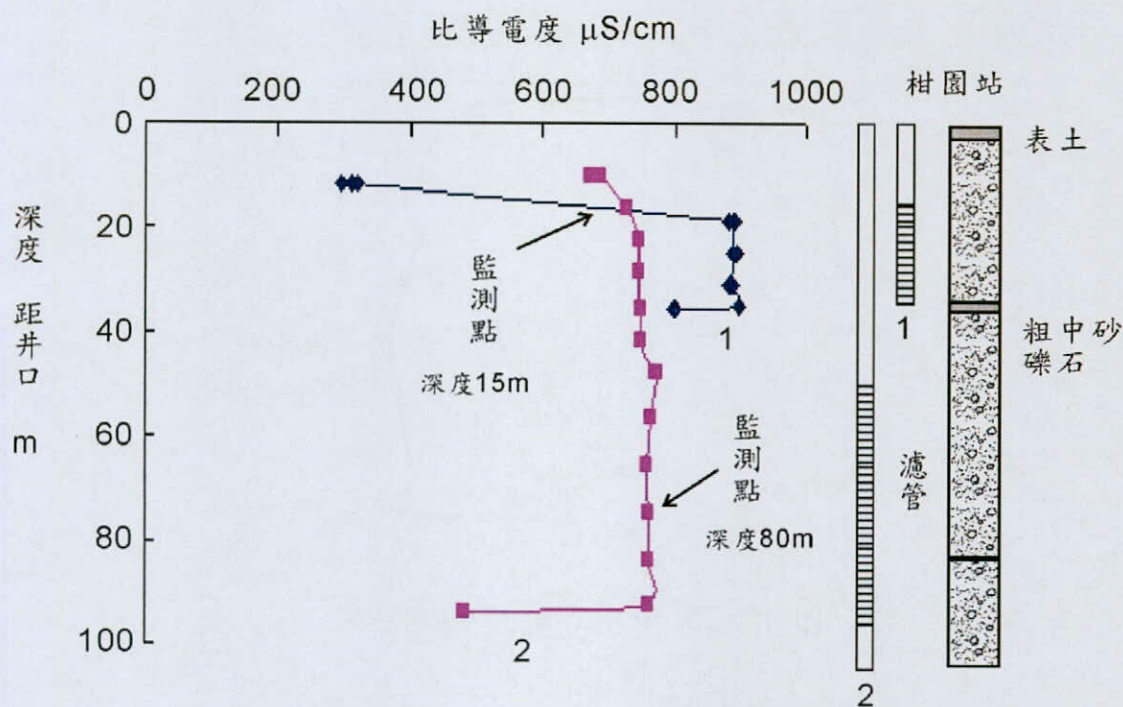


圖 4.2-26 柑園井導電度井測

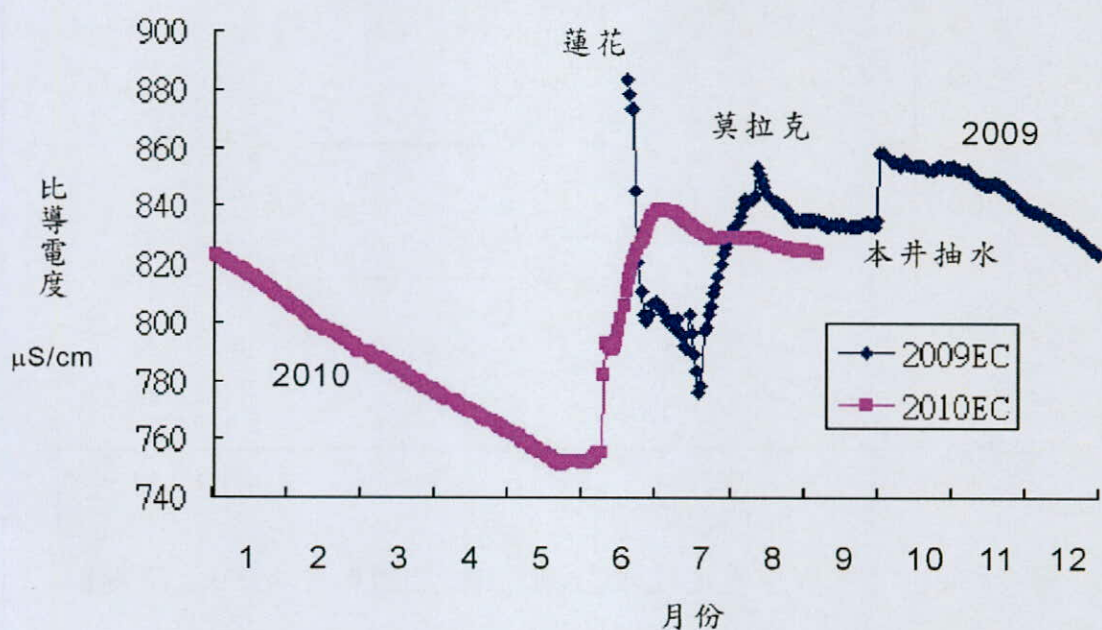


圖 4.2-27 柑園一井 2009-2010 年導電度連續監測

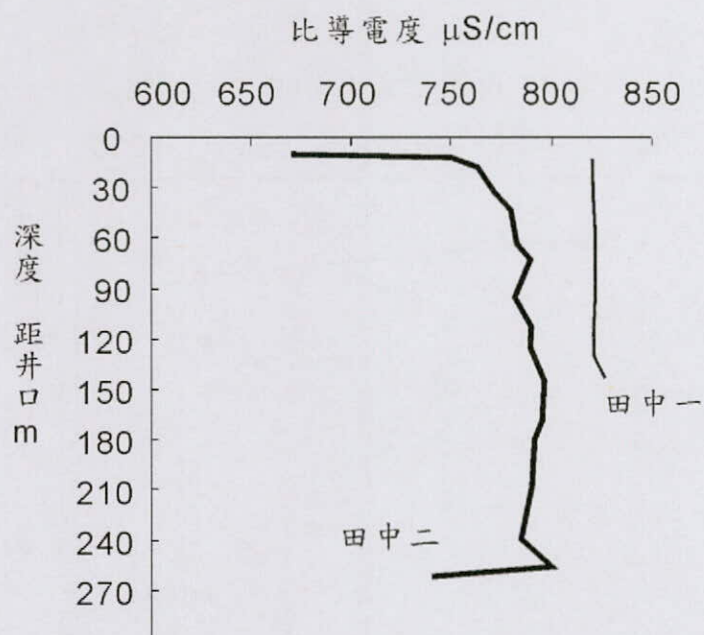


圖 4.2-28 田中導電度井測結果

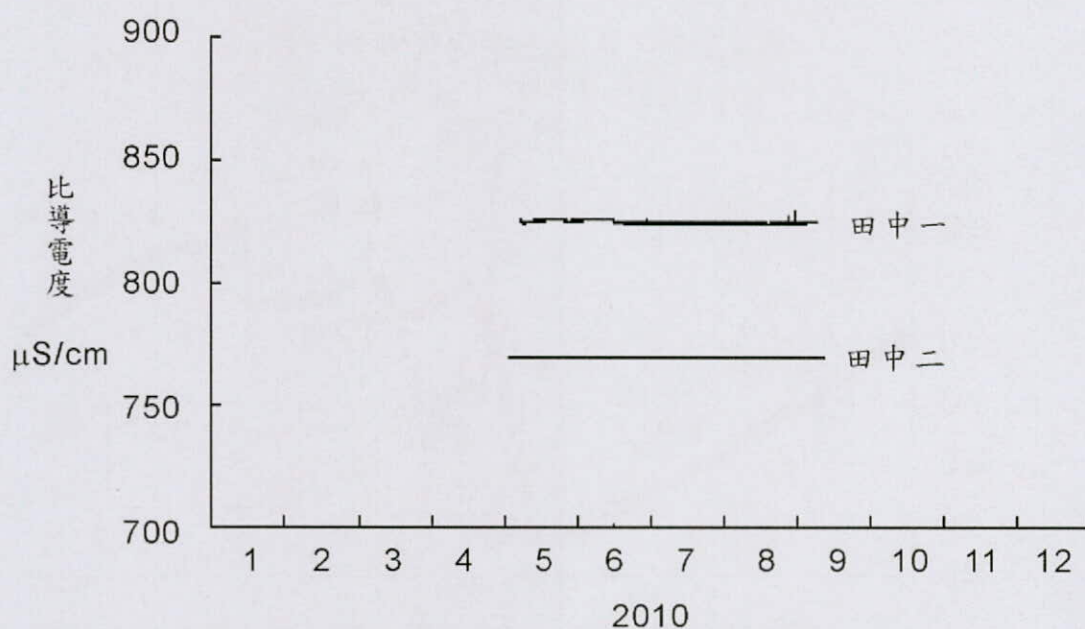


圖 4.2-29 田中站導電度連續監測結果(監測點皆在 80m 深度)

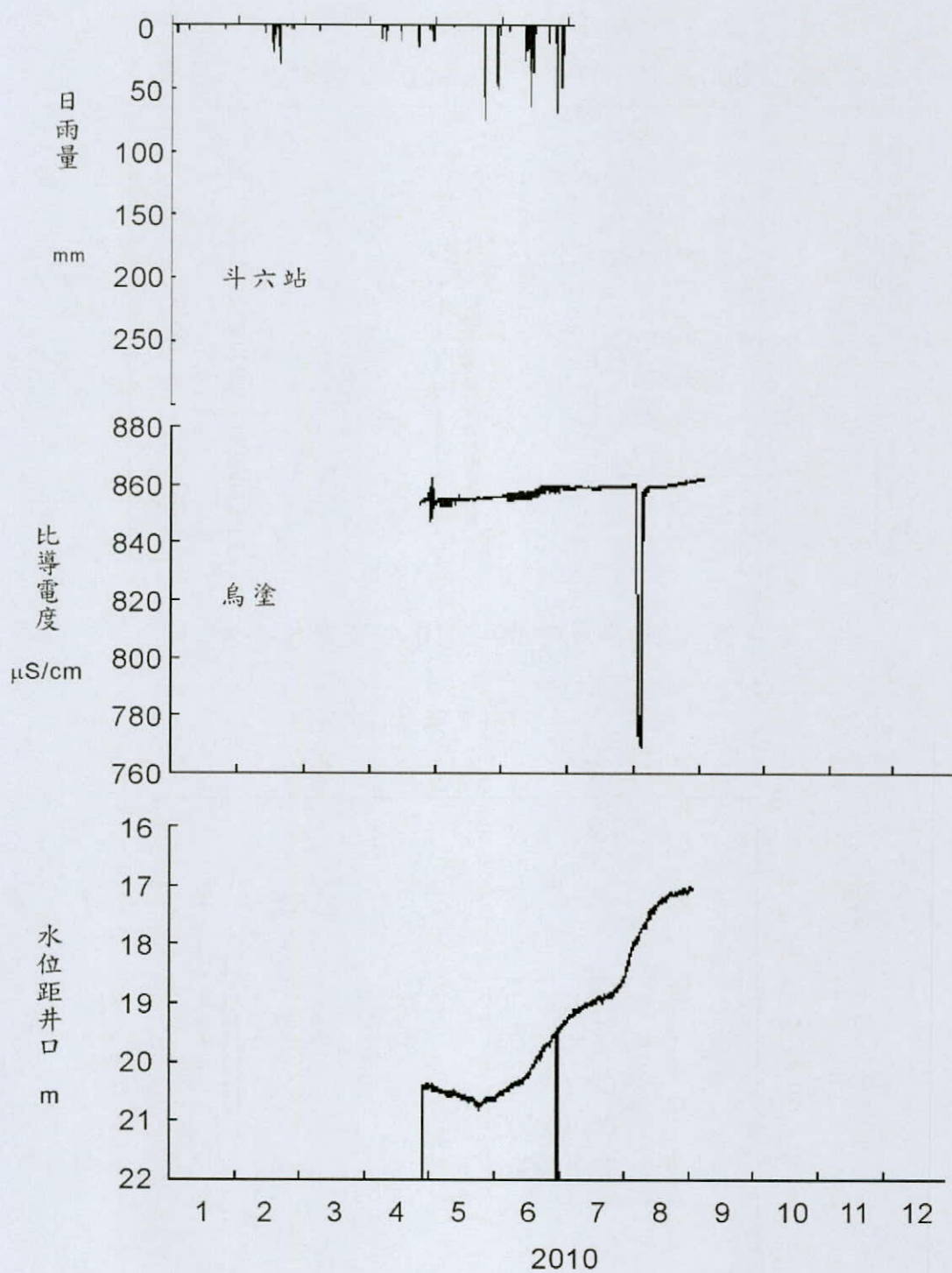


圖 4.2-30 烏塗井 2010 年導電度連續監測

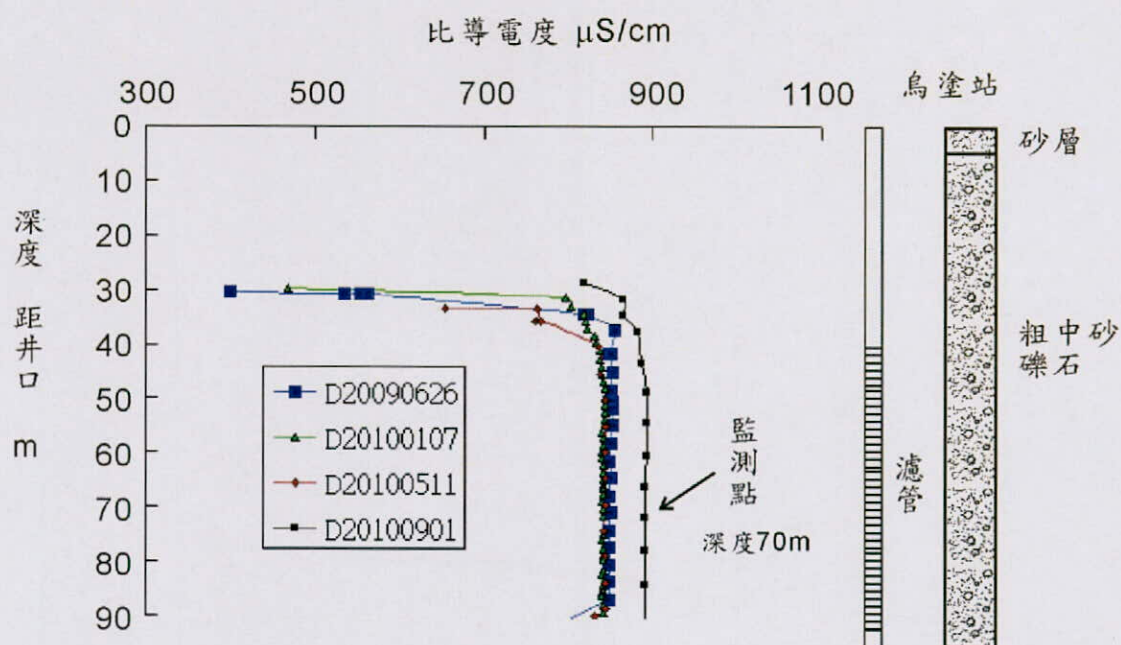


圖 4.2-31 烏塗井 2009-2010 年導電度井測

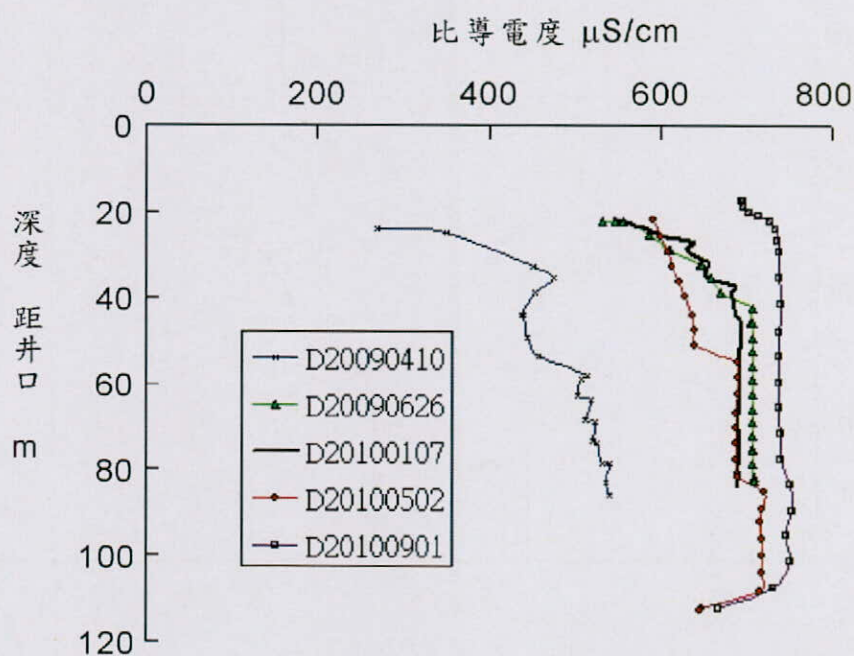


圖 4.2-32 六合二井 2009-2010 年導電度井測

4.3 抽水試驗

4.3.1 抽水井鑿建與分級試水

自民國 81 年起，經濟部辦理觀測井整體計畫，主要由水利署及中央地質調查所執行，相關濁水溪沖積扇試水成果如表 4.3-1，各站井分佈如圖 4.3-1 所示。本計畫自民國 98~101 年執行期間，於濁水溪沖積扇與屏東平原進行抽水井鑿建及抽水試驗，其中 98 年度於濁水溪沖積扇之荊桐及柑園站進行試驗，99 年度於濁水溪沖積扇之六合、100 年度於屏東平原彭厝及 101 年度於屏東平原萬隆進行鑿井試驗。本計畫所鑿建之抽水井皆在觀測井附近，因此可繼續進行複井抽水試驗，求取含水層之導水係數(T)與儲水係數(S)。本小節將說明井體鑿建及分級試水原理。

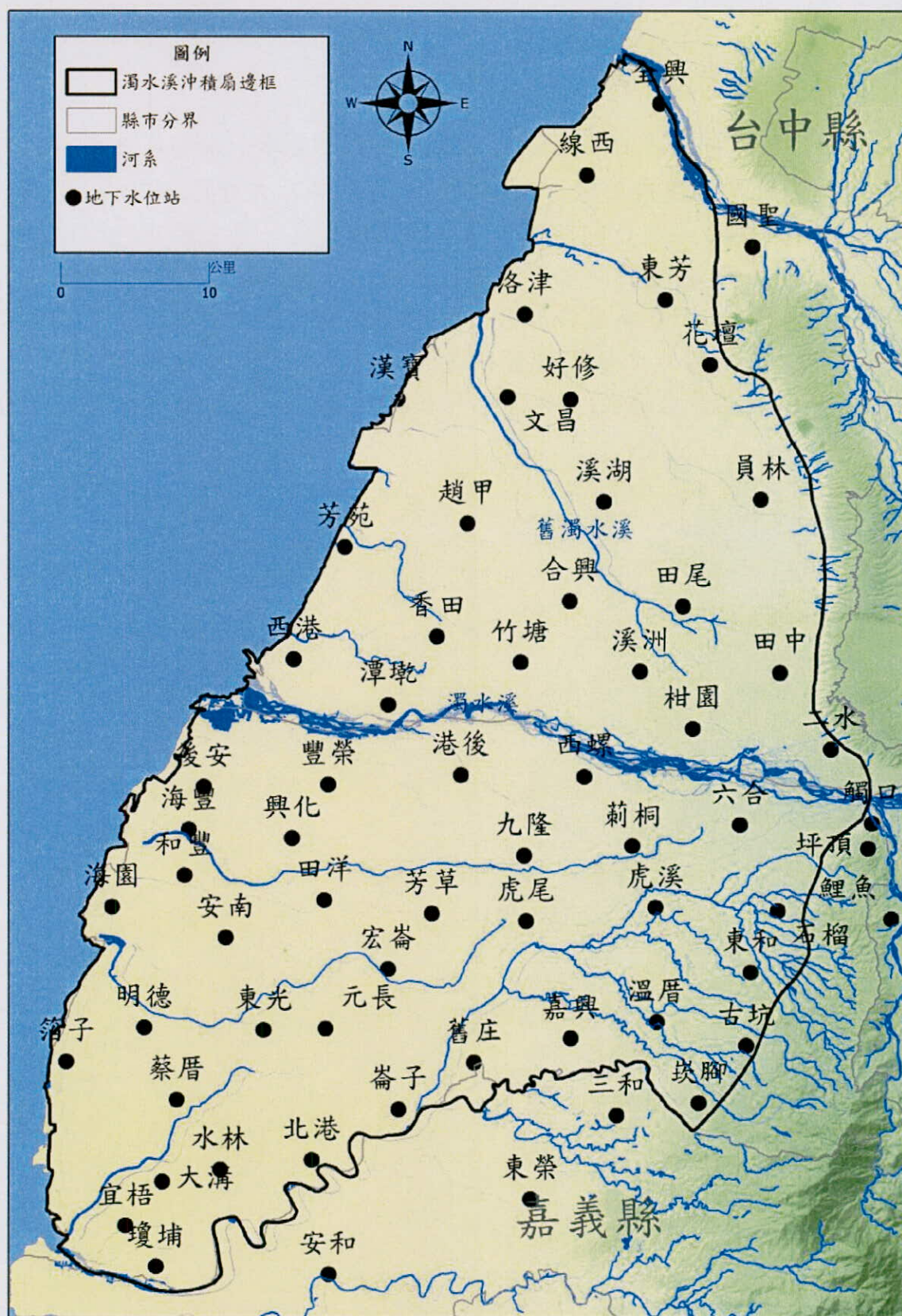


表 4.3-1 濁水溪沖積扇試水成果表

站名	井別		試水日期	靜水位	抽水水位	出水量	導水係數	儲水係數
				(井口下,m)	(井口下,m)	Q(cmh)	T(m ² /min)	S
六合	觀測井	(2)	81.07.22	13.130	15.050	45.2	2.7237	
石榴	觀測井	(2)	81.06.21	21.340	23.025	27.7	0.3577	
東和	觀測井	(1)	81.06.30	14.430	18.890	35.3	0.1436	
東和	觀測井	(2)	81.03.11	15.880	17.470	33.8	1.8009	
虎溪	觀測井	(1)	81.04.25	6.125	11.770	37.3	0.3617	0.00144
虎溪	觀測井	(2)	81.04.09	4.208	5.900	54.6	1.2122	
虎尾	觀測井	(1)	81.03.28	12.386	13.616	37.6	1.2200	
虎尾	觀測井	(2)	81.03.17	11.120	12.210	38.0	1.0850	
芳草	觀測井	(1)	81.06.03	1.815	4.255	35.3	0.3528	
芳草	觀測井	(2)	81.06.03	7.365	8.723	60.4	1.5470	
田洋	觀測井	(1)	81.05.05	2.680	3.690	38.1	0.9097	0.00188
田洋	觀測井	(2)	81.05.13	9.546	11.453	60.4	0.8888	0.00062
安南	觀測井	(1)	81.05.01	14.560	16.810	51.5	1.0972	
安南	觀測井	(2)	81.05.02	15.520	18.110	32.2	0.3490	
海園	觀測井	(1)	81.07.31	10.395	18.830	32.2	0.1120	
海園	觀測井	(2)	81.07.11	13.900	17.005	39.5	0.4630	
海園	觀測井	(3)	81.07.28	18.060	21.810	34.1	0.3390	
二水	觀測井	(1)	82.09.20	39.153	39.350	41.0	4.1882	0.2
柑園	觀測井	(1)	82.05.02	9.405	10.010	60.3	1.8611	
柑園	觀測井	(2)	82.04.28	9.565	10.245	60.3	1.4115	
溪洲	觀測井	(1)	82.08.06	4.559	6.360	63.2	1.0479	0.237
溪洲	觀測井	(2)	82.07.10	5.010	6.215	70.5	1.9799	0.00107
溪洲	觀測井	(3)	82.07.01	4.100	5.364	70.5	3.0056	0.00138
竹塘	觀測井	(1)	82.05.29	1.715	2.626	72.8	2.2687	
竹塘	觀測井	(2)	82.05.25	6.705	8.055	72.8	1.4978	
潭墘	觀測井	(1)	82.07.29	10.400	12.540	49.9	0.3827	
潭墘	觀測井	(2)	82.08.01	12.210	13.165	48.9	1.4481	
西港	觀測井	(1)	82.09.03	16.796	20.341	45.6	0.3435	
西港	觀測井	(2)	82.08.30	10.190	12.826	57.6	0.6909	
烏塗	觀測井	(1)	82.10.18	29.262	29.974	76.5	2.3227	0.175

站名	井別		試水日期	靜水位	抽水位	出水量	導水係數	儲水係數
				(井口下,m)	(井口下,m)	Q(cmh)	T(m ² /min)	S
六合	觀測井	(1)	82.03.18	17.205	17.890	49.9	2.7756	
石榴	觀測井	(1)	82.04.04	4.570	10.250	7.4	0.0205	
西螺	觀測井	(1)	82.05.14	4.815	6.365	55.8	1.0308	
西螺	觀測井	(2)	82.04.29	4.935	5.655	55.8	2.5913	
港後	觀測井	(1)	82.08.21	6.600	10.520	49.9	0.3290	0.000057
港後	觀測井	(2)	82.07.20	7.840	9.479	63.0	1.0847	0.00023
豐榮	觀測井	(1)	82.06.22	3.780	6.280	55.8	0.5884	
豐榮	觀測井	(2)	82.06.02	10.000	12.360	55.8	0.8457	
豐榮	觀測井	(3)	82.06.29	9.860	15.610	52.0	0.2190	
後安	觀測井	(1)	82.05.11	20.780	22.535	40.8	0.6370	
後安	觀測井	(2)	82.05.24	22.300	28.220	40.8	0.1768	
和豐	觀測井	(1)	82.05.19	20.265	22.460	55.8	0.8020	0.0007
和豐	觀測井	(2)	82.04.09	20.410	24.837	49.9	0.2900	0.0017
炭腳	觀測井	(1)	82.09.04	53.620	59.776	16.6	0.0646	
炭腳	觀測井	(2)	82.08.26	53.185	55.565	23.5	0.2730	
三和	觀測井	(1)	82.09.01	7.910	10.170	38.0	0.4364	
三和	觀測井	(2)	82.09.22	35.200	43.767	21.0	0.0572	
北港	觀測井	(1)	82.07.13	23.100	24.843	40.2	0.6150	
北港	觀測井	(2)	82.07.22	25.960	27.521	34.1	0.5462	
箔子	觀測井	(1)	82.08.18	11.360	15.960	51.0	0.2990	
箔子	觀測井	(2)	82.09.01	17.280	22.224	40.8	0.2000	
箔子	觀測井	(3)	82.09.04	17.620	22.361	40.8	0.2150	
國聖	觀測井	(1)	83.07.08	1.420	(輔助觀測井，未試水)			
國聖	觀測井	(2)	83.07.07	7.456	16.705	5.1	0.0080	
國聖	觀測井	(3)	83.06.18	-46.000	33.521	10.1	0.0053	
線西	觀測井	(1)	83.09.14	2.280	9.982	60.4	0.2562	0.0045
線西	觀測井	(2)	83.09.06	6.815	(輔助觀測井，未試水)			
線西	觀測井	(3)	83.08.20	7.010	10.600	54.6	0.5076	0.00033
線西	觀測井	(4)	83.09.06	7.690	14.085	54.6	0.2846	0.000145
花壇	觀測井	(1)	83.06.24	1.496	(輔助觀測井，未試水)			
花壇	觀測井	(2)	83.06.26	6.812	13.704	16.6	0.0375	

站名	井別		試水日期	靜水位	抽水位	出水量	導水係數	儲水係數
				(井口下,m)	(井口下,m)	Q(cmh)	T(m ² /min)	S
花壇	觀測井	(3)	83.06.10	16.577	19.272	60.4	0.6490	
好修	觀測井	(1)	83.08.18	5.727	7.547	56.1	0.8423	0.000363
好修	觀測井	(2)	83.07.31	10.487	12.831	56.1	0.7810	
好修	觀測井	(3)	83.07.21	10.402	13.361	51.5	0.5597	
漢寶	觀測井	(1)	83.06.26	12.739	(輔助觀測井，未試水)			
漢寶	觀測井	(2)	83.06.26	13.381	16.090	49.9	0.4209	
漢寶	觀測井	(3)	83.06.18	7.321	9.635	54.6	0.6595	
員林	觀測井	(1)	83.06.20	9.590	14.750	63.1	0.3165	
員林	觀測井	(2)	83.07.14	12.650	15.605	54.6	0.5928	
員林	觀測井	(3)	83.07.15	12.590	(輔助觀測井，未試水)			
員林	觀測井	(4)	83.06.03	15.050	18.735	46.1	0.3143	
溪湖	觀測井	(1)	83.04.17	8.854	11.350	69.3	0.7457	0.000642
溪湖	觀測井	(2)	83.05.10	9.730	15.965	60.4	0.2370	0.00295
溪湖	觀測井	(3)	83.04.28	13.086	15.308	70.5	1.7493	0.00114
趙甲	觀測井	(1)	83.04.27	11.750	13.345	40.8	0.6749	
趙甲	觀測井	(2)	83.04.23	11.750	13.055	40.8	0.8538	
趙甲	觀測井	(3)	83.03.29	11.100	12.710	40.8	0.8391	
芳苑	觀測井	(1)	83.04.11	11.272	14.888	54.6	0.3888	
芳苑	觀測井	(2)	83.03.27	10.582	12.614	63.1	0.8432	
芳苑	觀測井	(3)	83.03.10	8.115	14.040	72.8	0.3150	
田中	觀測井	(2)	83.03.19	11.474	13.092	60.4	1.1697	
荊桐	觀測井	(1)	83.02.23	6.452	7.765	63.1	1.3342	
荊桐	觀測井	(2)	83.02.09	6.070	7.255	66.2	1.6034	
九隆	觀測井	(1)	83.07.19	4.920	7.235	55.8	0.6462	
九隆	觀測井	(2)	83.04.01	7.939	9.607	57.6	1.0072	
九隆	觀測井	(3)	83.03.23	12.178	17.227	48.2	0.2492	
興化	觀測井	(1)	83.09.03	10.550	12.880	47.8	0.4859	
興化	觀測井	(2)	83.08.31	10.600	15.195	47.8	0.2695	
興化	觀測井	(3)	83.08.14	12.220	14.075	47.8	0.8087	
海豐	觀測井	(1)	83.08.23	15.500	18.875	39.5	0.3086	
海豐	觀測井	(2)	83.08.10	17.730	21.245	38.1	0.3212	

站名	井別		試水日期	靜水位	抽水位	出水量	導水係數	儲水係數
				(井口下,m)	(井口下,m)	Q(cmh)	T(m ² /min)	S
古坑	觀測井	(1)	83.03.17	47.520	53.520	35.5	0.1830	
溫厝	觀測井	(1)	83.05.03	7.535	18.550	68.1	0.1088	
溫厝	觀測井	(2)	83.04.24	12.740	35.180	47.5	0.0492	
嘉興	觀測井	(1)	83.07.10	21.315	28.430	47.5	0.1630	0.000172
嘉興	觀測井	(2)	83.09.14	18.360	(輔助觀測井，未試水)			
嘉興	觀測井	(3)	83.06.22	23.625	27.120	48.2	0.5971	0.000241
崙子	觀測井	(1)	83.02.04	22.405	26.215	35.3	0.1446	
崙子	觀測井	(2)	83.01.27	18.570	21.103	43.3	0.4448	
元長	觀測井	(1)	83.07.30	14.260	15.860	42.0	0.8061	
元長	觀測井	(2)	83.07.19	14.080	16.455	49.9	0.5123	
蔡厝	觀測井	(1)	83.03.06	19.865	22.270	40.8	0.3365	0.00013
蔡厝	觀測井	(2)	83.02.24	20.700	26.335	38.1	0.1409	0.00298
水林	觀測井	(1)	83.07.06	25.050	27.665	37.0	0.4172	
水林	觀測井	(2)	83.07.01	28.000	33.450	21.0	0.0732	
大溝	觀測井	(1)	83.09.06	19.650	20.795	47.8	1.1610	
大溝	觀測井	(2)	83.09.04	22.780	25.715	33.5	0.3029	
瓊埔	觀測井	(1)	83.02.25	31.540	33.490	18.2	0.2367	
瓊埔	觀測井	(2)	83.03.15	37.050	40.750	24.0	0.1860	
新光	抽試井	(1)	85.07.29	53.100	59.460	30.9	0.0906	0.000688
新光	抽試井	(2)	85.04.29	48.923	71.850	41.5	0.0340	0.00027
新民	觀測井	(1)	85.06.30	9.333	10.870	77.2	0.9864	
新民	觀測井	(2)	85.07.03	12.244	22.670	41.5	0.1306	
竹山	觀測井	(1)	85.09.10	6.360	45.460	47.8	0.3080	0.00022
竹山	觀測井	(2)	85.03.07	10.370	47.280	30.2	0.0120	0.00024
鯉魚	觀測井	(1)	85.07.12	2.125	16.870	3.6	0.0048	
鯉魚	觀測井	(2)	85.07.09	2.979	25.580	3.4	0.0031	
社寮	觀測井	(1)	85.08.21	9.160	11.190	4.2	0.0318	
觸口	觀測井	(1)	85.07.08	8.620	12.770	15.8	0.0952	
觸口	觀測井	(2)	85.07.09	3.760	23.190	15.2	0.0200	
坪頂	觀測井	(1)	85.03.08	95.770	120.430	3.8	0.0018	
國聖	觀測井	(1)	85.05.17	3.128	4.430	10.0	0.2121	

站名	井別		試水日期	靜水位	抽水水位	出水量	導水係數	儲水係數
				(井口下,m)	(井口下,m)	Q(cmh)	T(m ² /min)	S
員林	觀測井	(3)	85.05.01	13.878	19.010	19.3	0.0956	
花壇	觀測井	(1)	85.04.18	1.632	2.560	19.3	0.4113	
漢寶	觀測井	(1)	85.04.13	10.764	18.770	15.1	0.0470	
嘉興	觀測井	(2)	85.04.26	23.652	31.330	12.0	0.0400	
漢寶	觀測井	(4)	86.04.24	6.288	12.470	37.3	0.2093	
全興	觀測井	(1)	86.06.23	3.558	9.510	51.5	0.3325	
全興	觀測井	(2)	86.07.01	10.097	25.490	9.9	0.0130	
全興	觀測井	(3)	86.06.25	9.818	16.560	53.1	0.3998	
全興	觀測井	(4)	86.06.22	7.474	16.930	82.3	0.2687	
洛津	觀測井	(1)	86.05.22	5.248	19.090	18.8	0.0356	
洛津	觀測井	(2)	86.06.06	9.959	13.660	69.5	0.8056	
洛津	觀測井	(3)	86.05.26	8.936	14.660	71.3	0.6052	
好修	觀測井	(4)	86.04.18	11.401	13.760	38.7	1.1697	0.00005
花壇	觀測井	(4)	86.02.26	14.571	29.490	57.6	0.1083	
東芳	觀測井	(1)	86.01.14	11.988	14.600	59.0	0.6504	
東芳	觀測井	(2)	86.01.14	12.251	15.210	53.1	0.5084	
文昌	觀測井	(1)	86.04.22	3.685	9.780	28.5	0.1488	
文昌	觀測井	(2)	86.04.13	9.725	12.580	59.0	0.6696	
文昌	觀測井	(3)	86.04.19	11.118	13.020	52.8	0.8643	
文昌	觀測井	(4)	86.04.23	10.440	14.430	66.0	0.6500	
西港	觀測井	(1)	86.03.09	21.880	28.000	59.0	0.2817	0.0009
西港	觀測井	(2)	86.03.19	33.230	35.480	64.4	0.8232	0.000115
西港	觀測井	(4)	86.03.07	7.900	14.440	51.5	0.2172	0.0000566
香田	觀測井	(1)	86.01.10	7.300	17.400	70.5	0.2485	
香田	觀測井	(2)	86.01.09	14.430	16.260	39.5	0.6171	
田尾	觀測井	(1)	86.01.22	7.065	8.180	34.5	0.9143	
田尾	觀測井	(2)	86.01.16	17.997	19.400	29.4	0.6001	
合興	觀測井	(1)	86.05.05	5.320	6.860	88.3	1.5831	0.202
合興	觀測井	(2)	86.01.30	13.288	14.440	26.7	0.6691	0.00122
合興	觀測井	(3)	86.01.31	13.915	23.240	35.7	0.0920	0.0000718
田中	觀測井	(2)	86.03.30	14.289	19.460	50.7	1.2625	

站名	井別		試水日期	靜水位	抽水位	出水量	導水係數	儲水係數
				(井口下,m)	(井口下,m)	Q(cmh)	T(m ² /min)	S
海園	觀測井	(1)	86.04.19	11.659	21.390	38.1	0.1543	0.000173
海園	觀測井	(4)	86.04.17	12.722	20.430	52.0	0.3089	0.003403
田洋	觀測井	(3)	85.12.27	15.166	40.020	43.1	0.0964	
虎溪	觀測井	(1)	86.05.15	9.978	15.410	54.6	0.2779	
虎溪	觀測井	(2)	86.03.10	8.346	11.030	71.3	1.3187	0.001465
虎溪	觀測井	(3)	86.04.22	17.769	24.910	59.2	0.3943	0.0010054
虎溪	觀測井	(4)	86.03.07	18.783	25.860	56.1	0.3442	0.0000971
東和	觀測井	(3)	86.03.19	50.520	59.440	38.1	0.1244	
明德	觀測井	(1)	86.03.16	10.230	22.010	39.4	0.0962	
明德	觀測井	(2)	86.03.05	17.975	21.030	22.3	0.2808	
明德	觀測井	(3)	86.03.19	19.421	32.530	35.3	0.1658	
明德	觀測井	(4)	86.03.04	18.106	25.040	21.0	0.1406	
宏崙	觀測井	(1)	86.03.17	5.793	11.730	57.6	0.4168	
宏崙	觀測井	(2)	86.03.26	17.552	27.460	10.0	0.0564	
舊庄	觀測井	(1)	86.03.26	3.785	10.170	59.4	0.2511	
舊庄	觀測井	(2)	86.03.04	21.080	32.610	25.8	0.0578	
舊庄	觀測井	(3)	86.03.24	22.160	33.070	58.5	0.1361	
舊庄	觀測井	(4)	86.02.02	22.130	32.710	25.8	0.0542	
舊庄	觀測井	(5)	86.04.18	20.890	33.310	46.1	0.0696	
東光	觀測井	(1)	86.04.17	8.079	16.200	72.9	0.3785	0.289
東光	觀測井	(2)	86.03.29	19.426	21.650	48.2	0.6224	
東光	觀測井	(3)	86.04.14	20.020	25.240	55.0	0.5303	
東光	觀測井	(4)	86.04.08	18.950	25.250	58.2	0.2822	0.000114
東光	觀測井	(5)	86.03.14	17.510	22.490	58.2	0.3518	0.000138
宜梧	觀測井	(1)	85.12.31	24.440	30.750	57.7	0.3744	
宜梧	觀測井	(2)	86.03.14	31.901	42.480	55.8	0.1404	
宜梧	觀測井	(3)	86.01.05	25.239	33.140	53.9	0.1977	
宜梧	觀測井	(4)	86.03.10	25.337	47.870	56.7	0.0648	
東石	觀測井	(1)	86.06.15	29.125	32.080	49.9	0.4758	
東石	觀測井	(2)	86.05.11	37.509	45.150	27.1	0.1099	
東石	觀測井	(3)	86.06.08	24.262	32.600	37.6	0.1425	

站名	井別		試水日期	靜水位	抽水水位	出水量	導水係數	儲水係數
				(井口下,m)	(井口下,m)	Q(cmh)	T(m ² /min)	S
東石	觀測井	(4)	86.05.18	20.326	37.340	18.8	0.0434	
安和	觀測井	(1)	86.06.18	10.103	27.680	49.5	0.0672	
安和	觀測井	(2)	86.05.26	25.325	43.250	40.6	0.0747	
安和	觀測井	(3)	86.06.13	28.036	32.740	47.4	0.2526	
安和	觀測井	(4)	86.05.30	28.185	38.160	4.5	0.0078	
港後	觀測井	(3)	86.01.16	13.350	16.530	45.3	0.4800	0.000149
港後	觀測井	(4)	86.01.15	13.550	16.960	44.4	0.7393	0.00023
東榮	觀測井	(1)	86.01.26	34.679	50.950	5.6	0.0045	
東榮	觀測井	(2)	86.03.19	43.768	61.230	22.3	0.0351	
東榮	觀測井	(3)	86.03.16	43.856	56.550	26.8	0.0522	
東榮	觀測井	(4)	86.01.22	36.578	42.860	40.8	0.1366	
石榴	觀測井	(1)	86.06.16	7.369	10.960	1.7	0.0113	
荊桐	觀測井	(1)	98.06.11	7.385	7.691	110.0	3.7180	0.0006849
柑園	觀測井	(1)	98.08.21	10.240	10.521	199.4	6.0540	0.0408
六合	觀測井	(1)	99.06.10	20.540	20.597	190.0	11.2800	0.1313

一、井體建置

1. 鑽鑿井孔：

事前準備工作包括機具搬運及安裝、開挖井孔保護套管、挖泥漿池等，準備工作完成後，接隨進行鑽鑿井孔工作。

2. 孔內地層電測：

鑽鑿井孔達計畫深度後，接著進行孔內地層電測工作，取得自然電位(SP)、電阻率(16"、64")、自然伽瑪(γ) 四條曲線，此四條曲可反映出地層之岩性組成，提供核對地層岩心沙樣，並以之研判含水層之優劣，並決定濾水管置放位置。

3. 井管安裝：

當鑽鑿井孔至預計深度及擴孔完成後，依照井體設計進行下管作業。

4. 井圈處理：

井圈係指井管與孔壁之空間，為維護孔壁安全及阻沙濾水功用，此空間須予填充礫石濾料。另為充分隔絕上、下層地下水源，須在此空間內的適當位置填充皂土(Bentonite)、黏土漿予封隔，俾達到地下水分層觀測之效果。

5. 擴水洗井：

利用吊筒振盪器(Bailer, $\phi 2'' \sim \phi 4'' \times 20'$)放入井內上下反覆振盪，藉水力激動，幫助井圈濾料沉陷密實，並沖洗孔壁泥膜，接著抽吊井內泥水，使含水層與井體間水流暢通。擴水完成後，再安裝電動抽水機將井內泥水抽除，直到出水水色澄清為止。

二、分級試水

觀測井擴水洗井完成後進行分級試水，以測知井體特性，分析觀測井試驗所取得之試驗數據，以求取井體的井性能曲線及觀測地層(含水層)的導水係數(T)。

以連續抽水作分級試水時，第2級以後各級抽水之洩降因包含之前各級抽水之累計洩降，故各級洩降值，需藉之前各級洩降與抽水時間對數值曲線之延長線予以校正。故依據疊合原理(principle of superposition)，第2級之洩降，為第1級抽水量 $\Delta Q_1 = Q_1$ 所造成洩降，加上第2級增加抽水量 $\Delta Q_2 = Q_2 - Q_1$ 所造成之洩降；第3級之洩降為第1級 ΔQ_1 ，第2級增量 ΔQ_2 和第3級增量 $\Delta Q_3 = Q_3 - Q_2$ 所造成洩降之疊合；依此類推可得各級洩降之內部組成，試驗資料分析可由江崇榮(2008a)所推導之相等延時分級抽水試驗資料分解公式，分解成各級單獨抽水試驗資料。

除第一級試水採用實測洩降值 $s(Q_n, t)$ 外，其餘各級由實測洩降值 $s(Q_n, t)$ 計算修正洩降值 $s(Q_n, t')$ ，其修正方式如式 4.3-1 示：

$$s(Q_n, t') = s(Q_n, t) - \sum_{i=1}^{n-1} \left[\frac{2.30 \Delta Q_i}{4\pi T} \log \frac{(n-i)\Delta t + t'}{t'} \right] \dots (\text{式 4.3-1})$$

$s(Q_n, t')$ ：各級單獨抽水試驗井水位洩降(m)， Q_n 為第n級之抽水量(m^3 / day)， t' 為時間(0 ~ $\Delta t, \text{min}$)

$s(Q_n, t)$ ：分級抽水試驗井水位洩降(m)，t 為時間(0 ~ $n\Delta t, \text{min}$)

ΔQ_i ：各級比前級增加之抽水量(m^3 / day)， $\Delta Q_i = Q_i - Q_{i-1}$

T：導水係數(m^2 / day)

i：分級抽水試驗第i級， $i=1 \sim n$

Δt ：各級抽水延時(min)

在分解得單獨抽水試驗資料後，進行井性能曲線(well performance curve)分析，江崇榮(2008b)建議可由 Birschenk(1963)或 Rorabaugh(1953)法分析，其程序

為：

1. 先假設 $s=BQ+CQ^2$ 。 s 為單獨抽水試驗 100 分鐘之井水位洩降。
2. 因 $s/Q=B+CQ$ ，故 Q 對 s/Q 作圖應成直線；直線之斜率為 C ， $Q=0$ 時之截距為 B (Birschenk, 1963)。若 Q 對 s/Q 諸點分布確實呈直線，則完成分析。
3. 若 Q 對 s/Q 點分布明顯地偏離直線，且是向上彎曲之曲線，則應採用 $s=BQ+CQ^p$ 型式，以 Rorabaugh(1953)方法重新分析。
4. 因 $\log(s/Q-B)=\log C+(p-1)\log Q$ ，故在雙對數座標上 Q 對 $(s/Q-B)$ 作圖，各點應該呈直線分布。
5. B 為未知，必須以 Rorabaugh(1953)方法反覆嘗試求之。其方法是先用步驟 2 求得之 B 值代入步驟 4 之等式中，計算各組抽水試驗之 $(s/Q-B)$ 值，再點繪於雙對數座標上；若點呈向上彎之曲線，表示 B 值太小；改用較大 B 值重複計算和點繪，若得到向下彎之曲線，則表示 B 值太大；如此反覆試算 3 到 5 次可使各點呈直線分布，其 B 值為所求。

6. 由直線之斜率 $\frac{\log(s_2/Q_2-B)-\log(s_1/Q_1-B)}{\log Q_2-\log Q_1}=p-1$ ，可得 p 值。 $\log Q=\log 1=0$
- 時直線之截距等於 $\log C$ ，故 $\frac{\log(s/Q-B)-\log C}{\log Q-\log 1}=p-1$ ，可求得 C 值。

三、分級試水成果

(1)98 年荊桐站

本站建置 1 口抽水井，井體建置深度為 38m，採用 $\phi 8"$ PVC 管，濾水管安置於 14~32m 處，32~38m 處為沉砂管。

鑿井深度為 42m，依鑽探過程所汲取之砂樣資料顯示，本站大致淺層(0-12m)由較細緻之泥層組成，部份並夾有粉細砂地層；深層(12-42m)則以較粗之礫質粗砂層為主，偶夾中細砂層及泥層，其中泥層位置在 34~35m 附近(圖 4.3-2)，未發現厚層泥。

荊桐站分級試水，靜水位為 7.410 m，由第 1 級分級試水之洩降差 $\Delta s_1=0.0327$ m/log，以 $T_1=10.262$ m²/min 進行分級試水分析，分級試水之第 1 級抽水量 $Q=44.0$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 112.82 cmh/m；第二級 $Q=60.2$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 108.27 cmh/m；第三級 $Q=77.8$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 102.10 cmh/m；第四級 $Q=95.2$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 98.35 cmh/m；第五級 $Q=110.0$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 91.51 cmh/m。

以 Rorabaugh(1953)方法分析，結果當 $B=0.0082$ 時，其斜率 1.542，故得 $p=2.542$ ；由截距 $\log C = -5.713$ ，得 $C=19.4 \times 10^{-6}$ ；分析得井性能曲線式為 $s=0.0082 \cdot Q+1.94 \times 10^{-6} \cdot Q^{2.542}$ 。

(2)98 年柑園站

本站建置 1 口抽水井，井體建置深度為 38m，上段採用 $\phi 10''$ PVC 管，0~14m 為井管，於 14~20m 處為濾水管，下段採用 $\phi 8''$ PVC 管，20~32 m 處為濾水管，32~38m 處為沉砂管。

鑿井深度為 40m，依鑽探過程所汲取之砂樣資料顯示，本站除表層外(0-3m)，其餘以礫質粗砂層及砂質礫石為主，並偶夾泥層，其中可見之泥層位置在 20~21m 附近(圖 3.3-3)，未發現厚層泥。

柑園站抽水井一分級試水，靜水位為 10.350 m，靜水位於試水期間為上升趨勢，以上升率為 2.9396×10^{-5} m/min 修訂水位，由第 1 級分級試水之洩降差 $\Delta s_1 = 0.0336$ m/log，以 $T=7.254$ m²/min 進行分級試水分析，分級試水之第 1 級抽水量 $Q=79.8$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 74.51 cmh/m；第二級 $Q=112.8$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 78.35 cmh/m；第三級 $Q=141.9$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 79.56 cmh/m；第四級 $Q=170.8$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 80.82 cmh/m；第五級 $Q=199.4$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 78.81 cmh/m。

以 Rorabaugh(1953)方法分析，結果當 $B=0.0123$ 時，其斜率 1.196，故得 $p=2.196$ ；由截距 $\log C = -6.144$ ，得 $C=7.18 \times 10^{-7}$ ；分析得井性能曲線式為 $s=0.0123 \cdot Q+7.18 \times 10^{-7} \cdot Q^{2.196}$ 。

(3.)99 年六合站

本站鑽鑿 12 吋 PVC 管抽水井，以上部地下水層(F1)為主，另以既有觀測井一，進行複井抽水試驗以求取儲水係數。

由於本站地層屬極堅硬地層，施工時直接以 20 吋鑽頭進行井孔鑽鑿，於 4 月 28 日當鑽鑿深度至 20m 附近，鑽具被井壁掉落之礫石卡住而打撈，經數天打撈未成，5 月 2 日井孔內泥漿水因比重降低而失壓，導致井孔壁崩塌、鑿井工具埋陷於內，已於 5 月 5 日移位重鑿。

因地層質地相當堅硬，鑽鑿進度緩慢，常造成井孔內泥漿水嚴重失水、鑽具磨損嚴重需常停工焊補及鋼索損耗過度而斷裂更換等因素，影響鑽鑿進度頗鉅，每日施工進度約 2~3 公尺，於 5 月底完成井體建置。

本站在保護套管以內，即地表下 17 公尺以上皆以鑽頭將地層打碎，除淺層 2-3m 以泥層為主外，其餘 3-17m 之礫石皆為鑽頭打成粗砂狀；地表下 17 公尺開始以 balier(鑽筒)取樣，一直持續到 49 公尺深，主要以砂質粗礫為主(表 1 為

每公尺所量測之最大礫石粒徑)；地表下 49~60 公尺因地層結構較為緻密，故又改以鑽頭鑿穿地層，岩性推測仍為砂質粗礫(圖 3.3-4)。

六合站抽水井一分級試水，靜水位為 21.170 m，由第 1 級分級試水之抽水量 $Q=79.8$ cmh 及洩降差 $\Delta s_1=0.0556$ m/log，以 $T_1=4.375$ m²/min 進行分級試水分析，分級試水之第 1 級抽水量 $Q=79.8$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 102.97 cmh/m；第二級 $Q=103.0$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 91.78 cmh/m；第三級 $Q=130.3$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 85.13 cmh/m；第四級 $Q=156.2$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 76.08 cmh/m；第五級 $Q=190.0$ cmh，單位洩降出水量(Q/s)為 69.17 cmh/m。

以 Rorabaugh(1953)方法分析，結果當 $B=0.005$ 時，其斜率 0.803，故得 $p=1.803$ ；由截距 $\log C=-3.854$ ，得 $C=1.40 \times 10^{-4}$ ；分析得井性能曲線式為 $s=0.005 \cdot Q+1.40 \times 10^{-4} \cdot Q^{1.803}$ 。

4.3.2 複井抽水試驗方法

雙井抽水試驗其目的在於分析觀測井試驗所得的試驗數據，以推測含水層屬性，並選擇適當分析模式，求得含水層導水係數(T)及儲水係數(S)等參數。其試驗方法及程序分述如下：

一、試驗方法

於試驗含水層建置分層抽水井(P1)，由 P1 裝置抽水機以定量抽水，並由圓縮口流量計控制抽水量；觀測井(O1)以測棒及自記式監測儀紀錄時間與水位關係，以進行雙井抽水試驗。

二、試驗程序

雙井抽水試驗程序簡述如下：

- (1)分別於觀測井及抽水井安裝測棒並連線至自記式監測儀。
- (2)安裝圓縮口流量計。
- (3)完成自記式監測儀設定。
- (4)啟動抽水機及記錄抽水位，並於 2 分鐘內穩定控制抽水量。
- (5)於定量抽水結束，同時停抽及記錄回升水位。
- (6)完成試驗，拆除機具及設備。

4.3.3 複井抽水試驗結果與分析

(1) 荊桐站

荊桐站位於濁水溪南岸中游，靠近沖積扇扇央部分，根據鑽井資料顯示 0~12m 為黃-灰色泥偶夾細、粉砂，12~34m 為灰色極粗砂-粗砂偶含細礫，往下 34~35m 所形成之阻水層為一灰泥層、偶含有機質，本層厚度由數十公分至一二公尺。觀測上下含水層荊桐站觀測井一及觀測井二亦發現兩者之水位相近，應屬同一來源；根據地層資料及不同含水層之抽水洩降與時間特性，淺層觀測井一推測為漏壓(Leaky)含水層。

荊桐站觀測井一於 98 年 6 月 11 日開始進行雙井抽水試驗，6 月 13 日開始進行回升試驗，試驗期間適逢降雨於 6 月 17 日進行第 2 次雙井抽水試驗，6 月 18 日進行第 2 次回升試驗。茲將雙井抽水試驗結果說明如下：

荊桐站觀測井一(O1)第 1 次雙井抽水試驗，O1 靜水位 7.460m，靜水位於試水期間為上升趨勢，以水位上升率為 3.7037×10^{-6} m/min 修訂水位，抽水量 $Q = 110.0$ cmh，井距 $r = 13.46$ m，以 Neuman-Witherspoon 法分析，得 $T = 3.461$ m²/min， $S = 0.0007299$ ， $r/B = 0.03485$ 。

荊桐站觀測井一(O1)第 2 次雙井抽水試驗，O1 靜水位 7.385m，靜水位於試水期間為上升趨勢，以水位上升率為 1.2121×10^{-5} m/min 修訂水位，抽水量 $Q = 110.0$ cmh，井距 $r = 13.46$ m，以 Neuman-Witherspoon 法分析，得 $T = 3.718$ m²/min， $S = 0.0006849$ ， $r/B = 0.02947$ 。

(2) 柑園站

柑園站位於濁水溪北岸中上游，靠近沖積扇扇頂部分，根據觀一鑽井資料顯示井深 38m，地面表土層約 3m 的灰色沙土，表土層之下至 38m 為褐色粗砂礫卵石層。

柑園站於抽水井一(P1)安裝抽水機，觀測井一(O1)、觀測井一(O2)、抽一各井量測水位，另於 33.80m 處借用一口淺層民井(M1)同步量測水位，於 98 年 8 月 21 日開始進行雙井抽水試驗，至 8 月底完成試驗。茲將雙井抽水試驗結果說明如下：

柑園站觀測井一(O2)雙井抽水試驗，O1 靜水位 10.24m，靜水位於試水期間為上升趨勢，以水位上升率為 2.9396×10^{-5} m/min 修訂水位，抽水量 $Q = 199.4$ cmh，井距 $r = 15.90$ m，以 Neuman 法分析，得 $T = 6.054$ m²/min， $S = 0.0004856$ ， $S_y = 0.0408$ ， $\sigma = 0.00272$ 。

柑園站觀測井一(O1)以 Boulton 法分析，前段(early-time) $r/B = 0.02$ ，得 $T =$

4.760 m²/min, $S = 0.00116$; 後段(late-time) $r/B=0.02$, 得 $T = 4.760 \text{ m}^2/\text{min}$, $S_y = 0.120$ 。

柑園站民井(M1)試驗, O1 靜水位 6.75m, 抽水量 $Q = 199.4 \text{ cmh}$, 井距 $r = 33.80 \text{ m}$, 以 Neuman 法分析, 得 $T = 7.835 \text{ m}^2/\text{min}$, $S = 0.0004953$, $S_y = 0.01444$, $\beta = 0.007478$ 。

(3)六合站

六合站位於濁水溪南岸上游, 靠近沖積扇扇頂部分, 根據鑽井資料顯示, 地面表土層約 2m 之下至 60m 為褐灰色粗砂礫卵石層, 透水性佳。

六合站於抽水井一(P1)安裝抽水機, 觀測井一(O1)、觀測井二(O2)、抽水井一各井量測水位, 於 99 年 6 月 10 日開始進行雙井抽水試驗, 至 6 月下旬完成試驗。茲將雙井抽水試驗結果說明如下:

六合站觀測井一(O1)雙井抽水試驗, O1 靜水位 20.54m, 靜水位於試水期間為上升趨勢, 以水位上升率為 $4.812 \times 10^{-5} \text{ m/min}$ 修訂水位, 抽水量 $Q = 190.0 \text{ cmh}$, 井距 $r = 12.66 \text{ m}$, 以 Neuman 法分析, 得 $T = 11.28 \text{ m}^2/\text{min}$, $S = 0.000112$, $S_y = 0.1313$ 。

另以 Boulton 法分析, 前段(early-time) $r/B=0.1$, 得 $T = 10.08 \text{ m}^2/\text{min}$, $S = 0.000194$; 後段(late-time) $r/B=0.1$, 得 $T = 10.08 \text{ m}^2/\text{min}$, $S_y = 0.148$ 。

第五章 地下水主要補注區範圍評估

本章節將建立一套完整的地下水主要補注區評估流程。5.1 節說明地下水補注潛勢評估作業程序以及說明「地下水補注潛勢」所使用之因子。5.2 節將說明地下水補注潛勢各項因子原始屬性建立以及轉換成因子分數的圖層繪製。5.3 節為依據「地下水補注潛勢」、「二維地電阻」兩者進行主要補注區之結果分析。

5.1 主要補注區範圍評估流程

本章節將訂定補注潛勢評估作業，以此作業最終目的在於劃定主要補注區，主要補注區是以補注能力之大小作為劃分依據，是故主要補注區即為補注能力較高之區域。圖 5.1-1 為主要補注區劃分作業流程圖，首先選定數項土地利用或降雨量等地上資料，以及部分地下之鑽探或觀測資料，以此建立研究區域之補注潛勢分數或地下水資源潛能等；其次，再以高補注潛勢區邊界作為後續地電阻試驗之試驗建議區，主管單位可視研究區域之重要性、發展性與地下水資源管理策略，適時施作二維地電阻現地試驗；最後，二維地電阻試驗結果可找出主要補注區邊界交界面，試驗結果搭配補注潛勢結果，可進一步修正主要補注區範圍。

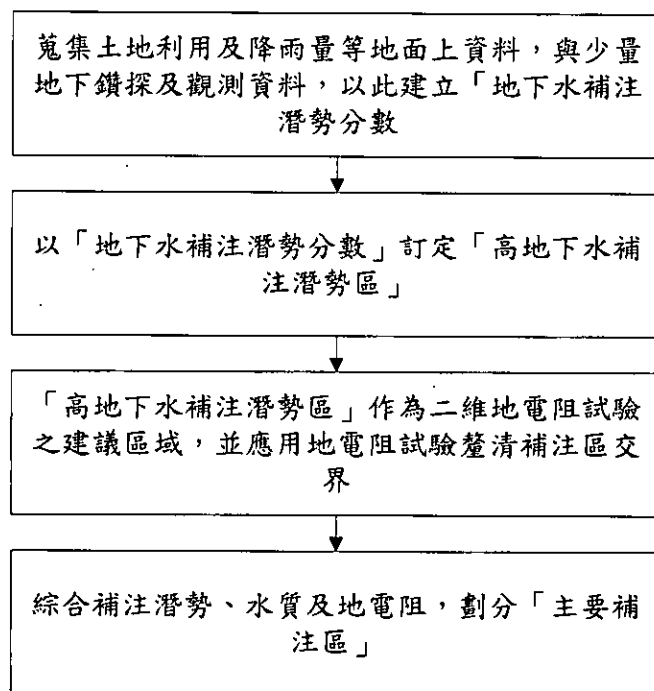


圖 5.1-1 主要補注區劃分作業流程圖

本計畫針對濁水溪沖積扇之水文地質特性，參考地下水補注潛勢相關之研究報告與文獻資料，提出地下水補注潛勢評估作業程序，補注潛勢評估之流程架構如圖 5.1-2 所示。

在「地下水補注潛勢」之組成因子選擇方面，參考相關文獻資料，配合濁水溪沖積扇之水文地質特性，並綜合各合作單位之意見，採用「土地利用」、「表層土壤種類」、「降雨與地下水位變化相關性」、「平均年降雨量」、「單位蓄水量變化」、「透水係數」以及「河系密度」等七項補注潛勢影響因子(如表 5.1-1 所示)。

地下水補注潛勢評估作業程序如圖 5.1-2 所示，首先需針對補注潛勢定義影響因子，在此本計畫以前述七個因子進行補注潛勢估算。此外，並針對研究區域蒐集各類點位資料與圖層資料。其次，將所蒐集之相關資料，經過初步地簡單處理後，即為該因子之原始屬性。接著，訂定原始屬性與細部分數之轉換規則或轉換表，可將原始屬性轉換為 0 至 100 分之因子分數，此階段以一公里見方之網格呈現。最後，為呈現不同因子對於補注之影響程度，在此需針對因子權重進行訂定，再依據所訂定之權重，進行加權加總之計算，所得即為補注潛勢。

在因子權重之訂定方面，Shaban et al. (2006) 與 Yeh et al. (2008)認為各項影響因子之間，具有相依相存之關係，可以「因果關係邏輯圖」呈現該項關係，並顯現各因子影響力之差異，進而訂定因子權重，本計畫以此方式評估不同影響因子間權重比例。圖 5.1-3 為補注潛勢影響因子間的因果關係邏輯圖，其中補注潛勢影響因子互以實線或虛線連接，實線代表主要影響，而虛線則代表次要影響，箭頭方代表被影響方，箭尾方向則代表影響方。

舉例說明，「降雨與地下水位變化相關性」及「單位蓄水量變化」之間有主要影響關係，其方向由「降雨與地下水位變化相關性」指往「單位蓄水量變化」，代表「降雨與地下水位變化相關性」為因，「單位蓄水量變化」為果。若由物理現象來探討，假設降雨與地下水位變化相關性高時，地下水位將明顯受到雨量之影響，進而明顯地影響其地下水之蓄水量變化。例如當一區域雨量豐沛時，其長期地下水位會較為穩定，若有雨季與旱季之分則其水位變動則較大，因此「降雨與地下水位變化相關性」因子為高相關性時，會影響地下水位之標準差，而「單位蓄水量變化」為地下水位標準差與儲水係數之乘積，因此將到影響，故「降雨與地下水位變化相關性」對於「單位蓄水量變化」的關係視為主要影響。

表 5.1-1 地下水補注潛勢影響因子表

因子種類	影響因子	說明
地層內因	土地利用	地表土地使用性質、植被覆蓋。
	表層土壤種類	表層土壤種類分布狀況。
	透水係數	透水係數 K 值。
水文外因	平均年降雨量	長期平均年降雨量。
	河系密度	每一網格內河川所佔面積比例。
綜合因素	降雨與地下水位變化相關性	降雨事件期間「降雨量」與「地下水位上升量」迴歸統計之 R^2 。
	單位蓄水量變化	長期地下水位變化(標準差)與儲水係數之乘積。

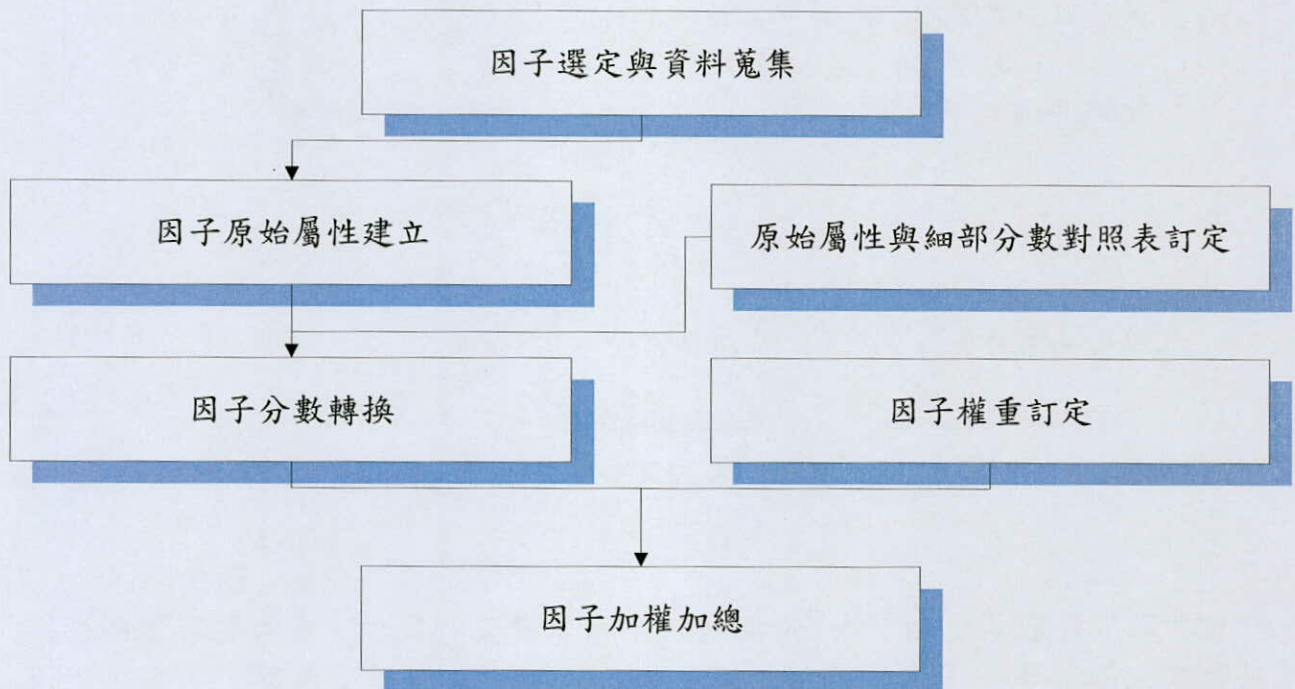


圖 5.1-2 地下水補注潛勢評估作業程序

- ▶ 對補注存在主要影響
 - - - -▶ 對補注存在次要影響

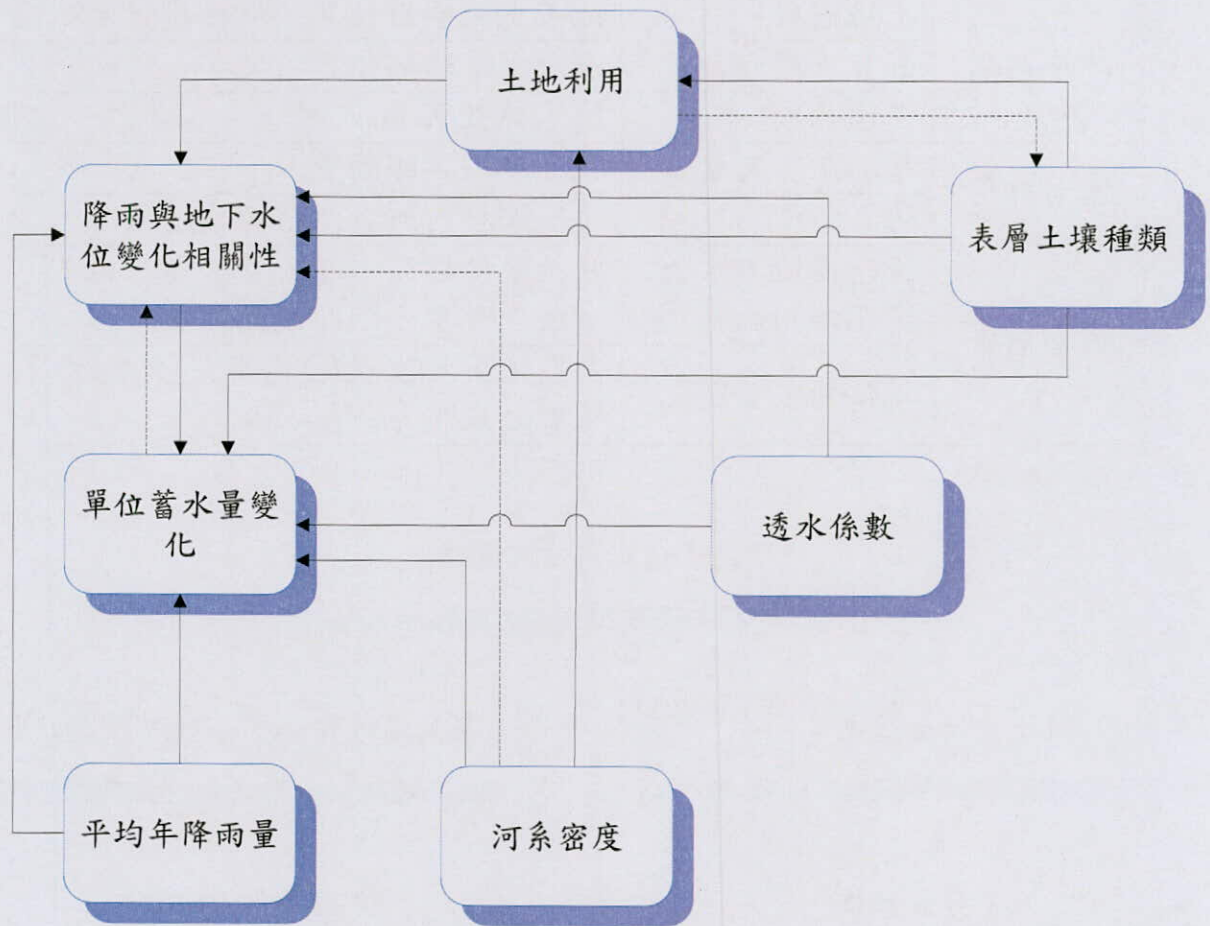


圖 5.1-3 地下水補注潛勢影響因子關係圖

在「單位蓄水量變化」對「降雨與地下水位變化相關性」為次要影響部分，「單位蓄水量變化」為因，「降雨與地下水位變化相關性」為果。「單位蓄水量變化」為地下水位標準差與儲水係數之乘積，而此兩項中僅儲水係數會影響到地下水位，但對於「降雨與地下水位變化相關性」因子而言，此兩項因素皆無法對其明確而直接的影響。比較前述兩種例子，其影響程度有所差異，故分為主要影響與次要影響兩種。由圖 5.1-3 為本計畫之補注潛勢影響因子邏輯關係圖，為探討不同影響因子影響力的大小比例，本計畫因為主要影響給予較大的權重值，Shaban 建議主要影響權重應為 1.0，而次要影響權重為 0.5。其計算公式如式 5.1-1 所示。

$$\omega_i = \frac{N_i^{maj} \times 1 + N_i^{min} \times 0.5}{\sum_{i=1}^7 (N_i^{maj} \times 1 + N_i^{min} \times 0.5)} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (式 5.1-1)$$

其中， ω_i 代表第 i 種因子的因子權重； N_i^{maj} 與 N_i^{min} 分別代表第 i 種因子的主要影響關係數與次要影響關係數。

圖 5.1-3 為本計畫之補注潛勢影響因子邏輯關係圖，可以明顯表示各項影響因子間之影響關係。以「土地利用」因子為例，其有一個主要影響箭尾與一個次要影響箭尾，因此其權重值即為 1.5。完成定義各影響因子之間的權重後，接下來將定義影響因子內部分類之分數。表 5.1-2 為本計畫藉由 Shaban 建議之方法訂定之因子權重表。

表 5.1-2 地下水補注潛勢影響因子權重計算表

地下水補注潛勢影響因子	計算方式	權重值	權重百分比
土地利用	$1(1)+1(0.5)=1.5$	1.5	12%
表層土壤種類	$3(1)=3.0$	3.0	24%
降雨與地下水位變化相關性	$1(1)=1.0$	1.0	8%
平均年降雨量	$2(1)=2.0$	2.0	16%
單位蓄水量變化	$1(0.5)=0.5$	0.5	4%
透水係數	$2(1)=2.0$	2.0	16%
河系密度	$2(1)+1(0.5)=2.5$	2.5	20%
	總分	12.5	100%
主要影響(1.0)，次要影響(0.5)			

在因子分數轉換方面，土地利用與表層土壤兩項因子以區塊(Polygon)形式呈現之資料，亦即不同區塊中有其各自之屬性，因此可視屬性對於補注之影響能力給予分數，例如：不透水類之土地利用型態對於補注並無幫助，因此可給予低分甚至零分；反之，水田或裸土類之土地利用型態則有助於補注，應給予高分。如此一來，該區塊之代表分數即可依據屬性進行給分(如式 5.1-2 所示)，然本計畫是以一公里見方之網格呈現，網格中涵蓋不同屬性之多個區塊，因此可藉由區塊面積，進行分數之加權加總(如式 5.1-3 所示)，即可決定網格之代表分數。

除土地利用與表層土壤屬性外之其他因子則多半為連續資料呈現，可透過線性正規化方式將原始屬性轉換成 0 至 100 分之因子分數，例如：平均年降雨量因子可利用最大年降雨量與最小年降雨量進行線性正規化。

$$G_i^m = \bar{G}_i^k, \text{ if } F_i^m = \bar{F}_i^k, \text{ for } k=1, \dots, N \text{ for } i=1, 2 \quad \dots\dots\dots (式 5.1-2)$$

$$G_{i,j} = \frac{\sum Area_i^m \times G_i^m}{\sum Area_i^m}, \quad m \in Cell_j \dots\dots\dots (式 5.1-3)$$

$$G_{i,j} = [F_{i,j} - F_i^{\min}] / [F_i^{\max} - F_i^{\min}] \times 100 \quad for \quad i = 3, \dots, 7 \dots\dots\dots (式 5.1-4)$$

其中， $G_{i,j}$ 代表第 j 個網格第 i 種因子的因子分數； F_i^m 代表位於第 m 個區塊中第 i 種因子的原始屬性； $\bar{F}_i^k$ 為第 i 種因子於第 k 組的原始屬性； $\bar{G}_i^k$ 代表第 i 種因子於第 k 組對應的因子分數； $Area^m$ 代表第 m 個區塊的面積，其位於第 j 個網格中； $F_{i,j}$ 代表第 j 個網格第 i 種因子的原始屬性。 $F_{i,j}$ 代表第 j 個網格第 i 種因子的原始屬性； $F_i^{\max}$ 與 $F_i^{\min}$ 分別代表 $F_{i,j}$ 數列中的最大值與最小值。

$$RP_j = \sum_{i=1}^7 \omega_i \times G_{i,j} \dots\dots\dots (式 5.1-5)$$

最後，式 5.1-5 可用於不同因子分數之加權加總，其結果為補注潛勢。其中， $G_{i,j}$ 代表第 i 種因子於第 j 個網格之的因子分數； ω_i 代表第 i 種因子的因子權重； RP_j 代表第 j 個網格之補注潛勢分數。

5.2 補注潛勢分析

本計畫項目所使用之軟體詳列於表 5.2-1。在資料取得方面，其中土地利用、表層土壤種類及河系可直接取得相關之圖層資料；其餘因子則需蒐集研究區域現地觀測之點位資料，並搭配距離倒數平方法(Inverse Distance to a Power)或克力金法(Kriging)，將點位資料內插至一公里見方之網格上。本計畫選取之七項地下水補注潛勢因子可依據其性質大致區分為三大種類，第一類為地層內因，包含土地利用、表層土壤種類以及透水係數；第二類為水文外因，包含河系密度和平均年降雨量；第三類為綜合因素，包含降雨與地下水位變化相關性、單位蓄水量變化。以下各小節將針對這三大種類補注潛勢因子說明選取的原因、資料來源及圖層製作處理過程。

表 5.2-1 圖資製作工具

工具類別	軟體名稱
桌上型 GIS 軟體	SuperGIS 2.2
3D 科學繪圖軟體	SURFER 8.0
空間分析模組	Spatial Analyst Extension for SuperGIS
空間統計分析模組	Spatial Statistics Analyst Extension for SuperGIS
TWD 67/97 座標轉換模組	TWD 67-97 Coordinates Transform Extension for SuperGIS

5.2.1 地層內因

此類因子顧名思義是和地層本身相關之因子，分別為土地利用、表層土壤種類以及透水係數，以下將分別介紹：

一、土地利用

土地利用是影響地下水補注過程中很重要之因素，此因素包括居住區域分佈以及植被覆蓋。人造建築物如房屋、道路以及堤防等都阻礙了地下水補注(Bou Kheir et al.,2003)，雖然高密度植被覆蓋會增加蒸散率，減少水滲透至地表，但有研究指出另外三項見解，(1)植物根部的生化分解有助於鬆散岩石或土壤，使得水更容易滲透地表，(2)植被區帶可避免土壤水分直接蒸發，(3)植物根部有吸附水分能力，可減少水分隨逕流帶走，故植被覆蓋仍是有效提供地下水補注(Shaban et al., 2006)。綜合考量前述文獻之結論，本計畫將土地利用納入地下水補注潛勢因子。

在圖層建立上，本計畫透過內政部國土測繪中心申請取得之圖層為 TWD 97

之 Shapefile 格式檔案，但本計畫使用的座標系統為 TWD 67，因此需使用 SuperGIS 之 TWD 67/97 座標轉換模組進行座標轉換。由於取得的原始圖層資料是台灣地區的土地利用圖層，且該圖層被分割為數百個大小不等的小範圍圖層，因此該圖層製作時，須將所有小範圍圖層合併成單一圖層，再以地下水區的圖層裁剪之，即為濁水溪沖積扇之土地利用圖層(如圖 5.2-1 所示)。又因圖層是國土測繪中心分區委託不同單位製作(如表 5.2-2 所示)，例如本計畫期中報告的水區會包含到彰化、雲林、南投、嘉義等縣市。國土測繪中心在 95 年度委託財團法人工業技術研究院製作南投嘉義的土地利用圖層，96 年度委託亞興測量有限公司製作彰化、雲林等地的土地利用圖層。不同的單位在細部的格式上有所不同，所以還需將檔案轉換或調整，才能順利合併圖層使用。

表 5.2-2 95 及 96 年國土利用調查委託製作範圍表

年度	委託生產單位	範圍
95	台灣世曦工程顧問股份有限公司	第 1 作業區(新竹縣、新竹市、苗栗縣、宜蘭縣)
95	財團法人工業技術研究院	第 2 作業區(嘉義縣、嘉義市、南投縣、部分花蓮縣)
95	亞興測量有限公司	第 3 作業區(屏東縣、臺東縣、部分花蓮縣、澎湖縣)
96	台灣世曦工程顧問股份有限公司	第 1 作業區(臺北縣、臺北市、桃園縣、基隆市)
96	亞興測量有限公司	第 2 作業區(彰化縣、雲林縣、部分臺南縣及部分高雄縣)
96	中華民國航空測量及遙感探測學會	第 3 作業區(臺南市、高雄市、部分臺南縣、部分高雄縣)

二、表層土壤種類

表層土壤種類主要是以顆粒大小的不同來劃分，粒徑大小會造成土石間的孔隙大小不同，同時也會影響降雨入滲到地下水中的效率。故本計畫將表層土壤種類納入地下水補注潛勢因子。本計畫從行政院農業委員會農業試驗所取得之圖層為早期 ArcInfo 之交換格式(exchange file, e00)，與目前通用之 Shapefile 格式不符，因此需先將其轉換。圖層所載資訊包含地表至地表下 30(cm)深度、30(cm)至 60(cm)深度、60(cm)至 90(cm)深度與 90(cm)至 150(cm)深度土壤分布(如圖 5.2-2 所示)。

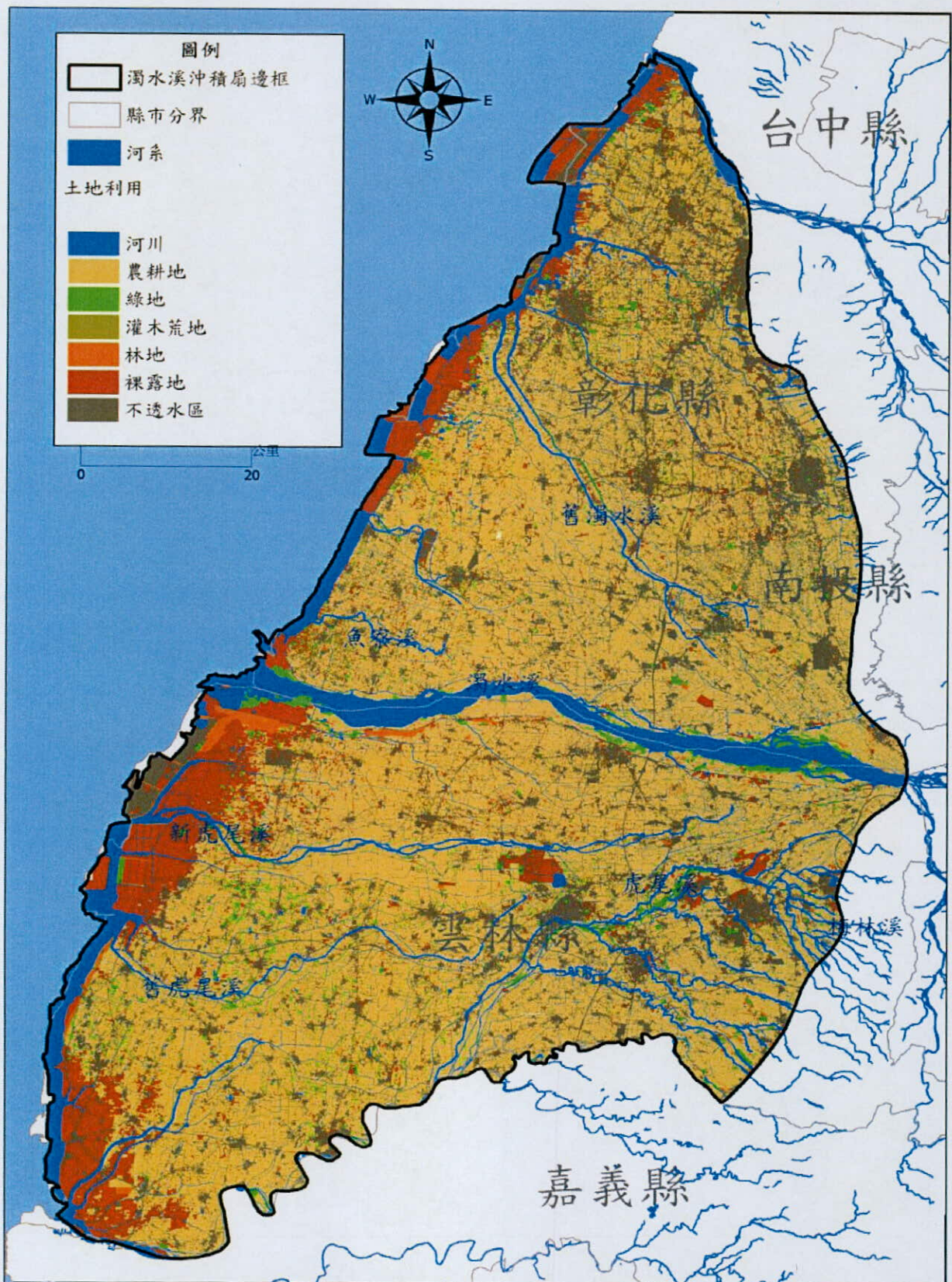
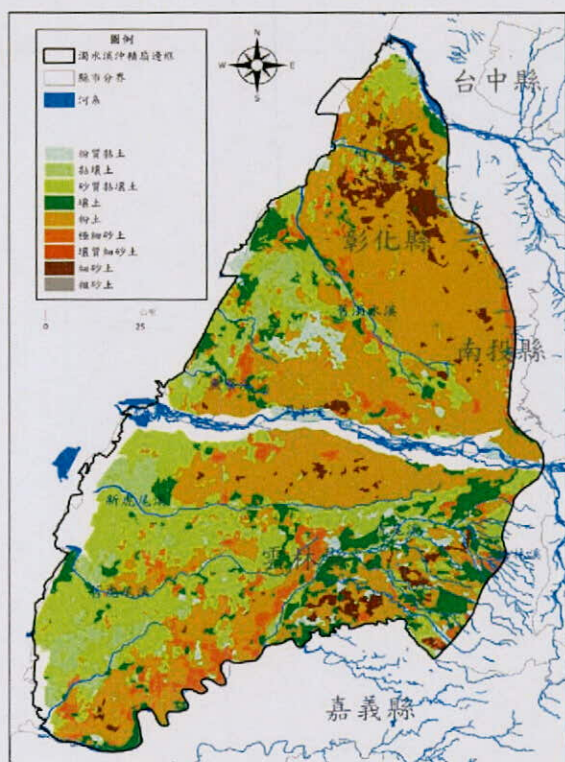
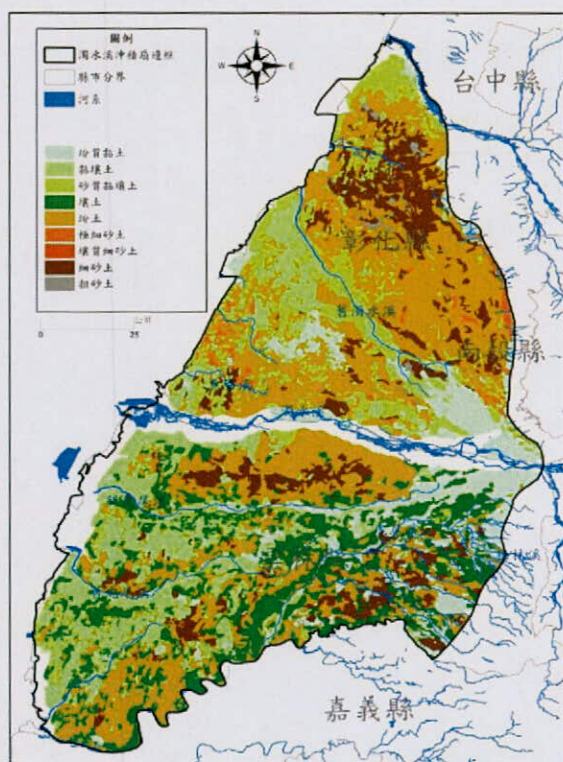


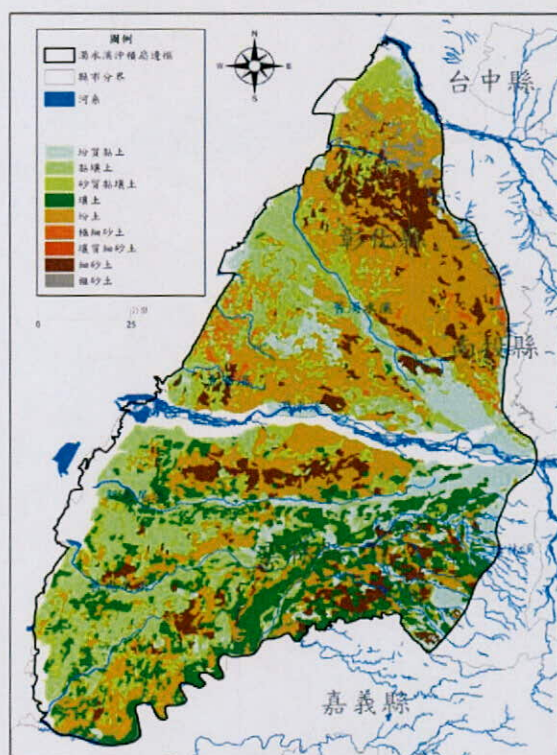
圖 5.2-1 濁水溪沖積扇土地利用計畫分類圖層



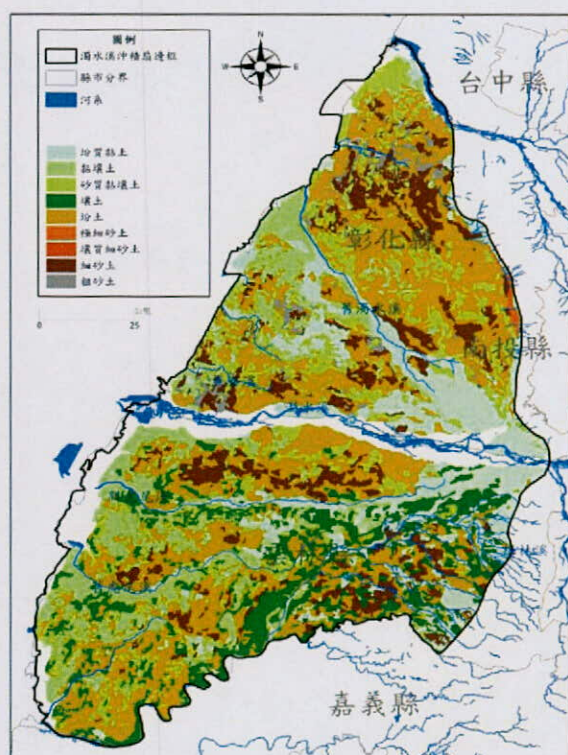
(a) 0~30cm 深度土壤種類



(b) 30~60cm 深度土壤種類



(c) 60~90cm 深度土壤種類



(d) 90~150cm 深度土壤種類

圖 5.2-2 表層土壤種類原始圖層

三、透水係數

透水係數 K (hydraulic conductivity) 可描述水穿越不同含水層容易程度，於補注機制中扮演相當重要之因素，因此本計畫將透水係數列為補注潛勢因子之一。本計畫使用之透水係數 K 值取自「台灣地區地下水觀測網整體計畫_地下水觀測網之建立及運作管理_地下水觀測井建置及相關試驗」，並藉由地質鑽探所獲得之水文地質剖面圖，劃分出濁水溪沖積扇之概念分層含水層一、二、三、四(F1~F4)及阻水層一、二、三(T1~T3)，取出位於地下含水層一(F1)深度內 30 口地下水位觀測井。再將各井位之 K 值資料以 Surfer 軟體內建之距離倒數平方(Inverse Distance to a Power)內插至各網格，並依此資料建置透水係數之 GIS 圖層，如圖 5.2-3 所示。濁水溪沖積扇 K 值最大約為 0.08~0.1(m/min)，位於竹塘(1)及合興(1)。

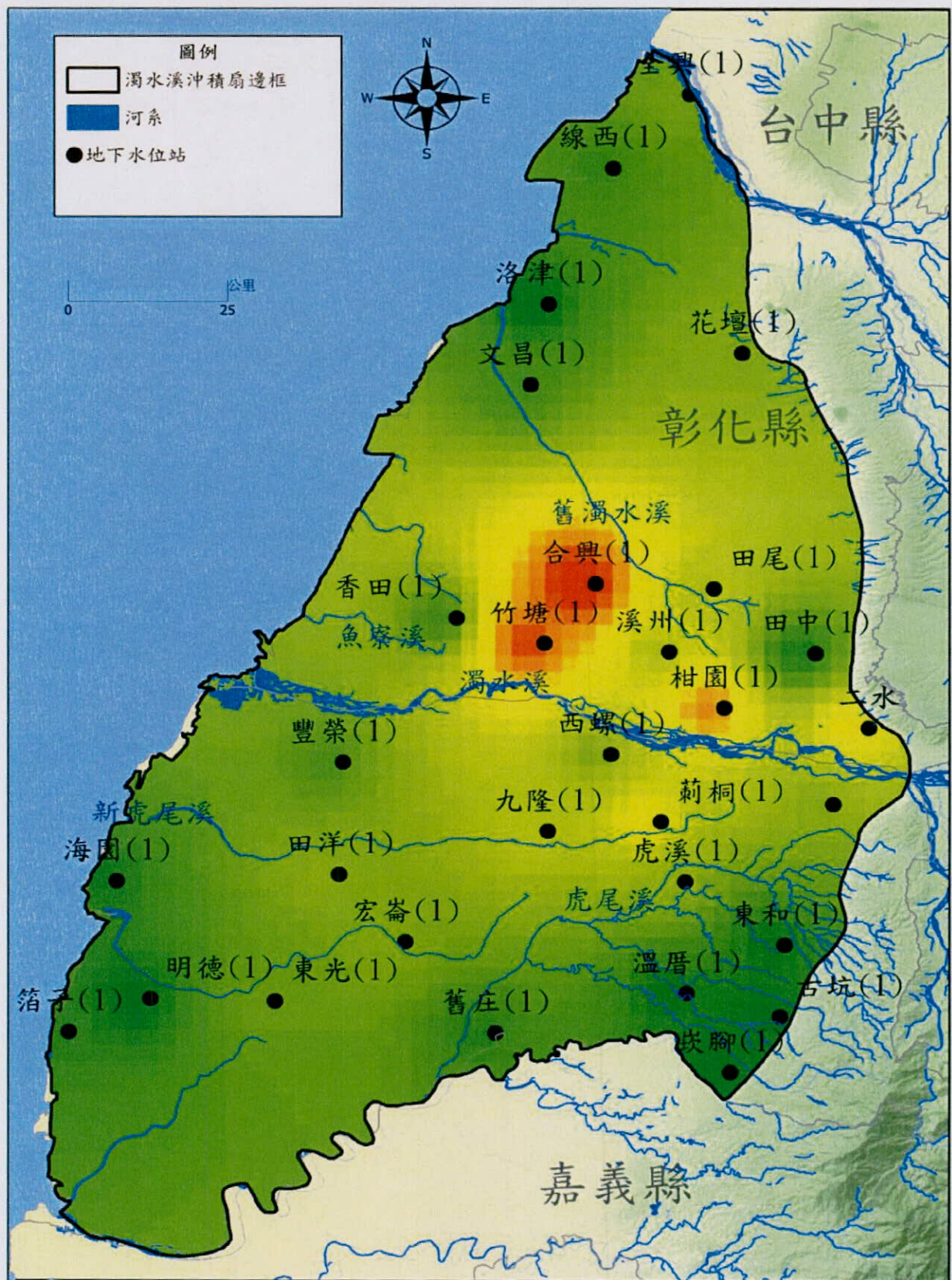


圖 5.2-3 濁水溪沖積扇含水層一(F1)透水係數分布圖

5.2.2 水文外因

水文外因是指受到外在影響之因子，包含河系密度、平均年降雨量。以下將分別描述：

一、河系密度

濁水溪沖積扇地下水補注主要來源為降雨與河川補注，因此不能忽視河川補注對此區域地下水補注之重要性。故本計畫亦將河系密度納入地下水補注潛勢因子。本計畫以水系 GIS 圖資(Polyline 線形資料)(如圖 5.2-4)，其因次為單位面積之河系線段長度，由於本計畫網格以為一公里見方之正方形，即代表單位面積，故此分別累計網格中的河段長度即可。



圖 5.2-4 濁水溪流域河系圖

二、平均年降雨量

台灣位在歐亞大陸及太平洋的交界處，獨特的地理位置加上季風、颱風及周遭海流的交互影響，使台灣的降雨一直有著複雜的變化型態。地下水的補注來源主要以天然降雨入滲為主，故本計畫亦將年平均降雨量納入地下水補注潛勢因子。

本計畫雨量質量取自中央氣象局雨量站，選出位於濁水溪沖積扇及其周圍之雨量站作分析，所選擇之 20 站如圖 5.2-5 所示，使用資料為 1995-2009 年各年年雨量平均所得之各站平均年雨量。本計畫以前述 1 公里見方之濁水溪沖積扇格網為基礎，將各點之平均年雨量資料利用克力金法(Kriging)內插到各網格，內插完成後之等值線圖如圖 5.2-6 所示。

5.2.3 綜合因素

綜合因素並非直接測得的各種地層或水文數值，而是經人工額外運算而得。例如降雨與地下水位變化相關性因子並非單純的代表降雨量與地下水位的量多寡，而是經由迴歸方法統計判斷降雨是否為地下水補注之主要原因。另外，單位蓄水量變化，也並非單純蓄水量的值，而是將地下水位變化標準差乘上儲水係數，以反應含水層蓄水量變化。以下將分別對兩個因子進行詳細說明：

一、降雨與地下水位變化相關性

此補注潛勢因子乃是經由迴歸統計方式，探討地下水位變化是否受降雨之影響，其概念為取出降雨事件發生期間之「降雨量」與「地下水位上升量」，將兩個量進行迴歸統計，並以其統計結果 R-squared value (以下稱 R^2) 代表降雨與地下水位變化相關性。當一格網對應之 R^2 值越接近 1 時，代表該站附近之地下水位變化與降雨量相關性越高，因此給予之補注潛勢分數越高。

雨量資料採用中央氣象局位於濁水溪沖積扇之雨量站共計 20 站，如圖 5.2-5 所示。資料蒐集期距自西元 1997/01/01 至 2009/12/31 之每日觀測數據。地下水位資料採用經濟部水利署濁水溪沖積扇內之地下水井，共計 30 口井，如圖 5.2-7 所示，資料蒐集期距自西元 1997/01/01 至 2009/12/31 之每日觀測數據。

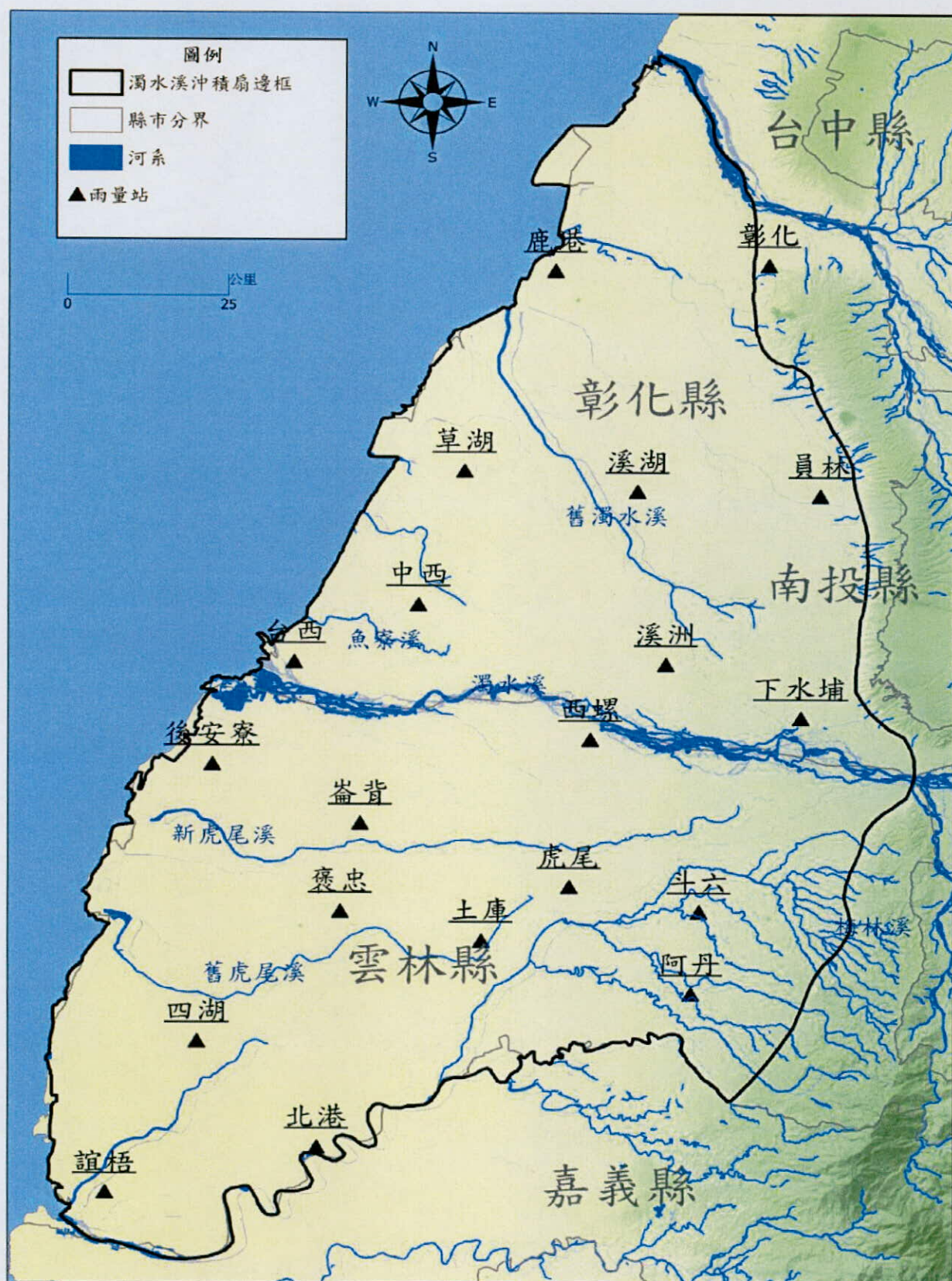


圖 5.2-5 平均年降雨量因子選取之雨量站

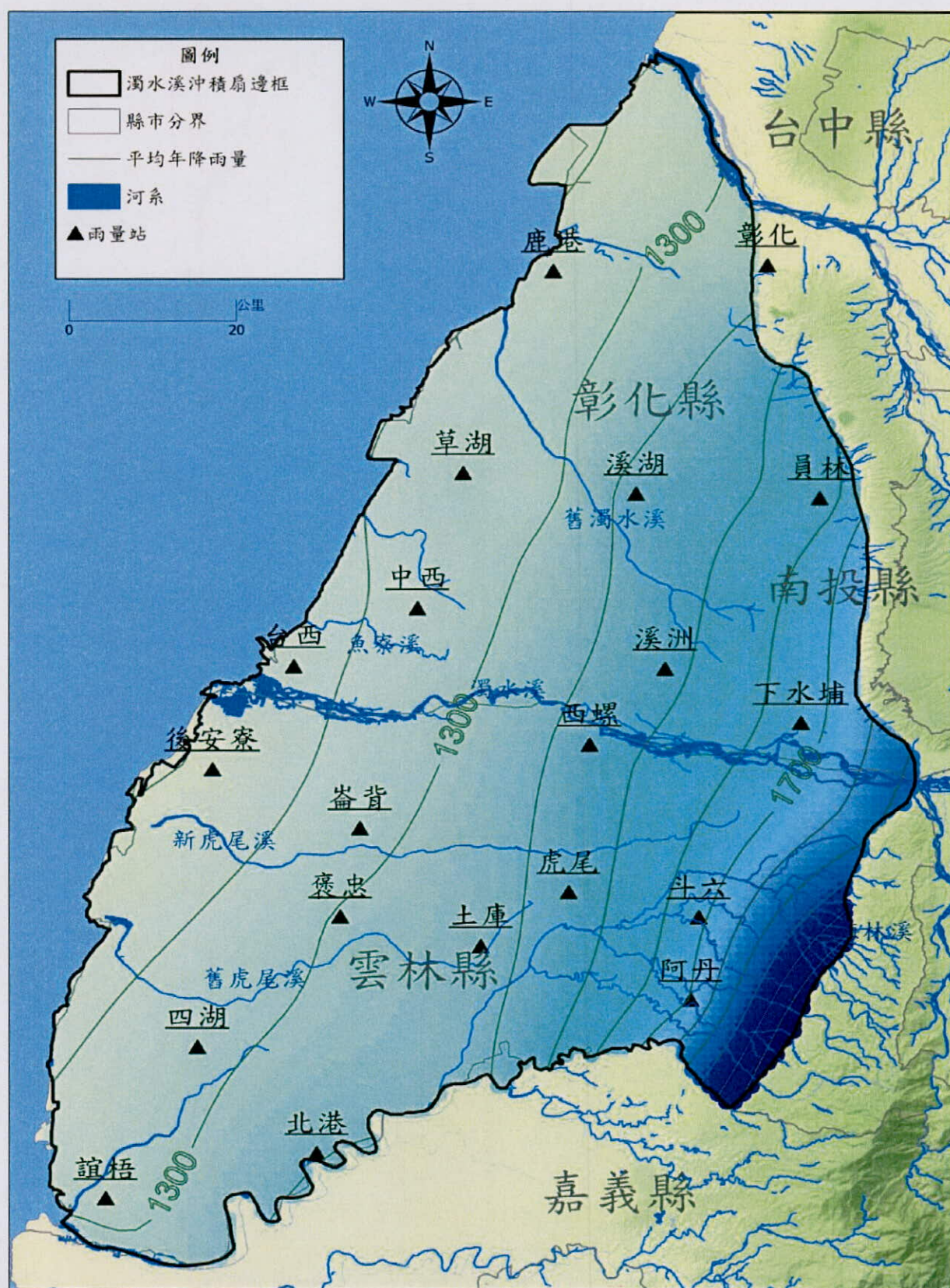


圖 5.2-6 本計畫選取雨量站之平均年降雨量分布圖

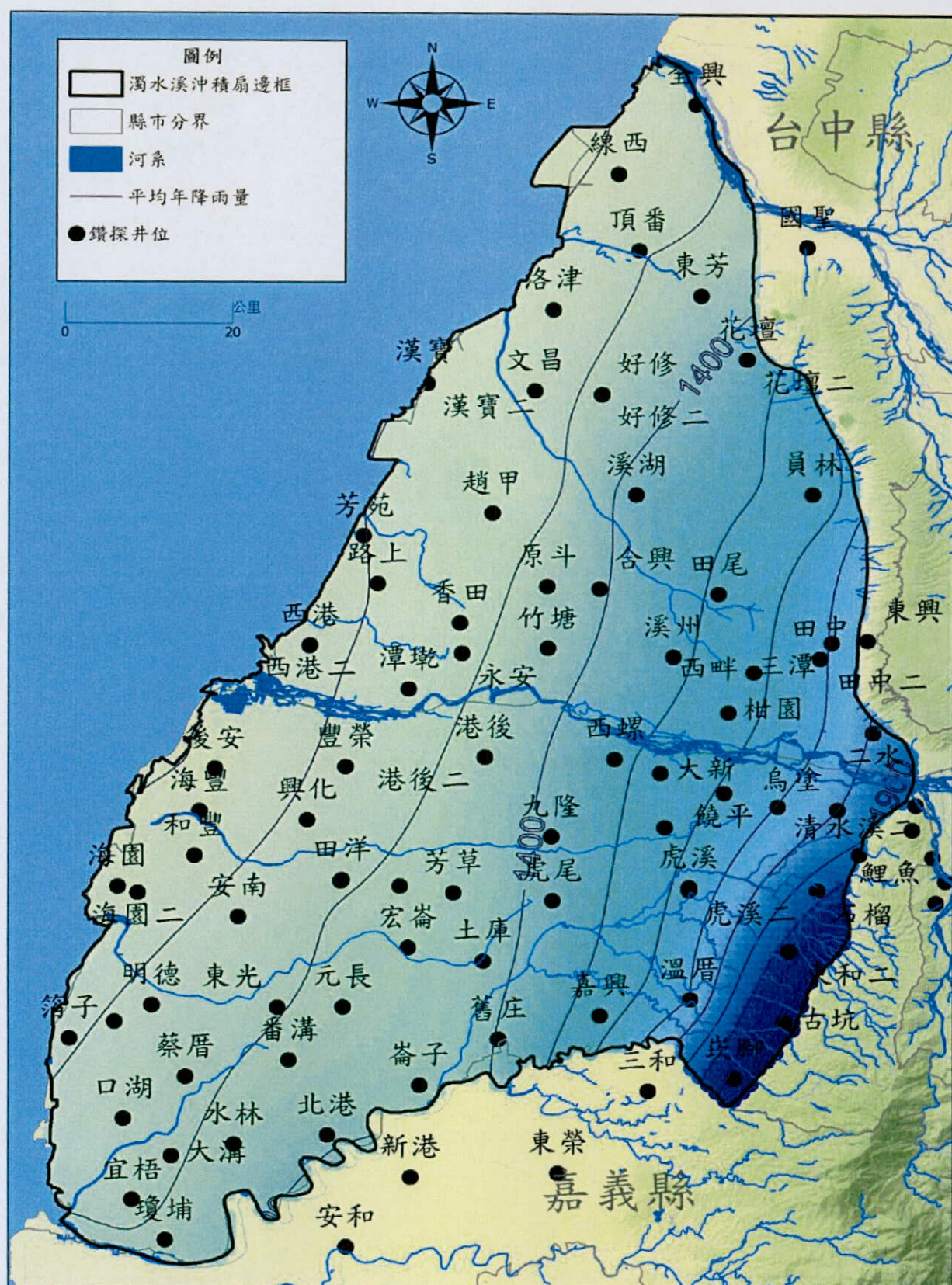


圖 5.2-7 濁水溪沖溪扇地下水位站分布圖

為考量濁水溪沖積扇降雨與各站水位之相關性，本計畫將濁水溪沖積扇區分為「扇頂」、「扇央」與「扇尾」三區，分別考量三區降雨對地下水位之影響。「扇頂區」降雨資料係以地表高程 30 公尺以上之雨量站，應用徐昇氏法搭配面積加權平均方式計算區域內的平均降雨強度，扇頂區降雨可能會透過集流面積，由集集攔河堰處從河道或地下伏流水方式流入濁水溪沖積扇，扇頂區降雨將影響的是整個濁水溪沖積扇的地下水井水位；「扇央區」降雨資料則是以地表高程 10 公尺以上、30 公尺以下之雨量站，再以加權平均計算得之，扇央區降雨將影響的是扇央與扇尾區的地下水井水位；「扇尾區」則是以地表高程 10 公尺以下之雨量站，再以加權平均計算得之，扇尾區降雨將影響的是扇尾區的地下水井水位。計算「扇頂區」、「扇央區」、「扇尾區」之每日平均雨量公式如下：

$$R_{AV} = \sum_{i=1}^N W_i R_i \dots\dots\dots(\text{式 5.2-1})$$

R_{AV} ：區域每日平均降雨量

W_i ：面積權重，以第 i 個雨量站之徐昇氏網格控制面積與全區總面積之比值

R_i ：第 i 個雨量站之雨量

N ：雨量站總數

表 5.2-3 各雨量站徐昇氏網格之控制面積

站號	雨量站站名	X	Y	控制面積(m ²)
C1G630	彰化	203931.85	2664054.22	137151336.5
C0G650	員林	207023.17	2649369.9	141683916.2
C1G690	下水埔	205876.81	2635129.51	139357422.9
C1K310	斗六	199833.73	2622720.66	98061267.65
C1K320	阿丹	199362.14	2617461.73	77503584.11
C0G640	鹿港	191247.82	2663700.73	135159971.3
C1G660	溪湖	196138.16	2649621.88	137537843.1
C1G680	草湖	185908.43	2650925.27	110365208.5
C1G670	溪州	197851.16	2638540.35	97182574.15
C1K230	西螺	193389.64	2633727.16	107794309.1
C1G700	中西	183182.68	2642354.16	119459497.2
C0G710	台西	175836.68	2638698.26	51280954.32
C1K260	後安寮	171018.58	2632139.89	95378713.59
C1K250	崙背	179748.2	2628372.33	96974833.08
C0K330	虎尾	192134.96	2624318.28	75048071.29
C1K340	土庫	186936.57	2620863.55	111901334.8
C1K270	褒忠	178587.84	2622748.07	98471778.74
C0K280	四湖	170128.52	2614423.91	156881521.8
C0K290	誼梧	164686.64	2604794.46	83547110.3
C1K350	北港	177181.24	2607680.41	80506548.98

在迴歸方法上乃將各地下水井之「地下水位上升量」與「降雨量」做線性迴歸。以地下水井-豐榮(1)為例，其線性迴歸結果顯示，該站地下水位與扇頂區降雨相關性最差 $R^2=0.569$ ，扇央區次之 $R^2=0.813$ ，扇尾區最佳 $R^2=0.833$ ，如圖 5.2-8 所示。

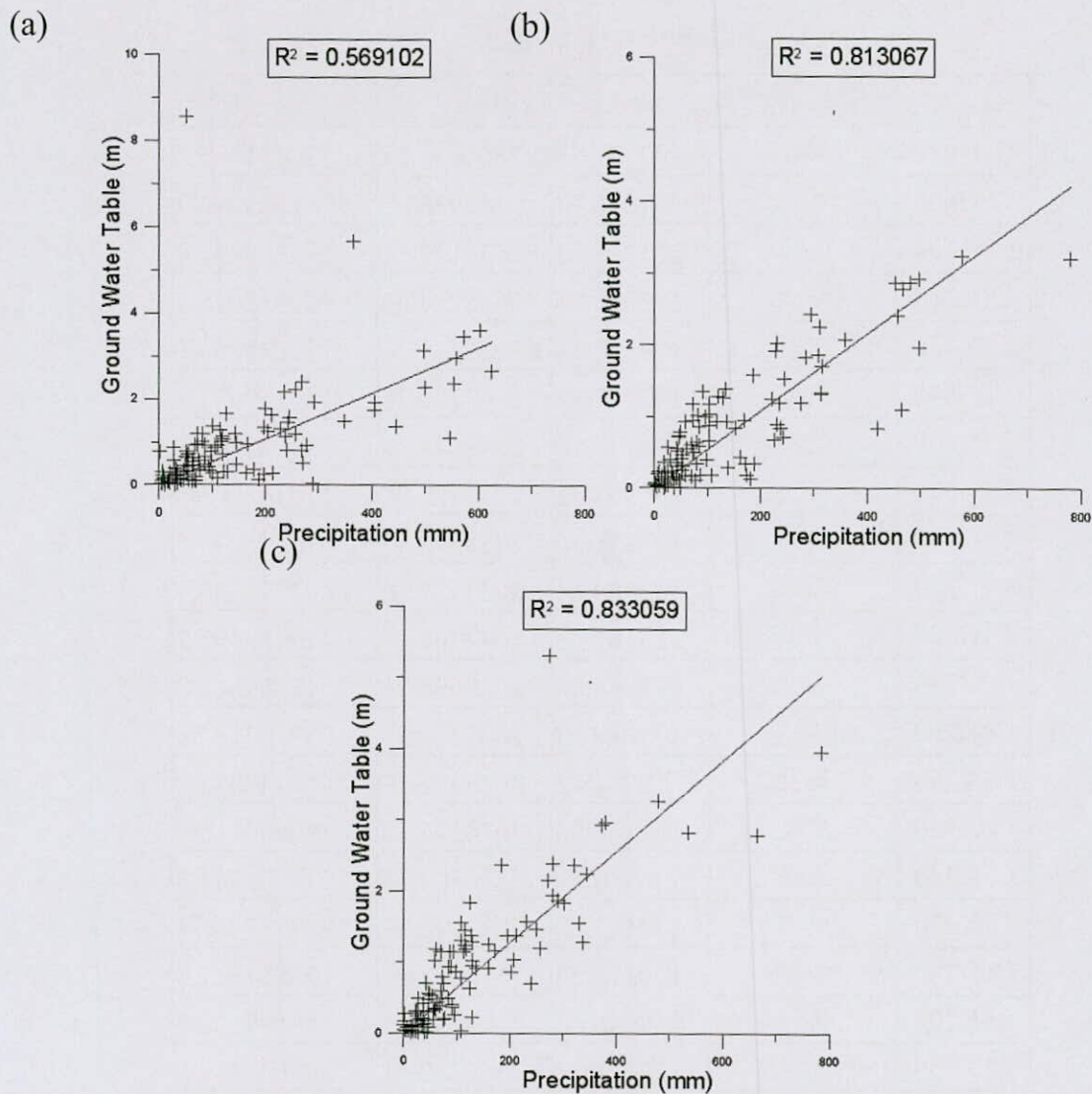


圖 5.2-8 豐榮(1)地下水位上升量與各區平均降雨量線性迴歸(a)扇頂區(b)扇央區
(c)扇尾區

「扇頂區」地下水井之水位變化對「扇頂區」之平均降雨求得各井之 R^2 值如圖 5.2-9 所示；「扇央區」地下水井之水位變化對「扇頂區」、「扇央區」之平均降雨可求得 2 組不同之 R^2 值，各井之比較如圖 5.2-10 所示；「扇尾區」地下水井之水位變化對「扇頂區」、「扇央區」、「扇尾區」之平均降雨可求得 3 組不同之 R^2 值，各井之比較如圖 5.2-11 所示，由圖可知各區域之地下水位受到同區之降雨影響較高，而由圖 5.2-11 又可發現扇央區降雨對扇尾的影響高於扇頂區降雨，因此研判在各區域之降雨對於該區之地下水應具有較高之補注潛勢，且區域愈遠之降雨對補注之影響愈小。但由於空間分佈及區域水文地質特性不同，各口井之地下水位，對不同區域之降雨相關性也不同，此補注因子僅考慮其水位變化是否受降雨所影響，故僅取出該井求得 R^2 值之最大者，利用距離倒

數平方法(Inverse Distance to a Power)內插出各網格之數值，完成後之等值線圖如圖 5.2-12 所示。

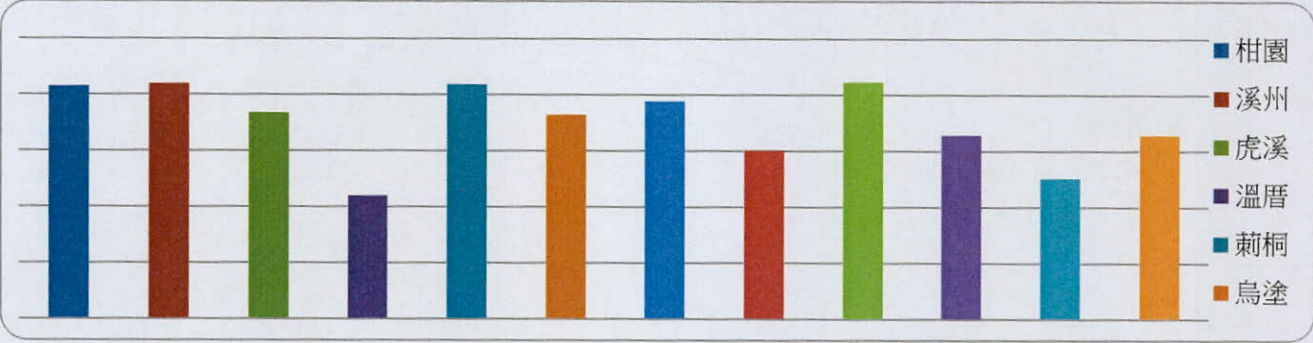


圖 5.2-9 扇頂區降雨對扇頂區地下水井水位變化迴歸統計之 R^2 值比較圖

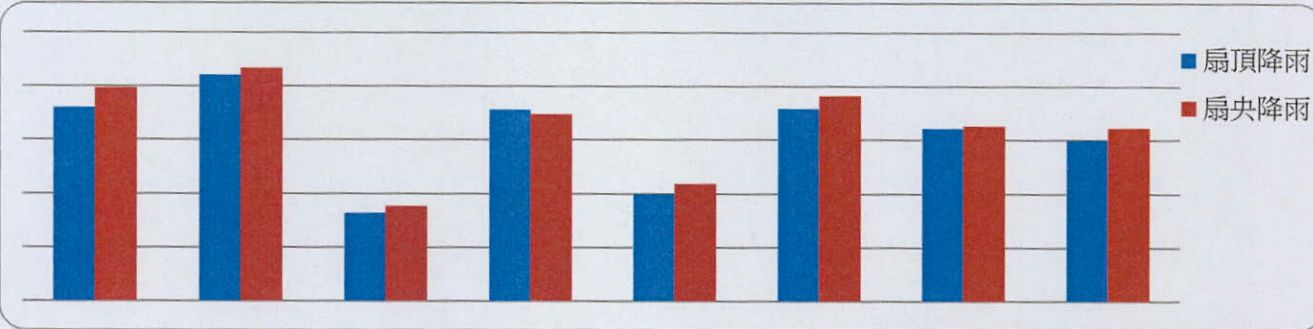


圖 5.2-10 扇頂區與扇央區降雨對扇央區地下水井水位變化迴歸統計之 R^2 值比較圖

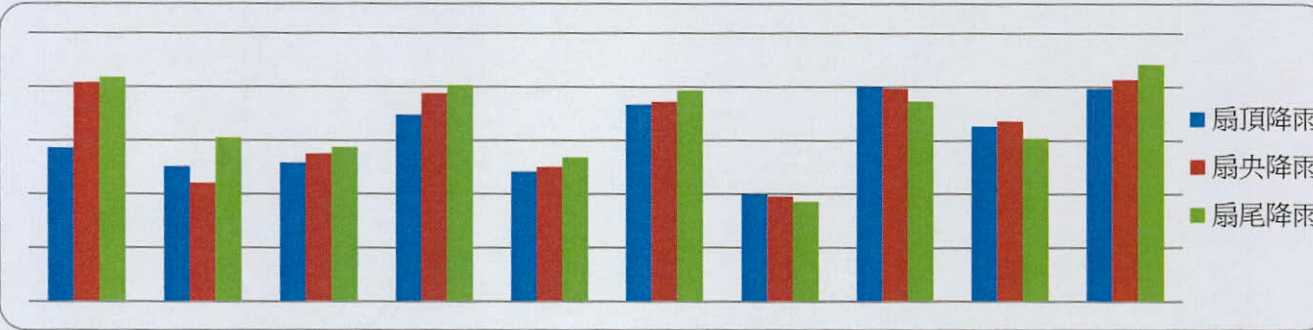


圖 5.2-11 扇頂區、扇央區與扇尾區降雨對扇尾區地下水井水位變化迴歸統計之 R^2 值比較圖

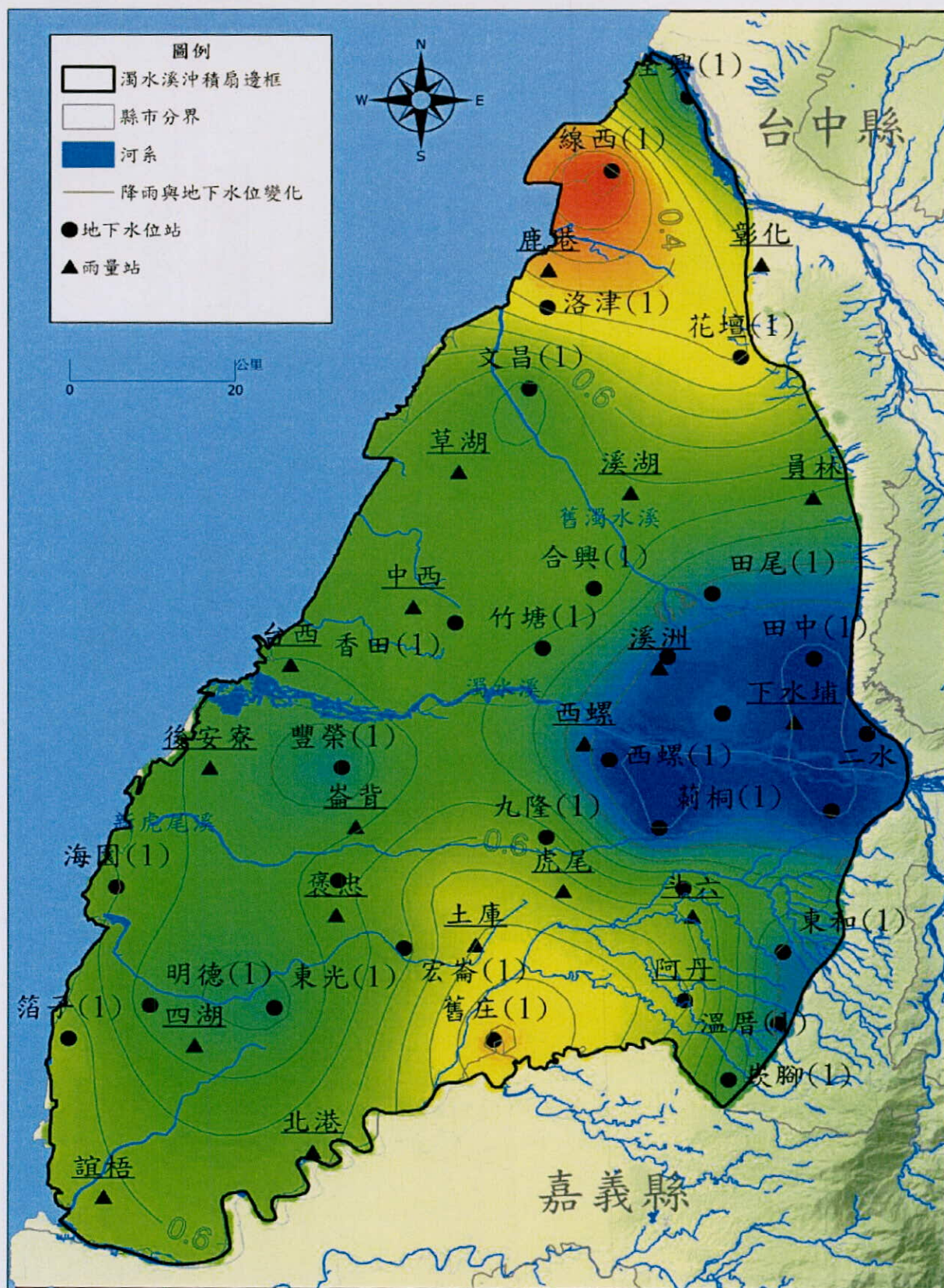


圖 5.2-12 降雨與地下水位變化相關性分布圖

二、單位蓄水量變化

儲水係數為含水層蓄水量估算重要參數，藉由儲水係數可評估含水層補注潛勢之高低，本計畫針對蒐集之儲水係數進行分析，於濁水溪沖積扇上游補注區擁有較高之儲水係數。各含水層蓄水量之增減，主要是由扇頂非受壓地下水層地下水面之升降，亦即非受壓含水層地下水飽和含水體積之增減來儲存或支出；其餘受壓含水層部分則屬於彈性蓄水，其蓄水量變化極小。若考慮受壓地下水層，假設其儲水係數約 1.91×10^{-4} ，其低估水量僅約 1% 左右(江崇榮等，2004b)。在實用上，以最上部非受壓地下水層之歷線分析所得之地下水收支量，可代表地下水區整體之地下水收支量。前述說明亦反應出地下水儲蓄量才是反應出整個含水層地下水進出的整體效應，事實上補注的結果即是含水層蓄水量的變化，因此，本計畫乃以蓄水量變化，即地下水位之變化與儲水係數之相乘積（單位面積且高度為含水層厚之土柱蓄水量變化），而非地下水位或蓄水係數個別之變化來反應補注潛勢之大小，其中地下水位之變化乃以水位標準差代表，如式 5.2-2 所示。

若僅只考慮最上部非受壓含水層之井，以其單位蓄水量變化值進行內插，會導致此內插值在受壓含水層區域之值過高，高估補注潛勢，因此本計畫取位於淺層非受壓及受壓含水層的井，如圖 5.2-7 所示，其井名、儲水係數（參考自中央地質調查所彙刊第十九號圖六及表二）、各站水位標準差及單位蓄水量變化如表 5.2-4 所示。以 Surfer 軟體內建之距離倒數平方(Inverse Distance to a Power)內插得各格網之單位蓄水量變化值，並以此資料建立單位蓄水量變化之 GIS 圖層。濁水溪沖積扇之單位蓄水量變化等值圖如圖 5.2-13 所示，由圖中可知在扇頂二水站及古坑站處有較高之單位蓄水量變化，其相對之補注潛勢也較高。

$$\bar{S} = \sigma \times S \dots\dots\dots (式 5.2-2)$$

$\bar{S}$ ：單位蓄水量變化

σ ：地下水位標準差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}$$

S ：受壓含水層為儲水係數(S)，非受壓含水層為比出水率(S_y)

表 5.2-4 各井之儲水係數與單位蓄水量變化

井名	well_name	S	Sy	水位標準差	單位蓄水量變化 (m)
竹塘(1)	Jhutang		0.200	0.767	0.1534
柑園(1)	Ganyuan		*0.120	1.522	0.1827
溪州(1)	Sijhou		*0.216	0.914	0.1974
虎溪(1)	Husi	0.00218		0.879	0.0019
溫厝(1)	Wuncuo	0.00218		0.920	0.0020
西螺(1)	Siluo		0.200	0.897	0.1793
舊庄(1)	Jiouhuang	0.00218		0.842	0.0018
荊桐(1)	Cihtong	*0.00071		1.146	0.0008
烏塗(2)	Wutu		*0.152	2.775	0.4217
豐榮(1)	Fongrong	0.00218		1.889	0.0041
田洋(1)	Tianyang	*0.00188		0.693	0.0013
海園(1)	Haiyuan	*0.00019		2.326	0.0004
箔子(1)	Bozih	0.00218		1.769	0.0039
明德(1)	Minde		0.200	1.205	0.2411
東光(1)	Dongguang		*0.289	1.613	0.4662
洛津(1)	Luojin		0.200	0.581	0.1161
線西(1)	Siansi	*0.00448		0.453	0.0020
全興(1)	Cyuansing		0.200	0.416	0.0832
文昌(1)	Wunchang	0.00218		0.562	0.0012
花壇(1)	Huatan	0.00218		0.341	0.0007
田中(1)	Tianjhong		0.200	2.300	0.4601
二水	Ershuei		*0.199	3.158	0.6284
香田(1)	Xiangtian	0.00218		0.933	0.0020
田尾(1)	Tianwei	0.00218		0.663	0.0014
合興(1)	Hesing		*0.225	1.050	0.2362
九隆(1)	Jiulong	0.00218		0.934	0.0020
宏崙(1)	Honglun	0.00218		1.009	0.0022
東和(1)	Donghe		0.200	3.912	0.7823
炭腳(1)	Kanjiao	0.00218		4.107	0.0090
古坑(1)	Gukeng		0.200	5.142	1.0284

*表示雙井抽水試驗時測值，其餘無實測資料之站以平均值給定，柑園站為本計畫實測結果。

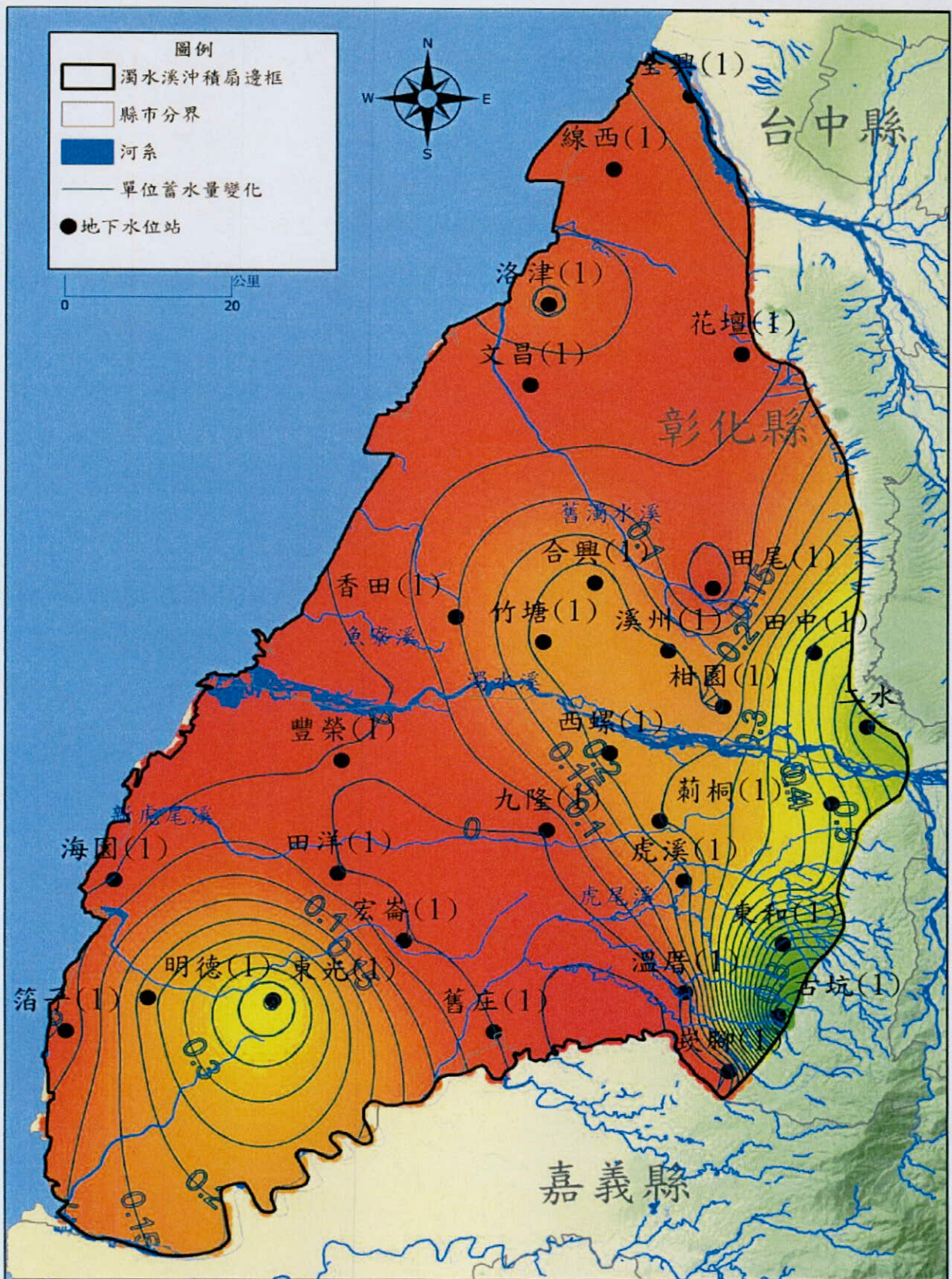


圖 5.2-13 單位蓄水量變化分布圖

於 5.1 節已經說明如何由原始屬性決定因子分數，其中式 5.1-2 與 5.1-3 是用於非連續型之因子，如土地利用與表層土壤，其餘連續型因子則以式 5.1-4 進行計算。5.2 節展示地下水補注潛勢之七種因子原始屬性，後續將依據原始屬性對於地下水補注能力之強弱，給予 0 至 100 之因子分數。

前述 5.1 節已說明土地利用圖層之來源，其中土地利用屬性高達 103 種(如表 5.2-5 所示)，難以直接應用於補注潛勢之估算上，本計劃依據其對補注之特性，歸納為 7 種土地利用重分類類別，重分類類別如表 5.2-6 所示，表中亦同時呈現本計劃於土地利用分數建議值，表 5.2-7 呈現表層土壤之分類類別與對應之分數建議值，分數決定方式亦與土地利用相同。

土地利用與表層土壤屬於非連續型的因子，其分數分別採表 5.2-6 與 5.2-7 之因子分數，圖 5.2-14 與 5.2-15 分別為土地利用與表層土壤之潛勢分數分布圖。此外，由於表層土壤原始圖層在濁水溪河道上無土壤資料記錄，為呈現河道應有較高之補注潛勢，故經評估後直接給予最高分。

降雨與地下水位變化相關性、平均年降雨量、單位蓄水量變化、透水係數與河系密度等其他五項因子屬於連續型之資料格式，圖 5.2-16 至 5.2-20 分別為五項因子之潛勢分數分布圖。最後，綜合 7 項因子之潛勢分數分布圖，則可繪得地下水補注潛勢分布圖，如圖 5.2-21 所示。

表 5.2-5 土地利用屬性與重新分類表

屬性別	原始屬性代碼	重分類代碼	屬性別	原始屬性代碼	重分類代碼
稻作	10101	2	鐵路相關設施	30203	7
旱作	10102	2	國道	30301	7
果樹	10103	2	省道、快速道路	30302	7
廢耕地	10104	3	一般道路	30303	7
水產養殖	10200	6	道路相關設施	30304	7
畜禽舍	10301	6	商港	30401	1
牧場	10302	3	漁港	30402	1
溫室	10401	6	專用港	30403	1
倉儲設施	10402	7	其他港口相關設施	30404	1
農產品展售場	10403	7	河川	40101	1
其他設施	10404	6	減河	40102	1
天然針葉樹純林	20101	5	運河	40103	1
天然闊葉樹純林	20102	5	堤防	40104	1
天然竹林	20103	5	溝渠	40200	1
天然竹針闊葉混淆林	20104	5	水庫	40301	1
人工針葉樹純林	20201	5	湖泊	40302	1
人工闊葉樹純林	20202	5	其他蓄水池	40303	1
人工竹林	20203	5	人工湖	40304	1
人工竹針闊葉混淆林	20204	5	水道沙洲灘地	40400	1
伐木跡地	20301	6	水閘門	40501	1
苗圃	20302	5	抽水站	40502	1
防火線	20303	6	水庫堰壩	40503	1
土場	20304	6	地下取水井	40504	1
機場	30100	7	其他設施	40505	1
一般鐵路	30201	7	防汛道路	40600	1
高速鐵路	30202	7	海面	40700	1
零售批發	50101	7	法定文化資產	70101	7
服務業	50102	7	一般文化設施	70102	6
純住宅	50201	7	其他文化設施	70103	7
兼工業使用住宅	50202	7	公園綠地廣場	70201	3
兼商業使用住宅	50203	7	遊樂場所	70202	7
兼其他使用住宅	50204	7	體育場所	70203	7
製造業	50301	7	礦場	80101	6
倉儲	50302	7	礦業相關設施	80102	6

表 5.2-5 土地利用屬性與重新分類表(續)

屬性別	原始屬性代碼	重分類代碼	屬性別	原始屬性代碼	重分類代碼
宗教	50401	7	土石採取場	80201	6
殯葬設施	50402	7	土石相關設施	80202	6
興建中	50403	6	鹽田	80301	6
其他	50404	6	鹽業相關設施	80302	6
政府機關	60100	7	軍事用地	90100	7
幼稚園	60201	7	溼地	90200	6
小學	60202	7	草生地	90300	3
中學	60203	7	灘地	90401	6
大專院校	60204	7	崩塌地	90402	6
特種學校	60205	7	礁岩	90403	6
醫療保健	60300	7	裸露空地	90404	6
社會福利設施	60400	7	灌木荒地	90500	4
氣象	60501	7	災害地	90600	6
電力	60502	7	營建剩餘土石方	90700	6
瓦斯	60503	7	未使用地	90801	6
自來水	60504	7	人工改變中土地	90802	6
加油站	60505	7	測量標	90803	7
環保設施	60600	7			

表 5.2-6 土地利用重分類屬性代碼與因子分數表

代碼	重分類	因子分數
1	河川	100
2	農耕地	90
3	綠地	70
4	灌木荒地	60
5	林地	40
6	裸露地	20
7	不透水區	0
因子分數為本計劃建議值		

表 5.2-7 表層土壤分類屬性代碼與因子分數表

代碼	分類	細部描述	因子分數
1	粗砂土	粗砂土，砂土	90
2	細砂土	細砂土，壤質粗砂土，壤質砂土	80
3	壤質細砂土	壤質細砂土，粗砂質壤土，砂質壤土，細砂質壤土	70
4	極細砂土	極細砂土，壤質極細砂土，極細砂質壤土	60
5	粉土	粉土，粉質壤土	50
6	壤土	壤土	40
7	砂質粘壤土	砂質粘壤土	40
8	粘壤土	粘壤土，粉質粘壤土	30
9	粉質粘土	粉質粘土	20
10	粘土	粘土	10
11	石礫	石礫	100

因子分數為本計劃建議值

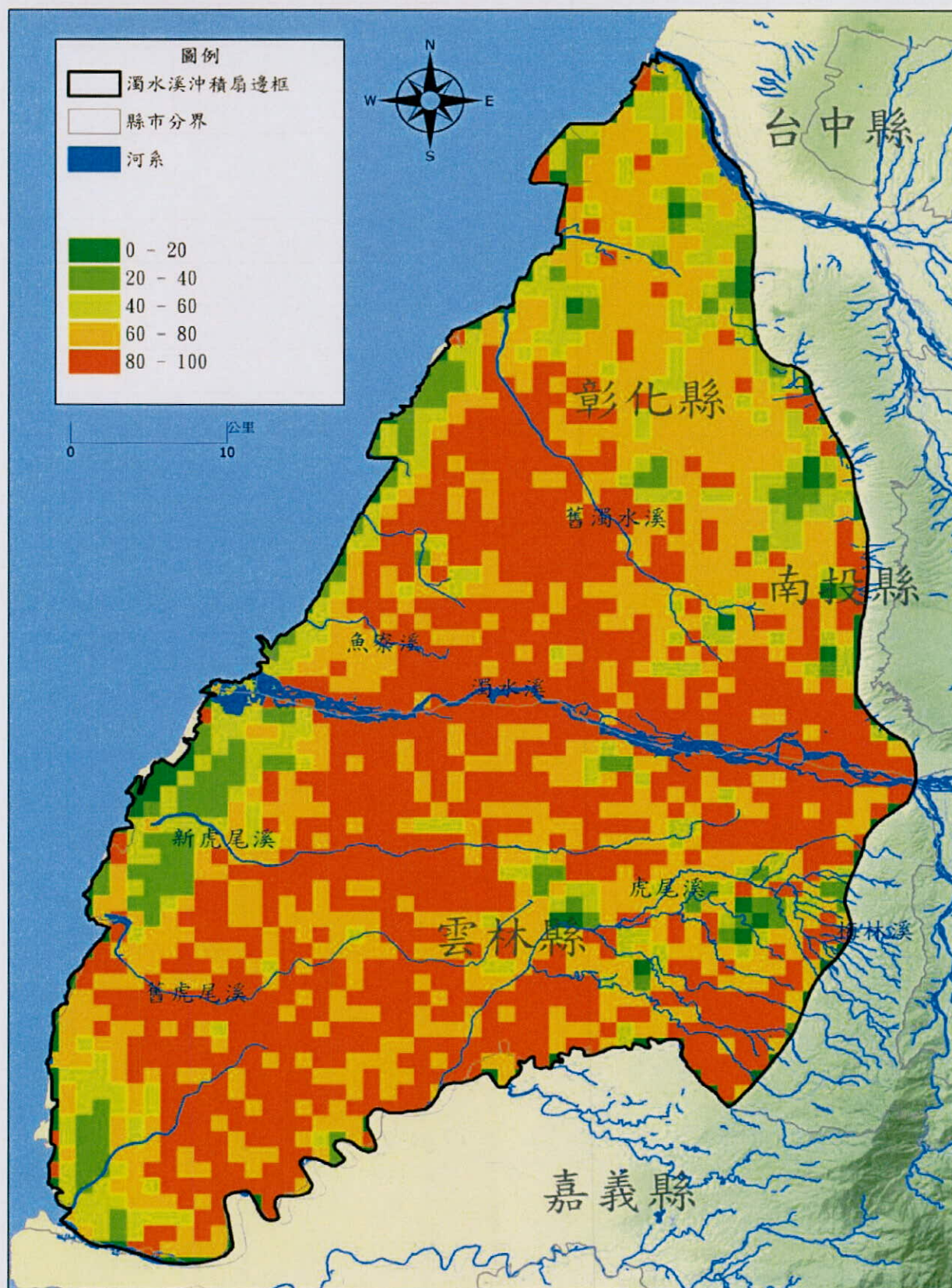


圖 5.2-14 土地利用分數分布圖

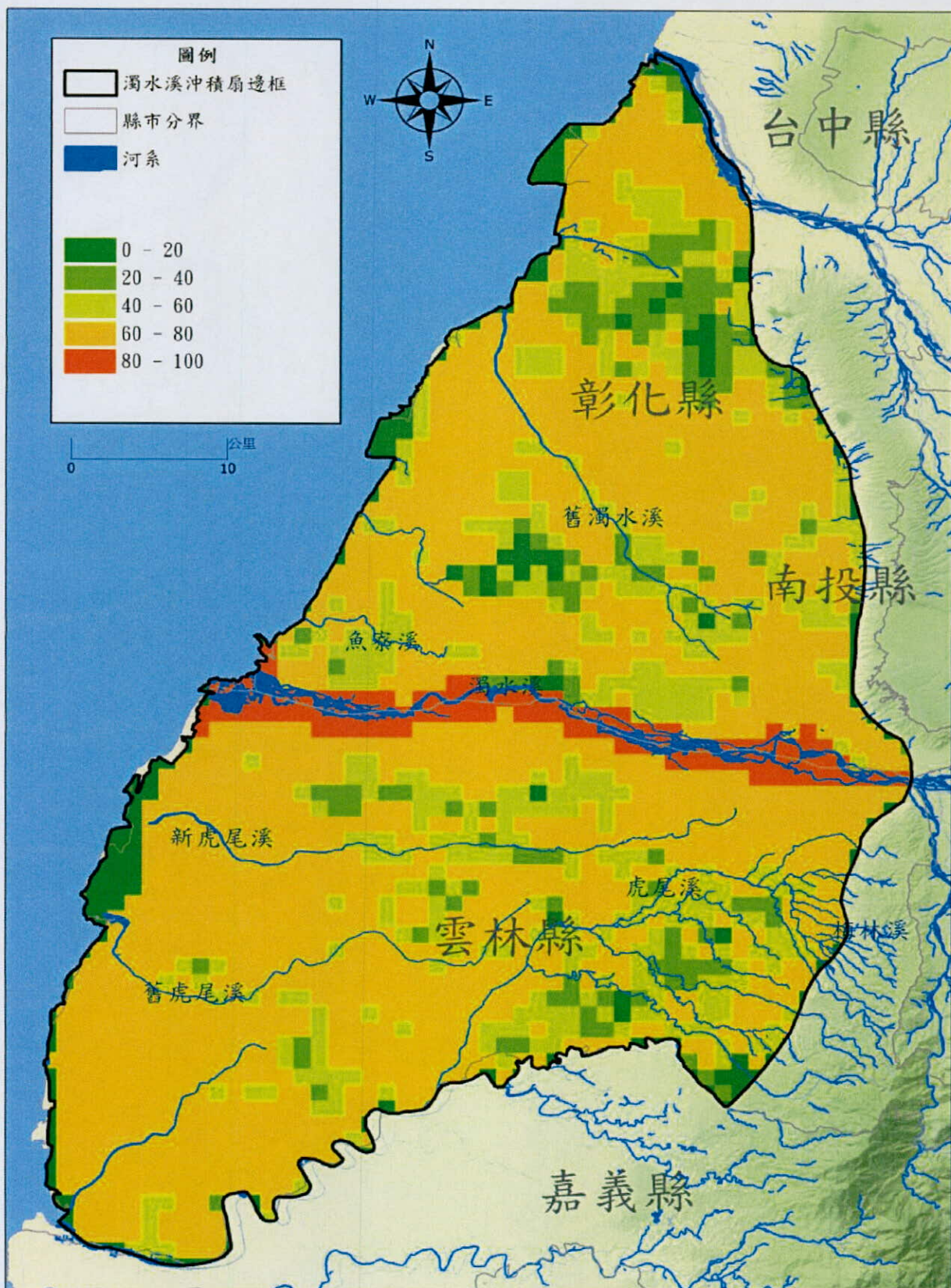


圖 5.2-15 表層土壤種類分數分布圖

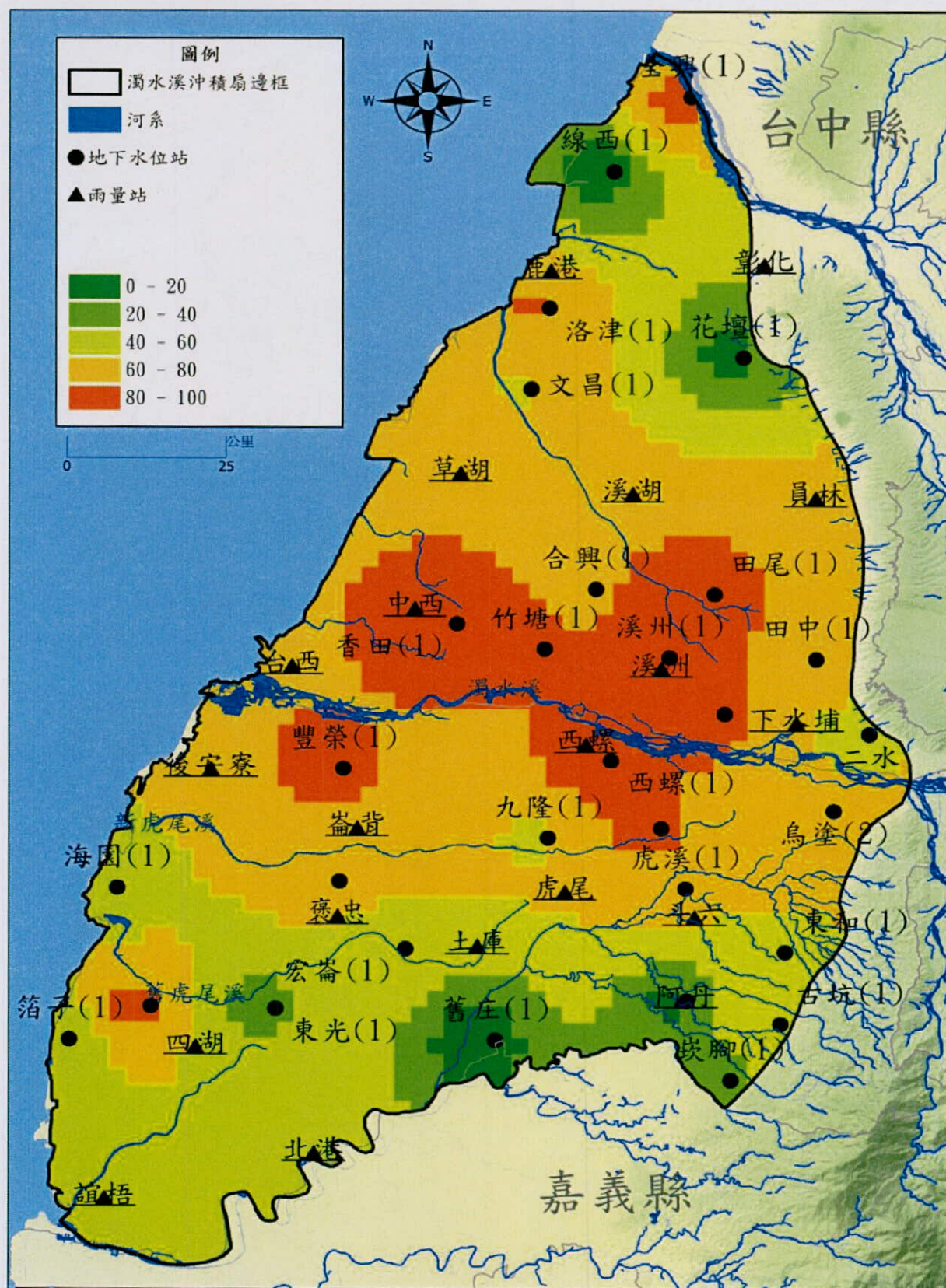


圖 5.2-16 降雨與地下水位變化相關性分數分布圖

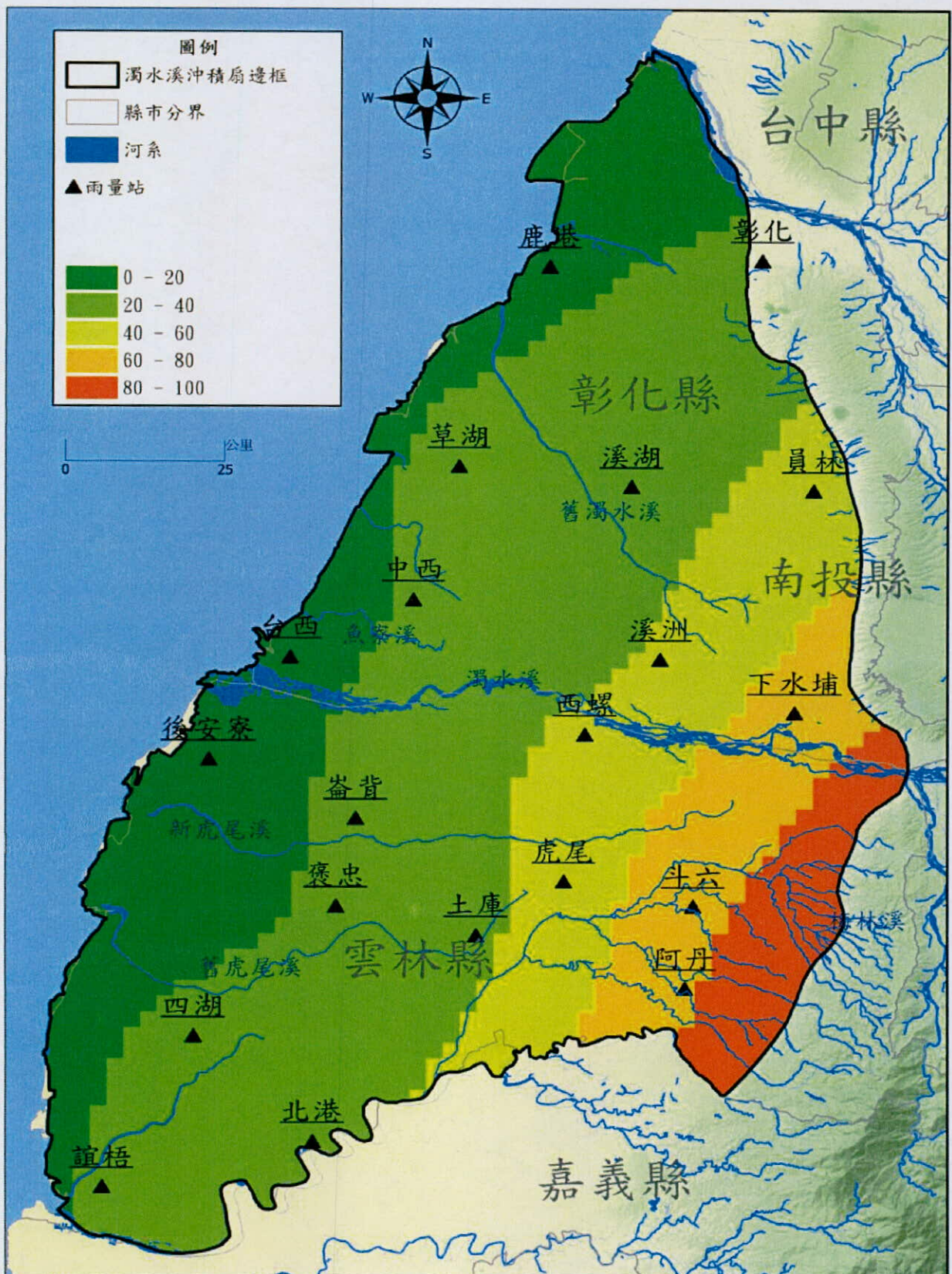


圖 5.2-17 1993~2008 年平均年降雨量分數分布圖

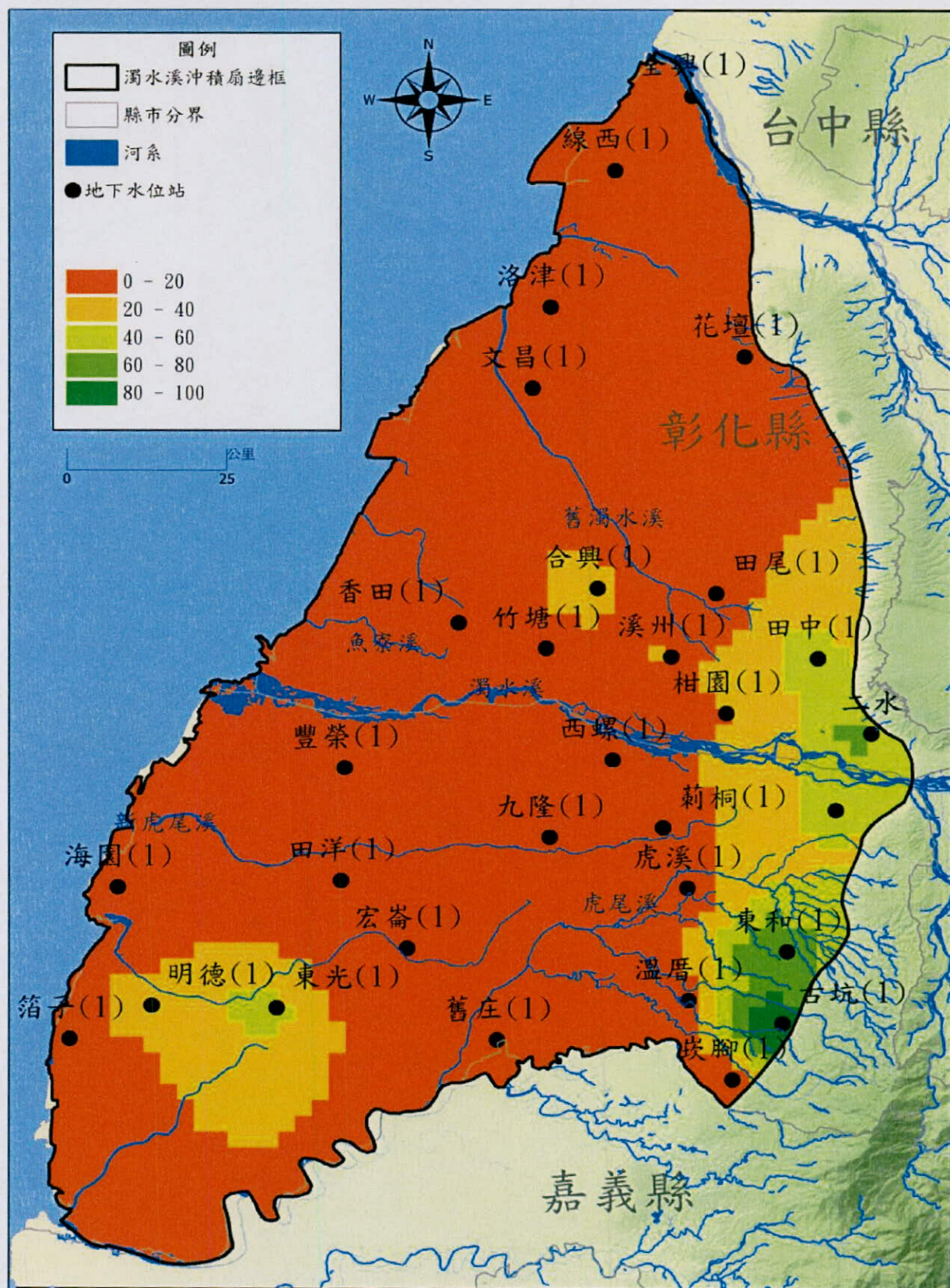


圖 5.2-18 單位蓄水量變化分數分布圖

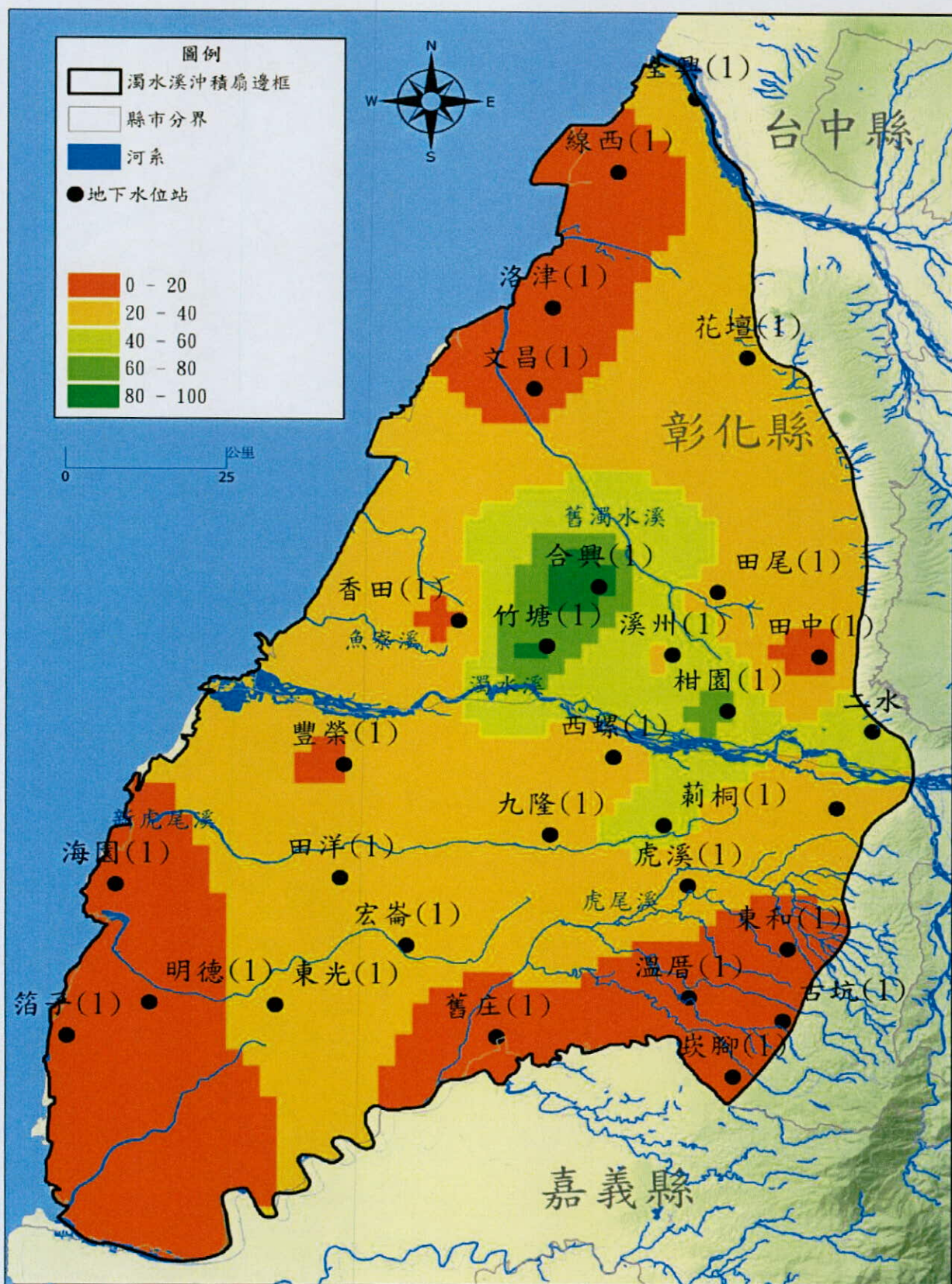


圖 5.2-19 透水係數分數分布圖

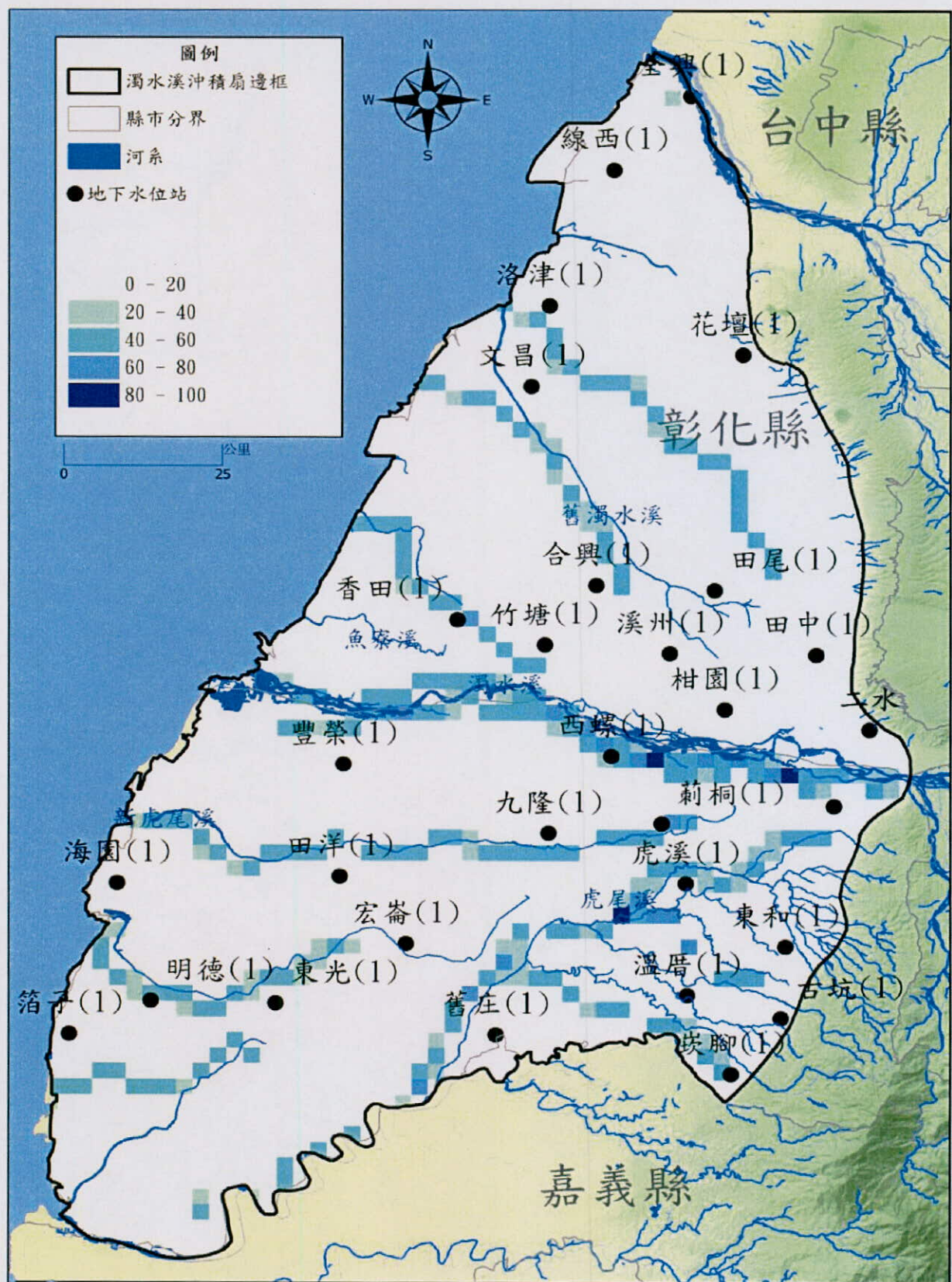


圖 5.2-20 河系密度分數分布圖

5.3 主要補注區範圍綜合分析

地球物理方法部分，參考二維地電阻所劃定之主要礫石層區域，將圖 5.2-21 地下水補注潛勢整體分數，以潛勢分數 57 作為門檻，則可重繪得地下水主要補注潛勢區分布圖，如圖 5.3-1 所示，若以主要補注潛勢區域之空間分布，可區分為北區與南區，其中北區與二維地電阻所推測的交界面中重疊面積為 94.4%，南區與二維地電阻重疊面積為 97.3%，兩者結論極為相似。地下水主要補注潛勢區多數分布於扇頂地區，少數分布於扇央地區與扇尾地區，扇頂部分包含二水鄉、田中鎮、社頭鄉、北斗鎮、溪州鄉、林內鄉、荊桐鄉、斗六市及古坑鄉，扇央部分包含埤頭鄉與二林鎮，扇尾部分主要位於四湖鄉。其中扇央地區之合興站由於透水係數較附近觀測井高，使得該區域之補注潛勢相對較高；扇尾地區之東光站及明德站由於儲水係數較高，且該區域之水位變化幅度大，而有較大之單位蓄水量變化，故此區域亦有較高之補注潛勢。

地球化學方法部分，由於地下水溶氧量在地下流動時，受到氧化還原等化學反應消耗大量溶氧，因此若無地面水量補注，地下水溶氧量將迅速降低。比較主要補注潛勢區與水質檢測結果，主要補注潛勢區內之水井溶氧量多相對較高，水質結果可證明此區域為濁水溪沖積扇主要補注來源。古坑站位於主要補注潛勢區外，然其溶氧量亦相對較高，若參考兩站之地質柱狀圖與鄰近區域之地電阻施測分析，兩者均有泥質材質土壤覆蓋於含水層上，綜合三者資訊可推測鄰近區域有破碎泥層覆蓋在表層，使得該區域有一定程度之補注量，可維持該水井之溶氧量，但受到破碎泥層之影響，其補注量應遠較通透之礫石層低。

綜合前述補注潛勢分析、二維地電阻施測分析與水質檢測結果，繪出濁水溪沖積扇地下水主要補注分布區，如圖 5.3-2 所示。顯示無論是藉由地球物理方面或地球化學方面的證據，所推得之主要補注區域均類似，可降低主要補注區劃設之不確定性。

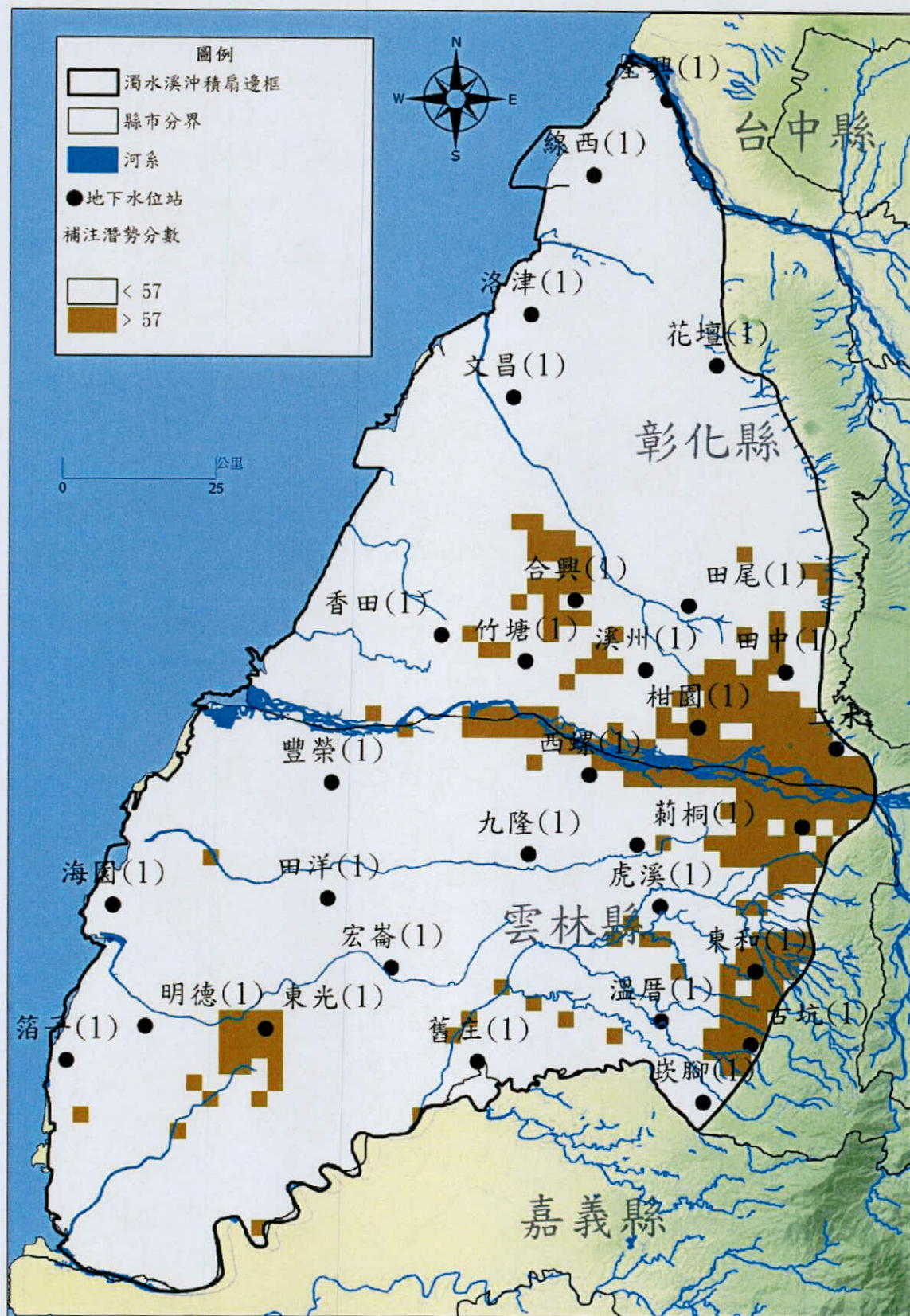


圖 5.3-1 地下水主要補注潛勢分數分布區

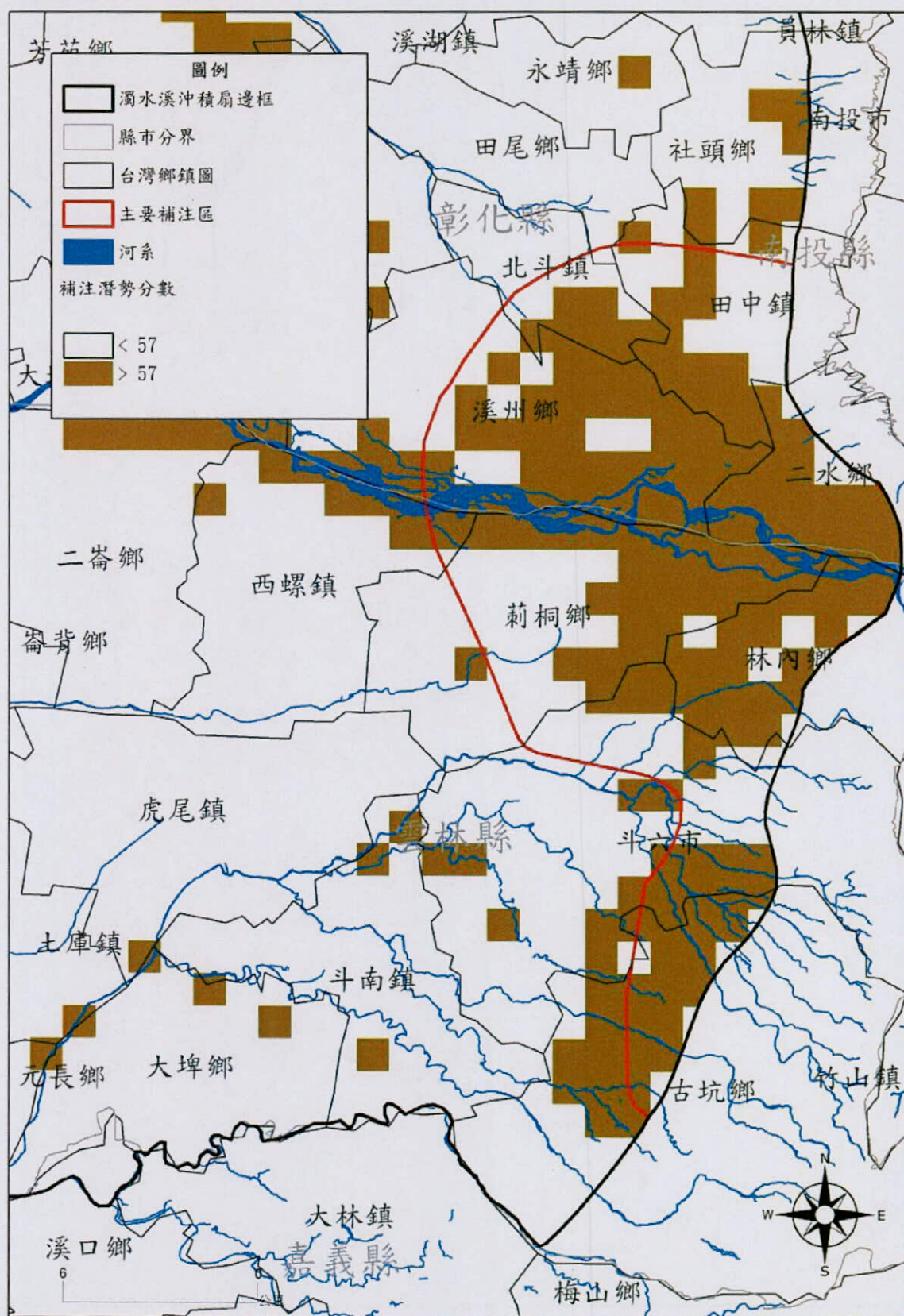


圖 5.3-2 濁水溪沖積扇扇頂主要補注區分布

第六章水資源評估

6.1 分散型地下水歷線法理論概述

Healy and Cook (2002)、Schwartz and Zhang (2003) 與江崇榮等人(2006b)指出水位的上升可代表地下水補注量，而水位的下降則代表地下水出滲至河川中。地下水水位同時受到抽水與補注之綜合影響，地下水位歷線隨時間高低起伏，然而分析地下水位歷線與降雨歷線之關係，可以發現地下水位歷線上升或是減緩下降是隨著降雨行為而產生(De Vries and Simmers (2002); Healy and Cook (2002); Ketchum et al. (2000); Scanlon et al. (2002); Sophocleous (1991); Moon et al. (2004); Crosbie et al. (2005); Jie et al. (2011))，因此藉由水位歷線的變化即可呈現掌握各項水量進出之歷程，以此概念推估地下水補注量或其他進出水量之方法，可稱之為地下水歷線法(Groundwater Fluctuation Method, GFM)。

地下水歷線法之流程主要可以分為四個步驟，首先利用各站各時刻之觀測水位，以內插演算法推估全系統全時刻之水位；其次，內插水位搭配比儲率(S_s)或比流出率(S_y)計算全系統之蓄水量歷線；接著，利用枯水期之蓄水量歷線推估系統抽水量與邊界交換量，並以降雨事件求得降雨造成之垂向補注量與流失量；最後，統計各年度之水平衡分析。為求與數值模式一致，因此地下水歷線法與數值模式之系統定義相同。以濁水溪沖積扇而言，目前水文地質架構共區分為 F1、F2-1、F2-2 與 F3 四層含水層，T1、T2 與 T3 共三層阻水層，由於 F3 觀測井數過少不足以進行模式檢定，因此數值模式僅檢定 F1、T1、F2-1、T2 與 F2-2，而地下水歷線法亦以 F2-2 之底部，作為濁水溪沖積扇之水量積分基準面。以下將進一步詳細說明：

6.1.1 地下水位內插

以地下水觀測水位為基礎，以河川觀測水位或邊界條件等為輔，搭配水文地質架構，以分層式距離倒數平方法內插推估系統水位($h'_{i,j,k}$)。內插演算法是以控制點之數值為基礎，以加權平均的方式推估空間上任意點之數值，不同內插方法有不同之權重估算方式。圖 6.1-1 為控制點控制點設置的示意圖。

地下水系統之水文地質架構影響地下水流動與水位變化，一般而言在含水層中因透水性良好，因此多僅有水平流動，而無垂向流動，故在水力梯度方面可假設垂向之水力梯度為 0；在阻水層的部份，則多為垂向流動，故阻水層上下方之含水層則具有垂向水力梯度；在觀測井濾孔開篩方面，大多數開篩會坐落於相同分層中，因此在此假設濾孔開篩範圍之水位推估值應等於觀測水位。

為呈現上述特性，控制點的給定則依據下列條件，將觀測水位設定於控制點上。

濾孔開篩位置：依據濾孔開篩範圍，將控制點給在濾孔開篩的上緣與下緣，因此可確保後續內插上，在此深度範圍內之推估值與觀測水位一致。濾孔上方或下方有阻水層：如圖 6.1-1 所示，若濾孔上方或下方有阻水層存在，則在阻水層之下緣或上緣高程處，加入一個控制點。如此可確保在相同分層中，垂向之推估水位一致，無垂向水力梯度；在跨越阻水層時，由於阻水層的上下緣均有控制點，其分別由上下兩觀測井之觀測水位給定，因此若分層觀測值呈現水位差，則阻水層位置之推估值亦會呈現垂向水力梯度。

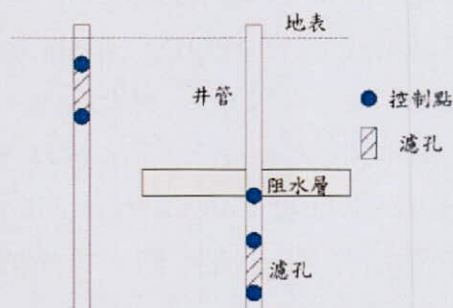


圖 6.1-1 控制點設置示意圖

一般而言，內插演算法是以權重的方式，對鄰近控制點數值以加權平均的方式，來計算內插點數值，因此當內插點與控制點空間上的距離越接近，其所佔權重越高，可使最鄰近控制點的影響加重，進而使得內插值與最近控制點數值越類似。因此對距離倒數平方法而言，其權重為鄰近控制點與其內插點之距離倒數平方。此外，由於內插方法是以鄰近控制點的數值來推估，因此當控制點的距離過遠時，亦應視為無影響，在此以搜尋範圍的方式來區分非鄰近控制點。

本計畫以分層式之距離倒數平方法來計算，其是以現地的水文地質架構來做分層，首先，以相同分層或相鄰分層的控制點作為候選鄰近控制點；其次才以內插點與控制點的水平距離辨別鄰近與非鄰近控制點。

6.1.2 蓄水量計算

$$S_i' = \left\{ \begin{array}{ll} n_i A_i \times (t_i - b_i) + s_{s,i} A_{v,i} \times (h_i' - t_i) \times (t_i - b_i) & \text{Confined} \\ = s_{s,i} A_{v,i} \times + s_{s,i} A_{v,i} \times (h_i' - t_i) + Const & \\ s_{y,i} A_{v,i} \times (h_i' - b_i) & \text{Unconfined} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (式 6.1-1)$$

其中， h_i' 與 S_i' 分別代表時刻 t 於第 i 個控制體積蘊藏之水位與地下水儲蓄水量，

$S_{s,i}$ 與 $S_{s,y}$ 則分別代表土壤之比儲率(specific storage) 與比流出率(specific yield)， b_i t_i 與 $A_{v,i}$ 則分別代表控制體積之底部高程、頂部高程與俯視面積。藉由式(6.1-1)與前述之內差水位即可求得控制體積內的蓄水量變化。

6.1.3 以蓄水量歷線分析主要退水線(Master Recession Curve, MRC)

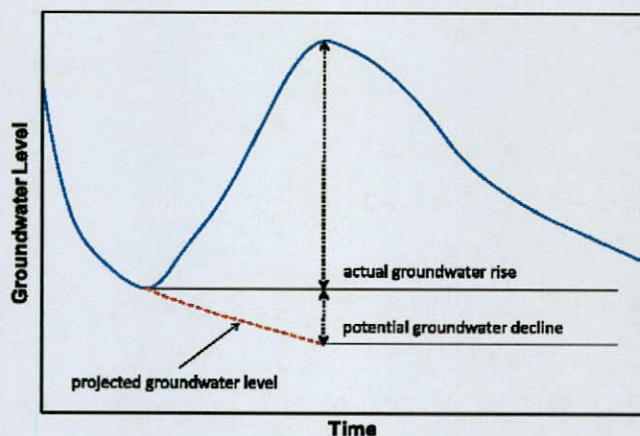


Fig. 3 Potential groundwater decline curve (dashed red line) and measured groundwater level (solid blue line) resulting from recharge in an unconfined aquifer (after Healy and Cook 2002)

圖 6.1-2 區域降雨歷線與地下水位歷線起伏變化示意圖

圖 6.1-2 為區域降雨歷線與地下水位歷線起伏變化示意圖，圖中顯示兩個階段，在降雨事件之前，地下水位持續下降，直降雨事件發生為止；當降雨事件發生期間，地下水位迅速抬升，此時水位達至最高點。發生為止；當降雨事件發生期間，地下水位迅速抬升，此時水位達至最高點。Healy and Cook (2002)將稱為地下水位潛在下降量(potential groundwater decline)，可視為系統因河川出滲、邊界流出，甚至人工抽水等行為，導致地下水位持續下降，如降雨期間該下降機制仍持續作用，因降雨實質補注造成之水位抬昇量應為觀測到之抬昇量，再加上潛在下降量。

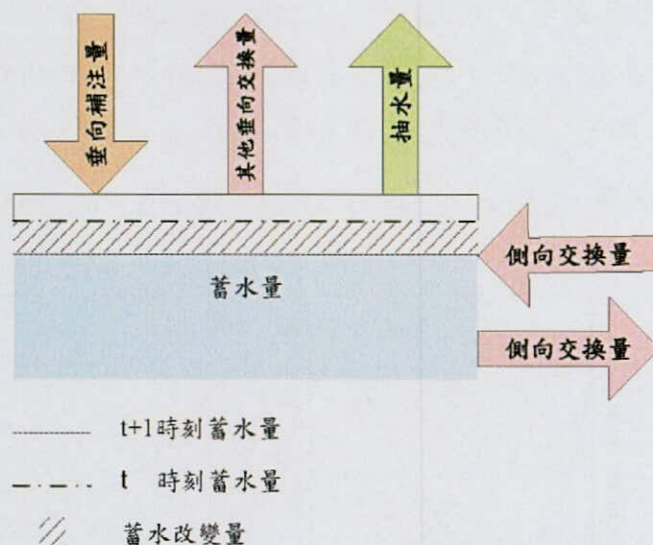


圖 6.1-3 控制體積進出水量概念模型示意圖

圖 6.1-3 為表層水層之概念模型圖，式(6.1-2)為系統之水平衡方程式，系統之蓄水量變化，受到抽水量、補注量、側向交換量與其他垂向交換量之影響。其他垂向交換量包含河川出滲量與系統對外部之流失量等。前述所謂之地下水潛在下降量，即為水平衡方程式中的抽水量與其他垂向交換量之和。

$$S_i^t - S_i^{t-1} = \Delta S_i^{t,t-1} = I_i^{t,t-1} - W_i^{t,t-1} - VE_i^{t,t-1} + HE_i^{t,t-1} \dots\dots\dots (式 6.1-2)$$

中， S_i^t 代表時刻 t 於第 i 個控制體積之地下水儲蓄水量， $\Delta S_i^{t,t-1}$ 即代表時刻 $t-1$ 至 t 之蓄水改變量， $I_i^{t,t-1}$ 、 $W_i^{t,t-1}$ 、 $VE_i^{t,t-1}$ 與 $HE_i^{t,t-1}$ 分別代表於時刻 t 與 $t-1$ 間的地下水補注量、抽水量、其他垂向交換量與水平向交換量。

式(6.1-1)為控制體積內之水位與蓄水量之轉換關係式，其中因應含水層型態之不同，其計算式亦不同。對於非拘限含水層而言，蓄水量可應用比流出率計算；而對於拘限含水層而言，蓄水量之絕對數值應以孔隙率估算填滿孔隙之水量，與以比儲率計算之彈性蓄水部分，然填滿孔隙之水量不為時間之函數，而為一定值，因此後續估算蓄水改變量($\Delta S_i^{t,t-1}$)時，該定值會彼此對消，因此在計算上可忽略不計。

式(6.1-3)是以達西公式計算水平流量，並環繞加總可得與鄰近控制體積之水平交換量。另外，藉由參數 ω 與加權平均的方式，計算時刻 $t-1$ 至 t 間之水平交換量。

$$HE_i^{t,t-1} = \left\{ \omega \sum_{j=1}^M \left[-\bar{K}_{ij} \frac{h_i^t - h_j^t}{l_{ij}} \right] + (1-\omega) \sum_{j=1}^M \left[-\bar{K}_{ij} \frac{h_i^{t-1} - h_j^{t-1}}{l_{ij}} \right] \right\} \times A_{h,ij} \dots\dots\dots (式 6.1-3)$$

$j \in \bar{R}_i$

其中， $\bar{R}_i$ 代表第 i 個控制體積周遭的鄰近控制體積， M_i 代表鄰近控制體積個數， $HE_i^{t,t-1}$ 代表時刻 $t-1$ 至 t 間，由周遭控制體積流入之水平交換量， h_i^t 則代表第 i 個控制體積於時刻 t 之水位， $\bar{K}_{ij}$ 代表第 i 與 j 個控制體積間的等效水力傳導係數， l_{ij} 與 $A_{h,ij}$ 則兩鄰近控制體積間的距離與穿越面積。

$$\rightarrow I_i^{t,t-1} - W_i^{t,t-1} - VE_i^{t,t-1} = \Delta S_i^{t,t-1} - HE_i^{t,t-1} \dots\dots\dots (式 6.1-4)$$

由於地下水歷線法是以觀測水位為運算基礎，因此藉由觀測水位，搭配式 (6.1-1) 與 (6.1-3) 即可求得 $\Delta S_i^{t,t-1}$ 與 $HE_i^{t,t-1}$ ，如依據已知與未知來作分類，將已知項置放於右方，未知項則放於左方，即可改寫為式 (6.1-4)，等號左方之 $I_i^{t,t-1}$ 、 $W_i^{t,t-1}$ 與 $VE_i^{t,t-1}$ 等三項則留待後續推估。由於枯水期間，因缺少降雨而無補注事件，因此枯水期之水位變化與水平交換，則是受到人工抽水 ($W_i^{t,t-1}$) 與其他垂向交換 ($VE_i^{t,t-1}$) 之影響。

江崇榮等人 (2004; 2006a) 與張良正等人 (2011) 指出，枯水期水位呈現直線下降，由於該時期長期無降雨，因此完全受到抽水之影響，故水位下降之斜率即為區域之平均抽水量，其假設抽水量大小為區域土地利用開發與社經發展之緣故，因此可假設該時期之抽水量為定值。Heppner et al. (2005) 指出河川出滲時，由於外部水位比較低，當內部地下水位提高時，造成較大的水力梯度，因此向外流出之量值會隨地下水位或蓄水量的增加而增加，因其為水位或系統蓄水量的函數，越高之水位或越多之蓄水量，則向外流失之量值亦越大，故枯水期之水位歷線或蓄水量歷線並非完全呈現線性，而是約略呈現非線性。

本計畫以枯水期之蓄水量歷線之時序變化，藉由迴歸分析 (Regression Analysis) 求得主要退水線 (Master Recession Curve, MRC)，求得蓄水量對單位時間蓄水量減少率之函數關係，如式 (6.1-5) 所示，本計畫以指數函數來推估蓄水量減少率 (式 (6.1-6))，其中常數項 α 由於不受到蓄水量之影響，因此可視為人工抽水，其餘指數項則是為天然之邊界交換量。

$$\frac{dS'}{dt} = f(S') \dots\dots\dots (式 6.1-5)$$

$$\rightarrow = -\alpha - \exp[\beta \times (S' - \gamma)] \dots\dots\dots (式 6.1-6)$$

6.2 濁水溪沖積扇之水資源評估

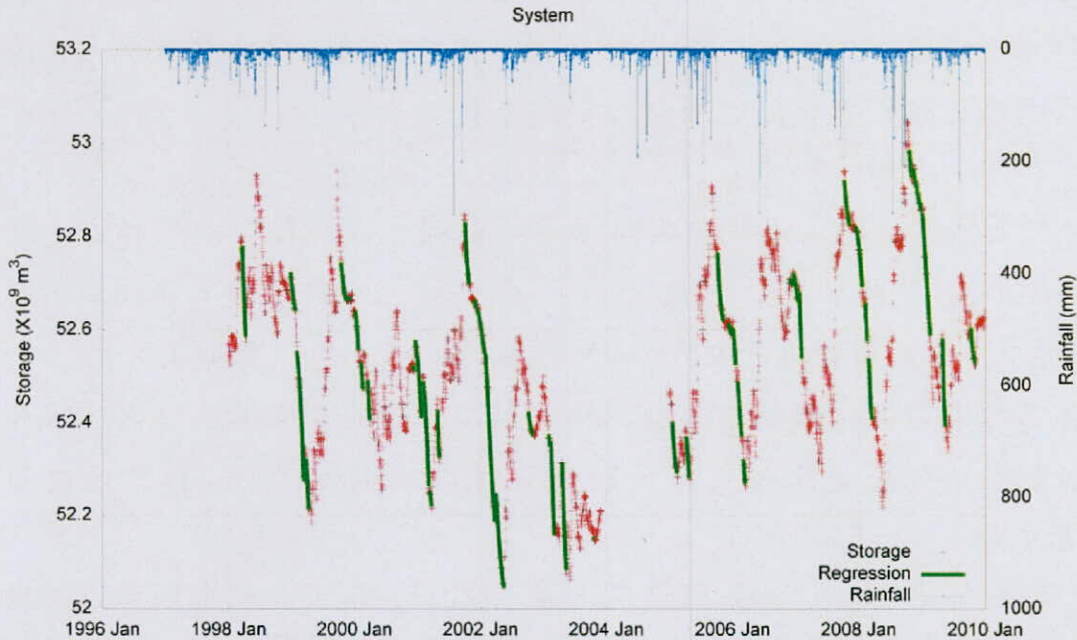


圖 6.2-1 濁水溪沖積扇全系統蓄水量與降雨量歷線圖

圖 6.2-1 呈現了 1998 年至 2003 年間與 2005 年至 2008 年間之濁水溪沖積扇之蓄水量與降雨量之歷線圖，圖中顯示降雨量於四五月間增加，而十月份時轉而趨弱，地下水位亦有類似的反應，四五月間迅速上升，至十月份時則逐漸下降。本區域相對於屏東平原，濁水溪沖積扇之豐枯特性較不明顯，因此枯水期間仍間雜微幅降雨，對水位或蓄水量仍有微幅影響。

濁水溪沖積扇之蓄水量於 2004 年之前，明顯呈現超抽狀態，蓄水量之長期趨勢持續下降，2004 年之豐水期回升幅度亦最小，蓄水量於豐水期並無明顯因補注回升。此外，2001 年底至 2002 年五月之枯水退水段，其退水幅度最大。由於集集攔河堰於民國 90 年(2001 年) 正式啟用，可能是河道中之水量大幅降低，使得補注量大幅衰退。2005 年之後，系統蓄水量狀態回復穩定，歷年間呈現穩定之豐枯變化。

為率除小幅降雨對地下水歷線法之影響，本計畫以 $5(\text{mm/day})$ 降雨強度為門檻值，若有高於門檻值之降雨事件發生，則不納入枯水段之計算。圖上綠線是以枯水段之蓄水量，搭配二次多項式曲線(式 6.2-1) 迴歸，由於迴歸式為可微分方程式，其一階微分型態為式 6.2-2，即可求得各枯水段之退水斜率，以此方式可有效避免雜訊與誤差之影響，而正確取出退水趨勢。

$$y = ax^2 + bx + c \dots\dots\dots (\text{式 6.2-1})$$

$$y' = 2ax + b \dots\dots\dots (式 6.2-2)$$

由於濁水溪沖積扇為台灣之魚米之鄉，一、二期稻作施作期間均抽用大量之地下水，因此將枯水退水段區分為十月至隔年一月，以及二月至五月兩時段，十月至隔年一月為一般用水，而二月至五月為濁水溪沖積扇一期稻作期間，因此兩時段之用水特性不同。將前述所得枯水段蓄水量之迴歸式與其一階導函數繪於圖面上，橫軸為蓄水量，縱軸為單位時間蓄水量減少率，如圖 6.2-2 與 6.2-3 所示。以迴歸分析建立蓄水量對退水斜率之迴歸式，分別如式 6.2-3 與 6.2-4 所示。

$$MRC1 = -0.000909 \times S' + 0.044776 (\times 10^9 m^3 / day) \dots\dots\dots (式 6.2-3)$$

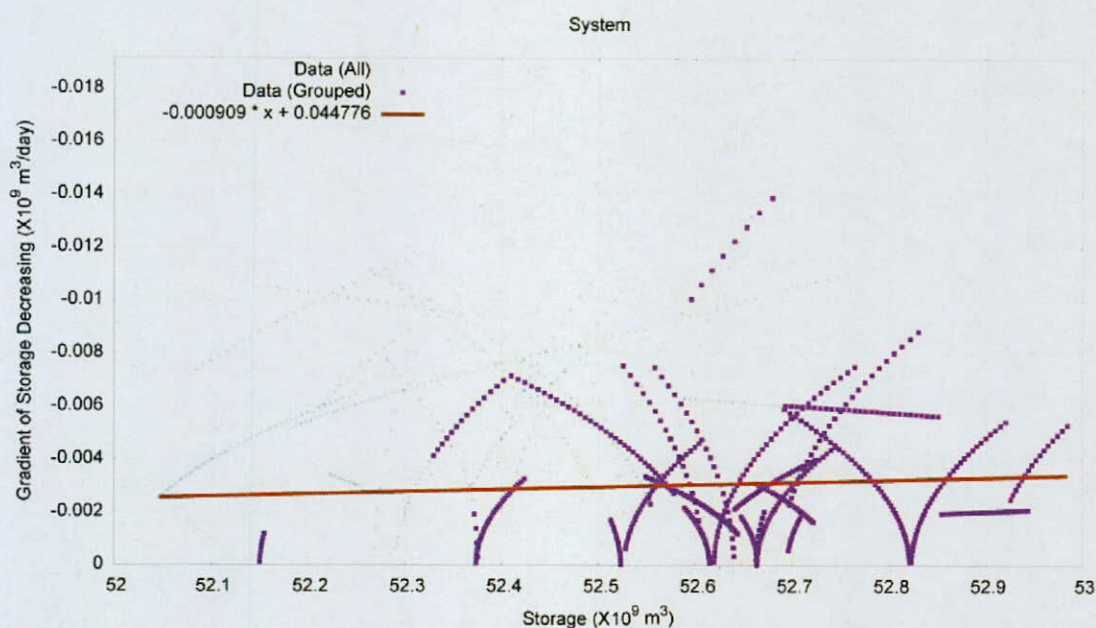


圖 6.2-2 濁水溪沖積扇蓄水量與蓄水量退水斜率分布圖(十月至隔年一月)

$$MRC2 = -0.005016 \times S' + 0.255787 (\times 10^9 m^3 / day) \dots\dots\dots (式 6.2-4)$$

迴歸式是以線性方程式進行迴歸。假設系統內水位最低時、蓄水量最少時，對外流失量為零，退水斜率應完全由抽水所造成，本系統以 520.465 億噸蓄水量作為系統出現過之最低蓄水量，代入方程式中，分別可得 -0.00254233 與 -0.00525601 ，亦即在十月至隔年一月間，單日平均抽水應為 2.54 萬噸之抽水量，一期稻作期間則單日抽水量為 5.25 百萬噸。後續計算年度之水平衡報表，則以兩公式計算。此外，六月至九月為豐水期，亦為二期稻作期間，亦抽用地下水供

灌溉使用，故沿用式 6.2-4 進行運算。此外，由於許多抽水行為會因為降雨補充了水源，故轉而降低抽水量，例如稻作等，若於降雨當天之抽水量應小於平日未降雨之抽水量，在此以一定比值搭配參數檢定的方式來調整，本計畫設定為 0.25。

本計畫以式 6.2-3 與 6.2-4 為系統之主要退水線(MRC)，以年為單位進行水平衡分析，分析結果如表 6.2-1 為系統水平衡分析表，表中分析 1998 至 2003，以及 2005 至 2009 共十一年間之水平衡分析，十一年間之相對豐

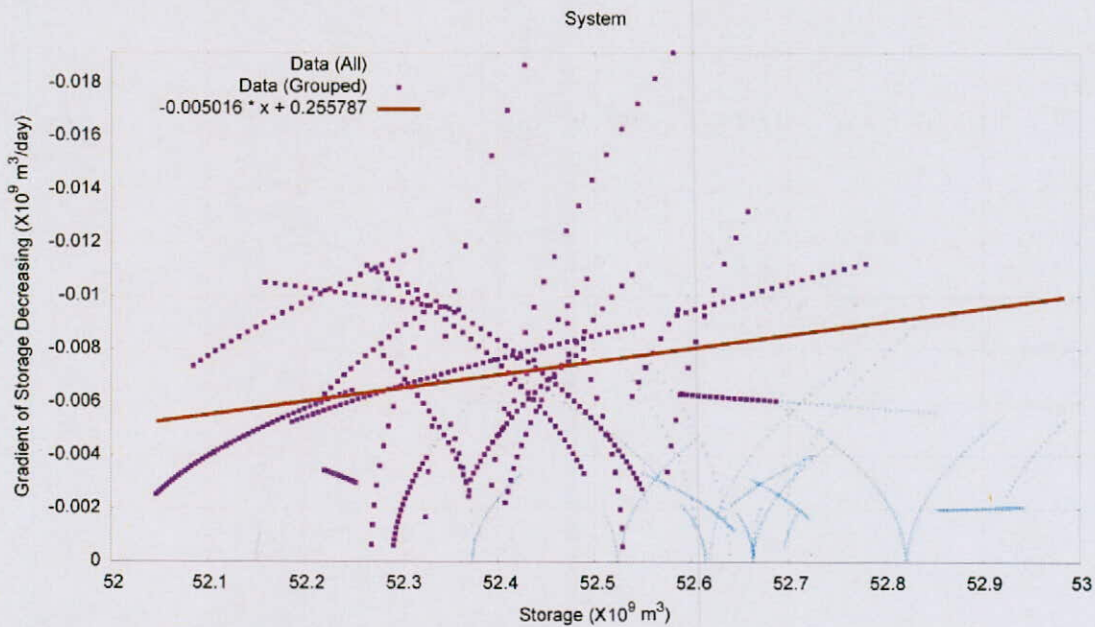


圖 6.2-3 濁水溪沖積扇蓄水量與蓄水量退水斜率分布圖(二月至五月)

水年(2008) 之年雨量為 2,692(mm)，相對枯水年(2003) 之年雨量為 1,136(mm)，而相對豐水年之抽水量、邊界交換量與補注量分別為 13.07、6.09 與 19.92 億噸，而相對枯水年則為 13.00、1.91 與 12.01 億噸，十一年間之平均值為 12.57、5.90 與 18.36 億噸。系統儲蓄改變量集中在 2002、2003 與 2009 年間，期間系統分別減少 1.13、2.63 與 2.24 億噸水量，十一年間共減少 1.26 億噸水量。

圖 6.2-4 分析各降雨事件之累積降雨量，以及對應之垂向補注量，建立兩者之迴歸關係，式 6.2-6 為其迴歸式，式中顯示如某降雨事件之累積降雨量為 100(mm)，該場降雨所能產生之補注量應為 52.63×10^6 (噸)，亦即將近 53 百萬噸。

$$f(x) = 0.526387x + 63.109227 \dots\dots\dots (式 6.2-6)$$

表 6.2-1 濁水溪沖積扇水平衡分析表

年份	年儲蓄改變量 ^a	抽水量 ^a	邊界交換量 ^a	補注量 ^a	降雨量 ^b
1998	135	-1,179	-877	2,192	2,497
1999	-67	-1,227	-555	1,714	1,718
2000	-88	-1,287	-550	1,749	1,622
2001	58	-1,230	-564	1,853	2,111
2002	-113	-1,337	-401	1,625	1,368
2003	-263	-1,270	-213	1,220	1,136 **
2005	148	-1,254	-638	2,040	2,668
2006	119	-1,216	-689	2,025	2,401
2007	86	-1,215	-640	1,941	2,445
2008	84	-1,269	-708	2,060	2,692 *
2009	-224	-1,345	-659	1,781	1,734
總計	-126				
平均	-11	-1,257	-590	1,836	2,036

^a 單位： $\times 10^6 (m^3)$ ；^b 單位：(mm)；* 與 ** 分別代表豐水年與枯水年

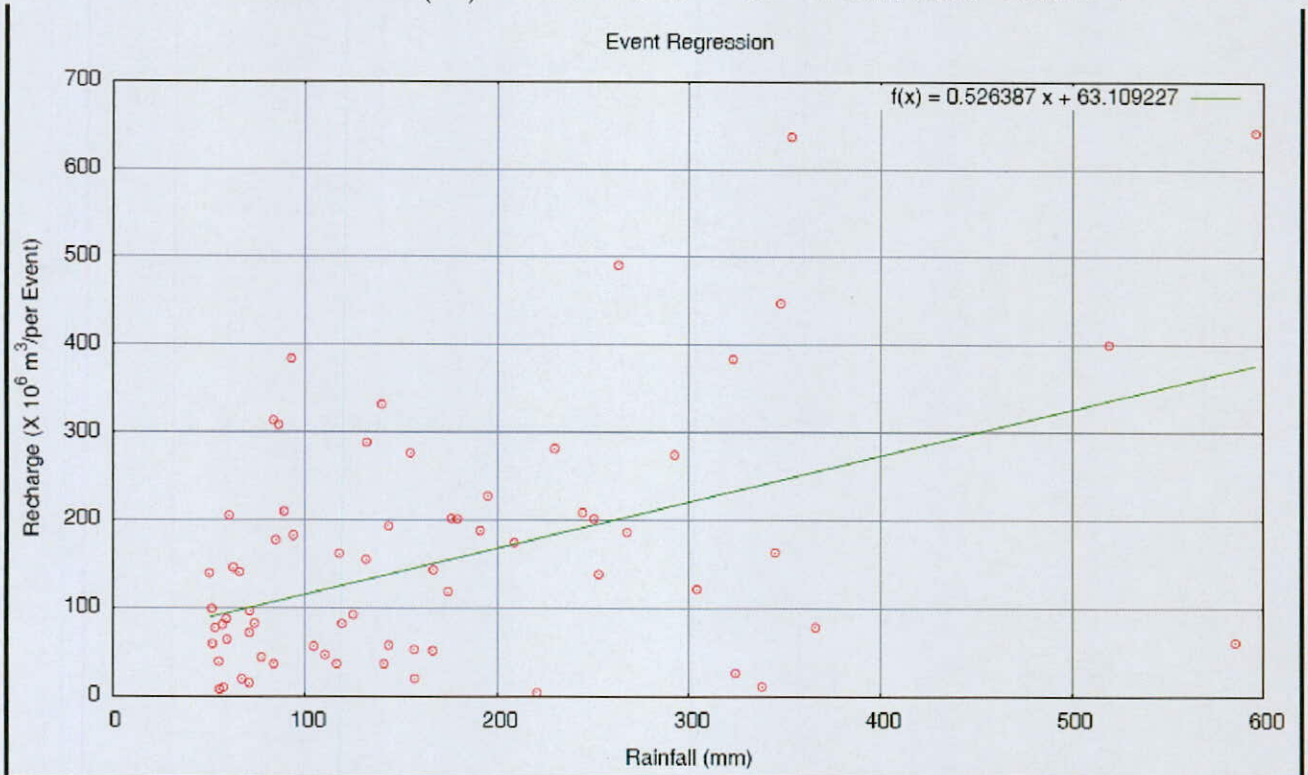


圖 6.2-4 濁水溪沖積扇降雨事件累積降雨量對累積垂向補注量分布圖

第七章 地下水數值模式建置與分析

本章將說明濁水溪沖積扇之地下水數值模式建置流程、水平衡分析及主要補注區對研究區域地下水系統於水量及水質之影響。首先在 7.1 節說明地下水數值模式之建置流程。7.2 節簡介濁水溪沖積扇數值模式之建置，包括 MODFLOW 之簡要說明、水文地質架構、邊界條件與參數檢定成果等。7.3 節對檢定完成之模式進行補注量與抽水量之統計分析，以進一步了解濁水溪沖積扇地下水系統概況。最後於 7.4 節中，首先分析主要補注區之補注量對整體地下水系統水量之影響，之後應用 MODPATH 套件，分析主要補注區域受污染時，在不同時間之可能污染範圍，以瞭解主要補助區對整體地下水資源之影響。

7.1 地下水數值模式建置流程

本計畫地下水數質模式之建置及後續應用分析流程如圖 7.1-1 所示，可分為五大部分，依序為邊界條件與網格劃分、模式資料輸入、模式參數檢定、水平衡分析及模式應用(如圖 7.1-1 所示)。本計畫採用美國地質調查局開發之 MODFLOW 地下水流模擬模式模擬研究區域之地下水流系統(見 7.2.1 MODFLOW 簡介)。在以 MODFLOW 建模時，首先需先定義研究區域之空間切割，模擬期距，分層架構及邊界條件等設定，接著再設定初始條件與含水層參數(如透水係數、儲水係數、含水層厚度等)；其輸出資訊則包含各含水層之地下水位分佈、洩降分佈、模式水平衡等。在給定建模所需之基本資料後，本計畫應用規則式專家系統(見 7.2.4 參數檢定方法)進行淨補注量檢定，檢定模擬期距(1998~2003 年、2005~2009 年)中，各月份之表層淨補注量與深層抽水量。在水平衡分析時，因本計畫乃以參數檢定方式檢定表層淨補注量，因此需再以分散型地下水歷線法之分析結果，將模式之表層淨補注量分離出表層垂向補注量、表層抽水量及流失量。最後本計畫進一步分析主要補注區對整體地下水系統於水量及水質之影響，其中在水量的評估部分，本計畫分析主要補注區對整體地下水系統之補注量影響程度，而在水質之評估部分，本計畫以檢定後之地下水模式搭配 MODPATH 進行污染範圍分析，評估主要補注區受污染後，對整體地下水系統之影響。

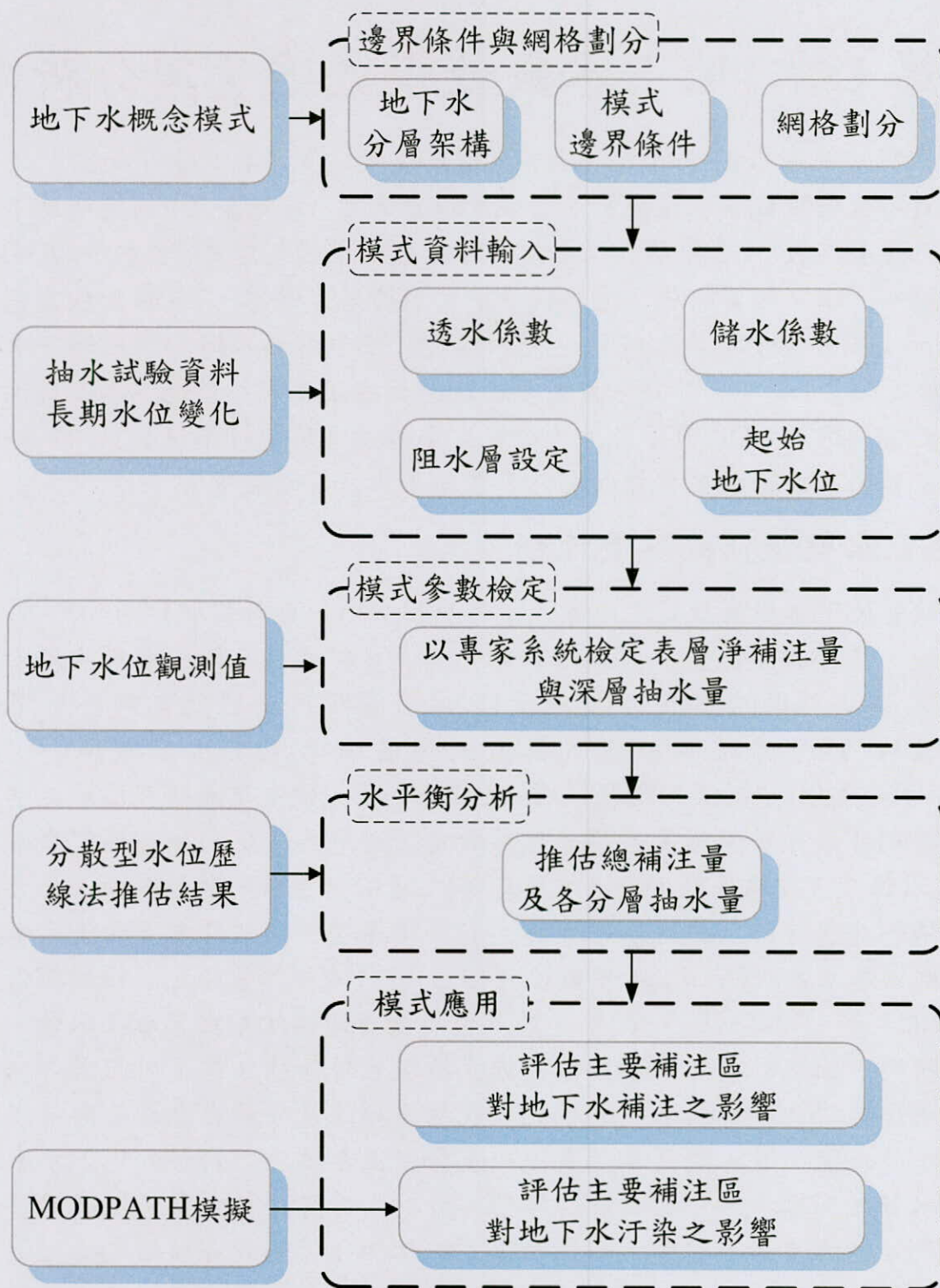


圖 7.1-1 地下水數值模式建置與應用流程示意圖

7.2 地下水數值模式建置

7.2.1 MODFLOW 簡介

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

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

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

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

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

7.2.2 邊界條件與格網劃分

一、水文地質與模式分層架構

MODFLOW 模擬的設定上，可將含水層型態設定為拘限含水層或非拘限含水層，並需輸入各分層之上部和底部之高程值。本計劃參考中央地質調查所於民國 88 年出版之「台灣地區地下水觀測網第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告」，以濁水溪沖積扇 72 站地層柱狀圖，完成平原地區水文地質剖面一至十二(深度至 300 公尺左右)，再依據丘陵及河谷區之 8 站地層柱狀圖，繪製水文地質剖面十三至十五(深度約達 250 公尺左右)，劃分出濁水溪沖積扇概念分層，依深度分別為含水層 1、阻水層 1、含水層 2、阻水層 2、含水層 3、阻水層 3 及含水層 4，濁水溪沖積扇模式共分為第 1 至 4 分層，如圖 7.2-1 所示。本章將含水層 1 視為表層含水層，含水層 2 二以下含水層視為深層含水層。並由於含水層 4 之觀測井數量較少，僅有 11 口主要分布於沖積扇扇尾區域，不足以提供建模所需資料，因此本計畫不將含水層四納入模擬範圍。

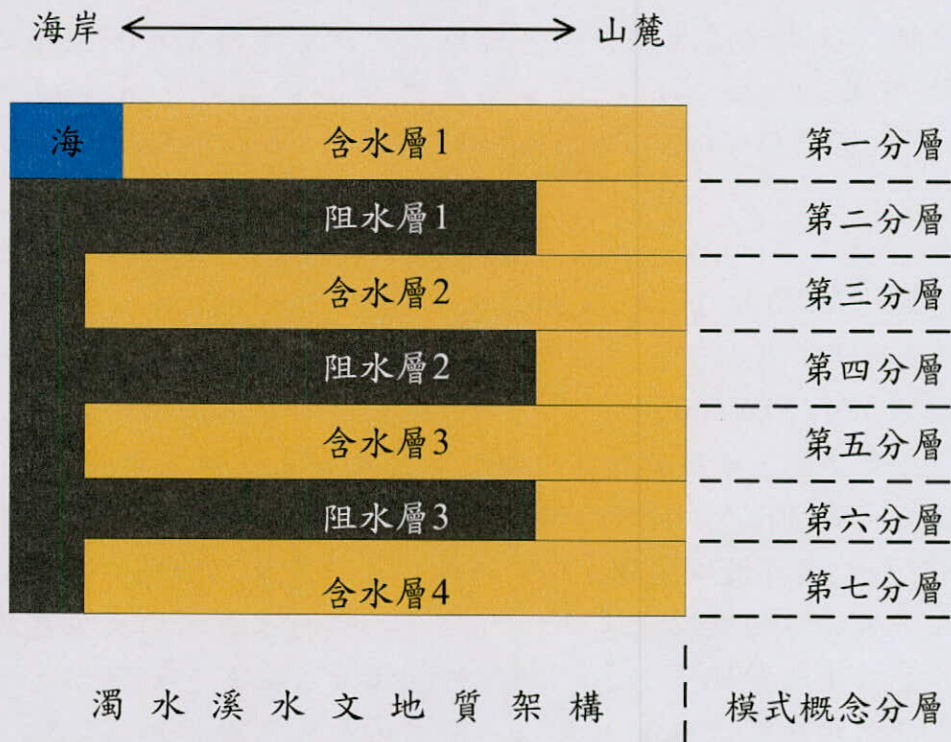


圖 7.2-1 濁水溪沖積扇概念分層

變小，然而並未尖滅，因此無實體之阻隔為界，然而從地下水流網分布型態，顯示 BC 段與地下水流線大致平行，於本身即可認定為一條流線，故亦屬於零流邊界。海岸附近之洩降錐，其在邊界南北之形狀及大小若相當，則不影響零流邊界之假設。

c. CD 段

此段為含水層尖滅封閉於阻水層之位置，屬於零流邊界。

d. DEF 段

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

e. FG 段

本段邊界大致與地下水等水位線平行，隨時間之不同水位有昇降變化。

f. GA 段

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

綜合上述環境特性，本計畫模式格網以 1 公里乘 1 公里之格網建構，南北方向 85 列與東西方向 75 行，共五層格網。而邊界條件設定於 MODFLOW 模式中，東部之八卦山地區有八卦山背斜，斗六丘陵有內林背斜及斷層經過，以此為東邊邊界，且設為零流量之邊界條件。北部邊界為烏溪，南部邊界為北港溪，各層皆為零流量之邊界，模擬區域如圖 7.2-3 所示。西邊含水層一以海岸線向外延伸兩公里設為定水頭邊界，如圖 7.2-4 所示，其餘含水層延伸 5 公里後尖滅，設為零流量之邊界條件，如圖 7.2-5 所示。圖中藍色網格為定水頭邊界，灰色網格為零流量。圖 7.2-6 所示 AA' 為剖面圖，水平向長度為垂向長度 30 倍。



圖 7.2-3 濁水溪沖積扇之模擬範圍

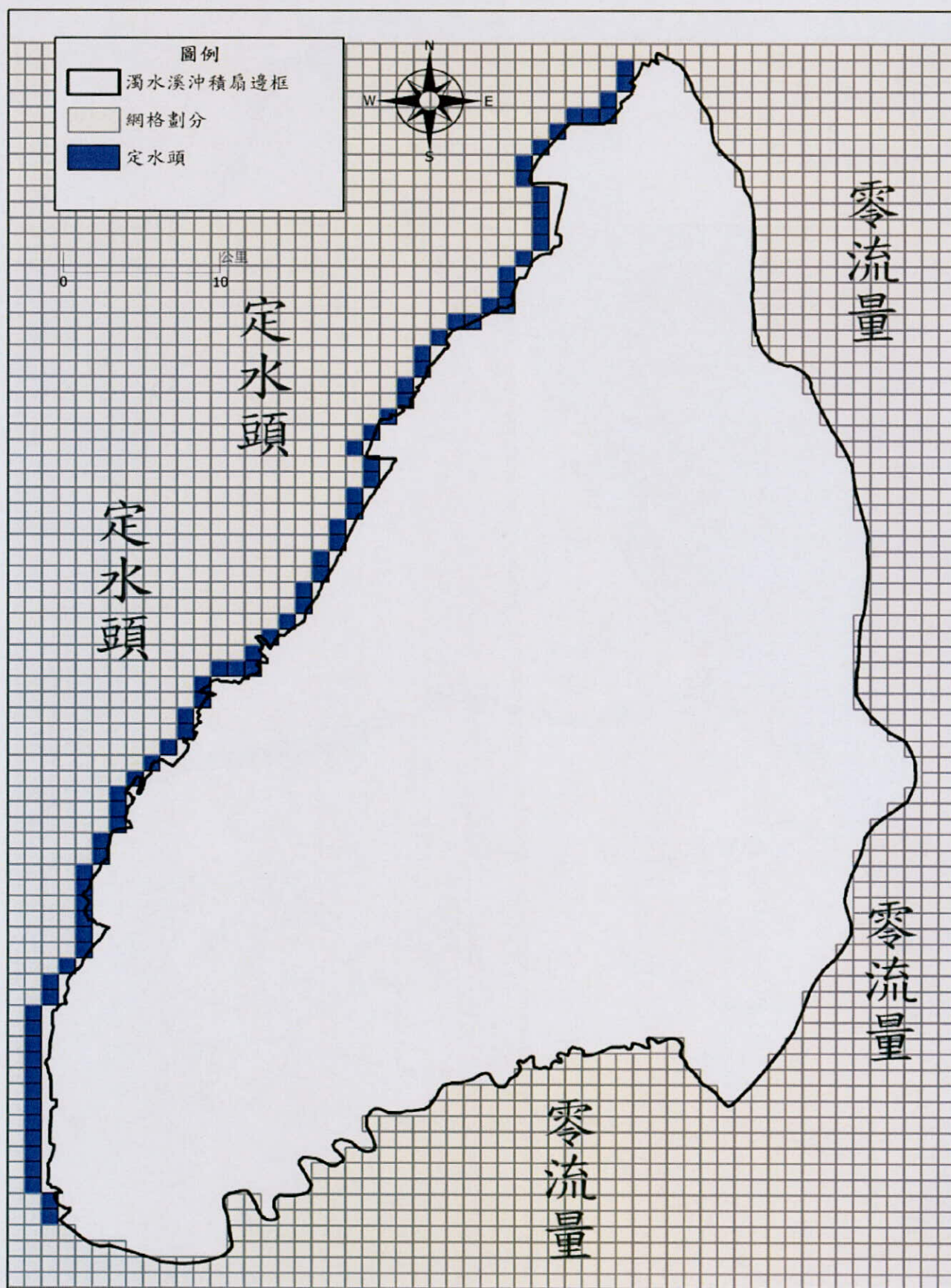


圖 7.2-4 濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網與邊界條件

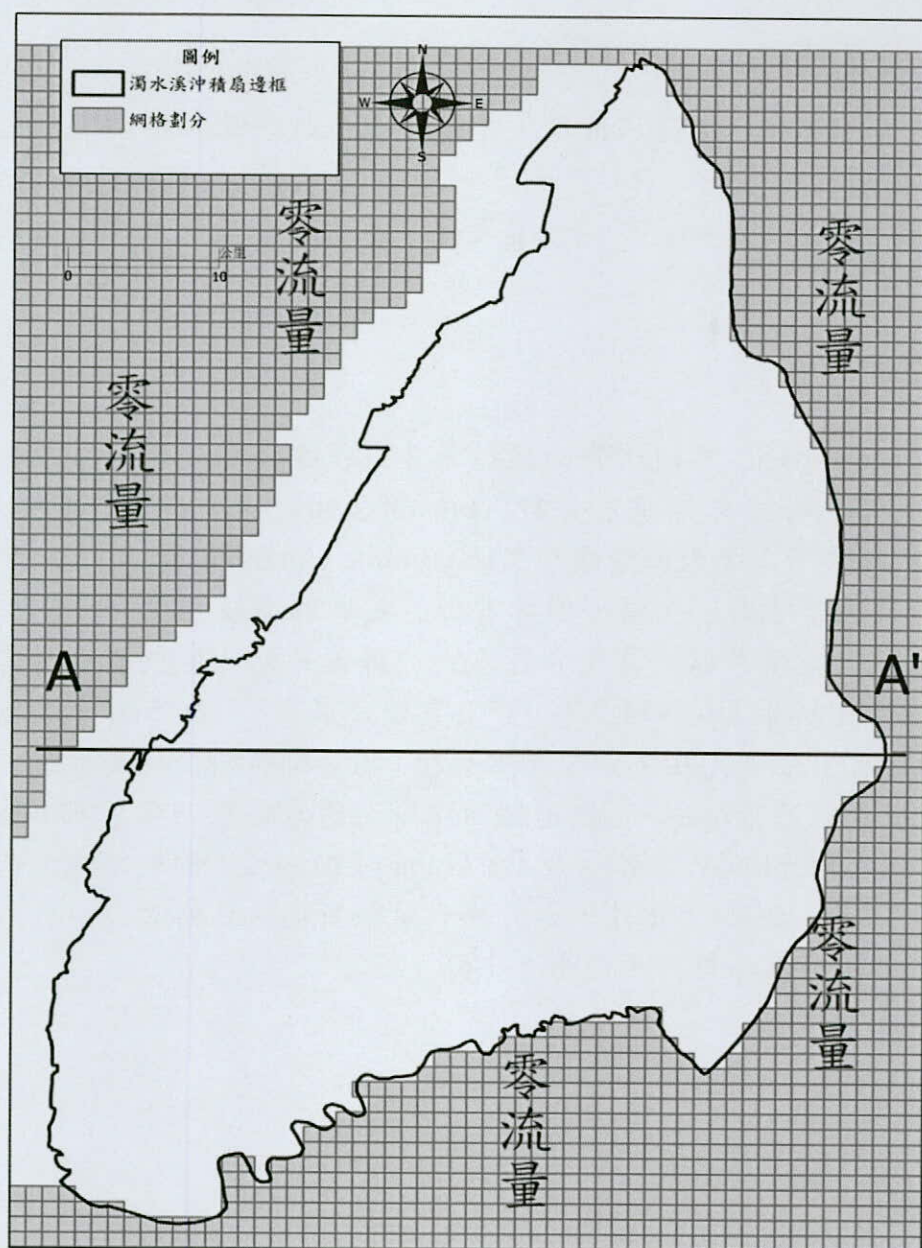


圖 7.2-5 濁水溪沖積扇模式第 2~7 分層格網與邊界條件

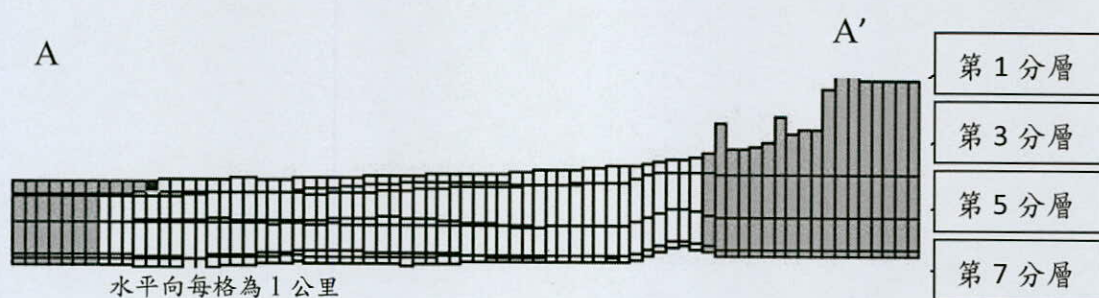


圖 7.2-6 濁水溪沖積扇模式 AA' 段剖面圖

7.2.3 模式資料輸入

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

一、透水係數

觀測站網建置時，各觀測井必進行單井或複井抽水試驗，因此幾乎各觀測井於不同含水層均擁有其導水係數(Transmissivity, T 值)現地試驗值，但因 MODFLOW 模式所需參數為透水係數(Hydraulic Conductivity, K 值)，因此本計劃以台灣地區地下水觀測網第一期計畫所得之導水係數，再除以含水層厚度(b)求得透水係數，後續再以徐昇氏分區方式，將各井點之參數值作為其對應徐昇氏分區之參數值，圖 7.2-7~圖 7.2-9 分別為模式第 1、3 及 5 分層之徐昇氏分區圖。而概念分層中之第 2 及 4 分層為阻水層，其分布範圍位於濁水溪沖積扇中、下游區域，模式於沖積扇中、下游區域阻水層之透水係數乃參考 Fundamentals of Ground Water (Franklin W. Schwartz and Hubao Zhang, 2003)中建議之值域，在此設定為 4×10^{-3} (公尺/天)。此外，由於抽水試驗所得結果為水平向之透水係數，故在此假設垂向透水係數為水平向之 1/50。



圖 7.2-7 含水層一徐昇式分區



圖 7.2-8 含水層二徐昇式分區



圖 7.2-9 含水層三徐昇式分區

二、儲水係數

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

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

三、阻水層設定

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

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

四、起始地下水水位

對於暫態模式而言，初始地下水水位代表模式之初始條件，不同初始條件影響模擬結果極巨，因此應選取適當之初始水位以得到較佳之模擬結果。本計畫建置之地下水系統模擬期距為 1998 年~2003 年、2005 年~2009 年，為月模擬，模擬起始時刻為西元 1998 年 1 月，因此以西元 1997 年 12 月之平均水位作為起始水位。

五、抽水量、補注量

由於現地抽水量資料較不完整，且地下水補注為未知，故本計畫將以專家系統(見 7.2.4 參數檢定方法) 檢定淺層淨補注量與深層抽水量，再結合分散型地下水歷線法之分析成果分離淺層垂向補注量、淺層抽水量及流失量。

本計畫設定之模擬時刻長度為月，參數檢定之依據為各觀測井之月平均水

位，此外，本計畫採用徐昇氏法進行參數分區，以降低參數維度。

7.2.4 參數檢定方法

一、參數檢定變數說明

MODFLOW 三維地下水模式乃以有限差分法進行數值離散，其在空間離散上採用矩形網格，因此每一模擬網格皆為一六面體，如圖 7.2-10 所示，模式中各網格之每一面與其相鄰網格之流量，皆可以達西公式計算，因此當水位與透水係數已知時，六面體與四周網格之交換量(flux)即可求得。然而，若此網格位於含水層一時，其與地表接觸的面並無法以達西公式計算，該平面之水量進出乃藉由地表補注(Recharge)或是人為抽水進出該網格，因此本計畫在進行參數檢定時，於含水層一檢定所得之量值即為補注與抽水之綜合效應，無法拆開，因此本計畫定義含水層一所檢定之量值為淺層淨補注量(Net recharge)。在含水層一以下之各個網格，其內部水量進出網格之形式除了因與相鄰網格之水位差造成之交換量外，亦可透過源流(source)或沉流(sink)之形式進出網格，意即將水量以抽水井或補注井之形式取出或注入該網格，惟濁水溪沖積扇並無補注井，因此本計畫設定深層含水層(含水層一以下之含水層)僅能抽水而不能補注，故深層含水層檢定之量值即為抽水量。

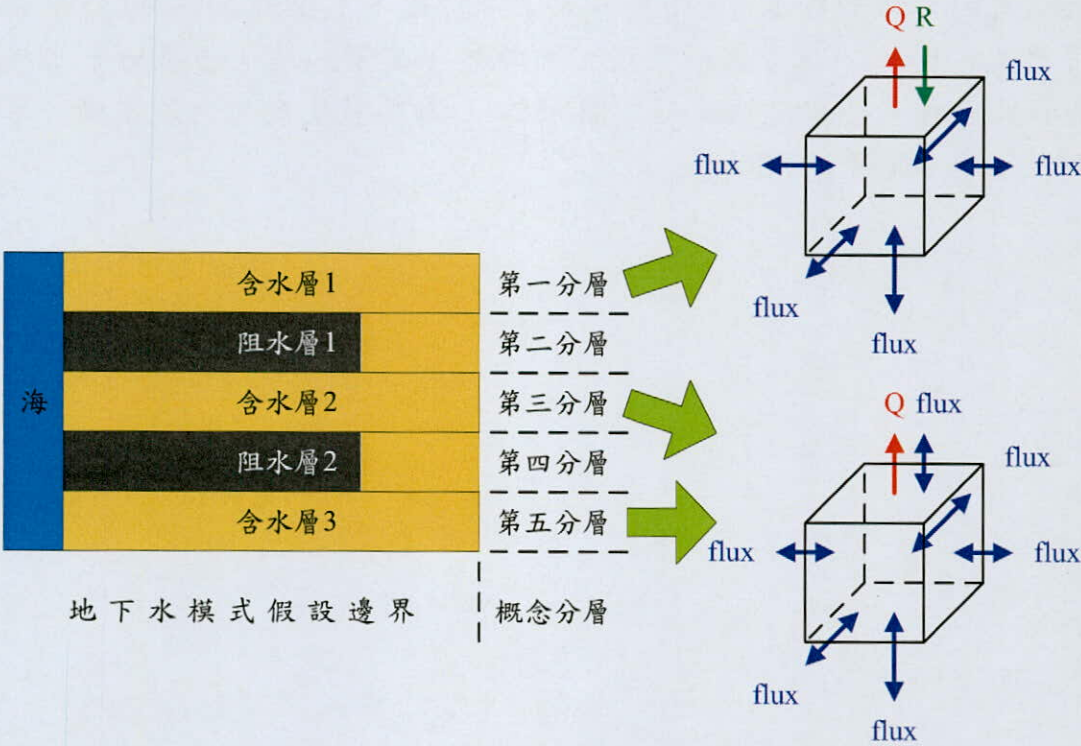


圖 7.2-10 地下水模式流量計算概念圖

二、參數檢定方法介紹

建立地下水模式之過程中，參數檢定乃必要的步驟，而一般的參數檢定方法可分為「人工參數檢定」與「自動參數檢定」。人工參數檢定以試誤法推估參數，過程不但複雜、冗長，且需要花費許多時間，進行檢定的人員除了需具備相關地下水知識外，亦須具有相當之參數檢定經驗與技巧。此外，如何將一位專家的參數檢定知識轉移給其他需進行人工參數檢定之人員亦是一大問題。人工參數檢定雖有上述缺點，惟其在進行參數推估過程中，人與模式不斷互動，因此人工參數檢定雖然繁瑣且費時費工，但檢定本身除了可對問題有更深入的了解外，若檢定者若是一個有經驗的專家，其結果往往較不易發生悖離現地物理特性的情形。

自動化參數檢定通常是將地下水模式結合優選法來進行檢定，雖然可免去人工參數檢定的煩瑣，但使用者難以參與參數變動過程，往往只能被動的接受最後的檢定結果，而因為地下水模式甚至優選模式本身，因受限於參數之維度數目，往往對問題本身有相當程度的簡化，使得自動參數檢定所得之結果亦可能產生不合理的狀況。

本計畫採用專家系統進行參數檢定，期能在保有自動化參數優選檢定的快速及方便的同時，亦能保有人工參數檢定之彈性，並能累積整合專家之經驗，使得參數檢定的工作更易進行。由於專家系統與地下水模擬 MODFLOW 系統之資料使用格式不同，必須透過檔案格式之轉換，使濁水溪沖積扇地下水模式之資訊，能在此兩種系統中流通使用。圖 7.2-11 為參數檢定之系統架構，可瞭解資訊在兩種系統中傳遞的情形。

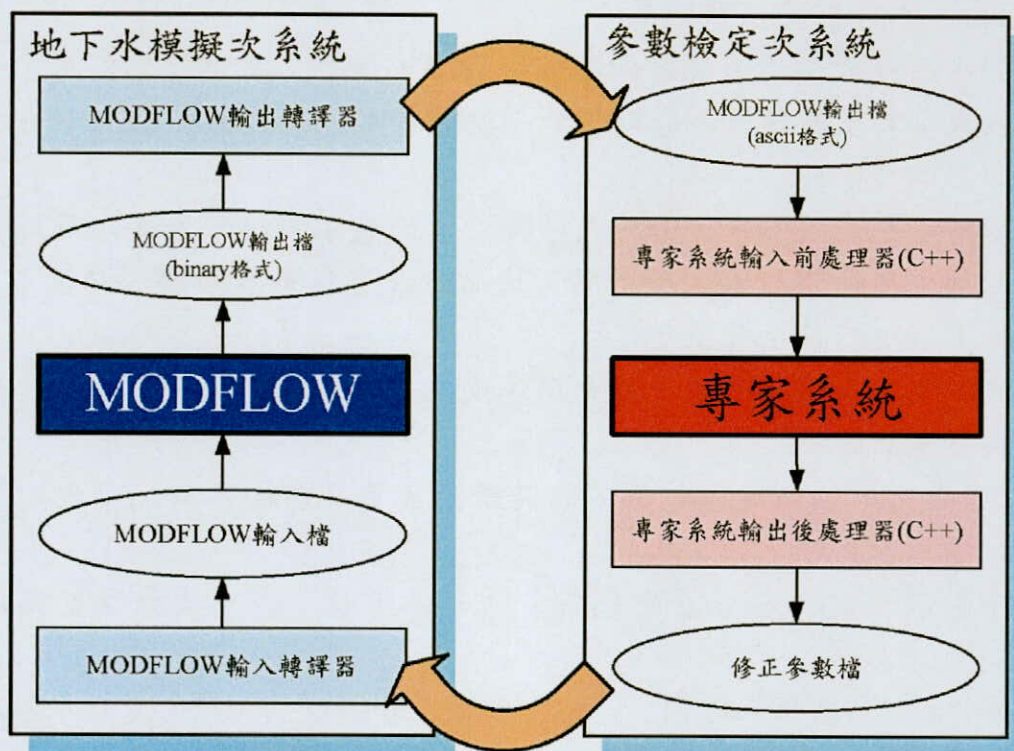


圖 7.2-11 地下水參數檢定系統架構圖

三、專家系統介紹

專家系統為一模仿人類專家且具有決策能力的智慧型電腦系統，本計畫採用 CLIPS(C Language Integrated Production System)建立地下水模式參數檢定專家系統，CLIPS 為一方便採用物件導向概念，用以建立專家系統之工具。在本計畫中，地下水模式以分區為概念進行參數檢定，一個分區即為一個物件，在 CLIPS 中則以建立實例(instance)的方式應用物件導向概念。在每個實例(物件)中，則有若干屬性(slot)代表各分區的特性，如水力傳導係數值、所在分層、淨補注量或抽水量、模擬水位與觀測水位誤差及各種參數調整依據。

建立之專家系統，乃將熟悉地下水模式參數檢定之專家所具有之經驗及知識，轉換成規則(Rule)並將之存放於知識庫(Knowledge Base)中，當專家系統對地下水模式進行參數檢定時，將依據所輸入之情況並透過推理機(Inference Engine)，以知識庫內之規則進行規則推論(Rule Inference)，其推理結果即為所輸入問題之答案。

四、知識庫之規則建立

在建立專家系統之前，必須先擷取參數檢定之經驗及知識。對於地下水參

數檢定之經驗，本計劃整理歸納為：

- a. 一般地下水流模式中，由於受到流線的影響，使得上游進行調整時，會對下游影響較大；而下游進行調整時，對上游影響較小。因此模式大多會從上游開始往下游調整。
- b. 在多層地下水模式檢定中，由於表層補注量的大小對於下層含水層抽水量有顯著的影響，因此進行人工檢定時，通常會先進行表層抽水、補注量檢定，再依序往下層進行抽水量檢定。
- c. 在人工檢定地下水模式時，通常會以迭代方式來回調整各分區參數，使各區之檢定誤差逐漸縮小。

基於上述概念，經由反覆測試，將其歸納成更具體的參數調整原則，詳細說明如下所示：

- a. 在進行參數調整前，各分區應先設定初始修正量，作為參數調整幅度之基準。
- b. 開始調整時，需判別修正方向。當觀測水位大於模擬水位時，往正方向調整，即增加水量；當觀測水位小於模擬水位時，往負方向調整，此時應減少水量。
- c. 判別修正方向後，接著應判斷修正量，其判斷方法為比較本次檢定與上次檢定時之修正方向。若修正方向相同，表示參數修正持續向同方向進行，則修正量不變；若修正方向相反，表示參數調整震盪，則修正量減半。
- d. 經多次調整後，參數修正量會逐漸縮小，然而因多分區同時進行調整，各分區會受相鄰分區影響，可能使得調整量縮小過快，造成檢定速度趨緩，若此時，各分區之最大誤差仍大於容許誤差，則將各分區調整量設定為同時放大一定倍數。

五、參數檢定流程

利用專家系統進行參數檢定流程如圖 7.2-12 所示，在參數檢定開始後，系統首先初始化參數值，即淨補注量及抽水量，並讀入相關參數的設定資訊，如分區設定、觀測井位置、觀測水位等。在完成初始參數設定後，接著執行地下水模式 MODFLOW，獲得各個時刻之模擬地下水位，下一步則判斷第一個時刻各分區之觀測水位與模擬水位之誤差(以下稱為檢定誤差)是否均小於容許誤差，本計畫以 2 公尺為容許誤差。

當有一分區之檢定誤差超過容許誤差，則會取出各分區的相關資訊，傳入專家系統進行推論分析。專家系統依據知識庫中之規則集合(Rules)，並搭配推理機(Inference engine)之運作，而推論出各區的參數修正量。當各區待檢定之參數，由專家系統分析出修正量後，再將各修正量依據 MODFLOW 輸入檔格式，

對 MODFLOW 輸入檔進行更新。接著再次執行 MODFLOW，計算出更新參數後的模擬地下水位，再次判斷第一個時刻各分區檢定誤差是否均小於容許誤差，若是則進入下一個時刻的參數檢定，若否則反覆執行上述步驟，直至該時刻所有分區檢定誤差均小於容許誤差。當所有時刻的各分區檢定誤差均小於容許誤差，則完成參數檢定的流程。

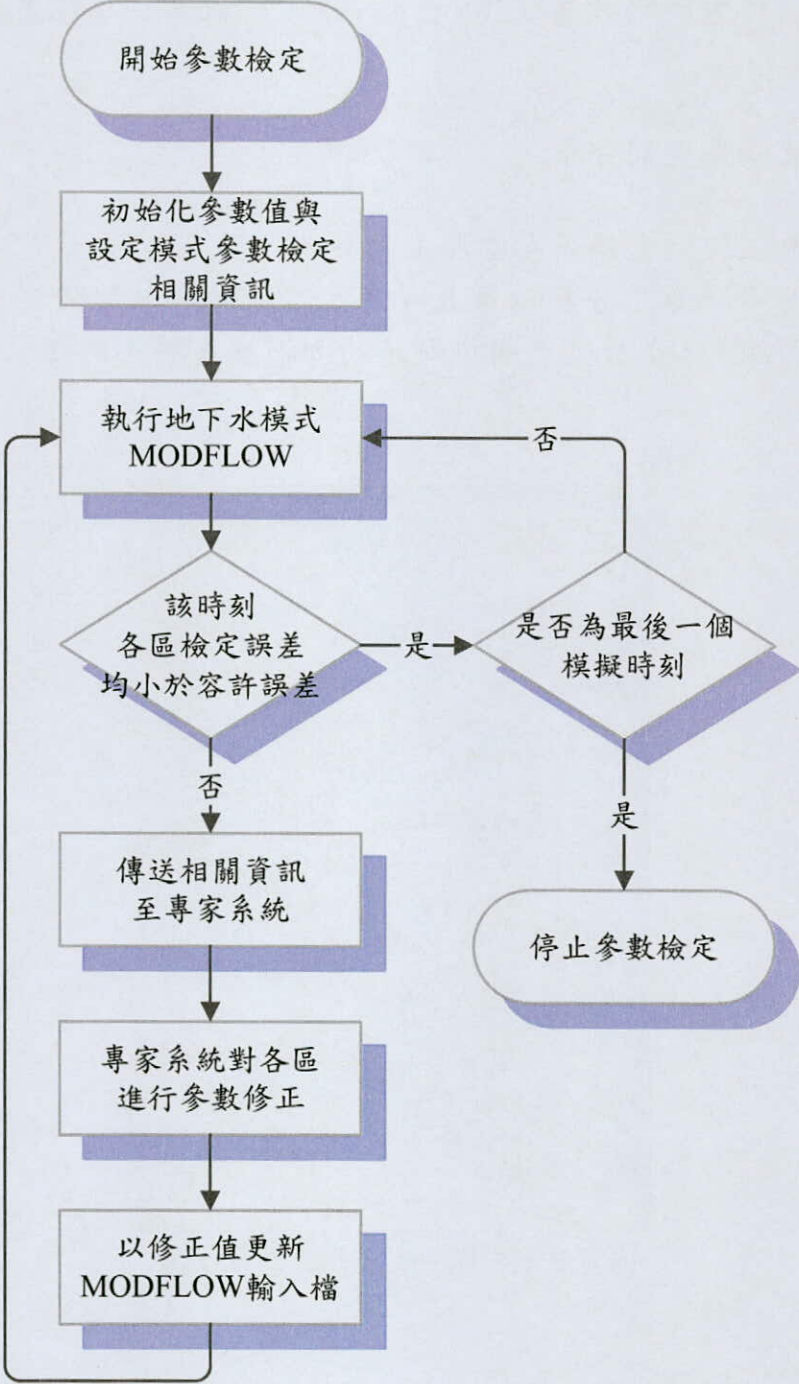


圖 7.2-12 參數檢定流程

7.2.5 檢定誤差統計分析

本暫態模式模擬設定一時刻長度為一個月，以西元 1998 年至西元 2003 年、西元 2005 年至西元 2009 年濁水溪沖積扇各觀測井之月平均水位，作為暫態模式各時刻之參照水位，設定各分區最大容許誤差值為 2 公尺進行參數檢定，檢定後全區全時刻均方根誤差為 0.385 公尺，以下將以各分層誤差空間分布及誤差統計進行說明。

一、檢定成果之誤差空間分布

此部份主要呈現檢定誤差在空間上的分佈。圖 7.2-13 ~ 7.2-15 分別為濁水溪沖積扇第一分層、第三分層與第五分層各時刻所有模擬值之均方根誤差等值圖，等值線的間距為 0.1 公尺。圖中顯示均方根誤差皆小於 1.5 公尺，檢定成果良好。

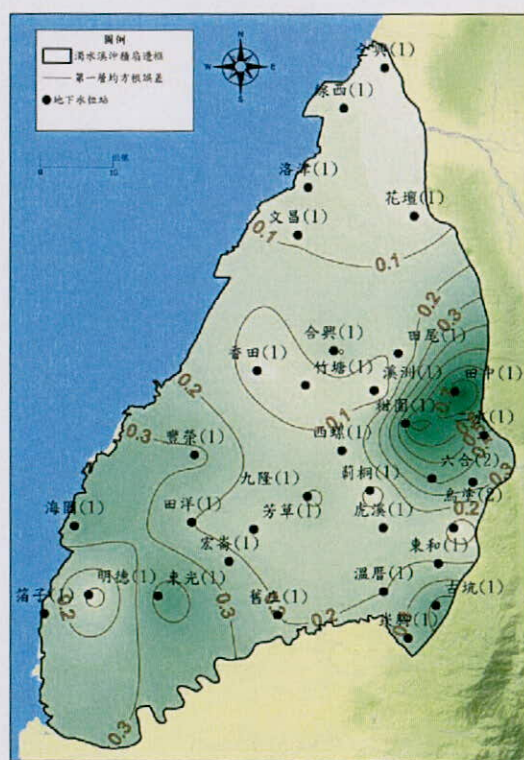


圖 7.2-13 第一分層誤差均方根

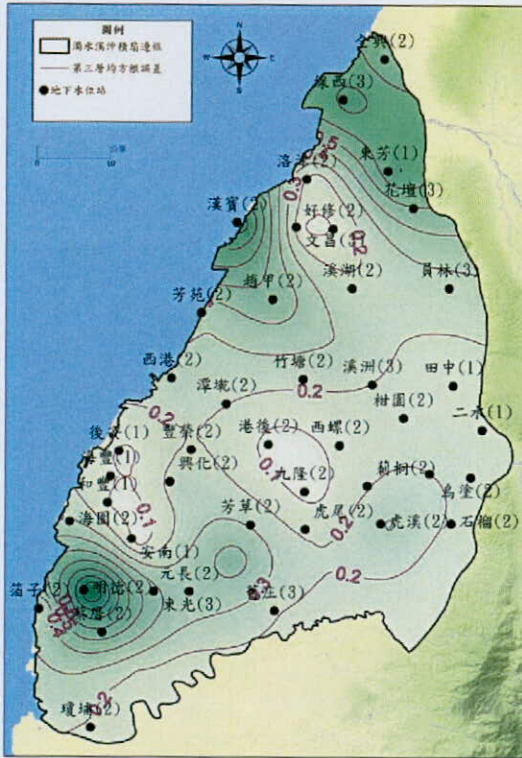


圖 7.2-14 第三分層誤差均方根

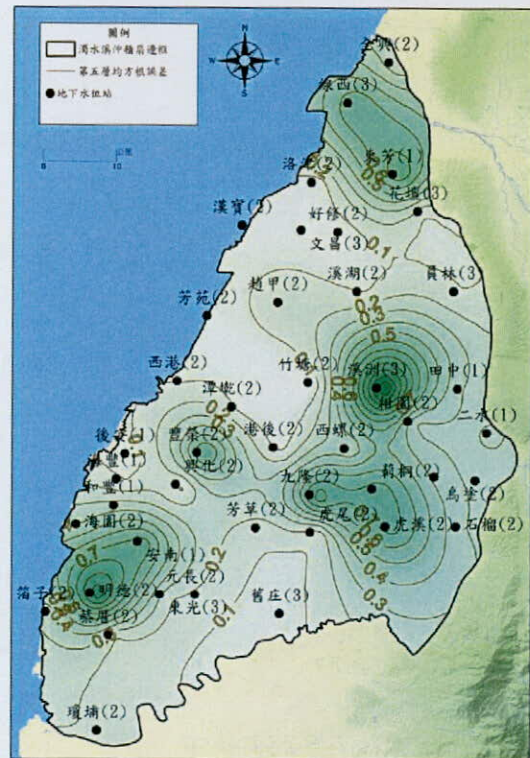


圖 7.2-15 第五分層誤差均方根

二、檢定成果之誤差時間分布

此部份主要呈現檢定誤差在時間上的分佈。將各月份均方根誤差依時間排序，如圖 7.2-16 所示。圖中均方根誤差最大值為 0.579 公尺，最小值為 0.282 公尺，其均方根誤差均在 0.28-0.58 公尺之間，顯示檢定成效良好，檢定誤差皆能維持在一定區間內。

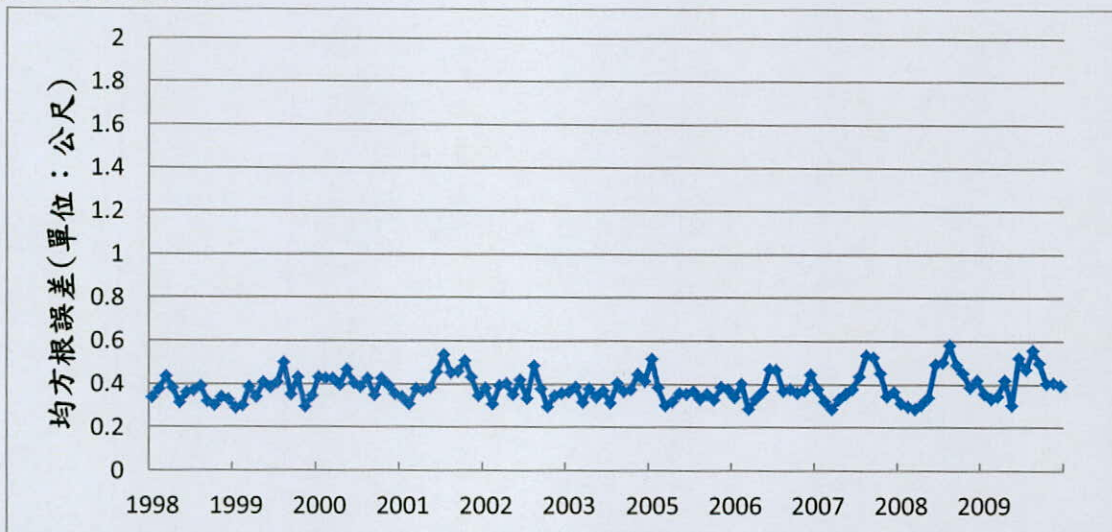


圖 7.2-16 各月份均方根誤差變化圖(1998-2003、2005-2009)

三、檢定成果之誤差統計

將 1998 - 2003 年、2005 - 2009 年所有模擬誤差以 0.4 公尺為誤差區間進行統計，並將此結果繪製成誤差主體圖，如圖 7.2-17 所示，由圖可知約 83% 的誤差在 -0.4 公尺與 +0.4 公尺之間，檢定成果良好。

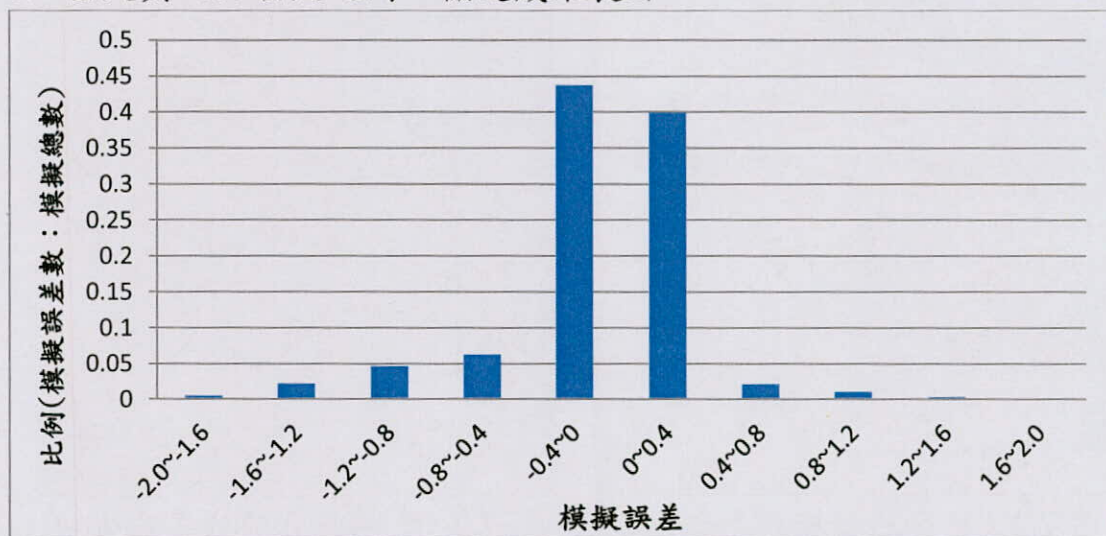


圖 7.2-17 模擬水位誤差主體圖(1998-2003、2005-2009)

7.3 區域水平衡分析

本節說明由模式檢定所得之表層淨補注量、含水層二抽水量、含水層三抽水量及海岸淨流入量，如表 7.3-1 所示。

表 7.3-1 模式檢定所得參數

年分	第一層(F1) 淨補注量	第三層(F2) 抽水量	第五層(F3) 抽水量	海岸 淨流入
1998	5.87	3.17	2.15	0.12
1999	4.86	3.12	2.25	0.21
2000	5.22	3.59	2.35	0.21
2001	6.04	3.09	2.26	0.15
2002	2.99	3.32	2.36	0.26
2003	3.75	3.36	2.35	0.30
2005	6.77	2.82	2.28	0.07
2006	6.08	3.26	2.47	0.10
2007	6.86	3.18	2.27	0.03
2008	4.69	2.93	2.25	0.20
2009	3.27	3.33	2.27	0.20
平均	5.13	3.20	2.30	0.17

(單位：億噸/年)

由表可知，第一含水層之淨補注量值約介於 2.99~6.86 億噸之間，年平均約為 5.13 億噸；第二含水層之抽水量值約介於 2.82~3.59 億噸之間，年平均約為 3.20 億噸，第三含水層之抽水量值約介於 2.15~2.47 億噸之間，年平均約為 2.30 億噸，海岸淨流入量值約介於 0.07~0.30 億噸之間，年平均約為 0.17 億噸。以上歸納可得深層抽水量與海岸淨流入量皆屬相對穩定之量值，而含水層一之淨補注量則變化幅度較大。由於本計畫在含水層一所檢定之量值為淨補注量，而此淨補注量為垂向補注量、第一層抽水量及流失量之總和，若要分離出此三個量值，則需以前一章所提之分散型地下水歷線法輔助推求，此部分將於後續文章說明。

為說明如何以分散型地下水歷線法與數值模式計算含水層一之補注量、抽水量與流失量，本計畫將先說明原始地下水系統水平衡所需考量之各主要分量，接著說明分散型地下水歷線法與數值模式之簡化系統，並說明如何以兩方法之分析成果換算出原始系統之各分量值，再對各分量進行統計分析。

首先介紹地下水系統之各項分量，如圖 7.3-1 所示，一般台灣平原區地下水系統之水量進出可分為垂向補注量、山邊側流量、沿海流入量、各含水層抽水量及流失量，由這些分量及相應之蓄水變化量達成系統水平衡。其中垂向補注量為降雨及地表逕流入滲地下水之補注；山邊側流量為由斷層側向流入之補注；沿海流入量為海水流入地下水之水量；各含水層抽水量為地下水各分層之人工

抽水；流失量如地下水由河川之出滲量及出滲至地表之自流量。

分散型地下水歷線法與數值模式因其計算分析之原理與假設不同，故兩者之地下水系統需進行相當程度之簡化，以下將分別說明之。圖 7.3-2 為分散型地下水歷線法之系統概念圖，其系統分量包含垂向補注量、抽水量、邊界交換量及儲蓄改變量，其中，抽水量則為各含水層之抽水量總和，邊界交換量則為沿海流入量、山邊側流量與流失量之總和。而數值模式之系統概念圖如圖 7.3-3 所示，其系統分量可分為沿海流入量、山邊側流量、淺層淨補注量、深層抽水量(含水層二及含水層三之抽水量)及儲蓄改變量，其中淨補注量為垂向補注量、含水層一之抽水量及流失量總和。上述兩種方法因原理與假設不同而對原地下水系統各有所簡化，難以單一方法求得地下水系統之各分量，因此本計畫以此兩方法之成果，換算出地下水系統之各分量值，換算公式說明如下：

分散型地下水歷線法之邊界交換量(B_h)為沿海流入量、山邊側流量及流失量之總和，其中模式將山邊側流量合併至表層淨補注量，為避免流量重複計算，乃設定本模式無山邊側流量；而沿海流入量則可由模式求得，因此經過換算後可求得流失量，如式(7.3-1)所示。

分散型地下水歷線法之抽水量則為各分層抽水量之總和，而含水層二與含水層三之抽水量可由模式求得，因此可以換算出含水層一之抽水量，如式(7.3-2)所示。

模式檢定之淨補注量則為垂向補注量、含水層一抽水量及流失量之總和，而流失量與含水層一之抽水量已由式(7.3-1)與式(7.3-2)求得，因此可換算出垂向補注量，如式(7.3-3)所示。

$$B_h = COAST_m + FAULT_m + LOSS \dots\dots\dots (式 7.3-1)$$

B_h = 邊界交換量，下標 h 代表由地下水歷線法取得

$COAST_m$ = 沿海流入量，下標 m 代表由數值模式取得

$FAULT_m$ = 山邊側流量，下標 m 代表由數值模式取得

$LOSS$ = 流失量

$$PUMP_h = PF2_m + PF3_m + PF1 \dots\dots\dots (式 7.3-2)$$

$PUMP_h$ = 抽水量，下標 h 代表由地下水歷線法取得

$PF2_m$ = 含水層二(F2)抽水量，下標 m 代表由數值模式取得

$PF3_m$ = 含水層三(F3)抽水量，下標 m 代表由數值模式取得

$PF1$ = 含水層一(F1)抽水量

$$NET\ RECHARGE_m = LOSS + PF1 + RECHARGE \dots\dots\dots (式\ 7.3-3)$$

$NET\ RECHARGE_m$ = 淨補注量，下標 m 代表由數值模式取得

$LOSS$ = 流失量

$PF1$ = 含水層一(F1)抽水量

$RECHARGE$ = 垂向補注量

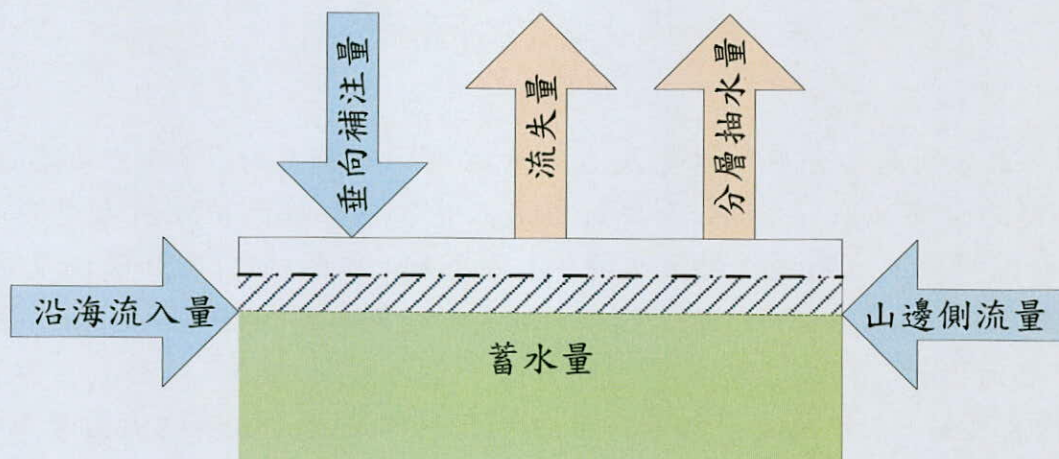


圖 7.3-1 進出地下水系統各項分量概念圖

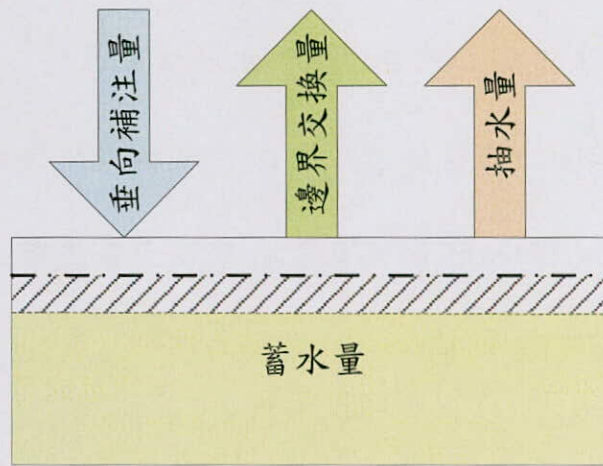


圖 7.3-2 分散型地下水歷線法水平衡概念圖

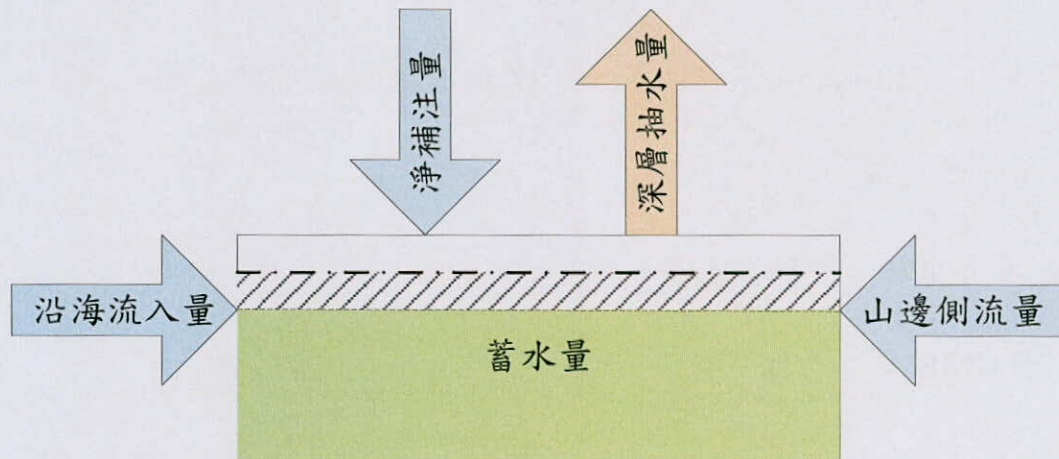


圖 7.3-3 數值模式水平衡概念圖

表 7.3-2 分別為各分層抽水量及流失量之統計結果，圖 7.3-4 則為各含水層抽水量之歷線分布。表 7.3-3 分別統計各流入量，包含垂向補注及海岸淨流入，圖 7.3-5 則說明地下水系統之補注來源，由圖可知，垂向補注(例如降雨及河川補注)為濁水溪沖積扇之主要補注來源。表 7.3-4 則統整各年份濁水溪沖積扇系統總流入量與總流出量，藉以分析各年份儲蓄改變量之變化趨勢。綜合表 7.3-2 至表 7.3-4 之結果可知，在系統流出之量值部分，12 年中之最大系統總流出量為 20.68 億噸，最小系統總流出量為 15.13 億噸，平均系統總流出量為 18.65 億噸；平均總抽水量為 12.58 億噸，平均流失量為 6.07 億噸。在系統流入之量值部分，12 年之最大系統總流入量為 21.35 億噸，最小系統總流入量為 13.47 億噸，平均系統總流入量為 18.45 億噸，平均垂向補注量為 18.28 億噸，平均海岸淨流入量為 0.17 億噸。

表 7.3-2 各分層抽水量與流失量

年分	第一層(F1)	第三層(F2)	第五層(F3)	流失量	總流出量
1998	6.47	3.17	2.15	8.89	20.68
1999	6.89	3.12	2.25	5.76	18.02
2000	6.93	3.59	2.35	5.71	18.58
2001	6.95	3.09	2.26	5.79	18.09
2002	7.69	3.32	2.36	4.27	17.64
2003	6.99	3.36	2.35	2.43	15.13
2005	7.44	2.82	2.28	6.45	18.99
2006	6.43	3.26	2.47	6.99	19.15
2007	6.70	3.18	2.27	6.43	18.58
2008	7.51	2.93	2.25	7.28	19.97
2009	7.85	3.33	2.27	6.79	20.24
平均	7.08	3.20	2.30	6.07	18.65

(單位：億噸/年)

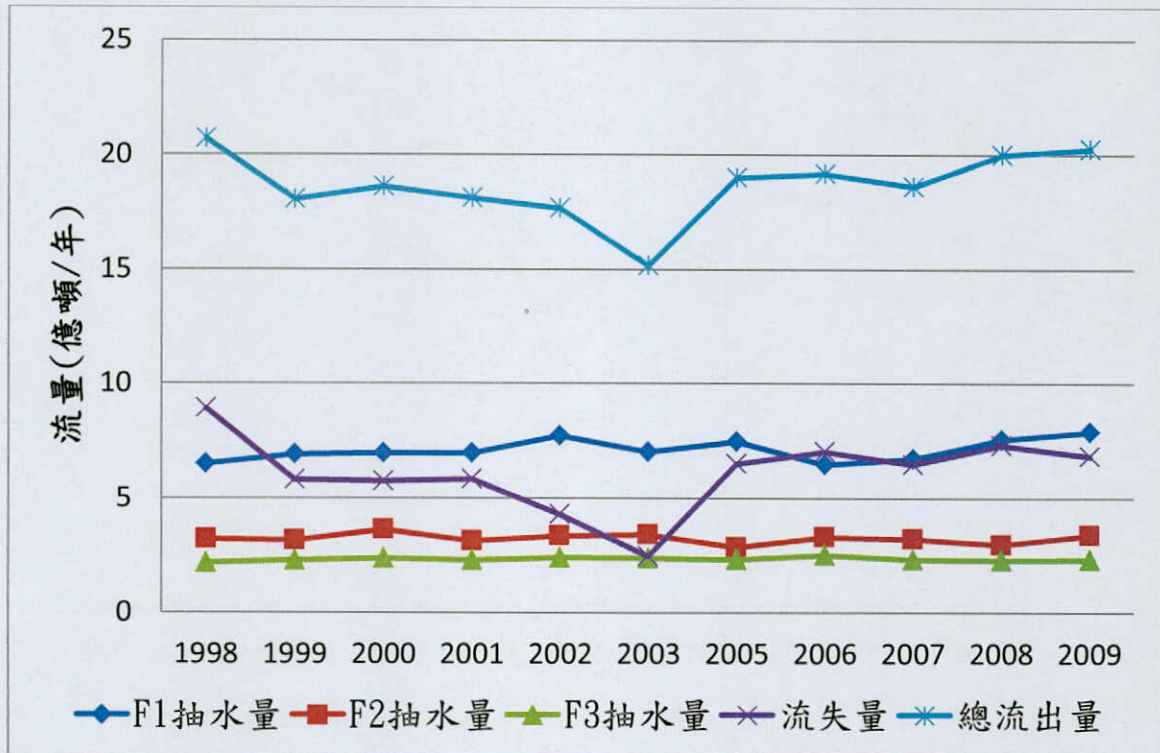


圖 7.3-4 濁水溪沖積扇年系統流出量

表 7.3-3 垂向補注與海岸淨流入量

年分	垂向補注	海岸淨流入	總流入量
1998	21.23	0.12	21.35
1999	17.51	0.21	17.72
2000	17.85	0.21	18.06
2001	18.77	0.15	18.92
2002	14.96	0.26	15.22
2003	13.17	0.30	13.47
2005	20.66	0.07	20.73
2006	19.50	0.10	19.60
2007	20.00	0.03	20.03
2008	19.48	0.20	19.68
2009	17.92	0.20	18.12
平均	18.28	0.17	18.45

(單位：億噸/年)

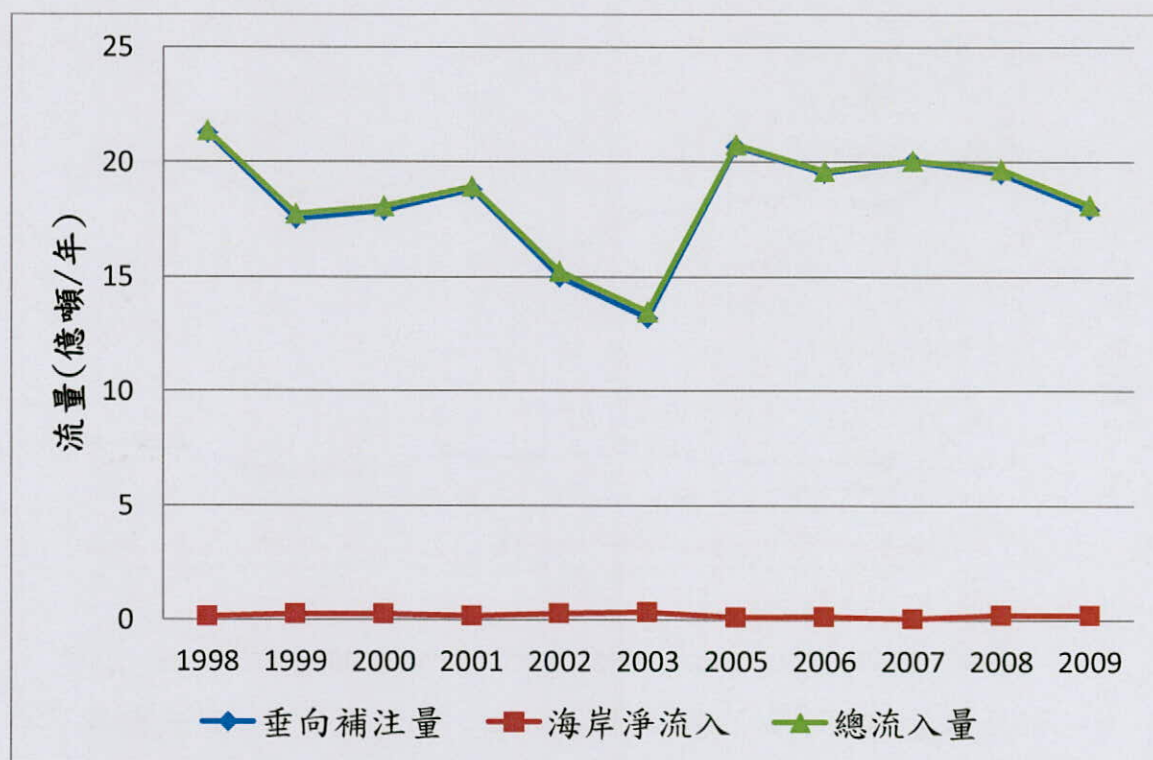


圖 7.3-5 濁水溪沖積扇年系統流入量

表 7.3-4 系統總流入量、總流出量與年儲蓄改變量

年分	系統總流入量	系統總流出量	年儲蓄改變量
1998	21.35	20.68	+0.67
1999	17.72	18.02	-0.30
2000	18.06	18.58	-0.52
2001	18.92	18.09	+0.83
2002	15.22	17.64	-2.42
2003	13.47	15.13	-1.66
2005	20.73	18.99	+1.74
2006	19.60	19.15	+0.45
2007	20.03	18.58	+1.45
2008	19.68	19.97	-0.29
2009	18.12	20.24	-2.12
平均	18.45	18.65	-0.20

(單位：億噸/年)

為觀察濁水溪沖積扇蓄水量之變化，本計畫將年儲蓄改變量依時間序列作圖，如圖 7.3-6 所示，由圖可知 2005 年增加量最大，儲蓄量增加 1.74 億噸；2002 年減少量最多，儲蓄量減少 2.42 億噸；再進一步觀察近 11 年間之累積儲蓄量，如圖 7.3-7 所示，以 1998 年為基準，設其累積儲蓄量為零，後續年分持續累加年儲蓄改變量。由圖可知，2001 年之蓄水量在 11 年間為最高，2003 年之蓄水量在 11 年間為最低，再將歷年累積儲蓄量與年雨量對比可發現，儲蓄改變量與當年及前一年降雨量有相當關係，當降雨量相較前一年驟減時，儲蓄量會大量減少，當降雨量持續維持在豐沛水準時，儲蓄量會持續增加，並至某一儲蓄量水準後幾乎持平。

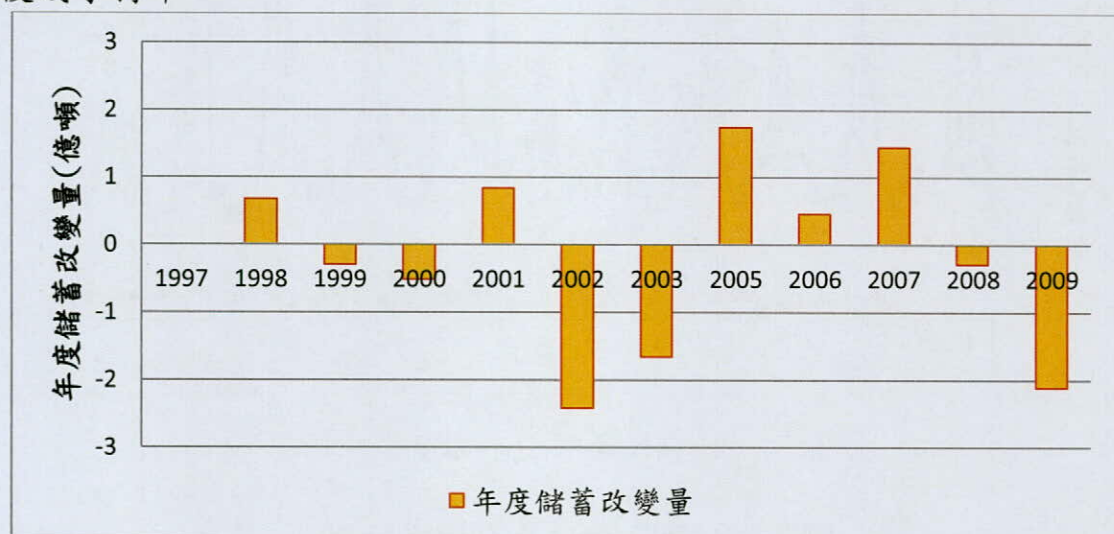


圖 7.3-6 濁水溪沖積扇年儲蓄改變量

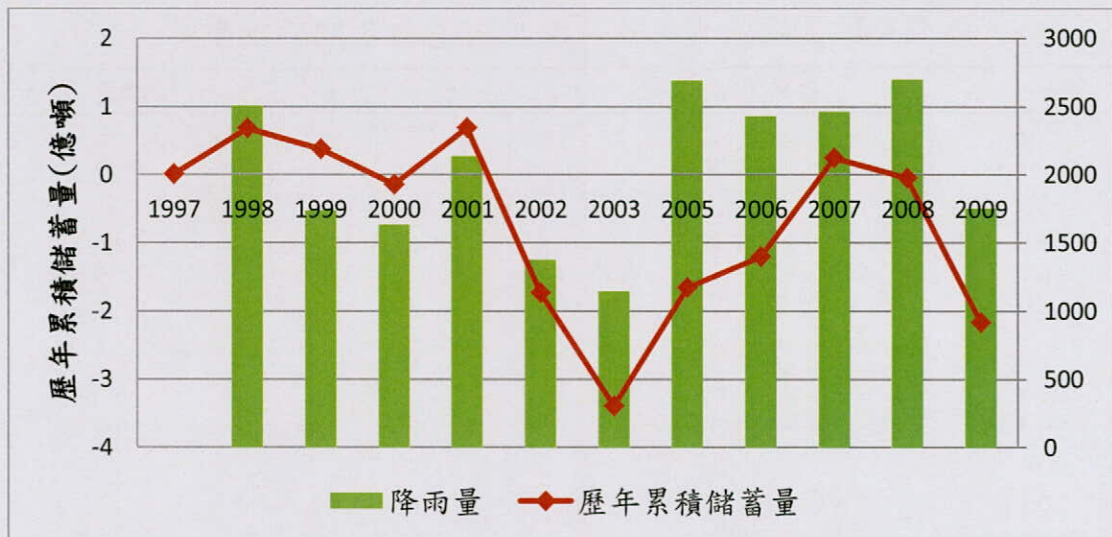


圖 7.3-7 濁水溪沖積扇歷年累積儲蓄量

圖 7.3-8 為補注量與抽水量隨時間變化關係圖，圖中顯示垂向補注量會隨雨季與旱季交替而有明顯變化，雨季時垂向補注量顯著增加，旱季時垂向補注量大減，而總抽水量變化較不明顯，雖流量有所增減，但均維持在一定區間內，隨時間推移，未有大幅度變動。

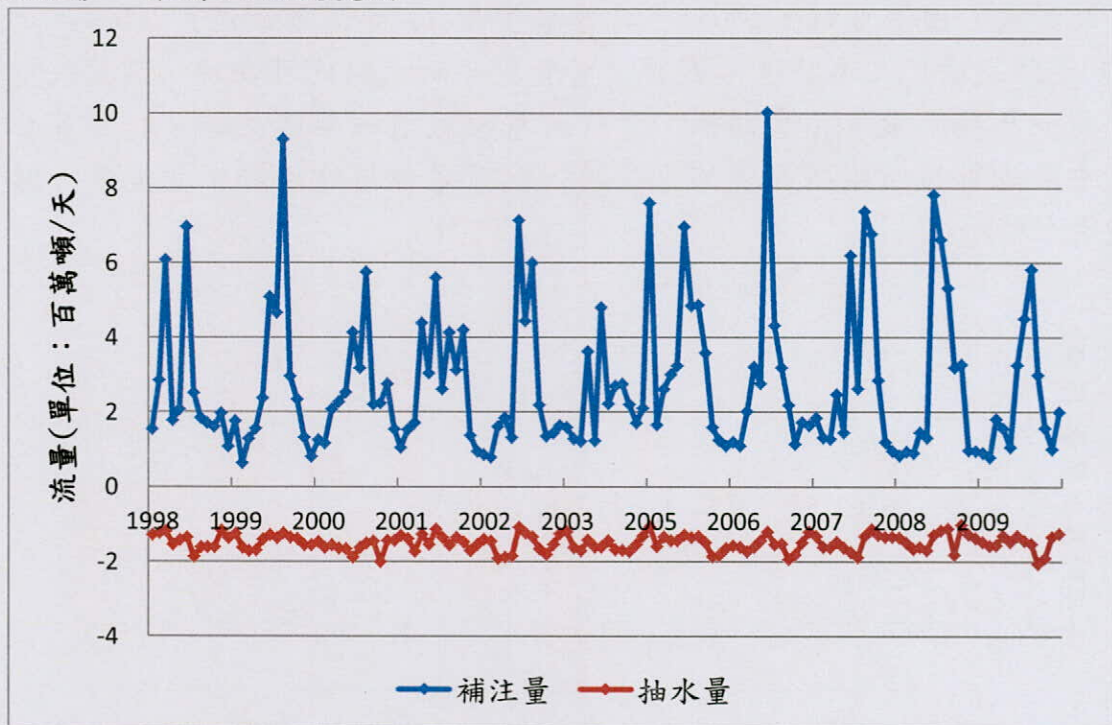


圖 7.3-8 補注量與抽水量變化圖

7.4 主要補注區對地下水資源影響分析

一、主要補注區對地下水系統補注之影響分析

為進一步了解主要補注區對整體地下水系統之補注影響程度，本計畫分別統計主要補注區之補注量與其所占整體補注量之百分比，表 7.4-1 為歷年濁水溪沖積扇垂向補注量與主要補注區垂向補注量所占百分比，由表可知，1998 年主要補注區之垂向補注量所占比例最高，約為 41.90%，而 2002 年主要補注區之垂向補注量所占比例最低，約為 35.35%。接著由表 7.4-2 分析，可再進一步探討主要補注區對整體地下水系統補注之重要性：濁水溪沖積扇總面積約 2079 平方公里，主要補注區面積約 200.18 平方公里，主要補注區面積占濁水溪沖積扇總面積 9.63%，而濁水溪沖積扇年平均垂向補注量為 18.28 億噸，主要補注區年平均垂向補注量為 7.16 億噸，因此可求得主要補注區之垂向補注量占整體垂向補注量之 39.19%。由此可知，若於主要補注區進行開發，導致地表透水性降低，將對濁水溪沖積扇之垂向補注造成相當程度之影響。

表 7.4-1 主要補注區補注量與整體補注量關係表

年分	濁水溪沖積扇 垂向補注量	主要補注區 垂向補注量	主要補注區 補注量百分比
1998	21.23	8.90	41.90
1999	17.51	6.28	35.86
2000	17.85	6.87	38.51
2001	18.77	7.01	37.34
2002	14.96	5.29	35.35
2003	13.17	5.29	40.15
2005	20.66	8.55	41.38
2006	19.50	7.64	39.16
2007	20.00	8.08	40.39
2008	19.48	8.03	41.24
2009	17.92	7.12	39.76
平均	18.28	7.16	39.19

(單位：億噸/年)

表 7.4-2 主要補注區面積及垂向補注量統計表

面積(km ²)		補注量(億噸/年)	
濁水溪沖積扇	2079	濁水溪沖積扇	18.28
主要補注區	200.18	主要補注區	7.16
百分比	9.63%	百分比	39.19%

二、主要補注區對地下水系統污染之影響分析

完成地下水數值模式建置後，可利用此模式搭配 MODPATH 污染傳輸模式，分析主要補注區受污染後，可能之影響範圍。MODPATH (Pollock, 1994)亦是由美國地質調查局(U.S.G.S)所開發，其為 MODFLOW 模式之後置處理程式，因其利用水流模式計算後之水頭分佈推算流場分佈，再以流場直接模擬污染質點之移動路徑(亦即僅考量傳流相, Advection term)，而質點流經範圍即為受污染範圍。因此 MODPATH 模擬不考慮污染物質於地下水中之擴散及土壤吸附力等效應，且模擬質點傳輸時，質點將隨水流移動且不影響流場(蔡英傑，2006;陳祐誠，2009)。以下說明應用 MODPATH 程式，評估主要補注區受污染後，污染質對各含水層之影響範圍，其說明如下：

為評估主要補注區受污染後對地下水資源之影響，本計畫應用穩態模式，於主要補注區內，各表層格網設定污染質點注入點，模擬期程為 100 年及 200 年，推估污染質點之可能傳輸範圍，模擬結果如圖 7.4-1 至圖 7.4-3 所示，分別繪出污染質點於含水層 1、2 與 3 之分布範圍。圖中紅線畫分區域為主要補注區，土黃色區域為 100 年後污染質點影響範圍，綠色區域則為 200 年後污染質點影響範圍，由圖可知部分污染質點停留於表層含水層(即含水層 1)，水平往香田與竹塘等扇尾區域傳輸。部分污染質點則先由表層含水層垂直進入深層含水層(即含水層二與三)，接著再水平向下游蔓延。200 年後，三層受污染之範圍分別佔整體面積之 22.2%，45.3%及 22.36%，其中又以以含水層二受污染面積最大，幾乎佔整體面積之一半(941km²)。

相對於屏東平原之水質污染影響評估結果，在濁水溪沖積扇第二含水層之污染範圍大於淺層含水層，原因在於濁水溪沖積扇中、下游區域阻水層包覆良好、結構完整，造成中、下游區域深層含水層水源需仰賴上游補注區供應，中、下游區域深層含水層極易產生超抽狀況而造成局部地下水位大幅下降，主要補注區之地表入滲量需提供更多的水量來補充中、下游深層含水層損失之水量，使得更多地下水流線流向中下游之深層含水層。因此補注區若無妥善管理地表污染情況，污染質點易於進入深層含水層，大面積影響深層含水層，如此一來將使深層含水層地下水的使用產生安全上之疑慮，因此建議應盡速完成主要補注區之保育規劃。

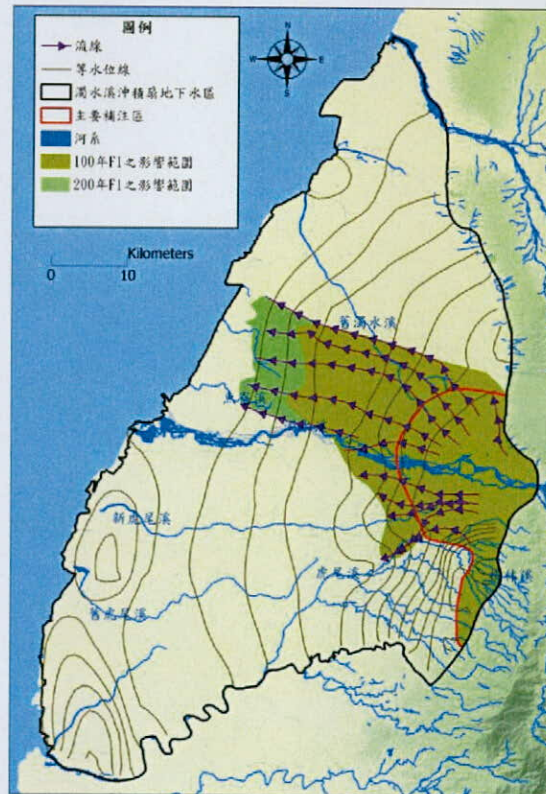


圖 7.4-1 污染物於含水層 1 之影響範圍

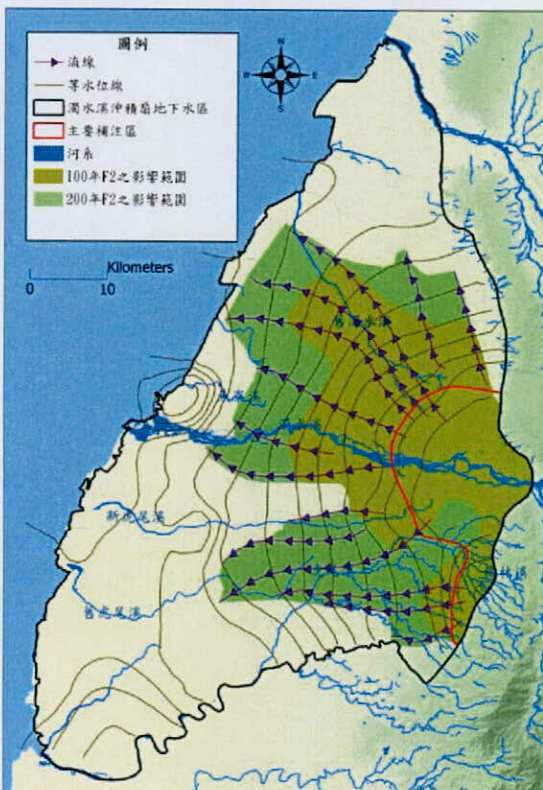


圖 7.4-2 污染物於含水層 2 之
影響範圍

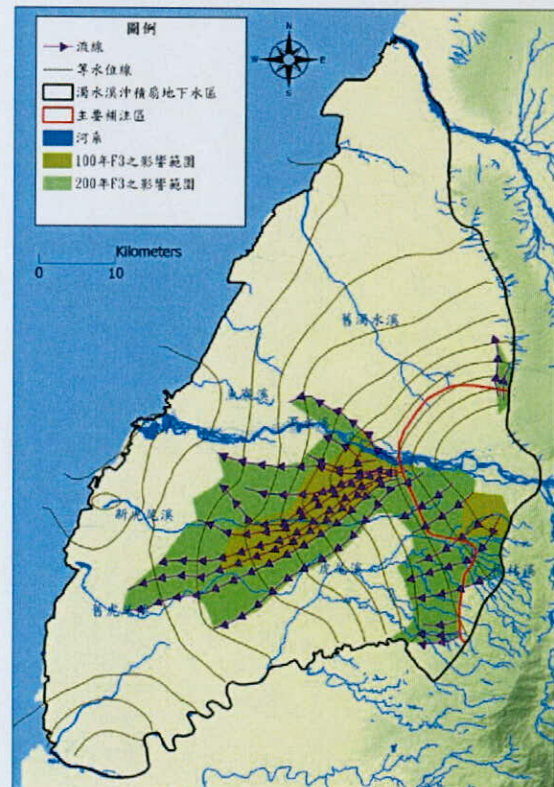


圖 7.4-3 污染物於含水層 3 之
影響範圍

結論與建議

濁水溪沖積扇相關研究於民國 98 年至 99 年完成，計畫主要成果在完成地下水主要補注區範圍建議、區域抽水量與補注量推估、現地補充調查試驗含地電阻調查與水質調查、數值模擬與水平衡分析等，相關結論與建議分述如下。

一、結論

(一) 主要補注區劃定

本計畫綜合高補注潛勢區、高地電阻區與高溶氧區三者，並搭配岩心鑽探柱狀圖與數位地表高程(DTM)等資訊，得出濁水溪沖積扇主要補注區分布。其主要範圍包含北斗鎮、田中鎮、溪州鄉、二水鄉、刺桐鄉、林內鄉、斗六市與古坑鄉等部分區域。

(二) 補注量及抽水量推估

本計畫應用分散型地下水歷線法進行評估，綜合濁水溪沖積扇淺層與深層觀測井，分析取 1998~2003、2005~2009 年之水平衡。此外，分散型地下水歷線法亦針對事件降雨量與補注量進行線性回歸，如有 100(mm)之累積降雨降於濁水溪沖積扇，約可貢獻將近 53 百萬噸之補注量。而於數值模式方面，則應用 MODFLOW 建立地下水數值模式，以 1998~2003、2005~2009 年地下水位資料進行淨補注量之檢定，平均檢定誤差約 0.4 公尺。

本計畫綜合分散型地下水歷線法與數值模式之結果，推估得濁水溪沖積扇全區之垂向補注量為 18.28 億噸，下游海岸側向流入量為 0.17 億噸，兩項總合之系統總流入量為 18.45 億噸。於系統流出量方面：含水層一抽水量 7.08 億噸，含水層二抽水量 3.20 億噸，含水層三抽水量 2.30 億噸，流失量 6.07 億噸，四項總合之系統總流出量為 18.65 億噸。

(三) 主要補注區對全區地下水系統水量、水質之影響

本計畫建置之數值模式，除可用於推估抽水量與補注量外，亦可用於探討主要補注區管制與否對地下水系統之影響，本計劃分別從水量與水質方面來進行分析。

在水量方面，分別統計濁水溪沖積扇與主要補注區之面積與垂向補注量，統計結果如下：濁水溪沖積扇面積為 2079 平方公里，整體之垂向補注量為 18.28 億噸，主要補注區面積為 200.18 平方公里(約佔平原面積一成)，主要補注區內之垂向補注量為 7.16 億噸(約佔整體垂向補注量四成)。因此若主要補注區內未妥善管理開發行為，而導致區域內透水面積大減，將大幅降低整體補注量，影響系統水平衡甚劇。

在水質方面，搭配水質模式(MODPATH)進行評估，假設無妥善管理主要補注區內的污染行為，在 200 年內污染物質已傳輸至第一含水層(F1)之下游沿海處，部分污染物質則進一步滲透至深層含水層(F2 與 F3)，顯現主要補注區除可提供大量補注量外，對深層地下水之水質影響亦極為重大。

相對於屏東平原之水質污染影響評估結果，在濁水溪沖積扇第二含水層之污染範圍大於淺層含水層，原因在於濁水溪沖積扇中、下游區域阻水層包覆良好、結構完整，造成中、下游區域深層含水層水源需仰賴上游補注區供應，中、下游區域深層含水層極易產生超抽狀況而造成局部地下水位大幅下降，主要補注區之地表入滲量需提供更多的水量來補充中、下游深層含水層損失之水量，使得更多地下水流線流向中下游之深層含水層。因此補注區若無妥善管理地表污染情況，污染質點易於進入深層含水層，大面積影響深層含水層，如此一來將使深層含水層地下水的使用產生安全上之疑慮，因此建議應盡速完成主要補注區之保育規劃。

(四) 資料之檢視與補遺

本計畫已全面檢視濁水溪沖積扇地下水觀測網，自 1999 年至 2003 年及 2005 年至 2009 年間之地下水位資料，發現少數水井存在一定程度之誤差與缺漏，若直接應用將產生相當之誤導，故需進行校正與補遺。資料之缺漏補遺，本計畫係以人工方式配合統計相關分析，逐站進行之。資料之誤差部分，存有一定程度之疑似儀器校正誤差，此種誤差，雖然可由資料明確顯示出，惟卻難以程式自動校正，故以人工方式逐站修正之。

(五) 現地補充調查試驗

1. 地電阻調查分析：

地電阻調查方法於 98 年度在濁水溪北岸彰化地區，完成柑園觀測井與竹塘觀測井附近長度約 300 公尺之兩條短距離測線，比對岩心紀錄及井測資料，可

作為長距離測線研判分析邊界位置之基礎。99 年度在濁水溪南岸雲林地區，完成六個主要測線區域，合計完成 16 條測線和 3 條標準測線，用以夾擊可能之邊界位置。綜合地電阻剖面影像對比，發現藉由高解析度(即電極間距為 10 公尺)地電阻方法，進行側向長距離地電阻施測，可以有效協助補注區邊界之判釋。濁水溪北岸高電阻區域邊界，大致由北斗一帶向南延伸至溪州一帶，南岸部分則由於虎尾溪的干擾，造成高電阻區域邊界在判斷上較為複雜。由於虎尾溪的作用，泥層(難透水層)與扇頂礫石層邊界，在虎尾溪流域則往西(下游)擴張，但到了斗六以南區域，則向東(上游)內縮至接近斗六丘陵一帶。

2. 水質調查分析:

地下水之溶氧帶往西達田中、柑園、六合等。硝酸鹽帶的分布再往西、分布更廣。扇頂地下水大都以碳酸氫鈣水質為主，只有少數地下水偏碳酸氫鈉，此現象應為陽離子交換的結果。扇頂補注區約 47% 觀測井的導電度偏高($>750 \mu\text{S/cm}$)，有 31% 井的導電度有增加的趨勢。扇頂區 10% 觀測井的硝態氮濃度偏高($>10\text{mg/l}$ 環保署飲用水源水質標準)。地下水氬態氮以靠海側較高，為泥質地層較多的中下游，可能由地層中的有機物溶解/降解。

(六) 濁水溪沖積扇綜合評估

濁水溪沖積扇數值模式是以現地觀測水位建置而成，由於深層含水層水位低於淺層含水層，造成扇頂通透區存在垂直向下之流向，如長時間維持過低水位與，污染物易藉由扇頂通透區深入深層含水層。深層含水層亦不易受到淺層補注，造成地下水位偏低，及較大之垂向水力梯度，使污染物易流向深層。而地下水位因濁水溪沖積扇扇央與扇尾阻水層結構較為明顯，導致中下游之深層含水層地下水系統不易受到補注(或降雨)豐枯之影響，易因超抽而造成地下水位降低。

二、建議

(一) 地下水位資料時間上之延續性與空間上之完整性，將大為影響後續資料之應用與加值，因此地下水位觀測資料品質之好壞，乃是觀測站網能否發揮其預期效益之關鍵，應持續加強站網之維護與資料蒐集之改善。

(二) 比流出率及儲水係數為地下水歷線法及相關研究之重要參數，建議在經費充足情況下，應增加複井抽水試驗數量，以提高地下水相關分析之可靠度。其中尤以非受壓含水層儲蓄水量之變化量佔整體變化量之絕大部分，因此應優先進行複井抽水試驗

(三) 本計畫地電阻調查工作主要都是針對濁水溪沖積扇上扇到下扇阻水泥層的空間分佈來做探討。可是綜合比較濁水溪北岸(彰化)與南岸(雲林)的情形其實是有差異的。濁水溪北岸為很單純的沖積扇組成，主要沖積層為濁水溪營力所建構，當然泥層(難透水層)的分布相當單純。無論以何種調查方法，其補注區邊界的偏移誤差是很小的。但是反觀濁水溪南岸，雖然濁水溪沖積扇亦構成了雲林區廣大的平原區，但在其上又有分布於其上的虎尾河流域影響，如果也將虎尾溪的營力列入考慮，本區域已不在是單純的濁水溪沖積作用形成。在一維地電阻半施蘭卜吉(Half-Schlumberger)測深法的結果中，反演影像剖面也可以發現斗六區測線有一砂體由東向西侵入。是否可以將虎尾溪的沙體入侵視為作用在一個大型沖積扇上的小型沖積扇，亦或是虎尾溪的小型沖積扇中的泥層(難透水層)可以另行獨立分割出一個次要的補注區，這可能是未來必須考慮的重點。目前的藉由地電阻調查方法所做的補注區邊界劃定雖然已有非常良好的成效，但是畢竟一維或二維的地電阻探勘都非真正三維的調查，唯有增加該區域的調查工作才可以將本區的補注區邊界更準確的劃定。

(四) 未來應針地下水補注區之降雨垂向入滲、扇頂區農牧及土地利用、化糞池、工商業(例如工業區、加油站)可能的影響進行調查研究與評估，以有效保護珍貴的地下水資源。

(五) 未來可以現行地下水概況為基礎，應用數值模式輔助推估地下水可用(安全)出水量，以有效管理地下水開發及使用。

(六) 未來可針對主要補注區因環境改變而造成入滲率下降進行評估，探討對地下水可能之影響，以凸顯主要補注區之重要性。

參考文獻

1. APHA (1998) Standard methods for the examination of water and waste water, 20th ed., American Public Health Assoc., Washington, DC., 413-426.
2. Anderson, M.P. (2005) Heat as a ground water tracer. *Ground Water* 43/6, 951-968.
3. Barlow, P.M. and Moench, A.F. (1999) WTAQ- a computer program for calculating drawdowns and estimating hydraulic properties for confined and water-table aquifers. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4225, 74p.
4. Bierschenk, W.H. (1963) Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests. *International Association Science Hydrology* No. 64, Berkeley, CA. pp.493-507.
5. Bou Kheir R., A. Shaban, M-C. Girard, M. Khawlie, and C. Abdallah (2003) Caract´erisation morpho-p´edologique des zones karstiques du Liban sensibilit´e des sols `a l'´erosion hydrique. *S´echeresse* 14:4.
6. Bromley, J., W. M. Edmunds, E. Fellman, J. Brouwer, S. R. Gaze, J. Sudlow, and J. D. Taupin (1997) Estimation of rainfall inputs and direct recharge to the deep unsaturated zone of southern Niger using the chloride profile method, *Journal of Hydrology*, Vol. 188-189, P.139-154.
7. Britt, S.L. (2005) Testing the In-Well Horizontal Laminar Flow Assumption with a Sand. Tank Well Model. *Ground Water Monitoring and Remediation* 25/3, 73-81.
8. Crosbie, R., Binning, P., and Kalma, J. (2005). A time series approach to infer-ring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water resources research*, 41(1):W01008.
9. De Vries, J. and Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1):5-17.
10. Healy, R. and Cook, P. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1):91-109.
11. Heppner, C., Nimmo, J., and Geological Survey, Menlo Park, C. (2005). A computer program for predicting recharge with a master recession curve. Technical report, United States Geological Survey.
12. Jasrotia, A.S., R. Kumar, A. K. Saraf (2007) Delineation of groundwater recharge sites using integrated remote sensing and GIS in Jammu district, India, *International Journal of Remote Sensing*, Volume 28 , Issue 22 , Pages 5019-5036, November.
13. Johnson, A.I. (1967) Specific yield- compilation of specific yields for various materials. U.S.G.S. Water-Supply Paper, 162-D, 74p.
14. Jie, Z., van Heyden, J., Bendel, D., and Barthel, R. (2011). Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and

- improvement of groundwater recharge calculations. *Hydrogeology Journal*, pages 1-16.
15. Ketchum, J., Donovan, J., and Avery, W. (2000). Recharge characteristics of a phreatic aquifer as determined by storage accumulation. *HYDROGEOLOGY JOURNAL*, 8(6):579-593.
 16. Kendall, M.G. (1975) Rank correlation methods. 4th ed. Charles Griffin, London.
 17. Kruseman, G.P. and D.e. Ridder NA (1991) Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement Publication 47, The Netherlands, 377p.
 18. Lebuc, C., G. Favreau, and P. Schroeter (2001) Long-term rise in a Sahelian water table: the Continental Terminal in southwest Niger, *Journal of Hydrology*, Vol. 243, P.43-54.
 19. McNeely RN, Neimanis VP, Dwyer L. (1979) Water quality sourcebook - A guide to water quality parameters. Inland Waters Directorate, Water Quality branch, Ottawa.
 20. Moench , A.F. (1994) Specific yield as determined by type-curve analysis of aquifer-test data. *Ground Water* 32/6, 949-957.
 21. Moench, A.F. (2001) Accurate estimates of specific yield: are long-term aquifer tests really necessary? American Geophysical Fall Meeting 2001, abstract #H11E-02.
 22. Mondal, N. C. and V. S. Singh (2004) A new approach to delineate the groundwater recharge zone in hard rock terrain, *Current Science*, Vol. 87, 5, 10.
 23. Moon, S., Woo, N., and Lee, K. (2004). Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 292(1):198-209.
 24. Morgan L (2005) Critical aquifer recharge areas guidance document, Washington State Department of Ecology, Water Quality Program, 69p.
 25. Michalski, A., 1989. Application of temperature and electrical-conductivity logging in ground water monitoring. *Ground Water Monitoring Remediation*. 9/3, 112 - 118.
 26. Mukherjee, S. (1996) Targeting saline aquifer by remote sensing and geophysical methods in a part of Hamirpur-Kanpur, India, *Hydrology Journal*, 19, 53-64.
 27. National Water Well Association, " DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings" ,USEPA,May 1985.
 28. Nwankwor, G.I., Gillham RW, Kamp, G., and Aindunni, F.F. (1992) Unsaturated and saturated flow in response to pumping of an unconfined aquifer. Field evidence of delayed drainage. *Ground Water*, 30, 690-700.
 29. Parkhurst, D.L. (1995) User' s guide to PHREEQC - a computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculations: Water-Resource Investigations Report, 95-4227, U.S. Geological Survey, Lakewood, Colorado.

30. Rorabaugh, M.I. (1953) Graphical and theoretical analysis of step- drawdown test of artesian well. Proc. Sep. No. 362, ASCE. Vol. 79.
31. Scanlon, B., Healy, R., and Cook, P. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1):18-39.
32. Schwartz, F.W., and Zhang, H. (2003) *Fundamentals of ground water*, John Wiley & Sons, New York.
33. Shaban, A., M. Khawlie, and C. Abdallah (2006) Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zone: the case of Occidental Lebanon, *Hydrogeology Journal*, 14: 433-443.
34. Sophocleous, M. (1991). COMBINING THE SOILWATER BALANCE AND WATER-LEVEL FLUCTUATION METHODS TO ESTIMATE NATURAL GROUNDWATER RECHARGE - PRACTICAL ASPECTS. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 124(3-4):229-241.
35. U.S. EPA. 1989. Wellhead Protection Programs: Tools for Local Governments. EPA 440/6-89-002. Washington D.C.: Office of Groundwater Protection, U.S. Environmental Protection Agency.
36. U.S. EPA, 1995. Benefits and Costs of Prevention: Case Studies of Community Wellhead Protection, EPA 813-B-95-005, 74 pp.
37. Washington Dept. of Community Trade and Economic Development, 2003. Critical Areas Assistance Handbook - Protecting Critical Areas within the Framework of the Washington Growth Management Act, 83 pp. <http://qa.cted.wa.gov/DesktopModules/CTEDPublications/CTEDPublicationsView.aspx?tabID=0&alias=CTED&lang=en&ItemID=976&Mid=944&wversion=Staging>
38. Washington Dept. of Community Trade and Economic Development, 2004. GMA Update: Issues to Consider When Reviewing and Evaluating Critical Areas Regulations and Natural Resource Lands Designations, 3 pp. <http://cted.wa.gov/DesktopModules/CTEDPublications/CTEDPublicationsView.aspx?tabID=0&alias=CTED&lang=en&ItemID=1022&Mid=944&wversion=Staging>
39. Yeh, H.F., Lee, C.H., Hsu, K.C., and Chang, P.H. (2008) GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. *Environ. Geol.*, Vol. 58, 185-195.
40. 土木科技研究發展文教基金會，1997，地層下陷防治推動綜合計畫子計畫九－雲嘉地區安全出水量之估算，經濟部水資源局。
41. 工研院能源與資源研究所，1994，地球物理探測及地層對比之應用，台灣地區地下水觀測網第一期計畫，水文地質調查研究及建檔，八十三年度報告，經濟部中央地質調查所。
42. 工研院能源與資源研究所，1995，地球物理探測及地層對比之應用，台灣地區地下水觀測網第一期計畫，水文地質調查研究及建檔，八十四年度報告，經濟部中央地質調查所。
43. 工研院能源與資源研究所，1996，濁水溪沖積扇地球物理探測及地層對比，

台灣地區地下水觀測網第一期計畫，水文地質調查研究及建檔，八十五年年度報告，經濟部中央地質調查所。

44. 中興工程，1998，濁水溪沖積扇地表地下水聯合運用第二階段—濁水溪沖積扇地下水人工補注計畫規劃報告，經濟部水利處。
45. 中興工程，2006，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。
46. 平成股份有限公司，1996，濁水溪中游地區地下水補注調查與評估。中興工程顧問股份有限公司。
47. 田巧玲、張炎銘、林維侃、蔡明坤，1996，濁水溪沖積扇之地下水水文概況。濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，第 207-221 頁。
48. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2002，屏東平原之地下水補注區，經濟部中央地質調查所彙刊，第十五號，第 17-47 頁。
49. 江崇榮、陳瑞娥，2004a，屏東平原地下水水源保護區劃定之芻議，經濟部中央地質調查所彙刊，第十七號，第 1-19 頁。
50. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2004b，屏東平原地下水補注量及抽水量之評估，經濟部中央地質調查所彙刊，第十七號，第 21-51 頁。
51. 江崇榮、黃智昭、and 陳瑞娥(2004). 屏東平原地下水補注量及抽水量之評估. 經濟部中央地質調查所彙刊, 17:21-51
52. 江崇榮、陳瑞娥、賴慈華、黃智昭，2005，濁水溪沖積扇地下水區之補注區與補注源探討，經濟部中央地質調查所彙刊，第十八號，第 1-28 頁。
53. 江崇榮、黃智昭、and 陳瑞娥(2006a). 以地下水位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, 19:61-90.
54. 江崇榮、黃智昭、and 陳瑞娥(2006b). 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, 19:61-90
55. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2006，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 61-90 頁。
56. 江崇榮，2008a，相等延時分級抽水試驗資料分析之原理與方法。經濟部中央地質調查所彙刊，第二十一號，第 1-21 頁。
57. 江崇榮，2008b，不等延時分級抽水試驗資料分析之原理與方法。經濟部中央地質調查所彙刊，第二十一號，第 23-41 頁。
58. 李昭順、吳景濂，1996，濁水溪沖積扇之抽水試驗，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，第 165-179 頁。
59. 李天浩、林國峰、劉振宇，1997，濁水溪沖積扇扇頂平原地區地表垂向補注量估計，台灣省水利處，96P。
60. 林朝榮，1957，台灣地形。台灣省文獻會，共 423 頁。
61. 林再興，1998，彰化地層下陷區地下水入滲補注及安全出水量之評估，經濟部水資源局。
62. 林俊男、賈儀平，2000，濁水溪沖積扇地下水補助區之劃定及保育原則之研

討，經濟部水資源局。

63. 吳景濂(1998)屏東平原之地下水抽水試驗，屏東平原地下水及水文地質研討會論文集，第 189-204 頁。
64. 地下水勘測隊，1957，大濁水沖積扇地區地下水源勘查報告，中國農村復興聯合委員會出版，共 206 頁。
65. 地下水工程處，1961，屏東平原地下水源勘查報告，共 74 頁。
66. 地下水工程處，1973，濁水溪南岸雲林地區地下水源調查報告，經濟部水利署。
67. 柯亭帆，丁澈士，吳峰誼，1996，屏東平原地下水變動立體化模擬及補注量估算之研究，土木水利，Vol.22, No.4, pp.35-45。
68. 陳文福、林文勝、張國強、秦啟文、蔡克敏，2003，彰雲地下水補注區之溶氧與硝酸鹽氮濃度，經濟部中央地質調查所彙刊第十六號，第 125-139 頁。
69. 陳文福、呂學諭，2009，沖積扇補注區地下水之硝酸鹽污染，經濟部中央地質調查所彙刊，第 22 號。
70. 張秉權、曾鈞敏，1995，屏東平原地下水數學模式之應用分析，經濟部水資源統一規劃委員會。
71. 張誠信，1996，雲林地區地下水流三維數值模擬，台灣大學農業工程研究所碩士論文。
72. 張良正、歐國隆、單信瑜，1999a，濁水溪沖積扇及屏東平原之地下水污染潛勢評估分析，八十八年度農業工程研討會，pp.369- 376。
73. 張良正、蔡威平、陳宇文，1999b，屏東地區地下水補注量推估及分級，第三屆地下水資源及水質保護研討會，pp.65-76
74. 簡錦樹，1991，濁水溪沖積扇地表地質材料粒徑分析及現地入滲試驗研究。經濟部中央地質調查所。
75. 謝永旭、蘇苗彬，1994-2003，地下水基本水質試驗分析研究，經濟部水利署與中興大學環境工程研究所出版。
76. 姜儷安、歐陽湘，1996，雲林地區地下水與水平衡初步分析，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，181-206 頁。
77. 簡金龍，1996，富含礫石土壤水力特性之研究。國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
78. 劉聰桂，1993-2001，地下水定年分析，經濟部水利署出版。
79. 劉聰桂，1996，臺灣地區地下水觀測網第一期計畫，觀測網之建立及運作管理八十五年度子計畫報告，地下水定年分析研究：水利局，第 1-1 至 8-43 頁。
80. 劉振宇、李天浩、林國峰、蘇明道，1998，濁水溪沖積扇扇央與扇尾平原地區地表垂向補注量評估，經濟部水資源局，69P。
81. 曹敏中，丁澈士，陳秋楊，1997，新園地區地下水污染防治之研究，技職學刊，Vol.12, No.1, pp.159-169。

82. 葉文工，1998，台灣沿海地區地下水超抽改善方案研擬與評估，經濟部水資源局。
83. 經濟部中央地質調查所，1995，濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告，共 102 頁。
84. 經濟部中央地質調查所，1997，屏東平原水文地質調查研究報告，共 163 頁。
85. 經濟部中央地質調查所，1999，濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告，共 129 頁。
86. 經濟部中央地質調查所，2002，臺灣地區地下水觀測網第一期計畫屏東平原水文地質調查研究總報告。
87. 經濟部中央地質調查所，2002，屏東平原地下水自然補注之研究。
88. 經濟部水資源局，1996、1997，台灣地區地下水觀測網第一期計畫-濁水溪沖積扇地下水觀測井建置及相關試驗八十五、八十六年度報告。
89. 經濟部水資源局，1999，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。
90. 經濟部水資源局，1999，臺灣水文年報。
91. 經濟部水利署，2007，規畫設計、監造「95 年度地層下陷區地下水觀測站井建置維護計畫」專題報告(1/2):規劃設計及監造工作。
92. 臺糖公司地下水中心，1999-2004，台灣地區地下水觀測網水質調查分析，經濟部水利署出版。
93. 農業工程研究中心，2007，96 年度台灣地區地下水質檢測分析與評估計畫，經濟部水利署出版。
94. 經濟部水利署，2002，地下水資源整體營運規劃與綜合評估。
95. Anderson MP (2005) Heat as a ground water tracer. Ground Water 43/6, 951-968.
96. 經濟部、行政院農委會、內政部，2005，彰化雲林地區地層下陷防治計畫。
97. 農業工程研究中心，2000，濁水溪沖積扇地下水補注區之劃定及保育原則之研訂。經濟部水資源局出版。
98. 張良正等人(2011). 臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估|地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(3/4). 經濟部中央地質調查所計畫報告. Technical report, 經濟部中央地質調查所.

網頁部分：

City of Issaquah (2009) Doing business in a wellhead protection area,

<http://www.ci.issaquah.wa.us>。

Georgia Carrollton (2002) Water resource districts, <http://www.carrollton-ga.gov/>。

Georgia Department of Natural Resources (2010), <http://www.gadnr.org/>。

King County (2010),

<http://www.kingcounty.gov/environment/waterandland/groundwater/maps-repor>

[ts/maps.aspx](#)

Washington Dept. of Community Trade and Economic Development, 2003. Critical Areas Assistance Handbook – Protecting Critical Areas within the Framework of the Washington Growth Management Act, 83 pp.

<http://qa.cted.wa.gov/DesktopModules/CTEDPublications/CTEDPublicationsView.aspx?tabID=0&alias=CTED&lang=en&ItemID=976&MIId=944&wversion=Staging>

Washington Dept. of Community Trade and Economic Development, 2004. *GMA Update: Issues to Consider When Reviewing and Evaluating Critical Areas Regulations and Natural Resource Lands Designations*, 3 pp.

<http://cted.wa.gov/DesktopModules/CTEDPublications/CTEDPublicationsView.aspx?tabID=0&alias=CTED&lang=en&ItemID=1022&MIId=944&wversion=Staging>

環保署全國環境水質監測網(2009), <http://wqshow.epa.gov.tw/>。

附錄 A 濁水溪沖積扇觀測水位

表 A-1 與圖 A-1 分別為濁水溪沖積扇與鄰近區域觀測站網列表與分布圖，圖 A-2 至 A-63 為濁水溪沖積扇所有水位站，扣除完全無法補遺使用之觀測水位歷線圖，國聖 (3) 於 2006 年前後之變化特性差異極大 (詳見圖 A-2)，故該站觀測水位不予使用。此外，原崙子 (1) 與 (2) 之井號分別為 09170111 與 09170121，於 1994 年正式啓用，於 2009 年棄用，改於鄰近區域重新建井，井名仍命名為 09170112 與 09170122。為求資訊之完整性，本研究以新井之水位接續，為求銜接點之平滑，將新井水位分別垂直平移 0.9 與 0.4 公尺。

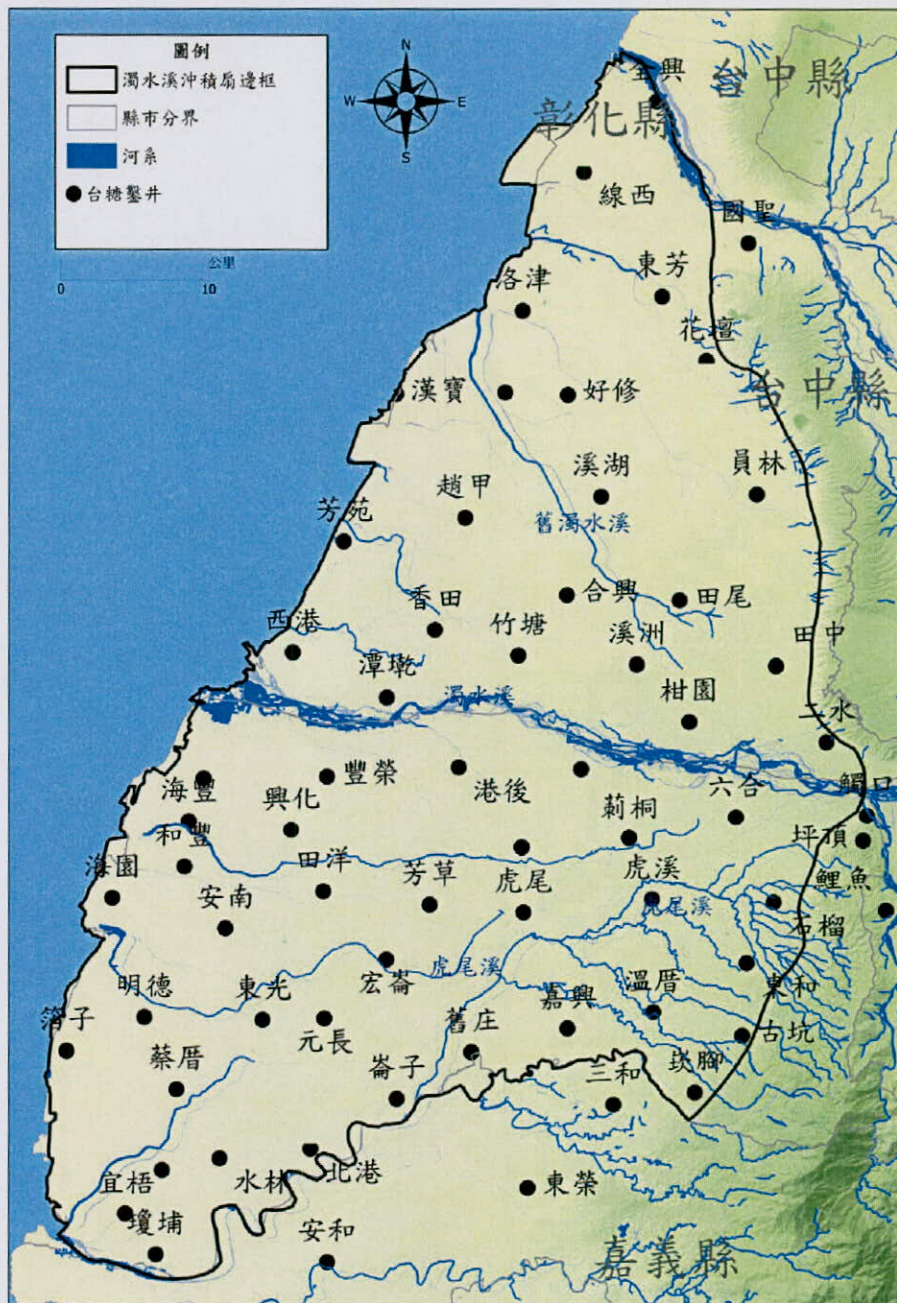


圖 A-1 濁水溪沖積扇站網分布圖

表 A-1濁水溪沖積扇與鄰近區域觀測站網列表

站號	站名	X坐標*	Y坐標*	井頂高 ¹	站號	站名	X坐標*	Y坐標*	井頂高 ¹
070101	國聖	206264	2665364	21.200	070102	東芳	199966	2662267	10.37
070201	洛津	191220	2661365	4.436	070251	頂番	196281	2665147	7.801
070401	練西	195060	2669970	5.423	070501	全興	199630	2674365	6.04
070601	文昌	190120	2656250	7.63	070801	花壇	202725	2658256	15.458
070802	花壇二	202693	2658256	15.458	071001	員林	206624	2649675	26.840
071101	溪湖	196159	2649626	18.910	071201	田中	207088	2639176	49.560
071202	田中二	207087	2639187	50.006	071203	東興	209908	2640321	66.282
071204	三潭	207765	2640174	46.324	071401	好修	194090	2656015	10.822
071402	好修二	194117	2656026	11.127	071801	二水	210240	2634430	82.440
072001	趙甲	187628	2648436	12.820	072002	香田	185725	2641405	15.230
072051	原斗	190880	2643767	19.092	072101	田尾	201045	2643280	33.160
072202	合興	194000	2643600	22.519	072302	漢寶	183599	2656820	3.717
072303	芳苑	179979	2646957	4.516	072304	漢寶二	183750	2656700	4.225
072351	路上	180842	2643909	10.094	072401	潭墘	182698	2637171	13.680
072402	西港	176815	2639962	4.960	072403	西港二	176792	2639944	5.006
072501	竹塘	190950	2639820	21.670	072502	永安	185838	2639466	13.000
072601	柑園	201660	2635700	46.690	072602	溪州	198370	2639270	34.180
072603	西畔	203159	2638278	38.293	080401	竹山	217225	2629078	150
080402	鯉魚	213983	2623598	170	080451	清水溪一	214537	2624962	146.629
080452	清水溪二	213794	2626477	133.447	080601	新光	215539	2638779	222
080602	新民	218498	2634399	144	090101	虎溪	199330	2624540	36.720
090102	石榴	206940	2624360	67.210	090103	虎溪二	199325	2624349	37.009
090104	東和二	205263	2620484	76.546	090201	溫厝	199400	2617410	48.563
090301	虎尾	191236	2623690	27.030	090302	芳草	185350	2624180	16.140
090401	西螺	194890	2632720	29.490	090402	九隆	191170	2627780	24.000
090403	大新	197623	2631851	34.05	090501	宏崙	182680	2620675	15.688
090551	土庫	187125	2619830	19.678	090601	北港	177885	2608753	9.000
090651	番溝	175573	2613529	187.1	090701	東和	205250	2620500	75.660
090702	荖腳	202020	2612380	110.110	090703	古坑	204980	2615930	100.600
090801	嘉興	194036	2616372	30.930	090802	舊庄	188020	2614870	17.871
090901	六合	204580	2629710	56.020	090902	荊桐	197890	2628380	37.620
090903	饒平	201398	2630582	43.654	091001	烏塗	208140	2629528	72.310
091002	觸口	212782	2629816	113.21	091003	坪頂	212560	2628257	197
091004	九芎	209443	2626665	77.717	091101	港後	187225	2632823	18.640
091102	港後二	187218	2632850	20.210	091201	塋榮	178950	2632220	9.200
091301	後安	171190	2632094	2.060	091302	興化	176677	2628803	8.349
091303	海豐	170296	2629366	2.492	091401	安南	172585	2622643	7.229
091501	田洋	178720	2624990	10.740	091502	馬光	182192	2624602	13.000
091503	田洋二	178668	2624918	11.649	091601	海園	165470	2624550	2.374
091602	和豐	169997	2626540	2.690	091603	海園二	166635	2624164	4.067
091701	崙子	183344	2611936	14.200	091702	元長	178807	2616896	9.578
091801	箔子	162600	2614900	2.180	091802	蔡厝	169452	2612475	5.214
091803	明德	167485	2617020	7.232	091804	東光	174905	2616870	8.921
091851	飛沙	165282	2615958	6.055	091901	宜梧	166291	2604639	3.413
091903	口湖	165796	2609792	3.809	092001	水林	172330	2608151	4.337
092002	大溝	168632	2607417	1.532	092003	瓊埔	168259	2602097	1.698
100401	三和	196920	2611590	45.670	100501	東榮	191545	2606340	28.290
100701	安和	178980	2601660	13.385	100751	新港	182809	2606087	11.862
100901	東石	162773	2595712	2.848					

* UTM 二度分帶座標；¹ 單位：(m) height

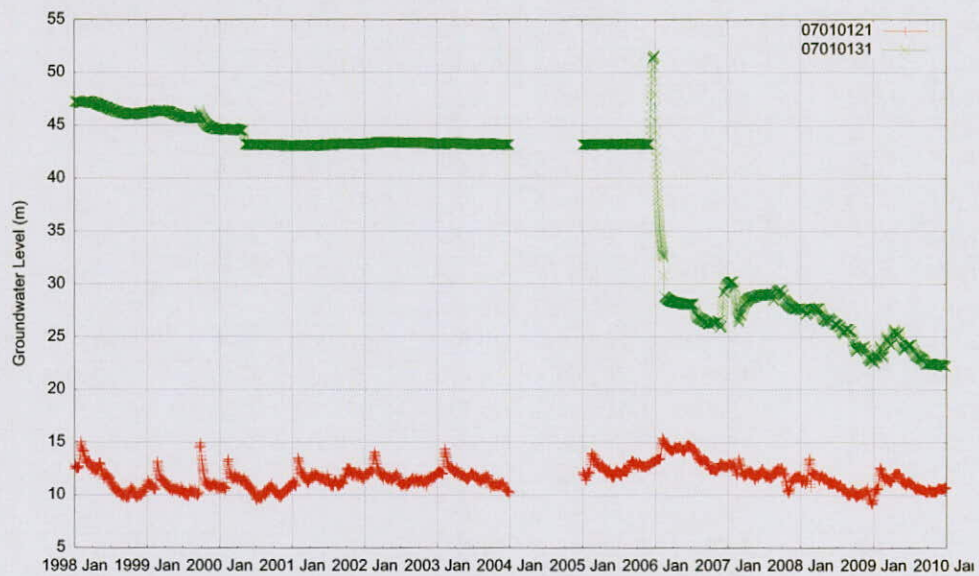


圖 A-2 國聖站地下水位歷線圖

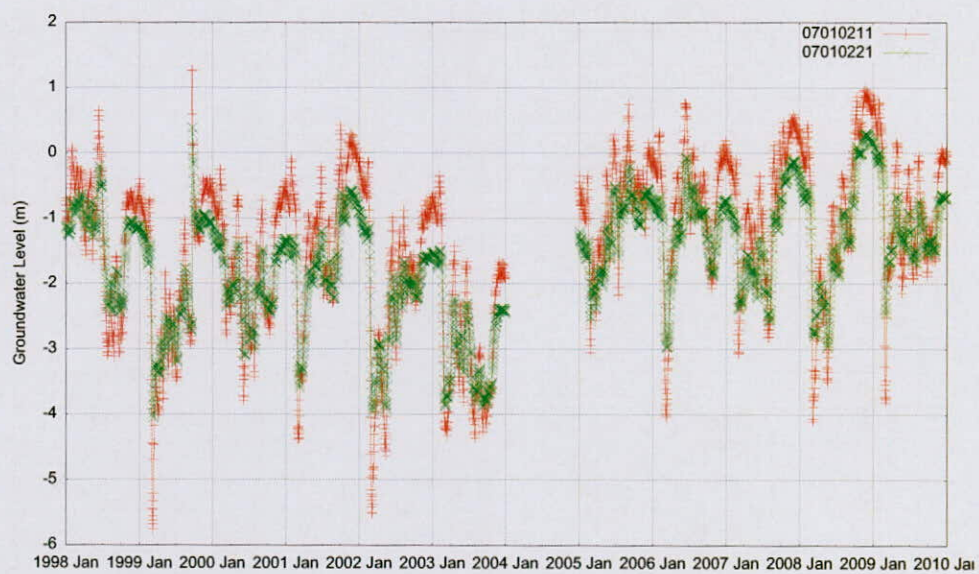


圖 A-3 東芳站地下水位歷線圖

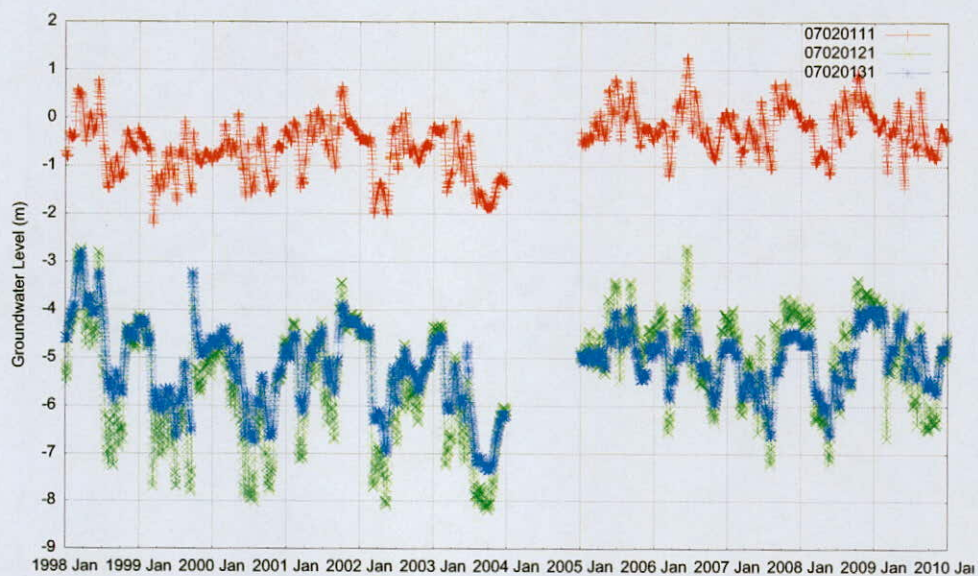


圖 A-4 洛津站地下水位歷線圖

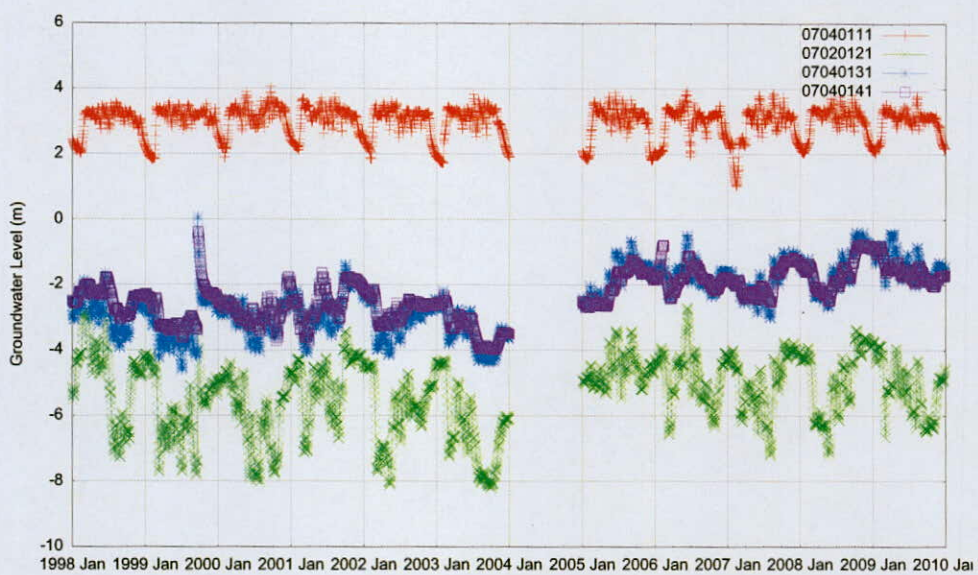


圖 A-5 線西地下水位歷線圖

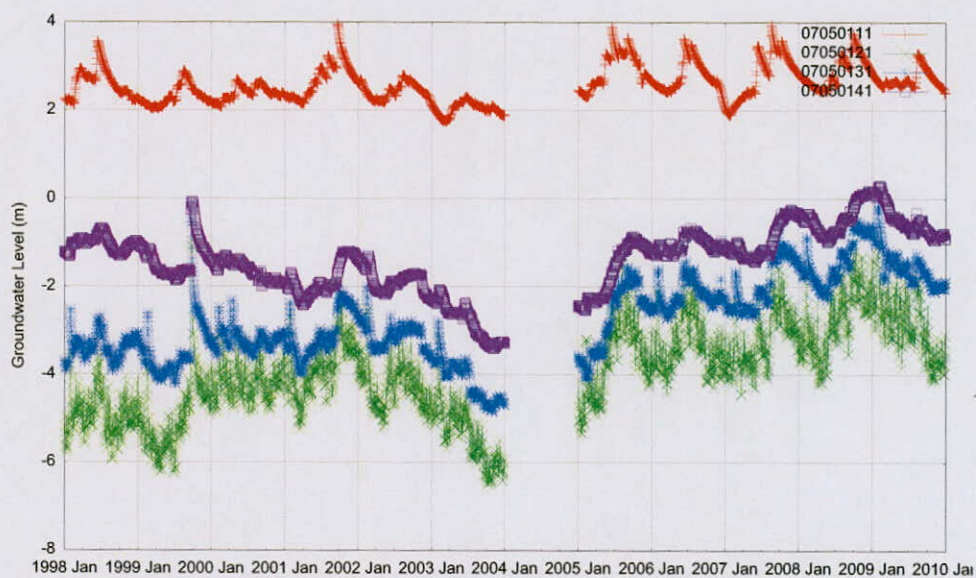


圖 A-6 全興地下水位歷線圖

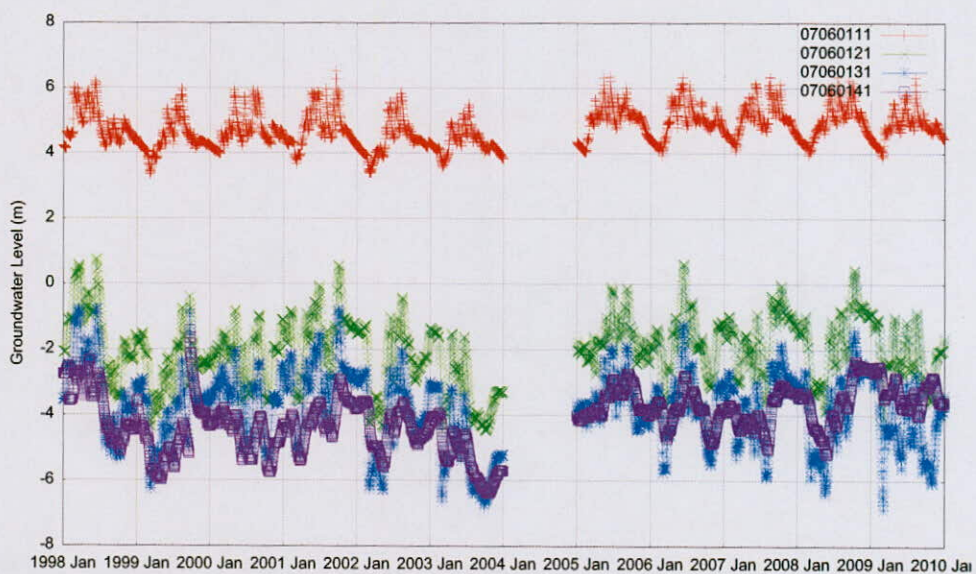


圖 A-7 文昌地下水位歷線圖

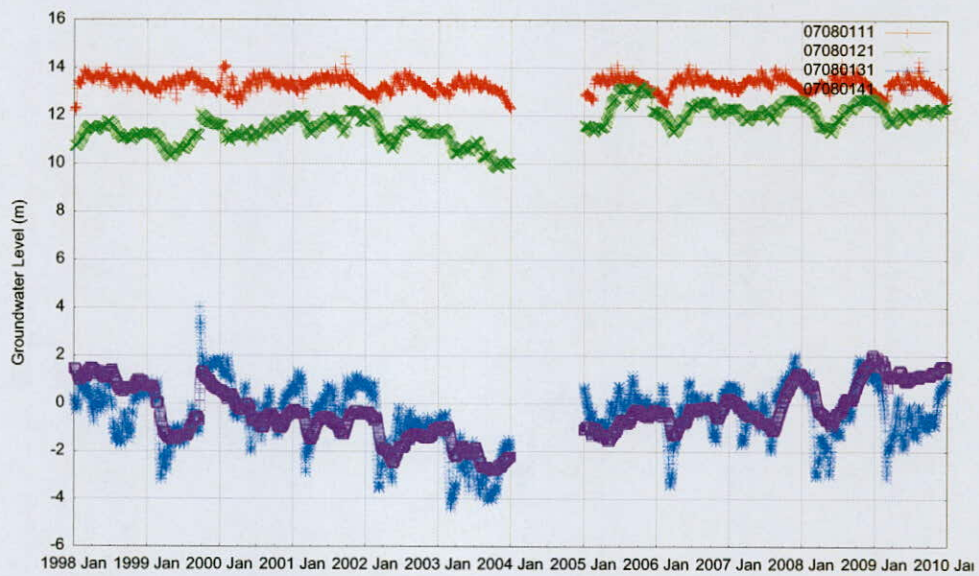


圖 A-8 花壇地下水位歷線圖

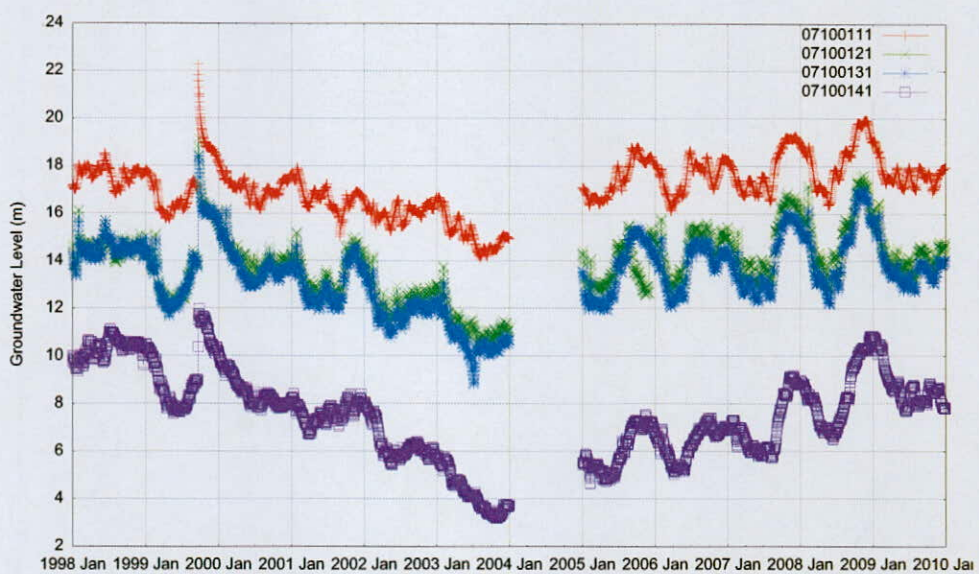


圖 A-9 員林地下水位歷線圖

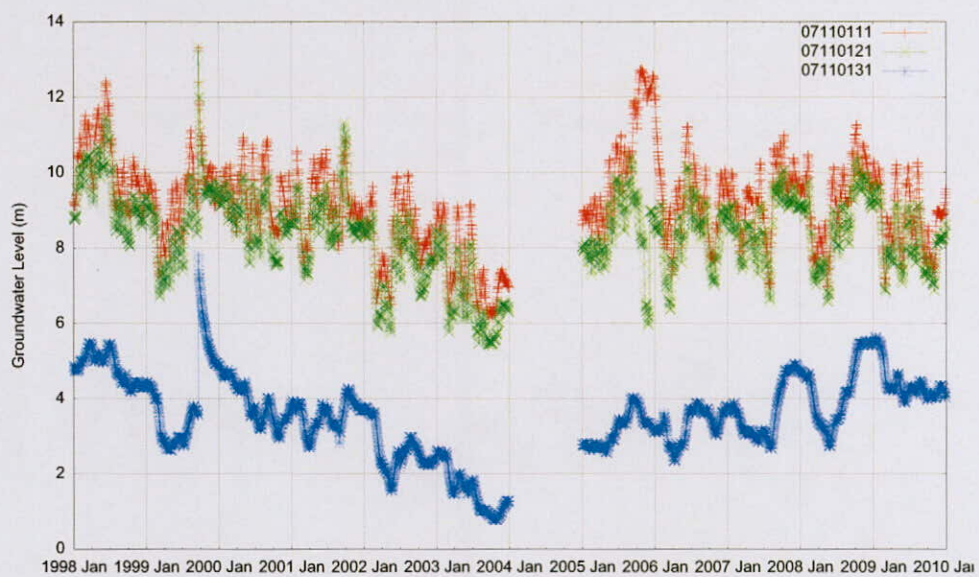


圖 A-10 溪湖地下水位歷線圖

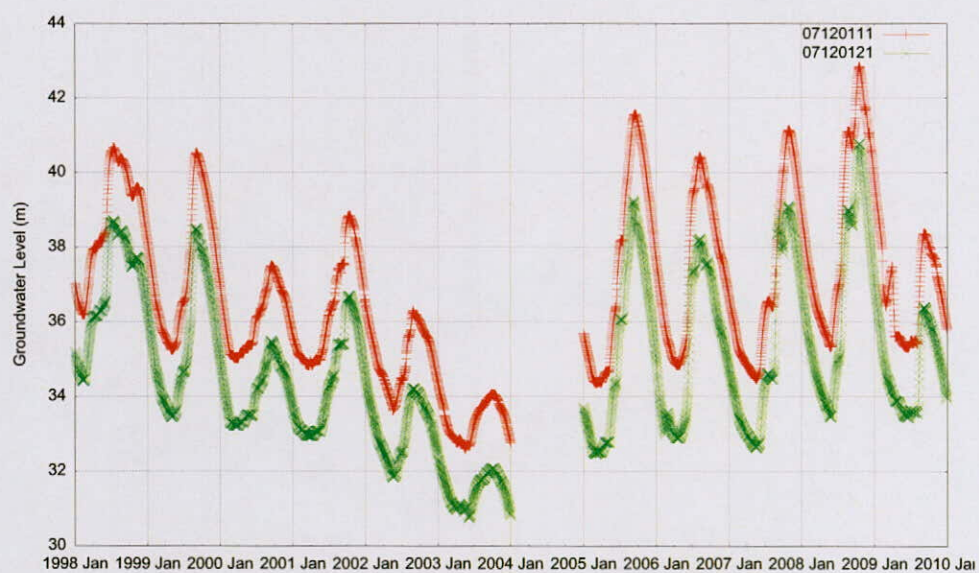


圖 A-11 田中地下水位歷線圖

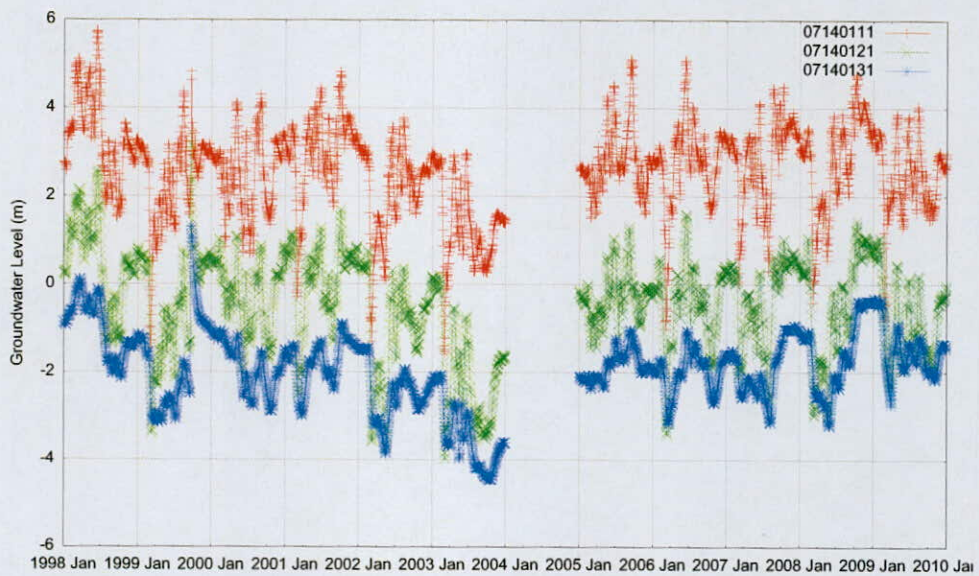


圖 A-12 好修地下水位歷線圖

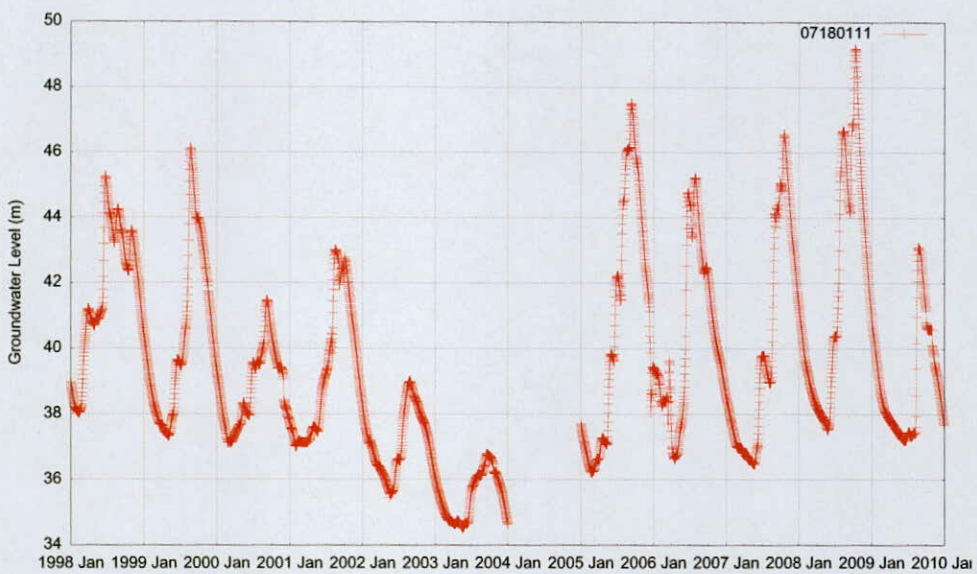


圖 A-13 二水地下水位歷線圖

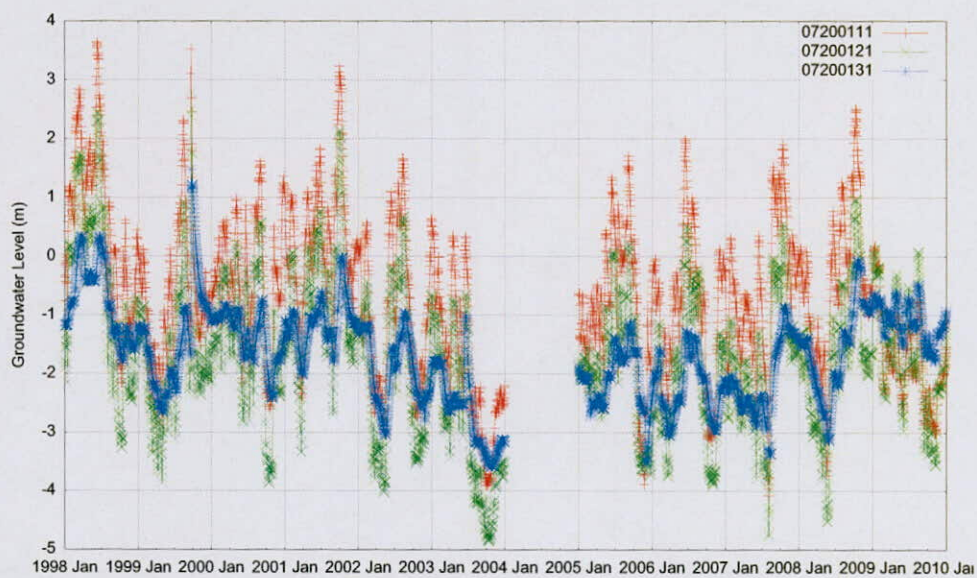


圖 A-14 趙甲地下水位歷線圖

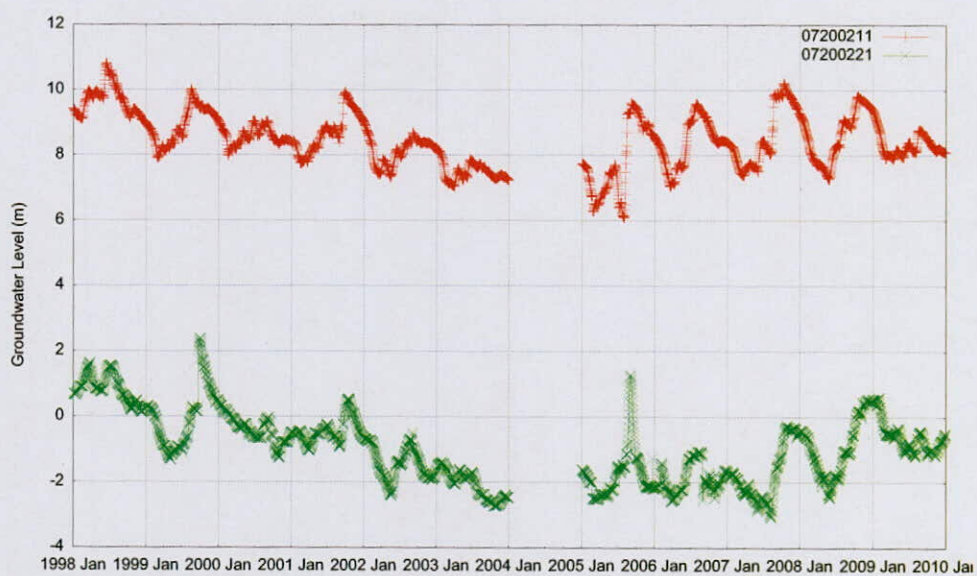


圖 A-15 香田地下水位歷線圖

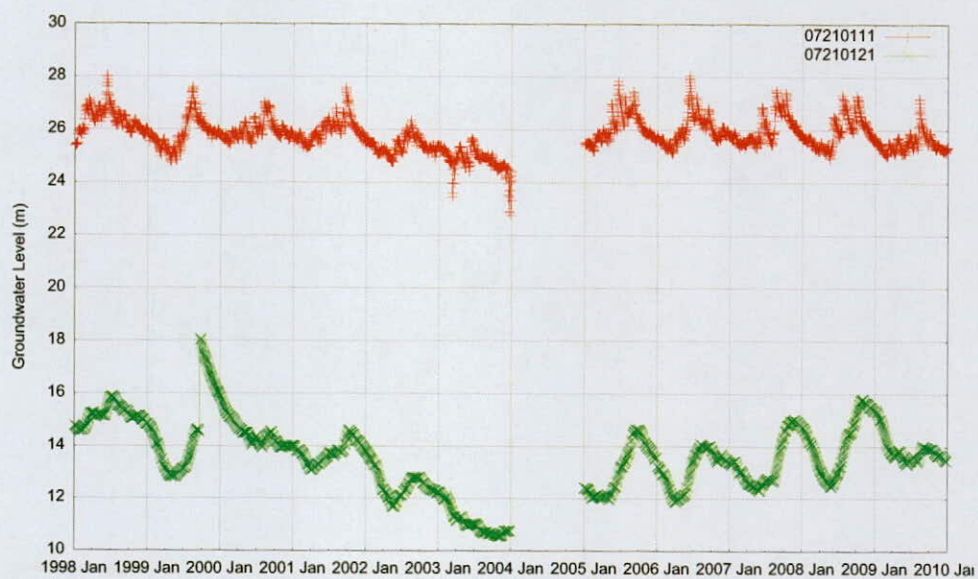


圖 A-16 田尾地下水位歷線圖

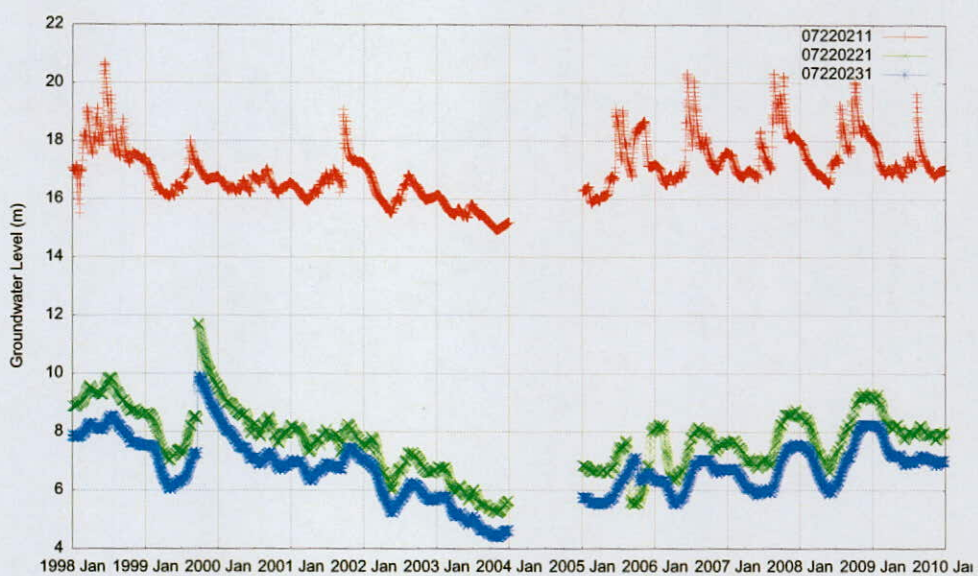


圖 A-17 合興地下水位歷線圖

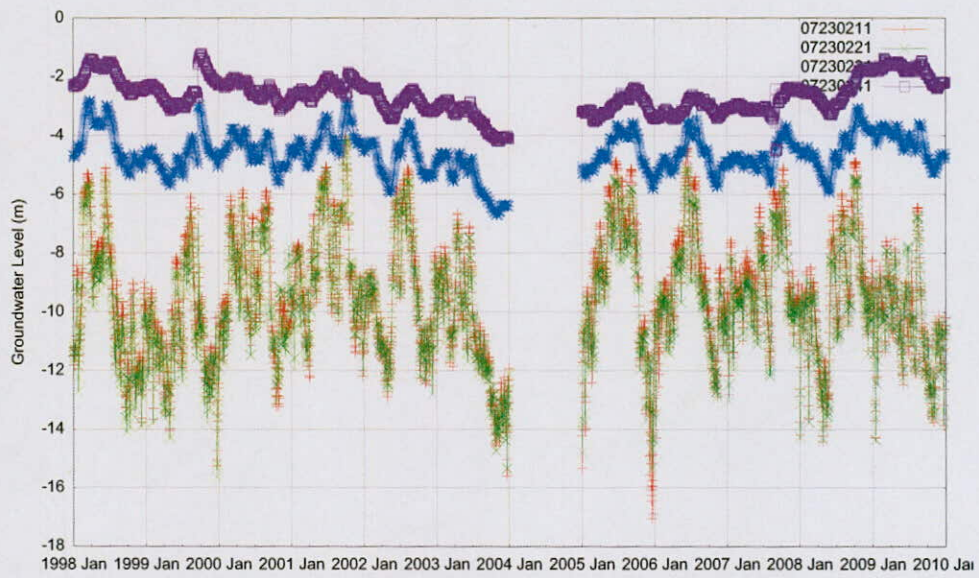


圖 A-18 漢寶地下水位歷線圖

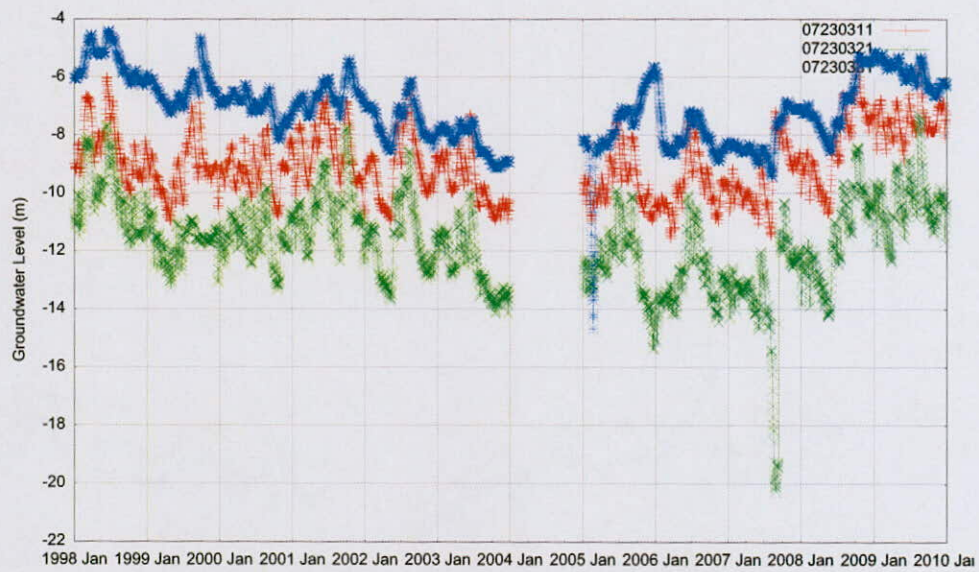


圖 A-19 芳苑地下水位歷線圖

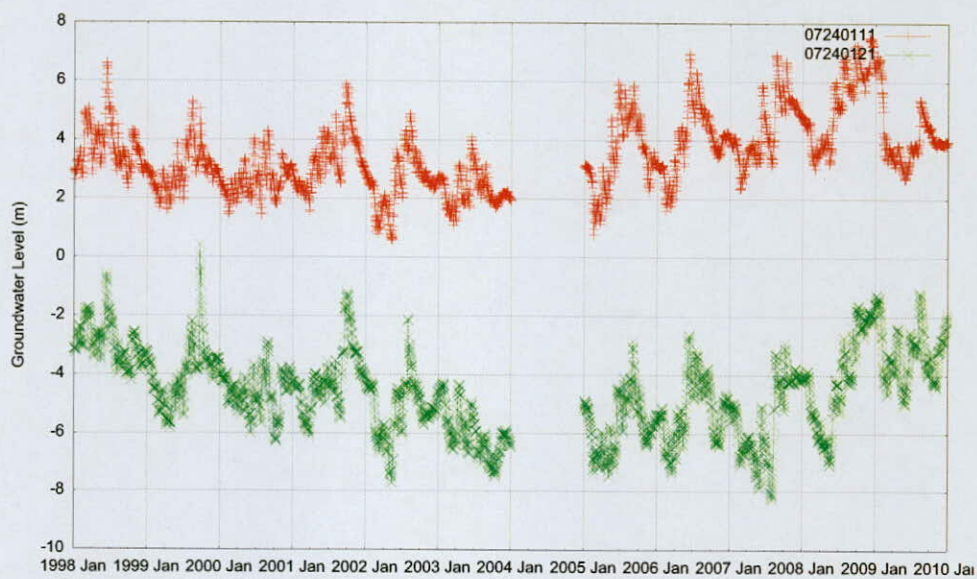


圖 A-20 潭墘地下水位歷線圖

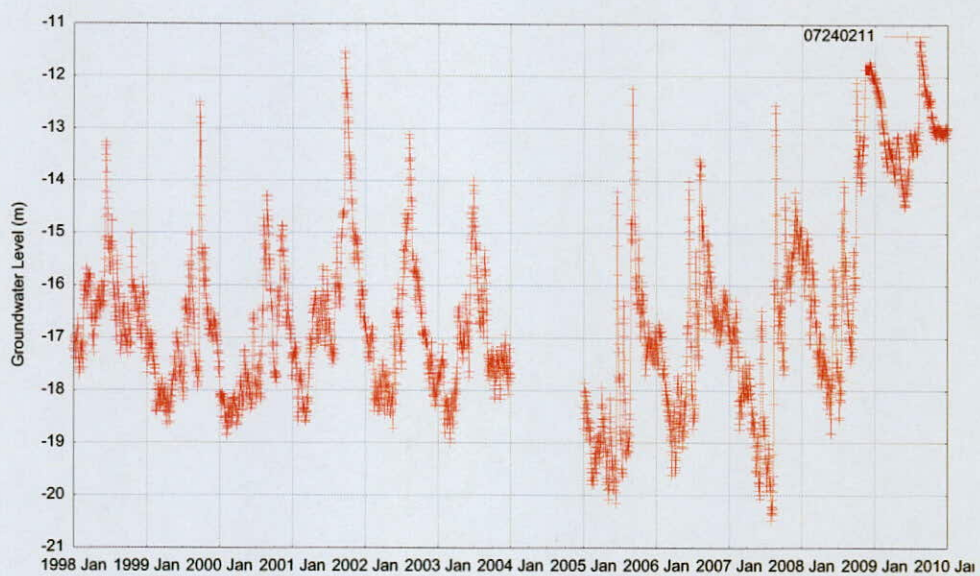


圖 A-21 西港地下水位歷線圖

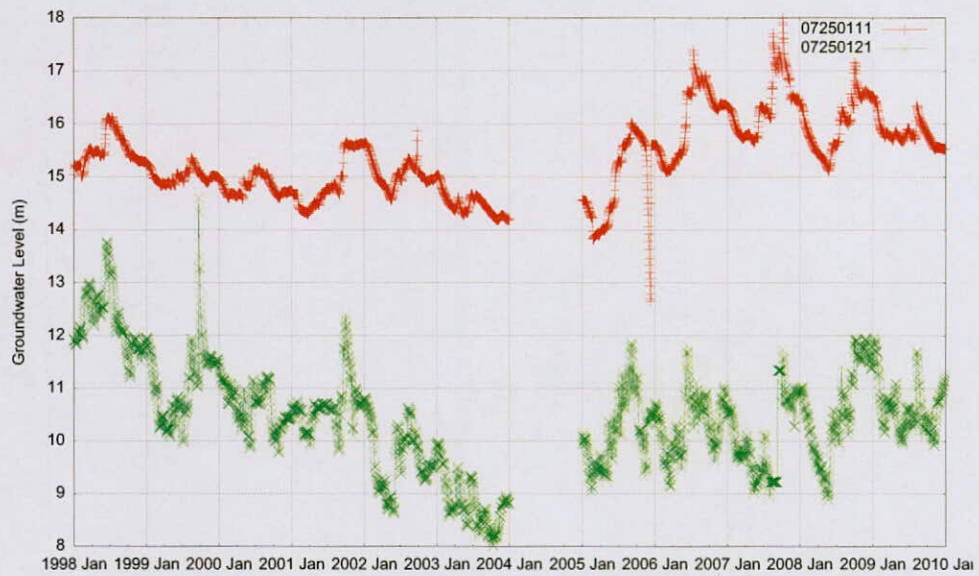


圖 A-22 竹塘地下水位歷線圖

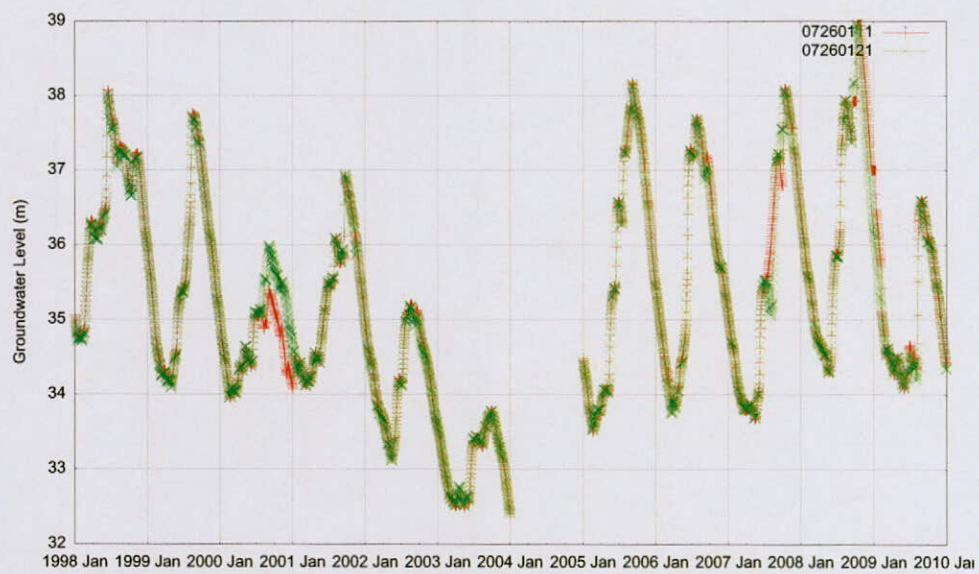


圖 A-23 柑園地下水位歷線圖

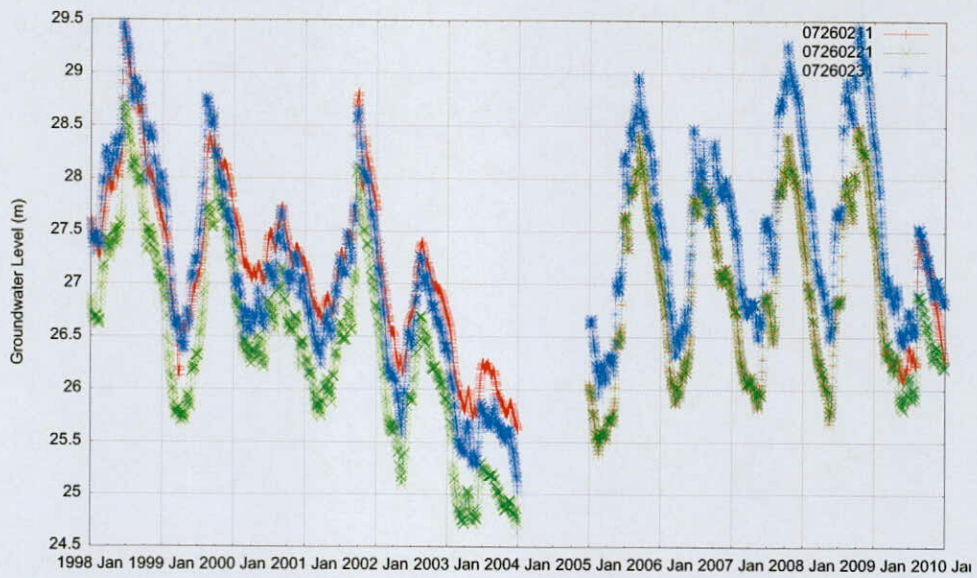


圖 A-24 溪州地下水位歷線圖

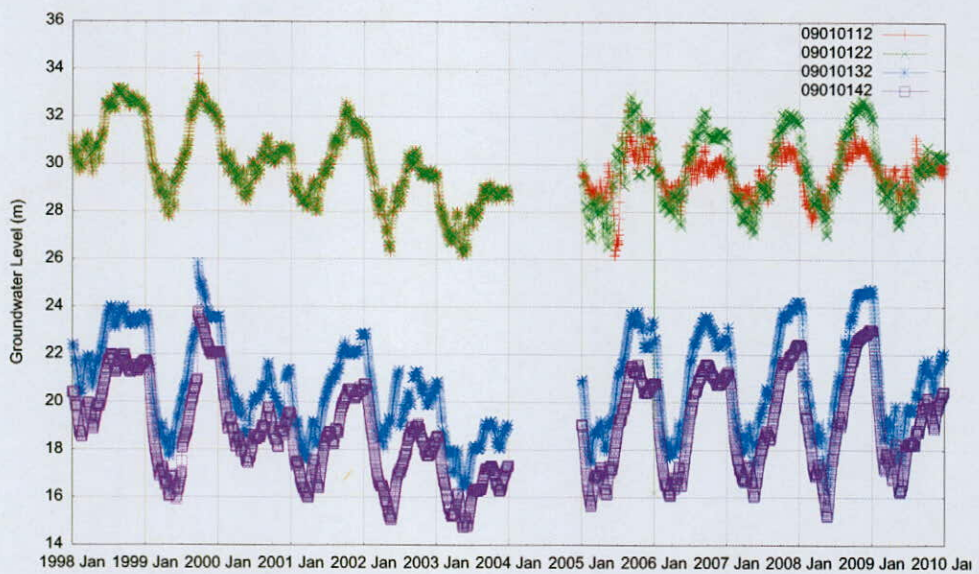


圖 A-25 虎溪地下水位歷線圖

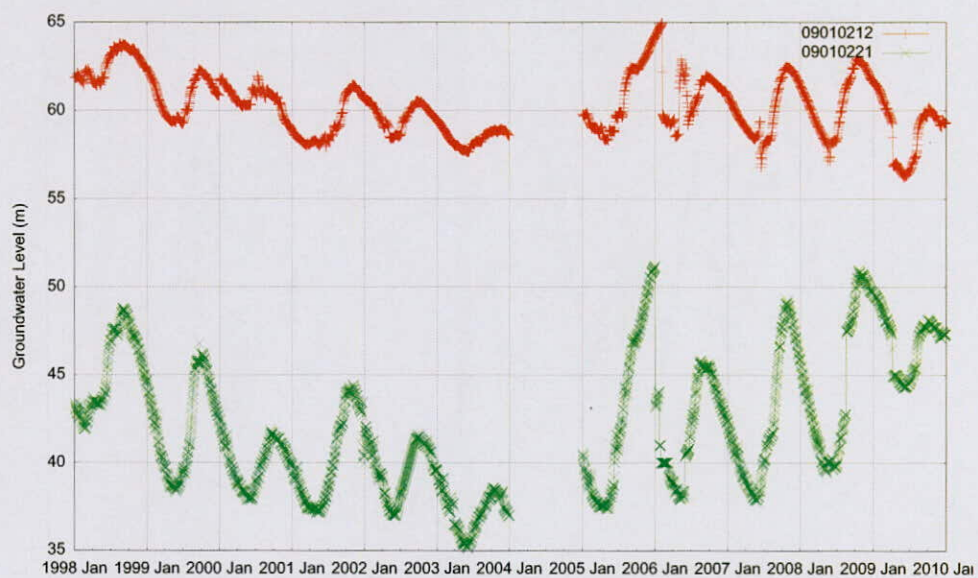


圖 A-26 石榴地下水位歷線圖

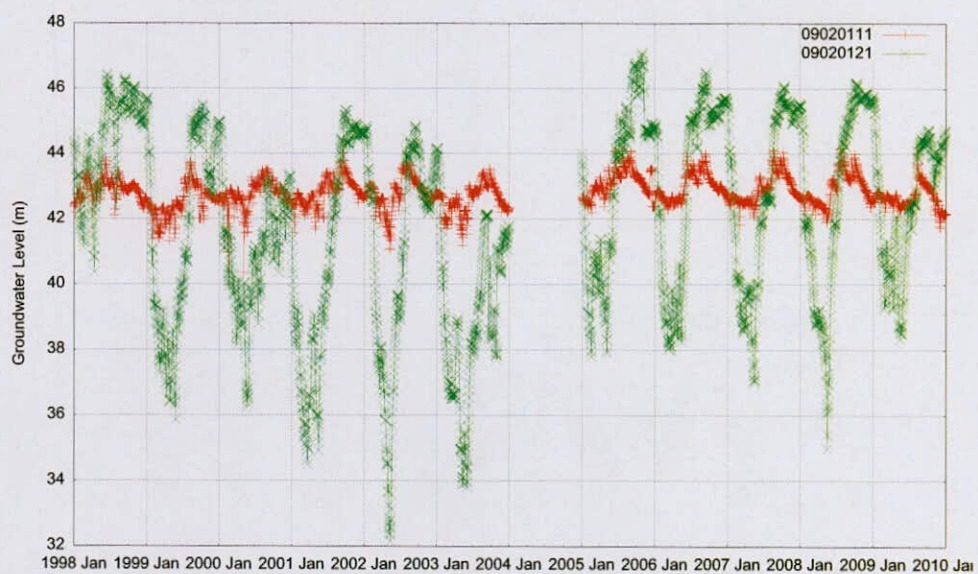


圖 A-27 溫厝地下水位歷線圖

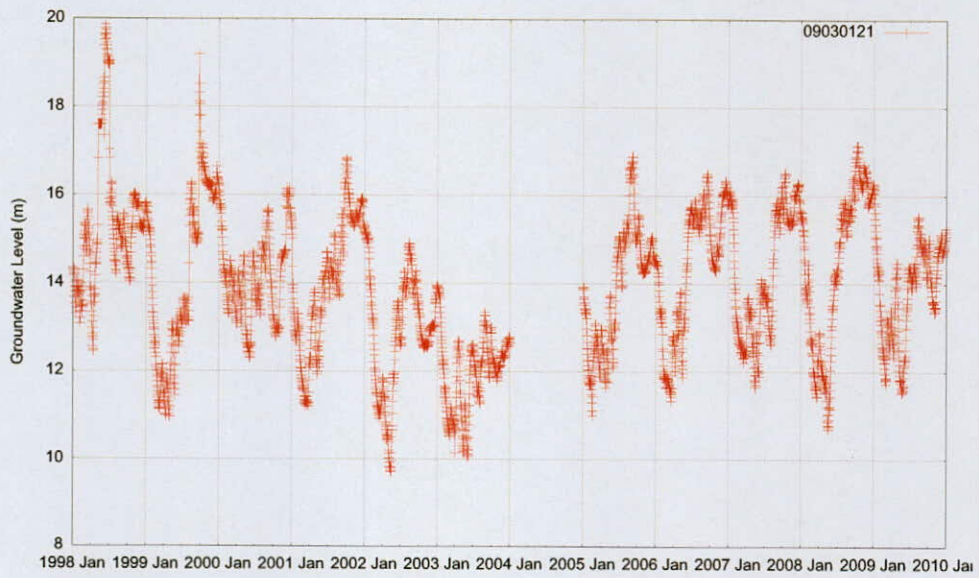


圖 A-28 虎尾地下水位歷線圖

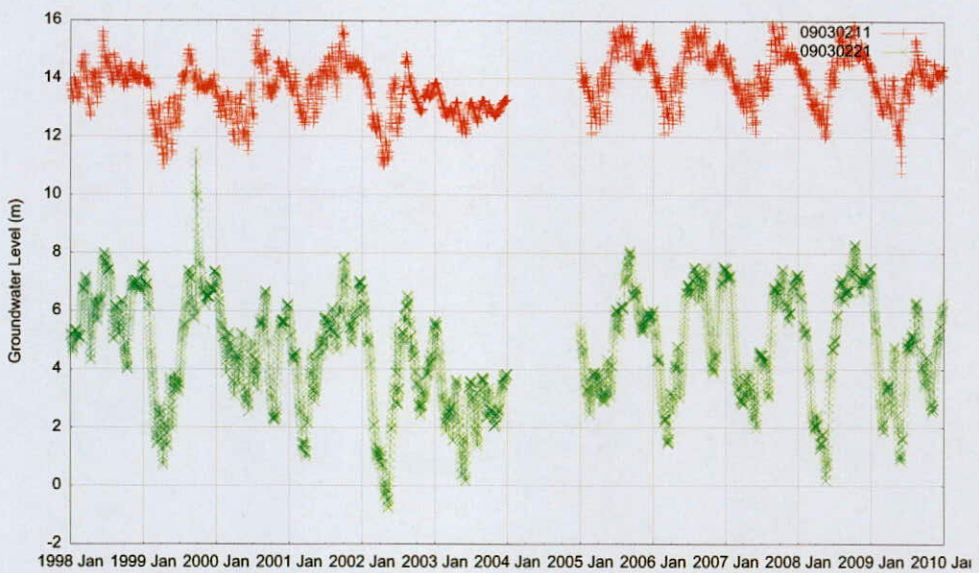


圖 A-29 芳草地地下水位歷線圖

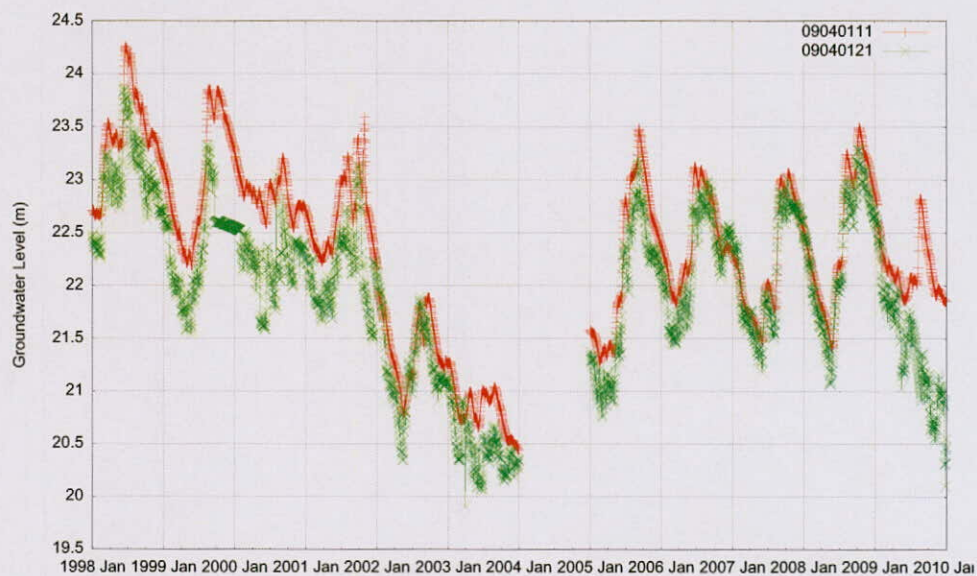


圖 A-30 西螺地下水位歷線圖

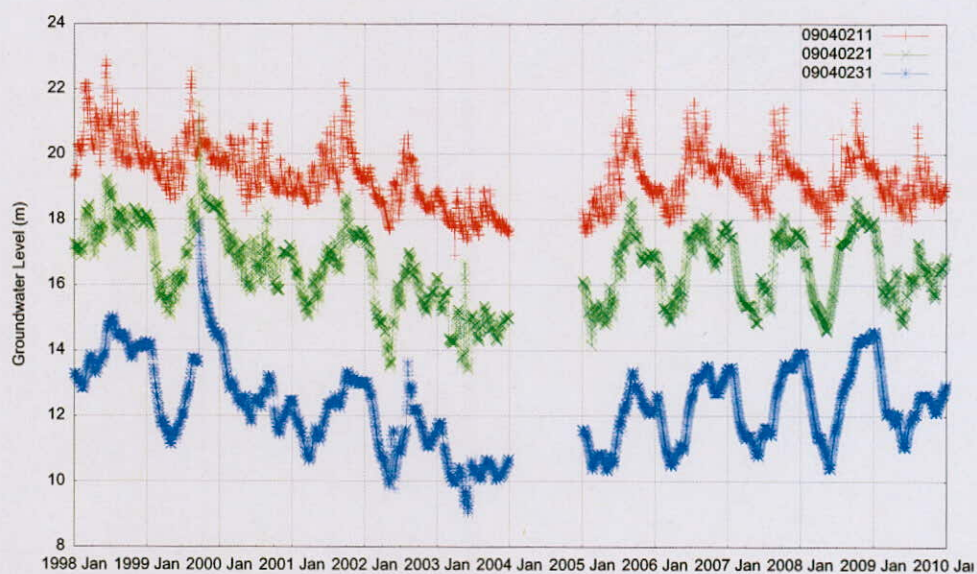


圖 A-31 九隆地下水位歷線圖

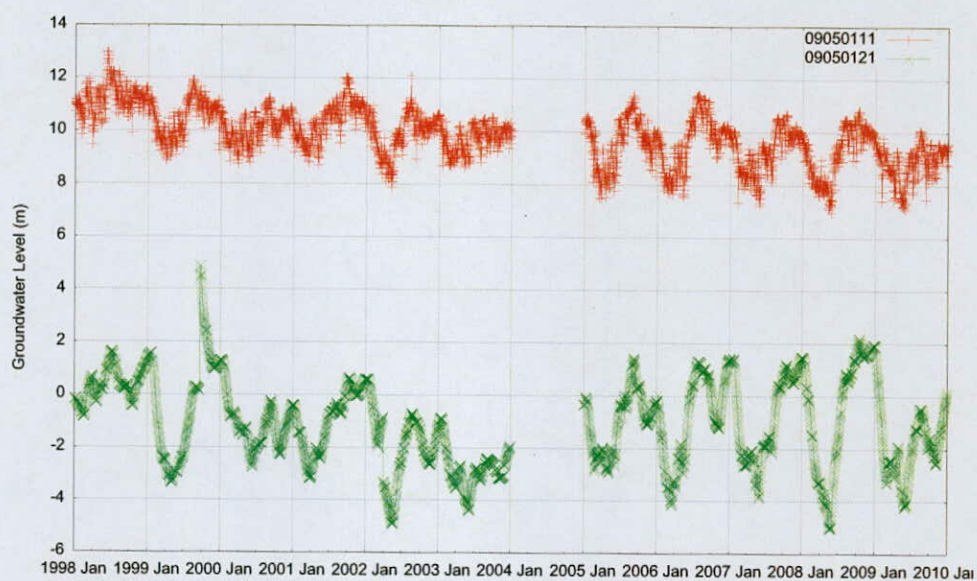


圖 A-32 宏崙地下水位歷線圖

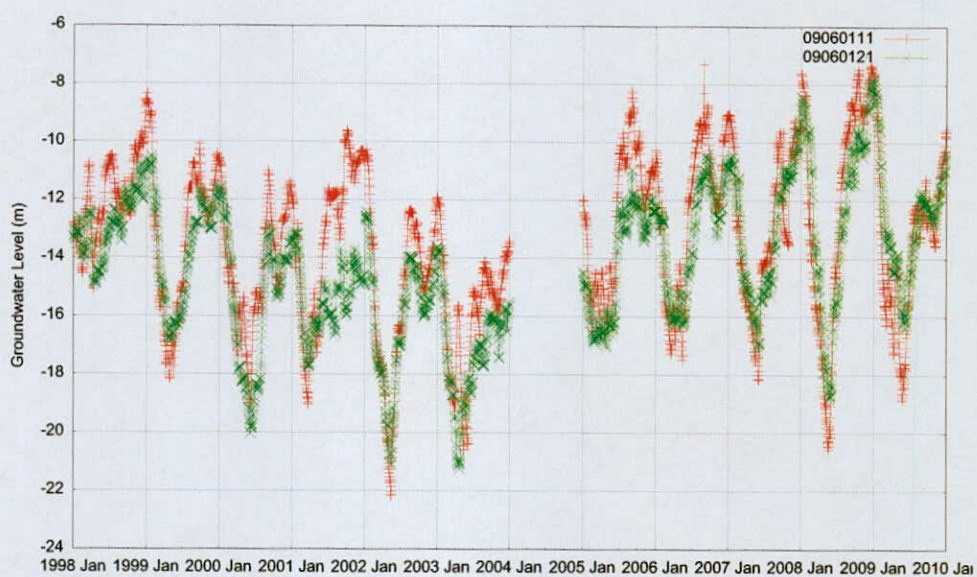


圖 A-33 北港地下水位歷線圖

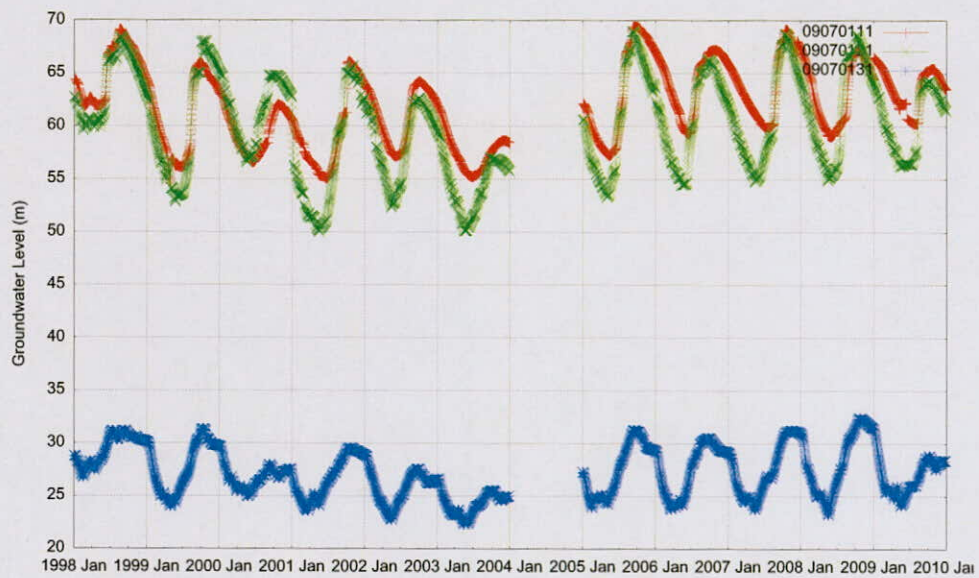


圖 A-34 東和地下水位歷線圖

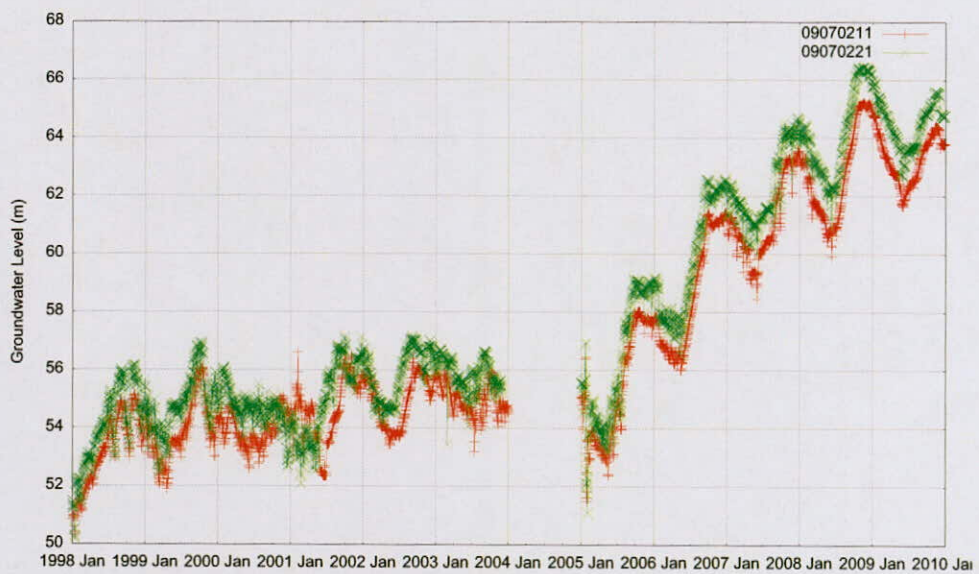


圖 A-35 崁腳地下水位歷線圖

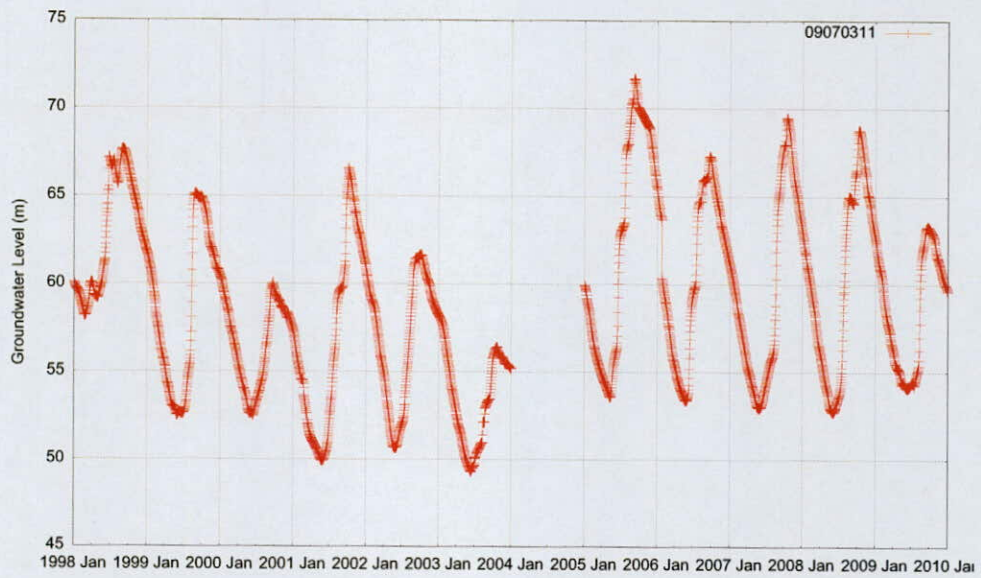


圖 A-36 古坑地下水位歷線圖

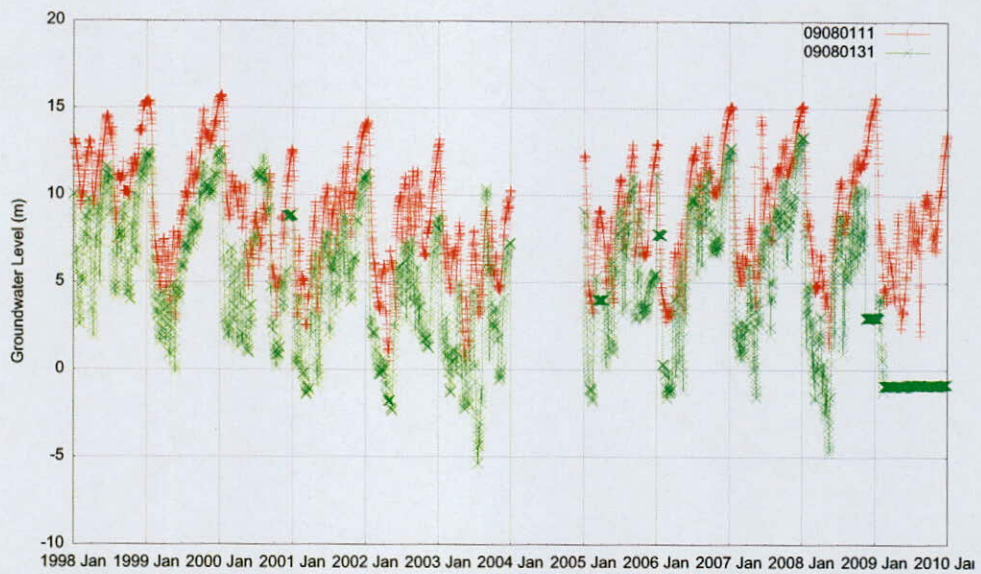


圖 A-37 嘉興地下水位歷線圖

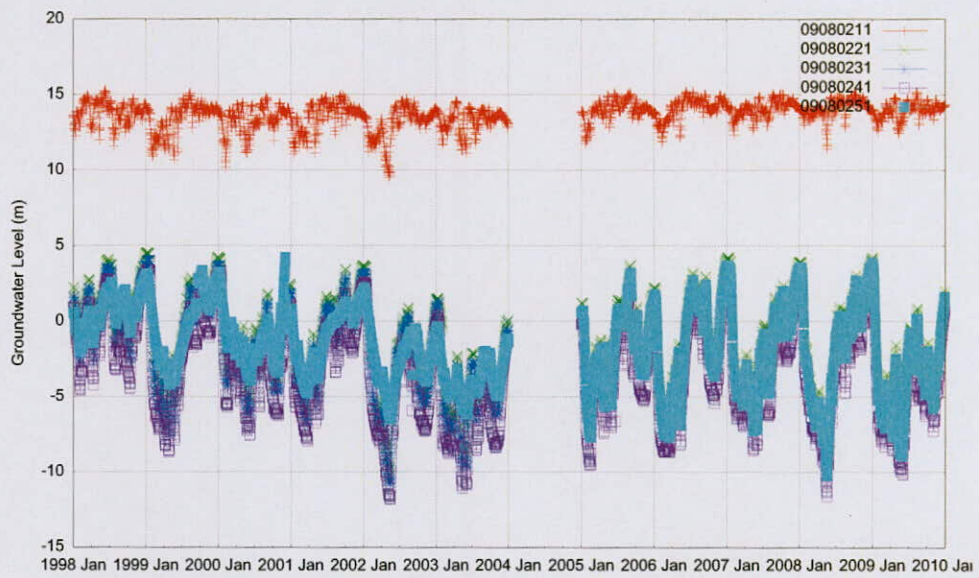


圖 A-38 舊庄地下水位歷線圖

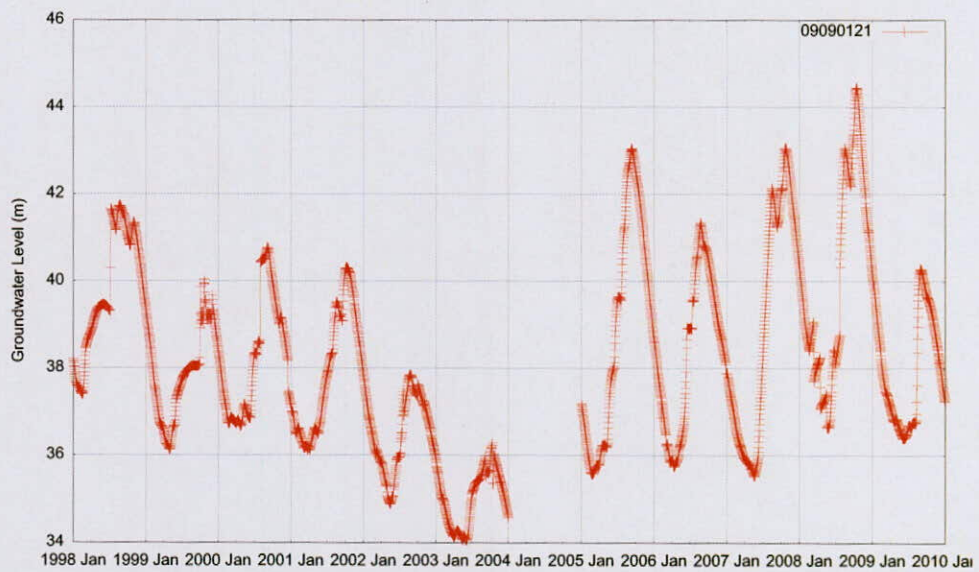


圖 A-39 六合地下水位歷線圖

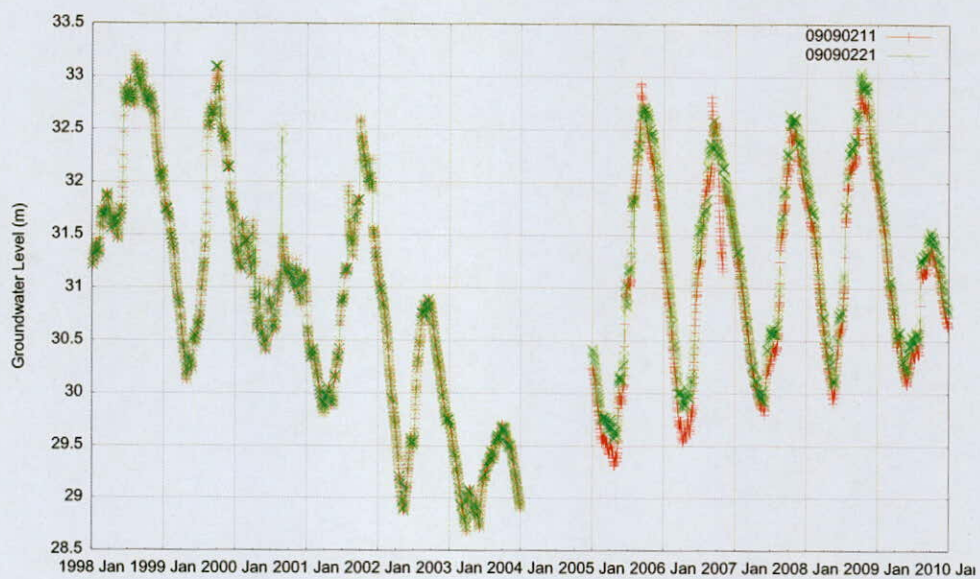


圖 A-40 荊桐地下水位歷線圖

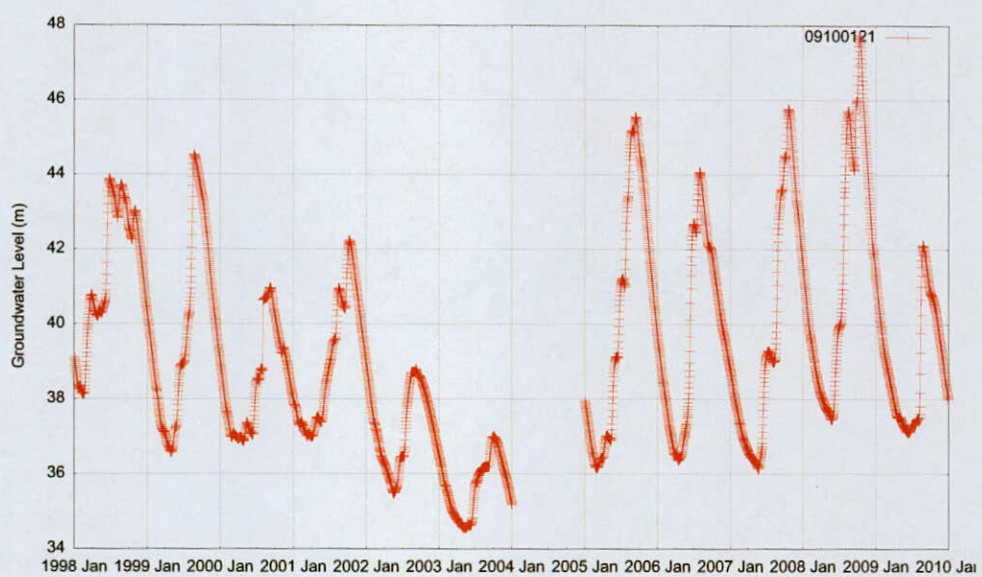


圖 A-41 烏塗地下水位歷線圖

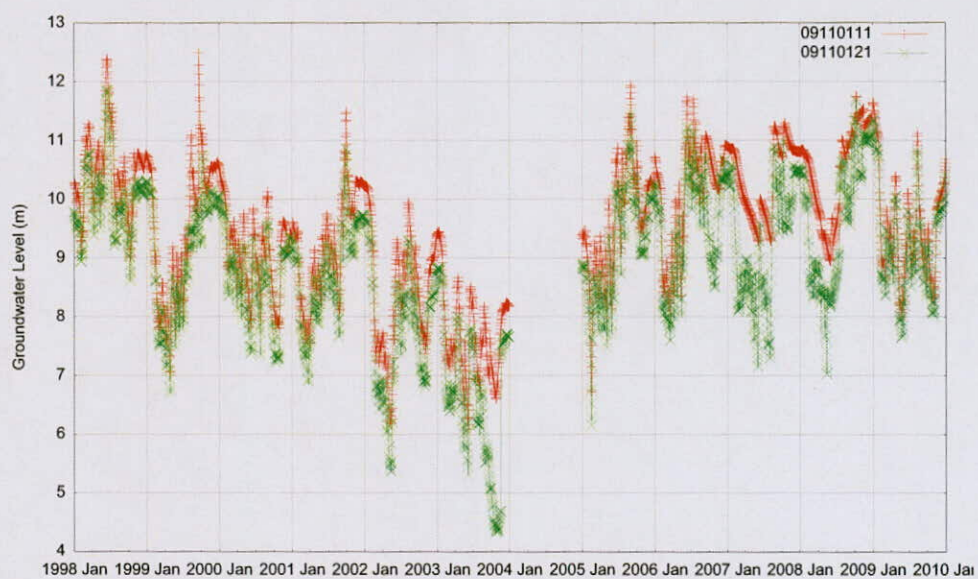


圖 A-42 港後地下水位歷線圖

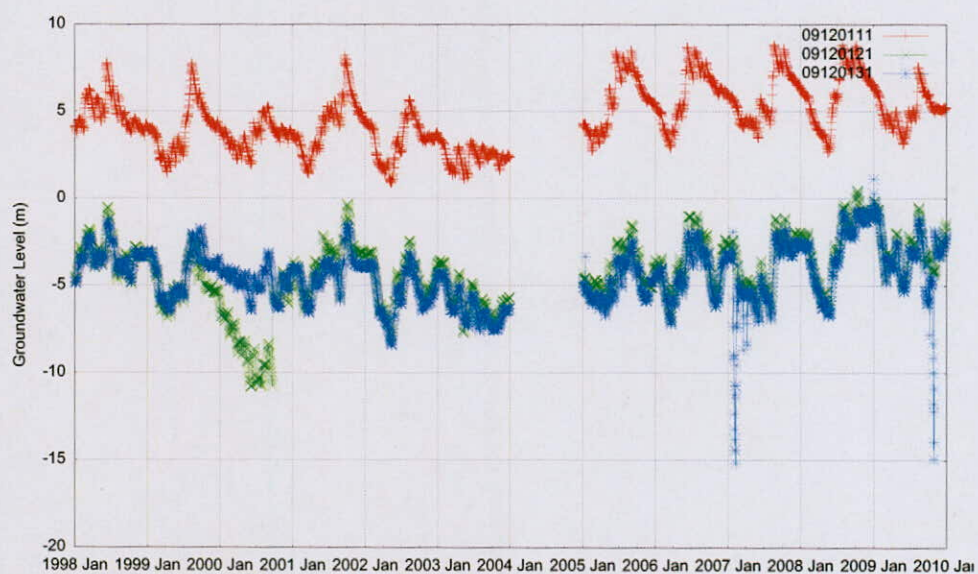


圖 A-43 豐榮地下水位歷線圖

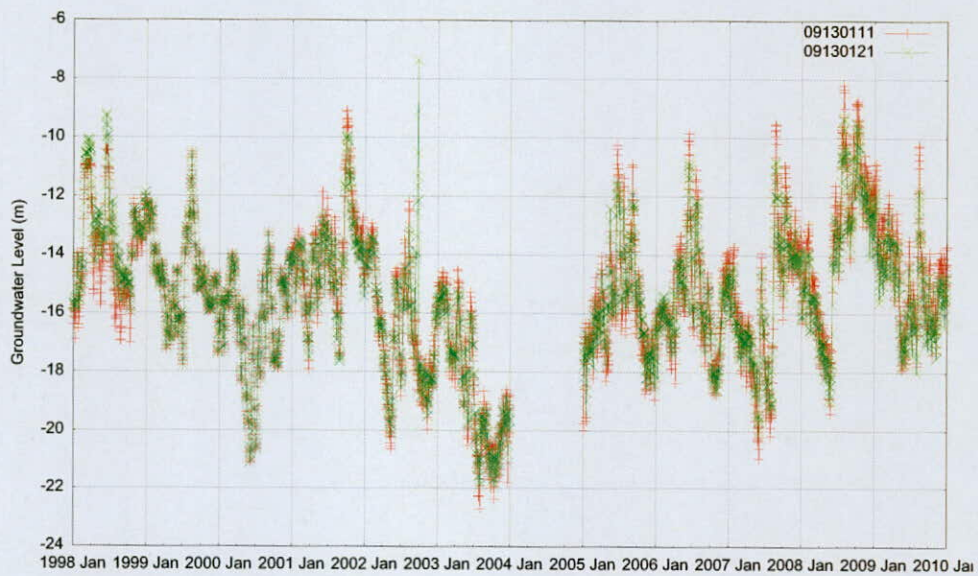


圖 A-44 後安地下水位歷線圖

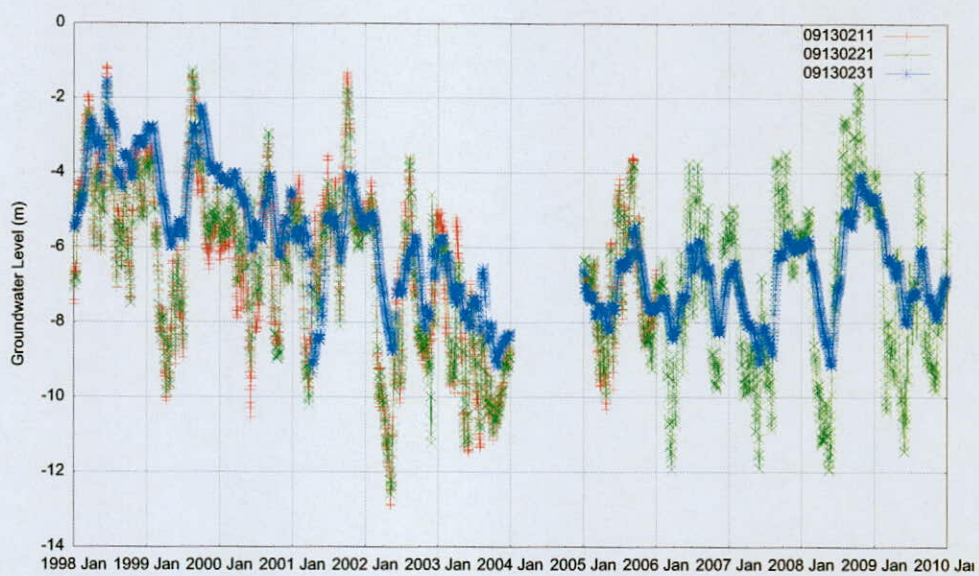


圖 A-45 興化地下水位歷線圖

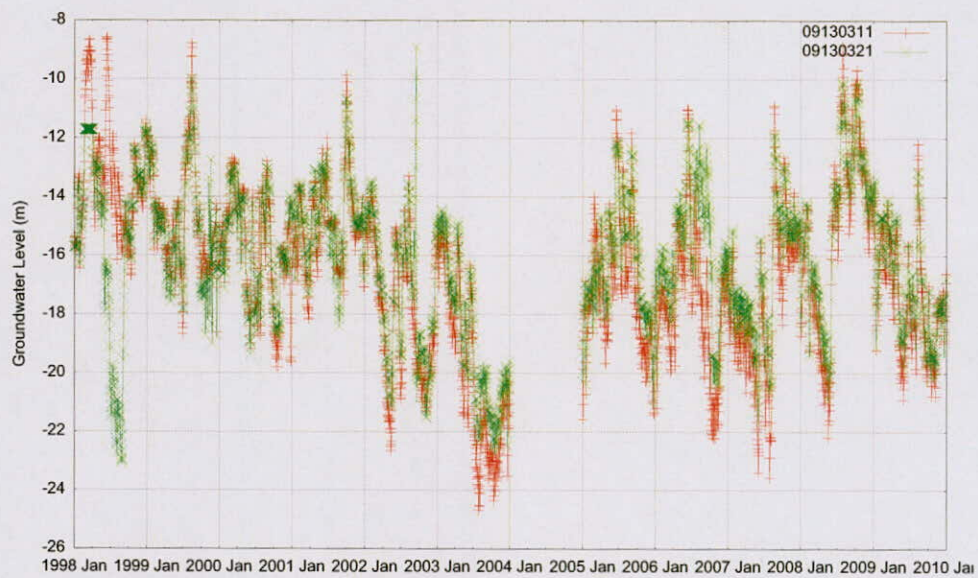


圖 A-46 海豐地下水位歷線圖

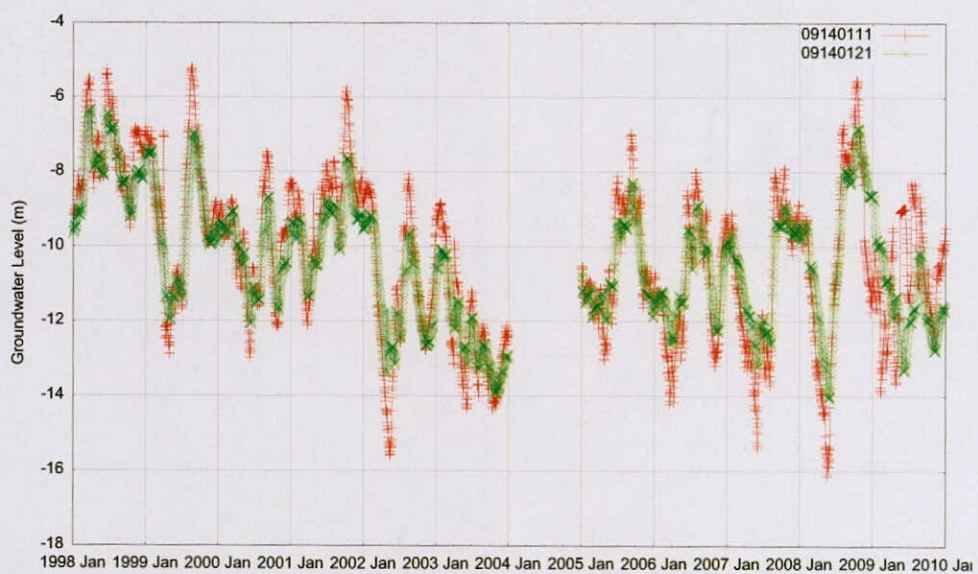


圖 A-47 安南地下水位歷線圖

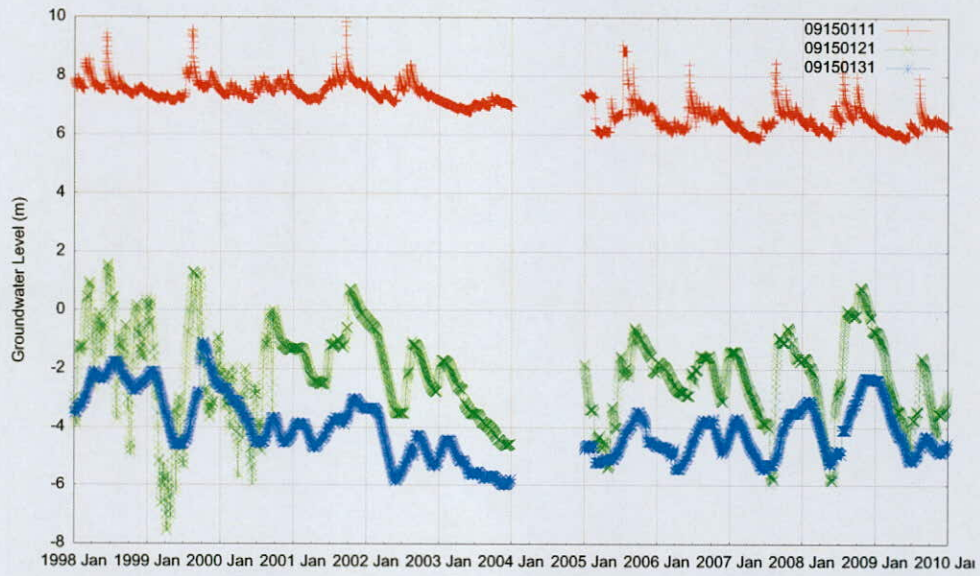


圖 A-48 田洋地下水位歷線圖

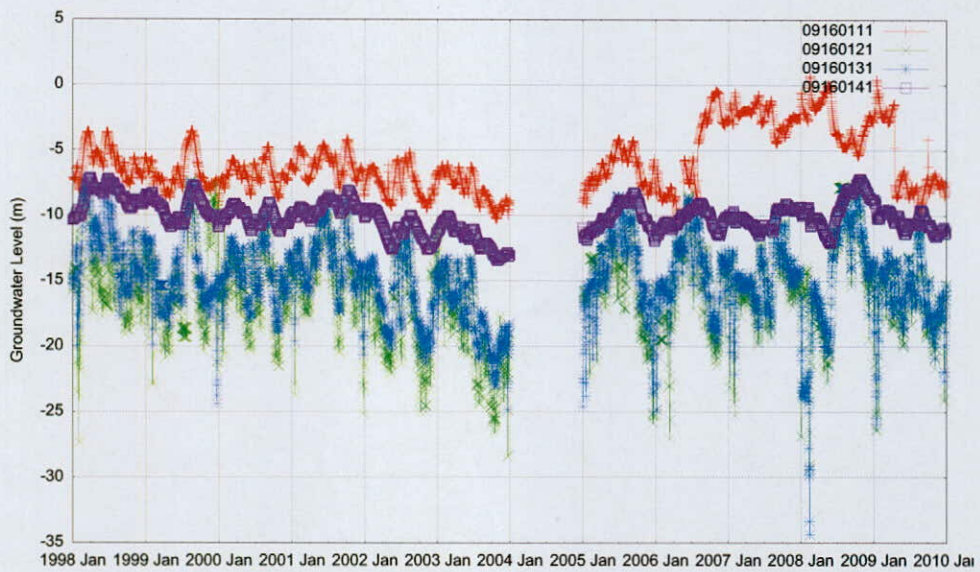


圖 A-49 海園地下水位歷線圖

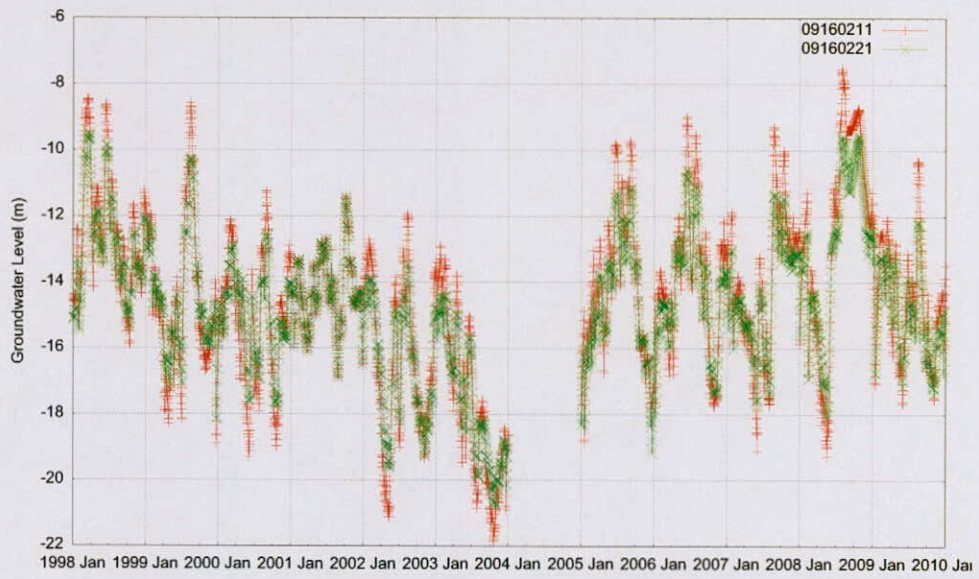


圖 A-50 和豐地下水位歷線圖

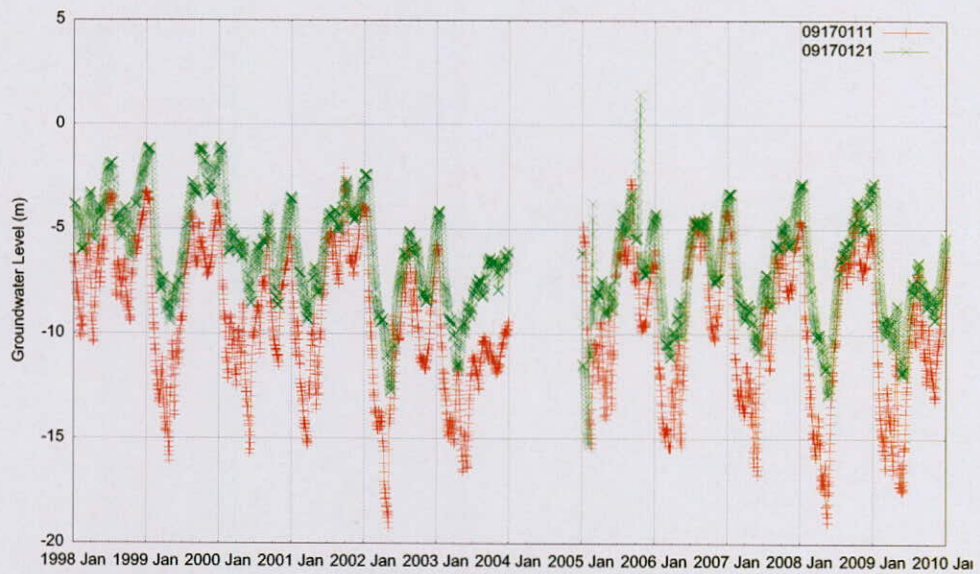


圖 A-51 崙子地下水位歷線圖

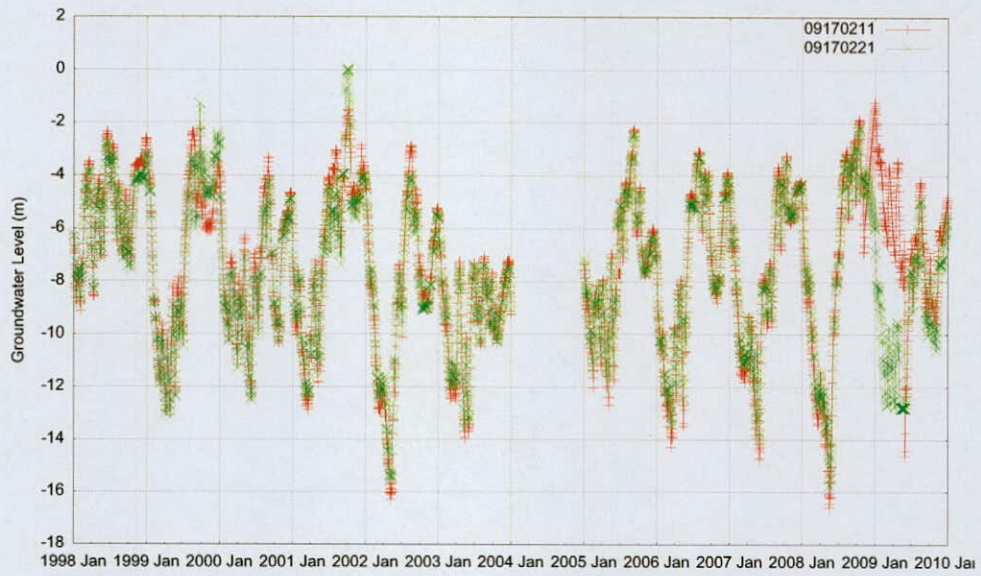


圖 A-52 元長地下水位歷線圖

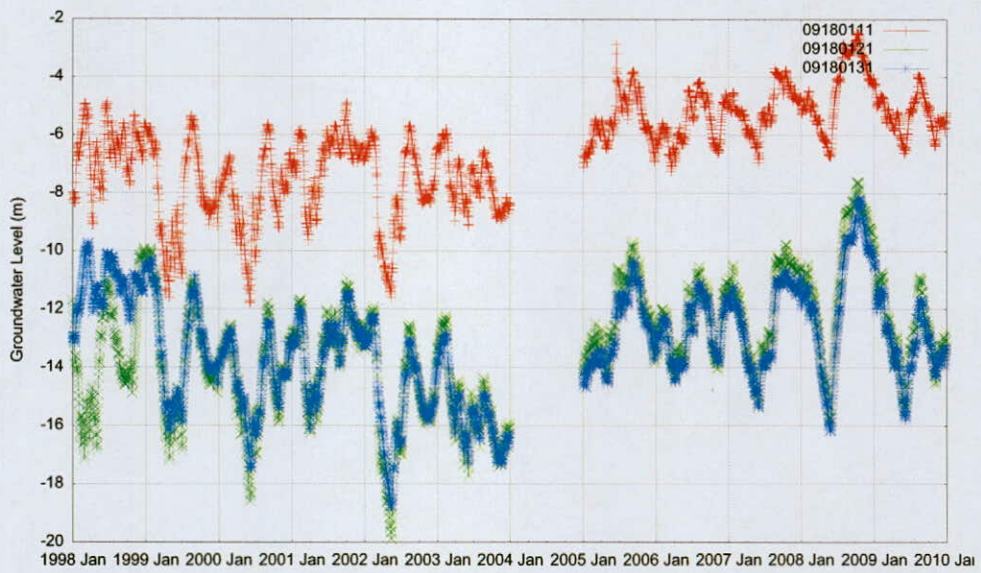


圖 A-53 箔子地下水位歷線圖

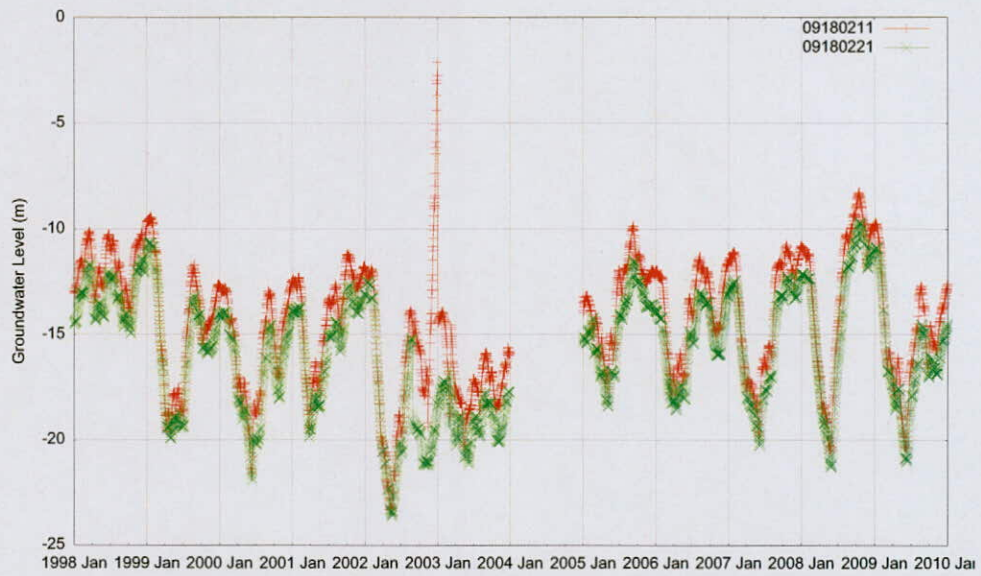


圖 A-54 蔡厝地下水位歷線圖

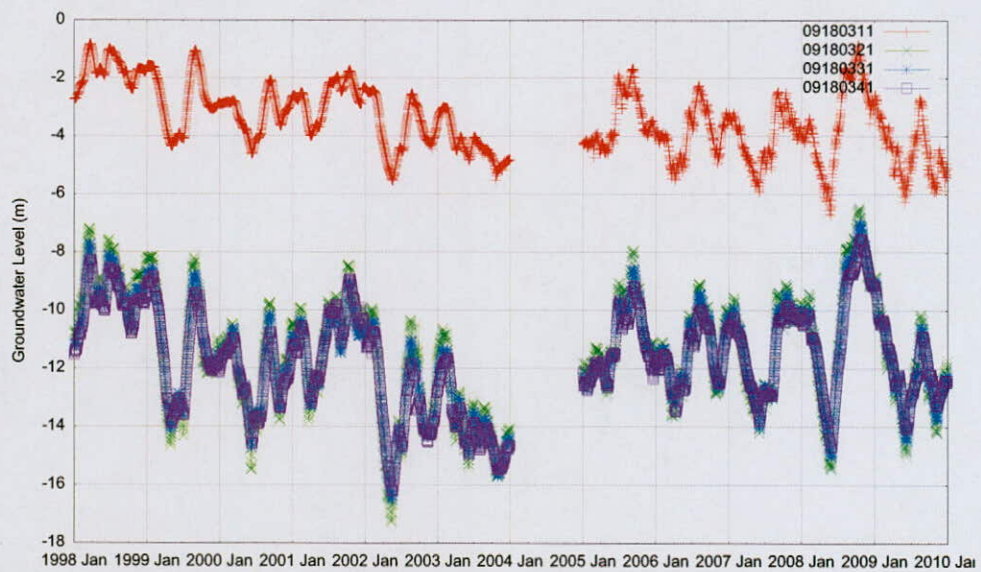


圖 A-55 明德地下水位歷線圖

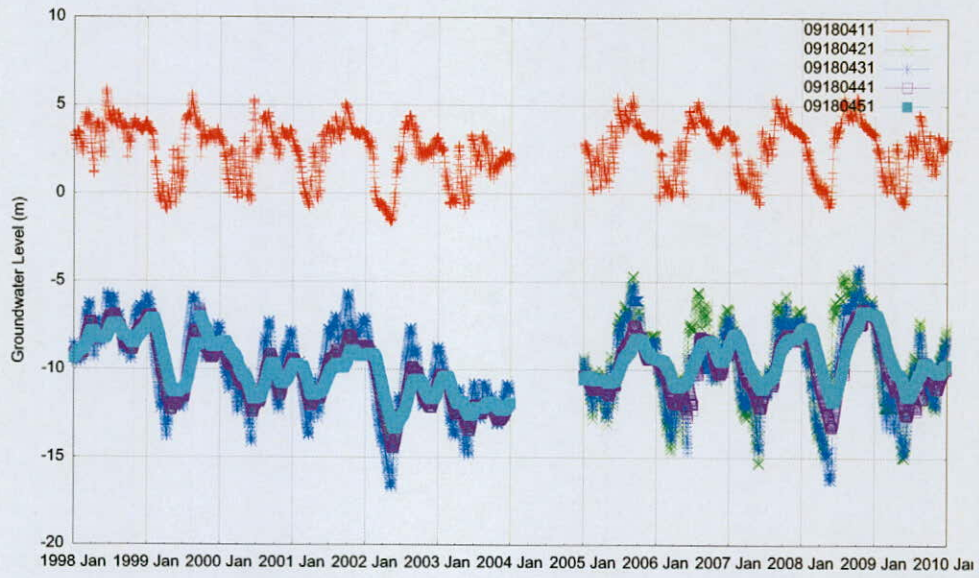


圖 A-56 東光地下水位歷線圖

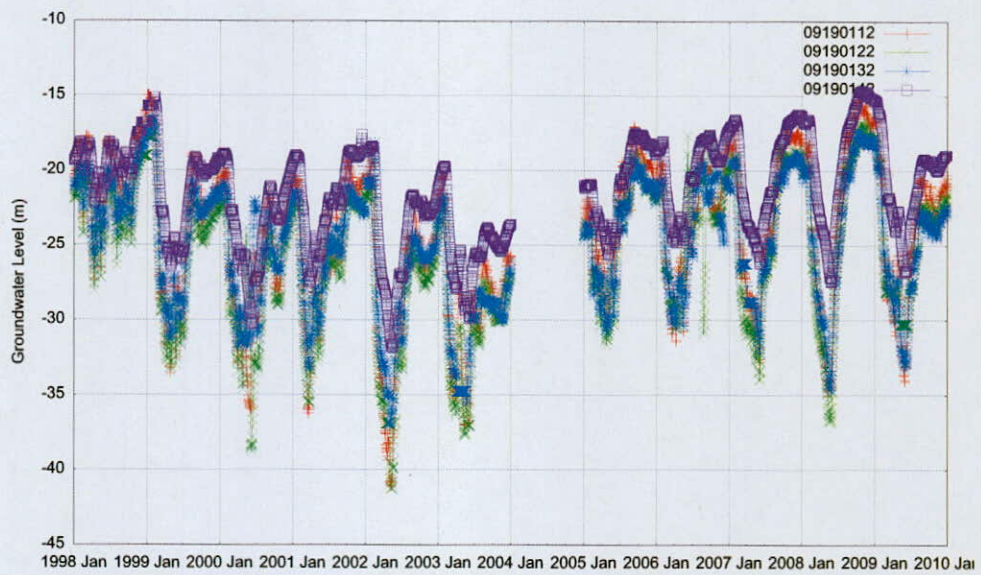


圖 A-57 宜梧地下水位歷線圖

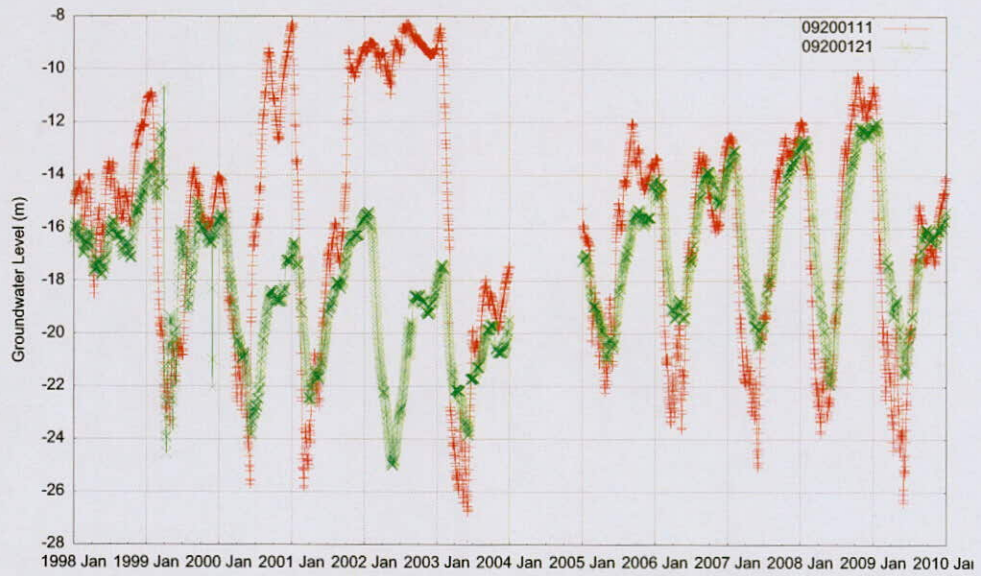


圖 A-58 水林地下水位歷線圖

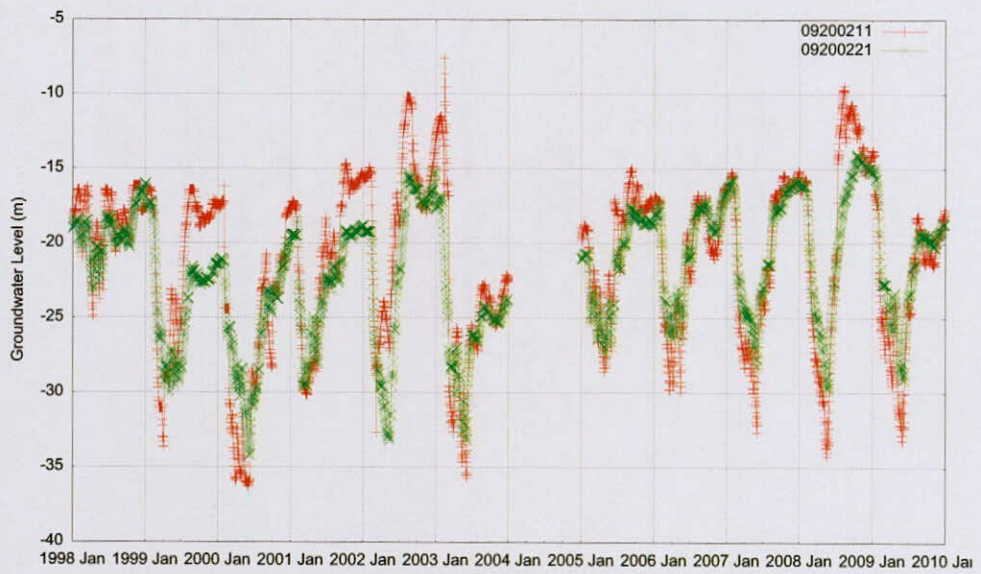


圖 A-59 大溝地下水位歷線圖

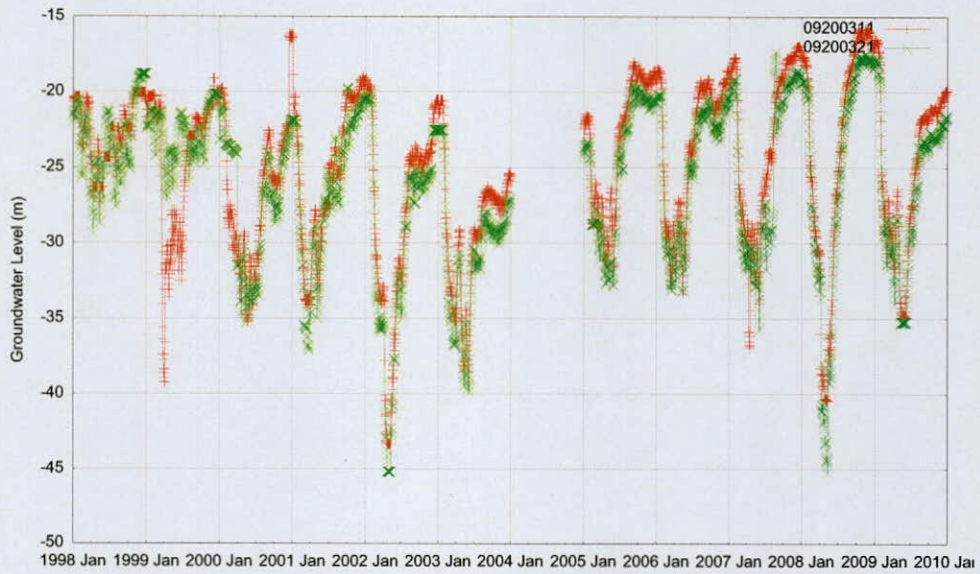


圖 A-60 瓊埔地下水位歷線圖

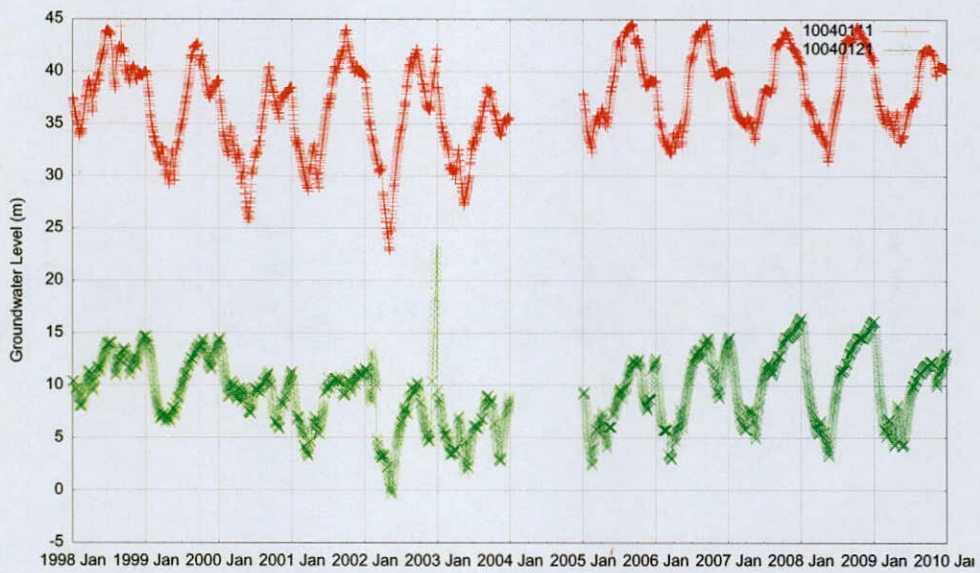


圖 A-61 三和地下水位歷線圖

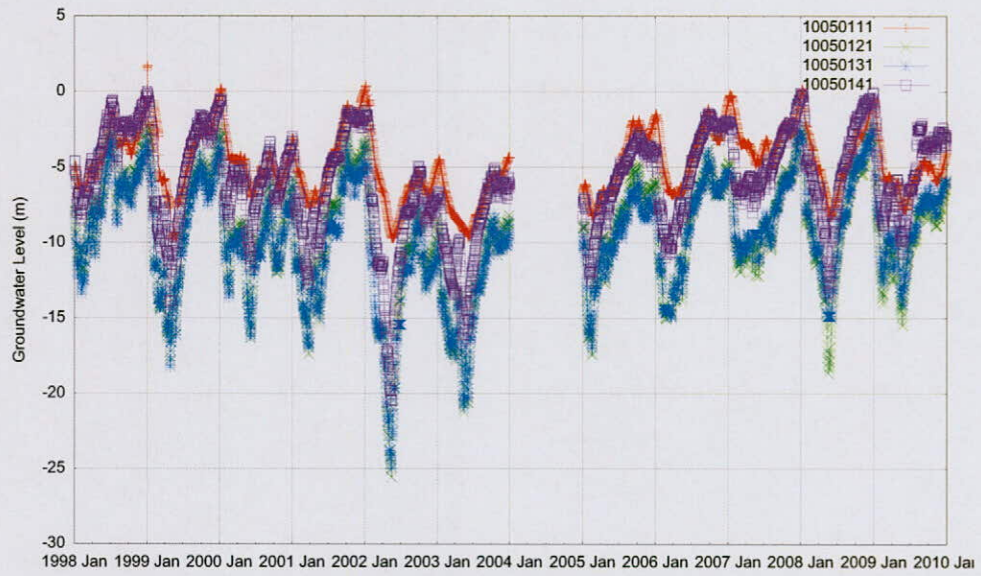


圖 A-62 東榮地下水位歷線圖

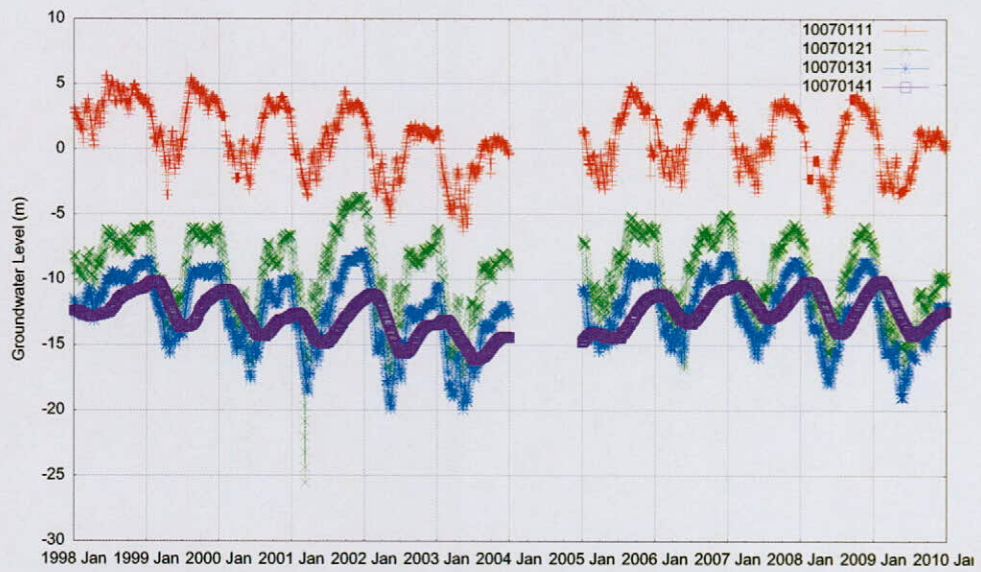


圖 A-63 安和地下水位歷線圖