經濟部

計畫編號：98-5926901000-04-01

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 (1/4)

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
中華民國九十八年十二月

計畫編號：98-5926901000-04-01

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 (1/4)

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

中華民國九十八年十二月

摘　要

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）實施進度規劃，預計 98 及 99 年度進行濁水溪沖積扇地下水區之全區地下水補注潛勢評估與地下水模式建置，包含扇頂補注區現地補充調查試驗及分析、地下水補注潛勢評估作業、地下水水位歷線法(及修正型)模式介紹、地下水補注潛勢評估作業平台及濁水溪沖積扇數值模式建置。

現地補充調查試驗及分析，包括複井抽水試驗、水質調查分析與監測、地電阻調查等，以建立更多地下水層儲水係數、水文地質基本資料、長期地下水水質和水位觀測數據與地電阻地層剖面資訊；地下水補注潛勢評估作業，則在以濁水溪沖積扇為例，建立地下水補注潛勢評估作業標準程序，並完成濁水溪沖積扇補注潛勢評估。其中潛勢評估作業包括選定補注潛勢影響因子、蒐集各因子圖層資料、評估因子間相互影響關係及給定影響權重，各因子圖層資料之處理及因子之加總分析皆以 GIS 為分析平台；本計劃應用 Fortran 電腦程式語言，建立地下水位歷線法模式，以地下水位歷線變動與地下水層儲水係數，直接進行抽水量、補注量、蓄水變化量和流失量之評估，模式可以選擇先逐站分析，再進一步累加為全區資訊，或直接以全區之儲蓄水量計算全區之補注量、抽水量與流失量估算。如選擇逐站計算方式，在側向交換量方面，可進一步應用達西公式釐清交換量之大小；地下水補注潛勢作業平台建置，則以水位歷線法與地下水補注潛勢評估程式為基礎，配合地下水位、雨量、水文地質參數與 GIS 圖層資料庫，分兩年進度(98 及 99 年)建立一地下水補注潛勢評估作業平台，提供使用者進行地下水補注區劃分之輔助工具，使用者除可利用本平台進行相關補注潛勢評估計算及以視覺展示方式呈現不同區位補注能力強弱，並可選定地下水區，進行區域之補注量與抽水量估計，並展示補注量與抽水量在空間上之分布情形；濁水溪沖積扇地下水數值模式建置，則將針對濁水溪沖積扇，配合水位歷線法推估地下水補注量及抽水量，並採用美國地質調查局(U.S.G.S)發展的 MODFLOW 程式建立數值模式。若以補注潛勢分數 40 分為一界線，可概略推估出扇頂補注區之範圍，與中央地質調查所以地電阻測深法及觀測井資料所推測之補注區界線及本計劃地電阻剖面方法研判之補注區界線範圍結果接近。濁水溪沖積扇之地下水位歷線法初步分析可得，相較於屏東平原，本區部分扇央與扇尾水井，較難找到退水曲線，顯示本區之抽水行為較

為複雜。

目前為本計畫第一年度成果，待後續整個計畫完成後，所得成果可供主管機關劃定地下水水源保護區之依據，並可藉此對保護區土地利用及水土污染防治提出適當的管制辦法。

關鍵詞：地下水補注、地下水水位、地下水模式、地下水觀測網

結論與建議

（一）結論

(1)地下水補注潛勢評估

本計劃使用類 DRASTIC 之潛勢計算方法，考量「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」等七項補注潛勢因子，藉由因子間相互影響關係圖給定權重，透過地理資訊系統(GIS)空間處理的功能，將七項補注潛勢因子分數整合成補注潛勢分數圖，完成濁水溪沖積扇補注潛勢評估。若以補注潛勢分數 40 分為一界線，概略推估扇頂補注區之範圍，則濁水溪沖積扇扇頂補注區約在彰化縣社頭、田中、溪州、二水，雲林縣莿桐、林內及南投縣竹山等鄉鎮，與中央地質調查所以地電阻測深法及觀測井資料所推測之補注區界線，及本計劃地電阻剖面方法研判之補注區界線範圍結果趨勢接近，惟仍有進一步檢討之空間。

(2)水位歷線法程式開發

本計劃針對濁水溪沖積扇 1997 至 2005 年之淺層觀測水位，進行資料檢查與分析，該時段內淺層可用之觀測水井合計 38 口觀測井，但缺漏比例亦高達 6 至 17%之間，因此必須進行資料之補遺，本計劃在此以相關係數選擇最相關之水井，再以線性迴歸公式補遺缺漏資料。

目前已初步完成地下水位歷線法電腦程式之開發，以 1997 至 2005 年之濁水溪沖積扇水位資料，應用電腦程式進行水位歷線法之分析，模擬成果與江崇榮(2006)同區域之前期結論近似，初步證明本程式之正確性。本程式可以節省大量之計算人力外，本程式亦可針對各降雨事件計算事件降雨量與對應之補注量，方便後續降雨量及補注量之關係分析。以濁水溪沖積扇水位資料進行地下水位歷線法計算可得，各站井之水位歷線，相較於屏東平原，本水區之水位歷線變化較為複雜，部分扇央與扇尾水井，較難找到退水曲線，顯示本區之抽水行為較為複雜，較不適合進行逐站分析。

(3)扇頂水文地質調查與參數

濁水溪沖積扇扇頂及臨近地層之水文參數可分成三大類：A 沖積

層、B 沖積層、火炎山段。A 沖積層的滲透性最好、K 值約 10^{-3}m/s，例如二水、田中、柑園、莿桐一、六合等井，濁水溪河床近一萬年來的河床沉積。B 沖積層的滲透性次之、K 值約 10^{-4}m/s，例如柑園二、莿桐二、烏塗等井，可能是濁水溪大於一萬年之冰期的河床沉積，可能含泥量較高。火炎山段的滲透性最差、K 值約 10^{-4}m/s 至 10^{-6}m/s，例如新民、新光、竹山、觸口等井，為數十萬年前的河流沉積，但因構造運動、已受擠壓及抬升。

(4)複井抽水試驗

本年度計畫於莿桐站及柑園站進行複井抽水試驗，莿桐站位於濁水溪南岸中游，靠近沖積扇扇央部分，觀測上下含水層(一)、(二)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（觀一）推測為漏壓（Leaky）含水層。觀一（O1）第 1 次複井抽水試驗，以 Neuman-Witherspoon 法分析，得 T = 3.461 m2/min，S = 0.0007299，r/B= 0.03485。第 2 次複井抽水試驗，亦以 Neuman-Witherspoon 法分析，得 T = 3.718 m^2/min，S = 0.0006849，r/B= 0.02947。

柑園站位於濁水溪北岸中上游，靠近沖積扇扇頂部分，柑園站觀一（O1）複井抽水試驗，以 Neuman 法分析，得 T =6.054 m^2/min，S = 0.0004856，Sy = 0.0408，β =0.00272。以 Boulton 法分析，前段（early-time） r/B=0.02，得 T = 4.760 m^2/min，S = 0.00116；後段 (late-time) r/B=0.02，得 T = 4.760 m^2/min，Sy = 0.120。民井（M1）複井抽水試驗，以 Neuman 法分析，得 T =7.835 m^2/min，S = 0.0004953，Sy = 0.01444，β =0.007478。

(5)水質調查分析

濁水溪沖積扇扇頂區歷年導電度的變化顯示，有多口井有鹹化的趨勢，以濁水溪南岸較為嚴重，接近半數的井，其導電度已超過灌溉水標準 750μS/cm。另降雨對莿桐、六合及柑園導電度有不同的影響。上覆泥層之含水層（莿桐）、地下水導電度會短暫升高，未有覆蓋層的礫石含水層（六合及柑園）導電度短暫降低。2009 年硝酸鹽污染監測顯示，新光及古坑井已超過環保署飲用水源標準。

(6)地電阻調查

由目前完成之地電阻剖面發現，補注區可能之邊界，並非一個明

顯的界線(boundary line)，而是應為一個邊界帶(boundary zone)，此邊界帶鄰近於原中央地質調查所推測之扇頂補注區分界線，並位於其東側(圖 3.4-26)。

(7) 地下水數值模式建置

本年度在濁水溪沖積扇數值模式部分，已完成濁水溪沖積扇地下水流穩態數值模式之建置，以及對穩態地下水流模式進行初步模式率定。其中，在模式率定部分，採用人工率定並以民國 89 年至民國 96 年濁水溪沖積扇各觀測井之觀測水位平均值，作為穩態模式之參照水位。

(二) 建議

(1) 綜觀濁水溪沖積扇之水位資訊，地下水位較難找到退水型態之線型，導致目前僅可以全區之儲蓄水量歷線計算平均抽水量。建議後續年度，可參考其他參數，將全區抽水量分配至各站。當各站抽水量訂定後，仍可利用各站之儲蓄水量歷線，逐站求得各站每日之補注量、抽水量與流出量。

(2) 2009 年硝酸鹽汙染監測顯示，新光及古坑井已超過環保署飲用水源標準。建議扇頂區應持續進行水質監測，因部份地下水已超過灌溉水標準，應評估調查該區農業灌溉之水質現況，並尋求因應之道。若鹽化情況與硝酸鹽汙染持續，也應評估對飲用水的影響。

(3) 由於地電阻調查所選用之施測方式為雙偶極距方式，雖然在理論上能對側向之地層變化或垂直之地質構造有較佳偵測能力，但在本區的施測，雙偶極法卻容易受到鄰近人為活動或建築物干擾，而無法正確呈現地下之水平延伸構造。因此未來繼續進行之長測線施測，將考慮嘗試利用受到人為活動干擾較小之 Wenner 方式進行，以減小人為活動之干擾。

目　錄

摘　要 I
結論與建議 III
目　錄 VI
表目錄 X
圖目錄 XIV
第一章 前言 1
1.1 計畫緣起及目的 1
1.2 計畫工作項目及內容 2
1.3 計畫區域概述 7
第二章 資料收集及彙整 10
2.1 國內外相關研究 10
2.2 研究資料蒐集 24
第三章 扇頂補注區現地補充調查及分析 34
3.1 扇頂補注區水文地質架構與參數 34
3.1.1 清水溪複井抽水試驗重新解析 38
3.1.2 二水站複井抽水試驗重新解析 40
3.1.3 烏塗站複井抽水試驗重新解析 44

3.1.4 扇頂補注區水文地質分析結論 48
3.2 複井抽水試驗 48
3.2.1 井體建置 49
3.2.2 抽水試驗 55
3.2.3 抽水井設置及抽水試驗現場施工照片 60
3.3 水質調查與分析 62
3.3.1 研究方法與步驟 62
3.3.2 地下水主要成分 69
3.3.3 成果分析 91
3.4 地電阻調查 92
3.4.1 地電阻調查原理及施作方法 93
3.4.2 工作項目 97
3.4.3 資料分析結果 98
3.4.4 一維地電阻測點與資料分析比對 109
3.4.5 成果分析 118
第四章 地下水補注潛勢評估作業 120
4.1 地下水補注潛勢評估作業程序建立 120
4.1.1 地下水補注潛勢評估作業程序 121
4.1.2 地下水補注潛勢因子圖層建立 123

4.1.2.1 地層內因 124
4.1.2.2 水文外因 130
4.1.2.3 綜合因素 132
4.2 地下水補注因子相互關係與權重劃分 142
4.2.1 土地利用 146
4.2.2 表層土壤種類 150
4.2.3 降雨與地下水位變化相關性 152
4.2.4 平均年降雨量 153
4.2.5 單位蓄水量變化 154
4.2.6 透水係數 155
4.2.7 河系密度 156
4.2.8 硝酸鹽濃度 157
4.3 地下水主要補注區初步劃分 158
第五章 地下水位歷線法(及修正型式)模式 163
5.1 地下水位歷線法理論介紹 163
5.2 修正型地下水位歷線法理論介紹 169
5.3 電腦程式開發 171
5.3.1 地下水位歷線法模式計算流程 171
5.3.2 程式計算流程 173

5.4 水位歷線法分析於濁水溪沖積扇之應用結果.....175
5.4.1 基本資料分析與補遺.....175
5.4.2 濁水溪沖積扇補注量推估分析.....180
第六章 地下水補注潛勢評估作業平台.....189
6.1 系統分析.....189
6.2 軟體架構.....194
6.3 系統實作.....196
6.3.1 資料庫建立.....196
6.3.2 使用者介面規劃.....199
第七章 濁水溪沖積扇地下水數值模式建置.....208
7.1 地下水數值模式發展簡介.....208
7.2 地下水數值模式建置流程.....209
7.3 濁水溪沖積扇地下水數值模式建置.....210
參考資料.....224
附錄一 莿桐與柑園站抽水試驗分析圖表
附錄二 期中報告審查意見及辦理情形
附錄三 期末報告審查意見及辦理情形
附錄四 本年度計畫工作會議紀錄
附錄五 本年度計劃出國研習訪查報告

表目錄

表 2.1-1、D 值之範圍及分數等級.....11

表 2.1-2、R 值之範圍及分數等級.....11

表 2.1-3、A 值之範圍及分數等級.....12

表 2.1-4、S 值之範圍及分數等級.....12

表 2.1-5、T 值之範圍及分數等級.....13

表 2.1-6、I 值之範圍及分數等級.....13

表 2.1-7、C 值之範圍及分數等級.....14

表 2.1-8、常用水文地質參數之權重表.....14

表 2.1-9、濁水溪沖積扇及屏東平原地區地下水位深度評分表.....15

表 2.1-10、濁水溪沖積扇及屏東平原地區淨補注量值之範圍及分數等級.....15

表 2.1-11、濁水溪沖積扇及屏東平原地區地形坡度之範圍及分數等級16

表 2.1-12、濁水溪沖積扇及屏東平原地區含水層介質評分表.....16

表 2.1-13、濁水溪沖積扇及屏東平原地區土壤介質評分表.....16

表 2.1-14、濁水溪沖積扇及屏東平原地區未飽和層影響評分表.....17

表 2.1-15、濁水溪沖積扇及屏東平原地區含水層水力傳導特性評分表17

表 2.1-16、地下水補注潛勢影響因子之權重表(Shaban et al., 2006)....19

表 2.1-17、地下水補注潛勢因子影響能力評估(Shaban et al., 2006)....20
表 2.2-1、含水層一(F1)42 口地下水觀測井資料列表 24
表 2.2-2、濁水溪沖積扇雙井抽水試驗實測儲水係數 27
表 2.2-3、本計劃蒐集中央氣象局雨量站資訊 27
表 2.2-4、本計劃蒐集經濟部水利署雨量站資訊 29
表 2.2-5、本計畫蒐集硝酸鹽濃度資料 30
表 2.2-6、本計畫蒐集圖資資訊 33
表 3.1-1、濁水溪扇頂補注區之複井抽水試驗結果與計畫建議 34
表 3.1-2、扇頂區之水文地質參數 35
表 3.1-3、濁水溪及清水溪河床下地層之水文地質參數 36
表 3.1-4、二水觀一含水層之水文地質參數 44
表 3.1-5、不同粒徑含水層之比出水率（Johnson, 1967） 44
表 3.3-1、彰雲扇頂補注區觀測井之基本資料 64
表 3.3-2、本計劃水質化驗項目及方法 66
表 3.3-3、飲用水源及灌溉用水質標準 67
表 3.3-4、扇頂區歷年地下水平均導電度(μS/cm) 73
表 3.3-5、扇頂之上下邊界歷年地下水平均導電度(μS/cm) 73
表 3.3-6、扇頂區 2009 年 6 月水質採樣及量測結果 74
表 3.3-7、扇頂區 2009 年 9 月水質採樣及量測結果 75

表 3.3-8、導電度 Mann-Kendall 趨勢分析結果 76
表 3.3-9、補注區及鄰近地下水之主要離子及鐵錳濃度(1999 年) 84
表 3.3-10、補注區及鄰近地下水之主要離子濃度(1999 年)..... 85
表 3.3-11、扇頂及鄰近地下水之礦物飽和指數 86
表 3.3-12、扇頂區 2009 年 6 月水質分析結果（mg/l） 87
表 3.3-13、扇頂區 2009 年 9 月水質分析結果（mg/l） 88
表 3.3-14、濁水溪扇頂補注區之歷年硝態氮濃度（NO_3-N mg/l） 90
表 4.1-1、地下水補注主要影響因子示意表 123
表 4.1-2、圖資製作工具 124
表 4.1-3、95 及 96 年國土利用調查委託製作範圍表 125
表 4.1-4、各雨量站徐昇氏網格之控制面積 134
表 4.1-5、各井之儲水係數與單位蓄水量變化 140
表 4.2-1、地下水補注潛勢因子權重計算表 144
表 4.2-2、地下水補注潛勢因子細項分類分數表 145
表 4.2-3、土地利用計畫分類表 147
表 4.2-4、表層土壤種類計劃分類表 150
表 4.3-1、地下水補注潛勢分數分級表 159
表 5.4-1、濁水溪沖積扇表層觀測井資料缺失分析表(合計 38 井) 177
表 5.4-2、濁水溪沖積扇表層觀測井補遺對照表 178

表 5.4-3、濁水溪沖積扇水平衡分析表 187

表 5.4-4、濁水溪沖積平均扇單日抽水量、一期與二期稻作抽水量表187

表 6.2-1、GIS 專案相關軟體清單表 196

圖目錄

圖 1.3-1、濁水溪海園-石榴水文地質剖面圖 8

圖 1.3-2、濁水溪沖積扇地下水觀測網站井分布圖 9

圖 2.1-1、在受壓含水層及非受壓含水層之地下水位深度 11

圖 2.1-2、地下水補注潛勢相互影響因子概念圖 19

圖 2.1-3、屏東平原入滲潛勢分級區域圖 22

圖 2.1-4、屏東平原區域補注分級區域圖 22

圖 2.2-1、含水層一(F1)42 口地下水觀測井分布圖 26

圖 2.2-2、雨量站位置圖 29

圖 2.2-3、硝酸鹽濃度各年資料數 30

圖 3.1-1、濁水溪及清水溪河床下水文地質剖面與參數 37

圖 3.1-2、清水溪河床四口觀測井之水位（台糖，1997） 38

圖 3.1-3、清水溪河床鑽探與複井抽水試驗（台糖，1997） 39

圖 3.1-4、(A)(B)清水溪河床複井抽水試驗結果解析 40

圖 3.1-5、二水觀一之複井抽水試驗結果（台糖，1993） 41

圖 3.1-6、(A）二水站地層與抽水試驗配置(B)部份貫穿示意圖 42

圖 3.1-7、(A)部份貫穿標準曲線前段疊合(B)部份貫穿標準曲線中後段疊合 43

圖 3.1-8、烏塗觀一之複井抽水試驗結果（台糖，1993）.....46
圖 3.1-9、(A)標準曲線前段疊合(B)標準曲線中後段疊合.....47
圖 3.1-10、扇頂及臨近地區透水係數 K 值統計.....48
圖 3.2-1、莿桐站抽水井井體構造圖.....50
圖 3.2-2、莿桐站抽水井井測圖.....51
圖 3.2-3、柑園站抽水井井體構造圖.....53
圖 3.2-4、柑園站抽水井井測圖.....54
圖 3.3-1、彰雲地區觀測井地下水及溪水採樣位置圖.....63
圖 3.3-2、(A)扇頂補注區可分為濁水溪扇及斗六扇(B)水文地質剖面示意圖.....65
圖 3.3-3、美國 In-situ Troll-200 水壓水溫導電度三合一自記測棒.....69
圖 3.3-4、彰雲地區地下水導電度（2001 年）.....70
圖 3.3-5、歷年導電度變化.....71
圖 3.3-6、彰雲扇頂地區地下水歷年導電度分布（μS/cm）.....72
圖 3.3-7、六合莿桐等五口井之導電度迴歸.....77
圖 3.3-8、影響扇頂地下水水質之因素.....78
圖 3.3-9、溪水及地下水之導電度.....79
圖 3.3-10、彰雲橋溪水導電度與颱風之關係.....80
圖 3.3-11、莿桐、六合及柑園導電度連續監測數據.....81

圖 3.3-12、地下水依主要成份分類 83
圖 3.3-13、地下水質演化模式 83
圖 3.3-14、彰雲扇頂之歷年硝態氮濃度 91
圖 3.3-15、彰雲扇頂硝態氮之平面分布 91
圖 3.4-1、地電阻探測儀器示意圖 93
圖 3.4-2、電流流動示意圖 94
圖 3.4-3、溫奈排列（Wenner Array）示意圖 96
圖 3.4-4、雙偶極排列（Dipole-dipole Array）示意圖 96
圖 3.4-5、二維地電阻剖面影像探測示意圖 96
圖 3.4-6、地電阻輪替式(Roll-along)陣列施測方式示意圖 97
圖 3.4-7、彰化地區地電阻長短測線及原推測補注區界線位置圖 98
圖 3.4-8、竹塘剖面與竹塘觀測井測資料(64”電阻井測) 對比結果..... 99
圖 3.4-9、柑園剖面與柑園觀測井測資料(64”電阻井測) 對比結果... 100
圖 3.4-10、柑園長距離測線之佈設位置 101
圖 3.4-11、柑園長距離測線之(a)左側 1200 公尺地電阻剖面影像，(b)右側 800 公尺地電阻剖面影像..... 102
圖 3.4-12、溪洲長距離測線之佈設位置 103
圖 3.4-13、溪洲長距離測線之(a)高速公路左側 0-400 公尺地電阻剖面影像，(b)右側 600-990 公尺地電阻剖面影像，(c)右側 800-1190 公尺地

電阻剖面影像，(d)右側 1000-1390 公尺地電阻剖面影像.....104
圖 3.4-14、北斗長距離測線之佈設位置 105
圖 3.4-15、北斗長距離測線之(a)左側 120-390 公尺地電阻剖面影像，(b)左側 320-590 公尺地電阻剖面影像，(c)左側 520-790 公尺地電阻剖面影像，(d)左側 730-990 公尺地電阻剖面影像，(e)左側 920-1190 公尺地電阻剖面影像，(f)右側 0-390 公尺地電阻剖面影像 106
圖 3.4-16、社頭東西向(EW 線)及南北向(NS-1 至 NS-5)長距離測線之佈設位置 107
圖 3.4-17、社頭東西向長距離測線之(a)左側 200-590 公尺地電阻剖面影像，(b)左側 400-800 公尺地電阻剖面影像.....108
圖 3.4-18、社頭南北向長距離測線 (a)NS-1 之 0-600 公尺地電阻剖面影像，(b)NS-2 之 0-600 公尺地電阻剖面影像，(c) NS-3 之 0-400 公尺地電阻剖面影像，(d) NS-4 之 600-1000 公尺地電阻剖面影像，(e) NS-4 之 800-1200 公尺地電阻剖面影像 108
圖 3.4-19、一維地電阻測點位置(經建版座標 TWD67) 110
圖 3.4-20、觀測井位置與一維電阻組測點竹塘剖面與 No.86 地電阻測點 111
圖 3.4-21、柑園剖面與地電阻測點資料 112
圖 3.4-22、柑園長距離測線研判之扇頂補注區邊界與一維地電阻資料

之比對圖 113
圖 3.4-23、溪洲長距離測線研判之扇頂補注區邊界與一維地電阻資料之比對圖 114
圖 3.4-24、北斗長距離測線研判之扇頂補注區邊界與一維地電阻資料之比對圖 116
圖 3.4-25、社頭長距離測線研判之扇頂補注區邊界與一維地電阻資料之比對圖 117
圖 3.4-26、濁水溪沖積扇由地電阻測深法及觀測井資料所推測之補注區界限(白色虛線)，以及由地電阻剖面方法研判之補注區界限帶(黃色虛線標示其左右界)..... 119
圖 4.1-1、地下水補注潛勢評估作業程序 122
圖 4.1-2、濁水溪沖積扇土地利用計畫分類圖層 126
圖 4.1-3、VBA 程式開發介面 126
圖 4.1-4、表層土壤種類原始圖層 128
圖 4.1-5、濁水溪沖積扇含水層一(F1)透水係數等值線圖 129
圖 4.1-6、濁水溪流域河系圖 130
圖 4.1-7、平均年降雨量因子選取之雨量站 131
圖 4.1-8、本計畫選取雨量站之平均年降雨量等值線圖 132
圖 4.1-9、降雨與地下水位變化相關性因子所選取之地下水井分布圖 133

圖 4.1-10、豐榮(1)地下水位上升量與各區平均降雨量線性迴歸(a)平原區(b)山區(c)全區 136
圖 4.1-11、各區降雨與受壓地下水井水位變化迴歸統計之 R^2 值比較圖 137
圖 4.1-12、各區降雨與非受壓地下水井水位變化迴歸統計之 R^2 值比較圖 137
圖 4.1-13、降雨與地下水位變化相關性等值圖 138
圖 4.1-14、單位蓄水量變化因子所選用之地下水井分布圖(參考自江崇榮等，2006，p.68)..... 141
圖 4.1-15、單位蓄水量變化等值圖 142
圖 4.2-1、地下水補注潛勢因子關係圖 144
圖 4.2-2、加權後土地利用潛勢分數分布圖 149
圖 4.2-3、加權後表層土壤種類潛勢分數分布圖 151
圖 4.2-4、加權後降雨與地下水位變化相關性潛勢分數分布圖 152
圖 4.2-5、1993~2008 年加權後平均年降雨量潛勢分數分布圖 153
圖 4.2-7、濁水溪沖積扇含水層一加權後透水係數潛勢分數分布圖 . 155
圖 4.2-8、加權後河系密度潛勢分數分布圖 156
圖 4.2-9、1997~2009 年硝酸鹽平均濃度等值線圖(mg/L)..... 158
圖 4.3-1、地下水補注區初步劃分 160
圖 4.3-2、地下水補注區初步劃分以及鄉鎮邊界 161

圖 4.3-3、40 分以上補注區界線與地電阻剖面研判之界線對比圖 162
圖 5.1-1、地下水水位歷線法計算流程圖 163
圖 5.1-2、區域降雨歷線與地下水位歷線起伏變化示意圖 164
圖 5.1-3、表層水層之概念模型示意圖 164
圖 5.1-4、徐昇氏多邊形 165
圖 5.1-5、建興站地下水層一(F1)88、89、90 年水位歷線和乾季退水線表 166
圖 5.1-6、降雨事件、補注量與流失量關係示意圖 167
圖 5.3-1、「地下水水位歷線法」電腦程式資料流程架構圖 172
圖 5.3-2、「修正型地下水水位歷線法」電腦程式資料流程架構圖 .172
圖 5.3-3、地下水位歷線法程式計算流程圖 174
圖 5.4-1、含水層一(F1)地下水觀測井分布圖 179
圖 5.4-2、原始水位與補遺後數列圖(田尾(1)) 180
圖 5.4-3、原始水位與線性推估數列圖(田尾(1)) 180
圖 5.4-4、線西(1)枯水期水位變化圖(1997 年) 181
圖 5.4-5、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(1997 年) 182
圖 5.4-6、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(1998 年) 182
圖 5.4-7、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(1999 年) 183
圖 5.4-8、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2000 年) 183

圖 5.4-9、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2001 年).....184
圖 5.4-10、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2002 年).....184
圖 5.4-11、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2003 年).....185
圖 5.4-12、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2004 年).....185
圖 5.4-13、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2005 年).....186
圖 5.4-14、場次降雨量與補注量關係圖 188
圖 5.4-15、場次降雨天數與補注量關係圖 188
圖 6.1-1、地下水補注潛勢評估作業平台架構圖 190
圖 6.1-2、經濟部水利署水文水資源資料管理供應系統 191
圖 6.1-3、國聖(1)之日觀測水位畫面.....192
圖 6.1-4、國聖(1)之日觀測水位原始碼.....192
圖 6.1-5、內插演算輸出成果圖 194
圖 6.2-1、SuperGIS 桌上型 GIS 系統.....195
圖 6.3-1、系統開發畫面 197
圖 6.3-2、將網頁內容轉存成檔案 197
圖 6.3-3、雨量資料庫(C0K300)範例 198
圖 6.3-4、地下水補注潛勢評估作業平台網路架構圖 198
圖 6.3-5、地下水補注潛勢評估作業平台使用者介面執行流程圖 200
圖 6.3-6、地下水補注潛勢評估作業平台模組主選單 201

圖 6.3-7、水位歷線補注評估選取資料來源介面 201
圖 6.3-8、使用者自行建立資料選取介面 202
圖 6.3-9、水位歷線法上傳輸入檔介面 202
圖 6.3-10、修正型水位歷線法上傳輸入檔介面 203
圖 6.3-11、程式計算完畢訊息介面 203
圖 6.3-12、資料庫自動建立資料選取介面 204
圖 6.3-13、選取計算地下井井號資料介面 204
圖 6.3-14、選取雨量資料介面 204
圖 6.3-15、地下水補注潛勢評估介面 205
圖 6.3-16、使用者自行建立設定介面 206
圖 6.3-17、選擇地下水區及補注潛勢因子介面 207
圖 6.3-18、補注潛勢因子設定介面 207
圖 7.2-1、地下水數值模式建置流程示意圖 209
圖 7.3-1、濁水溪沖積扇概念分層 211
圖 7.3-2、濁水溪沖積扇地下水邊界之概念圖 212
圖 7.3-3、濁水溪沖積扇模式之格網劃分 214
圖 7.3-4、濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網劃分 215
圖 7.3-5、濁水溪沖積扇模式第 2~7 分層格網劃分 215
圖 7.3-6、濁水溪沖積扇模式第 47 列格網劃分剖面圖 216

圖 7.3-7、濁水溪沖積扇模式第 1 分層徐昇氏網格分區 217
圖 7.3-8、濁水溪沖積扇模式第 3 分層徐昇氏網格分區 218
圖 7.3-9、濁水溪沖積扇模式第 5 分層徐昇氏網格分區 219
圖 7.3-10、濁水溪沖積扇模式第 7 分層徐昇氏網格分區 220
圖 7.3-11、第 1 層平均觀測水位 222
圖 7.3-12、第 1 層穩態模擬水位 222
圖 7.3-13、第 3 層平均觀測水位 222
圖 7.3-14、第 3 層穩態模擬水位 222
圖 7.3-15、第 5 層平均觀測水位 223
圖 7.3-16、第 5 層穩態模擬水位 223
圖 7.3-17、第 7 層平均觀測水位 223
圖 7.3-18、第 7 層穩態模擬水位 223

第一章 前言

1.1 計畫緣起及目的

經濟部自民國 81 年起至 97 年止，執行「臺灣地區地下水觀測網整體計畫」，執行期程分三期，於臺灣九個地下水區及恒春和澎湖地區進行水文地質調查研究及地下水觀測井建置工作，已完成建立臺灣地區水文地質基本資料、完善之地下水監測系統、開發水文地質資料庫。水文地質調查研究共完成 332 口（岩心總長度 67231 公尺）水文地質鑽探進行岩心分析研究；水文地質資料庫提供儲存和處理各項調查分析結果；研究成果除釐清臺灣地區地下水水文地質架構外，並已初步釐訂濁水溪沖積扇和屏東平原地下水區之地下水補注區，更進一步利用地下水位歷線和地下水層儲水係數，直接進行濁水溪沖積扇和屏東平原地下水抽水量、補注量、蓄水變化量和流失量之評估，認為地下水水位歷線分析法是具體可行的地下水收支分析途徑。

然而為提高地下水天然補注區範圍劃定及補注量評估之精確度，尚需補充建立更詳細之地下水層儲水係數、水文地質基本資料及長期地下水水質和水位觀測數據，再結合地下水水位歷線分析法程式化，進行地下水補注潛勢評估及建立地下水流數值模式；所得成果可供主管機關劃定地下水水源保護區之依據，希望能藉此對於保護區土地利用及水土污染防治提出適當的管制辦法，使地下水資源的管理開始朝向永續利用的目標跨出一大步。

水資源的保育無疑的是國家重要建設一部分，因此保護地下水源是刻不容緩的工作，而研究水文地質及評估地下水資源，分析地下水補注機制與現地水力試驗與監測則為必要的工作。過去之研究經驗顯示，要明瞭各調查區內地下水資源，則必須先掌握地下水位的變化、水文地質參數、補注來源、水質地化背景、概念模型及地下水流模式；而「地下水補注潛勢評估與地下水模式建置」的研究成果對地下水補注區的劃定、補注量的評估、水平衡分析、水質性質與演化及水資源保育管理均有很大的幫助。因此，本計畫擬透過現地試驗及監測、地下水水位歷線分析法、地下水補注潛勢分析及地下水流模式模擬之研究，建立各調查區域之相關基礎數據，作為分析各地下水補注區水文地質的參考依據。

1.2 計畫工作項目及內容

本計畫係依「臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估」，規劃自 98 年度至 101 年度止，預計執行 4 年；完成濁水溪沖積扇、屏東平原地下水區之地下水補注區補注機制及地下水流模式的建立與分析工作。各年度工作規劃如下：98 及 99 年度進行濁水溪沖積扇地下水區地下水補注機制研究、地下水流模式建立及地下水補注區劃分；100 及 101 年度進行屏東平原地下水區地下水補注機制研究、地下水流模式建立及地下水補注區劃分。

地下水補注機制及地下水流數值模式建立之執行，主要係整合分析相關調查成果並配合水文地質試驗井鑽鑿作業，進行抽水試驗及地下水水質監測工作。本年度主要工作項目及成果與 99-101 年主要工作項目及內容概述如下：

1. 98 年度

(1) 資料收集及彙整

本計劃已就濁水溪沖積扇水文地質調查、地質鑽探等資料進行蒐集，完成地下水水位、地下水水質、土地利用、土壤圖、雨量、地表地形及河川水系等資料收集，並彙整國內外地下水補注及保育相關報告與文獻，以作為劃定研究區域重要地下水補注區，及建置地下水流數值模式之參考。

(2) 地下水補注潛勢評估作業程序建立

地下水補注潛勢評估作業程序的建立，為本計畫重點工作項目之一，本年度以濁水溪沖積扇為例，參考相關文獻的作法，配合濁水溪沖積扇水文地質特性，選定土地利用、表層土壤種類、河系密度、透水係數、平均年降雨量、降雨與地下水位變化相關性、單位蓄水量變化等七個因子，為評估濁水溪沖積扇補注潛勢的主要因子。除了作業程序建立外，本年度並初步完成濁水溪沖積扇補注潛勢評估，並進一步進行濁水溪沖積扇補注區的劃分(工作項目(6))。

(3) 地下水水位歷線法電腦作業流程規劃及程式開發。

地下水位歷線法可根據地下水位長期變化資料，配合適當的

假設，推估出濁水溪沖積扇之補注量與抽水量，而可提供後續建立數值模式(工作項目(7))的參考，其中補注量更可與前述補注潛勢評估(工作項目(2))結果互相比較。

本計劃應用 Fortran 電腦程式語言，建立地下水位歷線法模式，以地下水位歷線變動與現地複井抽水試驗獲得之地下水層儲水係數，直接進行抽水量、補注量、蓄水變化量和流失量之評估，所估算之補注量可協助地下水補注潛勢評估作業程序之建立，抽水量則可供濁水溪沖積扇數值模式建置模擬之使用，且藉由電腦程式開發，讓水位歷線法更容易執行計算。

本計劃建立之地下水位歷線法模式可選擇先逐站分析，再進一步累加為全區資訊，或直接以全區之儲蓄水量計算全區之補注量、抽水量與流失量估算。如選擇逐站計算方式，在側向交換量方面，可進一步應用達西公式釐清交換量之大小。濁水溪沖積扇之地下水位歷線法初步分析可得，相較於屏東平原，本區部分扇央與扇尾水井，較難找到退水曲線，顯示本區之抽水行為較為複雜。

(4)地下水補注潛勢評估作業平台規劃與雛型建置

地下水補注潛勢作業平台建置，則以本年度完成之地下水補注潛勢評估作業程序與水位歷線法模式為基礎，配合地下水位、雨量、水文地質參數與 GIS 圖層資料庫之建置，完成地下水補注潛勢評估作業平台規劃與雛型建置，藉由此平台建置之完成，可讓地下水補注潛勢評估作業更方便執行。

(5)現地補充調查試驗

複井抽水試驗獲得之儲水係數，水質及地電阻調查，提供更詳細之地下水水質、水位觀測數據及地下水層地電阻剖面，可協助補注潛勢評估及地下水補注區之劃分。

本年度於濁水溪沖積扇莿桐及柑園站鑿建抽水井並進行複井抽水試驗；水質調查於扇頂區 19 口井及 3 處溪水及 1 個雨水樣共 22 個採樣點完成採樣與分析，並於莿桐及柑園站進行水位、水溫及導電度連續監測；地電阻調查於彰化地區補注區邊界完成柑園、溪州、北斗、社頭等 4 條 1~2 公里二維地電阻影像剖面測線。

(6)濁水溪沖積扇地下水主要補注區初步劃分

本項工作延續前述建立之濁水溪沖積扇地下水補注潛勢評估之結果，進一步以補注潛勢分數 40 分為一界限，概略推估出扇頂補注區之範圍，與中央地質調查所以地電阻測深法及觀測井資料所推測之補注區界線及本計劃地電阻剖面方法研判之補注區界線範圍結果接近。

(7)濁水溪沖積扇地下水流模式建置

本年度為濁水溪沖積扇地下水數值模式建置之第一年，本計劃採用美國地質調查局(U.S.G.S)發展的 MODFLOW 程式，參考濁水溪沖積扇長期地下水位觀測資料、水文地質架構、水文地質參數及邊界條件的設定等進行穩態模擬模式的檢定與建置。

2. 99 年度

(1)修正型地下水水位歷線法模式發展與比較

以地下水水位歷線法為基礎，加入側向交換量之考量，進行濁水溪沖積扇補注量評估，並與原地下水水位歷線法進行比較。

(2)濁水溪沖積扇補注量及抽水量推估

應用 98 年度之地下水水位歷線法及本年度完成之修正型程式，配合地下水日水位資料及 98、99 年度現地補充調查試驗所得資料，計算濁水溪沖積扇補注量與抽水量。

(3)地下水補注潛勢評估標準作業程序檢討與修訂

針對 98 年度建立之地下水補注潛勢評估標準作業程序，採用補注量、硝酸鹽濃度及地電阻值等之空間分佈趨勢作為補注潛勢因子權重檢定之指標，由此三項指標與地下水補注潛勢評估之結果相互比較，調整補注潛勢因子之權重，檢討修訂地下水補注潛勢評估標準作業程序。

(4)濁水溪沖積扇地下水流數值模式(MODFLOW)建置與參數檢定

延續 98 年度建置之濁水溪沖積扇穩態地下水數值模式，參

考地下水水位歷線法推估之結果，應用優選與人工檢定方式，進行暫態地下水數值模式之建置，以推估整個濁水溪沖積扇之抽水量及包括平面與側向之補注量，並與潛勢評估所得趨勢相互比較。

(5)地下水補注潛勢評估作業平台建置

依 98 年度作業平台雛型建置所得之檢討與建議，將於本年度完成地下水補注潛勢評估作業平台之完整建置，本平台可作為使用者進行地下水補注區劃分之輔助工具。使用者除可利用本平台進行相關補注潛勢評估計算及以視覺展示方式呈現不同區位補注能力強弱，並可選定地下水區，進行區域之補注量與抽水量估計，並展示補注量與抽水量在空間上之分布情形。

(6)現地補充調查

延續 98 年度現地補充調查，以地下水觀測井網現有井為觀測井，預計於六合及東和站，以上部地下水層(F1)為主，鑽鑿抽水井，埋設 8 吋 PVC 管進行複井抽水試驗以求取儲水係數。水質調查持續監測蒞桐及柑園站之水位、水溫、導電度等資料，並進行扇頂區 19 口井地下水、3 處河水、1 個雨水水質與 37 點地面水(導電度量測，其中 10 點化驗離子成份)採樣與分析，持續調查扇頂區污染現況。地電阻調查延續前一年度，預計於濁水溪南岸的雲林地區西螺、九隆、虎尾、溫厝等地下水觀測井附近，進行長距離(1 公里以上)地電阻施測。

3. 100 年度

(1)資料收集及彙整

蒐集屏東平原水文地質調查、地質鑽探、地下水水位、地下水水質、土地利用、雨量、地表地形及河川水系等資料，以作為劃定研究區域重要地下水補注區，及建置地下水流數值模式之參考。

(2)屏東平原補注量及抽水量初估

應用地下水水位歷線法配合民國 100 年屏東平原現地補充試驗調查所得資料，初估屏東平原地下水區補注量及抽水量。

(3)屏東平原地下水流數值模式(MODFLOW)建置與參數檢定

整合前述地下水水位歷線法之補注量推估，進行地下水流數值模式(MODFLOW)之建置與水文地質參數(K 與 S)檢定。

(4)屏東平原地下水主要補注區初步劃分

根據地下水補注潛勢評估標準作業程序，應用地下水補注潛勢評估資訊作業輔助及展示平台，初擬屏東平原之地下水主要補注區。

(5)現地補充調查試驗

於地下水觀測井網現有井為觀測井，選擇鄰近適當井位(至少 2 處)，以上部地下水層(F1)為主，鑽鑿抽水井，埋設 8 吋 PVC 管進行複井抽水試驗後並於水中監測水位、水溫、電導度、溶氧等資料，以探討降雨補注事件對地下水補注之敏感度；進行複井抽水試驗，以求取儲水係數，並進行監測及水質分析。

4. 101 年度

(1)屏東平原補注量檢討修訂

應用地下水水位歷線法分析地下水位資料，並配合 101 年現地補充調查試驗新增資料，修正屏東平原補注量推估值，並與前人研究作討論。

(2)補注區劃分因子之權重更新訂定

綜合濁水溪沖積扇與屏東平原地下水流數值模式模擬與補注區劃分成果，檢討修正地下水補注潛勢評估流程中，各補注區劃分因子之相對權重，以為後續應用之依據。

(3)成果彙整與建議

彙整 98 至 101 年成果及地下水位歷線開發軟體操作技術移轉。

(4)現地補充調查試驗

於地下水觀測井網現有井為觀測井，選擇鄰近適當井位(至少 2 處)，以上部地下水層(F1)為主，鑽鑿抽水井，埋設 8 吋 PVC 管

進行複井抽水試驗後並於水中監測水位、水溫、電導度、溶氧等資料，以探討降雨補注事件對地下水補注之敏感度；進行複井抽水試驗，以求取儲水係數，並進行監測及水質分析。

1.3 計畫區域概述

本計畫規劃自 98 年度至 101 年度止，預計執行 4 年；完成濁水溪沖積扇、屏東平原地下水區之地下水補注區補注機制及地下水流模式的建立與分析工作。預計 98 及 99 年度進行濁水溪沖積扇地下水區地下水補注機制研究、地下水流模式建立及地下水補注區劃分；100 及 101 年度進行屏東平原地下水區地下水補注機制研究、地下水流模式建立及地下水補注區劃分。由於以往十幾年來「台灣地區地下水觀測站網建置整體計畫」的執行，已有相當豐富的研究與成果，以下將對濁水溪沖積扇地下水及水文地質進行摘要描述。

1. 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 1,800 平方公里。本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塊北側之間地區，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。

2. 水文地質架構

地調所於 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中，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，深度至 300 公尺左右，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，深度約達 250 公尺左右;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 1.3-1 所示。

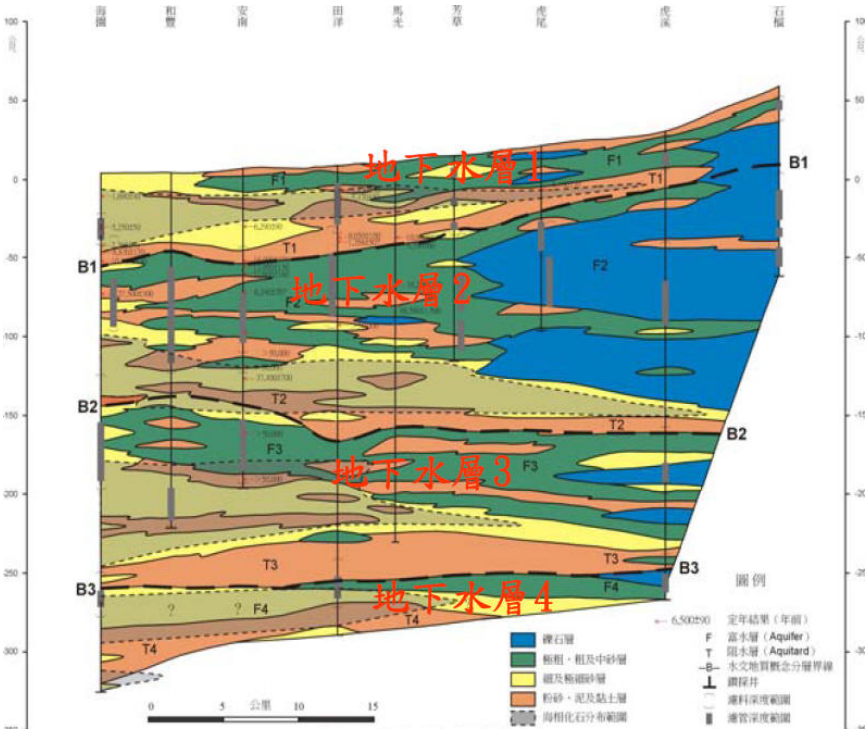


圖 1.3-1、濁水溪海園-石榴水文地質剖面圖

3. 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。

4. 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、東和聯線以東，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}～10^{-5}(公尺/秒)之間，導水係數 T 介於 0.01～4.19 平方公尺/分鐘之間，比容量 Q/s 介於 0.34~208.33 立方公尺/小時/公尺，含水層水力特性以扇頂最佳，扇央次之，扇尾最差。

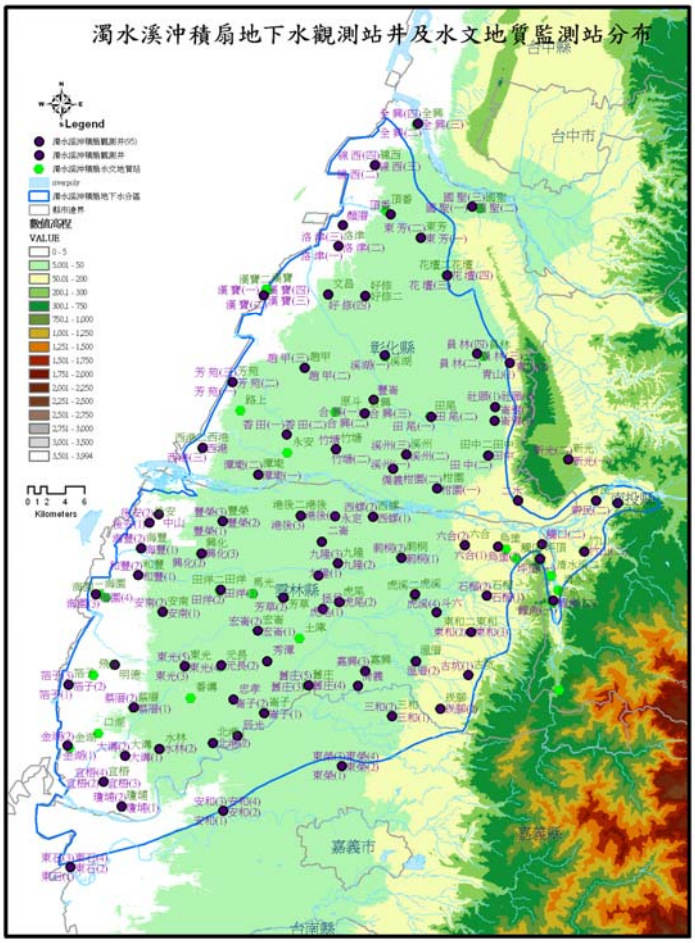


圖 1.3-2、濁水溪沖積扇地下水觀測網站井分布圖

第二章 資料收集及彙整

2.1 國內外相關研究

本計畫的課題乃是地下水補注，而地下水補注的研究又可分為兩個層次，一個乃是半定量的補注潛勢評估，另一個乃是定量的補注量推估，補注潛勢可用以描述一個地區客觀上是否容易補注，然而實際上仍需有如降雨等補注來源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。在潛勢評估方面，最具代表性乃是以 DRASTIC 為代表的一系列以因子權重分析為基礎的研究，至於補注量的推估方法則不一而足，亦將在本章描述之。

(一) DRASTIC

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。

1. DRASTIC 之水文地質參數及其評分

上述提到水文地質參數有七項，即為 DRASTIC 名稱命名之由來：地下水位深度(Depth to water, D)、淨補注量(Net recharge, R)、含水層介質(Aquifer media, A)、土壤介質(Soil media, S)、地形坡度(Topography, T)、未飽和層影響(Impact of vadose zone, I)與含水層水力傳導特性(Conductivity of the aquifer, C)。此七項水文地質參數皆可用地圖形式來表現。DRASTIC 系統將考慮之七個水文地質參數分別轉換成 0~10 分之分數等級。分別說明如下:

(1). D (地下水位深度)

在受壓含水層中，D 值為地面至含水層頂部之深度；在非

受壓含水層，D 表示地面至地下水位之深度(圖 2.1-1)。一般而言，D 值愈小，則地下水受污染之可能性愈高，其所對應的分數也較高。可從表 2.1-1 得知在實際應用上，D 值範圍及其對應之分數等級。

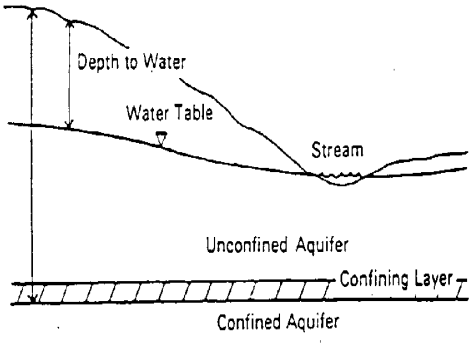


圖 2.1-1、在受壓含水層及非受壓含水層之地下水位深度

(2). R (淨補注量)

污染物質進入地層後，主要係受水之攜帶而移動，故來自地表之補注水量提供了污染物於含水層中傳輸及擴散之能力。其關係可用表 2.1-2 表示。

表 2.1-1、D 值之範圍及分數等級

範圍(Range)		分數等級 (Rating)
呎	公尺	
0~5	0~1.5	10
5~15	1.5~4.5	9
15~30	4.5~9.0	7
30~50	9.0~15	5
50~75	15~22.5	3
75~100	22.5~30	2
100+	30+	1

表 2.1-2、R 值之範圍及分數等級

範圍(Range)		分數等級 (Rating)
呎	公尺	
0~2	0~0.6	1
2~4	0.6~1.2	3
4~7	1.2~2.1	6
7~10	2.1~3.0	8
10+	3.0+	9

(3). A (含水層介質)

含水層介質之性質決定地下水於其間的流動能力，更影響到污染物之傳輸及擴散。大體而言，介質之顆粒愈大或裂縫孔隙愈多，則其滲透性佳且遲滯力愈差，污染可能性就愈高。所對應的分數也相對地高。表 2.1-3 表示主要介質種類及其分數等級。

表 2.1-3、A 值之範圍及分數等級

範　　圍 (Range)	分數等級 (Rating)	典型分數等級 (typical Rating)
塊狀頁岩(Massive shale)	1-3	2
變質/火成岩(Metamorphic/igneous)	2-5	3
風化之變質/火成岩 (Weathered metamorphic/igneous)	3-5	4
薄層砂岩、石灰岩、頁岩層 (Thin bedded sandstone,limestone,shale sequeuces)	5-9	6
塊狀砂岩(Massive sandstone)	4-9	6
塊狀石灰岩(Massive limestone)	4-9	6
砂及礫石(Sand and gravel)	6-9	8
玄武岩(Basalt)	2-10	9
喀斯特石灰岩(Karst limestone)	9-10	10

(4). S (土壤介質)

S 主要指未飽和層最上部生物作用明顯之部份。在 DRASTIC 系統中，一般可指地表 3 呎(約 1 公尺)以內之表土風化層。S 值對污染潛勢之影響主要決定於粘土種類，膨脹/收縮能力，土壤顆粒大小，以及有機質含量，應用上可利用表 2.1-4，來決定其所對應的分數。

表 2.1-4、S 值之範圍及分數等級

範　圍 (Range)	分　數　等　級 (Rating)
薄或無(Thin or Absent)	10
砂礫(Gravel)	10
砂(Sand)	9
收縮及結塊粘土 (Shrinking and/or Aggregated clay)	7
砂質壤土(Sandy loam)	6
壤土(Loam)	5
坋質壤土(Silty loam)	4
粘質壤土(Clay loam)	3
非收縮及非結塊粘土 (Nonshrinking and nonaggregated clay)	1

(5). T (地形坡度)

地表坡度表污染物將很快為地表逕流所帶走，或能有足夠停留時間以入滲至土層中。入滲機會大，則坡度所導致之污染可能性就高。應用上可利用表 2.1-5，來決定其所對應的分數。

表 2.1-5、T 值之範圍及分數等級

範圍 (Range)	分數等級 (Rating)
0~2	10
2~6	9
6~12	5
12~18	3
18+	1

(6). I (未飽和層影響)

此處之未飽和層於受壓含水層，其影響包括未飽和層及覆於該含水層以上之飽和層；於非受壓含水層指地下水位以上之未飽和層。生物分解、中和、過濾、化學反應、揮發及延散作用等均是於未飽和層中可能發生之過程。此外，此層並影響到污染物傳輸之時間及量。實際應用可利用表 2.1-6。

表 2.1-6、I 值之範圍及分數等級

範　圍 (Range)	分數等級 (Rating)	典型分數等級 (Typical Rating)
坋/粘土(Silt/Clay)	1-2	1
頁岩(Shale)	2-5	3
石灰岩(Limestone)	2-7	6
砂岩(Sandstone)	4-8	6
層狀石灰岩、砂岩、頁岩 (Bedded limestone, sandstone, shale)	4-8	6
含坋土及黏土之砂與礫石 (Sand and gravel with significant silt and clay)	4-8	6
變質岩/火成岩(Metamorphic/igneous)	2-8	4
砂及礫石(Sand and gravel)	6-9	8
玄武岩(Basalt)	2-10	9
喀斯特石灰岩(Karst limestone)	8-10	10

(7). C (含水層水力傳導特性)

透水係數愈大，污染物愈易自污染源被移走，則地下水受污染之潛能愈大，應用上可利用表 2.1-7。

表 2.1-7、C 值之範圍及分數等級

範圍(Range)		分數等級 (Rating)
Gpd/ ft^2	Cmd/m^2	
1-100	<4	1
100-300	4-12	2
300-700	12-28	4
700-1000	28-40	6
1000-2000	40-80	8
2000+	80+	10

DRASTIC 系統中除對一般性污染物提出所考慮水文地質參數之一般性權重外，另外農業耕作之施肥及農藥施放方式著重於表土層，對地下水所可造成污染之途徑較明確，故針對農業行為提出農業權重(表 2.1-8)。

表 2.1-8、常用水文地質參數之權重表

水 文 地 質 參 數	一般權重	農業權重
D (Depth to water table)	5	5
R (Net recharge)	4	4
A (Aquifer media)	3	3
S (Soil media)	2	5
T (Topography)	1	3
I (Impact of vadose zone)	5	4
C (Hydraulic Conductivity of the aquifer)	3	2

2. DRASTIC 污染評估指標之決定

決定上述七個水文地質參數之分數值(Rating)及權重值(weighting)後，其相應之乘積和即為 DRASTIC 污染評估指標值，如式 2.1-1 所示：

$$DRASTIC = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r + I_w I_r + C_w C_r \text{ .....} \quad (式\ 2.1\text{-}1)$$

下標 r 代表分數值(Rating)、w 代表權重值(weighting)。

前述指標值僅提供地下水污染潛勢間「相對」程度之大小關係，其絕對數值並無意義。

張良正(1999a)曾採用 DRASTIC 模式進行濁水溪沖積扇與屏東平原之地下水污染潛勢評估，該模式同時考量七項水文地質參數，以評估該地區受污染潛勢之大小。由於 DRASTIC 評估系統中所考慮之水文地質參數有七項，因此將這兩個地區以 2 公里 × 2 公里的格網進行空間切割，並針對這七項參數來給定各格網資料，再參考與修正 DRASTIC 評估系統中所對應之每個參數的權重，經加總後即可得到濁水溪沖積扇及屏東平原每個格網的總分，此分數即代表各網格之污染潛勢，表 2.1-9 至 2.1-15 表為該計畫針對國內資料，重新歸納定義之各參數評分表，各參數之對影響權重則採用表 2.1-8，其中對於一般類評估與農業方面評估有不同之權重數值。各網格之污染潛勢計算如式 4.1-1 所示；之後再利用 MAPINFO 顯示出在這兩個地區的水文地質狀況下，所造成之 DRASTIC 污染潛勢評估指標分佈圖。

表 2.1-9、濁水溪沖積扇及屏東平原地區地下水位深度評分表

範圍(Range)		分數等級 (Rating)
呎	公尺	
0~5	0~1.5	10
5~15	1.5~4.5	9
15~30	4.5~9.0	7
30~50	9.0~15	5
50~75	15~22.5	3
75~100	22.5~30	2
100+	30+	1

表 2.1-10、濁水溪沖積扇及屏東平原地區淨補注量值之範圍及分數等級

範圍(Range)		分數等級 (Rating)
呎	公尺	
0~2	0~0.6	1
2~4	0.6~1.2	3
4~7	1.2~2.1	6
7~10	2.1~3.0	8
10+	3.0+	9

表 2.1-11、濁水溪沖積扇及屏東平原地區地形坡度之範圍及分數等級

範圍 (Range)	分數等級 (Rating)
0~2	10
2~6	9
6~12	5
12~18	3
18+	1

表 2.1-12、濁水溪沖積扇及屏東平原地區含水層介質評分表

含 水 層 介 質	分 數
礫石層	10
極粗、粗、及中砂層	8
細及極細砂層	5
粉砂、泥及黏土層	2

表 2.1-13、濁水溪沖積扇及屏東平原地區土壤介質評分表

土 壤 介 質	分 數
石礫	10
粗砂土、砂土	9
細砂土、壤質粗砂土、壤質砂土	8
壤質細砂土、粗砂質壤土、砂質壤土、細砂質壤土	7
極細砂土、壤質極細砂土、極細砂質壤土	6
壤土	5
坋土、坋質壤土	4
砂質粘壤土	4
粘質壤土、坋質粘壤土	3
坋質粘土	2
粘土	1

表 2.1-14、濁水溪沖積扇及屏東平原地區未飽和層影響評分表

未飽和層介質	分數
礫石層	10
極粗、粗、及中砂層	7
細及極細砂層	4
粉砂、泥及黏土層	1

表 2.1-15、濁水溪沖積扇及屏東平原地區含水層水力傳導特性評分表

範圍(Range)		分數等級 (Rating)
Gpd/ ft^2	Cmd/m^2	
1-100	<4	1
100-300	4-12	2
300-700	12-28	4
700-1000	28-40	6
1000-2000	40-80	8
2000+	80+	10

(二) 地下水補注潛勢評估

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，可配合地理質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。

延續 DRASTIC 的精神，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 et al.(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 et al. (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 et al. (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 et al. (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 et al. (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 et al. (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。根據圖 2.1-2 地下水補注潛勢相互影響因子概念圖給予判定，如各項因子間存在主要影響關係(實線部份)，則給予 1.0 分之權重值；如各項因子間存在次要影響關係(虛線部份)，則給予 0.5 分之權重值。之後再將各因子進行分級，各分級皆有其權重分數(Weight)，最高為 10 分，最低為 1 分，如表 2.1-16 所示。接著再把之前各因子所代表的權重比例(Rate)與因子內部之分級所代表權重(Weight)乘積即可得到該因子內部分級對地下水補注潛勢之影響能力，如表 2.1-17 所示。

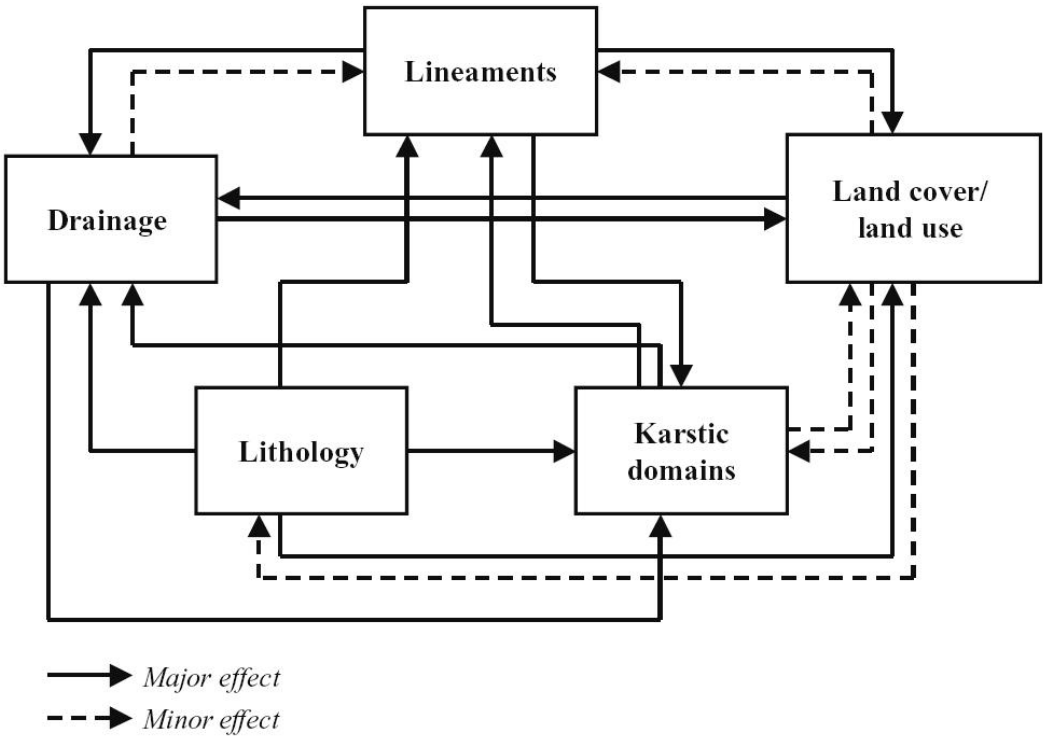


圖 2.1-2、地下水補注潛勢相互影響因子概念圖

表 2.1-16、地下水補注潛勢影響因子之權重表(Shaban et al., 2006)

Factor	Descriptive level	Proposed weight of effect	Domain of effect
Lineaments	Very high	10	>40 (lineament per 25 km^2)
	High	8	35–40
	High–moderate	6.5	30–35
	Moderate	5	25–30
	Non indicative	5	<25
Drainage	High	8	>75 (segment per 25 km^2)
	High–moderate	6.5	75–60
	Moderate	5	60–40
	Moderate–low	3.5	40–30
	Low	2	<30
Lithology	Very high	10	40–50%
	High	8	28–35%
	Moderate	5	10–20%
	Low	2	5–10%
	Very low	1	<5%
Karst	Very high	10	Distinct with lapiez
	High	8	Distinct with sinkholes
	High–moderate	6.5	Developed karst
	Moderate	5	Apparent karst
	Non indicative	5	No karst
Land cover/land use	High–moderate	6.5	Dense vegetation, rural and excavated land
	Moderate	5	Sparse vegetation
	Moderate–low	3.5	Scattered settlements, thin soil cover
	Low	2	Moderately thick soil
	Very low	1	Dense human settlements, compacted soil

表 2.1-17、地下水補注潛勢因子影響能力評估(Shaban et al., 2006)

Factor	Descriptive scale	Weight (a) (1–10)	Rate (b) (1–4)	Weighted rating (a×b)	Total
Lineaments	Very high	10	3	30	104
	High	8		24	
	High–moderate	6.5		20	
	Moderate	5		15	
	Non indicative	5		15	
Drainage	High	8	2.5	20	63
	High–moderate	6.5		16	
	Moderate	5		13	
	Moderate–low	3.5		9	
	Low	2		5	
Lithology	Very high	10	4	40	104
	High	8		32	
	Moderate	5		20	
	Low	2		8	
	Very low	1		4	
Karstic domains	Very high	10	2.5	25	87
	High	8		20	
	High–moderate	6.5		16	
	Moderate	5		13	
	Non indicative	5		13	
Land cover/Land use	High–moderate	6.5	2.5	16	46
	Moderate	5		13	
	Moderate–low	3.5		9	
	Low	2		5	
	Very low	1		3	

Yeh et al. (2008)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 et al. (2006)近似。另外，Yeh et al. (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。

國內研究方面，江崇榮等人(2005)利用氚、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% 。

林俊男(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。

張良正(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三級(如圖 2.1-3 所示)。圖中分別以紅、淡藍、綠代表高、中、低三類土壤飽和入滲分級。進一步藉由 MODFLOW 模式計算屏東地區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，該研究分級的原則如下:

1. 若土壤為低入滲率區，則對系統整體之影響為低
2. 若土壤為高入滲率區，且其敏感度之正規化值為 0.5 以上，則其對系統之影響視為高。

張良正(1999b)根據上述分級標準將屏東平原之區域補注分為高、中、低三級，依序以紅、淡藍、綠表示之，如圖 2.1.4 所示。

本研究將參考上述文獻評估地下水補注潛勢之方法，進行研究區域之地下水補注潛勢評估；在補注潛勢因子之細部評分上，將參考 DRASTIC 之評分方法，對於補注潛勢因子間對於地下水補注潛勢之影響權重，則參考 Shaban et al.(2006)提出之方法，而在空間分析上則應用 GIS 之空間分析功能，綜合前述地下水補注潛勢影響因子之評分標準，估算研究區域之地下水補注潛勢。

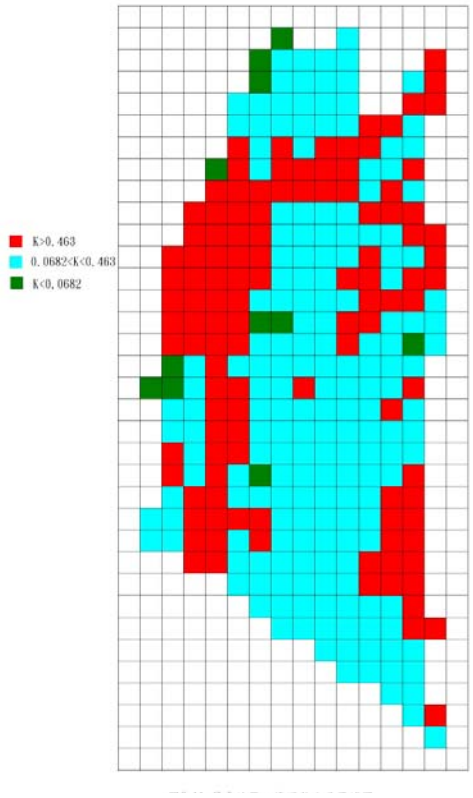


圖 2.1-3、屏東平原入滲潛勢分級區域圖

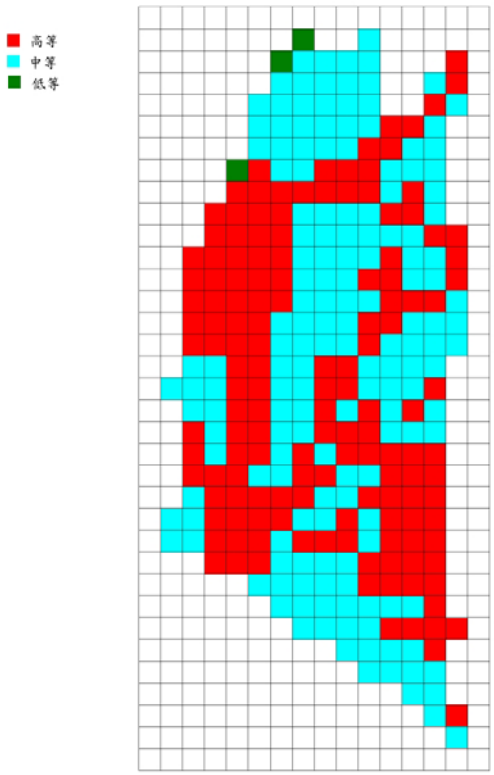


圖 2.1-4、屏東平原區域補注分級區域圖

(三) 地下水相關補注區、保護區或管制區劃定

前述地下水補注潛勢之推估，可為進一步地下水補注區、保護區或是管制區劃定的根據。經濟部主辦之「台灣地區地下水觀測網整體計畫」中，於第一期計畫之濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告(1999)及屏東平原水文地質調查研究總報告(2002)中，皆以水文地質剖面分析的方式劃分地下水補注區，該補注區之劃分乃依水文地質構造劃分，並未考量行政區域等因素。江崇榮(2004a)建議當正式劃定保護區時，應由主管機關再確認其實際及可行之範圍，必要時可進行水文地質補充調查，以提高保護區界線之精確度。另外地下水管制區劃分方面，經濟部水利署於民國 94 年 12 月 12 日公佈「地下水管制區劃設作業規範」，該規範加入行政區域之考量，其劃分地下水管制區邊界之方法為

1. 以水利署最新版臺灣地下水資源圖之地下水區為基準，輔以中央地質調查所最新地質圖之主要含水層分布區域及最新版臺

灣活動斷層分布圖之斷層位置相關資料，綜合評量得到地下水管制區之檢討線。

2. 檢討線通過之地段，該地段於檢討線內之面積達該地段總面積百分之五十以上者，以該地段在檢討線外之邊界劃定為地下水管制區劃設邊界，未達百分之五十者，則以該地段在檢討線內之邊界劃定為地下水管制區劃設邊界。

前述各種區域劃分的作法，皆可作為本計劃之參考。

(四) 地下水補注量估計

除了潛勢評估外，本計畫亦將進一步推估濁水溪沖積扇地下水補注量，其相關的研究如下：

早期地下水工程處利用達西公式及水平衡法來計算濁水溪沖積扇之補注量。地下水勘測隊(1957)在「大濁水溪沖積扇平原地下水勘查報告」中，計算出本區深層地下水天然補注量約為每年 9.18 億立方公尺。地下水工程處(1973 年)在「濁水溪南岸雲林地區地下水源調查表」計算出該地區地下水的年補注量約為 4.54 億立方公尺。

劉聰桂(1996)根據核爆氚水與碳十四定年，分析水中氚濃度，利用民國四十九年代初期核子試爆使水中之氚含量大於大自然背景值的事實，估算過去數十年地下水補注總量約 9 億立方公尺/年。中興工程顧問公司(1998)以水平衡法推估濁水溪沖積扇自然補注量為 5.25 億立方公尺/年。

劉振宇(1998)採用非飽和層一維長期水文模式，估計濁水溪沖積扇扇央及扇尾地下水的補注量，民國 84 年約 9.3 億立方公尺/年，民國 85 年約 8.9 億立方公尺/年，並根據水利處(1997 年)所推估扇頂垂向補注量的結果，推估整個濁水溪沖積扇在民國 84 年級 85 年垂向補注量約為 10.4 億立方公尺/年與 11.9 億立方公尺/年。

葉文工(1998)以 MODFLOW 模擬濁水溪沖積扇補注量約為 8.79 億立方公尺/年；中興工程顧問公司(1998)以 MODFLOW 模擬自然補注量約為 8.2 億立方公尺/年；姜儷安、歐陽湘(1996)以 MODFLOW 地下水程式建立雲林地區三維地下水系統數值模式，模擬自然補注量為 4.66 億立方公尺/年；林再興等(1998)以 MODFLOW 模擬反推彰化地區民國 84 年及 85 年補注量約為 8.07 億立方公尺；土木科技(1997)也以 MODFLOW 模擬雲林地區降雨補注，灌溉補注和河川補注量為 5.32 億立方公尺/年；中興大學(1999)也以 MODFLOW 模擬濁水溪沖積扇自然補量為 8.2 億立方公尺/年，張誠信(1996)以 3DFEWA 模式模擬雲

林地區之地下水流，結果顯示地下水年補注量約為 4.88 億立方公尺。

2.2 研究資料蒐集

本計劃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、透水係數資料

本計劃自臺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，蒐集位於含水層一(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，其各井空間分佈圖如圖 2.2-1 所示，資料如表 2.2-1。

表 2.2-1、含水層一(F1)42 口地下水觀測井資料列表

站名	Tmx	Tmy	T(m^2/min)	K(m/min)	蒐集資料區段
洛津(1)	195060	2669970	0.0356	0.003956	1994~2008
線西(1)	202730	2658260	0.2562	0.014233	1994~1995,1997~2008
全興(1)	191170	2627780	0.3325	0.036944	1994~2008
文昌(1)	199400	2617410	0.1488	0.0124	1994~2008
花壇(1)	198370	2639270	0.4113	0.034275	1994~2008
田中(1)	190948	2639823	1.1697	0.032492	1994~2008
二水(1)	206944	2624360	4.18	0.116111	1993~1997,2004
香田(1)	178954	2632222	0.2485	0.013806	1993~2008
田尾(1)	196915	2611594	0.9143	0.050794	1993~2008
合興(1)	162598	2614898	1.5831	0.131925	1993~2008
竹塘(1)	205251	2620504	1.93	0.107222	1992~2008
柑園(1)	199331	2624542	1.861	0.103389	1992~1998,2004
溪州(1)	185350	2624184	0.837	0.034875	1992~2002,2006
竹山(1)	178717	2624989	0.0308	0.001027	1993~2008
鯉魚(1)	165467	2624551	0.0048	0.000267	1992~2008
社寮(1)	202021	2612378	0.0318	0.003533	1994~2008
新民(1)	207088	2639188	0.9864	0.02055	1994~2008
虎溪(1)	197886	2628381	0.2779	0.046317	1994~2008
石榴(1)	204980	2615932	0.02	0.003333	1994~2008

表 2.2-1、含水層一(F1)42 口地下水觀測井資料列表(續)

站名	Tmx	Tmy	T(m2/min)	K(m/min)	蒐集資料區段
溫厝(1)	210242	2634428	0.1088	0.006044	1994~2008
芳草(1)	201662	2635696	0.3528	0.008605	1994~2008
西螺(1)	208141	2629528	1.031	0.057278	1994~2008
九隆(1)	194891	2632723	0.6462	0.05385	1993~2008
宏崙(1)	190120	2656250	0.4168	0.023156	1997~2008
東和(1)	185725	2641405	0.1436	0.003989	1997~2008
崁腳(1)	201045	2643280	0.065	0.002708	1997~2008
古坑(1)	194000	2643600	0.183	0.003268	1997~2008
舊庄(1)	188020	2614870	0.2511	0.01395	1997~2008
六合(1)	204584	2629706	2,775	0.0925	1993~1995,1999~2001,2003~2008
莿桐(1)	191545	2606340	1.3342	0.074122	1997~2008
烏塗(1)	182680	2620675	2.322	0.043	1997~2008
觸口(1)	178980	2601660	0.0952	0.001763	1997~2008
坪頂(1)	167485	2617020	0.0018	3.33E-05	1997~2008
豐榮(1)	174905	2616870	0.625	0.017361	1997~2008
田洋(1)	191220	2661365	0.9097	0.030323	1997~2008
海園(1)	199630	2674365	0.1543	0.012858	1997~2008
箔子(1)	218500	2634400	0.299	0.012458	1997~2008
明德(1)	213977	2623841	0.0962	0.008017	1997~2008
東光(1)	220800	2634163	0.3785	0.031542	1997~2008
三和(1)	217282	2629020	0.436	0.036333	1997~2008
東榮(1)	212545	2628234	0.0045	0.000375	1997~2008
安和(1)	212782	2629816	0.0672	0.0056	1997~2008

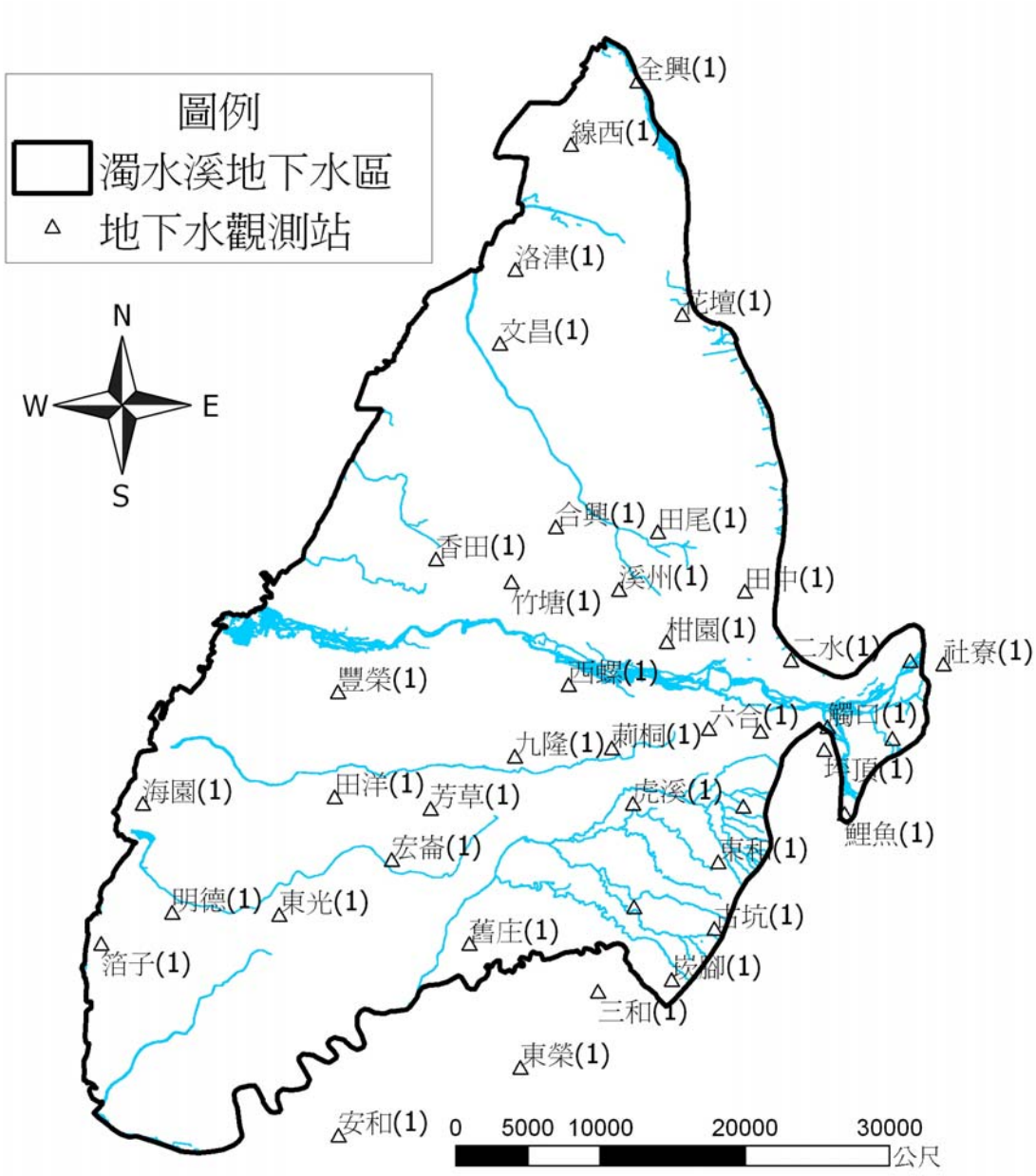


圖 2.2-1、含水層一(F1)42 口地下水觀測井分布圖

(二)　儲水係數資料

本計劃參考中央地質調查所彙刊十九號，配合本年度於柑園及莿桐站進行複井抽水試驗，蒐集濁水溪沖積扇有複井抽水試驗之實測儲水係數共 10 站，如表 2.2-2 所示。

表 2.2-2、濁水溪沖積扇雙井抽水試驗實測儲水係數

站名	Tmx	Tmy	儲水係數
線西	195060	2669970	0.00448
合興	194000	2643600	0.225
溪洲	198370	2639270	0.216
柑園	201660	2635700	*0.120
二水	210240	2634430	0.199
海園	165470	2624550	0.000191
田洋	178720	2624990	0.00188
莿桐	197890	2628380	*0.0007074
烏塗	208140	2629530	0.152
東光	174905	2616870	0.289
*柑園與刺桐站為本年度計畫試驗成果			

(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，本計劃蒐集位於濁水溪沖積扇及上游山區其中 40 站資料，如表 2.2-3 所示；經濟部水利署於濁水溪沖積扇共有 16 站，如表 2.2-4 所示，其相關位置圖如圖 2.2-2。

表 2.2-3、本計劃蒐集中央氣象局雨量站資訊

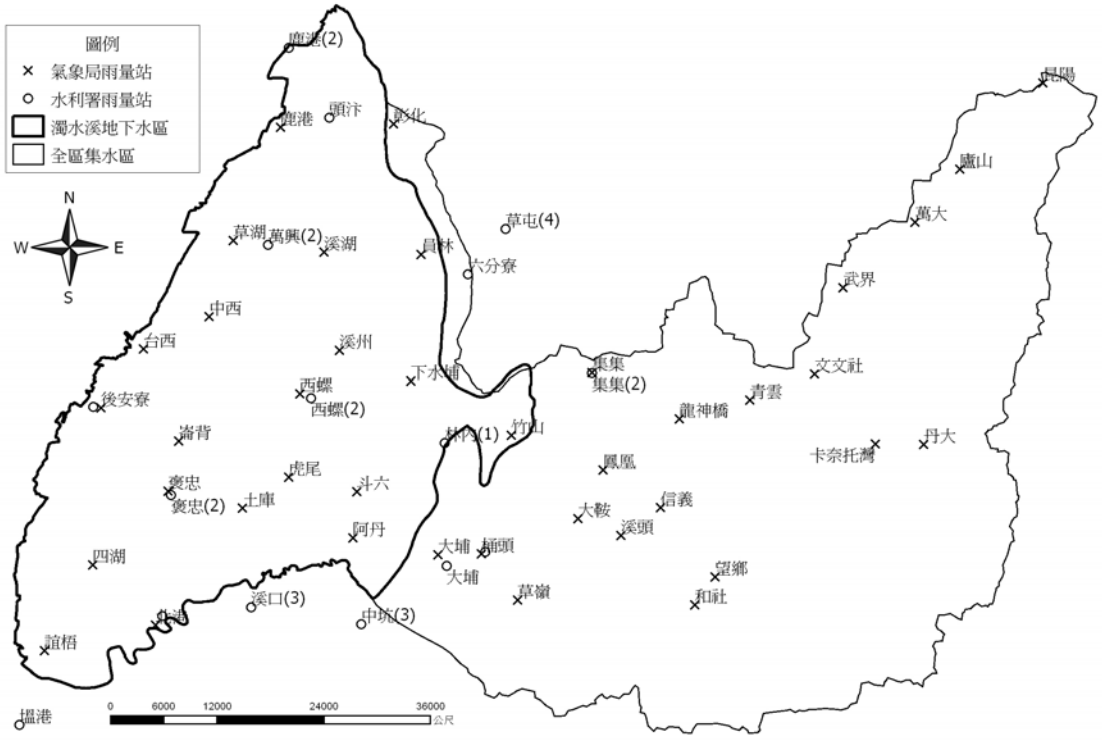
站名	縣市	Tmx	Tmy	蒐集資料區段
昆陽	彰化縣	276965	2668682	1993~2008
彰化	彰化縣	203932	2664054	1992~2008
員林	彰化縣	207023	2649370	1993~2008
下水埔	彰化縣	205877	2635130	1992~2008
中西	彰化縣	183183	2642354	1992~2008
台西	彰化縣	175837	2638698	1993~2008
鹿港	彰化縣	191248	2663701	1993~2008
溪湖	彰化縣	196138	2649622	1992~2008
草湖	彰化縣	185908	2650925	1992~2008
溪州	彰化縣	197851	2638540	1992~2008
西螺	雲林縣	193390	2633727	1992~2008
後安寮	雲林縣	171019	2632140	1993~2008
崙背	雲林縣	179748	2628372	1993~2008

表 2.2-3、本計劃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
虎尾	雲林縣	192135	2624318	1993~2008
土庫	雲林縣	186937	2620864	1993~2008
褒忠	雲林縣	178588	2622748	1993~2008
四湖	雲林縣	170129	2614424	1993~2008
誼梧	雲林縣	164687	2604794	1993~2003,2006~2008
北港	雲林縣	177181	2607680	1993~2008
草嶺	雲林縣	217879	2610488	1992~2008
大埔	雲林縣	208907	2615586	1993~2008
斗六	雲林縣	199834	2622721	1993~2008
阿丹	雲林縣	199362	2617462	1993~2008
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
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
桶頭	南投縣	213838	2615696	1992~2008

表 2.2-4、本計劃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
鹿港(2)	彰化縣	192167	2672633	1990~2007
頭汴	彰化縣	196708	2664771	1990-2008
六分寮	南投縣	212320	2647102	1990~2008
萬興(2)	彰化縣	189832	2650413	1990-2008
草屯(4)	南投縣	216504	2652224	1990~2008
集集(2)	南投縣	226238	2636009	1990~2008
西螺(2)	雲林縣	194639	2633240	1990-2008
林內(1)	雲林縣	209670	2628180	1995-2008
後安寮	雲林縣	170183	2632231	1990-2005,2007
褒忠(2)	雲林縣	178913	2622300	1990~2008
北港(2)	雲林縣	177912	2608667	1990~2008
溪口(3)	嘉義縣	187931	2609686	1990~2008
中坑(3)	嘉義縣	200270	2607743	1990~2008
大埔	雲林縣	209931	2614352	1990~2008
桶頭(2)	南投縣	214240	2615918	1990~2008
塭港	嘉義縣	161875	2596425	1990~2005,2007


圖例
氣象局雨量站
水利署雨量站
濁水溪地下水區
全區集水區
N
W
E
S
鹿港(2)
頭汴
彰化
草湖
萬興(2)
溪湖
員林
草屯(4)
六分寮
中西
台西
溪州
下水埔
集集
集集(2)
後安寮
西螺
西螺(2)
竹山
林內(1)
崙背
虎尾
斗六
褒忠
褒忠(2)
土庫
阿丹
四湖
大埔
桶頭
大埔
草嶺
溪口(3)
中坑(3)
和社
望鄉
大鞍
溪頭
信義
鹿谷
龍神橋
青雲
文文社
武界
萬大
鹽山
昆陽
丹大
卡奈托灣
鳳凰
竹圍
頂湖
口湖
下湖
義竹
東石
鰲鼓
布袋
新港
六腳
朴子
溪口
大林
民雄
水上
中埔
番路
梅山
竹崎
阿里山
嘉義
嘉義市
東區
西區
太保
新港
六腳
朴子
東石
鰲鼓
布袋
義竹
鹿草

(四)　硝酸鹽濃度資料

本計畫選用之硝酸鹽($NO3^{-}$)濃度由經濟部水利署水文水資源資料管理供應系統及陳文福老師提供，目前取得之各站年資料數如圖 2.2-3 所示，資料如表 2.2-5 所示。

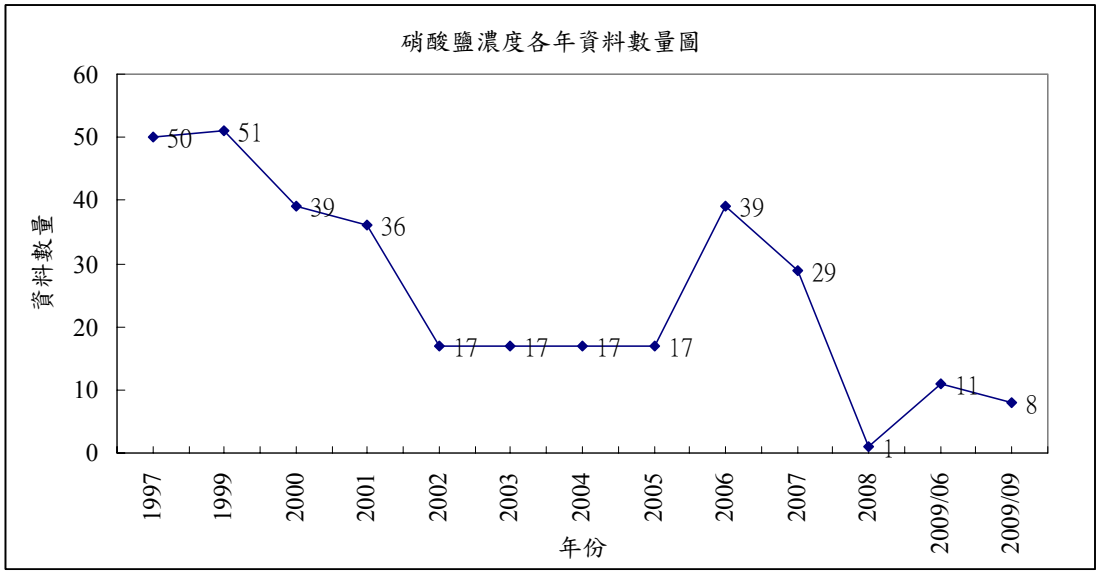


圖 2.2-3、硝酸鹽濃度各年資料數

表 2.2-5、本計畫蒐集硝酸鹽濃度資料

站名/年度	1997	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009/6 月	2009/9 月
國聖(1)	0.595	2.1	0.15	0.71					6.01				
洛津(1)		N.D.	0.09	0.08					0.14				
線西(1)	0.513	0.18	0.16	N.D.					0.05				
全興(1)	0.14	0.2	0.085	0.08					N.D.				
文昌(1)	0.88	N.D.	0.135	N.D.					N.D.				
花壇(1)	0.472	N.D.	0.15	0.5									
員林(1)	0.75	N.D.		N.D.					0.11				
溪湖(1)	0.478	N.D.							0.09				
田中(1)	2.36	6.79	7.455	5.96	6.61	10.47	3.29	2.08	7.5	7.65		6.66	5.9
好修(1)	N.D.	0.09	0.09						N.D.				
二水	3.65	8.47	12.7	3.32	3.21	1.24	0.1	0.33	1.38			0.5	<0.05
趙甲(1)	0.229	0.07	N.D.						0.07				
香田(1)	2.84	0.13	0.2	N.D.					0.11	0.61			
田尾(1)	0.1	0.12	0.14	0.1	0.37	0.15	0.1	0.1	N.D.	0.03		<0.05	<0.05
合興(1)	0.78	0.08	0.185	N.D.					N.D.				

表 2.2-5、本計畫蒐集硝酸鹽濃度資料(續)

井名/年度	1997	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009/6 月	2009/9 月
漢寶(1)	0.23	0.22		N.D.									
芳苑(1)	0.599	0.09		N.D.					0.07				
潭墘(1)	0.096	0.14	0.21	0.09					N.D.	0.37			
西港(1)	0.49	0.13							N.D.				
竹塘(1)	0.305	0.14	0.285	0.12					N.D.	0.28			
柑園(1)	1.99	4.8	6.7	0.72	0.59	1.35	2.37	0.59	6.3	6.07		<0.05	4.88
溪州(1)	0.16	0.26	0.275	0.66	0.14	0.11	0.1	0.1	0.14	0.04		<0.05	<0.05
虎溪(1)		N.D.	0.195	1.16									
石榴(1)	0.08	0.14	0.33	0.05	0.07	0.12	0.1	0.12		0.24		0.05	0.05
溫厝(1)	0.18	0.24	0.15	0.23	0.31	0.36	0.15	0.23	0.05	0.11		0.69	<0.05
虎尾(1)		0.13	N.D.						0.05	0.08			
芳草(1)				0.41									
西螺(1)	0.74	0.1	0.155	0.57	0.09	0.26	0.1	0.12	0.05	0.17		<0.05	<0.05
九隆(1)	0.014	0.1	1.55	0.08					0.32				
宏崙(1)	1	0.1	0.15	0.16					0.29	0.08			
北港(1)	0.263	N.D.							0.07	0.08			
崁腳(1)	2.45	0.66	0.405	1.18	0.37	0.72	0.77	1.73	8.54	0.54		0.19	<0.05
古坑(1)	3.15	7.41	12.2	17.8	10.46	12.63	13.7	14.77				6.57	12.9
嘉興(1)	0.141	0.28		3.18					0.05	0.23			
舊庄(1)	0.97	0.17	0.165	0.21					0.29				
六合(1)	6.46	3.46	4.125	4.15	5.02	5.82	4.58	8.52		8.67		5.06	5.28
莿桐(1)	0.02	0.1	0.215	1.27	0.06	0.03	0.1	0.11	0.07	1.92		<0.05	<0.05
港後(1)	3.32	N.D.		0.1					0.05				
豐榮(1)	0.231	0.1	0.14	N.D.					0.07				
後安(1)	1.55	N.D.							0.07	0.05			
興化(1)	0.201	N.D.							0.05				
海豐(1)	0.123	N.D.	N.D.		N.D.					0.04			
安南(1)		0.08							0.05	0.03			
田洋(1)		N.D.	0.29	0.17					0.07				
海園(1)		N.D.	0.19	0.12					0.66				
和豐(1)	0.481	N.D.							N.D.	0.03			
崙子(1)	0.166	0.12							0.05	0.17			
元長(1)	0.451	N.D.							0.05	0.18			
箔子(1)	0.339	N.D.	0.15	0.14					0.16				

表 2.2-5、本計畫蒐集硝酸鹽濃度資料(續)

井名/年度	1997	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009/6 月	2009/9 月
蔡厝(1)	0.093	0.15							0.05	0.05			
明德(1)		0.08	0.18	0.12					0.07				
東光(1)		0.14	0.08	0.18					0.05				
誼梧(1)		N.D.	0.4										
水林(1)	0.169	0.15							0.07	0.07			
大溝(1)	0.225	0.14							0.07	0.05			
瓊埔(1)	0.172	0.13	0.07	N.D.					0.05	0.03			
安和(1)		0.16	0.1	0.1					N.D.		0.05		
東石(1)		0.18	N.D.	N.D.					0.09		N.D.		
東榮(1)		0.25											
金湖(1)		0.11											
三和(1)		4.09											
坪頂(1)	4.47	10.4	9.14	9.77	9.1	9.88	7.1	8.74					
觸口(1)		0.15											
烏塗(1)	2.12	7.05	6.87	4.01	2.84	0.31	3.9	2.36				2.75	<0.05
社寮(1)	0.47	2.13		14.1	6.74	6.4	9.33	2.36				3.07	3.07
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
新民(1)		0.26											
東芳(1)		0.19											
東和(1)	13.76	0.1		3.91	0.34	0.23	0.34	0.29		0.1		0.07	0.07

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 年本計畫採樣。
4. N.D.為低於儀器檢測極限

(五) GIS 圖層資料

本計劃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，本計劃蒐集之圖資來源如表 2.2-6 所示。

表 2.2-6、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	本計劃製作	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	本計劃製作	中央氣象局、經濟部水利署
單位蓄水量變化	本計劃製作	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，本計劃現地試驗
透水係數	本計劃製作	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	本計劃製作	經濟部水利署

第三章 扇頂補注區現地補充調查及分析

濁水溪及屏東平原是台灣最重要的地下水資源區，兩者提供了全台超過 60%的地下水抽用量。此兩區大都由沖積扇所組成，扇頂的巨厚礫石層構成了主要的補注區，以濁水溪沖積扇為例，扇頂補注區即佔全區約 57%的地下水補注來源（江崇榮等，2006）。

為提高濁水溪沖積扇地下水天然補注區範圍劃定及補注量評估之精度，本計畫於扇頂補注區進行現地補充調查試驗，以複井抽水試驗、水質調查分析與監測、地電阻調查，建立更詳細之地下水層儲水係數、水文地質基本資料、長期地下水水質和水位觀測數據與地層剖面資訊，進而探討補注區之補注特性、水質成因、演變及降雨影響等。

3.1 扇頂補注區水文地質架構與參數

濁水溪沖積扇扇頂及臨近地區的地層，可概分為頭嵙山層和現代沖積層（經濟部中央地質調查所，1995），含水層的透水係數 K（hydraulic conductivity），可由單井完工試水（分級、定量及回升），複井抽水試驗得之(如表 3.1-1)。地下水觀測網及濁水溪及清水溪河床鑽探調查（平成公司，1996）水文地質參數如表 3.1-2 及表 3.1-3，透水係數 K 約在 10^{-3} 至 10^{-6} m/s。現代沖積層（現生河床礫石層）的透水係數明顯較高，約 10^{-3} m/s，頭嵙山層火炎山段的礫石層的透水係數較低，約 10^{-5} 至 10^{-6} m/s（圖 3.1-1）。

表 3.1-1、濁水溪扇頂補注區之複井抽水試驗結果與計畫建議

年度	站名	T(m^2/min）	Ss	Sy	深度(m)	井距(m)	含水層性質
1993	二水	4.19		0.199	108	13.45	非壓水層
1992	虎溪	0.32	1.44×10^{-3}		26	14.71	漏壓水層
1993	烏塗	2.54		0.152	94	9.98	非壓水層
2009	柑園				38	10	非壓水層
2009	莿桐				38	10	漏壓水層
2010	六合				60	10	非壓水層
2010	東和				63	10	漏壓水層

1. 數據引用自李昭順與吳景濂（1996）；Ss 為儲水係數（Coefficient of storage）、Sy 為比出水率（Specific yield）。
2. 2009 及 2010 年井為本計畫預估。

表 3.1-2、扇頂區之水文地質參數

井名	T	濾管長度	K	K	時間	靜水位	抽水量	H_{1000}	$\&_{1000}$
	m^2/min	m	m/min	m/sec		m	cmh	min	m
二水	4.18	36	0.116	0.00194	19930901	39.15	41.0	39.34	0.19
田中一	1.17	36	0.033	0.00054	19940319	11.48	60.4	13.23	1.75
田中二	1.26	12	0.105	0.00175	19970330	14.29	50.6	19.46	5.17
柑園一	1.86	18	0.103	0.00172	19930502	9.40	60.3	10.07	0.67
柑園二	1.41	54	0.026	0.00044	19930428	9.56	60.3	10.32	0.76
烏塗一	2.32	54	0.043	0.00072	19931018	29.26	76.5	29.93	0.67
六合一	2.77	30	0.092	0.00154	19930318	17.20	49.9	17.93	0.73
六合二	2.72	30	0.091	0.00151	19920722	13.13	45.2	15.08	1.95
薊桐一	1.33	18	0.074	0.00123	19940223	6.45	63.1	7.85	1.40
薊桐二	1.60	42	0.038	0.00063	19940209	6.07	66.2	7.3	1.23
石榴一	0.01	6	0.016	0.00026	19930404	4.57	7.4	10.67	6.10
石榴二	0.35	36	0.009	0.00016	19920621	21.3	27.7	23.1	1.8
東和一	0.14	30	0.005	0.00008	19920630	14.43	38.1	19.82	5.39
東和二	1.80	30	0.060	0.00100	19920311	15.88	33.8	17.5	1.62
觸口一	0.10	40	0.002	0.00004	19960708	8.62	15.8	11.82	3.20
觸口二	0.02	36	0.001	0.00001	19960709	3.76	15.2	23.26	19.5
新民一	0.99	48	0.021	0.00034	19960630	9.3	77.2	10.8	1.5
新民二	0.13	42	0.003	0.00005	19960703	12.2	41.5	22.5	10.3
新光一	0.09	42	0.002	0.00004	19960729	53.1	30.9	58.6	5.5
新光二	0.03	48	0.001	0.00001	19960725	47.9	26.6	59.9	12.0
竹山一	0.03	30	0.001	0.00002	19960910	6.36	47.8	44.36	38.0
竹山二	0.01	30	0.000	0.00001	19960307	10.37	30.2	48.37	38.0

*H_{1000}　1000min 之水位；$\&_{1000}$　1000min 之洩降

表 3.1-3、濁水溪及清水溪河床下地層之水文地質參數

井名	T	濾管長度	K	K	靜水位	抽水量	H_{1000}	S_{1000}
	m^2/min	m	m/min	m/sec	m	cmh	min	m
A1	0.420	10	0.0420	0.000700	10.25	52.4	14.25	4.00
A2	0.530	25	0.0212	0.000353	3.36	60.1	7.86	4.50
A3	0.320	17	0.0188	0.000314	5.2	27	6.20	1.00
A4	0.160	35	0.0046	0.000076	1.91	11.1	10.01	8.10
B1	5.670	16	0.3544	0.005906	3.61	118.2	5.01	1.40
B2	0.820	15	0.0547	0.000911	2.09	78.6	7.49	5.40
B3	1.780	15	0.1187	0.001978	5.29	109.2	7.39	2.10
B4	0.350	27	0.0130	0.000216	2.7	55.8	5.70	3.00
C1	0.260	5	0.0520	0.000867	2.79	7.2	3.69	0.90
C2	0.380	4	0.0950	0.001583	4.18	37.2	5.48	1.30
C3	1.580	4	0.3950	0.006583	2.45	31.8	4.55	2.10
C4	2.430	7	0.3471	0.005786	3.38	37.8	3.68	0.30
D1	0.002	5	0.0004	0.000006	14.92	2.4	17.92	3.00
D2	0.001	4	0.0002	0.000004	1.25	3	11.25	10.00
D3	0.160	10	0.0160	0.000267	1.28	13.8	6.68	5.40
D4	0.380	10	0.0380	0.000633	1.8	25.2	3.90	2.10
E1	6.070	10	0.6070	0.010117	3.56	40.2	3.91	0.35
E2	0.004	4	0.0010	0.000017	2.56	3.54	8.56	6.00
E3	0.160	5	0.0320	0.000533	2.01	6.6	5.01	3.00
E4	0.730	10	0.0730	0.001217	1.4	34.8	4.60	3.20

*試水時間：19960423；數據來源：平成公司（1996）。

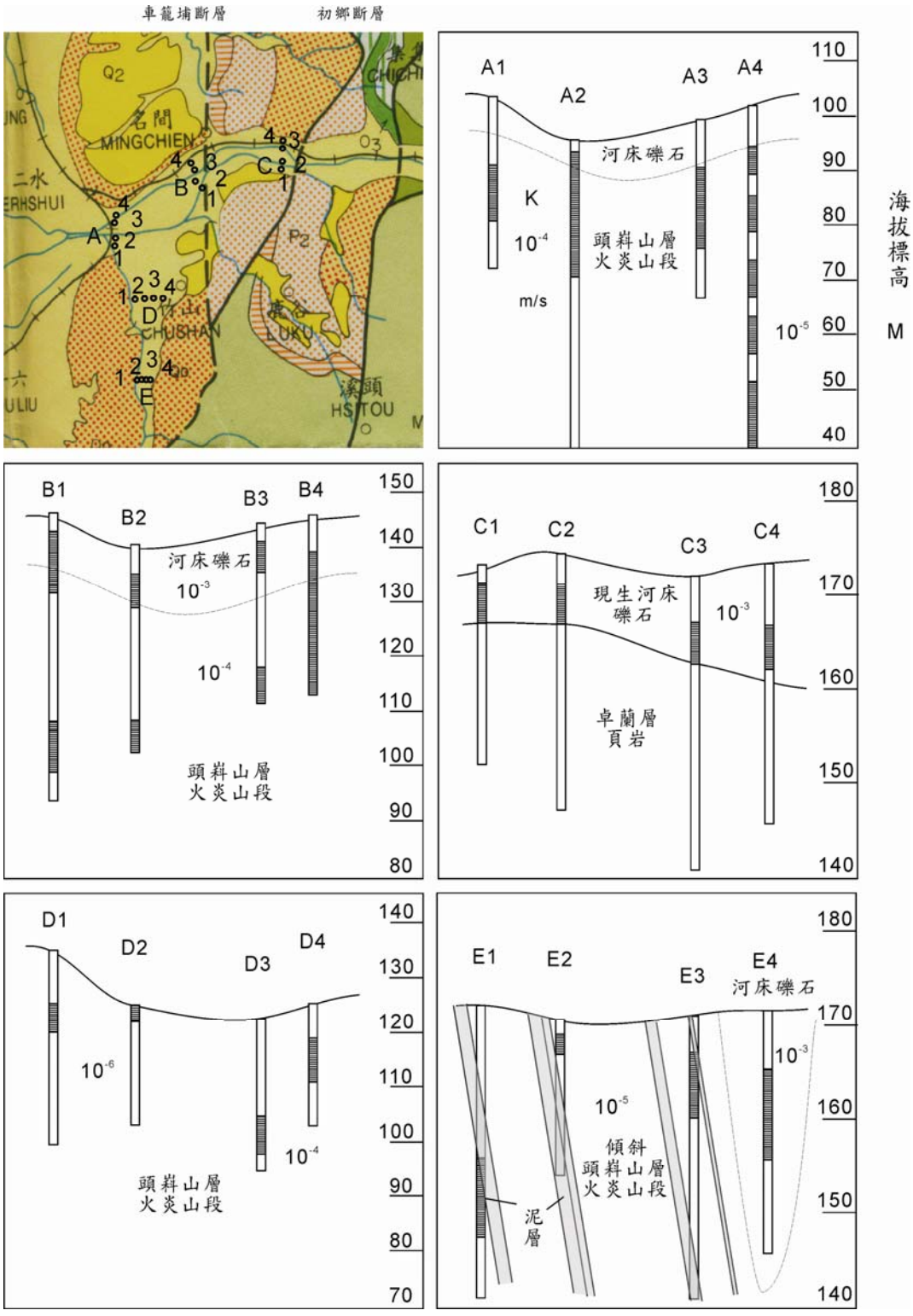


圖 3.1-1、濁水溪及清水溪河床下水文地質剖面與參數

3.1.1 清水溪複井抽水試驗重新解析

清水溪複井抽水試驗於 1997 年 3 月進行，淺層為現生河床礫石，厚度應不大於 5m，局部已有頭嵙山層火炎山段出露。設有一口抽水井及四口觀測井，試水配置如圖 3.1-3。觀四的水位最高，觀三次之，觀二及觀一最低（圖 3.1-2），顯示地下水由深層向淺層流動，深層含水層為頭嵙山層火炎山段，其補注源頭應在兩側之丘陵地。抽水井之洩降-時間曲線，可分成三段，前中後段各以半對數法求得 K 為 3.8×10^{-6}m/s、2.0×10^{-6}m/s、1.0×10^{-6}m/s（圖 3.1-4a），此數值代表 3-48m 跨層次之平均。

觀測井之洩降-時間曲線（圖 3.1-4b），觀二及觀三的水壓反應接近，可分成二段，前後段各以半對數法求得 K 為 4.2×10^{-6}m/s、1.0×10^{-6}m/s；觀一為非受壓水層之曲線，前各以半對數法求得 K 為 2.5×10^{-5}m/s。Ss 為 1.0×10^{-4}。K 值的調查結果與平成公司（1996）的調查一致。

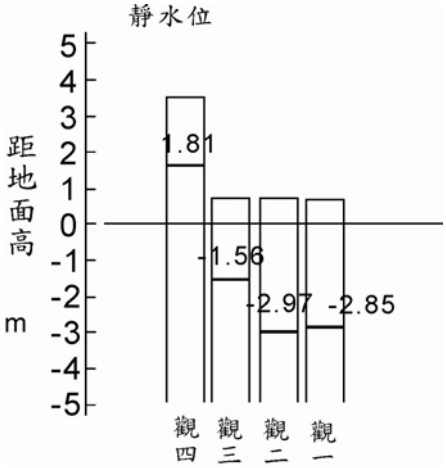


圖 3.1-2、清水溪河床四口觀測井之水位（台糖，1997）

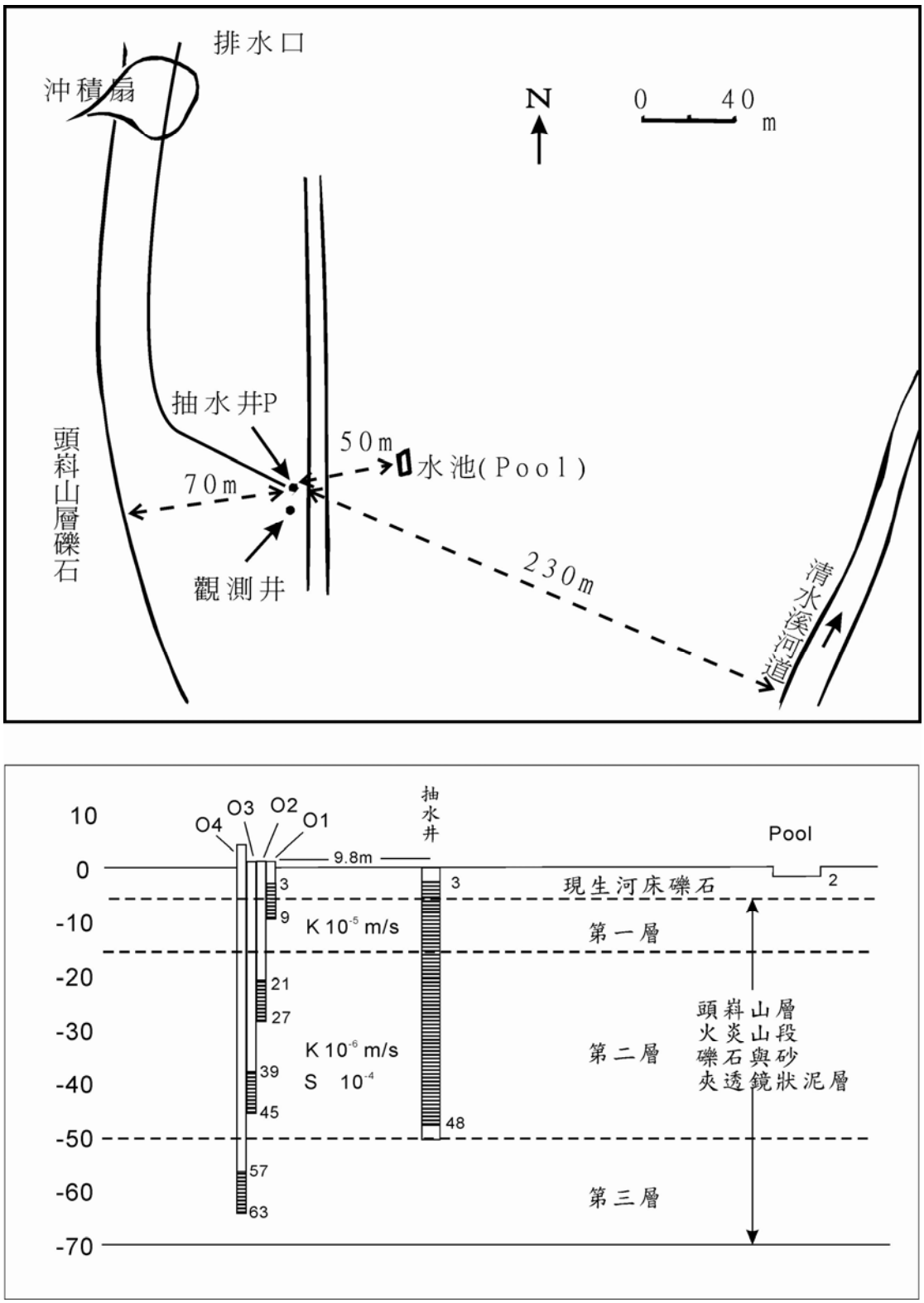


圖 3.1-3、清水溪河床鑽探與複井抽水試驗（台糖，1997）

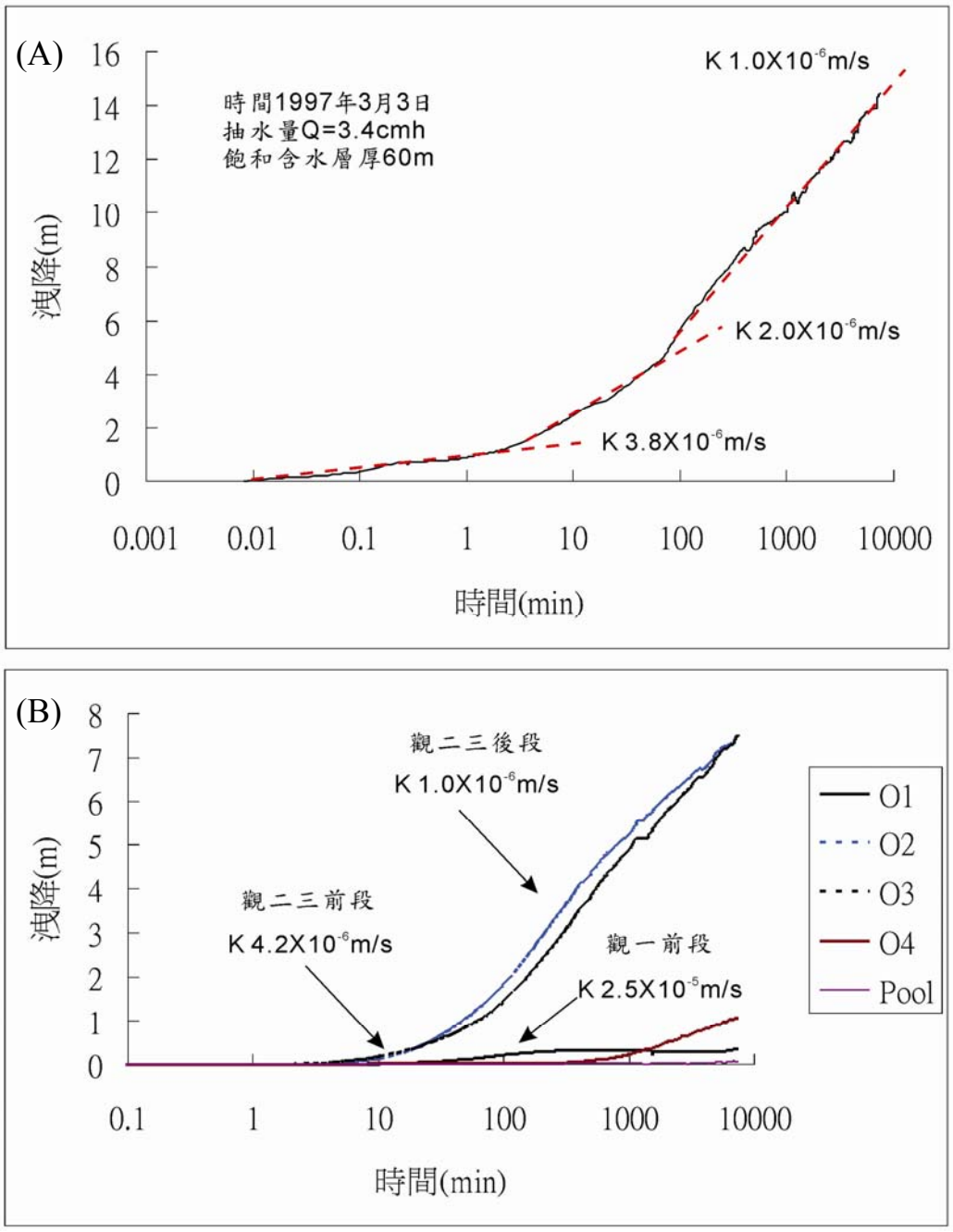


圖 3.1-4、(A)(B)清水溪河床複井抽水試驗結果解析

3.1.2 二水站複井抽水試驗重新解析

二水觀一之複井抽水試驗於 1993 年 9 月進行,原始分析以非受壓含水層完全貫穿之標準曲線疊合（圖 3.1-5），因本含水層的飽和層厚約 70m，而濾管長度只有 36m，應屬非受壓含水層部份貫穿，因此以舊有數據，重新以部份貫穿之標準曲線解析之（圖 3.1-6）。

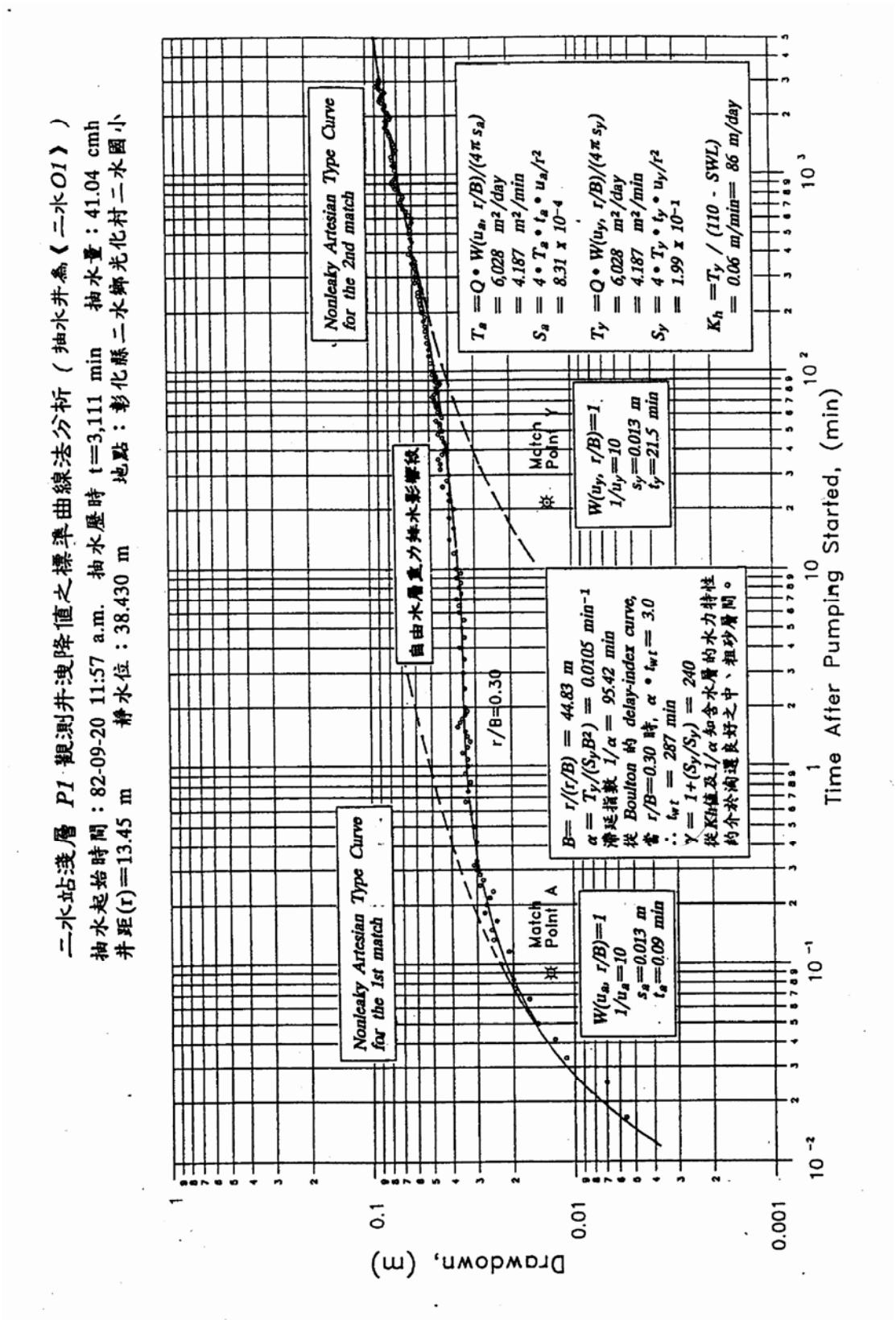


圖 3.1-5、二水觀一之複井抽水試驗結果（台糖，1993）

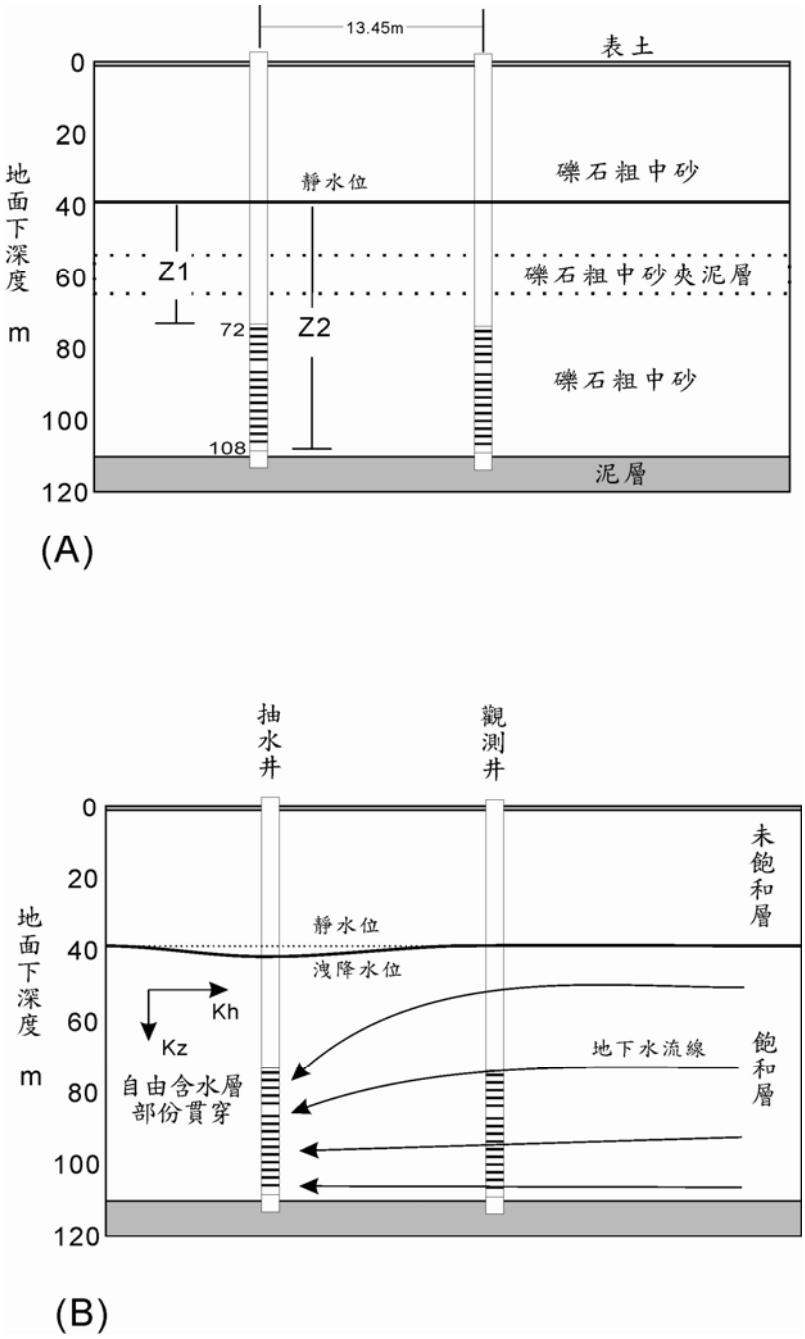


圖 3.1-6、(A）二水站地層與抽水試驗配置(B)部份貫穿示意圖

前段屬彈性解壓，仍可以 Neuman 曲線套疊（圖 3.1-7a），求得 $S_S=7.86\times10^{-4}$，舊數據為 8.31×10^{-4}，差異不大。中後段因有重力流及斜向流線（因部份貫穿），標準曲線因濾管貫穿比例及位置而不同，需因應試水之實況而自行繪製，本研究以美國地質調查所之 WTAQ 程式繪製（Barlow and Moench 1999），以進行套疊（圖 3.1-7b），部份貫穿參數如圖 6.2-9 所示。中後段套疊求得 $Kh=1.18\times10^{-3}$ m/s、$Kv=5.89\times10^{-3}$ m/s。

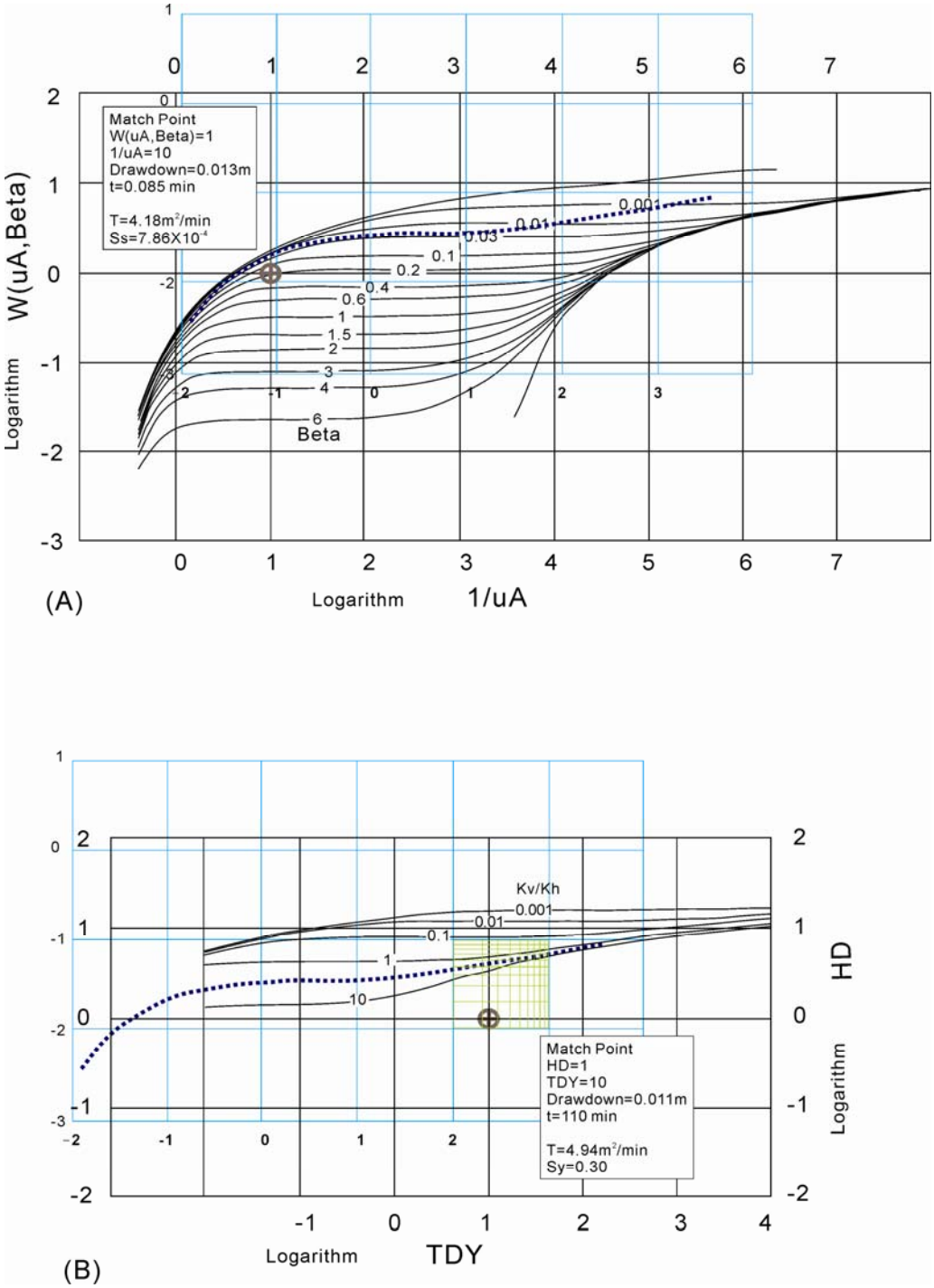


圖 3.1-7、(A)部份貫穿標準曲線前段疊合(B)部份貫穿標準曲線中後段疊合

本層礫石層可能分兩段，深度 55m 以上礫石應屬現代沖積層，65－110m 之礫石層可能是火炎山段的最上部，兩層之間夾一些透鏡狀泥層（圖 3.1-6a）。透水係數垂直方向較佳 Kv=5.89×10^{-3} m/s、是水平向的五倍（Kh=1.18×10^{-3} m/s），應是反應上層的透水性比下層好。

比出水率 Sy（Specific Yield）的差異比較大，舊值為 0.20、新值

為 0.30（表 3.1-4）。乃孔隙介質含水層因重力排水時的出水量，此值介於 0－35%之間，通常低於孔隙率，因有些水吸附於地質材料（例如砂、礫、泥）之表面，並不易排出（Johnson, 1967）。比出水率的量測，可由現地補注或排水試驗、水井抽水試驗、室內排水試驗、粒徑分析等取得。Johnson 整理 1967 年以前文獻，以上述方法研究含水層之比出水率共 28 篇，含水層依粒徑分為十類，比出水率平均值以粗砂最高（0.27）、黏土 0.02 最低（表 3.1-5）。

表 3.1-4、二水觀一含水層之水文地質參數

飽和含水層厚度 m	水平 Kh m/s	垂直 Kv m/s	Ss	Sy	備註
70	1.18×10^{-3}	5.89×10^{-3}	7.86×10^{-4}	0.30	本研究
70	1.00×10^{-3}	—	8.31×10^{-4}	1.99	台糖 1993

表 3.1-5、不同粒徑含水層之比出水率（Johnson, 1967）

分類	英文	Sy 比出水率		
		最大值	平均值	最小值
黏土	Clay	5	2	0
粉砂	Silt	19	8	3
砂質黏土	Sandy clay	12	7	3
細砂	Fine sand	28	21	10
中砂	Medium sand	32	26	15
粗砂	Coarse sand	35	27	20
含礫砂	Gravelly sand	35	25	20
細礫	Fine gravel	35	25	21
中礫	Medium gravel	26	23	13
粗礫	Coarse gravel	26	22	12

3.1.3 烏塗站複井抽水試驗重新解析

烏塗觀一之複井抽水試驗於 1993 年 10 月進行，原始分析以非受壓含水層完全貫穿之標準曲線疊合（圖 3.1-8），因本站地面至 100m 深皆以礫石為主，其中 63-68m 的含泥量稍高，靜水位約在 30m 深，含水層的飽和層厚約 70m，濾管長度 54m（地面下 40-94m），可視為非受壓含水層完全貫穿，以舊有數據，以 Neuman 標準曲線解析之（圖 3.1-9）。前段屬彈性解壓，求得 $Ss=4.07\times10^{-4}$，舊數據為 1.97×10^{-4}，差

異不大。中後段因有重力流及斜向流線，套疊求得 $Kh=7.83\times10^{-4}$ m/s（舊數據為 7.62×10^{-4}）、$Kv=2.29\times10^{-3}$ m/s。

本層礫石層可能分兩段，深度 63m 以上礫石應屬現代沖積層，63－100m 之礫石層可能是火炎山段的最上部，兩層之間夾一些透鏡狀泥層。透水係數垂直方向較佳 $Kv=2.29\times10^{-3}$ m/s、是水平向的三倍（$Kh=7.83\times10^{-4}$ m/s），應是反應上層的透水性比下層好，此現像與二水站類似。

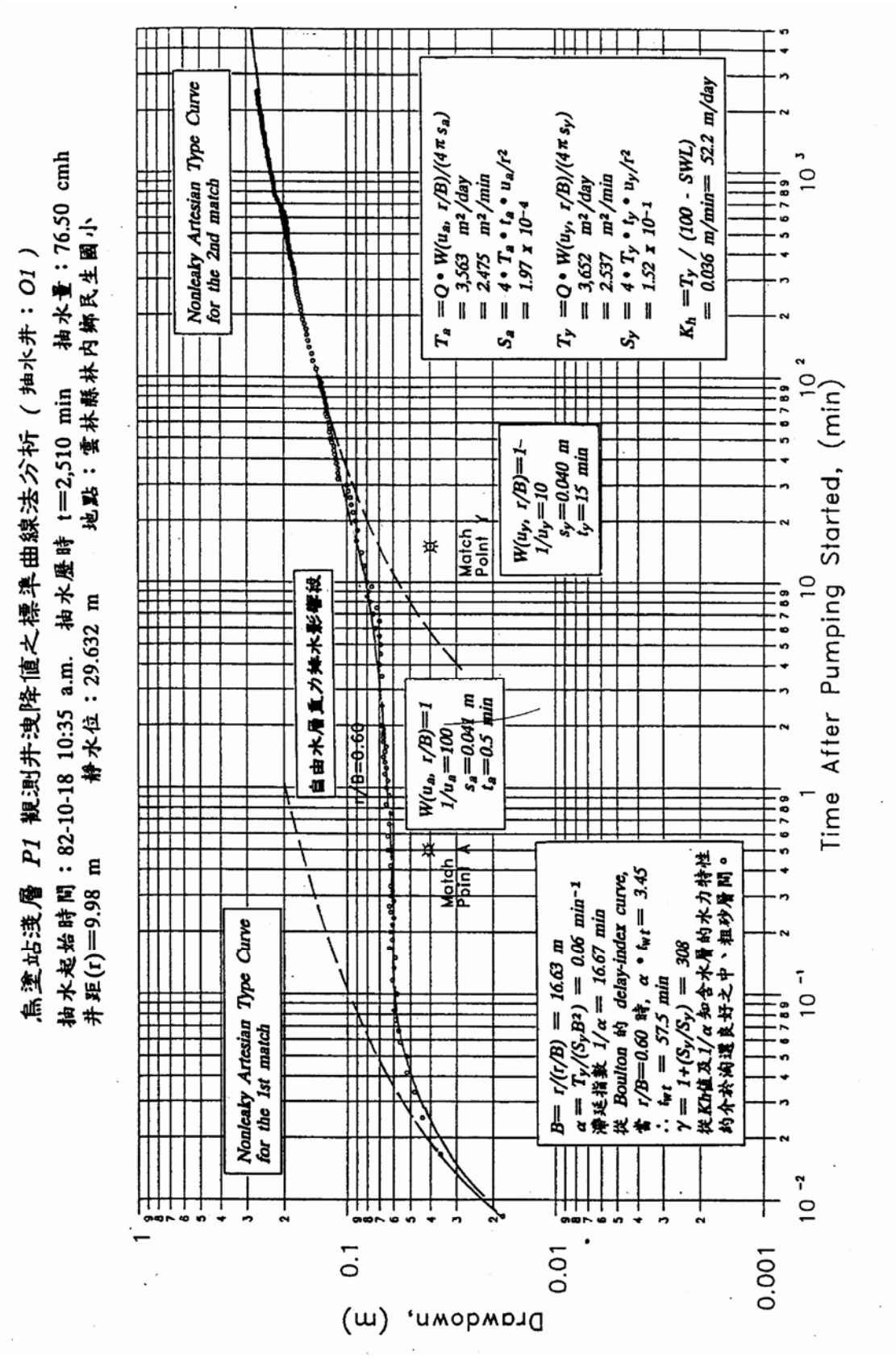


圖 3.1-8、烏塗觀一之複井抽水試驗結果（台糖，1993）

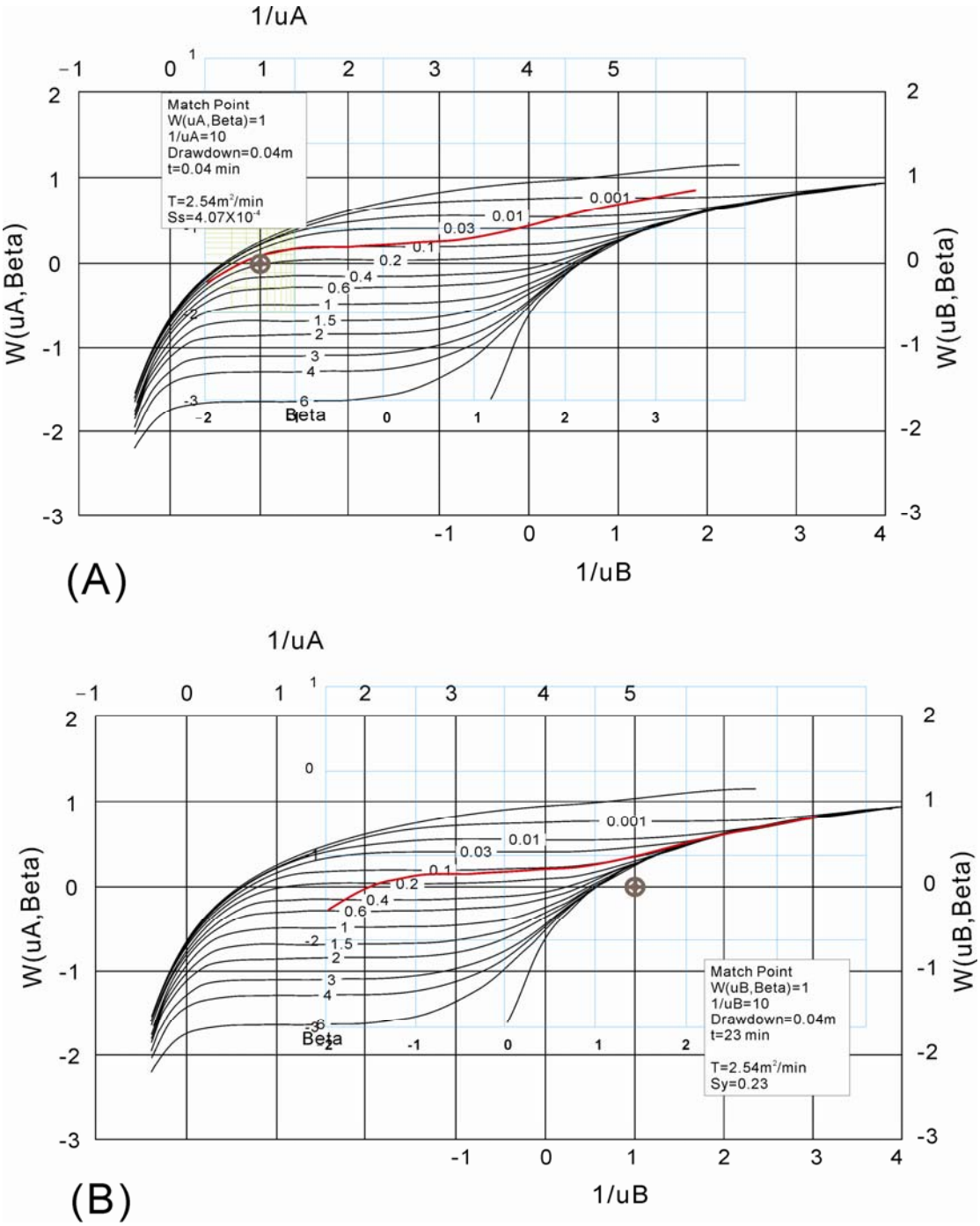


圖 3.1-9、(A)標準曲線前段疊合(B)標準曲線中後段疊合

比出水率 Sy（Specific Yield）的差異比較大，舊值為 0.15、新值為 0.23（表 3.1-4）。因進行曲線套疊時，稍微移動 Sy 即有差異，並不容易求得確定之值。前人研究也提出（Nwankwor et al, 1992; Moench, 2001），Sy 值會隨抽水時間延長而增大，因為非受壓水層在重力排水時，因孔隙間固體的吸力、與流體的黏滯性，排水常有延遲的效果。

3.1.4 扇頂補注區水文地質分析結論

扇頂及臨近地層之水文參數可分成三大類：A 沖積層、B 沖積層、火炎山段（圖 3.1-10）。A 沖積層的滲透性最好、K 值約 10^{-3}m/s，例如二水、田中、柑園、蓮桐一、六合等井，濁水溪河床近一萬年來的河床沉積。B 沖積層的滲透性次之、K 值約 10^{-4}m/s，例如柑園二、蓮桐二、烏塗等井，可能是濁水溪大於一萬年之冰期的河床沉積，可能含泥量較高。火炎山段的滲透性最差、K 值約 10^{-4}m/s 至 10^{-6}m/s，例如新民、新光、竹山、觸口等井，為數十萬年前的河流沉積，但因構造運動、已受擠壓及抬升。

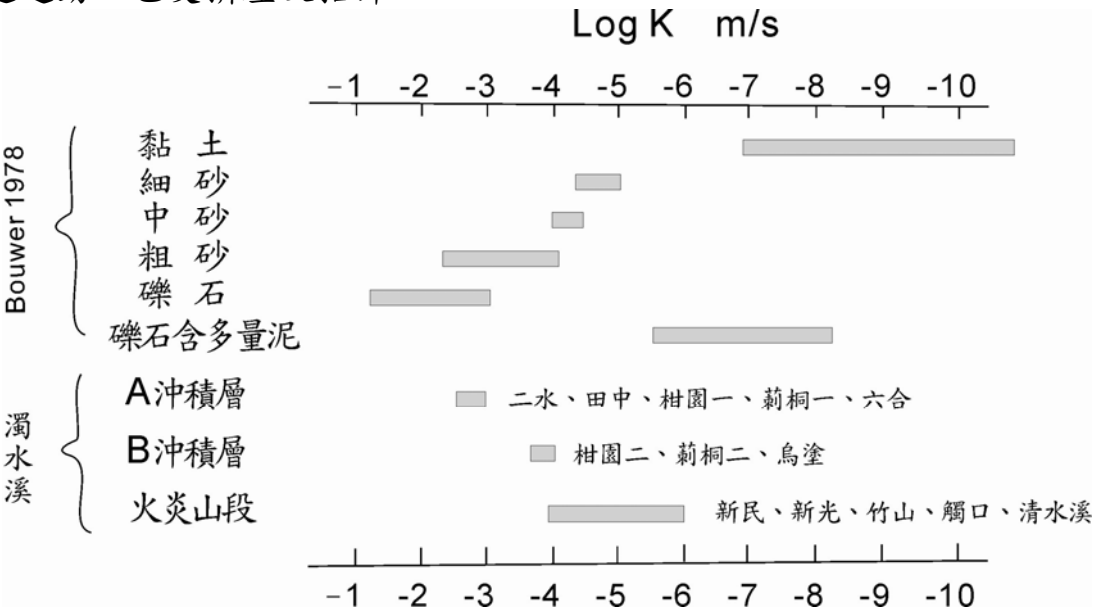


圖 3.1-10、扇頂及臨近地區透水係數 K 值統計

3.2 複井抽水試驗

抽水試驗包含單井(抽一)分級試水及複井(觀一、抽一)定量、回升試水等工作項目。本(98)年度調查工作於濁水溪沖積扇之柑園及蓮桐進行試驗，99 年度建議於濁水溪沖積扇之六合及東和（表 3.1-1）。鑽探位置選定後，得視地質條件與施工狀況增減深度，若因土地之同意使用權遭遇無法解決之困難，將另擇其它替代站址。

本(98)年度抽水試驗於蓮桐站（雲林縣蓮桐鄉）及柑園站（彰化縣溪州鄉）施作，共進行抽水試驗井（抽一）分級試水 2 組及觀測井（觀一、抽一）2 組複井抽水試驗。於抽水試驗井（抽一）安裝抽水機進行試驗，複井抽水試驗於觀一、觀二進行分層水位觀測，已於 8

月底完成莿桐及柑園站抽水試驗。

3.2.1 井體建置

（一）井測分析原理

孔內地層電測內容主要包括自然電位（SP）、電阻率（包括 64”正長距、16”正短距）及自然伽瑪（γ）等三種曲線（共四條），分析說明如下：

（1）左邊曲線是自然電位（SP），曲線顯示的電位差值受地層水、泥漿液及不同岩性間之離子濃度不同所造成。正常狀況下（地層水導電度大於孔內泥漿水之導電度）遇含水層（砂、礫石）SP 曲線向左偏折，遇不透水層（黏土、頁岩）SP 曲線向右偏折，是為正常型態之井測曲線。

（2）中間二條曲線分別為正短距（16”）電阻率及正長距（64”）電阻率。正常狀況下遇含水層（砂、礫石）曲線呈高電阻反應，遇不透水層（黏土、頁岩）曲線呈低電阻反應。

（3）右邊曲線是自然伽瑪（γ），一般地質材料含放射性物質愈多則自然伽瑪值愈大。泥質地層中之黏土顆粒常含放射性鉀等元素，故自然伽瑪質較大，而砂或礫質地層中黏土顆粒含量極少，所含放射性物質少，故自然伽瑪值偏低。另自然伽瑪值易受井徑大小影響，故研判時須與其他曲線小心對照，以免誤判。自然電位（SP）、電阻率及自然伽瑪（γ）三種曲線亦受到套管之影響，故分析時應先了解井測時之井況。

（二）井測分析與鑽探成果

1. 莿桐站

本站建置 1 口抽水井，井體建置深度為 38m，採用 §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 3.2-1），未發現厚層泥。

井測曲線（圖 3.2-2）顯示正長距電阻率值最高不超過 100ohm-m，研判粒徑大小應低於礫石之粒徑。依變化趨勢言，正長距電阻率值大

致在 10 公尺附近開始數值明顯變大，顯示顆粒變粗；自然伽瑪值曲線在淺層因受孔徑較大之影響，其值並不高，且低於深層粒徑較粗之地層，因此判斷岩性時須特別小心孔徑之大小變化。

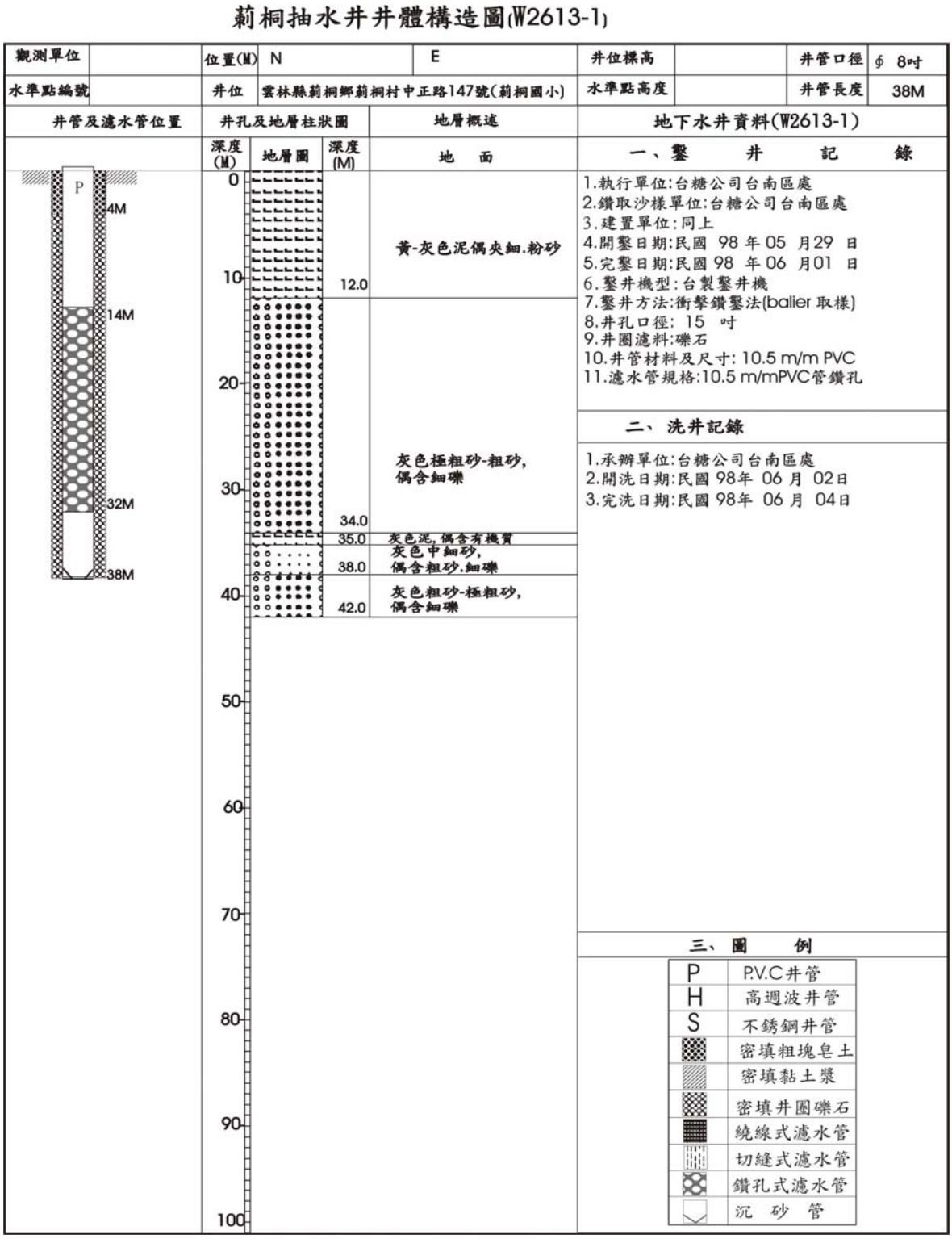


圖 3.2-1、蔦桐站抽水井井體構造圖

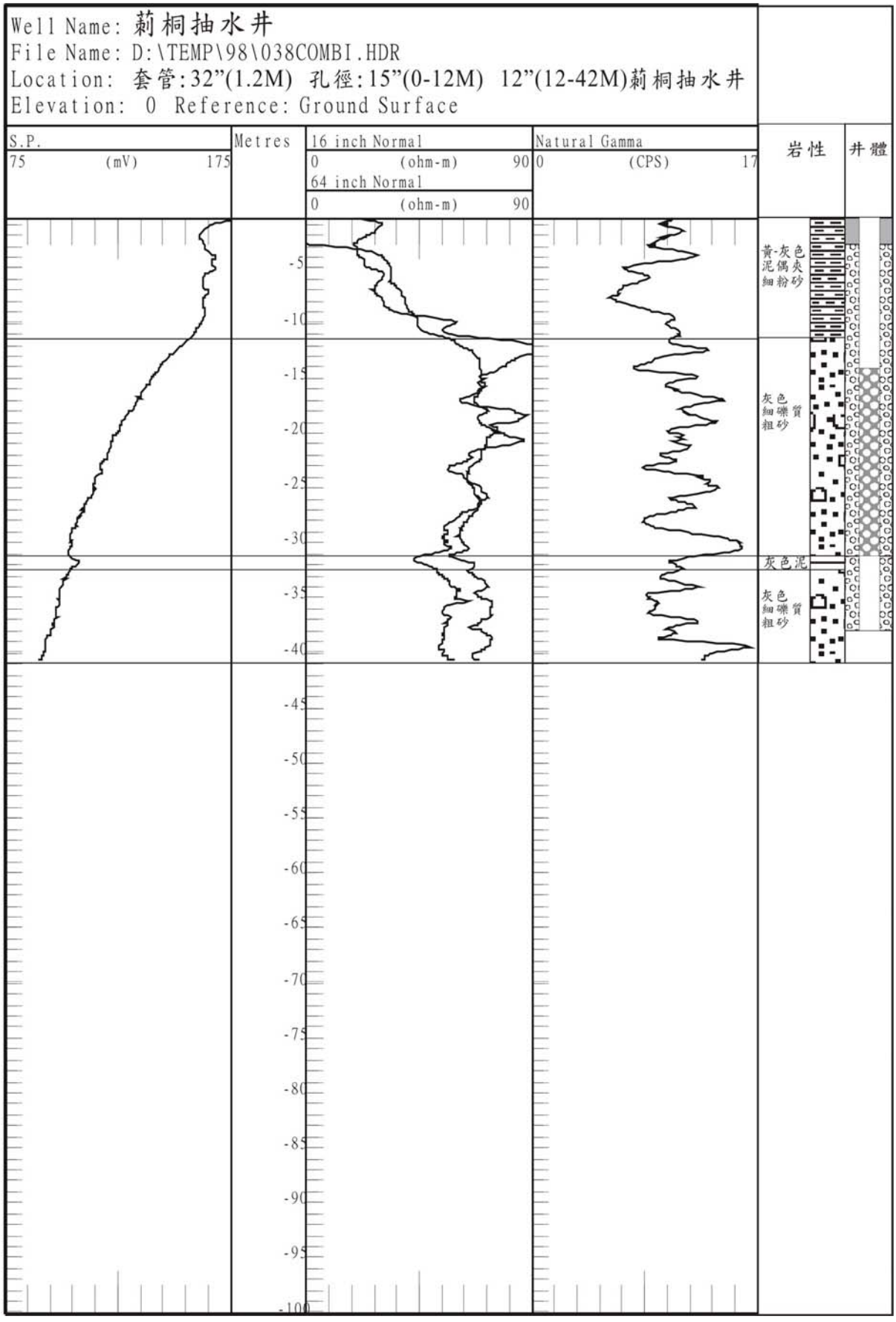


圖 3.2-2、蒞桐站抽水井井測圖

2. 柑園站

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

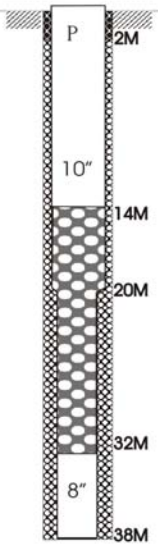
鑿井深度為 40m，依鑽探過程所汲取之砂樣資料顯示，本站除表層外（0-3m），其餘以礫質粗砂層及砂質礫石為主，並偶夾泥層，其中可見之泥層位置在 20~21m 附近（圖 3.2-3），未發現厚層泥。

井測曲線（圖 3.2-4）顯示正長距電阻率值幾皆超過 150ohm-m，依經驗岩性應以礫石為主，其中在 10m 附近其值異常之高，顯示為靜水位所在之處。自然伽瑪值曲線顯示 25-29m 處偏高，顯示礫石層局部含泥較高或夾泥層。

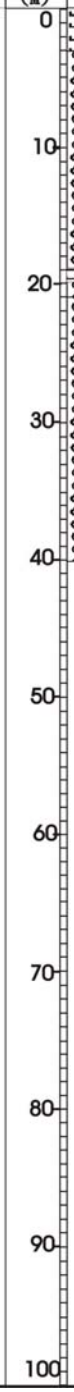
柑園抽水井井體構造圖(W2613-2)

觀測單位		位置(M)	N	E	井位標高		井管口徑	φ 10吋 8吋
水準點編號		井位	彰化縣溪洲鄉柑園村過溪路1號前		水準點高度		井管長度	38M

井管及濾水管位置



井孔及地層柱狀圖



地層概述

深度(M)	地　面
	灰色泥含砂
	灰色粗砂,偶含礫石,偶夾泥層
21.0	
	灰色礫質粗砂-粗砂質礫石
40.0	

地下水井資料(W2613-2)

一、鑿　井　記　錄

1.執行單位:台糖公司台南區處
2.鑽取沙樣單位:台糖公司台南區處
3.建置單位:同上
4.開鑿日期:民國 98 年 07 月21 日
5.完鑿日期:民國 98 年 07 月25 日
6.鑿井機型:台製鑿井機
7.鑿井方法:衝擊鑽鑿法(balier 取樣)
8.井孔口徑: 15 吋
9.井圈濾料:礫石
10.井管材料及尺寸: 厚10.5 m/m PVC
11.濾水管規格:厚10.5 m/m PVC管鑽孔

二、洗井記錄

1.承辦單位:台糖公司台南區處
2.開洗日期:民國 98 年 07 月26日
3.完洗日期:民國 98 年 07 月28日

三、圖　例

P	P.V.C井管
H	高週波井管
S	不銹鋼井管
	密填粗塊皂土
	密填黏土漿
	密填井圈礫石
	繞線式濾水管
	切縫式濾水管
	鑽孔式濾水管
	沉　砂　管

圖 3.2-3、柑園站抽水井井體構造圖

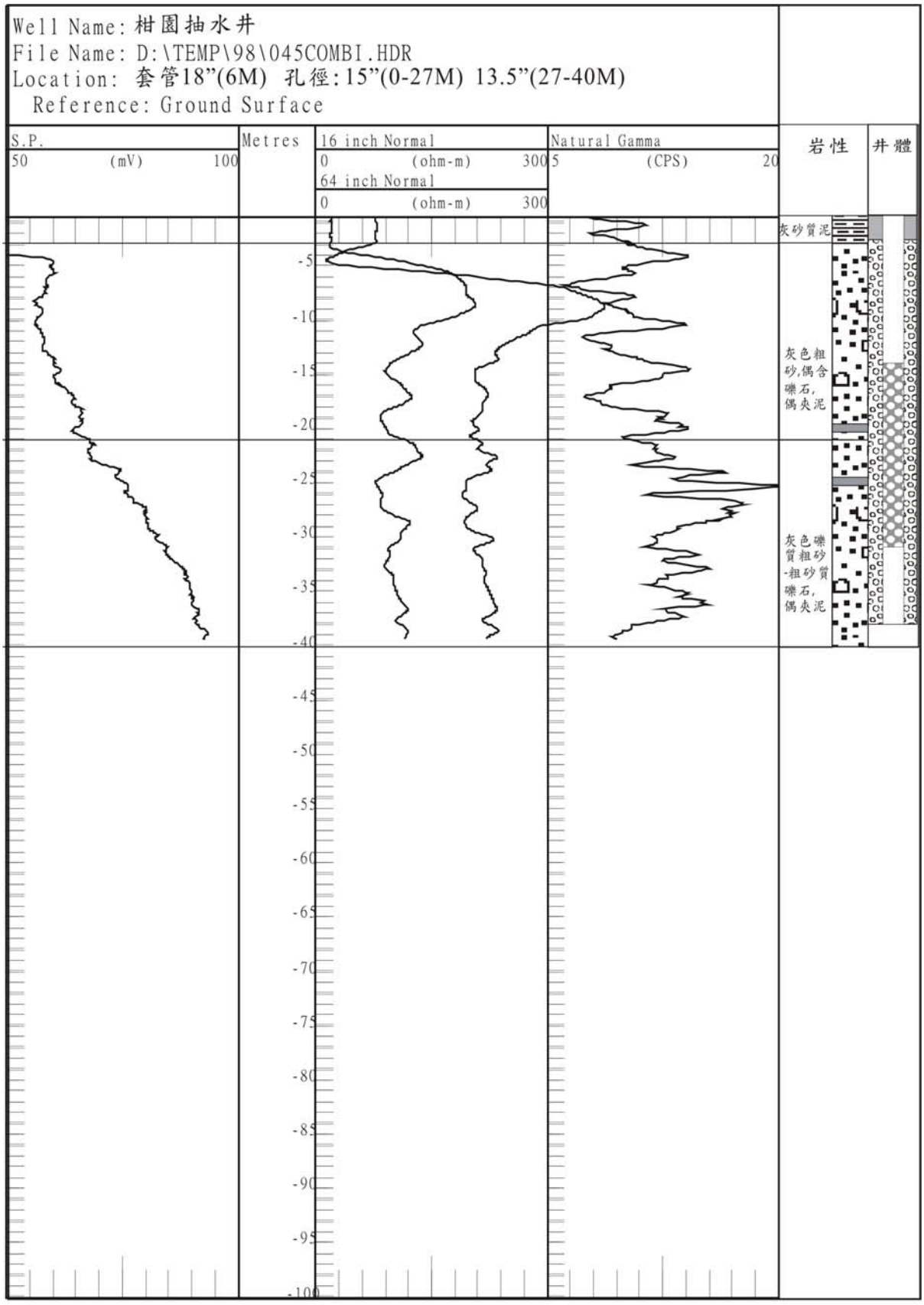


圖 3.2-4、柑園站抽水井井測圖

3.2.2 抽水試驗

一、分級試水

單井分級試水其目的在於分析觀測井試驗所取的試驗數據，以求取井體單位洩降出水量(Q/s)、井性能曲線式、導水係數(T)等參數。其試驗方法、程序及結果分述如下：

（一）試驗方法

分級試水採用連續抽水方式辦理。本計畫則將分級試水抽水量(Pumping Rate, Q)分成 5 級抽水量測試，依井中出水狀況作決定。，由小而大(亦即 $Q_1<Q_2<Q_3<Q_4<Q_5$)，各級抽水量差概略相等(即 $Q_2-Q_1 \fallingdotseq Q_3-Q_2 \fallingdotseq Q_4-Q_3 \fallingdotseq Q_5-Q_4$) ，$Q_5$ 一般約為 Q_1 之 2.5 倍。各級之抽水時間應相等。試驗過程中則利用觀測設備記錄各級抽水量對應之時間(t)及洩降量(drawdown, s)，洩降量為動水位(Dynamic Water Level)與靜水位(Static Water Level)間之差值。每一級試驗約 100 分鐘，再調整抽水量至下一級。

（二）參數計算與分析

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 $s(Q_n,t')$，其修正方式如下：

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

$s(Q_n,t')$：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 $(0 \sim \Delta t, min)$

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

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，則分析工作到此結束。
3. 若Q對s/Q點分布明顯地偏離直線，而是向上彎之曲線，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$\dfrac{\log(s_2/Q_2 - B) - \log(s_1/Q_1 - B)}{\log Q_2 - \log Q_1} = p - 1$，可得$p$值。

   $\log Q = \log 1 = 0$時直線之截距等於$\log C$，故

   $\dfrac{\log(s/Q - B) - \log C}{\log Q - \log 1} = p - 1$，可求得 C 值。

（三）分級試水結果

本年度已完成莿桐站抽(一)及柑園站抽(一)分級試水，茲將分級試水結果說明如下：

1. 莿桐站

莿桐站抽(一)分級試水，靜水位為 7.410 m，由第 1 級分級試水之

洩降差 Δs_1 =0.0327 m/log，以 T_1=10.262 m^2/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=95.2cmh，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. 柑園站

柑園站抽(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 Δs_1 =0.0336 m/log，以 T=7.254 m^2/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=170.8cmh，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 $s = 0.0123 \cdot Q + 7.18 \times 10^{-7} \cdot Q^{2.196}$ 。

二、複井抽水試驗

複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（抽一），由抽水井（抽一）裝置抽水機以定量抽水，並由圓縮口流量計控制抽水量；觀測井及抽試井各以測棒及自記式監測儀紀錄時間與水位關係，以進行複井抽水試驗。

（二）試驗程序

複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。

（三）複井抽水試驗結果

1. 莿桐站

莿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(一)、(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（觀一）推測為漏壓（Leaky）含水層。

莿桐站觀(一)於 98 年 6 月 11 日開始進行複井抽水試驗，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 次複井抽水試驗，6 月 18 日進行第 2 次回升試驗。茲將複井抽水試驗結果說明如下（分析圖表參考附錄一）：

莿桐站觀一（O1）第 1 次複井抽水試驗，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 m^2/min，S = 0.0007299，r/B= 0.03485。

莿桐站觀一（O1）第 2 次複井抽水試驗，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 m^2/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。

柑園站於抽一(P1)安裝抽水機，觀一(O1)、觀二(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 日開始進行複井抽水試驗，至 8 月底完成試驗。茲將複井抽水試驗結果說明如下（分析圖表參考附錄一）：

柑園站觀一（O1）複井抽水試驗，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 = 199.4cmh，井距 r = 15.90 m，以 Neuman 法分析，得 T =6.054 m^2/min，S = 0.0004856，Sy = 0.0408，β=0.00272。

柑園站觀一（O1）以 Boulton 法分析，前段（early-time）r/B=0.02，得 T = 4.760 m^2/min，S = 0.00116；後段(late-time) r/B=0.02，得 T = 4.760 m^2/min，Sy = 0.120。

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

3.2.3 抽水井設置及抽水試驗現場施工照片

1.蒞桐站施工前原貌



2.柑園站施工前原貌



3.井孔鑽設



4.井管及濾水管安裝



5.井圈濾料及密填處理



6.矽砂及密填處理



7.皂土及密填處理



8. 莿桐站抽水試驗工作



9.柑園站抽水試驗工作-1



10. 柑園站抽水試驗工作-2



11.柑園站完工照



12.莿桐站完工照



3.3 水質調查與分析

濁水溪沖積扇扇頂的巨厚礫石層構成了主要的補注區，其佔全區約 57%的地下水補注來源（江崇榮等，2006）。扇頂補注區的西邊界約沿著田中、柑園、莿桐、虎溪、及古坑；東邊界應沿著八卦台地及斗六丘陵的分水嶺。扇頂區除了是地下水資源豐富的區域，也是本區地下水的源頭，若有污染滲入，將對地下水資源產生很大的衝擊。許多國家已設立地下水水源保護區，例如美國華盛頓州的 CARA 區（Critical Aquifer Recharge Area）、喬治亞州的 GRAD 區（Groundwater Recharge Area District），但台灣尚在起步階段，所以極需進行此基礎調查研究（City of Issaquah，2009）。

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。

3.3.1 研究方法與步驟

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。本研究的採樣點，主要為台灣地區地下水觀測網之觀測井（經濟部中央地質調查所，1995，1999；台糖公司地下水中心，1999-2004）。為了瞭解補注區的水質變化，將會對其中位於補注區的井詳加討論，預計扇頂 22 口井及 3 處溪水（彰雲大橋、名竹大橋及南雲大橋），共 25 個採樣點，如圖 3.3-1 及表 3.3-1。

根據地下水水流方向及水文地質、彰雲扇頂區又可分為四個分區：濁水溪扇、斗六扇、上邊界及下邊界（圖 3.3-2）。濁水溪扇有二水、田中、烏塗、六合及柑園，此五站皆以礫石為主，為非受壓含水層。濁水溪扇的下邊界為田尾、溪州、西螺及莿桐，此四站淺處覆有泥層，屬於漏壓水層或受壓水層。上邊界有竹山、新光及社寮，此三站皆為於丘陵區之頭嵙山層。斗六扇有石榴、東和、古坑、崁腳等站，地下水源自斗六山區，由東南往西北流，其來源與水質都與濁水溪扇有很大差異。

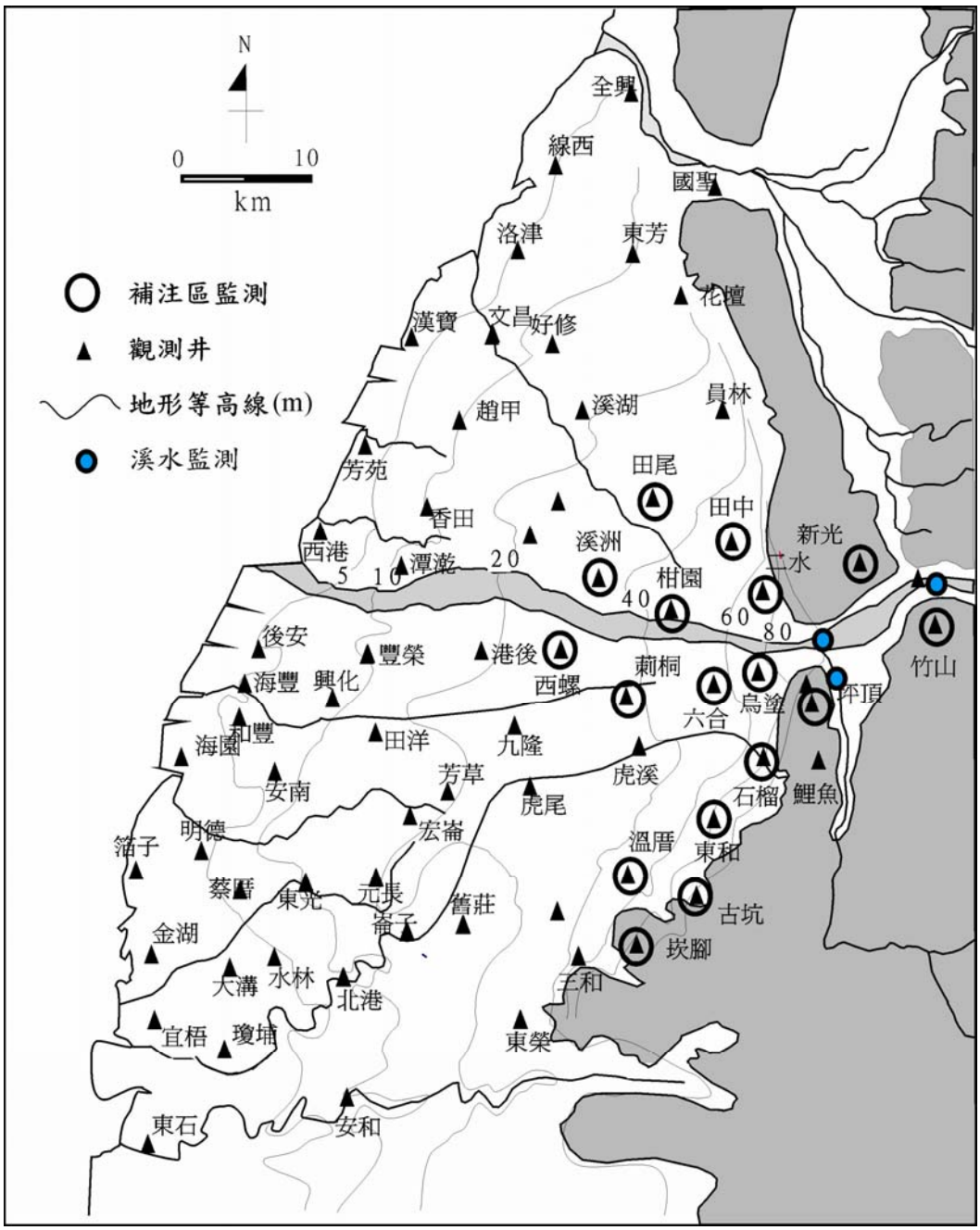


圖 3.3-1、彰雲地區觀測井地下水及溪水採樣位置圖

表 3.3-1、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)
崁腳一	78	102	53.62	202021	2612378	110.11
古坑一	66	102	47.52	204980	2615932	100.67
溫厝一	14	32	7.54	199400	2617408	48.65
溫厝二	78	96	12.74	199400	2617408	48.65
東和一	21	57	14.43	205251	2620504	75.66
石榴一	9	15	7.37	206944	2624360	66.57
坪頂一	144	186	95.77	212545	2628234	297.60
烏塗一	40	94	29.26	208141	2629816	72.31
六合一	24	54	17.21	204584	2629706	56.18
莿桐一	14	32	6.45	197886	2628381	37.62
西螺一	20	38	4.82	194891	2632723	29.49
社寮一	9	18	9.16	220800	2634163	176.07
竹山一	66	96	6.36	217282	2629020	150.95
新光一	78	120	53.1	215584	2638740	222.106
二水一	72	108	39.15	210242	2634428	82.44
柑園一	14	32	9.4	201662	2635696	46.69
溪洲一	4	28	4.56	198371	2639267	34.18
田中一	98	134	11.48	207088	2639188	49.56
田中二	243	266	14.29	207088	2639188	49.56
田尾一	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。

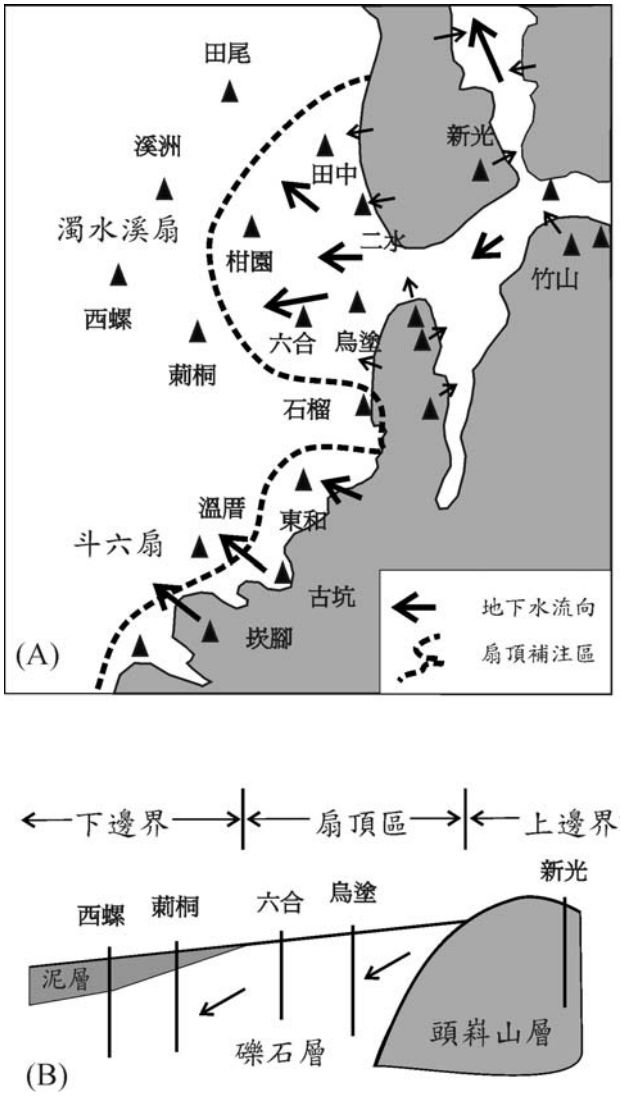


圖 3.3-2、(A)扇頂補注區可分為濁水溪扇及斗六扇(B)水文地質剖面示意圖

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 3.3-2）。採樣頻率為旱雨季各一次，2009 年採樣時間為六月（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 3.3-3）。

本計畫收集扇頂區的歷年水質數據，例如早期的地下水勘測隊（1957）、地下水觀測網的新建井水質化驗（謝永旭與蘇苗彬，1994-2003）、水利署的常態性水質監測（台糖公司地下水中心，1999-2004；農業工程研究中心，2007）、環保署的河川水質監測、加

上本年度所檢驗的數據，以探討水質之時間演變（圖 3.3-2）。

表 3.3-2、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：燄光光度計法	APHA(19th) 3500-Na D	0.50	mg/l
12	K：燄光光度計法	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 3.3-3、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

趨勢分析使用 Mann-Kendall 法（Kendall, 1975）。顯著值 S 以式 3.3-1 定義之：

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sign(x_j - x_k) \quad \text{.....(式 3.3-1)}$$

$Sign(X_j-X_k)=1$，若 $X_j-X_k>0$

$Sign(X_j-X_k)=0$，若 $X_j-X_k=0$

$Sign(X_j-X_k)=-1$，若 $X_j-X_k<0$

X_j 為時間 j 之數值、X_k 為時間系列之數值（共有 n 個值）。顯著值 S 為正值，表示有增加趨勢；若為負值，表示遞減之趨勢。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：

$$VAR(S) = \frac{1}{18}\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^{g} t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad \text{.....(式 3.3-2)}$$

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）：

若 S=0 則 Z=0

若 S>0 則 $Z=(S-1)/[VAR(S)]^{1/2}$

若 S<0 則 $Z=(S+1)/[VAR(S)]^{1/2}$

分布機率 f(z)為

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{z^2}{2}} \quad \text{.....(式 3.2-3)}$$

一般以 90－95%為顯著水平，本研究以 90%為判斷是否有顯著趨勢。

較長時間的連續監測，可瞭解降雨除了提高水位外，是否對於導電度有明顯的改變。水質連續監測為放置自記水質測棒，項目為水位、水溫及導電度三項，地點預計為柑園及莉桐。儀器為美國 In-Situ 公司的 Troll-200 型（圖 3），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 5－100000μS/cm、準確度 0.5%、解析度 0.1μS/cm；自記頻率預定為半小時一筆。連續監測於 2009 年 4 月 11 日開始，放置於六合一及莉桐一，後續因柑園站用地解決後，已於 6 月 17 日將六合一之測棒移至柑園。



圖 3.3-3、美國 In-situ Troll-200 水壓水溫導電度三合一自記測棒

主要成份可供辨識地下水來源及其時空演變，以瞭解其背景水質及演變的機制，配合地下水流向，是否有上游至下游規律的水質變化。主成份分析，將以導電度及菱形圖分析之。導電度反應出總溶解礦物的多寡，水中溶解礦物越多，則導電度越高，反之則低。因導電度會隨溫度而變化，一般都以校正為 25℃時的值來表示。

地下水與地層之沉澱與溶解，可經由常見自生礦物的飽和指數推測。例如硫酸鈣（硬石膏及石膏）、碳酸鈣（霰石及方解石）、碳酸鈣鎂（白雲石）、碳酸錳（菱錳礦）、及碳酸鐵（菱鐵礦）等。依水樣中的離子濃度，計算礦物之飽和指數，假設飽和指數於±1.0 時為飽和狀態、<-1.0 為未飽和、>1.0 為過飽和。本研究以美國地質調查所之水質地化模式 PHREEQC 進行計算與模擬（Parkhurst, 1995）。

微量成份如硝酸鹽，因大都來自人為施肥或污水，可作為污染示蹤劑，幫助補注區及補注路徑的畫定。

3.3.2 地下水主要成分

(一) 歷年導電度

彰雲平原地下水水質空間上的分布，以 2001 年的導電度表示，以第一層的導電度較高，第二含水層以下、除雲林口湖地區外，導電度較小，如圖 3.3-4。第一層含水層中，扇頂區除彰化田中及柑園外，其餘地區導電度明顯較扇央及扇尾區小，扇頂區地下水的導電度大都低於 750μS/cm（灌溉水標準）。

統計歷年導電度數據，四個分區中以下邊界各井的導電度較高(平

均約 600-1600μS/cm）、斗六扇較低（約 200-400μS/cm）。值得注意，濁水溪扇頂區許多井的導電度都已超過 750μS/cm，如圖 3.3-5。

若比較 1957、1997、2003 及 2009 年的導電度，濁水溪扇頂的水質有變鹹的趨勢，斗六扇頂則沒有明顯的變化(如圖 3.3-6 所示)。濁水溪扇頂有兩個明顯的趨勢：西北區的導電度有變大的趨勢，1957 年所有的井導電度都小於 1000μS/cm ，1997 年有一站的導電度大於 1000μS/cm，2003 年已有二站，至 2009 年有五站。濁水溪扇頂南岸導電度也有變大的趨勢，1957 年烏塗、六合及莿桐，導電度分別為 391、308、603μS/cm，1997 年此三站為 696、620、800μS/cm，2003 年此三站為 728、733、804μS/cm，至 2009 年 6 月增加為 903、982、1182μS/cm 如表 3.3-4、表 3.3-5、表 3.3-6 及表 3.3-7）。

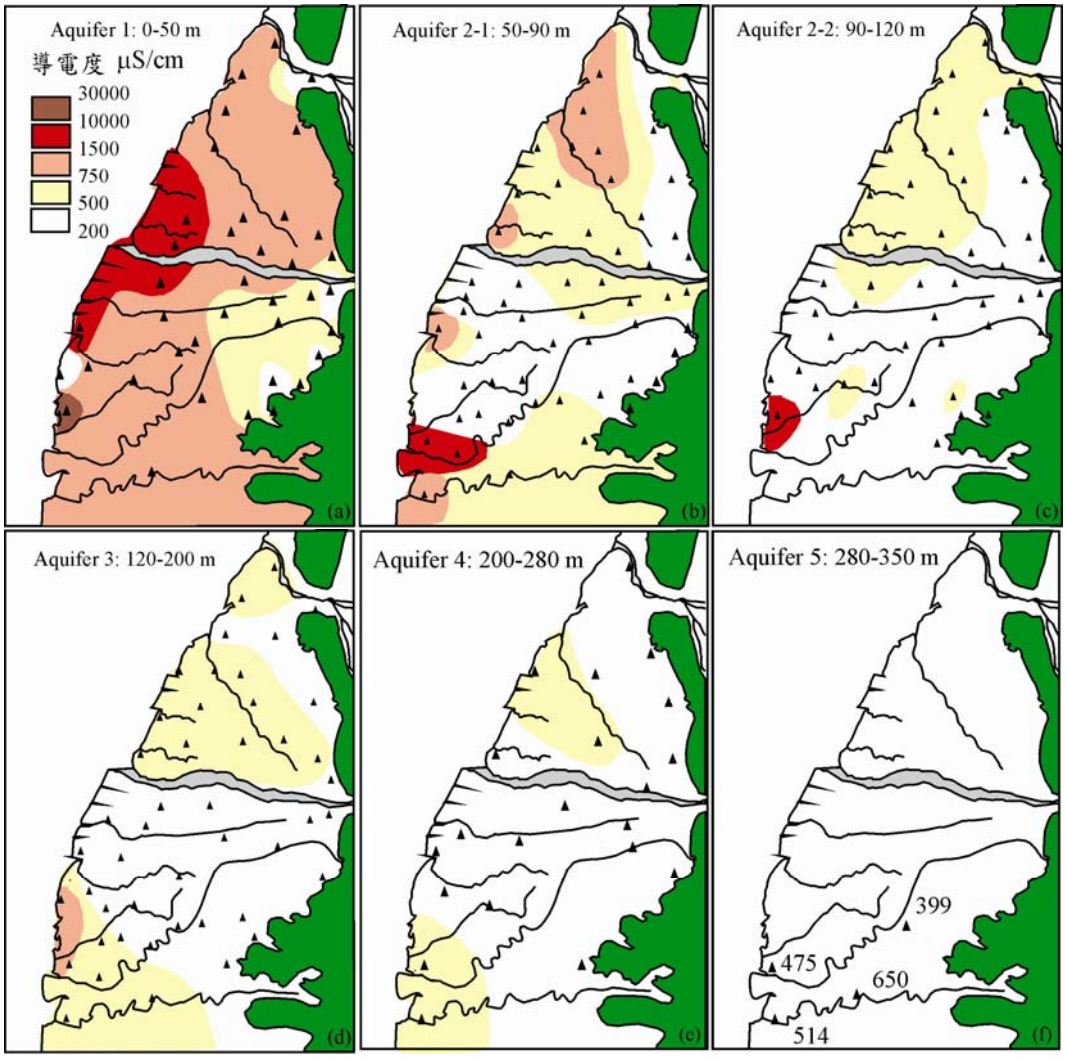


圖 3.3-4、彰雲地區地下水導電度（2001 年）

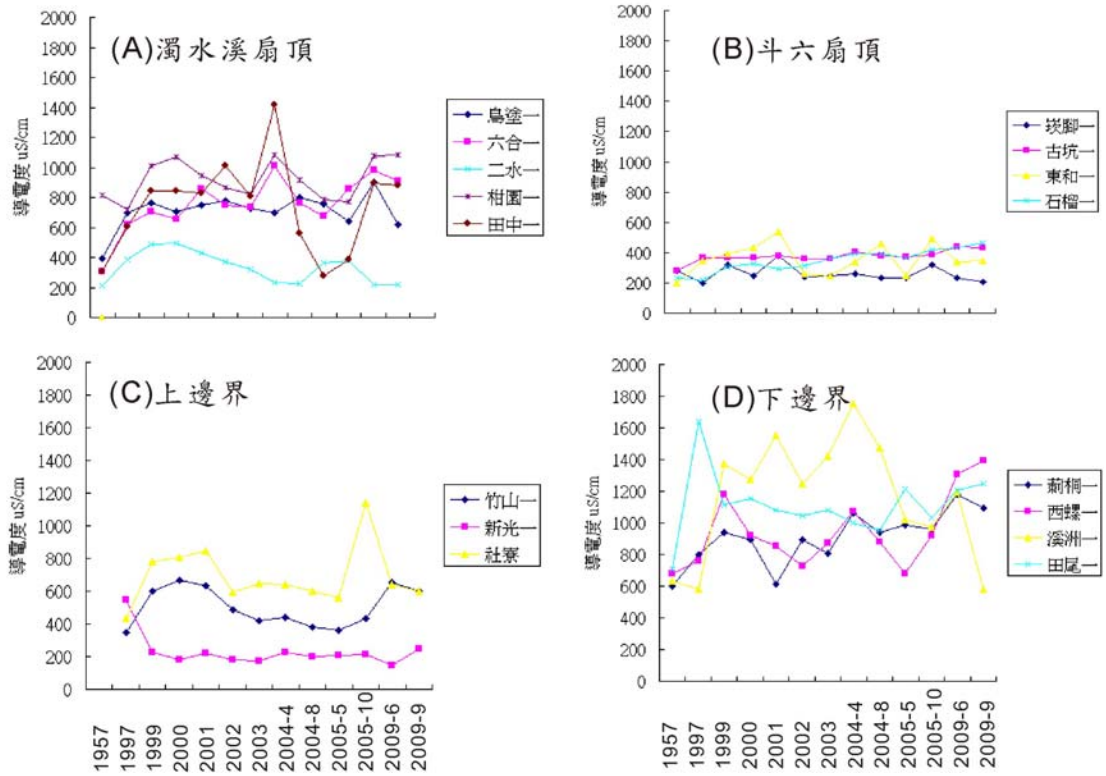


圖 3.3-5、歷年導電度變化

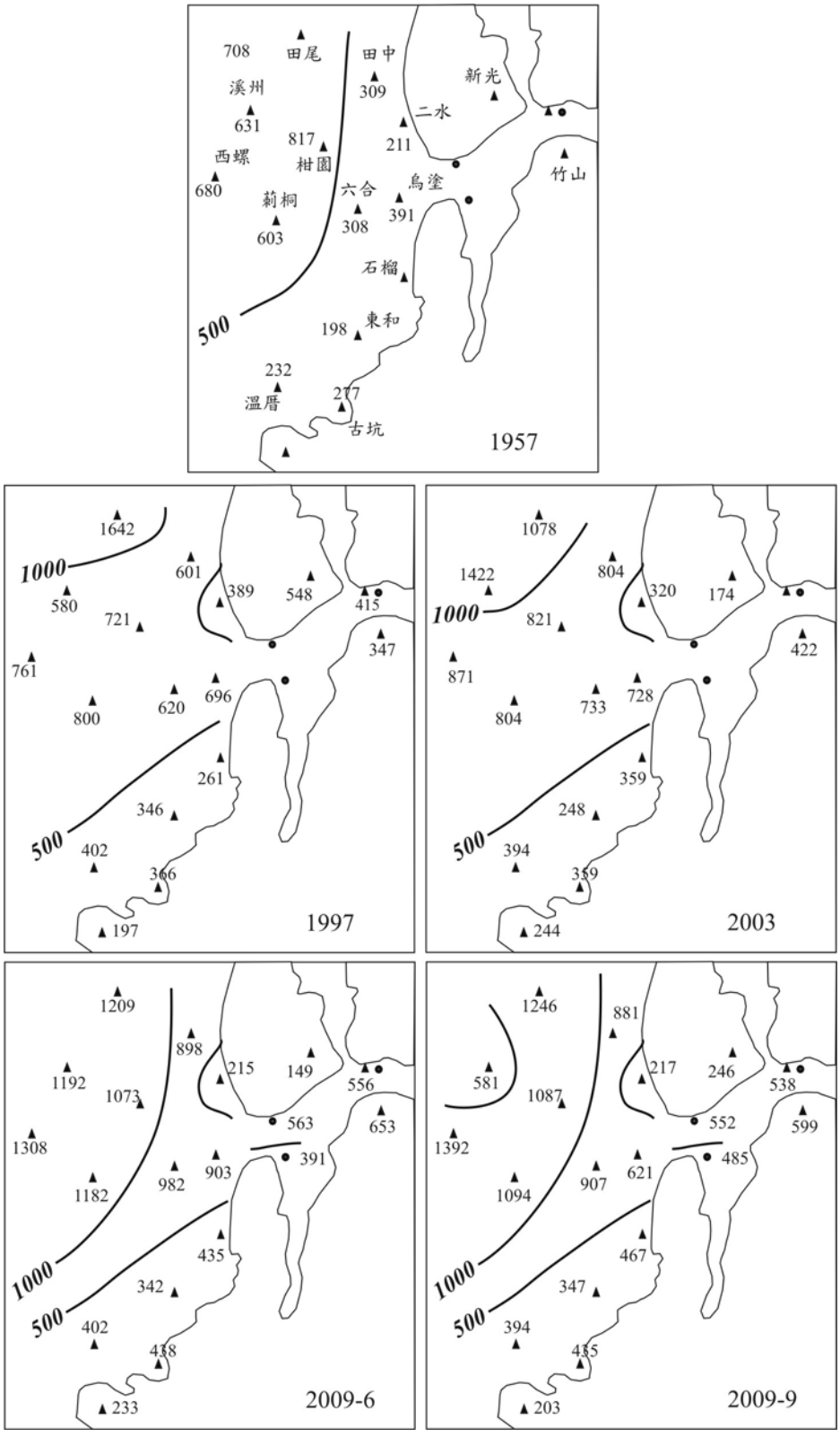


圖 3.3-6、彰雲扇頂地區地下水歷年導電度分布（μS/cm）

表 3.3-4、扇頂區歷年地下水平均導電度(μS/cm)

	濁水溪扇						斗六扇				
	烏塗一	六合一	二水一	柑園一	田中一	平均	崁腳一	古坑一	東和一	石榴一	平均
46 年	391	308	211	817	309	440	277	277	198	232	246
86 年度	696	620	389	721	601	638	197	366	346	216	281
88 年度	766	707	490	1014	842	793	319	366	390	308	346
89 年度	707	655	497	1069	846	778	244	367	429	325	341
90 年度	748	861	432	942	826	737	378	379	539	290	397
91 年度	780	748	372	862	1009	777	242	360	261	313	294
92 年度	728	733	320	821	804	702	244	359	248	359	303
93-4	699	1010	234	1083	1418	918	260	402	337	390	347
93-8	800	761	222	913	557	699	235	378	459	389	365
94-5	756	675	361	789	277	641	233	371	249	367	305
94-10	641	857	379	769	384	665	322	388	495	417	406
98-6	903	982	215	1073	898	876	233	438	342	435	362
98-9	621	907	217	1087	881	801	203	435	347	467	363

表 3.3-5、扇頂之上下邊界歷年地下水平均導電度(μS/cm)

	下邊界					上邊界			
	莿桐一	西螺一	溪洲一	田尾一	平均	竹山 1	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

表 3.3-6、扇頂區 2009 年 6 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
	μS/cm		℃	mg/l	mV
崁腳一	233	7.02	24.21	<0.50	-137
古坑一	438	6.92	24.05	6.35	87
溫厝一	402	7.32	23.84	<0.50	-44
溫厝二	414	7.03	24.54	<0.50	-45
東和一	342	7.11	24.15	1.42	-78
石榴一	435	6.71	24.12	<0.50	-210
烏塗一	903	7.17	24.35	4.35	-20
六合一	982	7.15	24.04	5.42	35
薊桐一	1182	7.24	24.55	<0.50	-135
西螺一	1308	7.15	24.62	<0.50	-170
社寮一	638	6.77	23.95	<0.50	-58
竹山一	653	6.87	34.35	1.52	60
新光一	149	6.81	23.42	<0.50	142
二水一	215	9.60	24.70	5.83	140
柑園一	1073	7.20	24.52	2.34	97
溪洲一	1192	7.32	24.16	<0.50	-125
田中一	898	7.32	23.27	3.55	147
田中二	828	7.18	24.42	5.25	136
田尾一	1209	7.17	24.35	<0.50	-250
名竹大橋	556	7.75	24.52	8.75	146
南雲大橋	391	7.74	25.65	7.54	197
彰雲大橋	563	7.78	25.34	7.65	175
雨水	8.7	7.28	27.31	8.44	147

表 3.3-7、扇頂區 2009 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
	μS/cm		℃	mg/l	mV
1. 崁腳一	203	6.96	24.20	1.50	145
2. 古坑一	435	7.16	24.15	4.53	278
3. 溫厝一	394	7.28	23.94	<0.50	-104
4. 溫厝二	416	5.78	24.54	2.31	85
5. 東和一	347	7.18	24.18	1.42	68
6. 石榴一	467	6.70	24.17	<0.50	-102
7. 烏塗一	621	7.97	24.31	6.55	147
8. 六合一	907	7.60	24.24	4.86	263
9. 薊桐一	1094	7.30	24.45	<0.50	-155
10. 西螺一	1392	7.31	24.63	<0.50	-187
11. 社寮一	599	7.48	23.95	2.13	104
12. 竹山一	590	7.18	34.45	2.65	198
13. 新光一	246	7.01	23.32	5.78	175
14. 二水一	217	9.80	24.80	4.97	185
15. 柑園一	1087	7.28	24.62	3.56	145
16. 溪洲一	581	7.38	24.18	<0.50	-187
17. 田中一	881	7.31	23.29	4.25	124
18. 田中二	815	7.25	24.45	3.54	187
19. 田尾一	1264	7.23	24.37	<0.50	-274
20. 名竹大橋	538	7.83	24.62	6.45	254
21. 南雲大橋	458	8.04	25.75	4.98	157
22. 彰雲大橋	552	7.03	25.84	7.55	198
23. 雨水	73	7.10	27.81	7.12	174

使用 Mann-Kendall 法分析其中 16 口井，其中六合、古坑、石榴、薊桐及西螺 5 口井，導電度有明顯變高的趨勢（90%顯著區間），一口井導電度變低（二水），其餘十口並沒有明顯趨勢(如表 3.3-8 所示)。若使用線性迴歸分析，六合井大約在 1990 年代時地下水超過灌溉水標準 750μS/cm，目前導電度大約在 800-1000μS/cm，如圖 3.3-7a。薊桐及西螺井超過 750μS/cm 標準的時間更早，約在 1970 年代，目前約在 1000-1400μS/cm 之間。古坑及石榴井雖然並沒有超過標準，但若目前趨勢不變，石榴井將於 2020 年代超過標準，古坑則約在 2050 年（圖 3.3-7b）。

表 3.3-8、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
烏塗一	13	391	903	13	0.74	0.46	無
六合一	13	308	1010	44	2.62	0.009	高
二水一	13	211	497	-28	-1.65	0.099	低
柑園一	13	721	1087	14	0.79	0.43	無
田中一	13	277	1009	8	0.43	0.67	無
崁腳一	13	197	378	-22	-1.29	0.20	無
古坑一	13	277	438	45	2.69	0.007	高
東和一	13	198	539	12	0.67	0.50	無
石榴一	13	216	467	64	3.84	0.0001	高
莿桐一	13	603	1182	48	2.87	0.004	高
西螺一	13	680	1392	30	1.77	0.077	高
溪洲一	13	580	1756	-4	-0.18	0.85	無
田尾一	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）

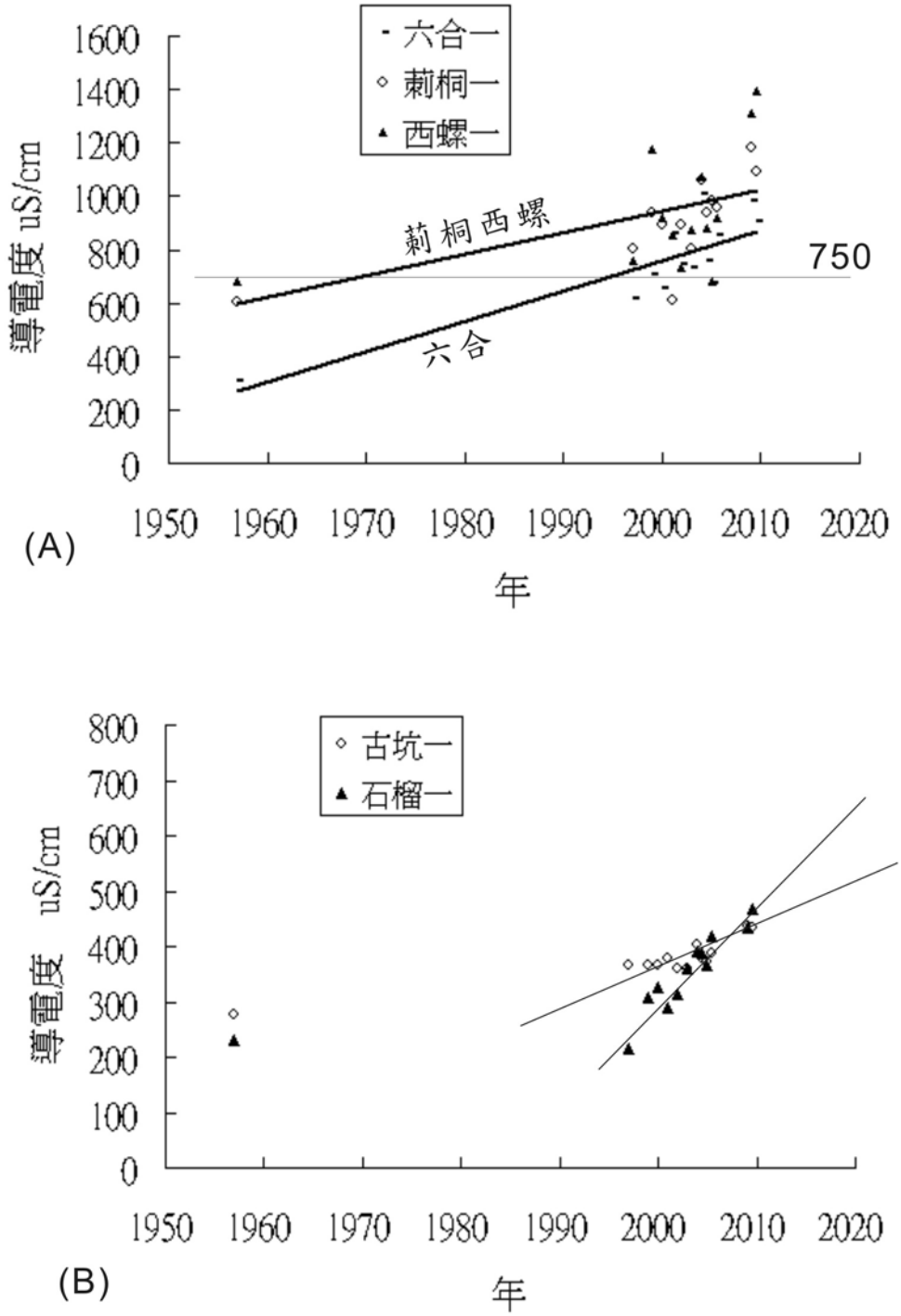


圖 3.3-7、六合莿桐等五口井之導電度迴歸

扇頂的地下水來源可能有側向補注、降雨、河水補注及人為用水等（含農業灌溉、畜牧廢水、生活廢水、工廠廢水等）。這些水源的水質應有很大的差異，流入扇頂區後，又因為混合作用及水岩及微生物地化反應，使水質發生變化，如圖 3.3-8。

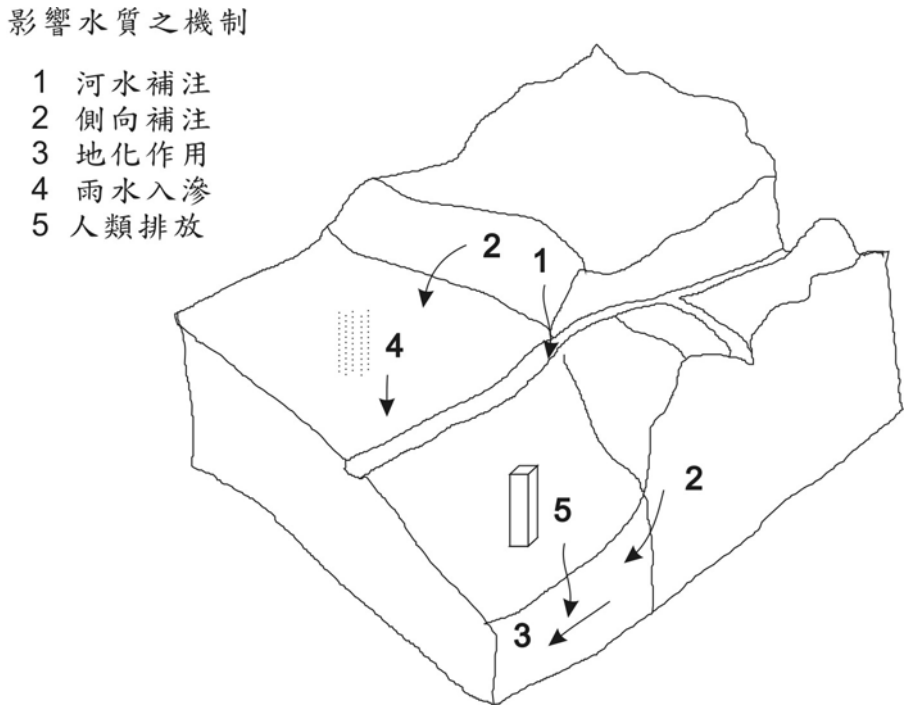


圖 3.3-8、影響扇頂地下水水質之因素

本區地下水最大的補注源應是濁水溪，因此濁水溪的溪水水質，為扇頂地下水水質的主要控制因素。濁水溪及清水溪河水的導電度，約在 200－600μS/cm，有明顯的年變化，雨季河水導電度較小、約 200－400μS/cm；旱季時導電度較高、約 400－600μS/cm，如圖 3.3-9。

比較溪水與地下水的導電度，二水與新民站的導電度與河水較接近，田中站則相差較多（圖 3.3-9）。二水站的導電度約 320－500μS/cm，新民一的導電度約 415－640μS/cm，名竹大橋（濁水溪）的溪水約 200－600μS/cm，南雲大橋（清水溪）的溪水約 200－500μS/cm，顯示此兩站的地下水與河水互相流動。新民站位於丘陵區河道，地下水由火炎山段流入濁水溪河床，二水站則由濁水溪河床滲入地下。田中站的導電度則明顯高出許多，可能有導電度較高的地面水混入，例如生活汙水或富含農田肥料的灌溉水。

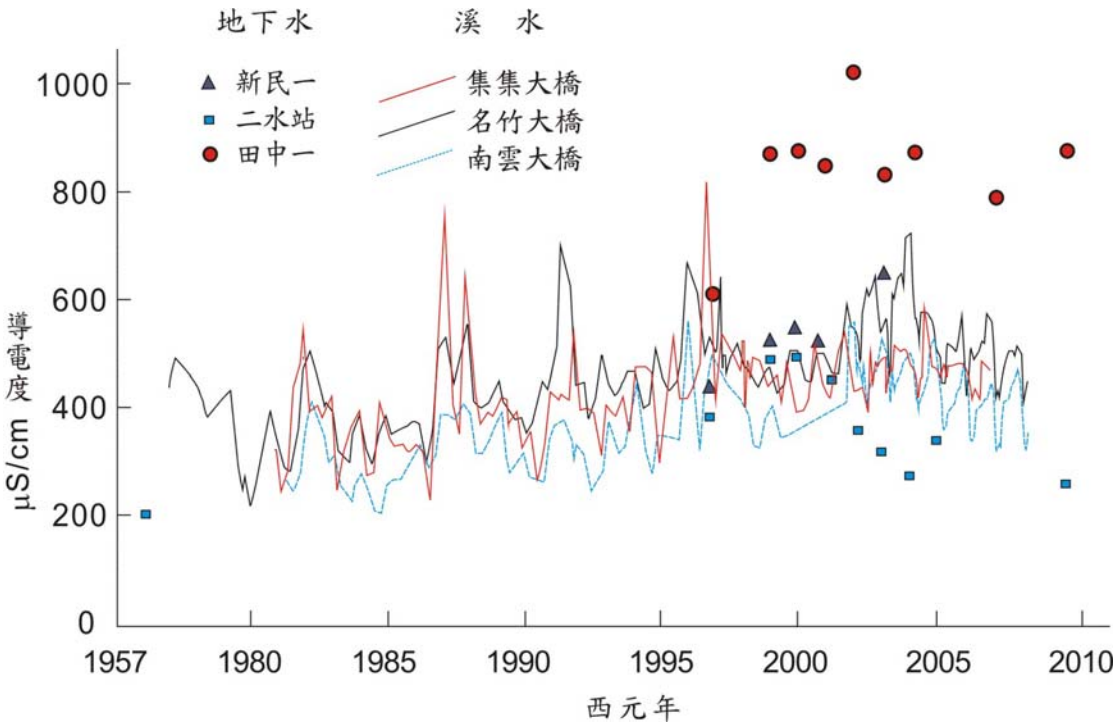


圖 3.3-9、溪水及地下水之導電度

1997 至 2009 年溪水之導電度，1997 年至 2004 年有緩慢上升，但 2004 年至 2008 年為緩慢下降，因此地下水導電度變大的趨勢，應不是溪水變化的影響。溪水的導電度很少超過 600μS/cm，但現今濁水溪扇頂有七成的站，地下水的導電度超過 600μS/cm，推測應有其它的來源。

颱風降雨對溪水導電度的影響非常明顯（圖 3.3-10）。2009 年 6 月 19 日蓮花颱風海上警報、並開始影響台灣陸地，6 月 19 日早上 9 時，因為降雨、溪水開始上漲，此時溪水導電度約 500μS/cm；6 月 20 日颱風登陸，風雨變大後，溪水水位上漲更多，導電度緩慢下降，6 月 21 日的溪水導電度約 400μS/cm;至 6 月 22 日早上 6 時至下午 7 時，溪水水位達到最高，導電度明顯變低，只有 200μS/cm；洪峯過後、導電度緩慢上升，6 月 25 日溪水下降至正常狀態，導電度緩升回 500μS/cm。

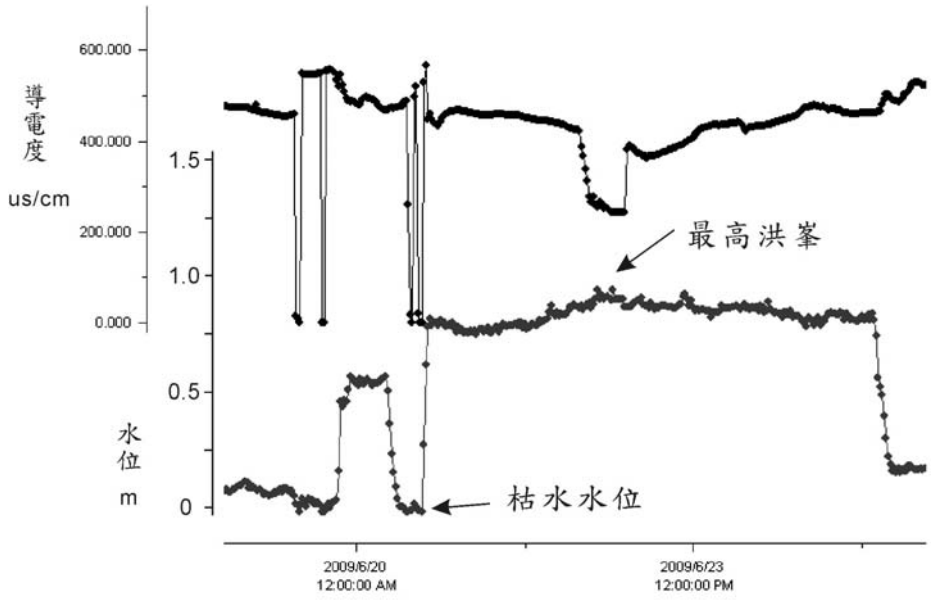


圖 3.3-10、彰雲橋溪水導電度與颱風之關係

(二) 導電度連續監測

莿桐、六合及柑園（皆為觀一）的導電度連續監測數據顯示，降雨造成莿桐的導電度增加、六合及柑園則相反、導電度明顯下降，如圖 3.3-11。觀測期間約從 4 月 11 日至 9 月 30 日，導電度及水位有 6 次事件的變化。事件 A，為較密集的春季降雨，時間約兩週，累積雨量共約 120mm。莿桐的導電度有明顯的上升，約從 1000μS/cm 升至 2000μS/cm;六合的導電度則明顯下降,約從 990μS/cm 降至 890μS/cm。

事件 B 為水質採樣造成，放監測儀器的井抽水，莿桐的導電度上升，但六合無變化。事件 C 為莿桐站抽水試驗，鄰井抽水、監測井的導電度並無變化。事件 D、E、F 都是颱風降雨，事件 D 及 E 為降雨較少的颱風，6 月底的蓮花颱風及 7 月中的莫拉菲颱風，同樣的在莿桐造成導電度上升,但柑園站導電度下降。事件 F 為降雨量大的颱風，莫拉克颱風 8 月 9 日單日降雨達 400mm，莿桐站導電度上升，但柑園站導電度並沒有下降。但長期而言、柑園 6 月時導電度約 1150μS/cm，颱風降雨使導電度下降至 1050μS/cm，不降雨時（EF 事件之間）導電度緩升，8 月莫拉克颱風降雨，雖沒有使導電度下降，但至少沒上升。

降雨造成莿桐的導電度增加、六合及柑園導電度下降之原因。可能因莿桐上覆約 8m 的泥層，其礦物質濃度較高，下雨時雨水流經泥層，溶解部份礦物質，使地下水導電度短暫升高。六合及柑園以礫石層為主，礦物質濃度較低，雨水下滲仍能維持低濃度，使地下水導電

度短暫變低。

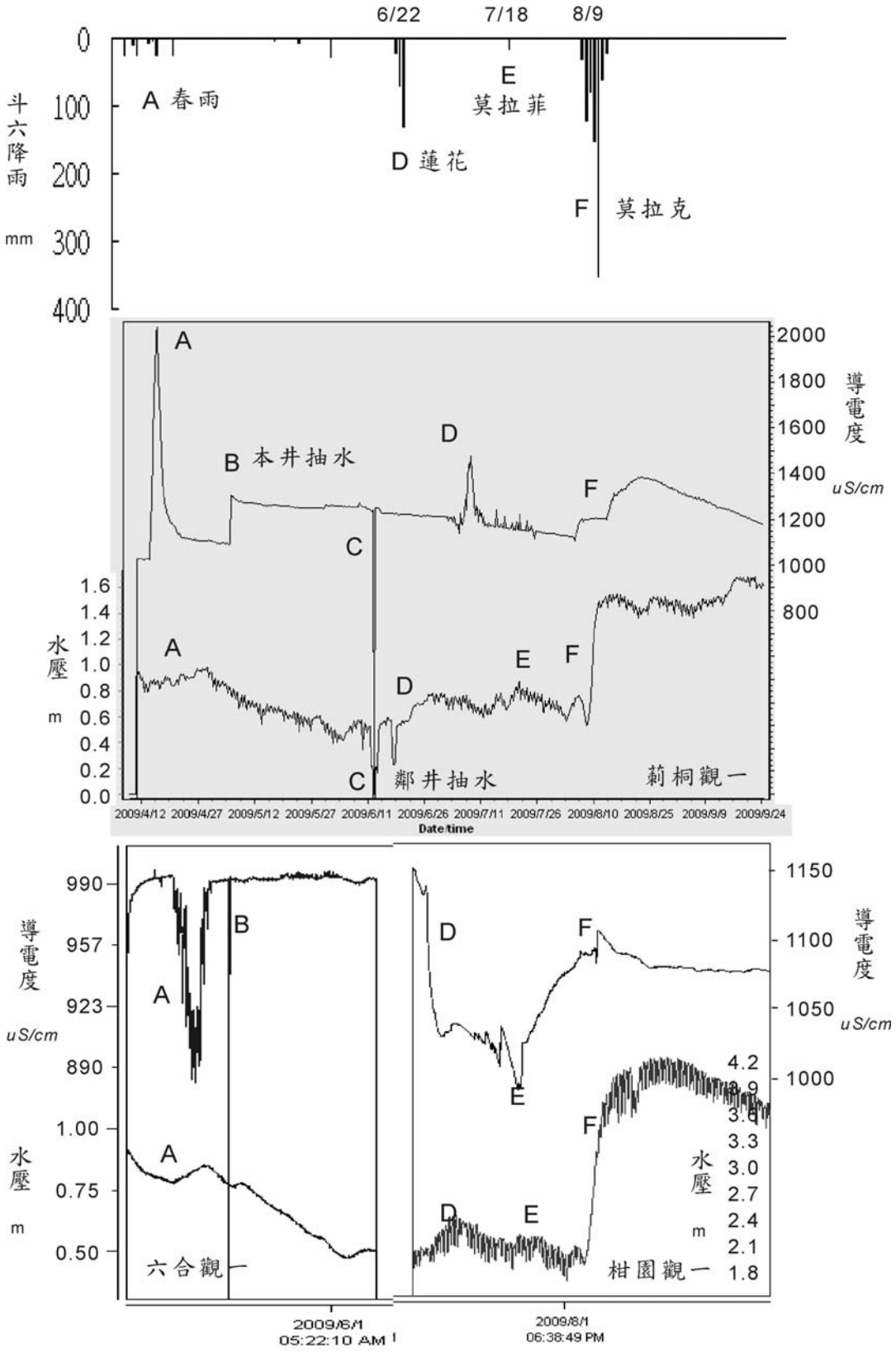


圖 3.3-11、莉桐、六合及柑園導電度連續監測數據

(三) 主要離子濃度比例與礦物飽和指數

扇頂地下水依主要離子濃度比例（表 3.3-9 及表 3.3-10），可分成兩類：硫酸根－碳酸氫根－鈣離子為主及碳酸氫根－鈉離子為主，前者為濁水溪扇頂及下邊界諸井，後者為斗六扇及上邊界，如圖 3.3-12。硫酸根－碳酸氫根－鈣離子類地下水，其陰離子濃度比－氯離子：硫酸根：碳酸氫根約為 10：30：60，陽離子比值鈣：鎂：鈉約為 70：20：10。碳酸氫根－鈉離子類型地下水，其硫酸根比例小於 25%、鈉離子濃度大於 15%。彰雲橋溪水水質介於此兩類之間，其硫酸鹽比例很高、達 50%，鈣濃度約 50%。

此兩類地下水之水質演化，為有機碳降解、硫酸根還原、陽離子交換及沉澱溶解等作用所控制。有機碳降解與硫酸根還原會同時進行，其結果為碳酸氫根濃度升高、但硫酸根濃度降低，如圖 3.3-13。

離子飽和計算結果顯示，所有地下水對硫酸鈣礦物都為未飽和(如表 3.3-11)。大都對碳酸鈣及碳酸鈣鎂為飽和及過飽和，只有崁腳、古坑、新光及石榴為未飽和。對碳酸錳大多為飽和及過飽和，只有古坑、東和二、新光及田中為未飽和。對碳酸鐵大多為飽和及過飽和，只有古坑、東和二及二水為未飽和。

扇頂區八口井：二水一、田中一二、柑園一二、烏塗一、六合一二，大都為硫酸鈣未飽和，碳酸鈣、碳酸鎂鈣、碳酸錳及碳酸鐵飽和，顯示本區地下水中的碳酸氫根、鈣、鎂、鐵、錳等離子受到沉澱/溶解作用的控制、硫酸根則否。硫酸根應受到硫酸根還原作用的控制。

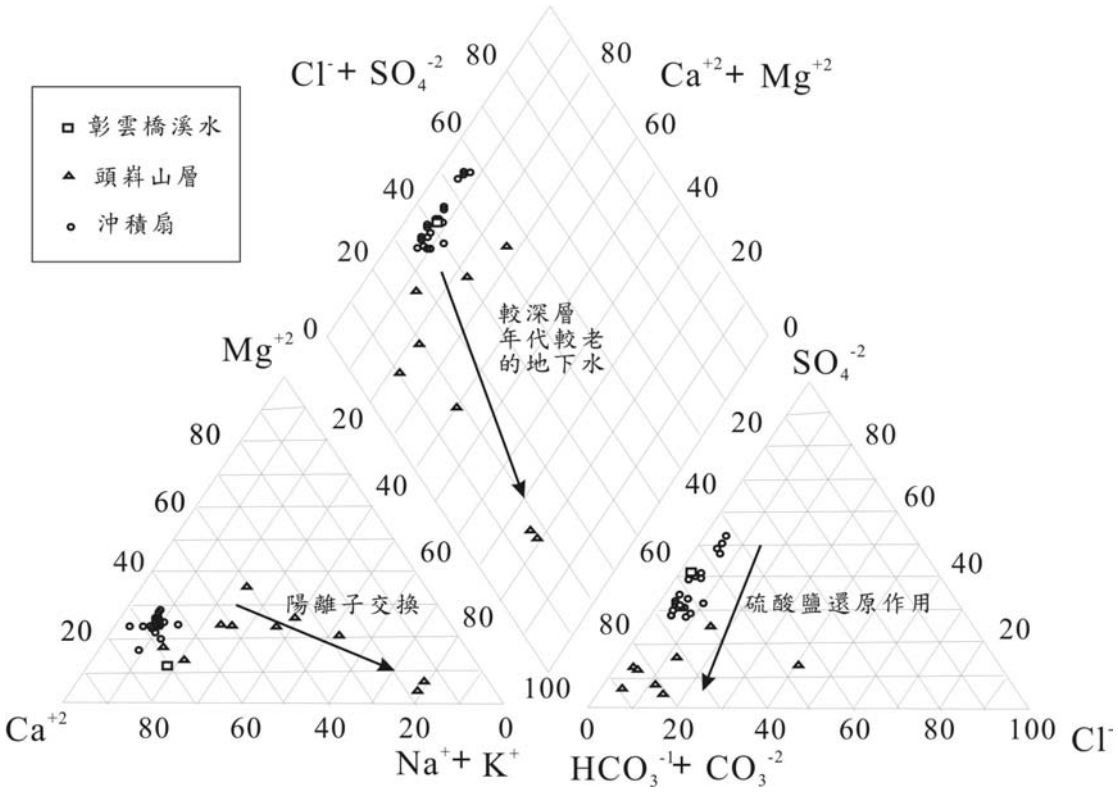


圖 3.3-12、地下水依主要成份分類

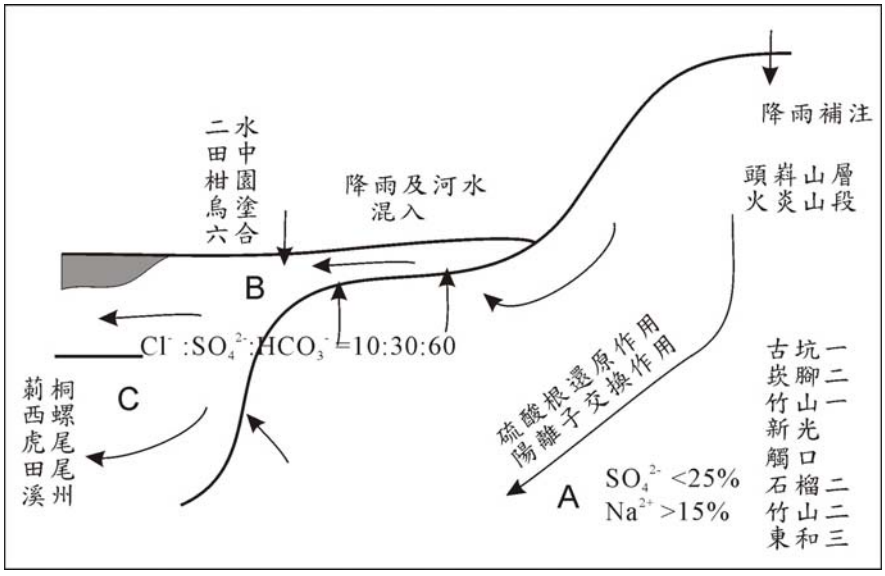


圖 3.3-13、地下水質演化模式

表 3.3-9、補注區及鄰近地下水之主要離子及鐵錳濃度(1999 年)

編號	站名	氯離子	硫酸根	鹼度	鈣	鎂	鈉	鉀	鐵	錳
33	崁腳一	8.15	9.6	125	41.3	3.04	11.7	1.56	2.87	0.92
34	崁腳二	9.93	37	55	13	4.37	13.8	<0.45	12	0.94
46	古坑一	16	36	85	33.3	9.72	19.1	0.78	0.09	0.006
60	東和一	12	62.9	115	37.3	14.7	17	<0.45	0.95	1.86
61	東和二	17	73.4	110	46.3	21.4	13.1	0.78	0.038	0.035
62	東和三	8.15	3.36	185	39.3	9.72	27.4	<0.45	1.31	0.23
63	虎尾一	13.1	129	270	113	20	18.6	1.17	2.16	0.21
64	虎尾二	12	113	200	82.2	20.6	18.9	0.78	2.14	0.2
77	石榴一	8.86	48.5	75	21	11.5	14.7	0.39	13	1.62
78	石榴二	13.1	13.4	130	32.1	9.1	16.6	0.78	8.09	0.33
83	坪頂一	31.9	137	255	140	19	14.5	0.78	0.21	0.15
84	觸口一	7.09	35	230	15	4.25	96.4	1.56	0.036	0.025
85	觸口二	8.86	28.8	210	18	2.43	86.9	1.17	0.030	0.05
86	烏塗一	14.9	116	250	108	23.7	12.9	1.56	0.18	0.039
87	六合一	11	106	250	102	23.1	12.2	1.56	0.06	0.035
88	六合二	13.1	133	275	121	29.2	12.4	1.96	0.030	0.032
89	薊桐一	16	162	335	142	28.6	16.3	2.74	2.24	0.31
90	薊桐二	12	109	250	103	20	13.1	1.56	0.063	0.043
104	西螺一	22	309	310	174	40.7	17.7	1.96	3.95	0.26
105	西螺二	11	142	210	95.2	22.5	14.5	1.56	1.32	0.17
116	竹山一	22	43.7	205	83.2	12.2	18.2	0.78	0.09	0.45
117	竹山二	6.03	11	185	53.1	6.08	18.9	0.78	0.92	0.23
118	新民一	8.15	138	125	70.1	18.2	8.05	1.56	0.22	0.41
119	新民二	8.15	146	130	75.2	17.6	10.1	1.56	0.07	0.013
120	新光一	26.9	11.5	45	14	6.08	29	1.17	1.14	0.05
121	新光二	8.86	4.8	65	12	5.47	15.6	<0.45	0.28	0.035
122	二水一	14.9	69.1	165	73.5	15.8	13.1	0.78	0.08	0.035
123	柑園一	14.9	186	340	160	30.4	12.9	2.35	0.1	0.18
124	柑園二	16	159	160	92.2	23.1	10.1	1.56	0.06	0.053
125	溪洲一	26.9	237	440	201	40.9	23.5	16.4	7.63	0.51
126	溪洲二	11	132	185	90.6	19.6	10.1	1.56	1.3	0.15
127	溪洲三	6.03	123	195	86.6	22.6	9.66	1.56	0.86	0.14
128	田中一	8.86	141	280	125	24.3	13.8	1.56	0.07	0.004
129	田中二	14.9	148	215	111	22.5	13.1	1.56	0.043	0.006
139	田尾一	24.1	195	385	164	34.9	21.2	5.47	2.88	0.46
140	田尾二	8.86	104	230	93.6	17.7	15	1.17	0.38	0.22

單位 mg/l

表 3.3-10、補注區及鄰近地下水之主要離子濃度(1999 年)

編號	站名	氯離子	硫酸根	碳酸氫根	鈣	鎂	鈉	鉀
33	崁腳一	0.23	0.20	2.50	2.07	0.25	0.51	0.04
34	崁腳二	0.28	0.77	1.10	0.65	0.36	0.60	<0.01
46	古坑一	0.45	0.75	1.70	1.67	0.81	0.83	0.02
60	東和一	0.34	1.31	2.30	1.87	1.23	0.74	<0.01
61	東和二	0.48	1.53	2.20	2.32	1.78	0.57	0.02
62	東和三	0.23	0.07	3.70	1.97	0.81	1.19	<0.01
63	虎尾一	0.37	2.69	5.40	5.65	1.67	0.81	0.03
64	虎尾二	0.34	2.35	4.00	4.11	1.72	0.82	0.02
77	石榴一	0.25	1.01	1.50	1.05	0.96	0.64	0.01
78	石榴二	0.37	0.28	2.60	1.61	0.76	0.72	0.02
83	坪頂一	0.90	2.85	5.10	7.00	1.58	0.63	0.02
84	觸口一	0.20	0.73	4.60	0.75	0.35	4.19	0.04
85	觸口二	0.25	0.60	4.20	0.90	0.20	3.78	0.03
86	烏塗一	0.42	2.42	5.00	5.40	1.98	0.56	0.04
87	六合一	0.31	2.21	5.00	5.10	1.93	0.53	0.04
88	六合二	0.37	2.77	5.50	6.05	2.43	0.54	0.05
89	薊桐一	0.45	3.38	6.70	7.10	2.38	0.71	0.07
90	薊桐二	0.34	2.27	5.00	5.15	1.67	0.57	0.04
104	西螺一	0.62	6.44	6.20	8.70	3.39	0.77	0.05
105	西螺二	0.31	2.96	4.20	4.76	1.88	0.63	0.04
116	竹山一	0.62	0.91	4.10	4.16	1.02	0.79	0.02
117	竹山二	0.17	0.23	3.70	2.66	0.51	0.82	0.02
118	新民一	0.23	2.88	2.50	3.51	1.52	0.35	0.04
119	新民二	0.23	3.04	2.60	3.76	1.47	0.44	0.04
120	新光一	0.76	0.24	0.90	0.70	0.51	1.26	0.03
121	新光二	0.25	0.10	1.30	0.60	0.46	0.68	<0.01
122	二水一	0.42	1.44	3.30	3.68	1.32	0.57	0.02
123	柑園一	0.42	3.88	6.80	8.00	2.53	0.56	0.06
124	柑園二	0.45	3.31	3.20	4.61	1.93	0.44	0.04
125	溪洲一	0.76	4.94	8.80	10.05	3.41	1.02	0.42
126	溪洲二	0.31	2.75	3.70	4.53	1.63	0.44	0.04
127	溪洲三	0.17	2.56	3.90	4.33	1.88	0.42	0.04
128	田中一	0.25	2.94	5.60	6.25	2.03	0.60	0.04
129	田中二	0.42	3.08	4.30	5.55	1.88	0.57	0.04
139	田尾一	0.68	4.06	7.70	8.20	2.91	0.92	0.14
140	田尾二	0.25	2.17	4.60	4.68	1.48	0.65	0.03

單位 meq/l

表 3.3-11、扇頂及鄰近地下水之礦物飽和指數

編號	站名	Anhydrite	Gypsum	Aragonite	Calcite	Dolomite	Rhodochrosite	Siderite
		$CaSO_4$	$CaSO_4.2H_2O$	$CaCO_3$	$CaCO_3$	$CaMg(CO_3)_2$	$MnCO_3$	$FeCO_3$
33	崁腳一	-2.93	-2.71	-0.41	-0.26	-1.31	0.50	0.77
34	崁腳二	-2.8	-2.58	-1.92	-1.77	-3.64	-0.43	0.43
46	古坑一	-2.47	-2.25	-1.41	-1.26	-2.71	-2.77	-1.60
60	東和一	-2.22	-2.00	-1.00	-0.86	-1.76	0.30	-0.23
61	東和二	-2.10	-1.88	-0.74	-0.59	-1.17	-1.26	-1.46
62	東和三	-3.44	-3.22	-0.11	0.04	-0.18	0.17	0.72
63	虎尾一	-2.55	-2.34	-0.04	0.10	1.85	-0.17	0.61
64	虎尾二	-1.74	-1.52	-0.0	0.14	0.04	-0.04	0.74
77	石榴一	-2.54	-2.32	-1.93	-1.79	-3.49	-0.42	0.24
78	石榴二	-2.91	-2.69	-1.02	-0.87	-1.95	-0.41	0.73
83	坪頂一	-1.5	-1.28	0.41	0.55	0.60	-0.04	-0.09
84	觸口一	-2.85	-2.63	0.05	0.20	0.20	-0.28	-0.38
85	觸口二	-2.84	-2.62	0.11	0.25	0.0	-0.09	-0.4
86	烏塗一	-1.65	-1.43	0.33	0.47	0.63	-0.67	-0.14
87	六合一	-1.70	-1.49	0.35	0.49	0.70	-0.63	-0.56
88	六合二	-1.56	-1.34	0.32	0.47	0.67	-0.71	-0.88
89	薊桐一	-1.45	-1.23	0.55	0.70	1.04	0.36	1.03
90	薊桐二	-1.68	-1.47	0.4	0.54	0.74	-0.60	-0.74
104	西螺一	-1.16	-0.94	0.42	0.57	0.85	0.12	1.09
105	西螺二	-1.61	-1.39	0.32	0.47	0.66	0.08	0.78
116	竹山一	-2.10	-1.89	-0.16	-0.02	-0.5	0.13	-0.76
117	竹山二	-2.81	-2.59	0.32	0.47	0.33	0.38	0.84
118	新民一	-1.70	-1.48	0.24	0.39	0.54	0.52	0.08
119	新民二	-1.65	-1.44	0.11	0.25	0.22	-0.69	-0.53
120	新光一	-3.26	-3.04	-1.62	-1.48	-2.97	-1.40	-0.32
121	新光二	-3.67	-3.45	-1.26	-1.12	-2.22	-1.19	-0.51
122	二水一	-1.95	-1.73	-0.46	-0.32	-0.95	-1.2	-1.03
123	柑園一	-1.36	-1.14	0.37	0.52	0.66	-0.06	-0.50
124	柑園二	-1.57	-1.35	0.22	0.37	0.49	-0.68	-0.58
125	溪洲一	-1.23	-1.01	0.27	0.42	0.49	0.20	1.15
126	溪洲二	-1.64	-1.42	0.21	0.35	0.38	-0.05	0.69
127	溪洲三	-1.69	-1.47	0.28	0.42	0.60	-0.01	0.59
128	田中一	-1.53	-1.31	0.43	0.79	0.79	-1.64	-0.48
129	田中二	-1.54	-1.32	0.18	0.30	0.30	-1.79	-0.96
139	田尾一	-1.35	-1.13	0.47	0.90	0.90	0.40	1.00
140	田尾二	-1.73	-1.51	0.52	0.95	0.95	0.33	0.41

表 3.3-12、扇頂區 2009 年 6 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
崁腳一	138	2.91	1.22	25.88	3.93	14.83	1.77
古坑一	183	10.95	54.19	47.91	14.81	25.26	1.52
溫厝一	153	8.28	65.15	44.2	11.58	22.04	1.71
溫厝二	161	7.98	65.11	47.7	11.15	20.88	1.45
東和一	162	10.05	19.61	31.2	11.7	15	1.03
石榴一	218	0.77	41.81	55.2	13.21	4.5	1.27
烏塗一	345	8.97	152.5	131.5	26.95	15.51	2.63
六合一	365	10.46	167.9	120.4	30.64	14.44	2.26
蔦桐一	501	40.89	115.3	198	16.53	11.9	3.04
西螺一	349	25.65	322.2	161	50.54	19.62	3.28
社寮一	212	6.68	118.8	92.15	17.61	12.24	2.82
竹山一	324	13.06	54.03	98	12.82	19.83	1.92
新光一	79	2.66	2.21	9.2	5.83	13.28	0.99
二水一	81	7.35	29.22	17.5	1	20.56	4.63
柑園一	363	10.3	186.3	132	33.04	14.98	4.28
溪洲一	413	16.57	221	142	39.5	18.53	7.01
田中一	356	10.66	137.7	144	25.04	13.46	2.99
田中二	296	8.1	141	115.1	23.83	12.51	2.66
田尾一	512	26.81	138.2	173	30.94	32.46	8.43
名竹大橋	186	3.4	102.1	78	15.95	11.62	2.79
南雲大橋	163	1.93	57.51	39.14	9.92	14.98	1.89
彰雲大橋	190	3.86	103.9	87.4	14.09	11.9	2.4
雨水	8	0.47	0.97	1.51	0.5	0.5	0.1

表 3.3-13、扇頂區 2009 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
崁腳一	115	2.34	1.64	21.4	3.45	14.78	1.5
古坑一	175	10.64	52.9	46.39	13.87	20.12	1.23
溫厝一	223	7.5	5.8	48.31	13.39	15.15	1.66
溫厝二	153	8.28	62.65	56.86	10.31	17.77	1.47
東和一	157	10.79	14.21	33.4	10.92	14.66	0.85
石榴一	143	24.14	78.24	54.61	14.5	20.55	1.22
烏塗一	208	6.15	122.7	76.5	26.05	16.62	2.69
六合一	337	9.84	155.8	111	30.64	14.22	2.7
蔦桐一	241	15.66	267.8	131	41.32	18.09	4.09
西螺一	345	25.24	341.2	180	50.92	19.03	3.38
社寮一	231	8.02	84.09	83.8	15.51	11.27	2.67
竹山一	248	12.58	51.62	83.1	10.23	18.47	1.91
新光一	134	7.9	1.56	24.1	6.99	17.47	1.06
二水一	83	7.34	30.19	22.2	1	19.18	4.1
柑園一	390	8.07	187.5	157	33.34	12.89	3.66
溪洲一	251	8.19	59.66	80.1	16.1	7.69	5.02
田中一	351	10.88	140.7	117	25.69	14.11	2.05
田中二	315	8.48	134.7	112	24.74	12.29	1.91
田尾一	453	20.92	218.9	154	37.39	26.49	7.01
名竹大橋	167	2.98	128.1	67.7	18.75	9.84	2.6
南雲大橋	193	3.46	66.45	51	13.36	20.98	3.06
彰雲大橋	179	3.5	126.8	67.8	18.51	10.53	2.72
雨水	23	6.65	5.61	9.3	1	4.29	0.9

(四) 微量成分-硝酸鹽

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 1997－2009 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(如表 3.3-14 所示)。曾超過環保署飲用水限值 10 mg/l 的井有：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，2009 年 9 月該兩口井也超過限值(如圖 3.3-14 所示)。溪水的硝酸鹽濃度，名竹大橋、南雲大橋及彰雲大橋溪水的硝態氮、除一次外、都大於 1mg/l，是否有農業汙染，值得注意（圖 3.3-15）。

表 3.3-14、濁水溪扇頂補注區之歷年硝態氮濃度（NO_3-N mg/l）

井名	1997	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2007	2009 6月	2009 9月
崁腳一	2.45	0.66	0.38	1.18	0.37	0.72	0.77	1.73	0.54	0.19	<0.05
古坑一	3.15	7.41	12.20	17.80	10.46	12.63	13.70	14.77		6.57	12.9
溫厝一	0.18	0.24	0.20	0.23	0.31	0.36	0.15	0.23	0.11	0.69	<0.05
溫厝二	1.14	3.10	2.32	1.82	1.57	2.43	1.69	2.54	2.91	1.63	3.21
東和一	13.76	0.10	3.57	3.91	0.34	0.23	0.34	0.29	0.10	0.07	<0.05
石榴一	0.08	0.14	0.26	0.05	0.07	0.12	0.10	0.12	0.24	0.05	<0.05
烏塗一	2.12	7.05	6.87	4.01	2.84	0.31	3.90	2.36		2.75	0.51
六合一	6.46	3.46	7.99	4.15	5.02	5.82	4.58	8.52	8.67	5.06	5.28
莿桐一	0.02	0.10	0.13	1.27	0.06	0.03	0.10	0.11	1.92	<0.05	<0.05
西螺一	0.74	0.10	0.17	0.57	0.09	0.26	0.10	0.12	0.17	<0.05	<0.05
社寮一	0.47	2.13	13.40	14.10	6.74	6.4	9.33	2.36		3.07	2.39
竹山一	0.02	7.24	7.05	7.81	3.09	2.29	1.44	2.27	9.77	5.34	5.82
新光一	1.55	8.99	9.94	10.20	9.77	11.35	14.50	18.59	23.2	0.59	14.4
二水一	3.65	8.47	12.70	3.32	3.21	1.24	0.10	0.33		0.50	<0.05
柑園一	1.99	4.80	5.30	0.72	0.59	1.35	2.37	0.59	6.07	<0.05	4.88
溪洲一	0.16	0.26	0.18	0.66	0.14	0.11	0.10	0.10	0.04	<0.05	<0.05
田中一	2.36	6.79	5.75	5.96	6.61	10.47	3.29	2.08	7.65	6.66	5.90
田中二	0.06	7.16	2.95	2.95	2.31	5.18	3.09	5.02	8.02	6.62	6.57
田尾一	0.10	0.12	0.14	0.10	0.37	0.15	0.10	0.10	0.03	<0.05	<0.05
名竹大橋										3.21	1.37
南雲大橋										2.78	0.83
彰雲大橋										3.26	1.33
雨水										<0.05	<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。
   2009 年本研究採樣。

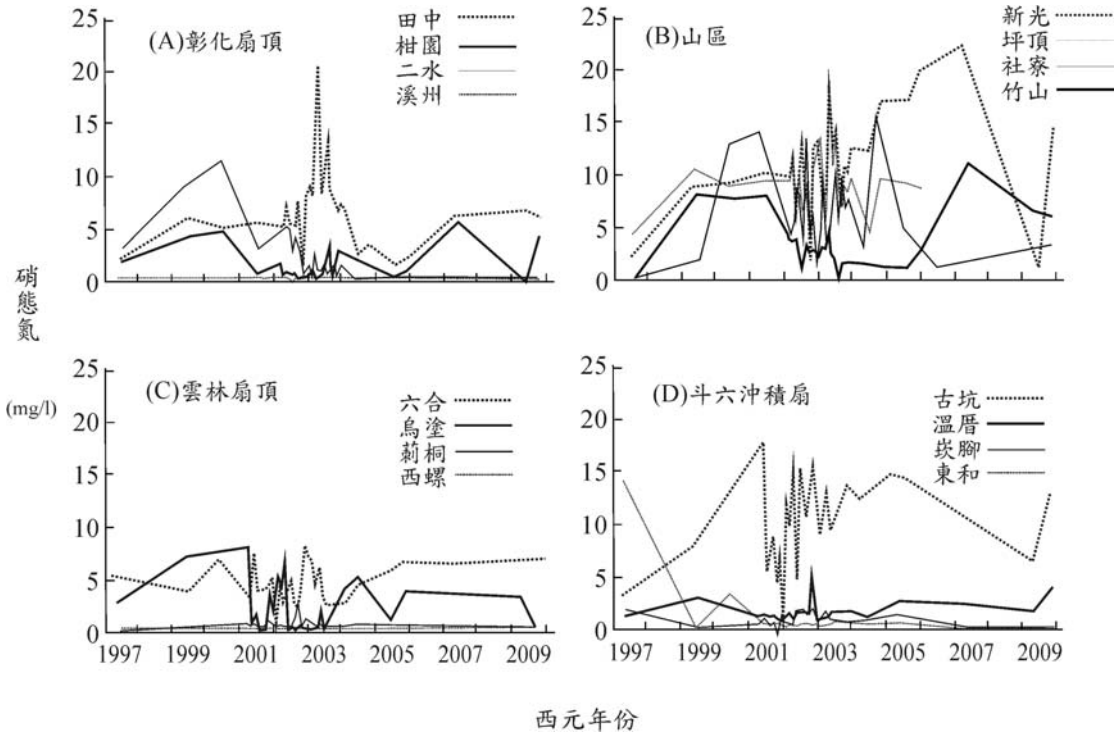


圖 3.3-14、彰雲扇頂之歷年硝態氮濃度

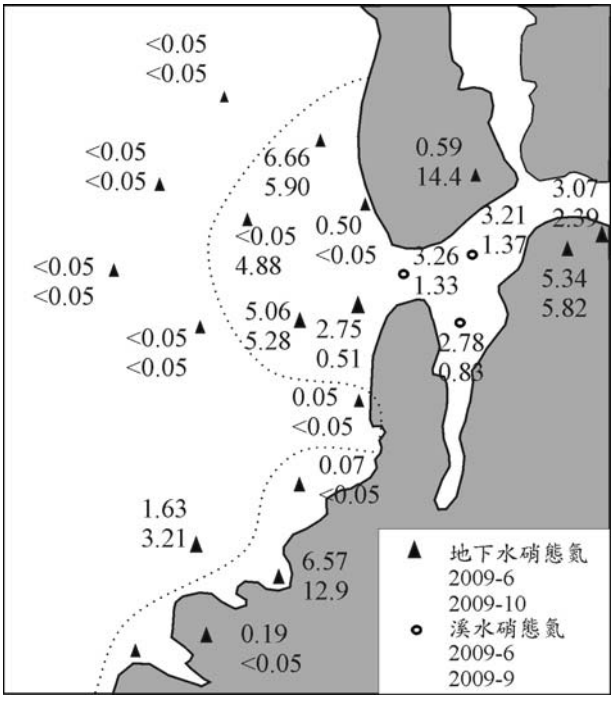


圖 3.3-15、彰雲扇頂硝態氮之平面分布

3.3.3 成果分析

彰雲扇頂區歷年導電度的變化顯示，有多口井有鹹化的趨勢，以

濁水溪南岸較為嚴重。接近半數的井，其導電度已超過灌溉水標準750μS/cm。彰雲橋溪水之導電度，很少超過 600μS/cm，但現今濁水溪扇頂有七成的觀測井，地下水導電度超過 600μS/cm，推測來自人類活動的影響，例如：以地下水灌溉、化肥、生活污水、工廠廢水等。扇頂區急需保護與復育。

降雨對莿桐、六合及柑園導電度有不同的影響。上覆泥層之含水層（莿桐）、地下水導電度會短暫升高，未有覆蓋層的礫石含水層（六合及柑園）導電度短暫降低。

彰雲扇頂區地下水水質可分為兩類：硫酸根－碳酸氫根－鈣離子水質及碳酸氫根－鈉離子為主，前者多為沖積層含水層，後者多為頭嵙山層含水層。前者與濁水溪溪水水質成份類似，顯示溪水滲入地下後，水質並無改變；後者水質演化為有機碳降解、硫酸根還原、陽離子交換及沉澱溶解等作用所控制。

2009 年硝酸鹽汙染監測顯示，新光及古坑井已超過環保署飲用水源標準。建議彰雲扇頂區應持續進行水質監測，因部份地下水已超過灌溉水標準，應評估調查該區農業灌溉之水質現況，並尋求因應之道。若鹽化情況與硝酸鹽汙染持續，也應評估對飲用水的影響。

3.4 地電阻調查

本調查工作採用地電阻調查方法，在由地質鑽井岩心與地表調查等資料判定之彰化地區濁水溪沖積扇補注區邊界，沿扇頂向扇尾方向，完成四條二維地電阻影像剖面測線，以及沿四條測線之高解析度地電阻補充探查工作，每條二維地電阻影像測線總長度至少為 1 公里，以協助補注區之劃設。由於目前一般補注區劃設之工作，均依據鑽井與地質鑽探之資料進行，而由於鑽井地點與經費之限制，無法由密集之鑽井資料判斷補注區之確切分佈範圍，因此往往造成許多爭議。由於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受壓含水層(Unconfined aquifer)，甚至是較深層之受壓含水層(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，形成良好之難透水層(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。預期在四條測線完成後，配合區域的鑽井資料，能建立一套快速且經濟的補注區範圍判釋做法標準，並且提供本地區之基礎地下探測資料，協助未來繼續進行補注區域範圍劃設之作業。

3.4.1 地電阻調查原理及施作方法

(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有明顯的層間電阻率對比，或是欲探測地下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3.4-1)，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)。

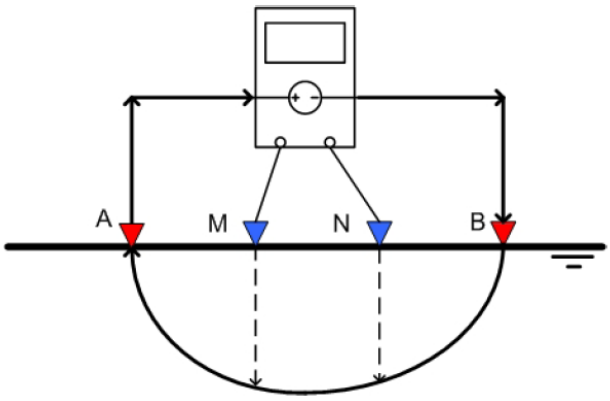


圖 3.4-1、地電阻探測儀器示意圖

根據歐姆定律，電流(I)與電壓(V)成正比，而與電阻(R)成反比

$$V = I R \quad \text{.....(式3.4-1)}$$

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

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{.....(式3.4-2)}$$

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad \text{.....(式3.4-3)}$$

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 3.4-2)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，且在均質的地表定義極薄的殼層為 dr。

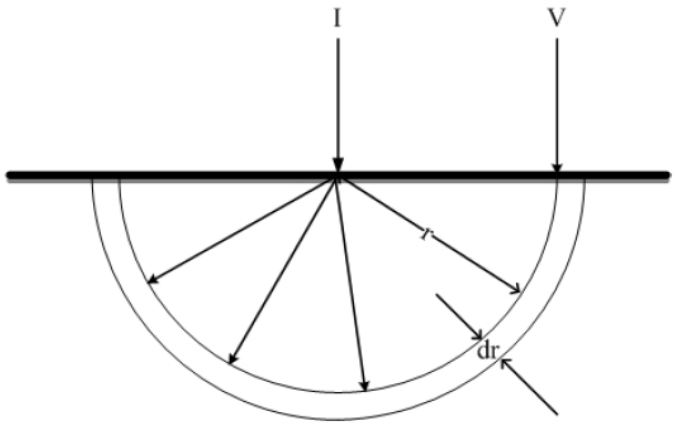


圖 3.4-2、電流流動示意圖

透過歐姆定律(3.4-1)式定義電位差穿過此殼層電位差為

$$dv = I(R) = I\left(\rho \frac{l}{A}\right) = I\left(\rho \frac{dr}{2\pi r^2}\right) \quad \text{.....(式 3.4-4)}$$

故距單電流極 D 之任一點其電位為

$$\begin{aligned} V &= \int_D^\infty dv \\ &= \frac{I\rho}{2\pi} \int_D^\infty \frac{dr}{r^2} \\ &= \frac{\rho I}{2\pi D} \end{aligned} \quad \text{.....(式 3.4-5)}$$

運用上述原理，可進行地電阻法(Geoelectric Resistivity Method)之測勘，其原理為：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 3.4-2.，據此即可計算該地層的視電阻率（Apparent Resistivity）由式

(3.4-5)推出

$$\Delta V = (V_{\overline{AM}} - V_{\overline{AN}}) - (V_{\overline{BM}} - V_{\overline{BN}})$$

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

$$\rho = \frac{\Delta V 2\pi}{I}\left[\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}}\right) - \left(\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{BN}}\right)\right]^{-1} \quad \text{.....(式3.4-6)}$$

(3.4-6)式 $K = 2\pi\left[\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}}\right) - \left(\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{BN}}\right)\right]^{-1}$ 可進一步縮寫為下式：

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad \text{.....(式3.4-7)}$$

ΔV：電位差，

$V_{\overline{AM}}$、$V_{\overline{BM}}$、$V_{\overline{AN}}$、$V_{\overline{BN}}$ ：電流極對電位極的絕對電位，

$\overline{AM}$、$\overline{BM}$、$\overline{AN}$、$\overline{BN}$：電極至電極間的距離，

K: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，綜合上述的結果統稱為“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（Sch1umberger Array）、溫奈排列（Wenner Array）、雙偶極排列（Dipole-dipole Array）及雙極排列（Pole-pole Array）等。

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。

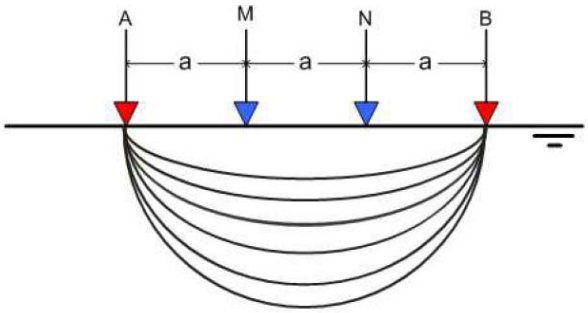


圖 3.4-3、溫奈排列（Wenner Array）示意圖

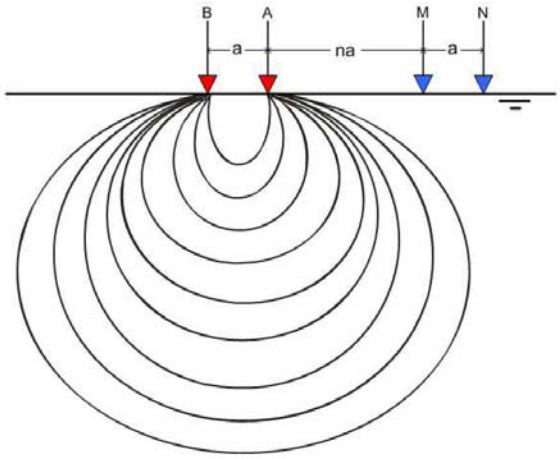


圖 3.4-4、雙偶極排列（Dipole-dipole Array）示意圖

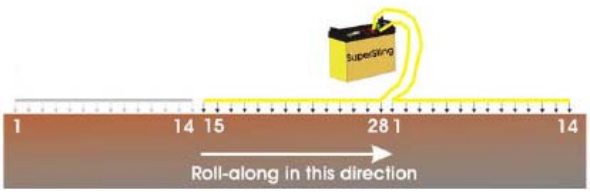


圖 3.4-5、二維地電阻剖面影像探測示意圖

本工作所採用的儀器為美國 Advanced Geosciences, INC.(AGI)公司之 SuperSting R1/IP 地電阻儀，並聯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。本研究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 2D^{TM}。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。

3.4.2 工作項目

本調查工作採用地電阻調查方法，在由地質鑽井岩心與地表調查等資料判定之彰化地區濁水溪沖積扇補注區邊界附近，以放射狀施作五條長度約為 1 公里之二維地電阻影像剖面輪替式(Roll-along)測線，以進一步釐清邊界之確切分佈。輪替式測線之做法係採用兩條固定間距之二維電極陣列(Electrode array)，沿一條測線上以交互輪替移動的方式進行施測(如圖 3.4-6)。本研究先期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。中後期則於柑園，溪洲，北斗，社頭四區域(如圖 3.4-7)，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、溪洲、北斗、社頭(東西向)，以及社頭(南北向)等五條長測線。

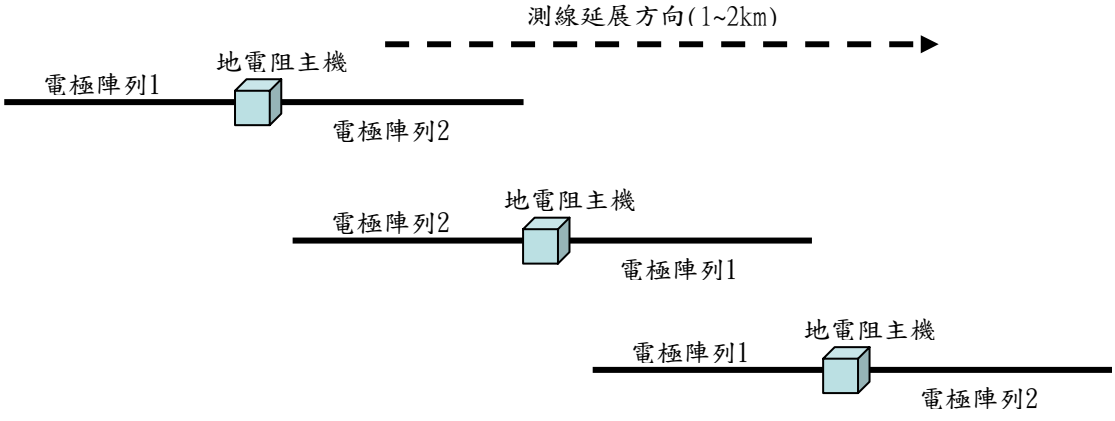


圖 3.4-6、地電阻輪替式(Roll-along)陣列施測方式示意圖

採用之每條電極陣列之電極間距為 10 公尺，陣列長度為 170 公尺，因此聯合兩條電極陣列之單次施測長度約為 340 公尺，測深約可達 50-60 公尺，根據目前本區之鑽探資料顯示，近地表超過約 10 公尺厚之泥層一般已被視作具有足夠阻水特性之難透水層，因此上述之測線設計應已足夠作為扇頂補注區劃設調查之用。輪替式的施測方式，運用單次 340 公尺之施測方式，根據圖一之做法交替中一半之電極佈設位置，逐漸向測線延展方向進行長距離之施測。如此可以進行一條極長之地電阻測線，以提供補注區範圍劃設之用。配合其他水文地質資料，嘗試研擬出運用地電阻率之空間分布劃設補注區邊界之標準分析做法。

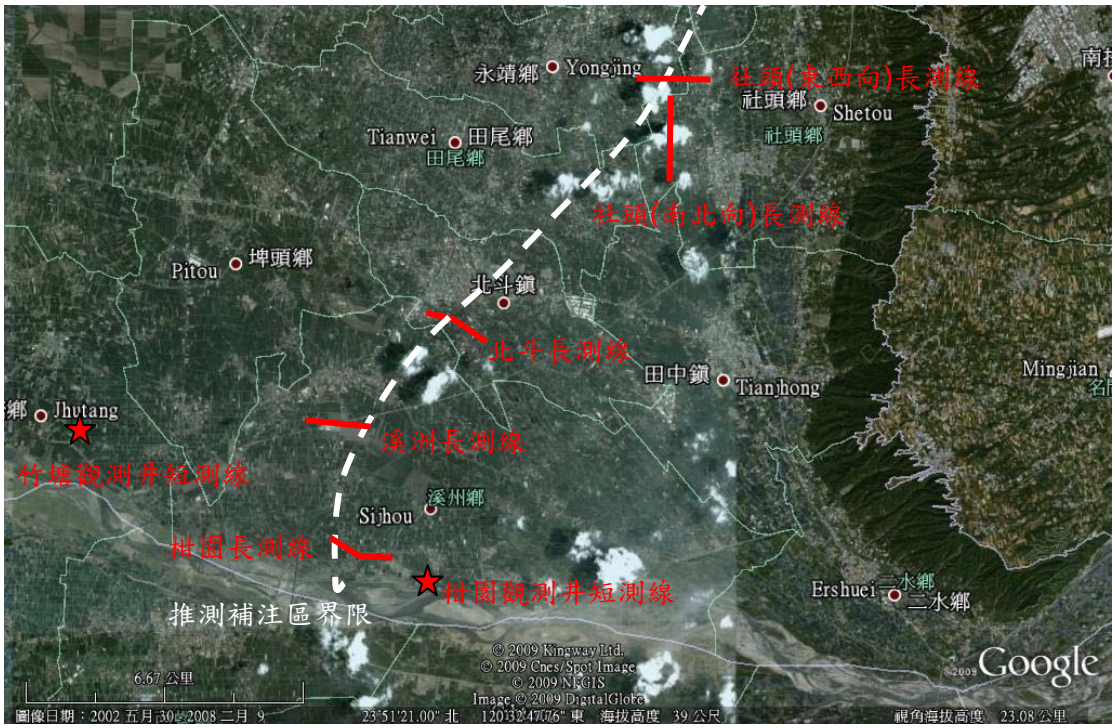


圖 3.4-7、彰化地區地電阻長短測線及原推測補注區界線位置圖

3.4.3 資料分析結果

本調查工作已於濁水溪沖積扇彰化地區完成(1)兩條提供與鄰近觀測井 300 公尺之地電阻率影像標準參考剖面，以及(2)沿圖 3.4-7 之柑園測線位置，總長度為 2000 公尺之長距離地電阻剖面量測(分佈位置如圖 3.4-10)，(3) 沿圖 3.4-7 之溪洲測線位置，總長度為 2000 公尺之長距離地電阻剖面量測(分佈位置如圖 3.4-12)，(4) 沿圖 3.4-7 之北斗測線位置，總長度為 2000 公尺之長距離測線施測(分佈位置如圖

3.4-14)，與(5) 沿圖 3.4-7 之社頭南北向及東西向測線位置，總長度各為 1200 及 1600 公尺之長距離地電阻剖面量測(分佈位置如圖 3.4-16)。量測之初步判釋結果敘述如下:

(一)地電阻率標準剖面建立與觀測井岩性比對

由沉積物之導電特性初步判斷，飽和之礫石層與泥層具有截然不同的反應，概括而言，沖積扇補注區域主要為礫石層之分佈，而形成難透水層的則多為泥層或含泥較多之砂層所組成。而礫石層一般之電阻率(約 50~100 Ohm-m) 較泥層(約 1~10 Ohm-m)為高，為確定濁水溪沖積扇地區礫石層與泥層具有預期之空間分佈特性，而能由地電阻率剖面上鑑別出來，並且協助決定本地區泥層與礫石層之反應差別。本工作選定水利署彰化地區地下水觀測井中，竹塘以及柑園兩處做為標準剖面之控制點，並於竹塘觀測井南側約 500 公尺處，與柑園觀測井南側約 5 公尺處分別施測 300 公尺之長距離雙偶極距地電阻法，並利用反演算建立影像剖面。

圖 3.4-8 顯示竹塘地區之 300 公尺地電阻影像剖面以及竹塘觀測井之 64”電阻井測對比資料，選擇竹塘站觀測井作為對比之原因為 1.由先前鑽探岩心及地下水位觀測研究，此站已位於扇頂補注區之外。2.此站鑽探岩心資料所顯示在 16-44 米左右存在一層厚層泥層，其下則為一層礫石層，進行電阻率對比較為容易。井測之資料也顯示有一層較低電阻值之地層存在於高電阻地層之上，而兩層之交界約在 44 米左右。而在地電阻剖面之相當位置，也反映電阻率有一較低(約在 20 Ohm-m 以下)之地層分佈於剖面左側水平相對距離 0-80 米，深度約為 16-48 米之位置。

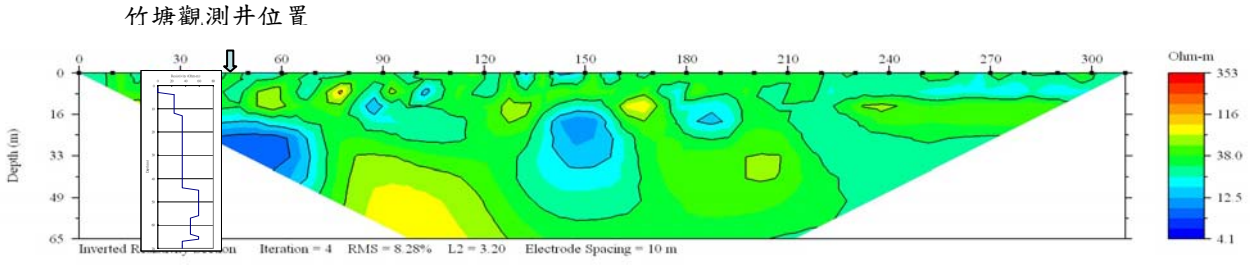


圖 3.4-8、竹塘剖面與竹塘觀測井測資料(64”電阻井測) 對比結果

而圖 3.4-9 則顯示柑園地區之 300 公尺地電阻影像剖面以及柑園

觀測井之 64”電阻井測對比資料，由於柑園觀測井鑽探岩心資料所顯示在其井下幾乎為厚層之礫石層分佈，因此可作為距離補注區邊界最近之典型礫石層之代表，以作為與地電阻剖面對比之依據。然而若直接對比觀測井相對位置之垂直電阻率分佈與 64”電阻井測資料，卻呈現不一致之變化趨勢。觀察地電阻影像剖面，在觀測井所在位置(位於測線相對位置約 95 公尺處)附近之測線旁約 1 公尺處存在另一口民用抽水井(位於測線相對位置約 90 公尺處)，而其相對位置之地電阻影像呈現一明顯之較高電阻率垂直構造，研判此處之地電阻影像因受抽水干擾而呈現此一抽水引起之較高電阻率垂直構造，若將井測資料與 50 公尺外之地電阻率垂直分佈剖面比對，則兩者垂直變化之趨勢與數值均相當一致，地表至 12-15 公尺深附近為電阻率較高之未飽和層，電阻率約在 200 Ohm-m 以上，而 12-15 公尺至約 50-55 公尺深處則為電阻率在 30 Ohm-m 以上之飽和砂礫層，50-55 公尺深以下則又為電阻率在 200 Ohm-m 以上之飽和礫石層。顯示地電阻剖面法能有效反映地下構造之分布情形。

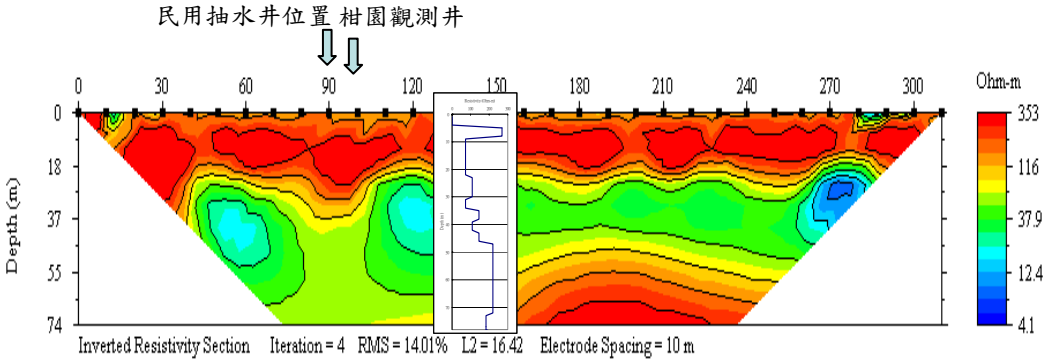


圖 3.4-9、柑園剖面與柑園觀測井測資料(64”電阻井測) 對比結果

(二)柑園長距離測線地電阻剖面測勘

圖 3.4-10 為柑園長距離測線之測線佈設位置圖，施測方式選用 Dipole-dipole 方法。測線約以中山高速公路以西約 100 公尺為左界，向東南沿農用道路延伸約 1200 公尺，因住宅密集緣故，向東平移 100 公尺後，再沿農用道路向東施測約 800 公尺。總長度約為 2000 公尺。本長距離測線之位置約在工研院能源與資源研究所(1996)利用地電阻垂直剖面測深方式所判斷之補注區邊界附近，約在其報告中之 77、76、73 測站位置處。

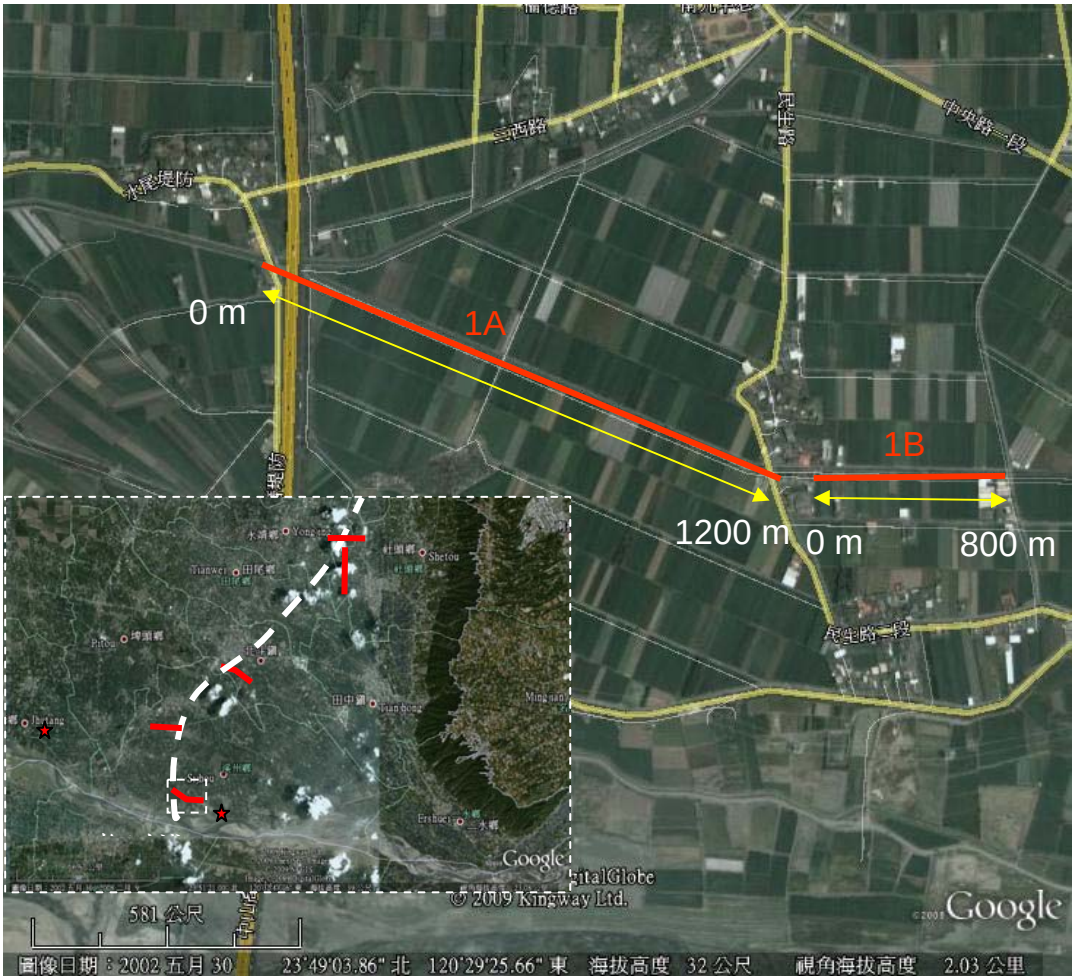


圖 3.4-10、柑園長距離測線之佈設位置

圖 3.4-11(a)與(b)分別為柑園長距離測線之左側 1200 公尺地電阻剖面影像(1A 測線)以及右側 800 公尺地電阻剖面影像(1B 測線)。由左側 1200 公尺地電阻剖面影像顯示(圖 3.4-12(a))，在 1A 測線深度約 14-55 公尺之地下，有一層較低電阻率，側向延伸性大致良好之地層分佈，比對竹塘標準剖面之電阻率，此一低電阻地層大部分電阻率在 20 Ohm-m 以下，可判斷主要為泥質地層組成。側向延伸在局部有為垂直較高電阻率構造斷開之現象，但仍可大致判斷此層低電阻率地層大致可延伸至約水平相對距離 1000-1200 米左右之位置。本測線所觀察到之垂直的高電阻率構造，根據先前柑園試測井之經驗推論，可能係由於抽水井干擾所造成，因此我們特別比對鄰近抽水井位置(圖 3.4-11(a)之紅色箭頭位置)與垂直構造之相對關係，發現有高度之相關性，因此我們判斷多數之垂直高電阻率構造為抽水干擾之影響。

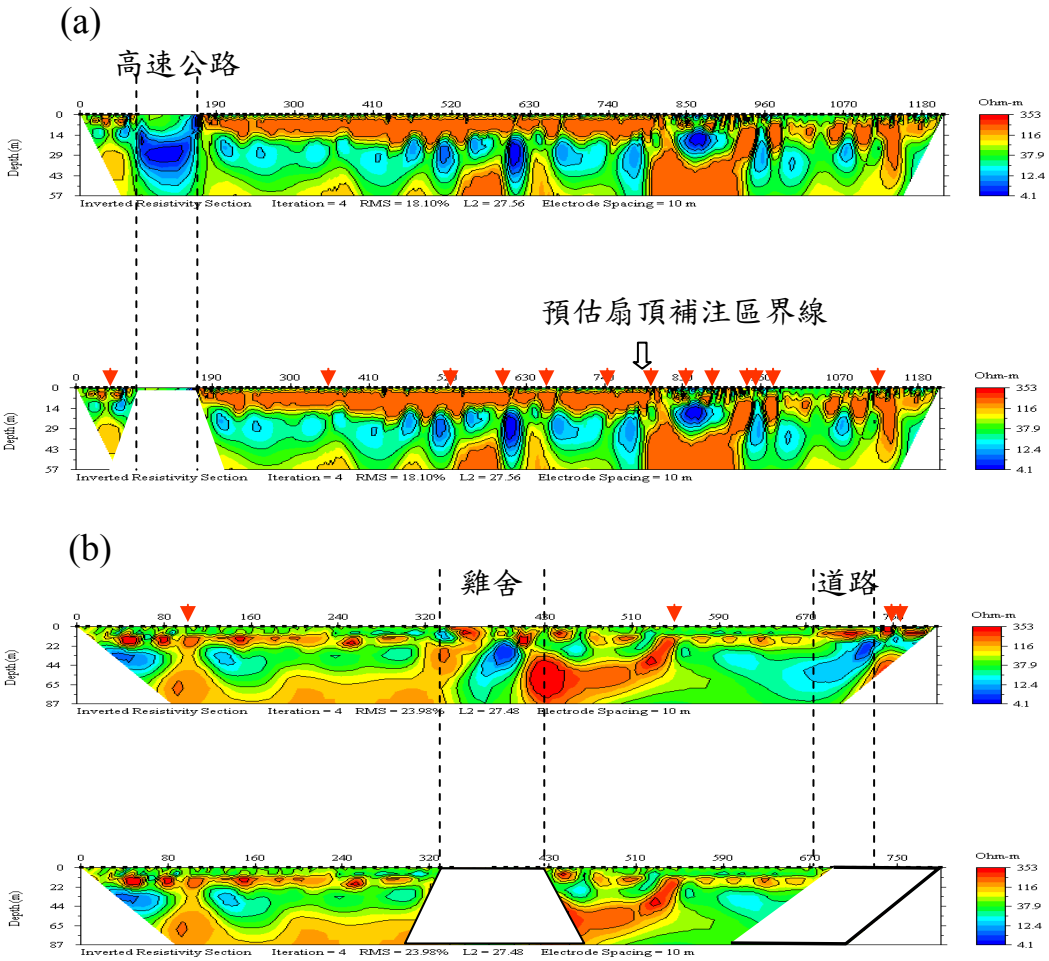


圖 3.4-11、柑園長距離測線之(a)左側 1200 公尺地電阻剖面影像，(b)右側 800 公尺地電阻剖面影像

由於接近民宅之緣故，無法連續進行施測，因此我們施側之起點向東平移 100 公尺後，繼續向扇頂方向施作輪替式地電阻剖面探測(1B 測線)。圖 3.4-12(b)顯示分佈於 1A 測線之 14-55 公尺深泥層，由 1B 測線水平距離約 150 公尺後之連續性逐漸變差，顯示泥層之出現頻率變少，於在測線水平距離約 240-600 公尺處，反應泥層之低電阻率分布幾乎消失。顯示應已完全進入補注區域範圍內。

(三)溪洲長距離測線地電阻剖面測勘

圖 3.4-12 為溪洲 1200 公尺長距離測線之位置分佈圖。由於高速公路以及地表建築物之影響，溪洲長測線分為高速公路左側之 400 公尺測線(0-400m)，以及右側之 800 公尺(600-1400m)測線。由於測線附近之人為建物不少，為減低來自人為構造物之雜訊，施測方式選用 Wenner 方法進行。

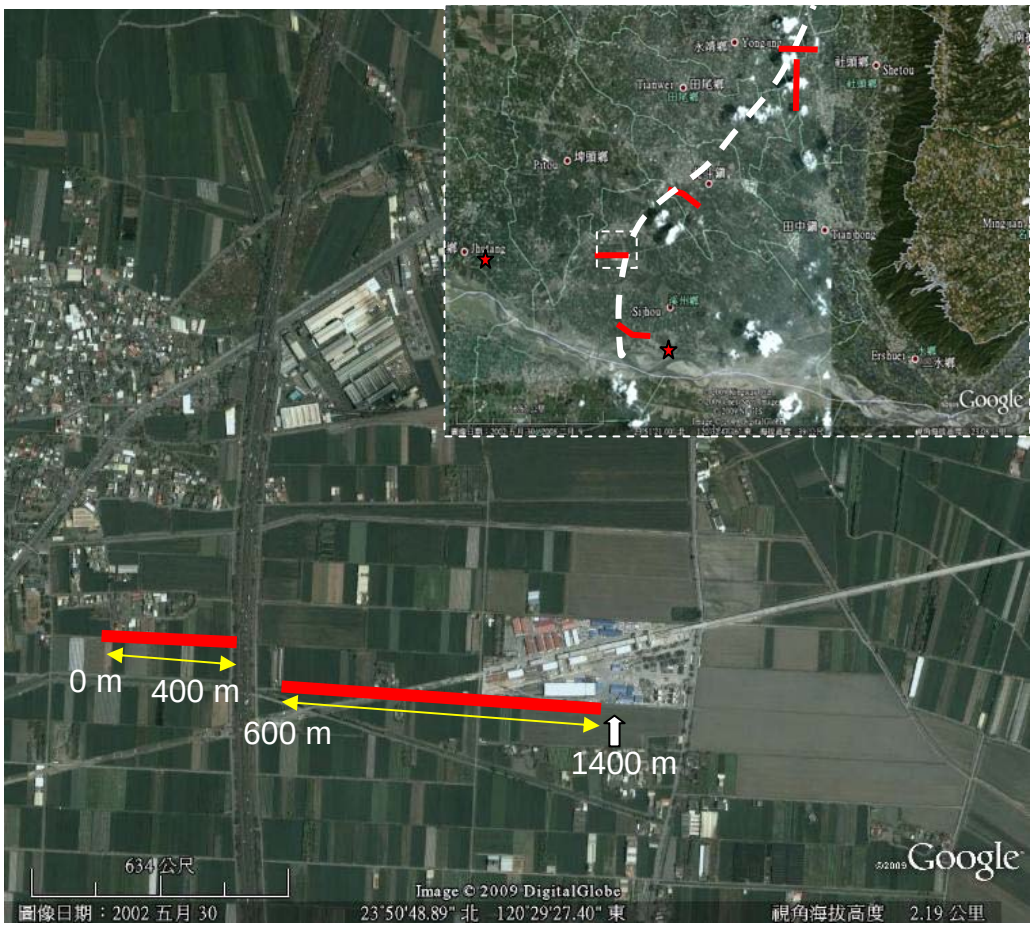


圖 3.4-12、溪洲長距離測線之佈設位置

圖 3.4-13 為溪洲測線之地電阻率剖面(為能清楚呈現電阻率分佈，右側之剖面分為三個連續剖面呈現，各連續剖面間存在約 200 公尺之重複段)，高速公路左側之長度 400 公尺之剖面起點位於僑義國小東南側約 450 公尺處，圖 3.4-13(a)顯示，此處地下 8-25 公尺處存在一厚度約在 10 公尺以下，側向斷續出現延伸之低電阻層，電阻率小於 20 Ohm-m 以下，研判為泥質地層，此泥質層向東似有增厚之趨勢。而在高速公路右側的地電阻測線剖面(圖 3.4-13(b) (c) (d))則顯示，有一延伸性佳之較厚層泥質層出現於深度約 10-35 公尺深處，而泥質地層可連續向東延伸約 500 公尺至高鐵軌道東側測線標示 1120 公尺處，再向東泥層延續性則變差，研判此處向東應進入泥質地層與扇頂礫石及砂層之漸變交界處。而扇頂之厚層礫石層與漸變層之交界則研判大致位於測線尾端處(圖 3.4-12 中白色箭頭所指處)。

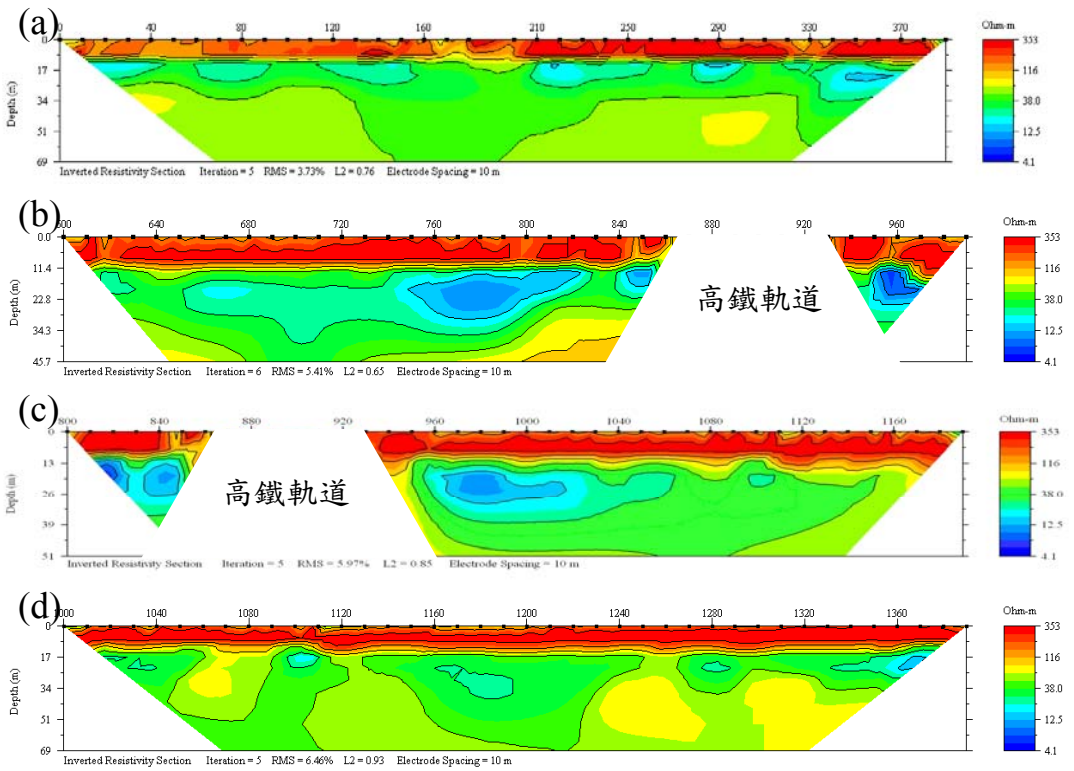


圖 3.4-13、溪洲長距離測線之(a)高速公路左側 0-400 公尺地電阻剖面影像，(b)右側 600-990 公尺地電阻剖面影像，(c)右側 800-1190 公尺地電阻剖面影像，(d)右側 1000-1390 公尺地電阻剖面影像

(四)　北斗長距離測線地電阻剖面測勘

圖 3.4-14 為北斗長距離測線之測線佈設位置圖，施測方式選用 Dipole-dipole 方法。測線位於彰化縣北斗鎮以南約 600 公尺處，向東南沿平行於該地舜耕路之南側農用道路延伸約 1200 公尺，測線尾端因穿越大排水渠道及建築物影響，向東(右側)平移 400 公尺後，再沿農用道路向東以 Wenner 法施測約 400 公尺。總長度約為 1600 公尺。本長距離測線之位置約在工研院能源與資源研究所(1996)利用地電阻垂直剖面測深方式所判斷之補注區邊界附近，約在其報告中之 77、76、73 測站位置處。

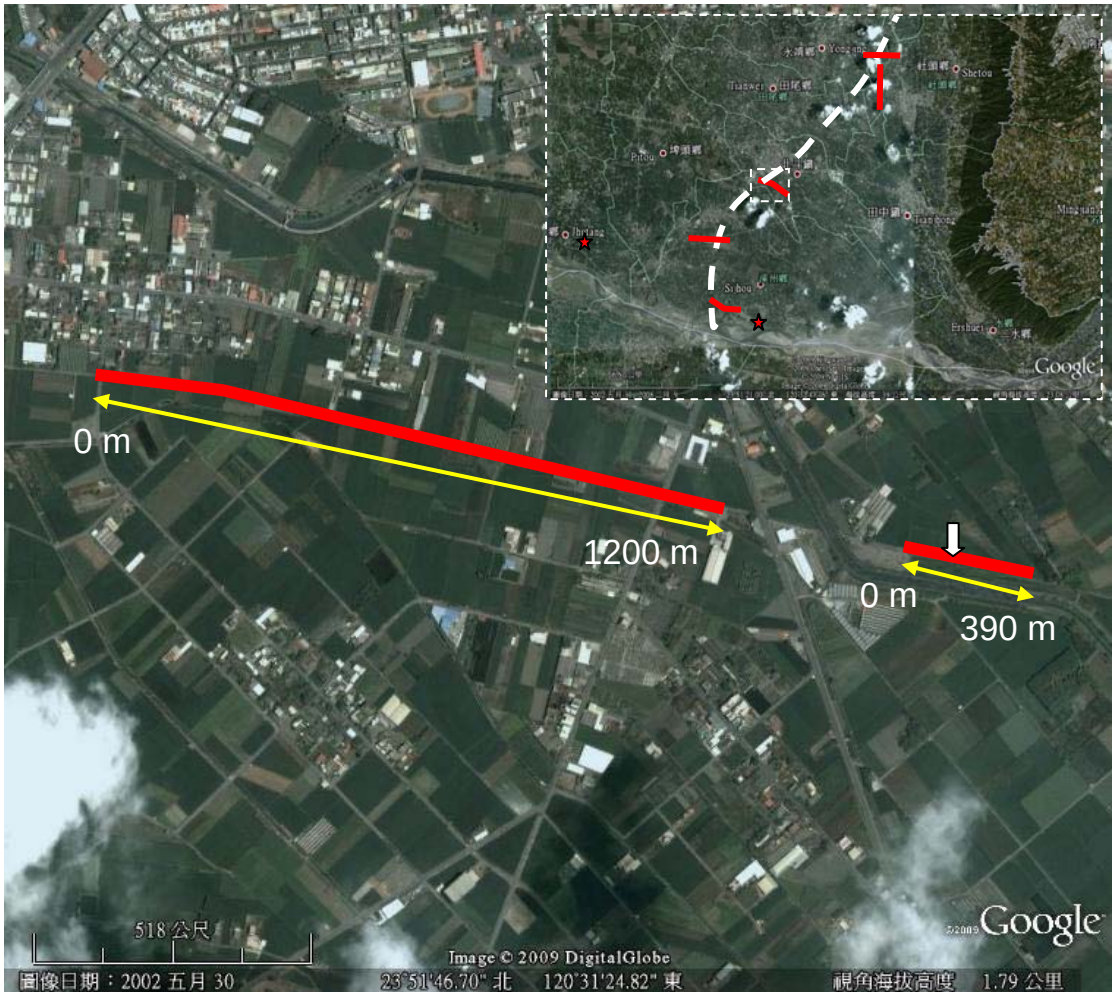


圖 3.4-14、北斗長距離測線之佈設位置

圖 3.4-15 為北斗長距離測線之地電阻反演剖面，為能清楚呈現電阻率分佈，左側之測線施測結果分為五個連續剖面(圖 3.4-15(a)至(e))呈現，各連續剖面間存在約 100 公尺之重複段。左側 1200 公尺剖面顯示此段測線在地下 15-35 公尺處存在一側向延續性佳之厚層低地電阻地層，電阻率在 20 Ohm-m 以下。局部雖可見之垂直高電阻率構造切過此一泥質地層，但由本研究先前之試測成果發現這些垂直高電阻率構造可能為抽水等人為活動所造成之電性結構，而並非地層之構造，因此可推論 15-35 公尺深處的泥質地層側向可延續至北斗測線之前 1200 公尺以東處。為向東追尋泥質地層延續及尖滅之界線，我們以原先 1200 公尺測線東方約 500 公尺處為起點，續向東施測一 400 公尺之 Wenner 法地電阻測線，發現在原先 15-35 公尺之 30 Ohm-m 以下之泥層已轉變為 40 Ohm-m 以上之較高地電阻率地層，研判已進入砂質或礫石層地層，因此研判在此 400 公尺右測測線起點附近，已進入扇頂補注區。

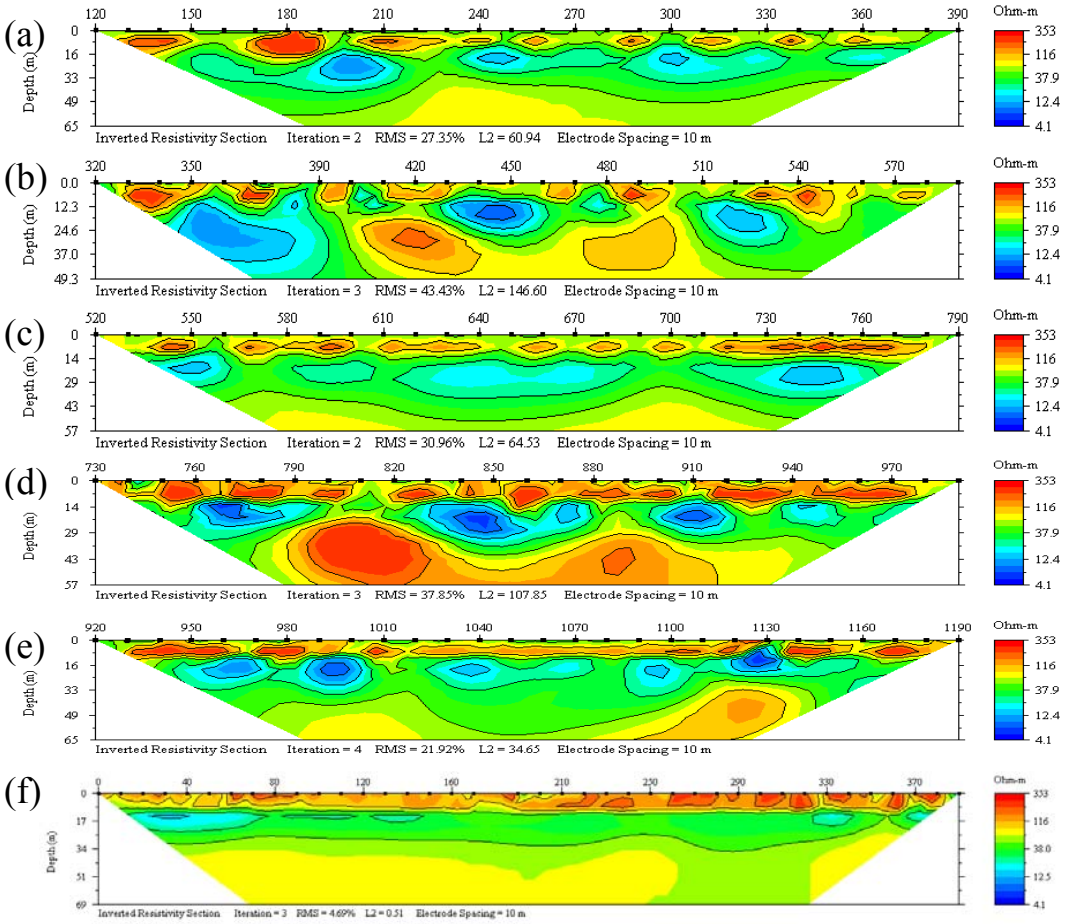


圖 3.4-15、北斗長距離測線之(a)左側 120-390 公尺地電阻剖面影像，(b)左側 320-590 公尺地電阻剖面影像，(c)左側 520-790 公尺地電阻剖面影像，(d)左側 730-990 公尺地電阻剖面影像，(e)左側 920-1190 公尺地電阻剖面影像，(f)右側 0-390 公尺地電阻剖面影像

(五) 社頭南北向及東西向長距離測線地電阻剖面測勘

圖 3.4-16 為社頭測線之配置圖，由於接近濁水溪沖積扇之東界，為了解在不同方向上，形成淺層難透水層之泥質地層延續情形，我們於此處沿東西向及南北向進行地電阻長距離剖面影像法施測，由於先前之經驗發現在濁水溪沖積扇地區之人為活動或構造物所引起之雜訊，造成以 Dipole-dipole 法所量測之地電阻訊號會含有大量遠距離雜訊，因此本測線均採用訊號品質較佳之 Wenner 法進行施測。

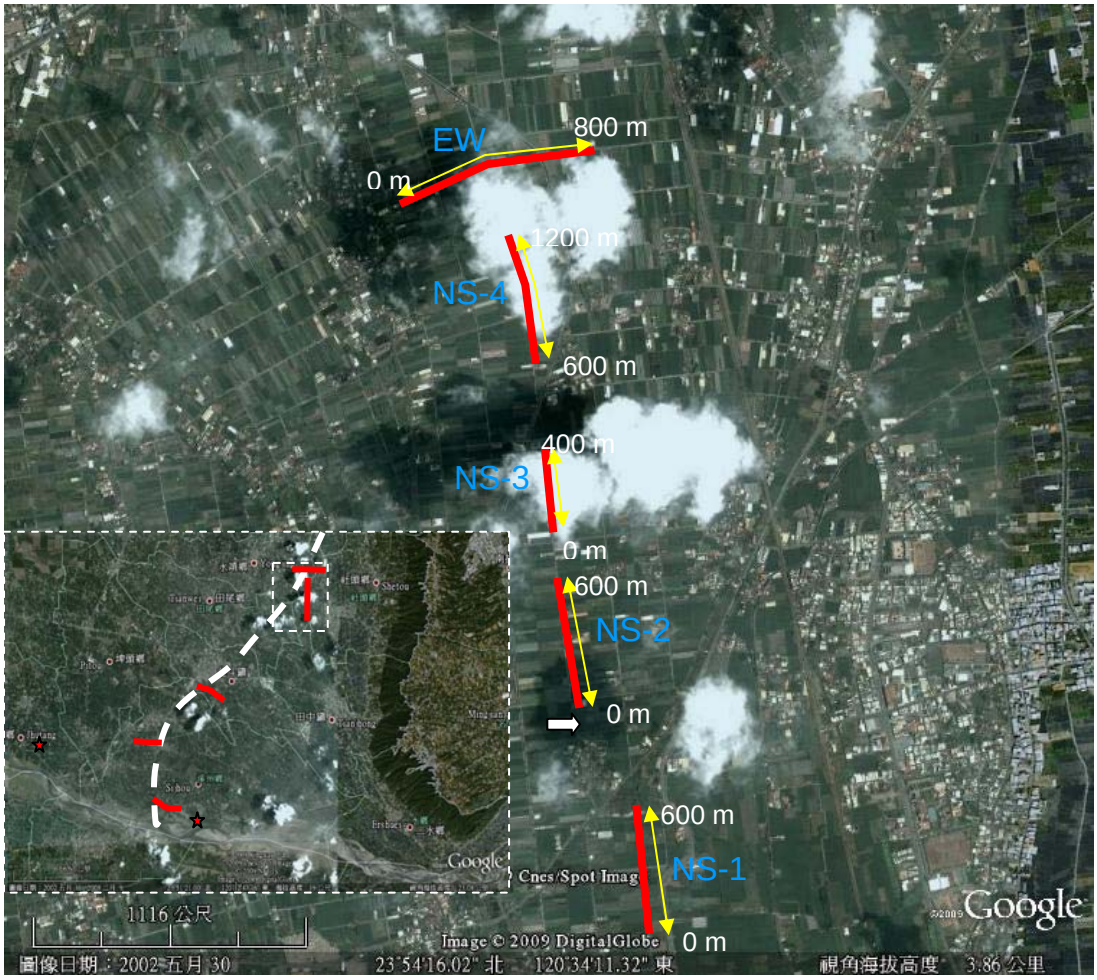


圖 3.4-16、社頭東西向(EW 線)及南北向(NS-1 至 NS-5)長距離測線之佈設位置

圖 3.4-17 為社頭東西向(EW)測線沿左至右方向 200 公尺至 800 公尺之地電阻反演剖面。由西側 320 公尺至約 580 公尺處，有一層較厚之低電阻層分佈於 18-40 公尺深，電阻率低於 30 Ohm-m，研判為泥質地層。而越過位於 630-670 公尺處之排水圳溝後，此連續性良好之低電阻泥質地層層厚快速增加至超過 60m，深度分布於 15-75 公尺深處。

圖 3.4-18(a)至(e)則為社頭地區所進行之南北向長距離測線之反演地電阻剖面。由南向北分別為 NS-1(圖 3.4-18(a))，NS-2(圖 3.4-18(b))，NS-3(圖 3.4-18(c))，NS-4(圖 3.4-18(d)及(e))，圖 3.4-18(a)之 NS-1 剖面顯示此段測線並未有小於 30 Ohm-m 之低電阻泥質地層出現，因此應仍位於扇頂非受壓含水層中，而圖 3.4-18(b)則顯示開始有局部不連續的泥質地層逐漸出現，研判本段測線已進入前述之漸變層中。而圖 3.4-18(c)至(e)則顯示一層較厚之低電阻泥質地層，電阻率

在 30 Ohm-m 以下，分布於 15-70 公尺之深度，因此可據此判斷扇頂非受壓含水層之界限應位於 NS-1 與 NS-2 測線之間(圖 3.4-16 白色箭頭所示之處)。

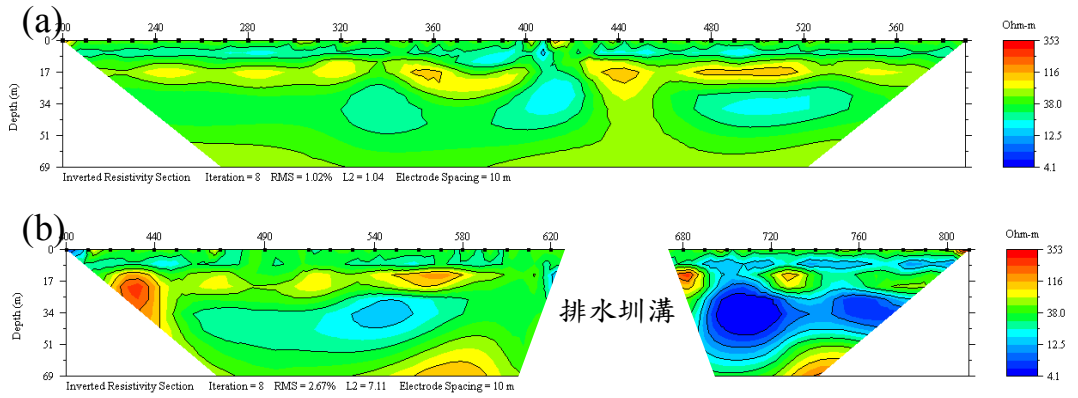


圖 3.4-17、社頭東西向長距離測線之(a)左側 200-590 公尺地電阻剖面影像，(b)左側 400-800 公尺地電阻剖面影像

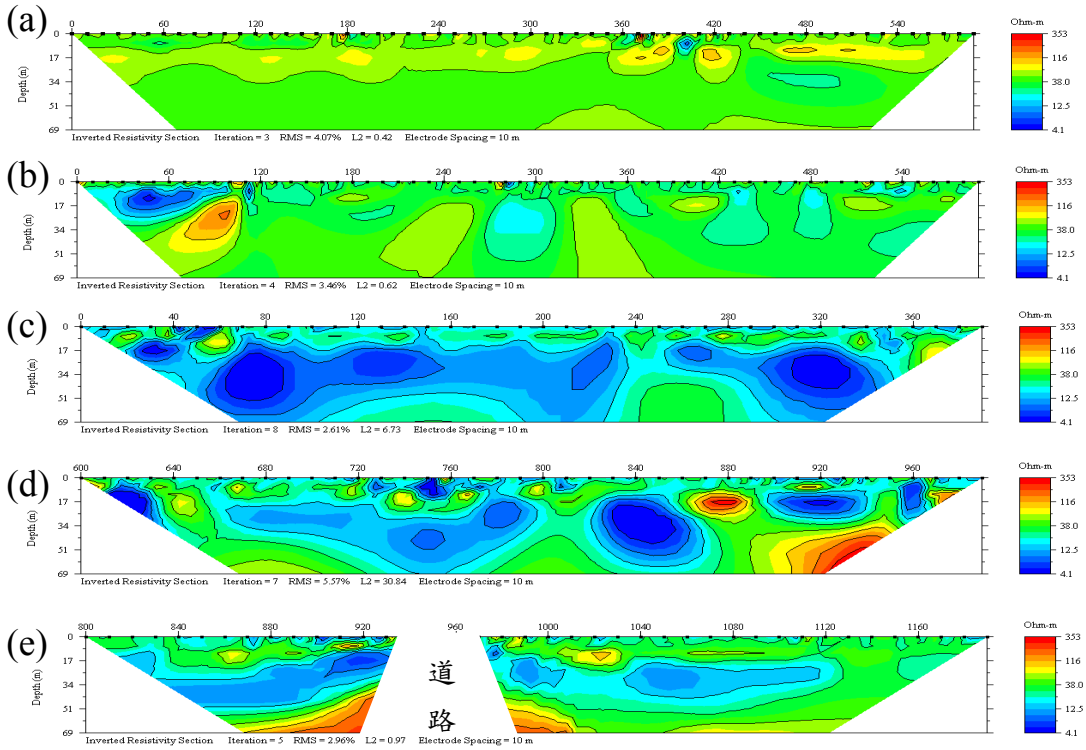


圖 3.4-18、社頭南北向長距離測線 (a)NS-1 之 0-600 公尺地電阻剖面影像，(b)NS-2 之 0-600 公尺地電阻剖面影像，(c) NS-3 之 0-400 公尺地電阻剖面影像，(d) NS-4 之 600-1000 公尺地電阻剖面影像，(e) NS-4 之 800-1200 公尺地電阻剖面影像

3.4.4 一維地電阻測點與資料分析比對

工研院(1984)曾於 1984 年在濁水溪與烏溪及八卦山以西的平原地帶完成了大範圍的一維地電阻水文地質調查探勘(如圖 3.4-19)，使用施蘭卜吉排列（Sch1umberger Array）地電阻法之測勘方法，利用低頻(1Hz~10Hz)交替直流電(Alternative Direct Current)通入地下，並利用電流計量測電流強度。所測量之電位差 V 與通入地下的電流強度 I 及電極之相對位置，而根據式 3.4-8 計算地層的電阻率 ρ_a。

$$\rho_a = K(V/I) \quad \text{.....(式 3.4-8)}$$

式中 K 為幾何因子(Geometric Factor)，與電極排列之相對位置有關；ρ_a 稱為視電阻率(Apparent Resistivity)，通常不代表地層之實際電阻率，而是代表在此種電極排列情況下所有地層電性之綜合效應。電流極展距越大，其效應越接近下部地層之電性。由於是下方地層電性之綜合效應，實際深度約為其半展距之三分之二至二分之一左右。

(一) 觀測井測線與地電阻一維測點比對

圖 3.4-20 顯示竹塘地區之 300 公尺地電阻影像剖面與地電阻測點 No.86 對比資料 No.86 地電阻測點資料顯示此地區在深度 50 以內之位置，存在有一厚層之低電阻地層，而在地電阻剖面之相當位置，也反映有一較低電阻率之地層分佈於剖面左側水平相對距離 270-300 米，深度約為 5-50 米之位置。

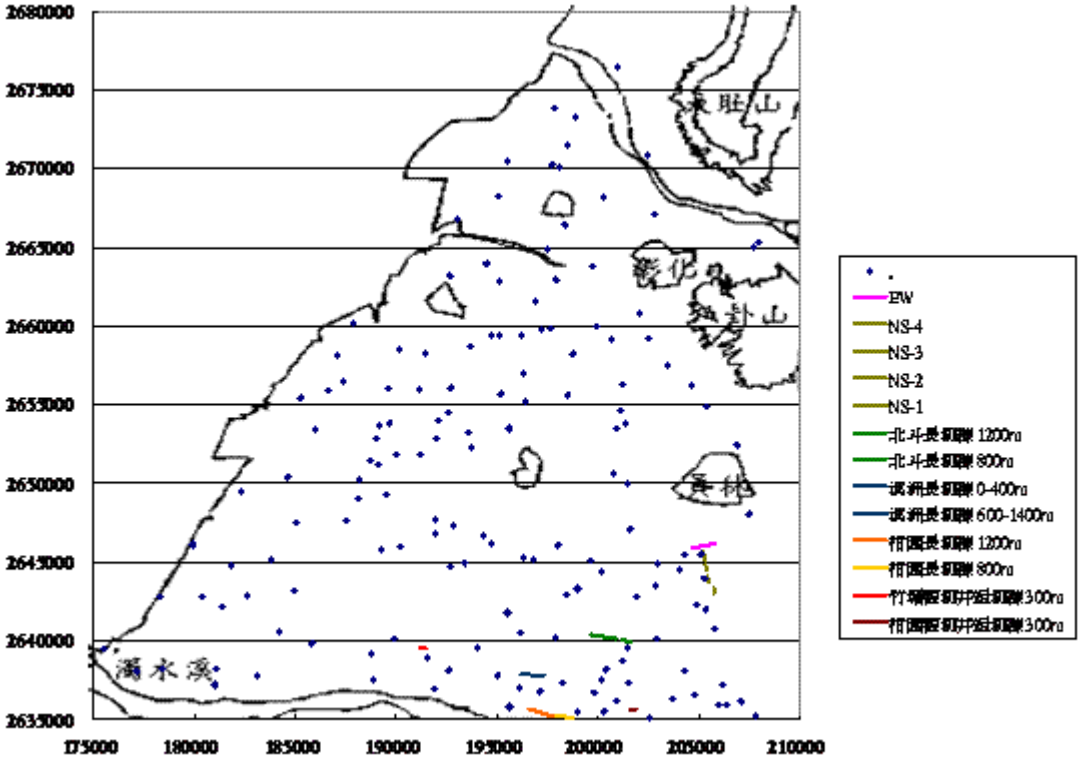


圖 3.4-19、一維地電阻測點位置(經建版座標 TWD67)



圖 3.4-20、觀測井位置與一維電阻組測點竹塘剖面與 No.86 地電阻測點

而圖 3.4-21 則顯示柑園地區之 300 公尺地電阻影像剖面以及地電阻測點 No.38 與 No.39 的對比資料；No.38 地電阻測點資料顯示此地區有高電阻地層在深度 20 公尺以內，判斷應為淺地表構造物，但整體資料為高電阻區域（約 200 Ohm-m），由於測點在地電阻剖面之東側約 200 公尺，反映之高電阻率地層，初步推測為礫石層之資料。No.39 地電阻測點資料顯示此地區在深度 20-30 公尺以內，有一較高電阻率之地層，而其下有一較低電阻率之地層分佈於深度約為 30-50

米之位置，與二維之柑園測線反演結果一致。

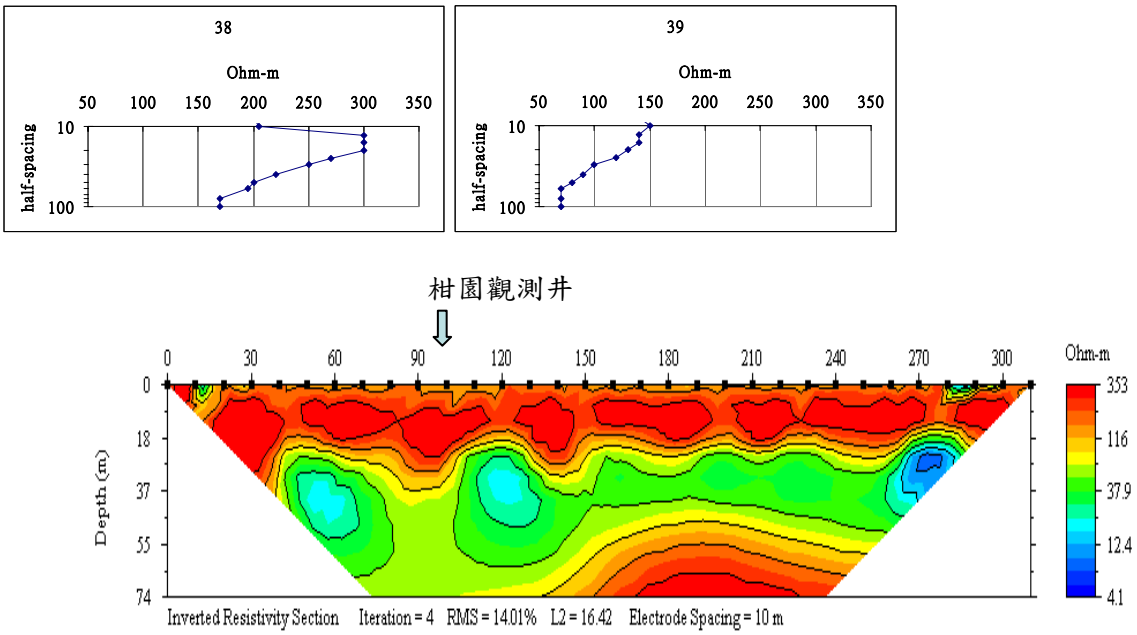


圖 3.4-21、柑園剖面與地電阻測點資料

(二) 柑園長距離測線

而圖 3.4-22 則顯示柑園長距離測線 1200 公尺地電阻影像剖面以及地電阻測點 No.73、No.76 與 No.231、No.39 的對比資料；No.73、No.76 位在柑園長測線以西，而 No.231、No.39 測點則位在本測線以東處。這四組地電阻測點資料雖均顯示此地區有高電阻地層（約 100 Ohm-m）在半展距 30-50 公尺深以內，視電阻率下降至約 50-60 Ohm-m，而在地電阻剖面當中，也反映有一較高電阻率之地層分佈於剖面深度 0-15 公尺，以下至 44 公尺則開始為較低電阻率之泥質地層。而由視電阻率變化趨勢，則反映柑園長測線以東與以西處之深度變化趨勢有所不同，No.73、No.76 在半展距 30-50 公尺處之視電阻率降至約 50 Ohm-m 以下，而 No.231、No.39 測點在相同之半展距深處，視電阻率仍超過 60 Ohm-m 以上，因此可協助印證補注區邊界劃分之範圍應在本測線中段。

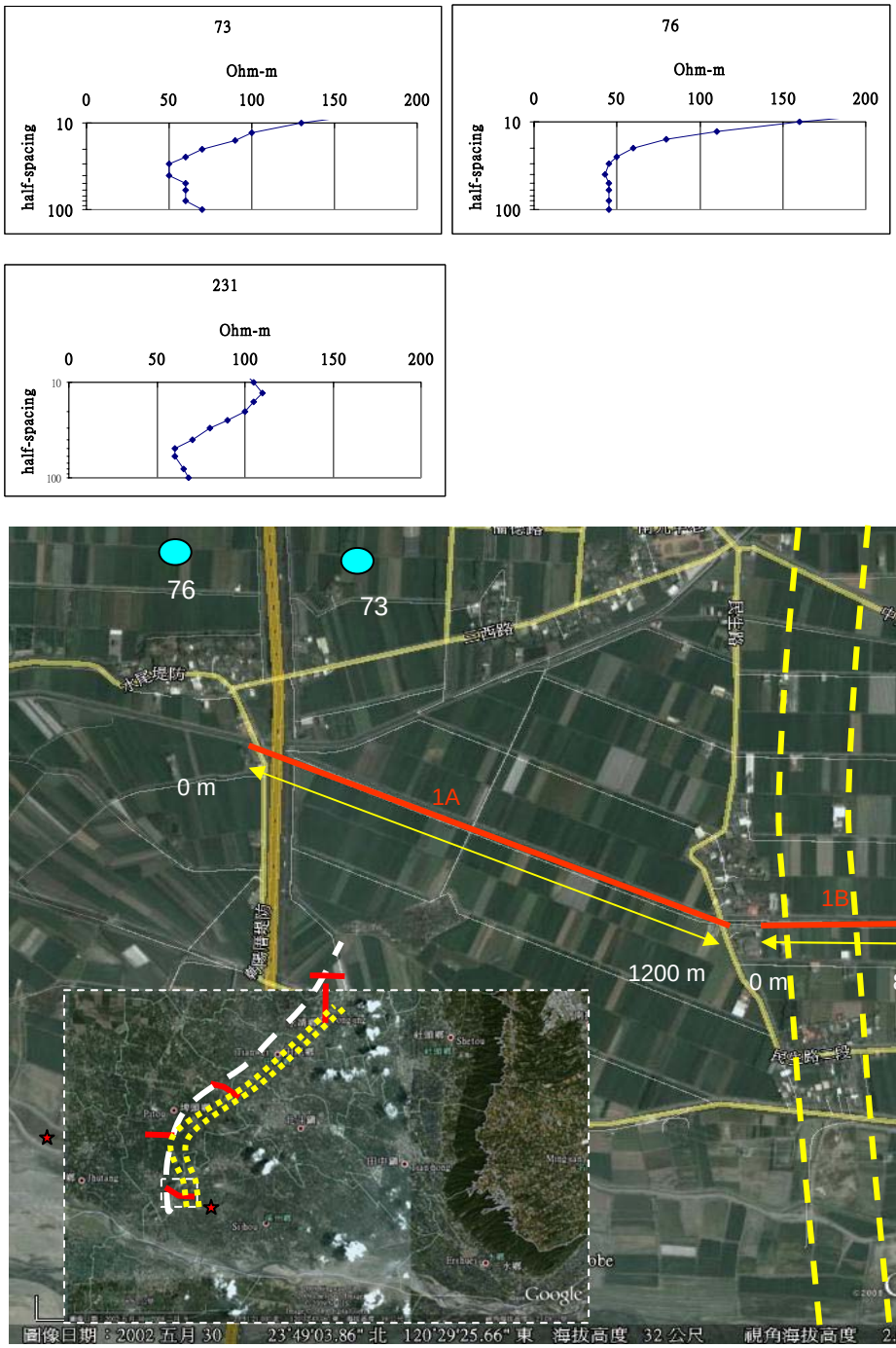


圖 3.4-22、柑園長距離測線研判之扇頂補注區邊界與一維地電阻資料之比對圖

(三) 溪洲長距離測線地電阻剖面測勘

圖 3.4-23 則顯示溪洲長距離測線 1200 公尺地電阻影像剖面以及地電阻測點 No.72、No.73、No.76 與 No.77 的對比資料；No.72、No.73 與 No.76 這三組地電阻測點資料之深度變化一致，顯示此地區在深度

15 公尺以內有一較高電阻率地層(約 100 Ohm-m)，並在半展距 30-60 公尺，即大致深度約在 15-30 公尺間，視電阻率下降至 50-60 Ohm-m，呈現扇頂補注區之視電阻率-半展距變化特徵，在二維地電阻剖面當中，可以明顯對比出淺層高電阻率區域，約在深度 15 公尺以內，而 15 至 50 公尺為較低電阻區域；而 No.77 測點則由較低的 15 Ohm-m 往下持續上升至約 40 Ohm-m，推測因為 No.77 一維地電阻測點位於較西側之位置(圖 3.4-13(a)西側約 600 公尺處)，因此所測量值為含泥較為豐富之低電阻率地層。

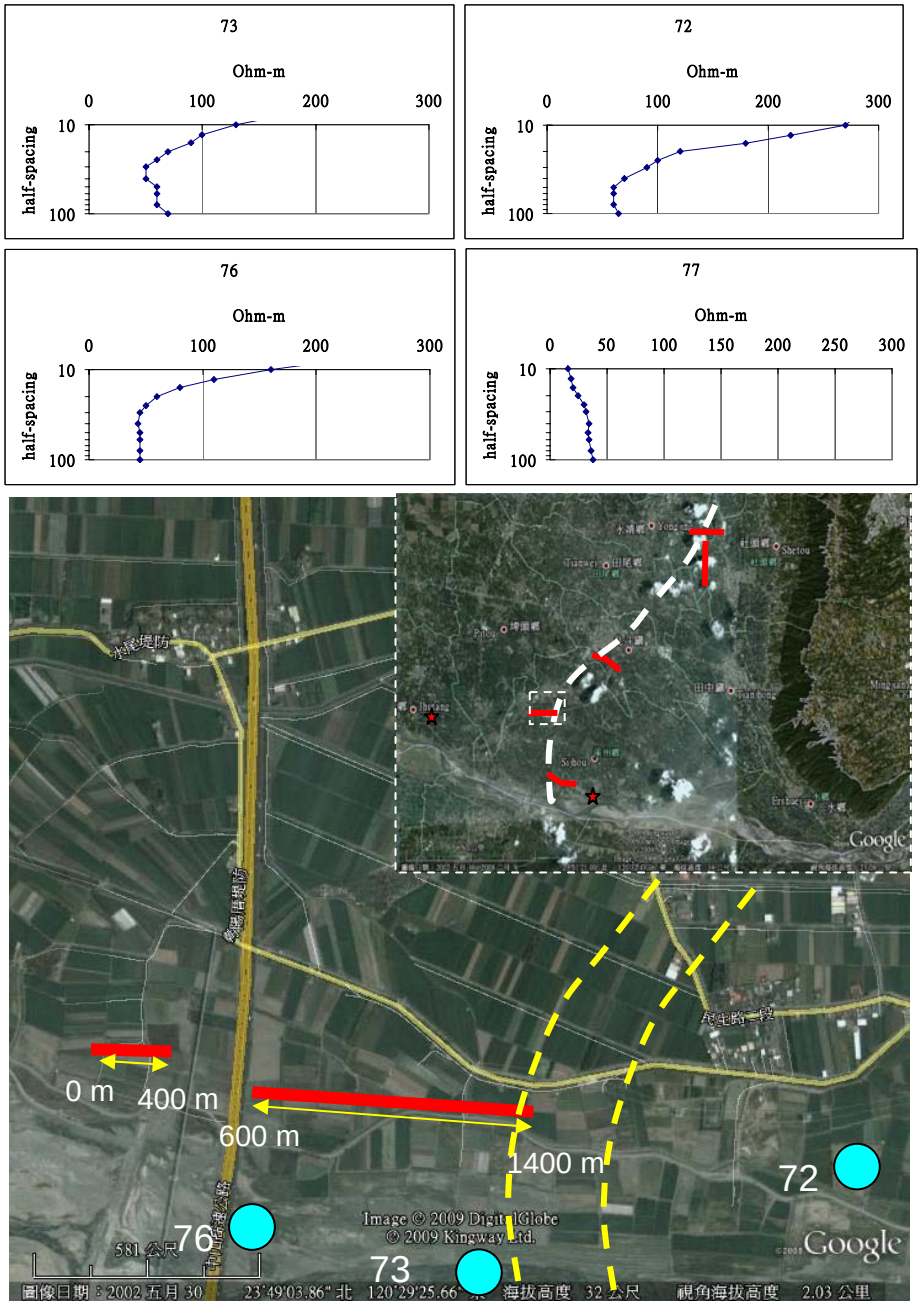


圖 3.4-23、溪洲長距離測線研判之扇頂補注區邊界與一維地電阻資料之比對圖

(四) 北斗長距離測線地電阻剖面測勘

圖 3.4-24 顯示北斗長距離測線所研判之扇頂補注區邊界，以及位於北斗長測線東側一維地電阻測點 No.50 的對比資料，測點 No.50 其位置約在圖 3.4-15(f)之二維測線東側 500 公尺，；地電阻測點 No.50 之視電阻率與半展距資料顯示此地區除在近地表處存在有一較低電阻率之地層，其視電阻率約為 60 Ohm-m，其餘自半展距 30 公尺以下之深處地層，視電阻率均在 60Ohm-m 以上，而在二維地電阻剖面當中，也反映出在東側已進入砂質或礫石層地層，雖然在本測線之東側無法找到距離相近之一維地電阻測點，但根據 No.50 判斷，仍可印證補注區邊界在二維測線上分佈之大致趨勢。

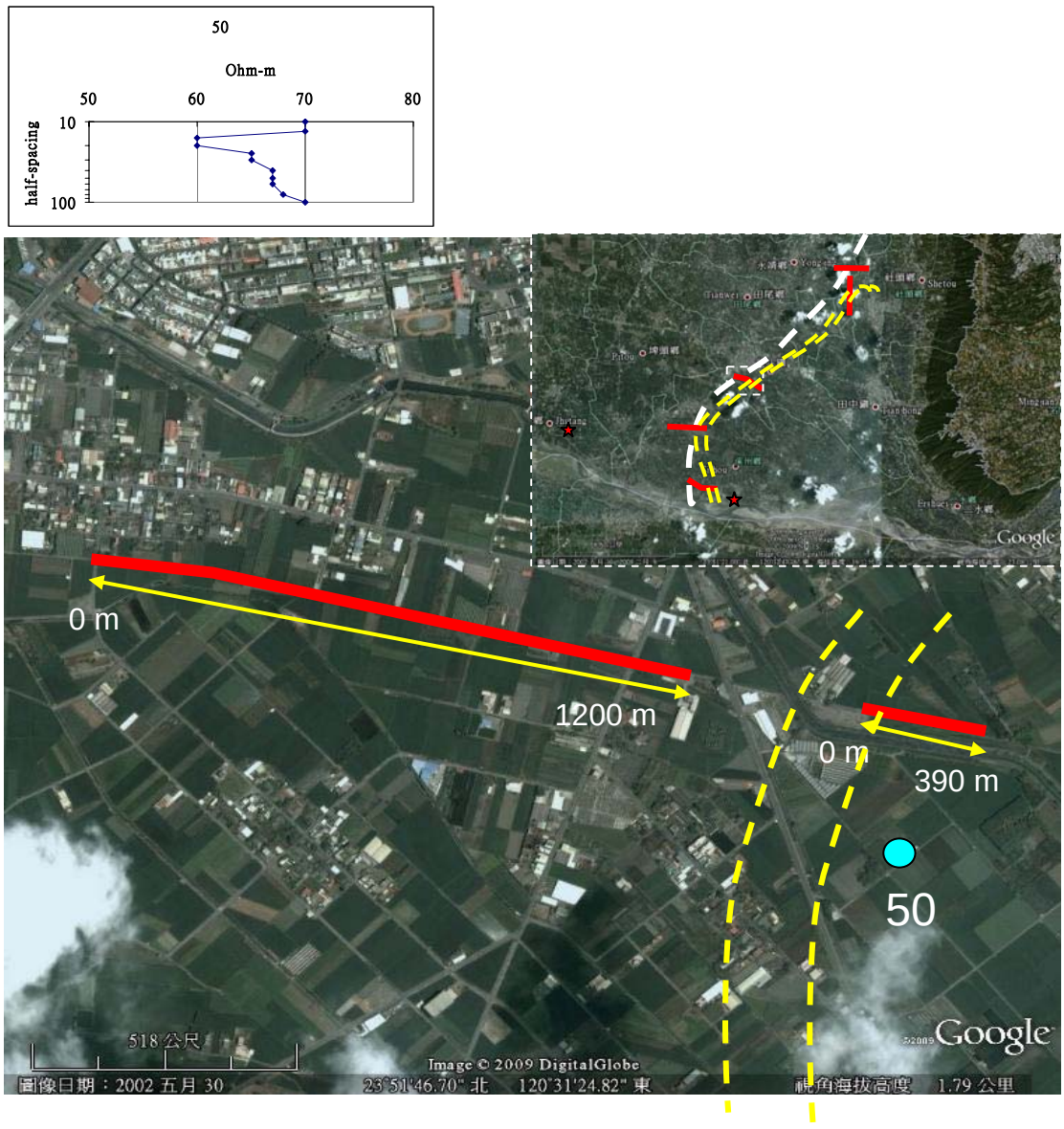
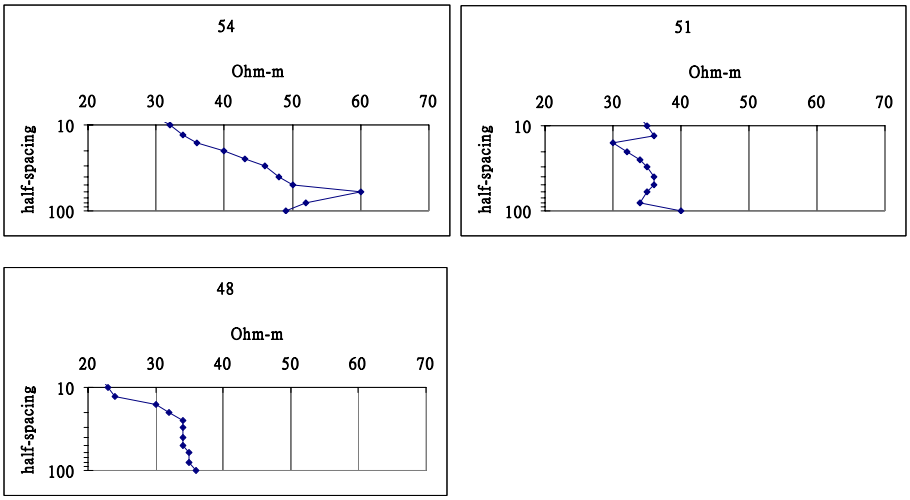


圖 3.4-24、北斗長距離測線研判之扇頂補注區邊界與一維地電阻資料之比對圖

(五) 社頭南北向及東西向長距離測線地電阻剖面測勘

圖 3.4-25 顯示社頭長距離測線地電阻影像剖面以及地電阻測點 No.54、No.51 與 No.48 的對比資料；地電阻測點資料 No.54、No.51 分別位於圖 3.4-17(a) (社頭東西向測線 EW)之左方水平位置 0 與 400m，由觀測資料中可以顯示，圖中多為低電阻率約 35 Ohm-m 至 50 Ohm-m 之地層，測點 No.48 約位在圖 3.4-18 (c)(社頭南北向測線)180 公尺處，視電阻率由 20 Ohm-m 至 35 Ohm-m。也大致與二維地電阻反演剖面之結果一致。研判 No.54、No.51 與 No.48 均呈現有

厚層泥質地層出現之低電阻率反應，研判均在補注區界線之外側，與根據二維測線所訂出之邊界研判結果大致吻合。



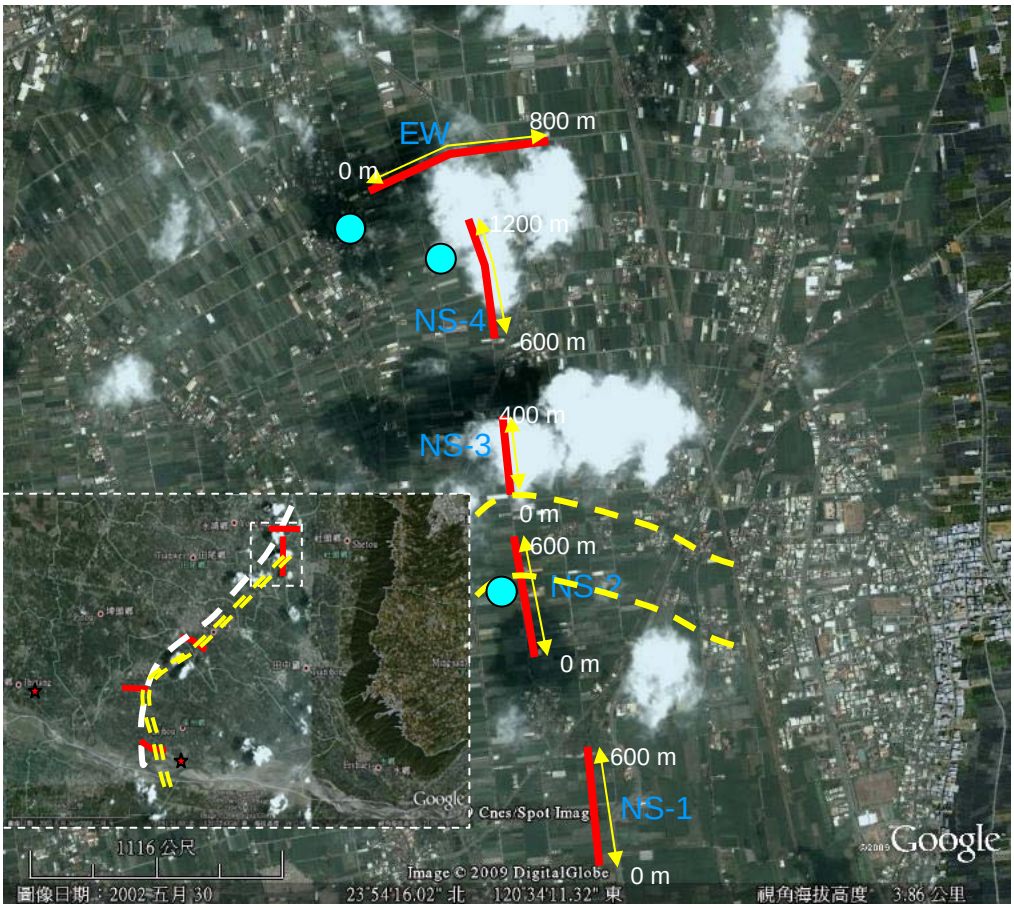


圖 3.4-25、社頭長距離測線研判之扇頂補注區邊界與一維地電阻資料之比對圖

3.4.5 成果分析

由目前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，可以有效協助補注區之邊界判釋。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。也因此印證先前我們認為可以利用地電阻剖面影像描繪阻水層分佈之假設。

由柑園 1A 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 1B 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。顯示應已完全進入補注區域範圍內。因此我們研判補注區可能之邊界，並非一個明顯的界線(boundary line)，而是應在 1A 測線之 1000-1200 公尺到 1B 測線 150 公尺間之一個邊界帶(boundary zone)。而在溪洲測線 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，相同的在北斗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，判斷應已完全進入扇頂補注區範圍。經檢視各剖面之扇頂補注區界限帶分佈位置，我們可以研判其分布範圍位置，約在圖 3.4-26 之兩條黃色虛線間之位置。雖然二維測線與之前一維結果有大致相同之深度分佈趨勢，但結果顯示扇頂補注區界限帶之位置，可能比先前由觀測井鑽井資料及一維地電阻施蘭卜吉(Schlumberger)測深法所推測之界限要再向扇頂側偏移約 300-800 公尺(如圖 3.4-26)。

然而，我們也同時發現由於本區為人為活動頻繁之區域，來自於人工建物、電線，特別是抽水活動均影響地電阻施測之結果。其中尤其是抽水活動，造成垂直之高電阻率構造。由於我們所選用之施測方式為雙偶極距方式，雖然在理論上能對側向之地層變化或垂直之地質構造有較佳偵測能力，但在本區的施測，雙偶極法卻容易受到鄰近人為活動或建築物干擾，而無法正確呈現地下之水平延伸構造。因此未來繼續進行之長測線施測，將考慮嘗試利用受到人為活動干擾較小之 Wenner 方式進行，以減小人為活動之干擾。

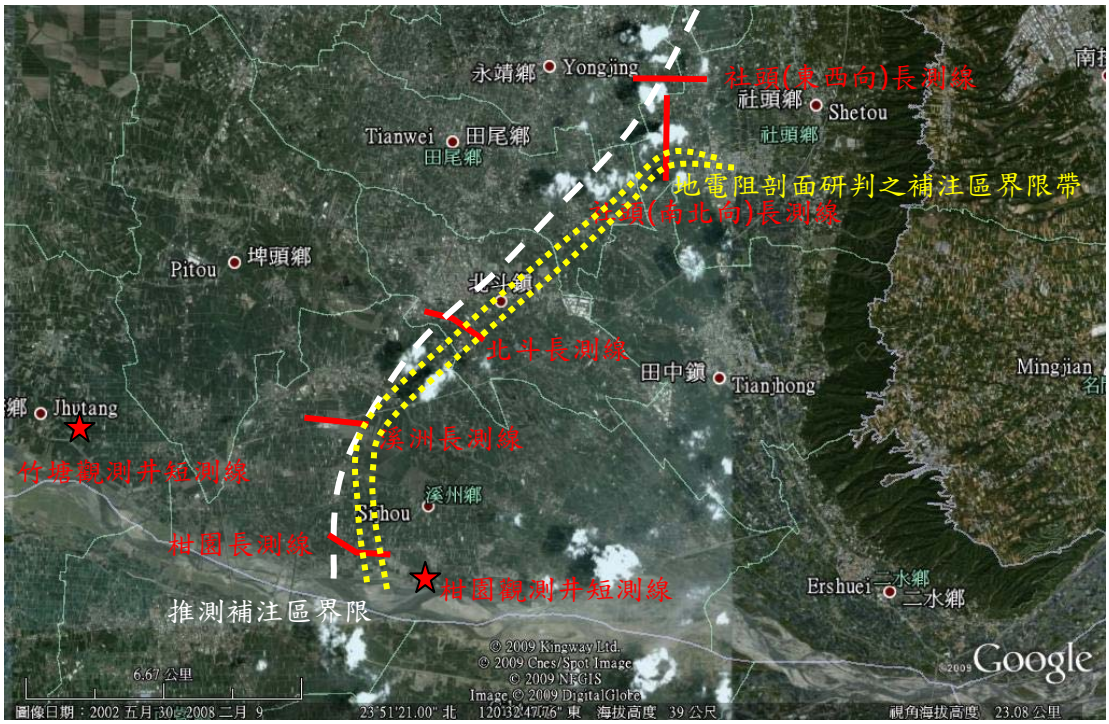


圖 3.4-26、濁水溪沖積扇由地電阻測深法及觀測井資料所推測之補注區界限(白色虛線)，以及由地電阻剖面方法研判之補注區界限帶(黃色虛線標示其左右界)

第四章 地下水補注潛勢評估作業

本計畫建立一套完整的地下水補注潛勢之評估流程，並將之應用於濁水溪沖積扇之地下水補注潛勢評估。本章節除了說明地下水補注潛勢之評估流程外，亦對濁水溪沖積扇之地下水潛勢評估的過程及結果進行詳盡說明。首先於 4.1 節說明地下水補注潛勢評估作業之程序；而在此補注潛勢評估流程中，主要關鍵步驟為建立影響地下水補注潛勢之因子，此部分將於 4.1 節之子節中說明。4.2 節進一步說明將 4.1 節所建立之補注潛勢因子，再透過因果分析方式，分析補注潛勢因子間相互關係，給予各補注潛勢因子互相間之權重分數。各因子本身之補注潛勢分數圖層，則透過地理資訊系統對各補注潛勢因子進行空間分析建立。最後於 4.3 節將各之因子本身之潛勢分數圖層，以 4.2 節所得因子互相間之權重分數進行整合，得到濁水溪沖積扇總體之補注潛勢分數圖層，以作為劃分研究區域之地下水主要補注區之參考。

4.1 地下水補注潛勢評估作業程序建立

本計畫針對濁水溪沖積扇之水文地質特性，參考與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流程，以此作業流程為基礎，進行濁水溪沖積扇地下水補注潛勢評估，補注潛勢評估之流程架構如圖 4.1-1 所示。

在建立地下水補注潛勢因子方面，乃參考相關文獻資料，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」等七項補注潛勢因子 (如表 4.1-1 所示)。本計畫期中報告時，曾將「硝酸鹽濃度」因子納入考量，但經詳細分析與檢討後，發現該因子為補注量之果而非因，其補注潛勢分數可作為與補注潛勢評估結果對照之用，比如當某區域補注潛勢大時，若該區域為農田，則硝酸鹽濃度應偏高，因此其分數圖層將與最後補注潛勢分數圖層作為對照比較之用。本計劃參照前述類 DRASTIC 模式概念，選定補注潛勢因子，進行補注潛勢評估。而各影響因子間相對權重之決定，乃是類 DRASTIC 模式概念最重要的一環，後續將於 4.2 節進一步說明。

4.1.1 地下水補注潛勢評估作業程序

地下水補注潛勢評估作業程序如圖 4.1-1 所示，首先為「選定地下水補注潛勢因子與因子資料蒐集」，在補注潛勢因子選定部份，本計劃已選定前述七個補注潛勢因子，而在補注潛勢因子之資料收集方面乃針對研究區域蒐集點位資料、圖層資料等，接著再將所蒐集之各因子資料建立 GIS 圖層。在進行地下水補注潛式評估前，本計劃以一公里見方之網格對濁水溪沖積扇各補注潛勢因子之 GIS 圖層進行空間切割，因此本計畫進行地下水補注潛勢評估時，將以一公里見方之網格作為基本評估單位。此外，在建立濁水溪沖積扇之地下水數值模式時，亦採用相同之網格大小，以利未來研究資料溝通之用，此部分將於 4.1.2 節說明。

在步驟「選定地下水補注潛勢因子與因子資料蒐集」之後，接著為兩個可平行進行的步驟，分別為「繪製補注潛勢因子關係邏輯圖」與「給定補注潛勢因子細部分類分數」。「繪製補注潛勢因子關係邏輯圖」乃是基於補注潛勢因子間的因果關係繪製關係圖，再根據此關係圖作為下一步驟「計算補注潛勢因子間之權重」之基礎，補注潛勢因子間的因果關係圖將於 4.2 節說明繪製方法。「給定補注潛勢因子細部分類分數」步驟是將補注潛勢因子根據其資料型態或特性再進行細部分類，並依照各細部分類對補注潛勢影響程度給定分數。

接在「繪製補注潛勢因子關係邏輯圖」後之步驟為「計算補注潛勢因子間之權重」，此步驟乃根據因子關係邏輯圖計算補注潛勢因子間之權重。接在「給定補注潛勢因子細部分類分數」後之步驟為「計算各網格之補注潛勢因子分數」，此步驟須依因子的圖層資料型態進行處理，因子圖層型態可分為面及點兩種型態。若因子的圖層型態屬於面圖層，則需依照因子內各細部分類面積佔一網格之比例乘上各細部分類之分數，再將各細部分類之分數加總即可得到該網格對應於該因子之潛勢分數，如式 4.1-1 所示。若因子的資料型態屬於點型態，由於因子資料是由點位資料直接內插到各網格，因此將各網格上之資料對照因子細部分類分數表即可得到各網格的分數。此部份將在 4.2 節詳細說明。

最後「以補注潛勢因子間之權重加權累加各因子分數」則是將前述本計劃所選定七項地下水補注潛勢因子在網格上之分數乘上各因子影響地下水補注潛勢之權重，再將七項因子之分數加總即可得到該網格之補注潛勢總分(如式 4.1-2 所示)。其結果將在 4.3 節以 GIS 圖層

展示，以輔助後續地下水補注區之劃分。

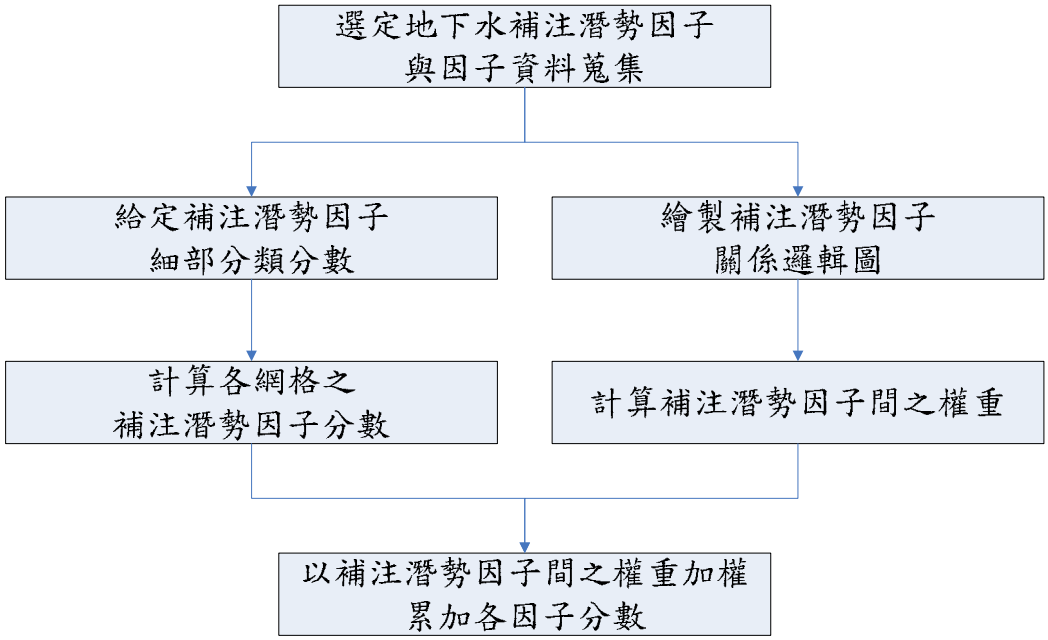


圖 4.1-1、地下水補注潛勢評估作業程序

$$AWA_{cno}(i)=\frac{\sum_{j=1}^{M_{cno}} Area(j)\times RF_{cno,i}(j)}{\sum_{j=1}^{M_{cno}} Area(j)} \quad \text{.....(式 4.2-1)}$$

$$TRF_{cno}=\sum_{i=1}^{N}\omega(i)\times AWA_{cno}(i) \quad \text{.....(式 4.2-2)}$$

$AWA_{cno}(i)$：代表第 i 種補注潛勢因子網格圖層中，第 cno 個網格之因子潛勢分數。

$RF_{cno,i}(j)$：代表第 i 種補注潛勢因子網格圖層中，第 cno 個網格內之第 j 種細部分類分數。

$Area(j)$：代表第 j 種細部分類區塊的面積。

M_{cno}：代表在第 cno 個網格內的區塊數量。

$\omega(i)$：代表第 i 種補注潛勢因子的權重數值。

N：代表補注潛勢因子個數。

TRF_{cno}：代表在第 cno 個網格內的整體補注潛勢分數。

表 4.1-1、地下水補注主要影響因子示意表

因子種類	潛勢因子	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。

4.1.2 地下水補注潛勢因子圖層建立

本計劃使圖層製作使用之軟體如表 4.1-2 所示。其中可取得之圖層資料有土地利用、表層土壤種類及河系。其餘因子因為並無現有圖層資料，因此須由本計劃蒐集研究區域之點位資料搭配對研究區域以一公里見方之網格進行空間切割後之網格圖層建立圖層資料。其作法為將分析篩選後所得之點位資料利用距離倒數平方(Inverse Distance

to a Power)內插到各網格上，得到各網格之資料，並以此建立 GIS 圖層。本計劃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 4.1-2、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

4.1.2.1 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，本計劃將土地利用

納入地下水補注潛勢因子。

在圖層建立上，本計劃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，但本計劃使用的座標系統為 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 4.1-2 所示)。但 SuperGIS 並未內建大量合併圖層的功能，因此需額外撰寫 VBA 程式進行大量圖層合併(程式碼撰寫示意圖如圖 4.1-3 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 4.1-3 所示)，例如本計劃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 4.1-3、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）

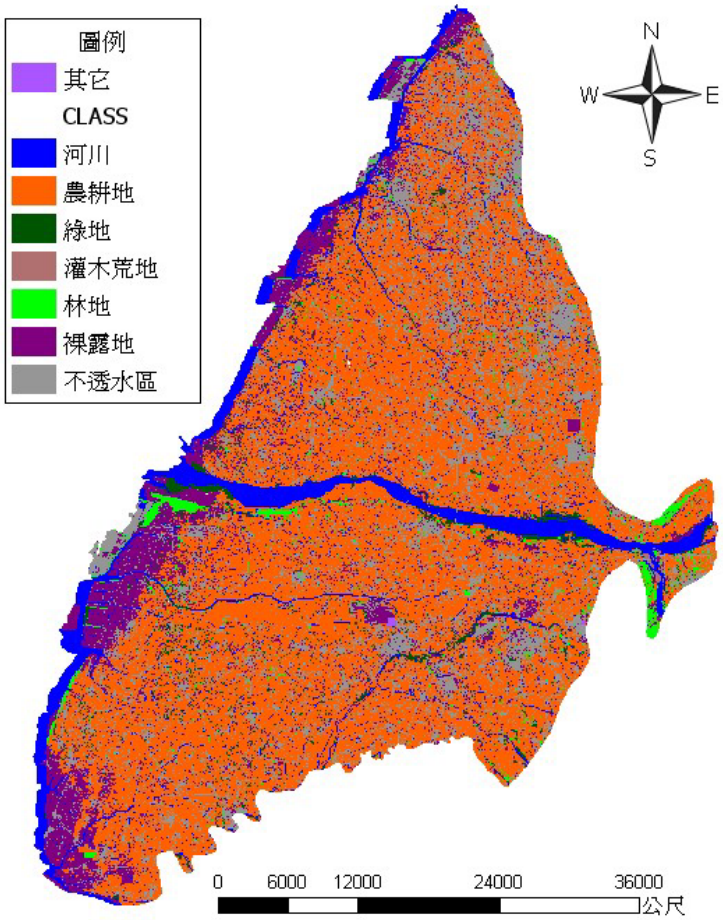


圖 4.1-2、濁水溪沖積扇土地利用計畫分類圖層

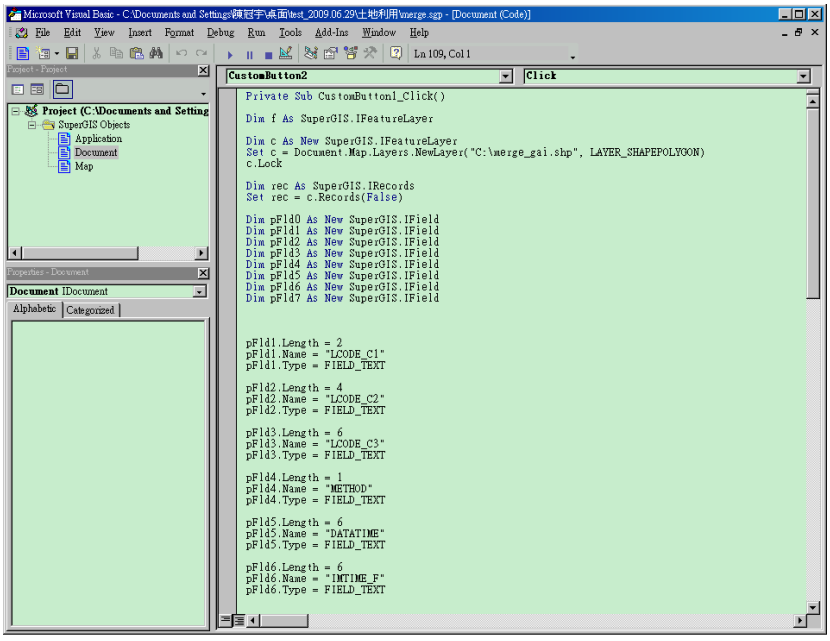
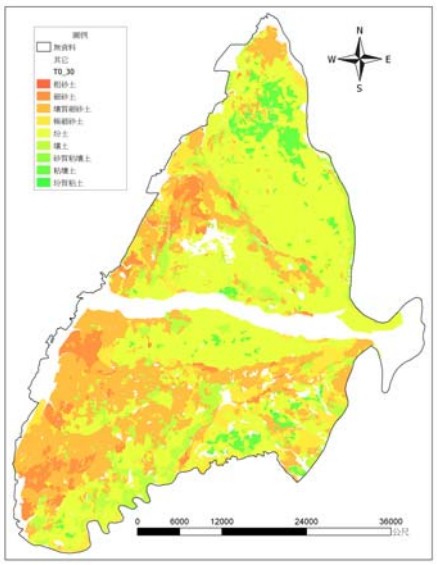


圖 4.1-3、VBA 程式開發介面

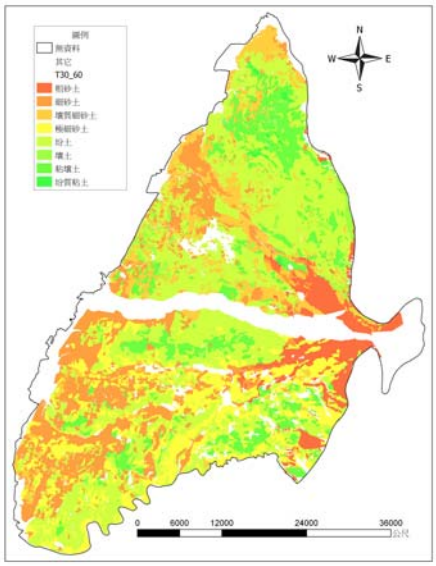
二、表層土壤種類

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。故本計劃將表層土壤種類納入地下水補注潛勢因子。

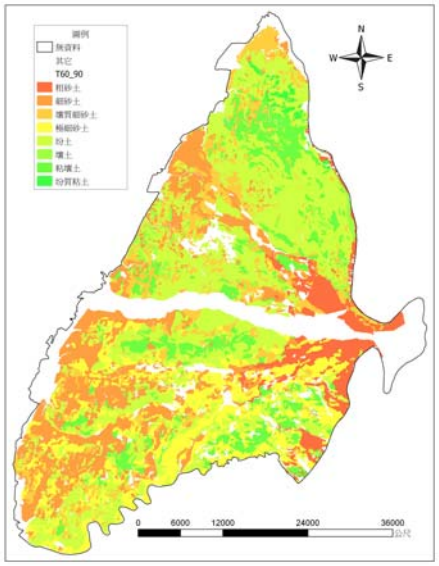
本計劃從行政院農業委員會農業試驗所取得之圖層為 ArcInfo 之 *.e00 格式，與本計劃之通用格式不符，因此需將其轉換為 Shapefile 格式。圖 4.1-4 為轉檔後，根據不同深度範圍的表層土壤種類分布圖。本計劃將採用 0~150cm 四層的圖層資料，先分別計算出各層土壤種類的補注潛勢分數後再平均。



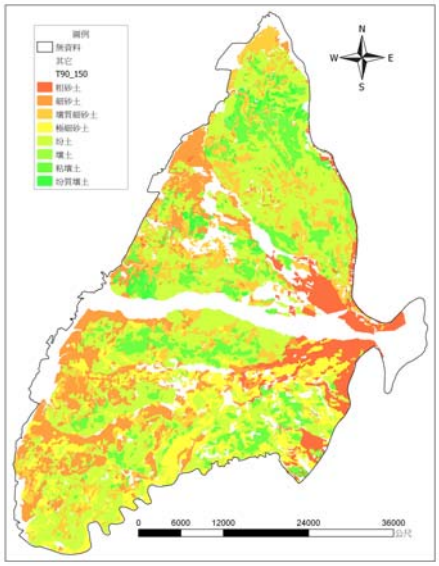
(a)0~30cm 深度土壤種類



(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 4.1-4、表層土壤種類原始圖層

三、透水係數

透水係數 K(hydraulic conductivity)為描述水於含水層中流動之速率，其對降雨補注至含水層中扮演相當重要之因素，因此本研究將透

水係數列為補注潛勢因子之一。本計劃使用之透水係數 K 值取自台灣地區地下水觀測網第一期計畫報告，並藉由地質鑽探所獲得之水文地質剖面圖(如圖 2.2-1)，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、四(T1~T4)，取出位於地下含水層一(F1)深度內 42 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。但內插後之結果顯示，竹塘(1)及合興(1)雖位於扇央，其 K 值分別為 0.107222 m/min.、0.131925 m/min.，相對於周遭井為高，影響整體等值線走向，造成竹塘(1)及合興(1)局部性的極端。由於本研究目的在於區域性的補注潛勢劃分，若考慮局部性極端資料繪製等值圖會影響整體之判斷，因此將竹塘(1)及合興(1)移除重新進行內插，如圖 4.1-5 所示。濁水溪沖積扇 K 值最大約為 0.12~0.13 m/min.，位於柑園(1)及二水(1)。

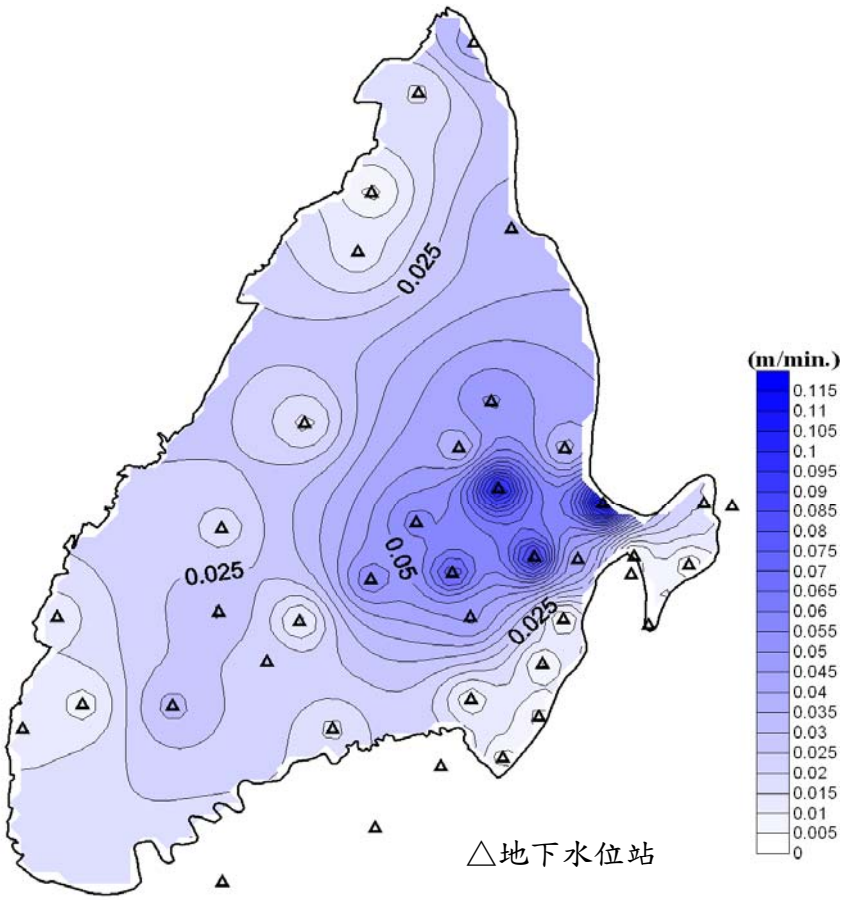


圖 4.1-5、濁水溪沖積扇含水層一(F1)透水係數等值線圖

4.1.2.2 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。故本計劃亦將河系密度納入地下水補注潛勢因子。本計劃以水系 GIS 圖資(Polygon 圖形資料)(如圖 4.1-6)，計算各網格內河系面積所佔之百分比。



圖 4.1-6、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，故本計劃亦將年

平均年降雨量納入地下水補注潛勢因子。

本計畫以經濟部水利署之雨量站為主，中央氣象局為輔，選出於濁水溪沖積扇及其周圍之雨量站作分析，所選擇之 37 站如圖 4.1-7 所示，使用資料為 1993-2008 年各年年雨量平均所得之各站平均年雨量。

本計劃以前述 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距離倒數平方(Inverse Distance to a Power)內插到各網格，內插完成後之等值線圖如圖 4.1-8 所示。

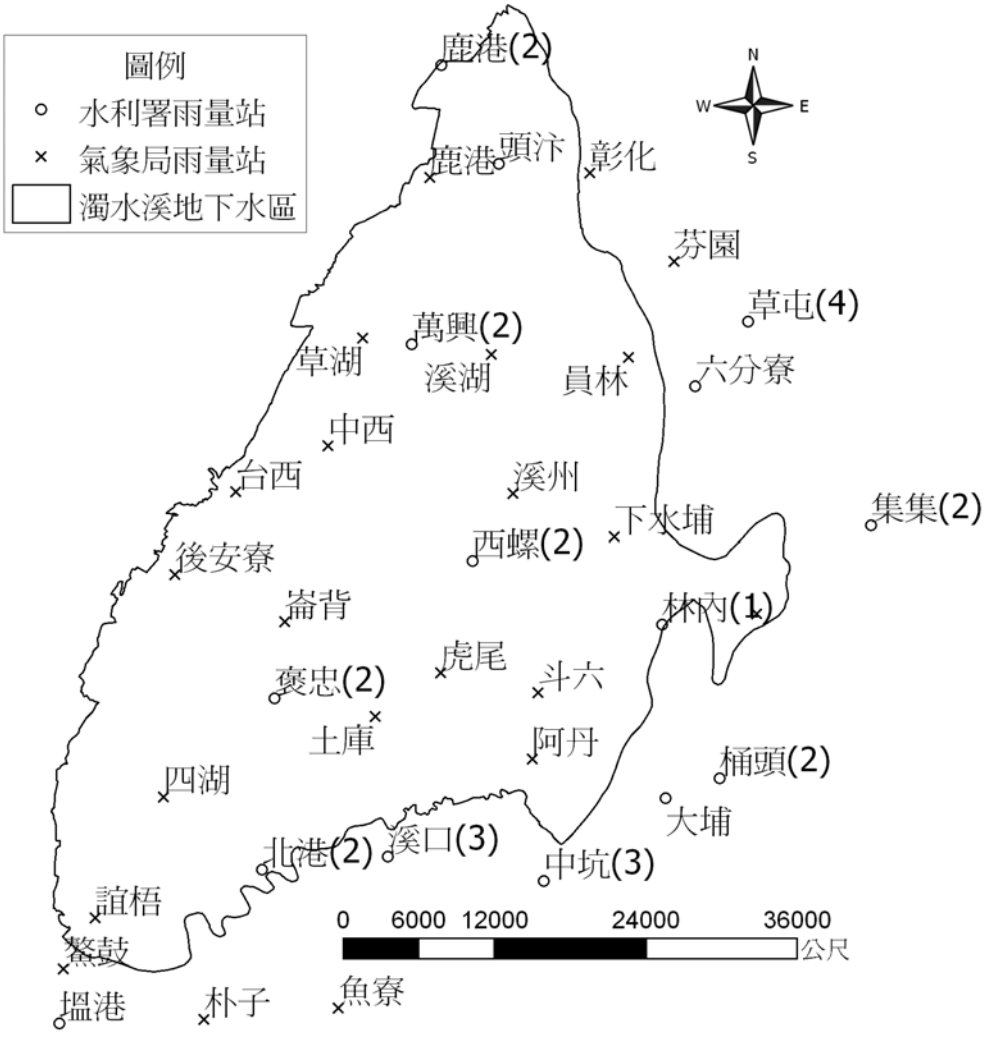


圖 4.1-7、平均年降雨量因子選取之雨量站

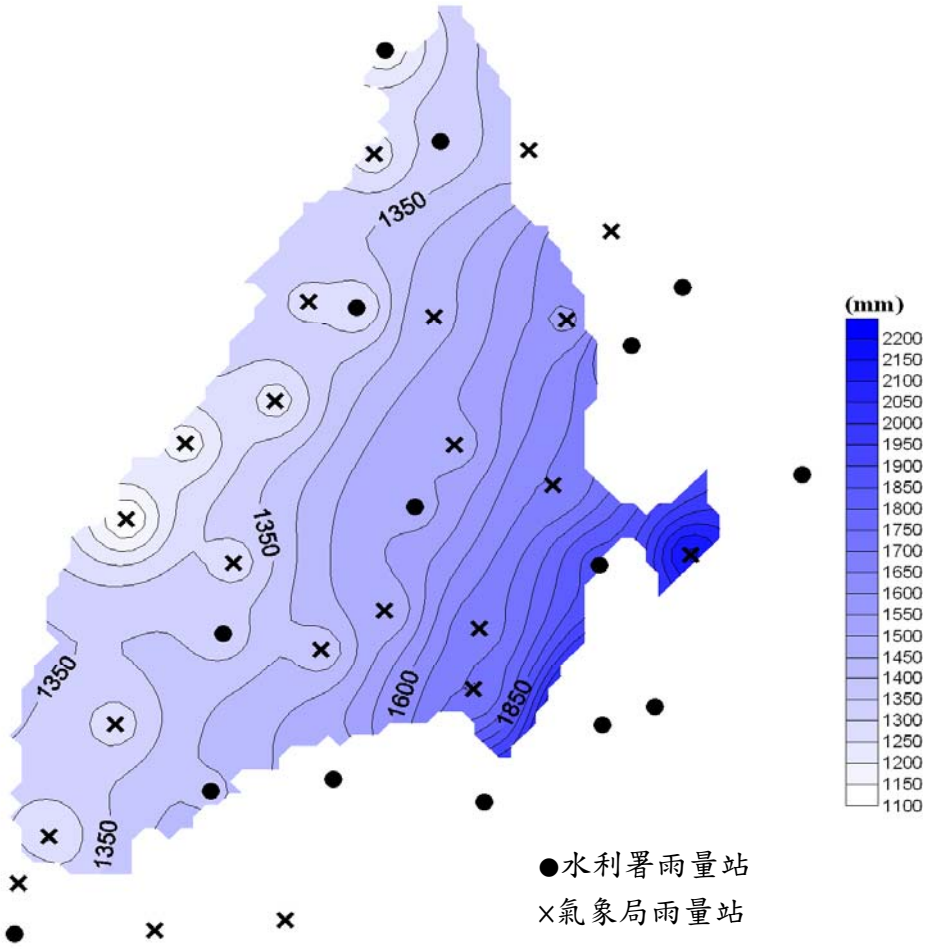


圖 4.1-8、本計畫選取雨量站之平均年降雨量等值線圖

4.1.2.3 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及山區之雨量站，包括山區 20 站以及平原區 20 站，共計 40 站，如圖 2.2-2 所示。資料蒐集期距自西元 1995/01/01 至 2007/12/31 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 33 口井，如圖 4.1-9 所示資料蒐集期距自西元 1995/01/01 至 2007/12/31 之每日觀測數據。

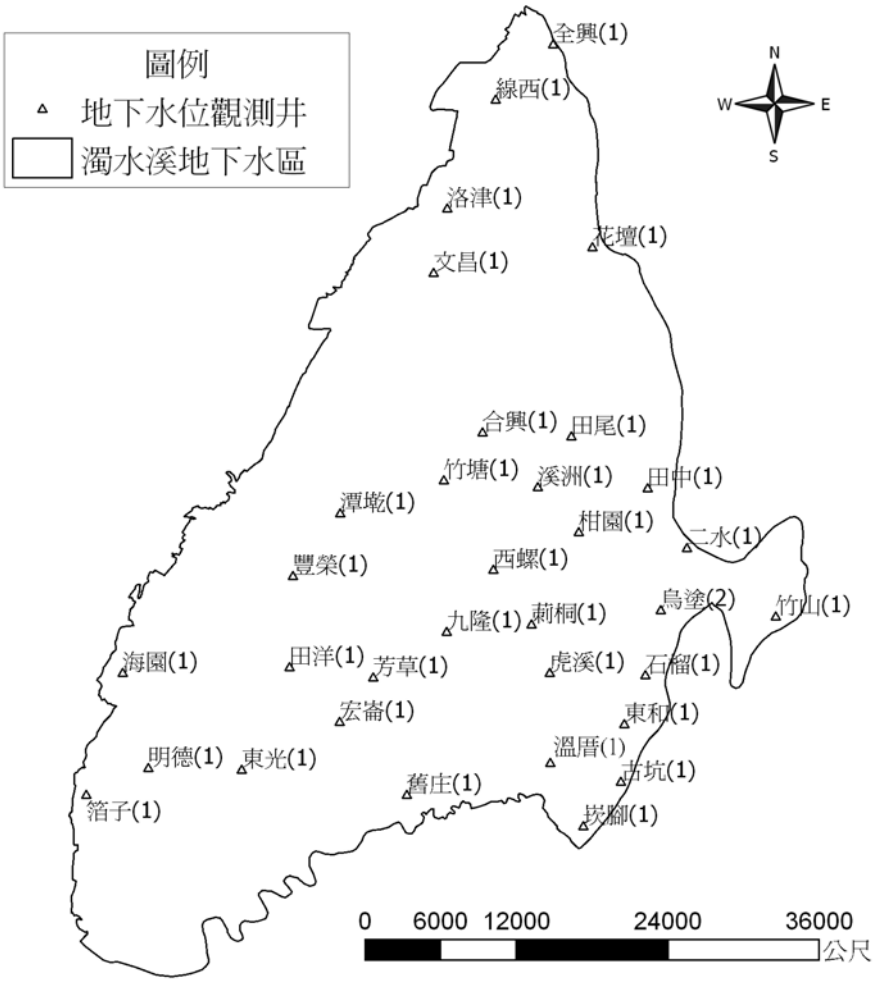


圖 4.1-9、降雨與地下水位變化相關性因子所選取之地下水井分布圖

假設受壓含水層之水位上升來自「含水層側向補注」，則補注來源可能分別為「平原區」、「山區」及「全區(平原區+山區)」之降雨；而非受壓含水層水位上升原因可能來自「垂向入滲」及「含水層側向補注」，因此需多考慮局部區域降雨之影響。計算「平原區」、「山區」、

「全區(平原區+山區)」之每日平均雨量公式如下

$$R_{AV} = \sum_{i=1}^{N} W_i R_i \quad \text{.....(式 4.1-2)}$$

R_{AV}：區域每日平均降雨量

W_i：權重=i雨量站徐昇氏網格控制面積/區域總面積

R_i：i雨量站之雨量

N：雨量站總數

表 4.1-4、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
C0H990	昆陽	276965.32	2668681.53	77044755.33
C0I010	廬山	267631.15	2658945.44	149072844
C1I020	萬大	262578.71	2653002.72	181108992.8
C1I030	武界	254496.76	2645614.64	111478114.9
C1I04	文文社	251301.84	2635862.15	94691013.68
C1I140	卡奈托灣	258126.59	2628050.57	202942102.9

表 4.1-4 各雨量站徐昇氏網格之控制面積(續)

站號	雨量站站名	X	Y	控制面積(m^2)
C1I050	丹大	263535.01	2627993.14	397212322.5
C1I150	青雲	243999.1	2633002.31	151831074.5
C1I160	龍神橋	236099.66	2630885.18	121553330.4
C1I060	望鄉	240079.31	2613101.14	355676574.9
C1I080	信義	233965.38	2620889.48	88540522.18
C1I100	溪頭	229513.2	2617757.33	76560067.22
C1I070	和社	237837.37	2609934.35	265621605.6
C1I170	集集	226256.12	2636066.11	88821668.49
C0I090	鳳凰	227484.44	2625143.29	73272289.26
C1I120	大鞍	224671.06	2619672.21	73067274.33
C0I110	竹山	217155.8	2629039.14	139809654
C1I130	桶頭	213838.17	2615695.93	74664612.26
C0K240	草嶺	217879.36	2610487.53	221188756.7
C0K300	大埔	208906.54	2615585.96	117948956.8

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。依照地下水井所處含水層特性可分為受壓與非受壓含水層，因此以下稱位處受壓含水層之地下水井為受壓地下水井，位處非受壓含水層者為非受壓地下水井。受壓水井之水位變化分別與「平原區」、「山區」、「全區」之平均降雨量作線性迴歸；非受壓井之水位變化除了與上述三區域之平均降雨量作線性迴歸外，另外與「最鄰近雨量站」之降雨量作線性迴歸。以受壓地下水井-豐榮(1)為例，其線性迴歸結果顯示，該站地下水位與平原區降雨相關性最佳 R^2=0.804，山區次之 R^2=0.691，全區最差 R^2=0.519，如圖 4.1-10 所示。

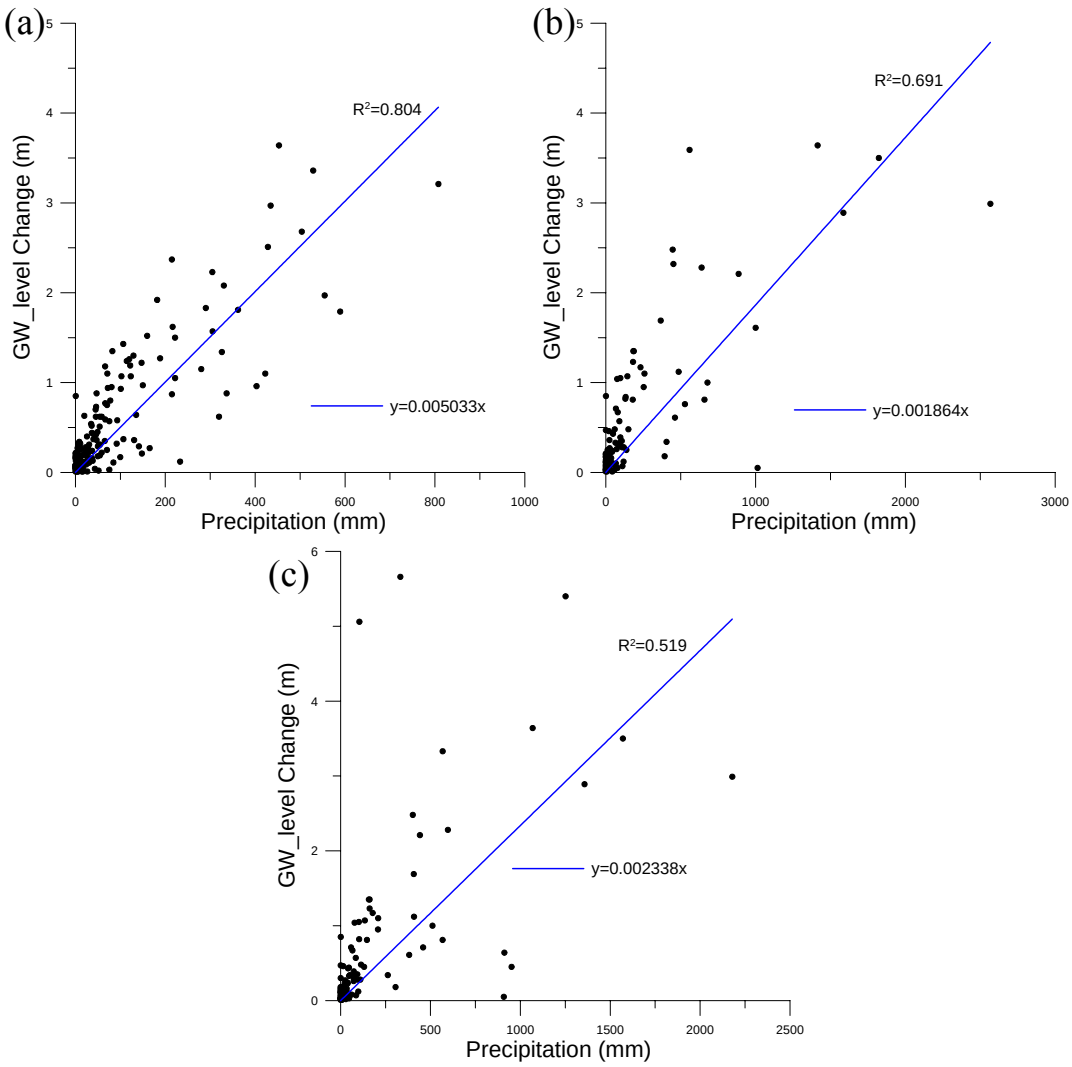


圖 4.1-10、豐榮(1)地下水位上升量與各區平均降雨量線性迴歸(a)平原區(b)山區(c)全區

受壓地下水井之水位變化對「平原區」、「山區」、「全區」之平均降雨可求得 3 組不同之 R^2 值，各井之比較如圖 4.1-11 所示；非受壓地下水井因為需多考慮垂向入滲之影響，多考慮「最鄰近之雨量站」的降雨量影響，故在非受壓地下水井的分析上共可得 4 組之 R^2 值，各井之比較如圖 4.1-12 所示。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 4.1-13 所示，由圖中研判扇頂區域之地下水位與降雨相關性較高，漸漸往扇尾遞減，因此在扇頂附近應具有較高之補注潛勢。

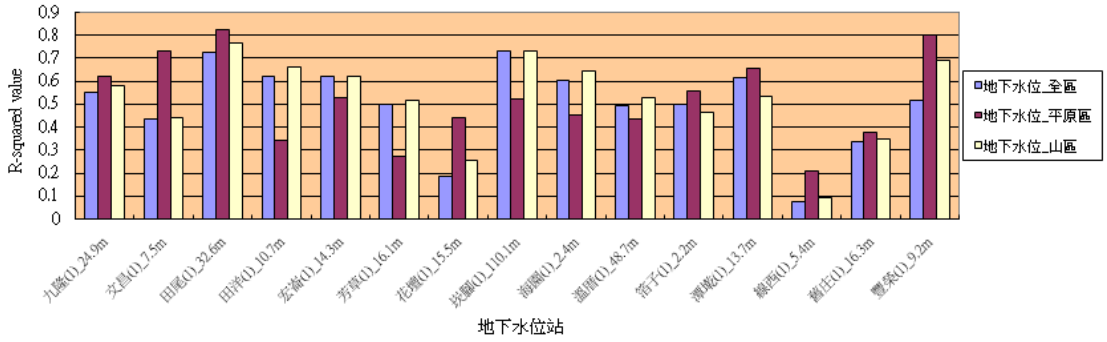


圖 4.1-11、各區降雨與受壓地下水井水位變化迴歸統計之 R^2 值比較圖

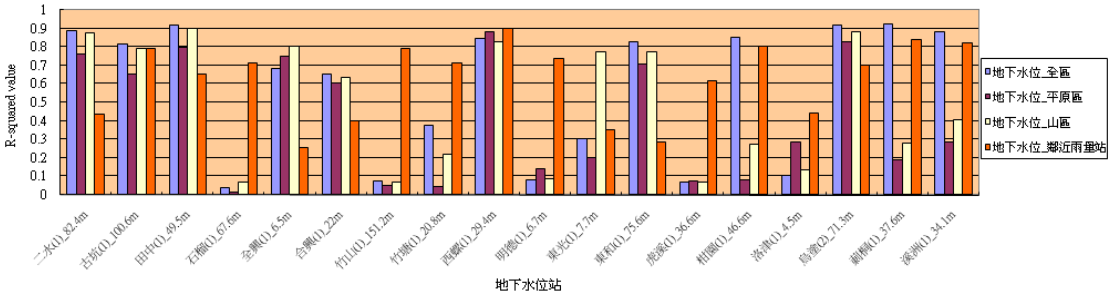


圖 4.1-12、各區降雨與非受壓地下水井水位變化迴歸統計之 R^2 值比較圖

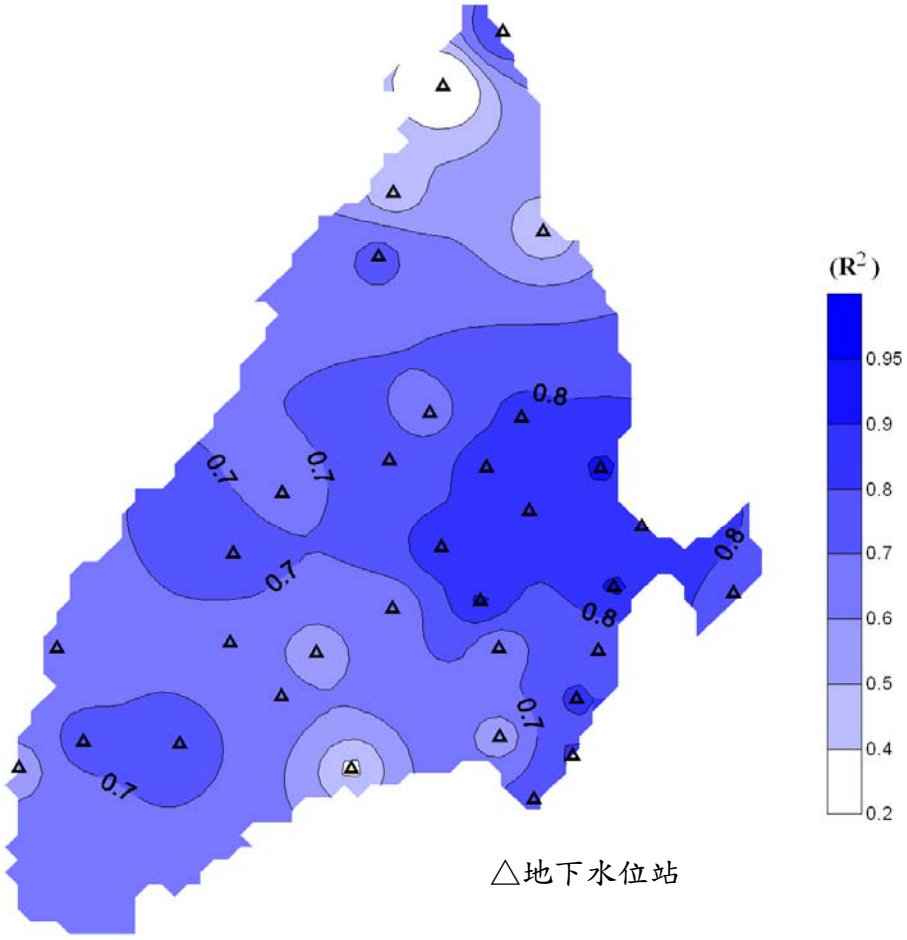


圖 4.1-13、降雨與地下水位變化相關性等值圖

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，本計劃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 4.1-3 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，因此本計劃取位於淺層非受壓及受壓含水層的井，如圖 4.1-14 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 4.1-5 所示，其中本年度計畫現地複井抽水試驗估測得柑園觀一比出水率約為 0.120、莿桐觀一兩次平均結果為 0.0007074，對照 3.1.1 節莿桐觀一鑽探資料，以及與一般比出水率平均值相比差異甚多，在此並未納入計算，而改以平均值表示。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 4.1-15 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。

$$\overline{S} = \sigma \times S \quad \text{.....(式 4.1-3)}$$

$\overline{S}$：單位蓄水量變化

σ：地下水位標準差

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

S：受壓含水層為儲水係數(S)，非受壓含水層為比出水率(Sy)

表 4.1-5、各井之儲水係數與單位蓄水量變化

站名	well_name	S	Sy	水位標準(m)	單位蓄水量變化 (m)
全興(1)	Cyuansing		0.200	0.435	0.087
線西(1)	Siansi	*0.00448		0.447	0.002
洛津(1)	Luojin		0.200	0.592	0.118
花壇(1)	Huatan	0.00218		1.723	0.004
文昌(1)	Wunchang	0.00218		0.538	0.001
合興(1)	Hesing		*0.225	1.078	0.242
田尾(1)	Tianwei	0.00218		0.679	0.001
潭墘(1)	Tancian	0.00218		1.378	0.003
竹塘(1)	Jhutang		0.200	1.114	0.223
溪洲(1)	Sijhou		*0.216	0.988	0.213
柑園(1)	Ganyuan		*0.120	1.619	0.194
田中(1)	Tianjhong		0.200	2.389	0.478
二水(1)	Ershuei		*0.199	3.291	0.655
豐榮(1)	Fongrong	0.00218		1.802	0.004
西螺(1)	Siluo		0.200	1.141	0.228
海園(1)	Haiyuan	*0.000191		2.294	0.000
田洋(1)	Tianyang	*0.00188		0.644	0.001
九隆(1)	Jioulong	0.00218		0.984	0.002
薊桐(1)	Cihtong		0.200	1.256	0.251
烏塗(2)	Wutu		*0.152	2.986	0.454
箔子(1)	Bozih	0.00218		1.839	0.004
明德(1)	Minde		0.200	1.169	0.234
東光(1)	Dongguang		*0.289	1.628	0.470
宏崙(1)	Honglun	0.00218		0.986	0.002
芳草(1)	Fancao	0.00218		0.815	0.002
虎溪(1)	Husi		0.200	0.895	0.179
石榴(1)	Shihliou		0.200	2.090	0.418
東和(1)	Donghe		0.200	3.903	0.781
舊庄(1)	Jioujhuang	0.00218		0.856	0.002
溫厝(1)	Wuncuo	0.00218		0.884	0.002
古坑(1)	Gukeng		0.200	5.107	1.021
崁腳(1)	Kanjiao	0.00218		1.870	0.004
*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，柑園站為本年度計畫實測結果。					

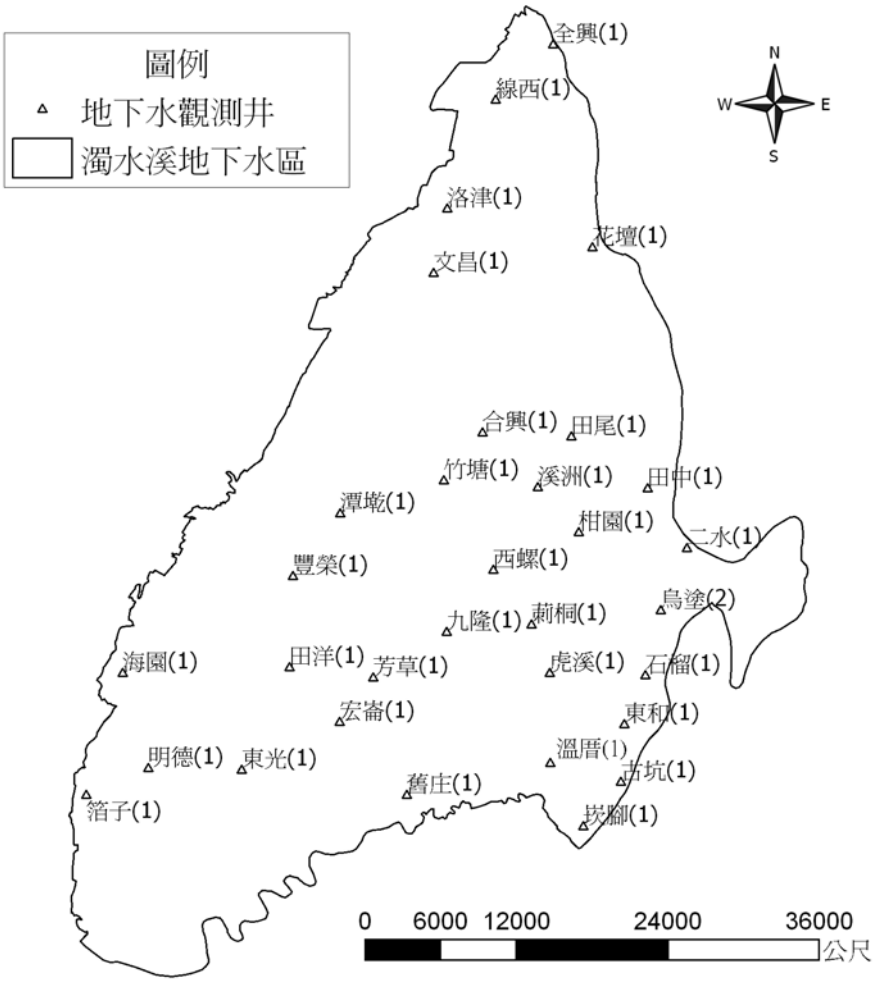


圖 4.1-14、單位蓄水量變化因子所選用之地下水井分布圖(參考自江崇榮等，2006，p.68)

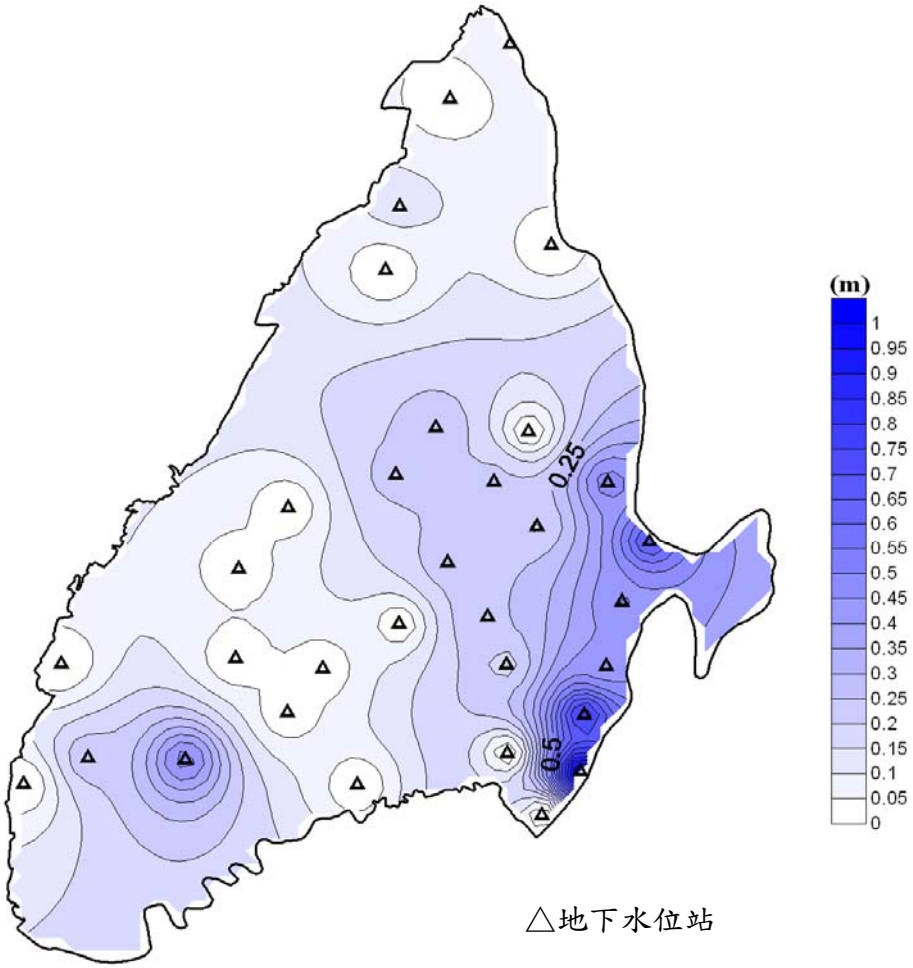


圖 4.1-15、單位蓄水量變化等值圖

4.2 地下水補注因子相互關係與權重劃分

每項補注潛勢因子對地下水補注而言，其影響效力並非皆佔有相同比例，根據 Shaban et al. (2006)之研究，各項潛勢因子之間，具有相依相存之關係。因此本計劃將參考 Shaban et al. (2006)與 Yeh et al. (2008)等方式，估算不同補注潛勢因子間權重比例。圖 4.2-1 為補注潛勢影響因子間的因果關係示意圖，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。

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 4.2-1 可以明顯表示各項影響補注潛勢因子間之影響關係，為探討不同影響因子影響力的大小比例，本計劃因為主要影響給予較大的權重值，在此給予 1.0 之權重值，而次要影響則給予 0.5 之權重值。計算主要影響箭尾個數與次要影響箭尾個數即可累計該影響因子的影響權重。以「土地利用」因子為例，其有二個主要影響箭尾與一個次要影響箭尾，因此其權重值即為 2.5。之後再將各因子之權重除以各因子之權重加總值，即可得到各因子之權重百分比，表 4.2-1 即為補注潛勢因子權重計算表。完成定義各潛勢因子之間的權重後，接下來將定義補注潛勢因子內部分類之分數。在一個補注潛勢因子之分類中，對於影響地下水補注潛勢最重要者給予 100 分，次要者則視影響地下水補注潛勢之大小適度調降分數，以此類推定義因子內部所有分類之分數，例如土地利用之權重百分比為 19%，因此在土地利用因子中，影響地下水補注之分類最高分為 100 分，加權後為 19 分(100×19%)，而河川為土地利用因子中影響濁水溪沖積扇地下水補注最重要的分類，因此河川之分數即為 19 分，其餘分類依照影響地下水補注潛勢的高低給予分數。表 4.2-2 為補注潛勢因子分數表。

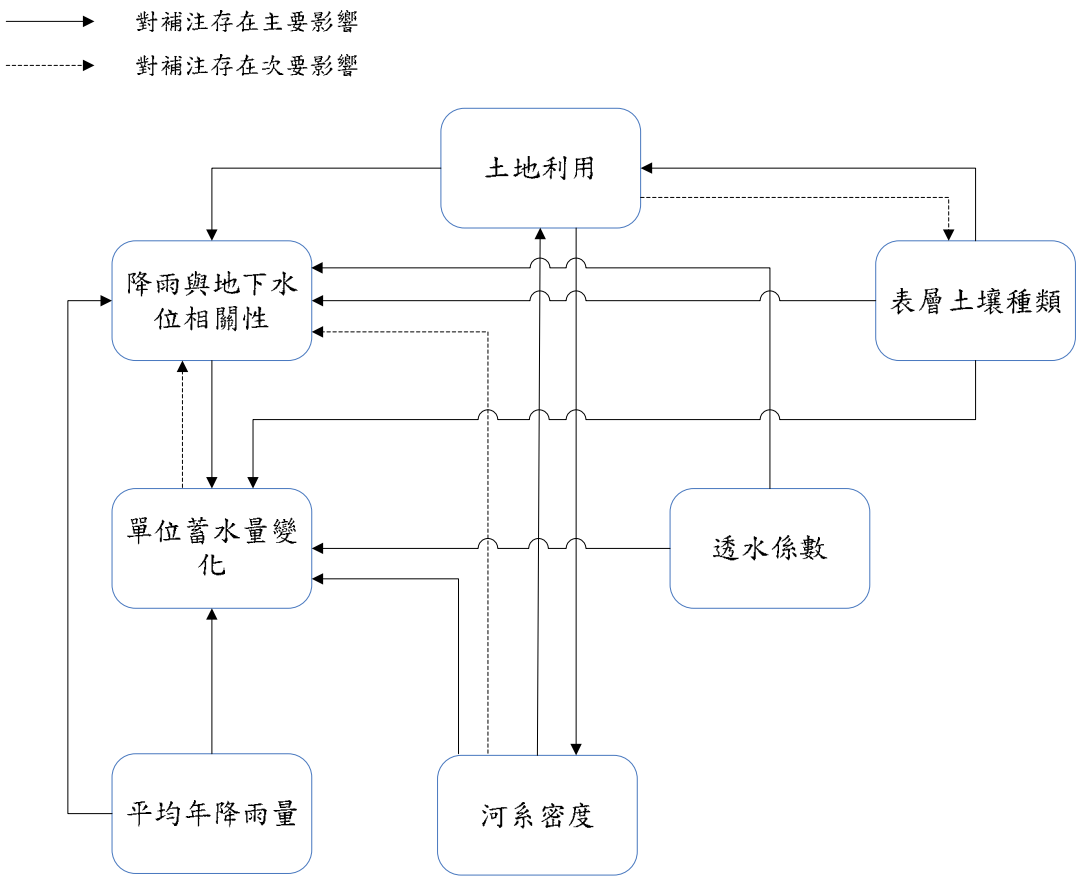


圖 4.2-1、地下水補注潛勢因子關係圖

表 4.2-1、地下水補注潛勢因子權重計算表

地下水補注潛勢因子	計算方式	權重值	權重百分比
土地利用	2(1)+1(0.5)=2.5	2.5	18.51%≒19%
表層土壤種類	3(1) =3.0	3.0	22.22%≒22%
降雨與地下水位變化相關性	1(1)=1.0	1.0	7.41%≒7%
平均年降雨量	2(1)=2.0	2.0	14.81%≒15%
單位蓄水量變化	1(0.5)=0.5	0.5	3.7%≒4%
透水係數	2(1)=2.0	2.0	14.81%≒15%
河系密度	2(1)+1(0.5)=2.5	2.5	18.51%≒18%
	總分	13.5	100%
主要影響(1.0)，次要影響(0.5)			

表 4.2-2、地下水補注潛勢因子細項分類分數表

地下水補注潛勢因子	代碼	分類與範圍	分數
土地利用	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
表層土壤種類	11	石礫	100
	1	粗砂土	90
	2	細砂土	80
	3	壤質細砂土	70
	4	極細砂土	60
	5	坋土	50
	6	壤土	40
	7	砂質粘壤土	40
	8	粘壤土	30
	9	坋質粘土	20
	10	粘土	10
降雨與地下水位變化相關性	1	0.22~0.33	20
	2	0.33~0.45	40
	3	0.45~0.56	60
	4	0.56~0.68	80
	5	0.68~0.79	90
	6	0.79~0.92	100
平均年降雨量	1	1114~1330	20
	2	1330~1545	40
	3	1545~1760	60
	4	1760~1976	80
	5	1976~2192	100

地下水補注潛勢因子	代碼	分類與範圍	分數
單位蓄水量變化	1	0~0.19	20
	2	0.19~0.38	40
	3	0.38~0.58	60
	4	0.58~0.77	80
	5	0.77~0.97	100
透水係數	1	0~0.02	20
	2	0.02~0.04	40
	3	0.04~0.06	60
	4	0.06~0.9	80
	5	0.9~0.12	100
河系密度	1	0~7	10
	2	7~14	20
	3	14~21	30
	4	21~28	40
	5	28~35	50
	6	35~42	60
	7	42~49	70
	8	49~56	80
	9	56~63	90
	10	63~72	100

4.2.1 土地利用

土地利用原始分類高達 103 種，本計劃將其歸納為 7 種土地利用類別，如表 4.2-3 所示。圖 4.2-2 是由圖 4.1-2 經過網格切割後，依照各種計劃土地分類根據表 4.2-2 給予分數，再將該分類分數所佔網格面積比例加權計算各網格分數，最後再搭配表 4.2-1 以補注潛勢因子間權重加權計算所得。

表 4.2-3、土地利用計畫分類表

類別	原始分類代碼	計畫分類代碼
稻作	10101	2
旱作	10102	2
果樹	10103	2
廢耕地	10104	3
水產養殖	10200	6
畜禽舍	10301	6
牧場	10302	3
溫室	10401	6
倉儲設施	10402	7
農產品展售場	10403	7
其他設施	10404	6
天然針葉樹純林	20101	5
天然闊葉樹純林	20102	5
天然竹林	20103	5
天然竹針闊葉混淆林	20104	5
人工針葉樹純林	20201	5
人工闊葉樹純林	20202	5
人工竹林	20203	5
人工竹針闊葉混淆林	20204	5
伐木跡地	20301	6
苗圃	20302	5
防火線	20303	6
土場	20304	6
機場	30100	7
一般鐵路	30201	7
高速鐵路	30202	7

類別	原始分類代碼	計畫分類代碼
鐵路相關設施	30203	7
國道	30301	7
省道、快速道路	30302	7
一般道路	30303	7
道路相關設施	30304	7
商港	30401	1
漁港	30402	1
專用港	30403	1
其他港口相關設施	30404	1
河川	40101	1
減河	40102	1
運河	40103	1
堤防	40104	1
溝渠	40200	1
水庫	40301	1
湖泊	40302	1
其他蓄水池	40303	1
人工湖	40304	1
水道沙洲灘地	40400	1
水閘門	40501	1
抽水站	40502	1
水庫堰壩	40503	1
地下取水井	40504	1
其他設施	40505	1
防汛道路	40600	1
海面	40700	1

類別	原始分類代碼	計畫分類代碼
零售批發	50101	7
服務業	50102	7
純住宅	50201	7
兼工業使用住宅	50202	7
兼商業使用住宅	50203	7
兼其他使用住宅	50204	7
製造業	50301	7
倉儲	50302	7
宗教	50401	7
殯葬設施	50402	7
興建中	50403	6
其他	50404	6
政府機關	60100	7
幼稚園	60201	7
小學	60202	7
中學	60203	7
大專院校	60204	7
特種學校	60205	7
醫療保健	60300	7
社會福利設施	60400	7
氣象	60501	7
電力	60502	7
瓦斯	60503	7
自來水	60504	7
加油站	60505	7
環保設施	60600	7

類別	原始分類代碼	計畫分類代碼
法定文化資產	70101	7
一般文化設施	70102	6
其他文化設施	70103	7
公園綠地廣場	70201	3
遊樂場所	70202	7
體育場所	70203	7
礦場	80101	6
礦業相關設施	80102	6
土石採取場	80201	6
土石相關設施	80202	6
鹽田	80301	6
鹽業相關設施	80302	6
軍事用地	90100	7
溼地	90200	6
草生地	90300	3
灘地	90401	6
崩塌地	90402	6
礁岩	90403	6
裸露空地	90404	6
灌木荒地	90500	4
災害地	90600	6
營建剩餘土石方	90700	6
未使用地	90801	6
人工改變中土地	90802	6
測量標	90803	7

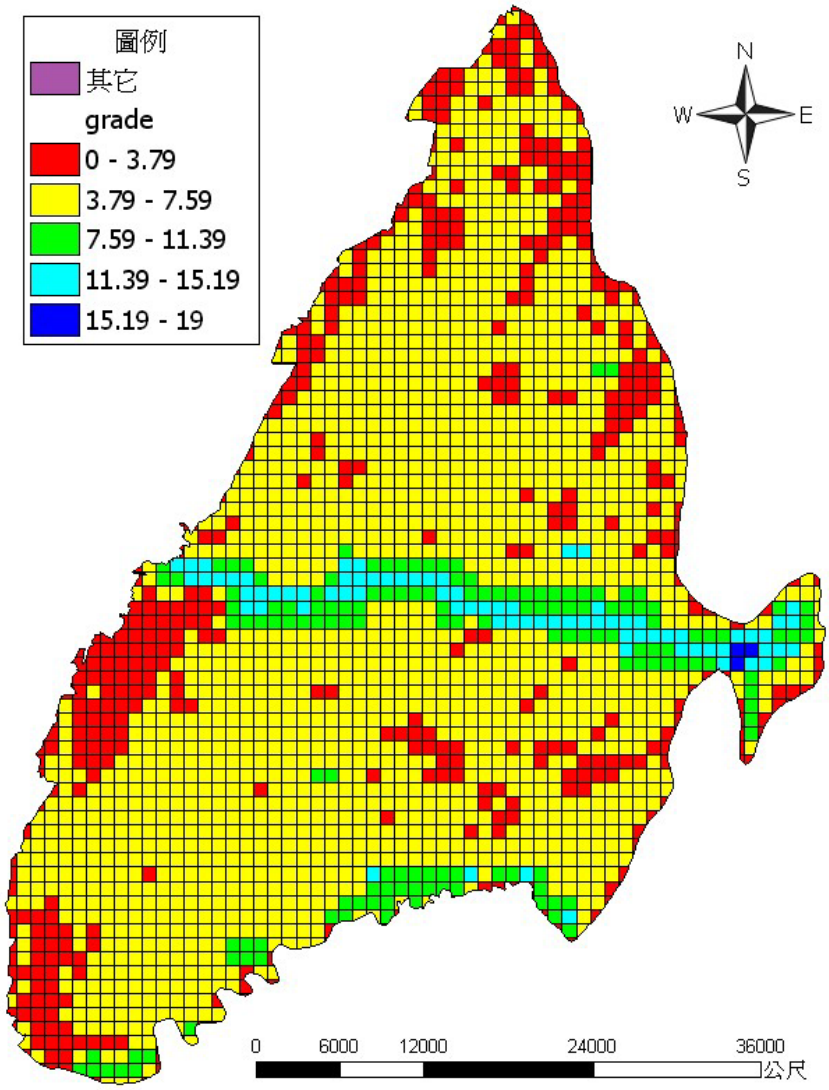


圖 4.2-2、加權後土地利用潛勢分數分布圖

4.2.2 表層土壤種類

圖 4.2-3 是表層 0~150cm 土壤經網格切割後依照各種土壤根據表 4.2-4 給予四種深度分層土壤種類分數再將四層分數平均，接著依該土壤種類分類所佔網格面積比例加權計算各網格分數，再搭配表 4.2-1 以補注潛勢因子間權重加權計算所得之表層土壤種類補注潛勢分數分布圖，對照圖 4.1-4 可看出粒徑較大的土壤分布區域其潛勢分數較高；反之，粒徑較小的土壤分布區域其潛勢分數較低。本計劃僅考慮表層土壤對入滲的影響，故無法像較深層之土壤分布可以看出地下水儲存之區域。表 4.2-4 為本計畫之分類代碼與原始圖層分類之對照，其中因為原始圖層在濁水溪流域無土壤資料，導致分數過低，經評估後決定將該區域直接給定最高分。

表 4.2-4、表層土壤種類計劃分類表

分類代碼	原始分類	細項
1	粗砂土	粗砂土，砂土
2	細砂土	細砂土，壤質粗砂土，壤質砂土
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
4	極細砂土	極細砂土，壤質極細砂土，極細砂質壤土
5	坋土	坋土，坋質壤土
6	壤土	壤土
7	砂質粘壤土	砂質粘壤土
8	粘壤土	粘壤土，坋質粘壤土
9	坋質粘土	坋質粘土
10	粘土	粘土
11	石礫	石礫

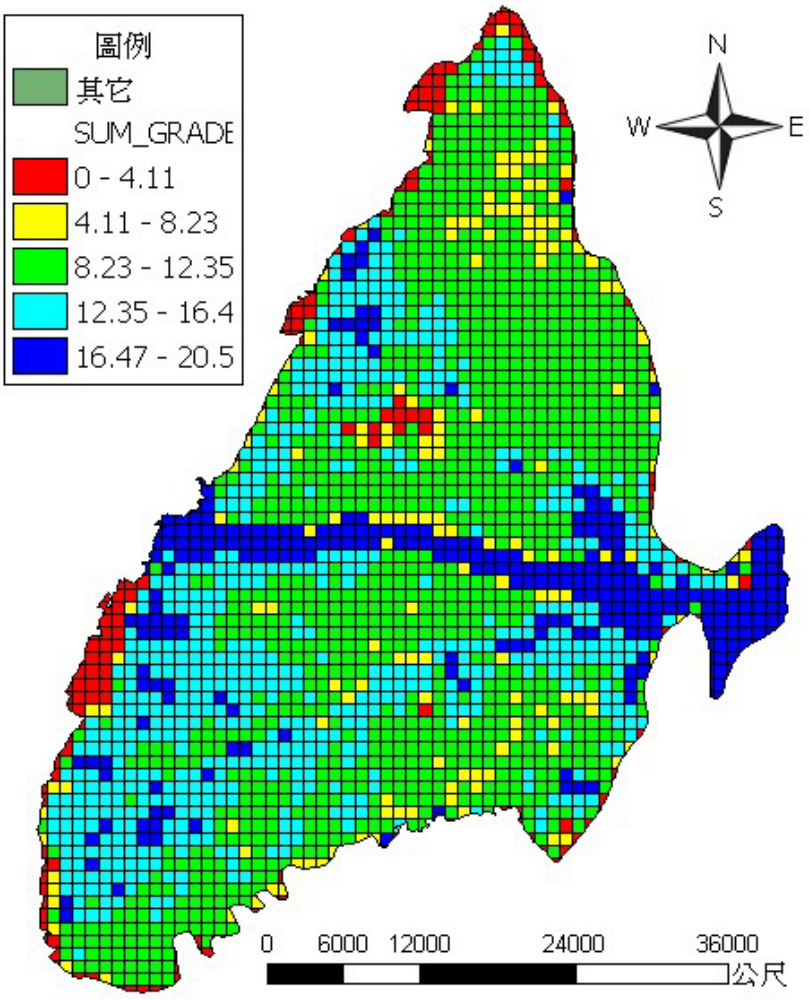


圖 4.2-3、加權後表層土壤種類潛勢分數分布圖

4.2.3 降雨與地下水位變化相關性

圖 4.2-4 是以 Surfer 內建距離倒數平方(Inverse Distance to a Power)內插出 1 公里見方網格中心座標之相關性值，再以 SuperGIS 將其值對應到網格內，依照表 4.2-2 分類給分後，再搭配表 4.2-1 以補注潛勢因子間權重加權計算所得的降雨與地下水位變化相關性潛勢分數分布圖。

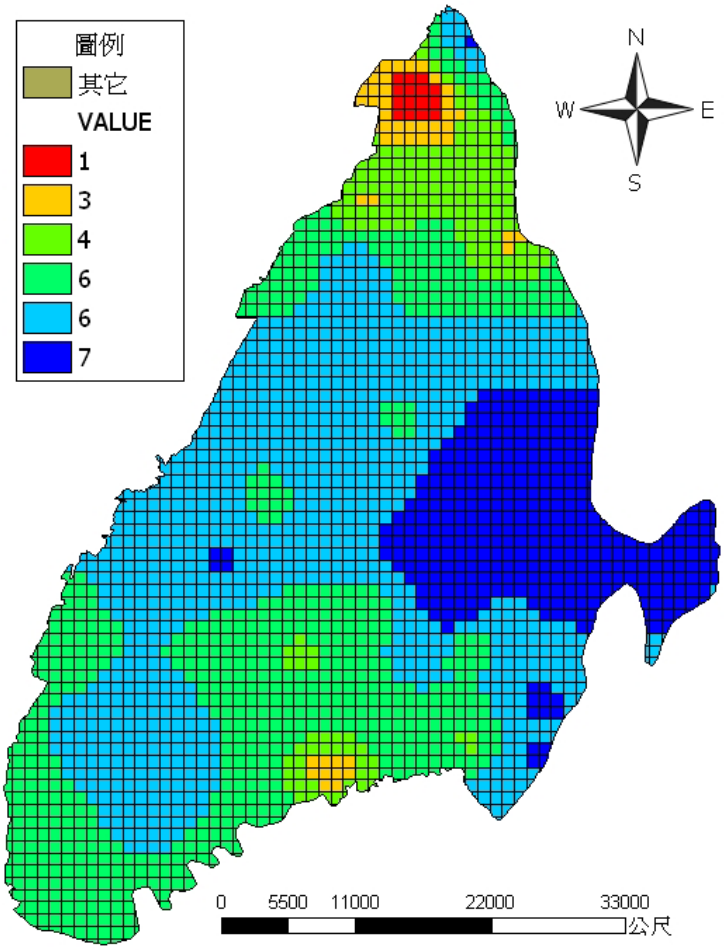


圖 4.2-4、加權後降雨與地下水位變化相關性潛勢分數分布圖

4.2.4 平均年降雨量

圖 4.2-5 是以 Surfer 距離倒數平方(Inverse Distance to a Power)內插出 1 公里見方網格中心座標之 1993~2008 年平均雨量值後，再以 SuperGIS 將其值對應到網格內，依照表 4.2-2 分類給分後，再搭配表 4.2-1 以補注潛勢因子間權重加權計算所得的平均年降雨量潛勢分數分布圖。由圖 4.1-8 之平均年降雨量等值圖可知靠近扇頂海拔較高處雨量豐沛，降雨量由東往西遞減，因此本因子影響地下水補注潛勢之分數亦是由東往西遞減。

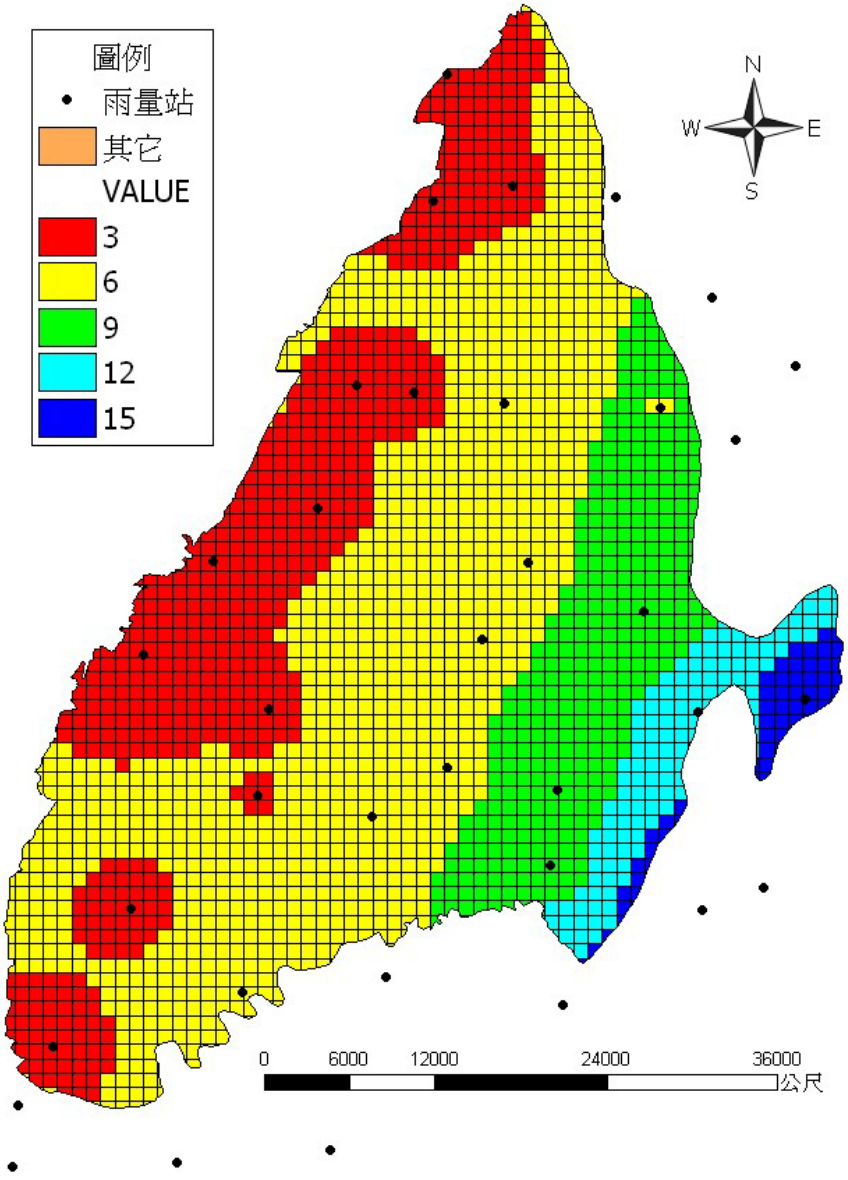


圖 4.2-5、1993~2008 年加權後平均年降雨量潛勢分數分布圖

4.2.5 單位蓄水量變化

圖 4.2-6 是以 Surfer 內建距離倒數平方法(Inverse Distance to a Power) 將點位之單位蓄水量變化資料內插出 1 公里見方網格中心座標，再以 SuperGIS 將其值對應到網格內，依照表 4.2-2 分類給分後，再搭配表 4.2-1 以補注潛勢因子間權重加權計算所得的單位蓄水量變化潛勢分數分布圖。配合圖 4.1-11 即可發現右下角靠近斗六丘陵處降雨量大且降雨與地下水位變化相關性高，因此蓄水量變化較大。

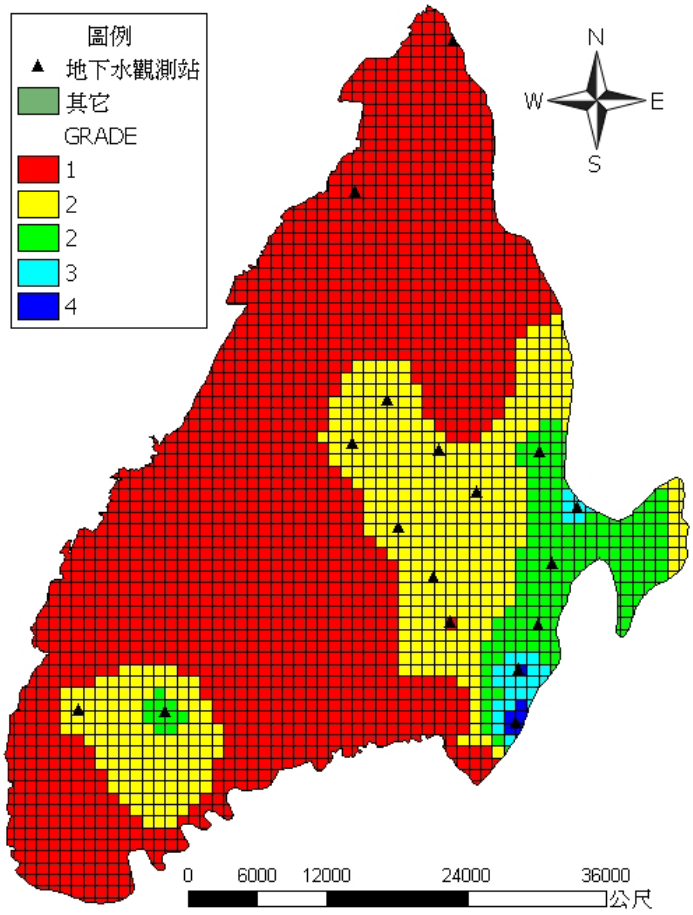


圖 4.2-6、加權後單位蓄水量變化潛勢分數分布圖

4.2.6 透水係數

圖 4.2-7 是以 Surfer 距離倒數平方(Inverse Distance to a Power)內插出 1 公里見方網格中心座標之含水層一(F1)透水係數後，再以 SuperGIS 將其值對應到網格內，依照表 4.2-2 分類給分後，再搭配表 4.2-1 以補注潛勢因子間權重加權計算所得的透水係數潛勢分數分布圖。由圖 4.2-7 可知扇頂區域之透水係數相對較大。

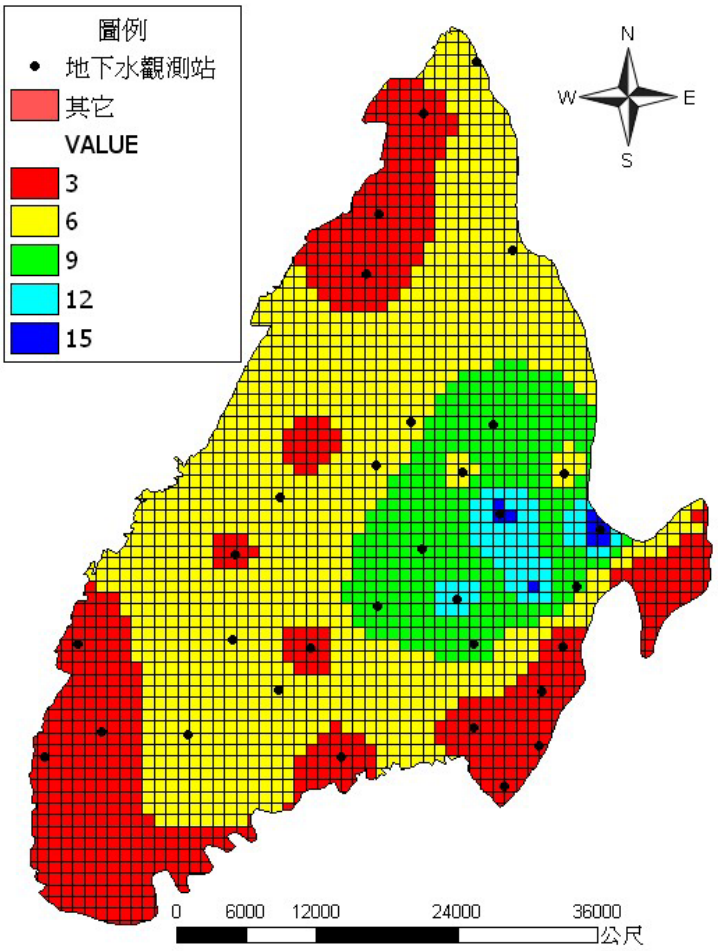


圖 4.2-7、濁水溪沖積扇含水層一加權後透水係數潛勢分數分布圖

4.2.7 河系密度

圖 4.2-8 是以 SuperGIS 計算每個網格內河川分布之面積百分比，依照表 4.2-2 分類給分，再搭配表 4.2-1 以補注潛勢因子間權重加權計算所得的河系密度潛勢分數分布圖。由圖中可看出少部份網格分數較高，此乃這些網格內河川面積佔網格本身面積將近 50%以上的結果。而其他溪流的面積相對於一公里見方的網格面積比例太小，因此即使某些網格上有河川經過，仍給予較低之分數。

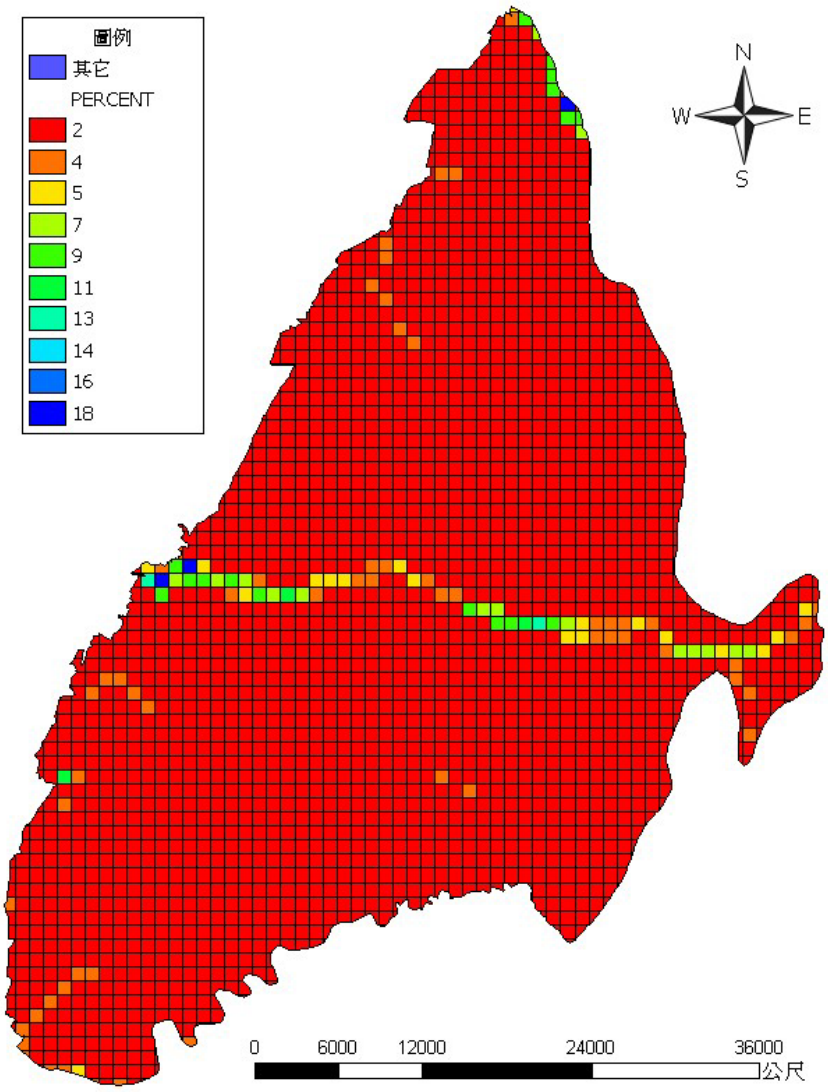


圖 4.2-8、加權後河系密度潛勢分數分布圖

4.2.8 硝酸鹽濃度

在 4.1 節提到本計畫期中報告時，曾將「硝酸鹽濃度」因子納入考量，但經詳細分析與檢討後，發現該因子為補注量之果而非因，其補注潛勢分數可作為與補注潛勢評估結果對照之用，比如當某區域補注潛勢大時，若該區域為農田，則硝酸鹽濃度應偏高，因此其分數圖層將與最後補注潛勢分數圖層作為對照比較之用。本小節將針對硝酸鹽濃度做資料的處理說明以及分數圖層處理介紹。

雨水中之硝酸態氮（$NO3^{-}$-N）一般在 0.2 mg / l 以下，未受污染之地面水常在 1.0 mg / l 以下（Mc Neely et al., 1979）。由於氮肥及人畜排泄物污染土壤和地面水，可使補注區地下水之硝酸態氮濃度遠高於 1.0 mg / l ；地下水往深處或下游滲流，因阻水層封閉及微生物作用下，硝酸態氮與水中溶氧幾乎同步被還原而迅速耗盡，基於上述特性，硝酸態氮可為地下水污染及補注區之指標，高濃度之區域為被污染區，也是地下水快速補注區（江崇榮等，2002）。

本計畫選用之硝酸鹽($NO3^{-}$)濃度是取自陳文福教授與經濟部水利署水文資訊系統提供之水質資料，共 69 站，資料蒐集期距自 1997 至 2009 年。由於水質檢測有各種檢測方法，每個檢測方法都有其可檢測到最低精度，例如 0.01 mg/L、0.001 mg/L 等。假設一檢測方法最低精度到 0.01 mg/L，當檢測水樣中所欲檢測之物體濃度小於 0.01 mg/L，此時該檢測法檢驗不出來，又無法確認其濃度為 0，標記為 N.D.，本計畫未將 N.D.資料列入計算。在圖層製作上，本計劃以 1 公里見方之格網對濁水溪沖積扇進行空間切割，將各點之平均硝酸鹽濃度資料利用距離倒數平方(Inverse Distance to a Power)內插到各網格。其硝酸鹽濃度等值圖如圖 4.2-9 所示，於扇頂有較高之硝酸鹽濃度，其趨勢與平均年降雨量一致由扇頂向扇尾遞減。

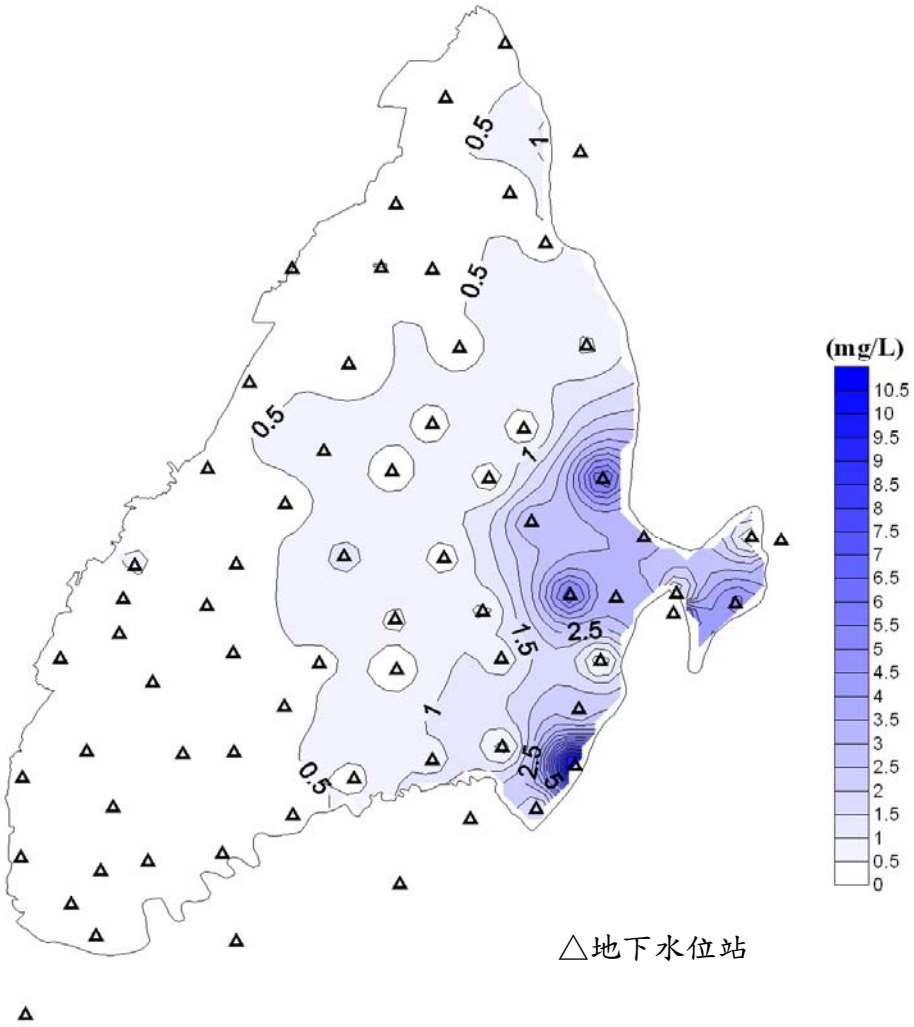


圖 4.2-9、1997~2009 年硝酸鹽平均濃度等值線圖(mg/L)

4.3 地下水主要補注區初步劃分

在前述 4.2 節完成濁水溪沖積扇各補注潛勢因子之分數計算後，將各因子分數分別根據因子間權重百分比加權相加，即可得到整個區域內各個網格之補注潛勢分數，再搭配表 4.3-1 對各網格進行補注潛勢分級，分級成果如圖 4.3-1 所示。將圖 4.3-1 套疊鄉鎮邊界圖後，由圖 4.3-2 可看出 50 分以上中高補注潛勢分布的鄉鎮有彰化縣的二水鄉、溪州鄉、和雲林縣的莿桐鄉、林內以及南投縣的竹山鎮、名間鄉等地區。

本計劃將 40 分以上的網格劃分出來，即可概略推估補注區界線。圖 4.3-3 為 40 分以上補注區界線與 3.4 節地電阻剖面研判之補注區界線(圖 3.4-26)對比圖，白色虛線為原地電阻測深法及觀測井資料

所推測之補注區界線，黃色帶狀虛線為本計劃地電阻剖面方法研判之補注區界線範圍。圖 4.3-3 中本計劃所得 40 分以上之補注區界線和白色虛線補注區界線相當接近，若與黃色帶狀邊界範圍對比，則差異較大處在上部邊界。

表 4.3-1、地下水補注潛勢分數分級表

地下水補注潛勢分數	分級
大於 80	很高(very high)
介於 70 到 80 之間	高(high)
介於 60 到 70 之間	中高(high moderate)
介於 50 到 60 之間	中(moderate)
介於 40 到 50 之間	中低(low moderate)
介於 30 到 40 之間	低(low)
小於 30	很低(very low)

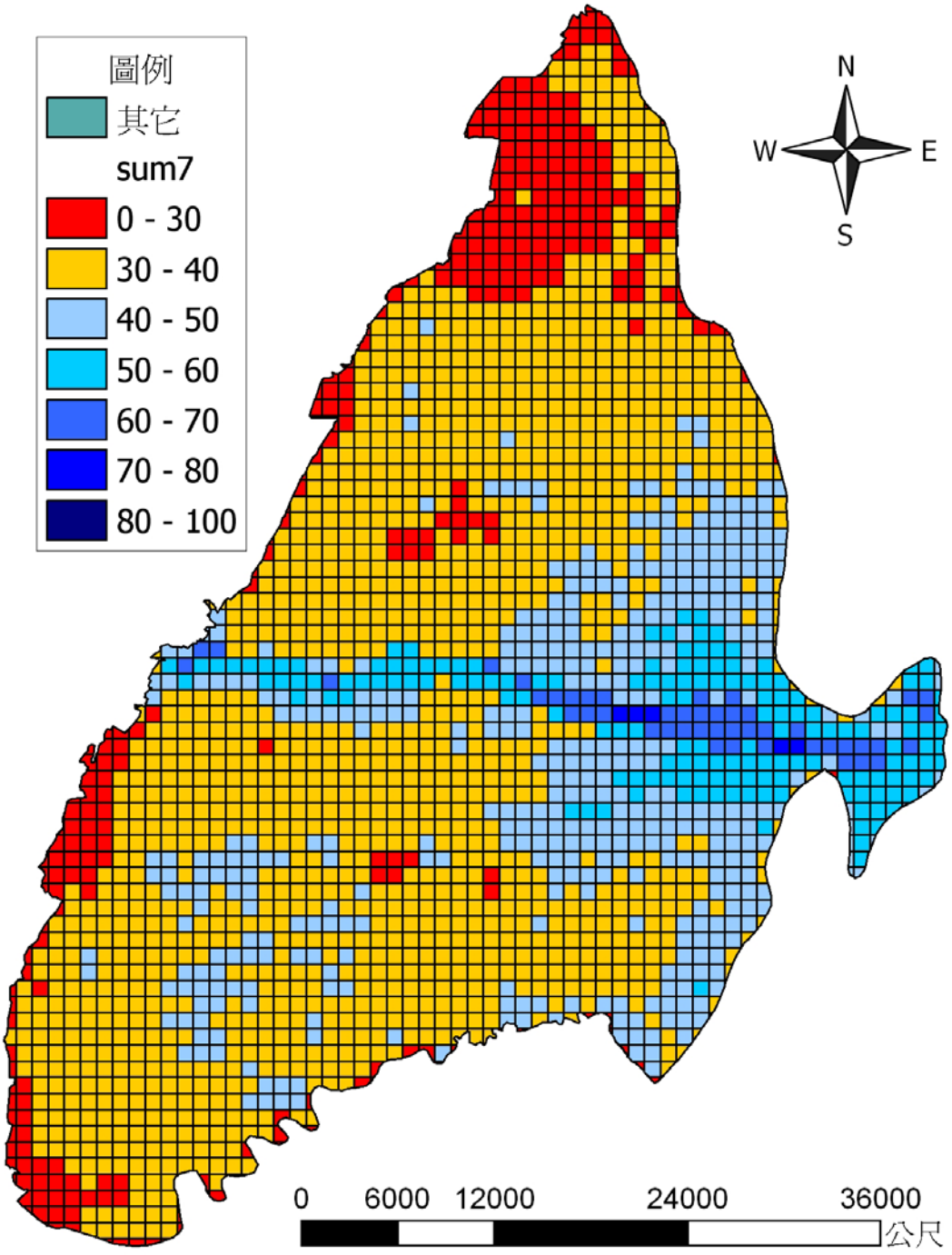


圖 4.3-1、地下水補注區初步劃分

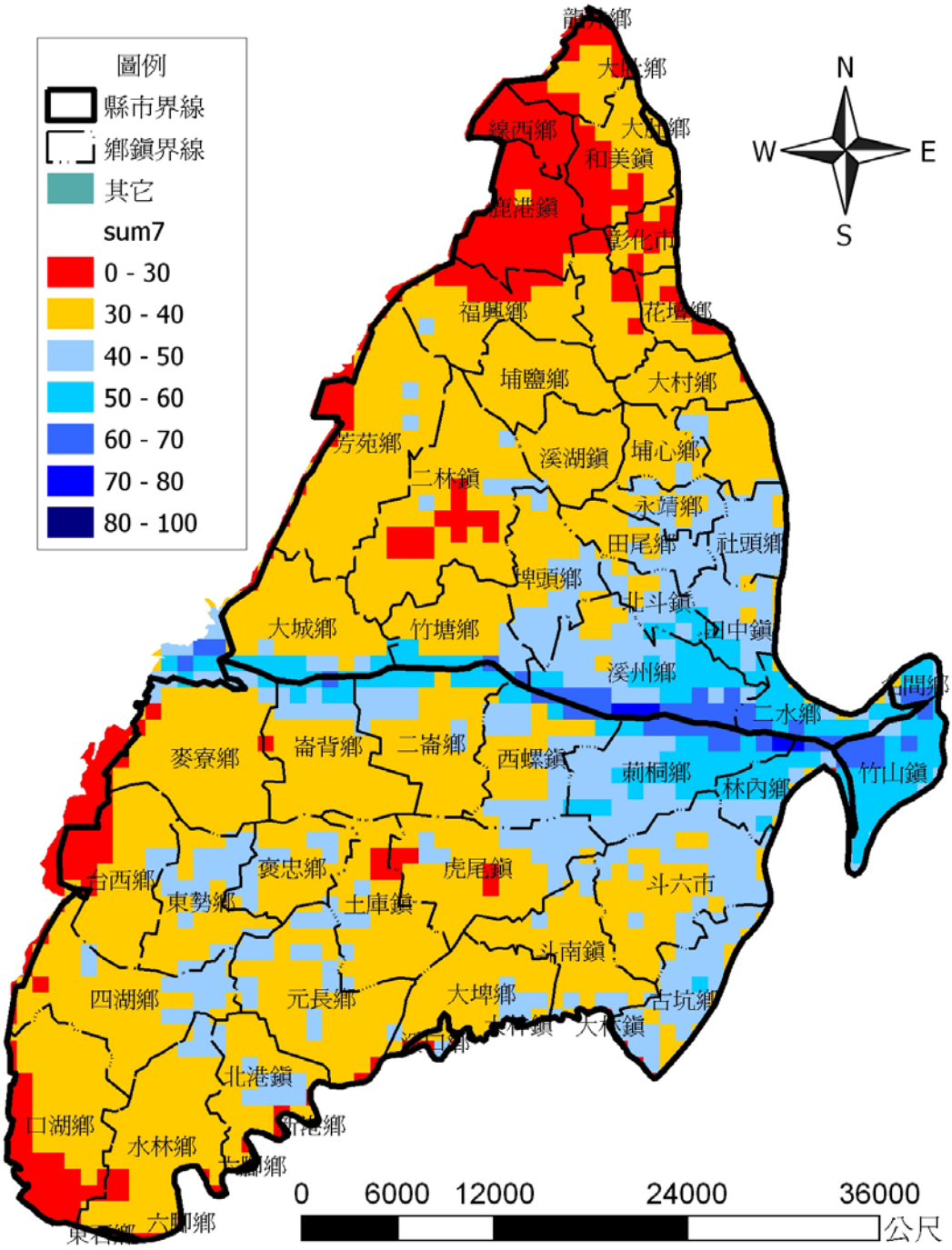


圖 4.3-2、地下水補注區初步劃分以及鄉鎮邊界

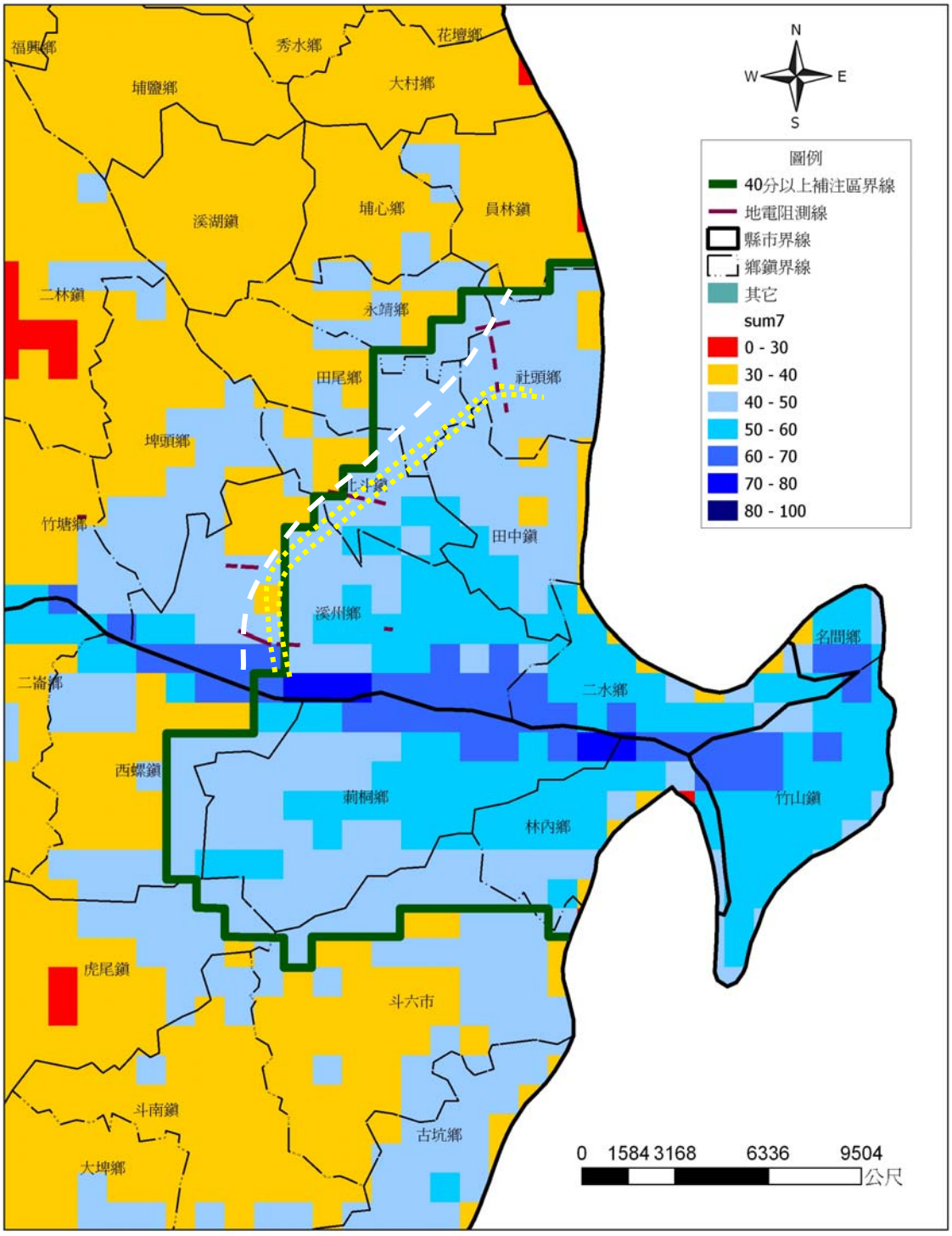


圖 4.3-3、40 分以上補注區界線與地電阻剖面研判之界線對比圖

第五章 地下水位歷線法(及修正型式)模式

5.1 地下水位歷線法理論介紹

江崇榮(2006)等人提出以地下水位歷線變動與地下水層儲水係數，直接進行抽水量、補注量、蓄水變化量和流失量之評估，該方法曾應用於屏東平原之地下水補注量推估，應用水位歷線法可以有效應用地下水觀測網累積多年之成果。圖 5.1-1 為地下水位歷線法之計算流程圖，其流程主要可以分為五個步驟，首先利用水位歷線配合土壤儲水係數或比流出率計算系統之儲蓄水量歷線，其次利用枯水期之儲蓄水量變化推估平均抽水量，接著應用降雨後之水位變化方式決定系統流出量，再來是以年初年末儲蓄水量決定年度變化量，最後則是以連續方程式推估年補注量。以下將進一步詳細說明：

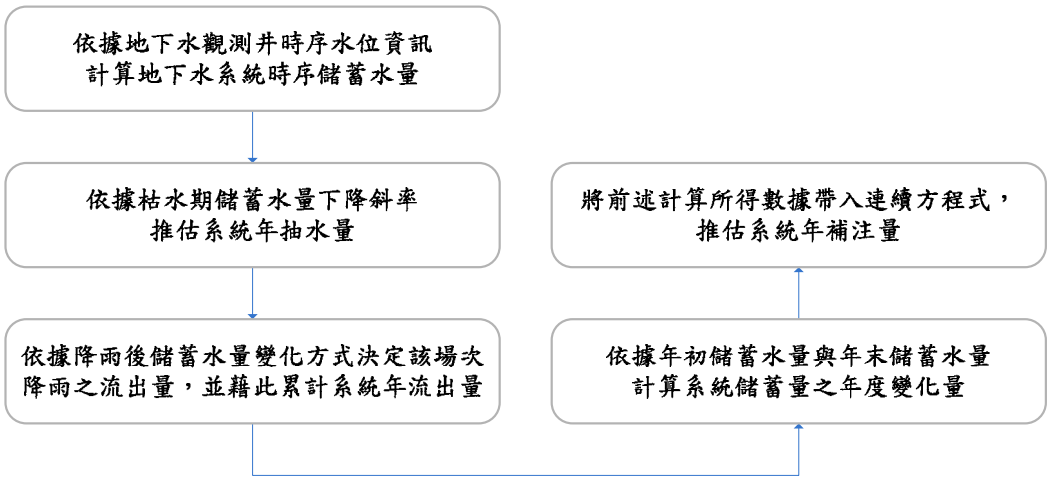


圖 5.1-1、地下水水位歷線法計算流程圖

地下水層平時受到抽水與補注之影響，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(如圖 5.1-2 所示)，因此可藉由水位歷線與降雨歷線之關係，估算系統平均抽水量與入滲補注量。圖 5.1-3 為表層水層之概念模型示意圖，其中影響水位變化的項目包含抽水量、補注量、側向交換量與其他垂向交換量。地下水位歷線與降雨歷線由觀測水井與雨量站長期觀測儲存，然其在研究區域上為點位型式分佈，若欲將點位型式之資料涵蓋至整個研究區域，常

見處理方法是透過徐昇氏多邊形或擬徐昇氏多邊形之矩形網格來劃分各觀測水井與雨量站之代表範圍(如圖 5.1-4 所示)。徐昇氏多邊形最重要的特性為徐昇氏多邊形中任意點必與其對應之觀測水井或雨量站最接近。

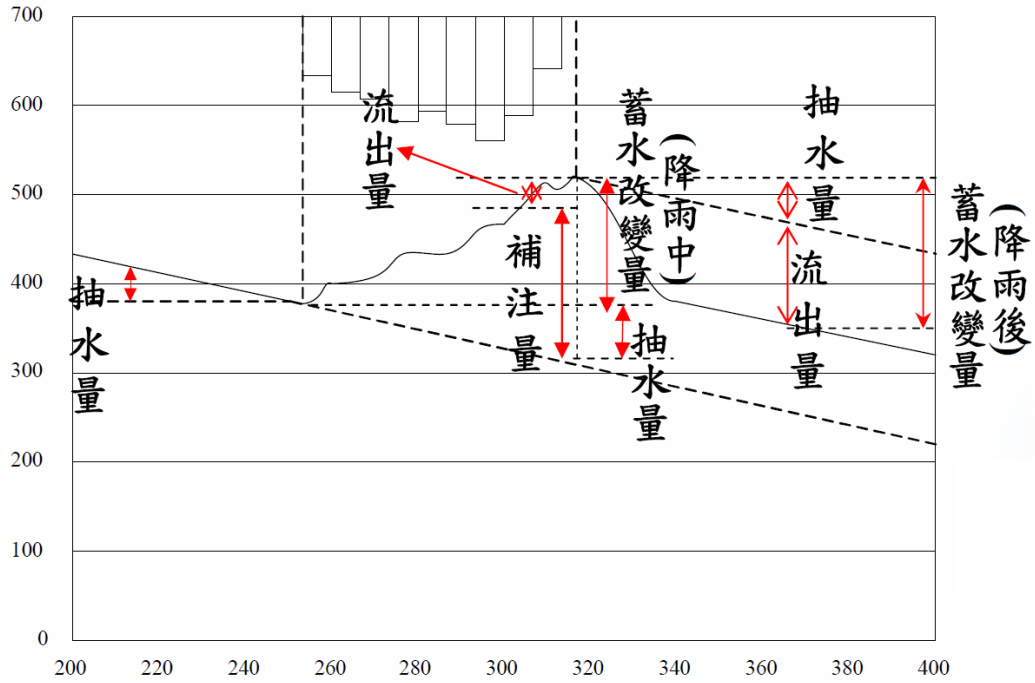


圖 5.1-2、區域降雨歷線與地下水位歷線起伏變化示意圖

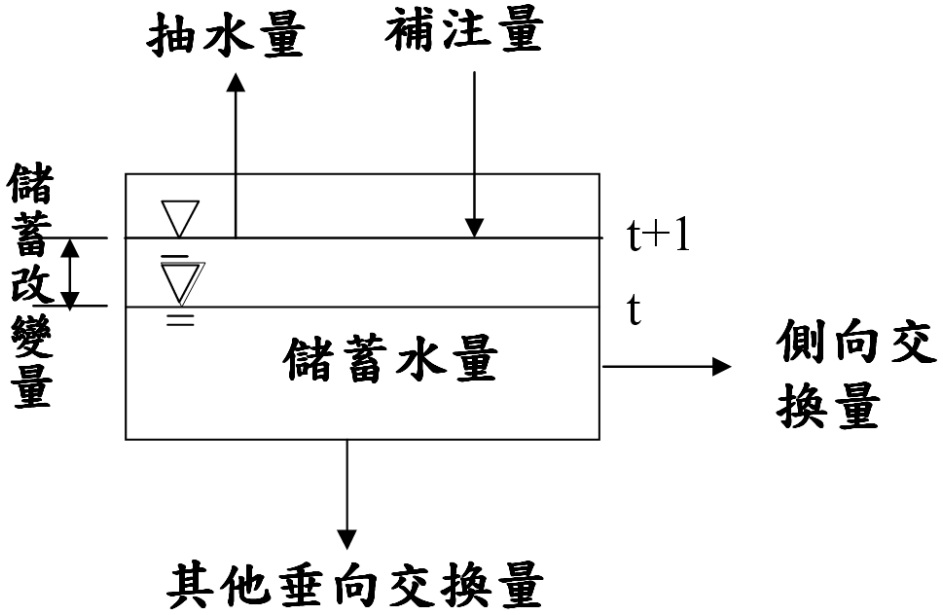


圖 5.1-3、表層水層之概念模型示意圖

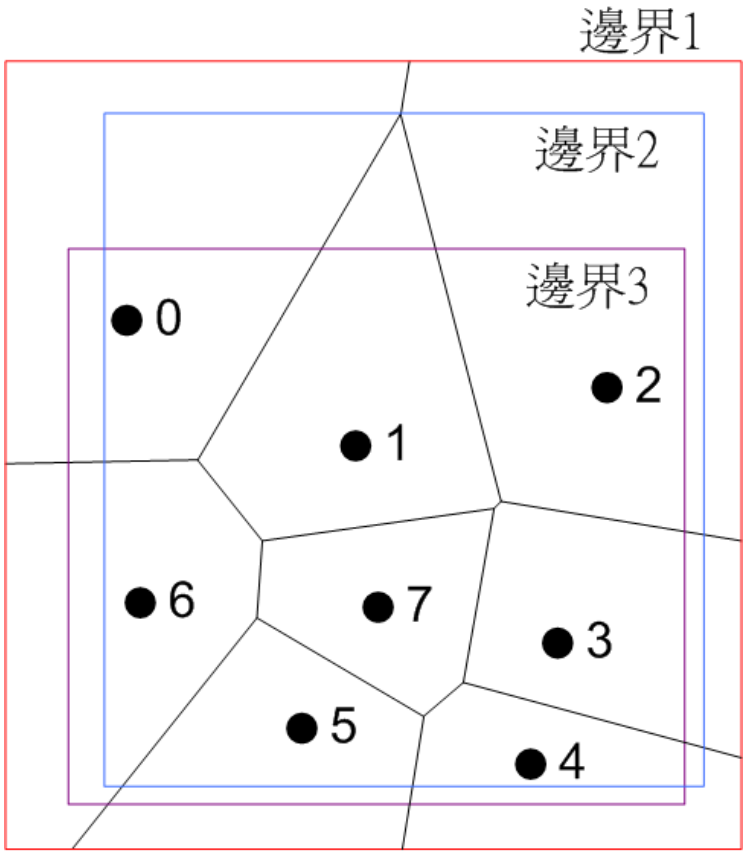


圖 5.1-4、徐昇氏多邊形

降雨行為使得地下水層蓄水量增加，地下水位亦隨之上升；然而地下水位之上升，並不全然代表地下水補注事件，潮汐、地潮、氣壓、地震及停止抽水等，均可造成地下水位之上升或減緩下降。因此，本方法將採用平均日水位進行計算，可以消除潮汐或地潮等引發之短週期水位起伏。基於此一原因，河川流量與降雨資料亦同時採用日平均資料。

觀察台灣地區降雨資料，可以發現從十一月起至次年四月間多為少雨之乾季，尤其以南部地區最為明顯；從各地下水區地下水觀測資料顯示，在乾季期間，地下水位歷線以趨近直線的方式下降，以屏東地區之建興觀測井為例(如圖 5.1-5 所示)，綜觀 88、89、90 三年，其地下水位退水線之斜率極為相近，直至雨季期間地下水位方止跌回升。

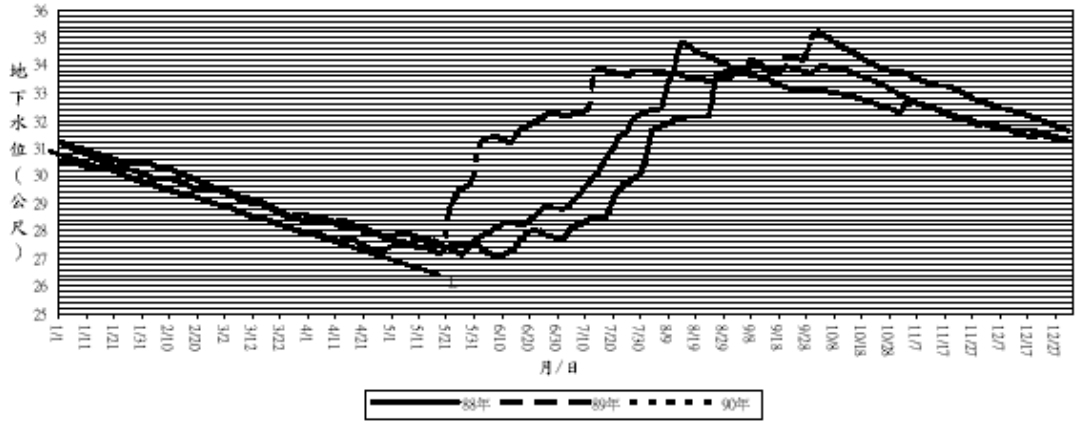


圖 5.1-5、建興站地下水層一(F1)88、89、90 年水位歷線和乾季退水線表

$$S_i^t - S_i^{t-1} = I_i^{t,t-1} - O_i^{t,t-1} - W_i^{t,t-1} \quad \text{.....(式 5.1-1)}$$

式中

S_i^t：代表於時刻 t 於第 i 口水井蘊藏之地下水蘊藏量(L^3)

$I_i^{t,t-1}$：代表於時刻 t 與 t-1 間的垂向地下水補注量(L^3)

$W_i^{t,t-1}$：代表於時刻 t 與 t-1 間的地下水抽水量(L^3)

$O_i^{t,t-1}$：代表於時刻 t 與 t-1 間的地下水流出量(L^3)。

$$S_i^t = s_i A_i \left(h_i^t - b_i\right) \quad \text{.....(式 5.1-2)}$$

s_i：若第 i 口觀測井位於非受壓含水層，代表該位置之比流出率；若第 i 口觀測井位於受壓含水層，代表該位置之儲水係數。

h_i^t：第 i 口觀測井位於 t 時刻之水位。

b_i：第 i 口觀測井之含水層底部高程。

A_i：第 i 口觀測井位代表範圍之面積，可利用徐昇氏多邊形劃分代表範圍。

式 5.1-1 為地下水系統之水平衡方程式，地下水蘊藏之改變量應等於地下水補注量、抽水量與流出量之綜合效應。式 5.1-2 為地下水蘊藏量估算公式，其為區域內地下水位、代表面積與儲水係數或比流出率之乘積。如搭配圖 5.1-3 之水平衡關係，式中之流出量($O_i^{t,t-1}$)即代表側向交換量與其他垂向交換量之和。

本方法以枯水期之退水曲線推估系統之單日平均抽水量，由於枯水期長期沒有下雨，因此可假設該段時期表層土壤並無多餘水源可供

垂向補注或山邊側流量補注，因此式中的地下水補注量($I_i^{t,t-1}$)假設為零。

此外，由於長期無補注行為，且地下水位極低，因此亦無出滲之狀態，故式 5.1-1 中之地下水流出量($O_i^{t,t-1}$)亦可假設為零。因此原始地下水收支平衡式(式 5.1-1)可進一步簡化為式 5.1-3。因此，藉由枯水期之水位歷線變化可全然視為抽水造成之影響，前後兩時刻之地下水儲蓄差值，即可代表該時段之地下水抽水量。

$$S_i^t - S_i^{t-1} = -W_i^{t,t-1} \quad \text{.....(式 5.1-3)}$$

如果以單日作為時刻長度，因此計算前後兩日的蓄水儲蓄量差值，即代表當日之抽水量。在此首先計算枯水期各日之抽水量，可以取得一個枯水期抽水量的數列。其次，計算該數列之平均值(如式 5.1-4 所示)，以此平均值作為系統全年之平均抽水量，該數值之含意亦為枯水期間的蓄水儲蓄量退水斜率。不局限於枯水期，可將此平均抽水量擴張應用於豐水期間。

$$\overline{W_i} = \frac{\sum_{t=1}^{N} W_i^{t,t-1}}{N-1} \quad \text{.....(式 5.1-4)}$$

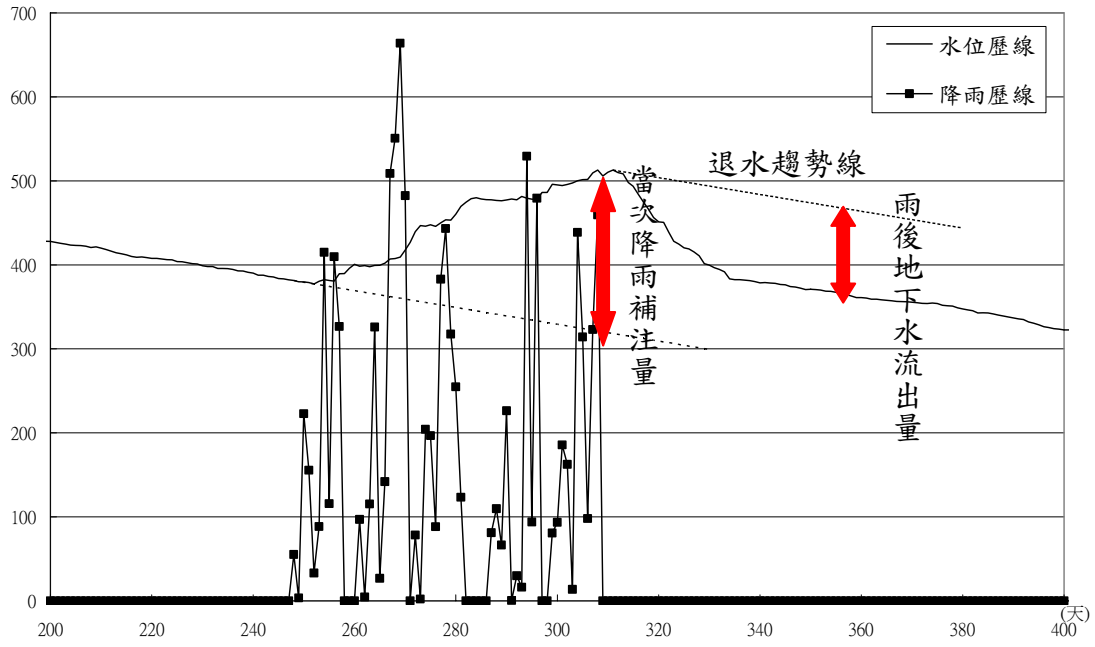


圖 5.1-6、降雨事件、補注量與流失量關係示意圖

如欲利用長期的日水位資料與日降雨資料，結合水位歷線法估算各日補注量，可依據下列方式估算。首先，利用日降雨資料擷取出各降雨事件之發生時段，將所有時刻分成降雨期間、降雨後數天內與非降雨期間三種情況。其次，不同降雨時段，以不同方式分別估算補注量、流出量與抽水量三者。以抽水量而言，在降雨後數天內與非降雨期間之單日抽水量可直接以前述之平均抽水量($\overline{W_i}$)給定，但在降雨期間部分需水量可能直接以降雨量直接滿足，因此降低抽水比例，因此在降雨期間的抽水比例(C_r)應在 0%至 100%之間，其數值可由最後之模擬結果進一步檢定。

$$W_i^{t,t-1}=\begin{cases} C_r\overline{W_i} & raining \\ \overline{W_i} & dry \end{cases} \quad \text{.....(式 5.1-5)}$$

在補注量與流出量方面，由於單日抽水量與該日儲蓄改變量均已決定，故可將方程式改寫如式 5.1-6，已知數置放於等號右方，而等號左方則為未知的單日補注量與單日流出量。在降雨期間(如圖 5.1-6 所示)，地下水儲蓄量會隨降雨事件之發生而持續上漲，在此假設該段期間之反應皆是因為補注量之影響，故降雨期間的單日補注量與單日流出量可分別由式 5.1-7 與 5.1-8 估算。

$$I_i^{t,t-1}-O_i^{t,t-1}=S_i^t-S_i^{t-1}+W_i^{t,t-1} \quad \text{.....(式 5.1-6)}$$

$$I_i^{t,t-1}=S_i^t-S_i^{t-1}+W_i^{t,t-1} \quad \text{.....(式 5.1-7)}$$

$$O_i^{t,t-1}=0 \quad \text{.....(式 5.1-8)}$$

在降雨後數天內，觀察水位反應行為，部分場次之水位並未在雨停後即時下降，仍有少許上升情形，顯示雨後數天內仍有補注產生。因此，本研究則依據式 5.1-7 估算，如等號右方項次大於零，則將數值歸於補注部分，反之則歸於流出部分(如式 5.1-9 與 5.1-10 所示)。

$$I_i^{t,t-1}=\begin{cases} S_i^t-S_i^{t-1}+W_i^{t,t-1} & if \quad S_i^t-S_i^{t-1}+W_i^{t,t-1}>0 \\ 0 & if \quad S_i^t-S_i^{t-1}+W_i^{t,t-1}<0 \end{cases} \quad \text{.....(式 5.1-9)}$$

$$O_i^{t,t-1}=\begin{cases} 0 & if \quad S_i^t-S_i^{t-1}+W_i^{t,t-1}>0 \\ -\left(S_i^t-S_i^{t-1}+W_i^{t,t-1}\right) & if \quad S_i^t-S_i^{t-1}+W_i^{t,t-1}<0 \end{cases} \quad \text{.....(式 5.1-10)}$$

在非降雨期間，如水位與儲蓄水量有其他異常之升高或降低，由於並無明顯之補注源，因此直接將此改變量歸於流出量部分。

$$O_i^{t,t-1}=-\left(S_i^t-S_i^{t-1}+W_i^{t,t-1}\right) \quad \text{.....(式 5.1-11)}$$

由於如欲以年度為單位，估算特定年度之補注量等相關分析，則可依據前述所得之單日補注量、流出量與抽水量，進行累加即可求得年抽水量、年補注量與年流出量。同理，如欲計算以場次為單位之水平衡分析，亦可以相同之方式進行累加計算。前述估算方式均是以各地下水觀測站為主體，所得之補注量、抽水量與流出量僅代表該站之資訊。如欲評估整體系統之各項數據，則可在將各站資訊累加，即代表全區之補注量、抽水量與流出量。

另外，對於如僅欲求得全區之補注量，亦可預先將各站之水位歷線資訊，轉換並累加成全區之儲蓄水量(如式 5.1-12 所示)，其次再直接以全區之儲蓄水量計算各時刻之補注量、抽水量與流出量等資訊。比較前述之逐站計算方式與全區統一計算方式，逐站計算方式除了可以求得全區之資訊外，仍可明確得到各站之空間分佈。逐站計算方式因為直接以各站之儲蓄水量進行計算，因此對於各站水位或儲蓄水量歷線要求較高，各站水位歷線必須能明確找出枯水期之退水曲線。

$$S^t = \sum_{i=1}^{N} s_i A_i \left(h_i^t - b_i \right) \quad \text{(式 5.1-12)}$$

影響補注量推估之精確程度，多在於地下水位歷線與雨量歷線資料之收集，目前台灣地區之雨量站分佈涵蓋全台，其分佈稠密度已足夠提供補注量之估算；然而地下水觀測資料，則有賴地下水觀測井網方足以提供，台灣地區僅濁水溪沖積扇、屏東平原與蘭陽平原等地區能提供足夠之觀測密度，因此對於全台補注量之推估上則有不足。

5.2 修正型地下水位歷線法理論介紹

前述章節已經提及地下水位歷線法之基礎理論與概念，其以各地下水觀測井資訊作為系統地下水儲蓄量之推估依據，藉由豐枯水期與降雨後之不同水位變化特性，藉此推估系統抽水量、補注量與流出量三者。也提及計算上可分為逐站計算與全區統一計算兩種方式，如欲以逐站計算方式計算特定水區之補注量與抽水量等，前述計算方式是以該站地下水儲蓄量進行計算，其變化同時受到側向交換量之影響，因此前述計算之流出量即為側向交換量與其他垂向交換量之綜合影響。

本章節將提出修正型地下水水位歷線法，側向交換量則以達西公式估算，藉以釐清其數值。地下水位歷線法需配合徐昇氏多邊形定義地下水觀測井之代表範圍，由於徐昇氏多邊形之特性，相鄰兩觀測井

之連線必與多邊形邊線垂直，因此搭配達西公式(Darcy's Law)估算穿越邊線之穿越水量，式 5.2-1a 與 5.2-1b 為加入達西定律之連續方程式，其為顯示法型式之連續方程式。其中，式 5.2-1a 適用於非受壓含水層，穿越厚度為水位高程與含水層底床高程之差值，而式 5.2-1b 則適用於受壓含水層，其穿越厚度直接以含水層厚度計算。

$$S_i^t - S_i^{t-1} = \sum_{j=1}^{M}\left(-K_{ij}\frac{h_j^t - h_i^t}{l_{ij}}L_{ij}\left(\overline{h_{ij}^t} - \overline{b_{ij}}\right)\right) + I_i^{t,t-1} - V_i^{t,t-1} - W_i^{t,t-1} \quad \text{.....(式 5.2-1a)}$$

$$S_i^t - S_i^{t-1} = \sum_{j=1}^{M}\left(-K_{ij}\frac{h_j^t - h_i^t}{l_{ij}}L_{ij}\overline{B}_{ij}\right) + I_i^{t,t-1} - V_i^{t,t-1} - W_i^{t,t-1} \quad \text{.....(式 5.2-1b)}$$

式中

S_i^t：代表於時刻 t 於第 i 口水井蘊藏之地下水蘊藏量(L^3)

$I_i^{t,t-1}$：代表於時刻 t 與 t-1 間的垂向地下水補注量(L^3)

$W_i^{t,t-1}$：代表於時刻 t 與 t-1 間的地下水抽水量(L^3)

$V_i^{t,t-1}$：代表於時刻 t 與 t-1 間的其他垂向交換量。

K_{ij}：代表第 i 區塊與第 j 區塊之等效透水係數

h_i^t：代表第 i 觀測井於時刻 t 之水位

l_{ij}：代表第 i 觀測井與第 j 觀測井之距離

L_{ij}：代表第 i 區塊與第 j 區塊之邊線長度

$\overline{h_{ij}^t}$：第 i 區塊與第 j 區塊之平均水位

$\overline{b_{ij}}$：第 i 區塊與第 j 區塊之含水層平均底床高程

$\overline{B_{ij}}$：第 i 區塊與第 j 區塊之平均含水層厚度

在修正型之估算上，首先仍需由枯水期之退水曲線，進行平均抽水量之估算，在此假設枯水期因長期無降雨，因此並不存在補注量與其他垂向交換量等。此外，在側向交換量上，各站枯水期水位並不一致，依據水往低處流之特性，顯示枯水期中各站與相鄰站間存在側向之交換，從式 5.2-1a 與 5.2-1b 所示，平均抽水量可藉由儲蓄改變量扣除側向交換量後計算之。

在單日抽水量、補注量與流出量之估算上，在抽水量之估算上沿用前述之方式給定。而在補注量與流出量之估算公式，因為側向交換量之加入，應由式 5.1-5 修改為式 5.2-2a 或 5.2-2b，並依據不同之降雨情境來估算補注量與流出量。

$$I_i^{t,t-1} - V_i^{t,t-1} = S_i^t - S_i^{t-1} - \sum_{j=1}^{M}\left(-K_{ij}\frac{h_j^t - h_i^t}{l_{ij}} L_{ij}\left(\overline{h_{ij}^t} - \overline{b_{ij}}\right)\right) + W_i^{t,t-1} \text{.....(式 5.2-2a)}$$

$$I_i^{t,t-1} - V_i^{t,t-1} = S_i^t - S_i^{t-1} - \sum_{j=1}^{M}\left(-K_{ij}\frac{h_j^t - h_i^t}{l_{ij}} L_{ij}\overline{B}_{ij}\right) + W_i^{t,t-1} \text{ .....(式 5.2-2b)}$$

5.3 電腦程式開發

本節在此說明「地下水位歷線法」與「修正型地下水位歷線法」之程式開發，5.3.1 小節將說明兩者的輸入資料與輸出資料。5.3.2 小節則說明程式之計算流程。

5.3.1 地下水位歷線法模式計算流程

本研究將依據前述流程，採用 FORTRAN 語言撰寫，其流程將於下節說明。圖 5.3-1 與 5.3-2 分別為「地下水位歷線法」與「修正型地下水位歷線法」之資料流程架構圖。在「地下水位歷線法」中，程式需給定三類資料，第一為每日之地下水觀測井水位變化資料與降雨量資料，第二為各觀測井之儲水係數或比流出率，以及該觀測井之代表面積等相關資訊，第三由於部分水區之抽水型態較為複雜，需要給定各年度一、二期稻作之耕作面積，由於濁水溪沖積扇明顯受到一二期稻作之抽水影響，因此觀察該地之全區儲蓄水量歷線，發現從以約在一月底前後為界，可分為兩種斜率之退水曲線，藉由兩曲線之斜率差即可找出一期稻作之單日平均抽水量，然二期稻作耕作期間，因為處於豐水期間，因此退水曲線不明顯，故藉由一、二期稻作的耕作面積比，計算二期稻作之單日平均抽水量。在「修正型地下水位歷線法」中，除了前述資訊外，由於必須利用達西公式計算各控制體積間的交換水量，則需給定以兩觀測站為端點之連結，提供連結相關資訊，包涵連結之距離與穿越之面積等資訊。

在輸出資料部分，兩程式可以計算出每日之補注量、平均抽水量與每日流出量。除此之外，「修正型地下水位歷線法」還可輸出內部之穿越水量。

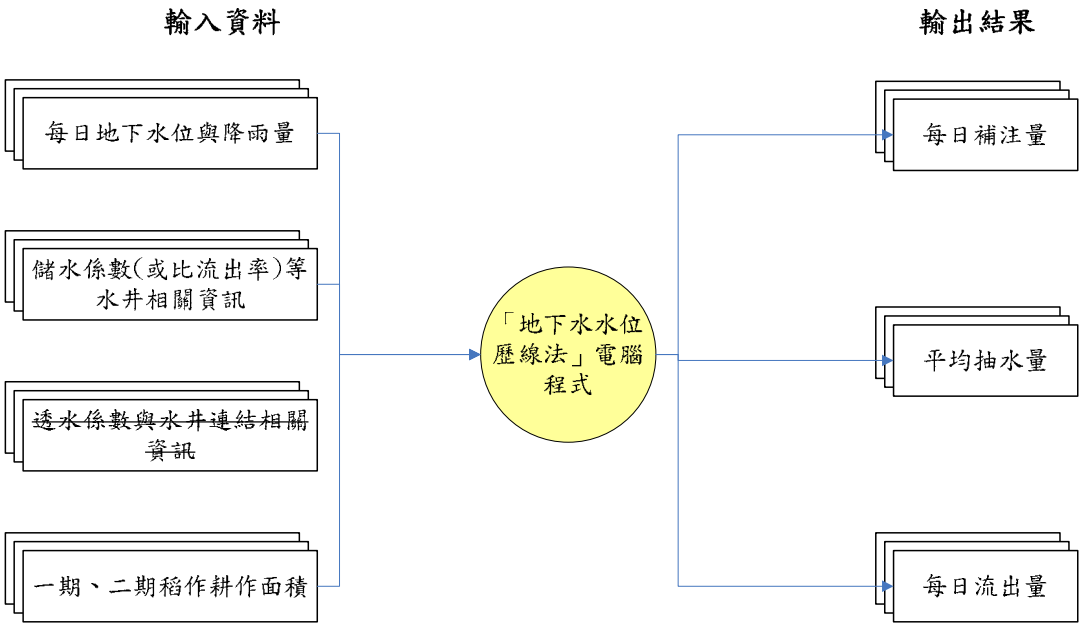


圖 5.3-1、「地下水水位歷線法」電腦程式資料流程架構圖

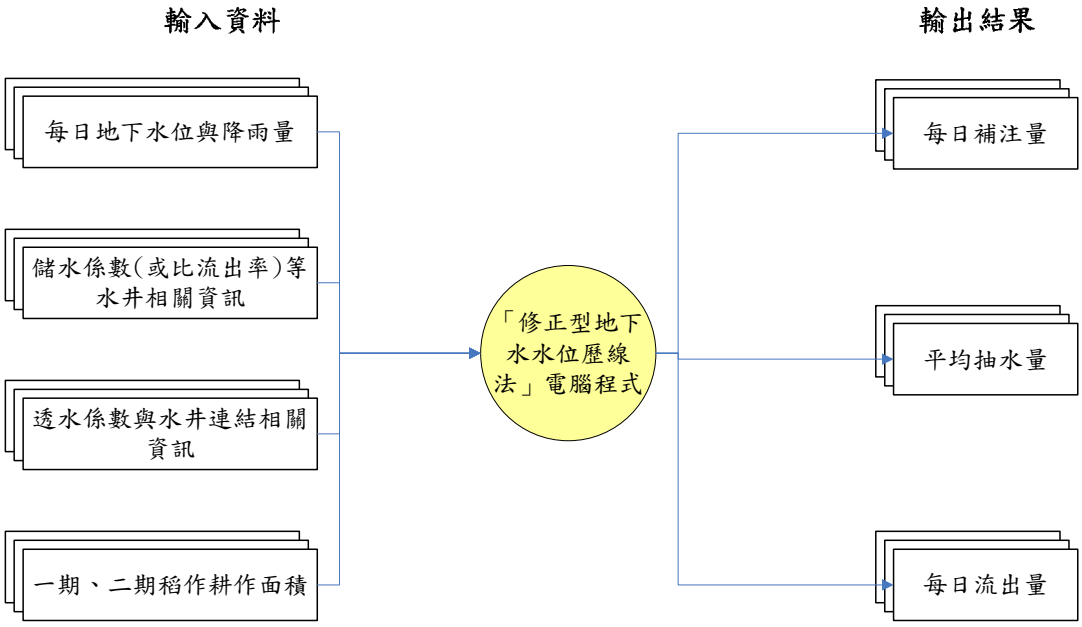


圖 5.3-2、「修正型地下水水位歷線法」電腦程式資料流程架構圖

5.3.2 程式計算流程

本程式計算流程如圖 5.3-3 所示，首先依據需求選擇所要計算之模組，「地下水位歷線法」或「修正型地下水位歷線法」。圖中分為左右兩區塊，左方為「地下水位歷線法」之運算流程，而右方則為「修正型地下水位歷線法」之運算流程，分別輸入各自之輸入資料，輸入資料可區分為三大類，包含「時序資料」、「水文地質參數」與「觀測井拓樸關係」三類資料，其中「時序資料」即為地下水位時序資料與降雨量時序資料；「水文地質參數」則包含儲水係數、比出水率與透水係數；「觀測井拓樸關係」則包含觀測井之代表範圍、相鄰觀測井之距離與相鄰觀測井間之穿越面積等，此類資訊可藉由地理資訊系統(GIS)建立提供。

比較「地下水位歷線法」與「修正型地下水位歷線法」之輸入資料，由於「修正型地下水位歷線法」會利用達西公式來計算穿越水量，因此較「地下水位歷線法」必須多輸入透水係數、相鄰觀測井之距離與相鄰觀測井間之穿越面積等資訊。

兩模組之計算順序則如圖 5.3-3 所示，其中可區分為數個步驟，依序如下所述：

(a) 交換水量可由式 5.2-1a 或 5.2-1b 之達西公式計算得。

(b) 利用各時刻之水位資料，乘上儲水係數或比流出率，以及代表之區塊面積，此乘積即為該時刻之地下水儲蓄水量(如式 5.1-2 所示)，而不同時刻之差值即為儲蓄變化量，因此由年初與年末水位差值，即可計算得年度儲蓄變化量。

(c) 依據枯水期之退水曲線即可得到平均抽水量(如式 5.1-4 所示)。

(d) 藉由降雨時序資料分辨各降雨場次，由此計算該降雨場次之降雨延時，將前述平均抽水率乘上降雨延時，即等於該場次期間之抽水量。

(e) 由於降雨期間假設抽水行為不因降雨與否而改變，因此場次之補注量即等於降雨事件結束與起始之地下水儲蓄量差值，再加上場次期間之抽水量。

(f) 各降雨場次之地下水流出量可利用降雨結束後之水位變化曲線判定，將降雨事件結束當日與結束後數日，以抽水斜率分別畫上虛擬線，兩虛擬線之差值即為該場次之地下水流出量。修正型地下水位歷線法則考量期間之穿越水量。

(g) 累計年度內之補注量與流出量，即可計算該年度之年補注量與

年流出量。

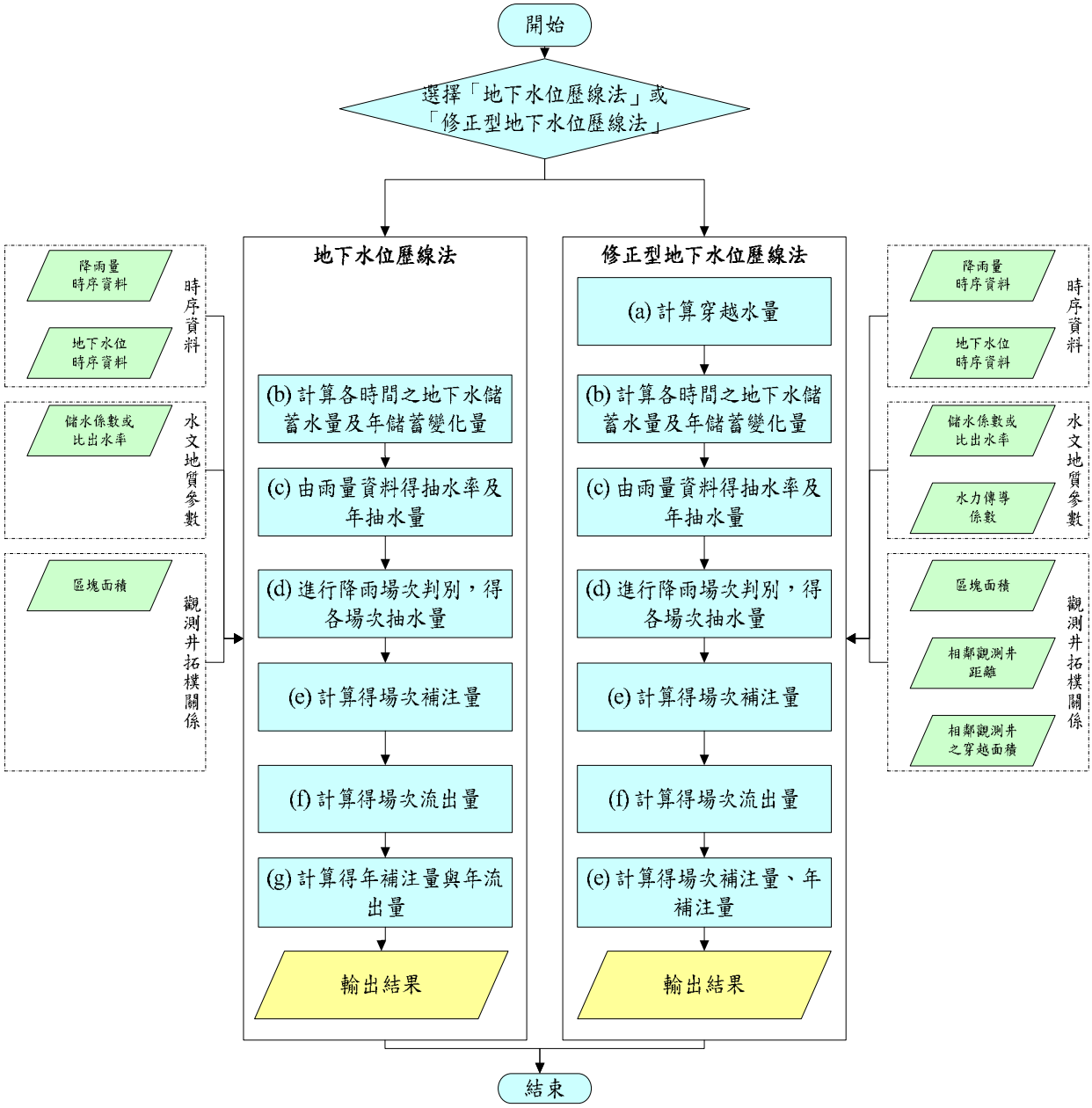


圖 5.3-3、地下水位歷線法程式計算流程圖

5.4 水位歷線法分析於濁水溪沖積扇之應用結果

5.4.1 基本資料分析與補遺

水位歷線法所需之資料主要為研究區域的降雨量資料與地下水位資料，兩者於濁水溪沖積扇之資料蒐集已於前述 2.2 節詳述，在此不再詳述。如欲應用水位歷線法估算濁水溪沖積扇之各日補注量、抽水量與流出量，則需連續且不間斷之時序水位資料，而濁水溪沖積扇之表層觀測井共有 41 口井，然其中虎溪(1)、石榴(1)與芳草(1)中途缺少至少六年以上的資料，因此直接忽略不採用。

但是是否扣除上述三口井後，是否所有資料皆可使用呢？表 5.4-1 為濁水溪沖積扇於民國 1997 年至 2005 年間的缺失筆數統計分析表，九年之資料合計 3287 筆，各井之缺漏筆數從 6%至 17%不等，以洛津(1)與線西(1)缺漏最多。本計劃從所有觀測井中任意兩兩配對，取可用之觀測資料，計算兩觀測井觀測資料數列之相關係數，藉由相關係數找出水位變化最相近之觀測井。表 5.4-2 為與該觀測井之相關係數最高之三口觀測井，如以合興(1)為例，其最相關之觀測井依序為溪州(1)、香田(1)與柑園(1)。

因此缺漏資料之補遺，則可以依據相關係數之高低，挑選最相關之觀測站資料，以線性迴歸方程式(式 5.4-1)進行缺漏資料之補遺，其中 x_j^t 代表第 j 口觀測井於 t 時刻之觀測資料，x_i^t 代表第 i 口觀測井於相同時刻之觀測資料，a_i^j 與 b_i^j 為兩觀測井間的線性迴歸參數，其可藉由線性迴歸工具求得。

$$x_j^t = a_i^j x_i^t + b_i^j \quad \text{.....(式 5.4-1)}$$

在進行資料補遺時，本計劃以相關係數之高低順位挑選補遺之對象，首先由第一順位進行資料補遺，如果第一順位觀測井於某時刻亦有缺漏，則改由第二順位觀測井進行資料補遺。圖 5.4-2 為田尾(1)的水位資料圖，該井位於扇央偏扇頂處，圖中空心符號代表該井之量測資料，顯示 1997 年該井有 8 個月缺少資料，透過相關係數之排序(表 5.4-2)選定九隆(1)，在距離上雖然不是最近的站井，但是兩站井均同樣位於扇央部分。圖中直線則是以九隆(1)水位變化，透過線性公式補遺缺漏部分，從畫面顯示在銜接處水位變化線型不會太突兀。圖 5.4-3 則是以相同之線性迴歸公式，同時計算缺漏部分與無缺漏部分，由圖面比較原始之觀測資料數列與迴歸公式所得之數列，兩數列

在八月前後水位變化較劇烈時，其誤差較大，但後半年之整體趨勢而言，線性迴歸公式大致上均可掌握，顯示以線性迴歸公式進行資料補遺之正確性。

表 5.4-1、濁水溪沖積扇表層觀測井資料缺失分析表(合計 38 井)

項次	井號	井名	總筆數	缺漏筆數	缺漏百分比
1	07020111	洛津(1)	3287	579	17.62%
2	07040111	線西(1)	3287	580	17.65%
3	07050111	全興(1)	3287	426	12.96%
4	07060111	文昌(1)	3287	389	11.83%
5	07080111	花壇(1)	3287	215	6.54%
6	07120111	田中(1)	3287	218	6.63%
7	07180111	二水(1)	3287	252	7.67%
8	07200211	香田(1)	3287	487	14.82%
9	07210111	田尾(1)	3287	458	13.93%
10	07220211	合興(1)	3287	427	12.99%
11	07250111	竹塘(1)	3287	274	8.34%
12	07260111	柑園(1)	3287	267	8.12%
13	07260211	溪州(1)	3287	247	7.51%
14	08040111	竹山(1)	3287	307	9.34%
15	08040211	鯉魚(1)	3287	482	14.66%
16	08040311	社寮(1)	3287	307	9.34%
17	08060211	新民(1)	3287	307	9.34%
18	09020111	溫厝(1)	3287	269	8.18%
19	09040111	西螺(1)	3287	44	1.34%
20	09040211	九隆(1)	3287	336	10.22%
21	09050111	宏崙(1)	3287	412	12.53%
22	09070111	東和(1)	3287	314	9.55%
23	09070211	崁腳(1)	3287	503	15.30%
24	09070311	古坑(1)	3287	162	4.93%
25	09080211	舊庄(1)	3287	433	13.17%
26	09090211	莿桐(1)	3287	235	7.15%
27	09100121	烏塗(2)	3287	296	9.01%
28	09100211	觸口(1)	3287	382	11.62%
29	09100311	坪頂(1)	3287	307	9.34%
30	09120111	豐榮(1)	3287	267	8.12%
31	09150111	田洋(1)	3287	241	7.33%
32	09160111	海園(1)	3287	270	8.21%
33	09180111	箔子(1)	3287	245	7.45%
34	09180311	明德(1)	3287	471	14.33%
35	09180411	東光(1)	3287	425	12.93%
36	10040111	三和(1)	3287	345	10.50%
37	10050111	東榮(1)	3287	536	16.31%
38	10070111	安和(1)	3287	557	16.95%

表 5.4-2、濁水溪沖積扇表層觀測井補遺對照表

待補遺觀測站		第一順位		第二順位		第三順位	
井號	井名	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數
07020111	洛津(1)	豐榮(1)	0.62	箔子(1)	0.61	文昌(1)	0.61
07040111	線西(1)	花壇(1)	0.51	文昌(1)	0.4	全興(1)	0.35
07050111	全興(1)	豐榮(1)	0.84	田尾(1)	0.77	柑園(1)	0.73
07060111	文昌(1)	田尾(1)	0.69	全興(1)	0.68	花壇(1)	0.67
07080111	花壇(1)	文昌(1)	0.67	田尾(1)	0.63	全興(1)	0.54
07120111	田中(1)	烏塗(2)	0.98	柑園(1)	0.98	二水(1)	0.97
07180111	二水(1)	烏塗(2)	0.98	柑園(1)	0.98	田中(1)	0.97
07200211	香田(1)	溪州(1)	0.94	柑園(1)	0.9	合興(1)	0.9
07210111	田尾(1)	九隆(1)	0.87	豐榮(1)	0.87	溪州(1)	0.86
07220211	合興(1)	溪州(1)	0.92	香田(1)	0.9	柑園(1)	0.88
07250111	竹塘(1)	香田(1)	0.9	合興(1)	0.84	溪州(1)	0.84
07260111	柑園(1)	田中(1)	0.98	二水(1)	0.98	烏塗(2)	0.97
07260211	溪州(1)	田中(1)	0.96	柑園(1)	0.96	烏塗(2)	0.94
08040111	竹山(1)	烏塗(2)	0.88	二水(1)	0.87	柑園(1)	0.84
08040211	鯉魚(1)	坪頂(1)	0.74	香田(1)	0.69	合興(1)	0.68
08040311	社寮(1)	新民(1)	0.52	崁腳(1)	0.44	線西(1)	0.33
08060211	新民(1)	田尾(1)	0.66	二水(1)	0.62	柑園(1)	0.6
09020111	溫厝(1)	烏塗(2)	0.54	柑園(1)	0.39	東光(1)	0.29
09040111	西螺(1)	莿桐(1)	0.91	柑園(1)	0.87	烏塗(2)	0.84
09040211	九隆(1)	田尾(1)	0.87	合興(1)	0.86	香田(1)	0.85
09050111	宏崙(1)	香田(1)	0.85	安和(1)	0.81	九隆(1)	0.79
09070111	東和(1)	古坑(1)	0.96	烏塗(2)	0.79	田中(1)	0.78
09070211	崁腳(1)	三和(1)	0.47	社寮(1)	0.44	箔子(1)	0.41
09070311	古坑(1)	東和(1)	0.96	烏塗(2)	0.86	田中(1)	0.85
09080211	舊庄(1)	東光(1)	0.7	文昌(1)	0.62	豐榮(1)	0.59
09090211	莿桐(1)	田中(1)	0.95	柑園(1)	0.94	烏塗(2)	0.93
09100121	烏塗(2)	田中(1)	0.98	二水(1)	0.98	柑園(1)	0.97
09100211	觸口(1)	鯉魚(1)	0.57	宏崙(1)	0.27	竹山(1)	0.24
09100311	坪頂(1)	莿桐(1)	0.89	香田(1)	0.87	田中(1)	0.86
09120111	豐榮(1)	田尾(1)	0.87	東光(1)	0.85	合興(1)	0.85
09150111	田洋(1)	香田(1)	0.8	溪州(1)	0.72	柑園(1)	0.71
09160111	海園(1)	田尾(1)	0.67	明德(1)	0.6	洛津(1)	0.59
09180111	箔子(1)	豐榮(1)	0.66	東光(1)	0.65	洛津(1)	0.61
09180311	明德(1)	合興(1)	0.83	溪州(1)	0.83	莿桐(1)	0.82
09180411	東光(1)	豐榮(1)	0.85	安和(1)	0.84	竹山(1)	0.8
10040111	三和(1)	崁腳(1)	0.47	古坑(1)	0.46	竹山(1)	0.44
10050111	東榮(1)	古坑(1)	0.72	莿桐(1)	0.7	東和(1)	0.68
10070111	安和(1)	田中(1)	0.88	烏塗(2)	0.87	莿桐(1)	0.86

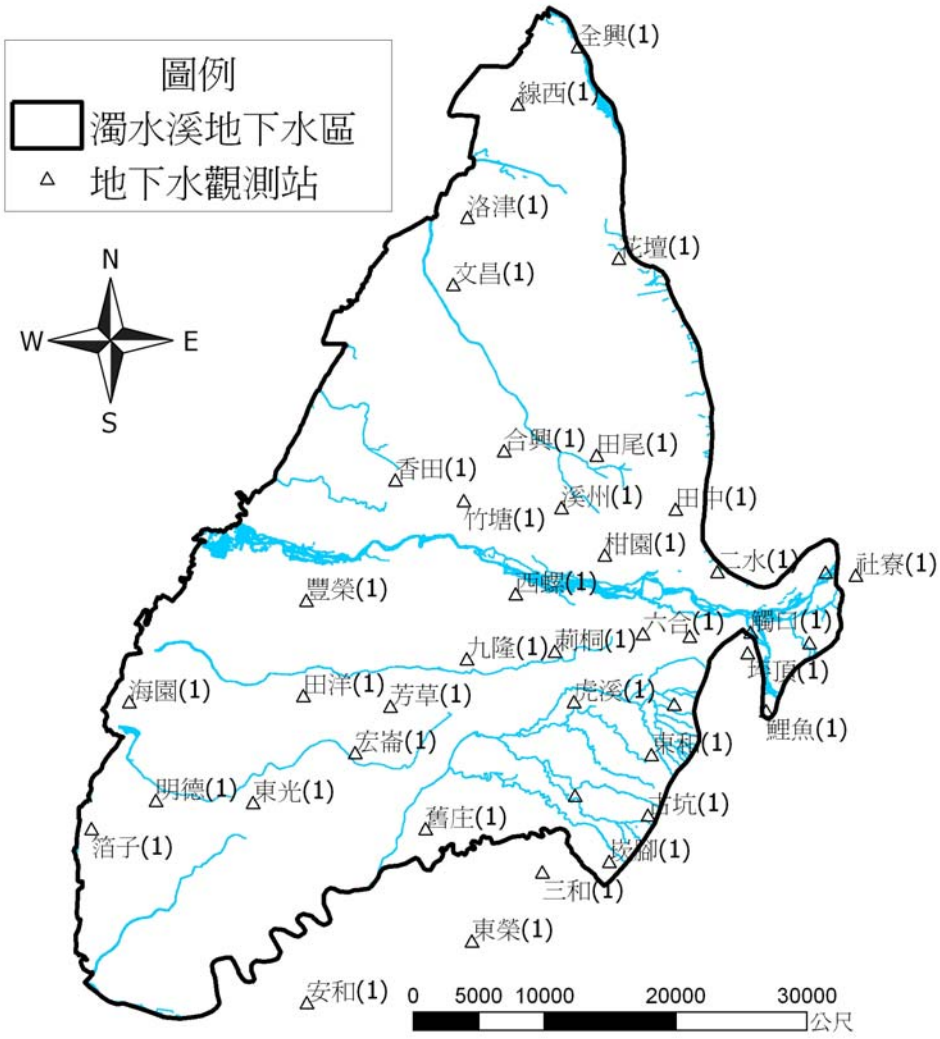


圖 5.4-1、含水層一(F1)地下水觀測井分布圖

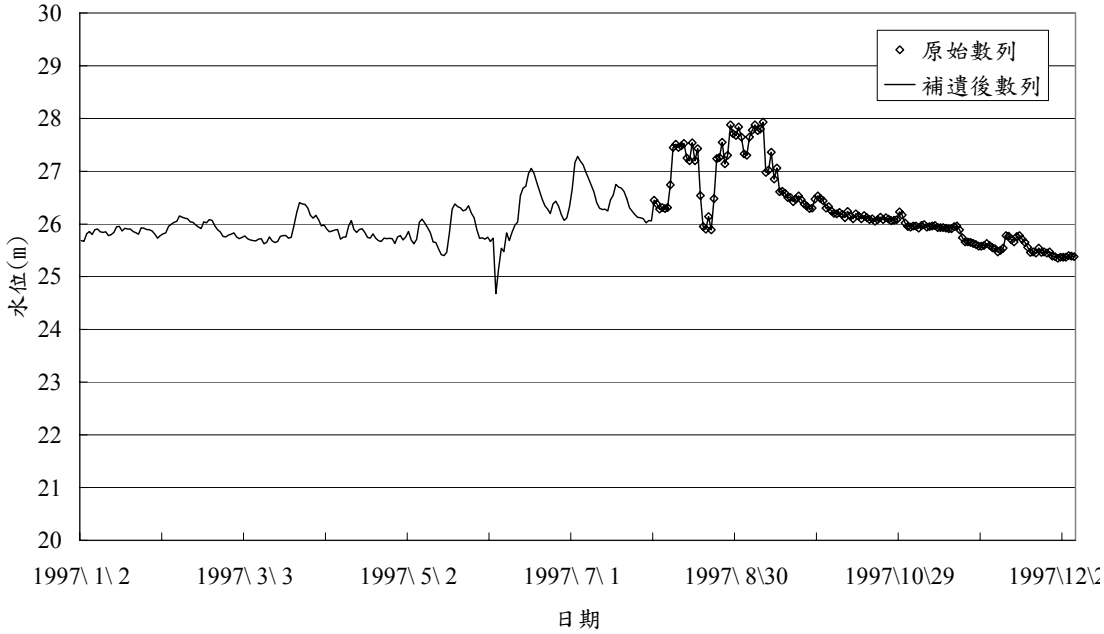


圖 5.4-2、原始水位與補遺後數列圖(田尾(1))

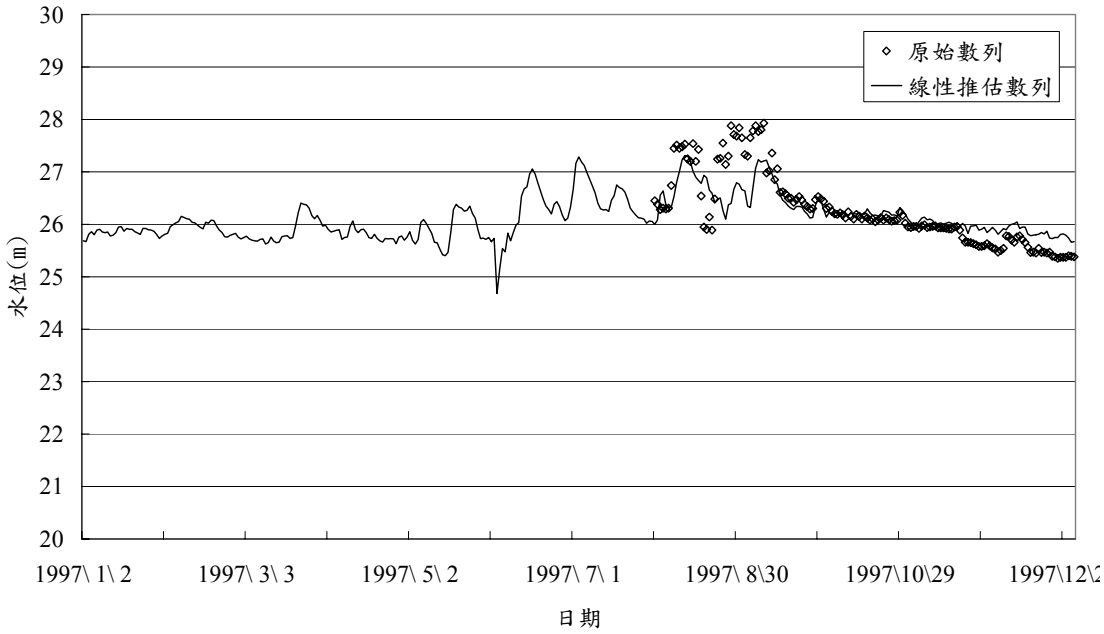


圖 5.4-3、原始水位與線性推估數列圖(田尾(1))

5.4.2 濁水溪沖積扇補注量推估分析

本計劃以 Fortran 電腦程式語言建立水位歷線法之電腦程式，在執行上本程式可以逐站計算各站的抽水量、補注量與流出量等資訊，

再進一步加總累計成全區之抽水量、補注量與流出量等；除此之外，本程式亦可直接以全區之儲蓄水量歷線進行計算。逐站計算的優點在於可以得到補注量、抽水量與流出量在空間上的分佈型態，但是為可計算各站之單日平均抽水量，各站之水位變化必須均可找出明顯之退水曲線，此為逐站計算的限制，對於一些抽水型態複雜，在空間上與時間上變化較為劇烈的區域，較難直接應用。而直接以全區之儲蓄水量歷線進行計算，由於累計之關係，單一區域較特殊的抽水型態對於全區儲蓄水量影響較小，因此枯水期之退水曲線亦較明顯。

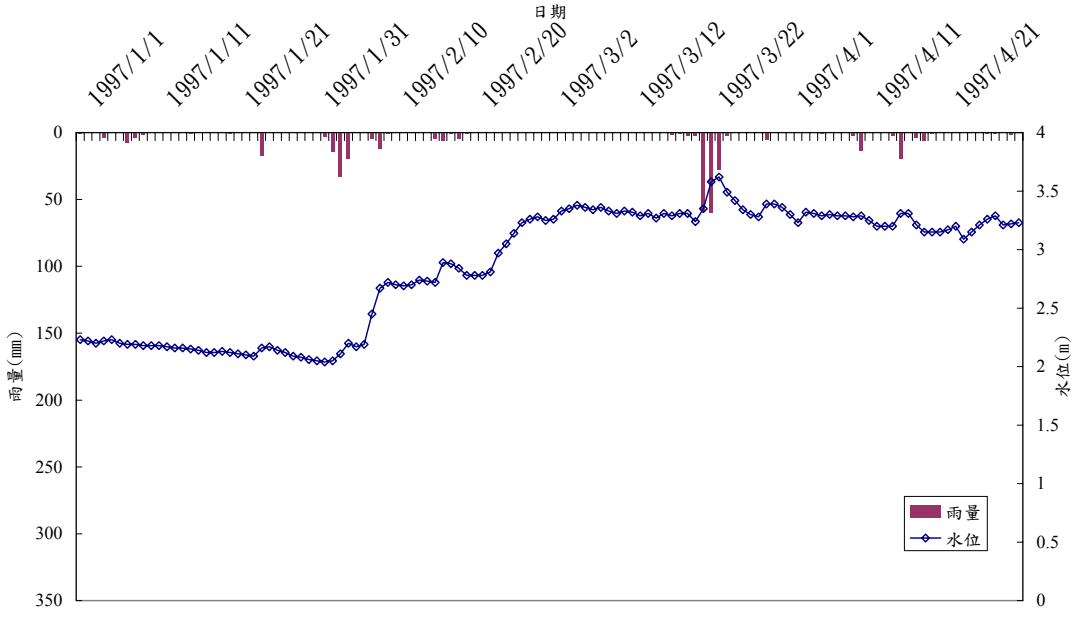


圖 5.4-4、線西(1)枯水期水位變化圖(1997 年)

圖 5.4-4 為線西(1)於 1997 年枯水期(一月至四月)之水位變化圖，從圖面顯示一月底之前，可以找到明顯的退水線，因此可以進一步求得平均單日抽水量。然江崇榮等人(2006)指出一二期稻作之抽水量對於系統水位亦有明顯之影響，一期稻作作用於二月至五月間，而二期稻作作用於七月至十月間，因此本計畫亦需要二月之後的退水曲線，藉此找出一、二期稻作之抽水量。

但是以線西(1)為例，二月之後之水位曲線中並不存在退水型態之線型，其曲線走勢為不斷往上抬升，上升之原因可能是受到枯水期間的降雨、側向交換量或其他原因等之影響。綜觀濁水溪沖積扇之多口站井，其觀測水位曲線均難以完整找到退水型態之線型，因此以資料而論，濁水溪沖積扇並不適合直接以各站資料，逐站求得各站之平均單日抽水量。建議以全區之儲蓄水量歷線推求全區之平均單日抽水量，後續要計算單日抽水量、補注量與流出量等資訊時，可考慮以前

述之全區計算方式，或另外以其他資訊分配各站之平均單日抽水量，再以此分配後之各站平均單日抽水量，逐站計算各站之單日抽水量、補注量與流出量等資訊。本計劃在此先以全區之儲蓄水量歷線檢驗電腦程式之正確性。由於是以全區之儲蓄水量歷線進行計算，因此並無法以各站之水位高低，透過達西公式計算側向交換量，因此後續檢驗亦先不檢驗修正型之計算成果。

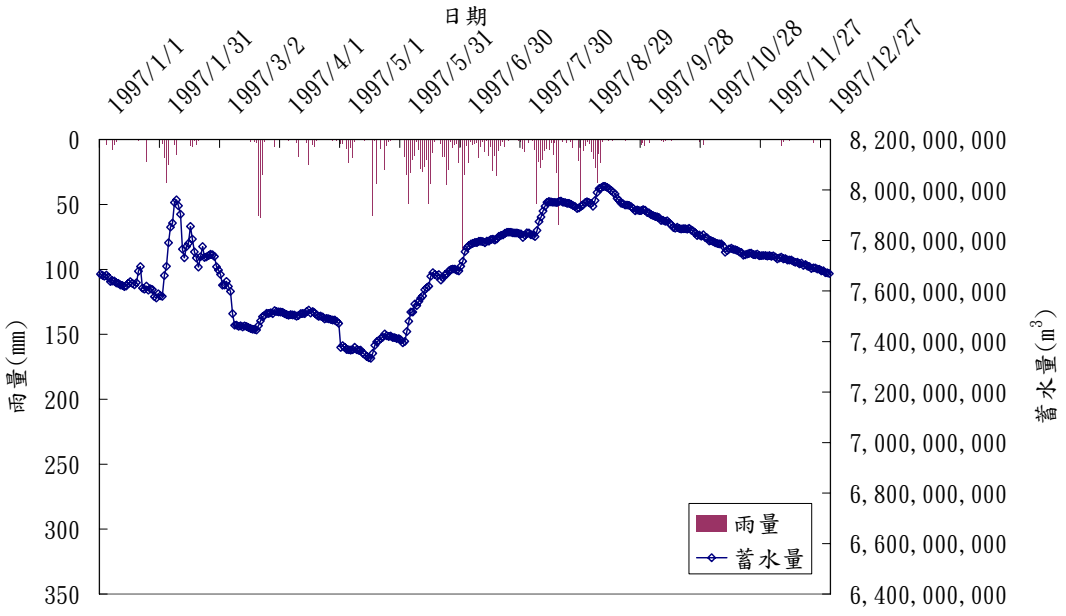


圖 5.4-5、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(1997 年)

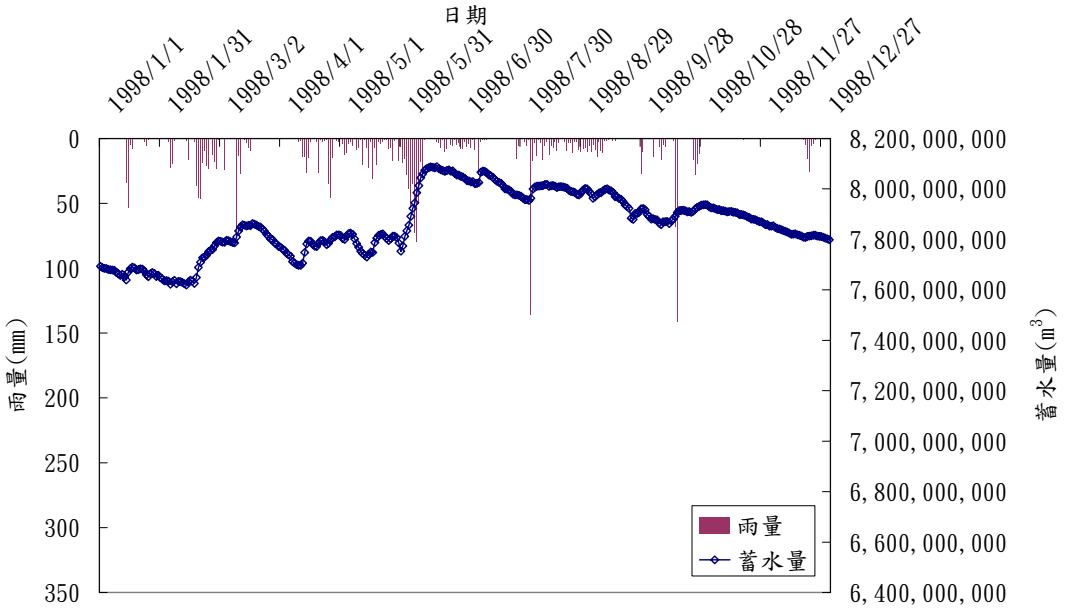


圖 5.4-6、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(1998 年)

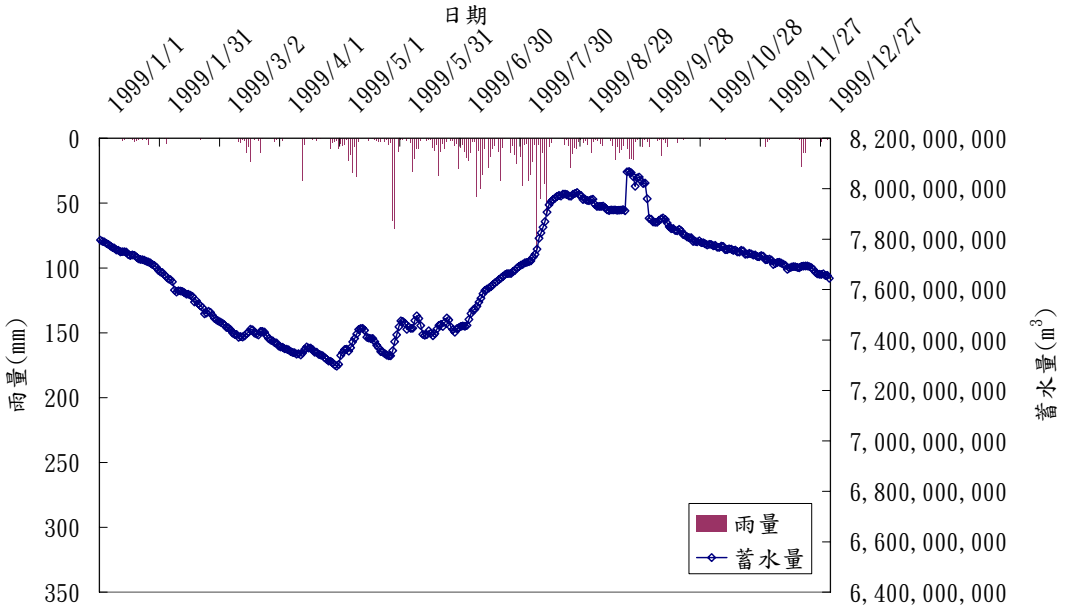


圖 5.4-7、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(1999 年)

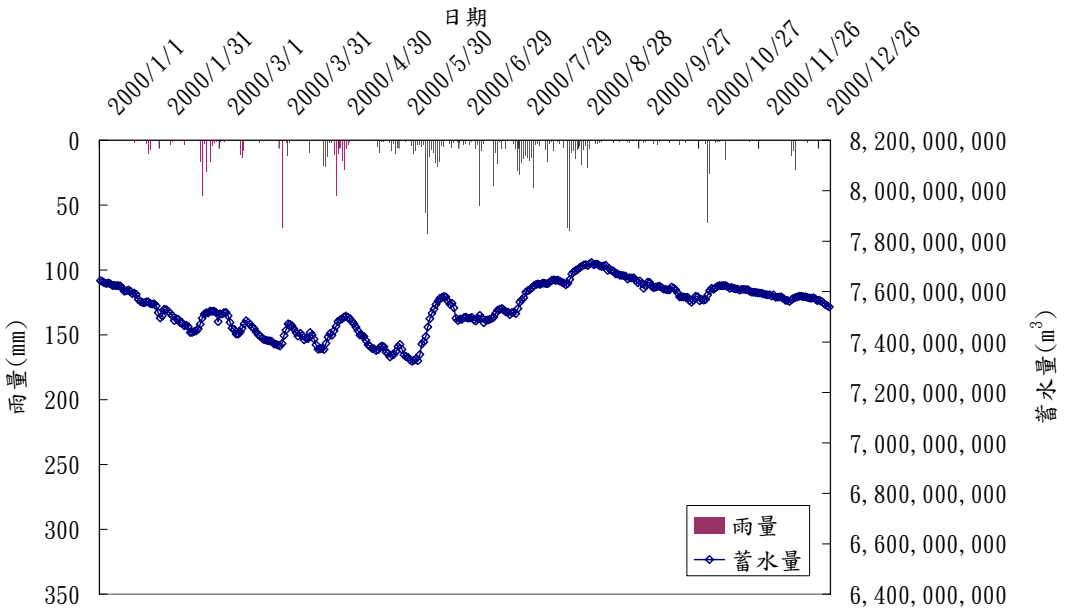


圖 5.4-8、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2000 年)

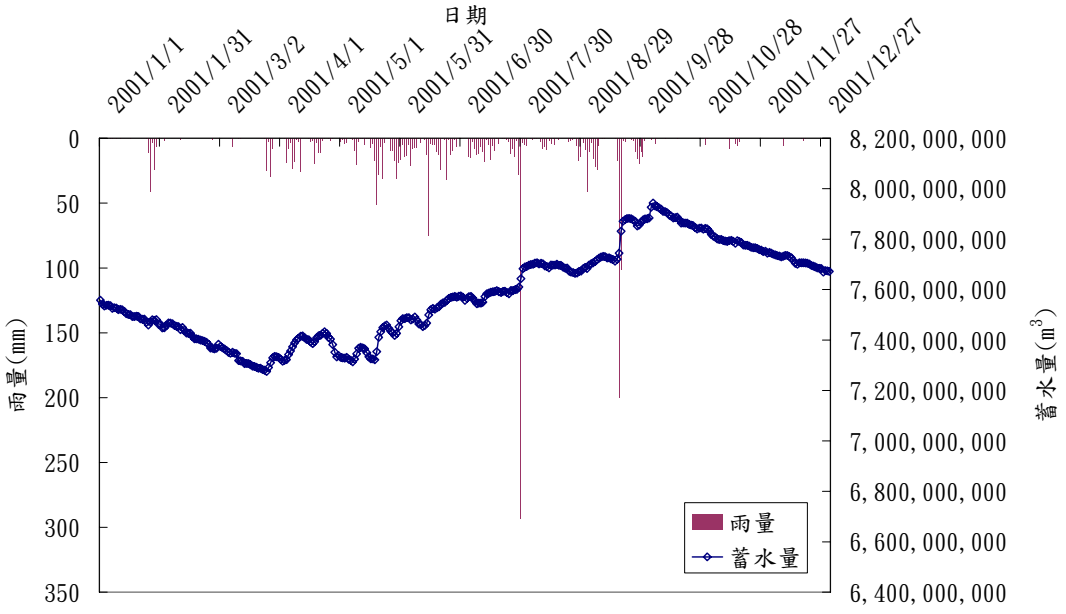


圖 5.4-9、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2001 年)

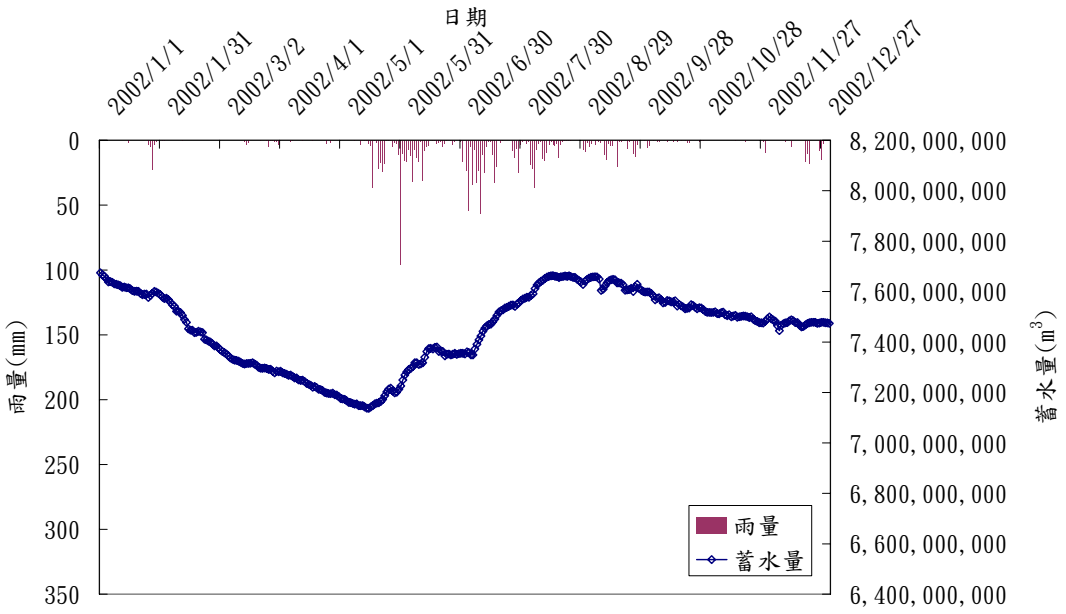


圖 5.4-10、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2002 年)

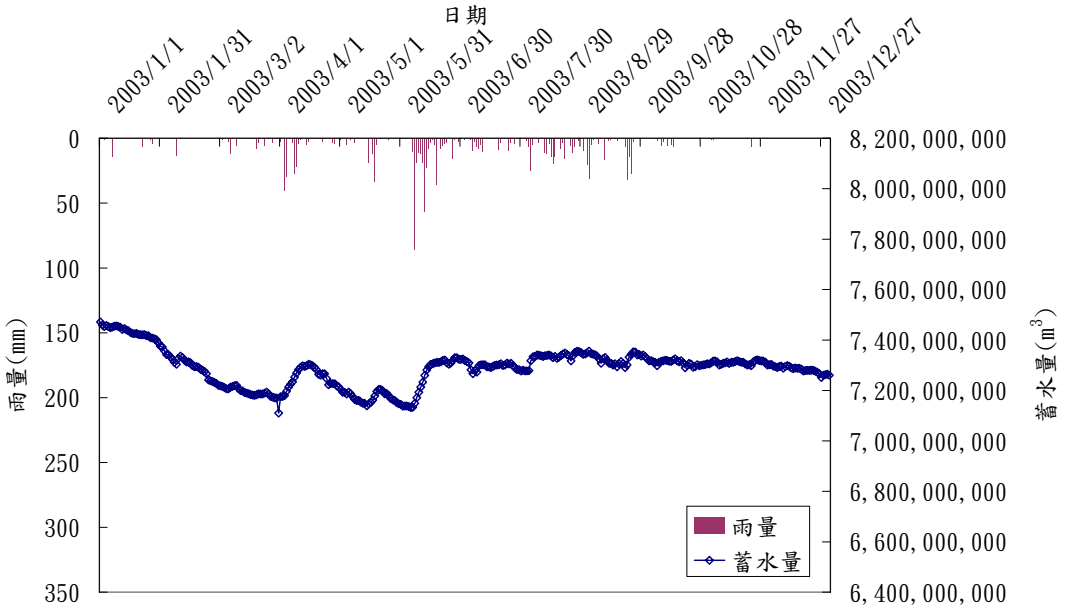


圖 5.4-11、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2003 年)

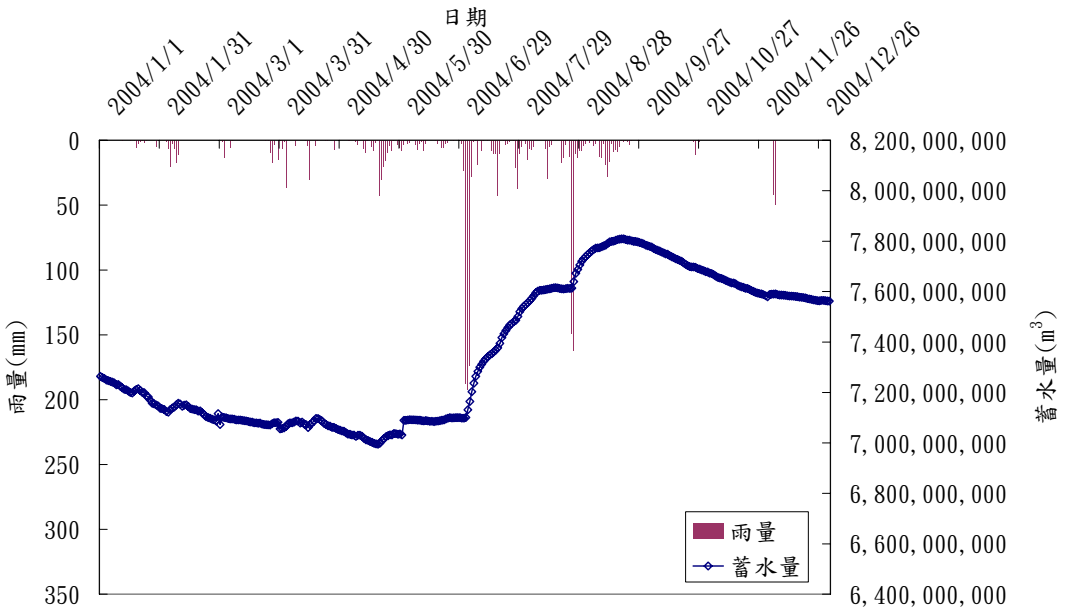


圖 5.4-12、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2004 年)

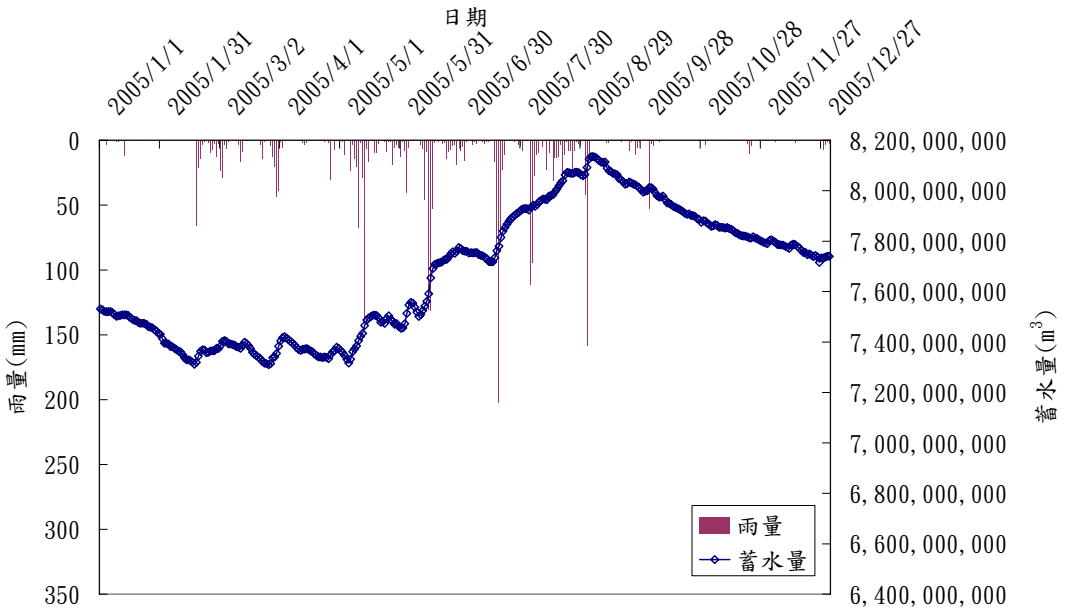


圖 5.4-13、濁水溪沖積扇儲蓄水量歷線與降雨量圖(2005 年)

圖 5.4-5 至 5.4-13 分別為濁水溪沖積扇於不同年度之儲蓄水量歷線與降雨量圖，相較於圖 5.4-4 之單站儲蓄水量而言，全區之儲蓄水量歷線震盪較為和緩，且可以明顯找出退水之線型。

表 5.4-3 為本區之水平衡分析表，本區儲蓄改變量於 1999 至 2005 年間約在正負 2 至 3 億噸間擺盪，1997、1998、2001、2004 與 2005 年之儲蓄改變量為正，其餘年份之儲蓄改變量為負，如果對照年降雨量資訊，恰可以 1800(mm)為分界，年降雨量高於 1800(mm)之年份，該年度之儲蓄改變量均為正值，反之則為負值。

如觀察本區各年度之年抽水量，其數值由 9 億噸至 12 億噸不等，其受到該年度之單日抽水之影響。表 5.4-4 為本區之各項單日平均抽水量表，表中顯示各年度的各項抽水量，其中單日抽水量部分約為 2.31 百萬噸。此外，一期稻作與二期稻作則是利用退水斜率之差值，求得單位面積耕作面積之單日稻作灌溉抽水量，因此乘上耕作面積即可換算一期稻作與二期稻作之單日抽水量，一期稻作之單日抽水量約在 3.5 至 4.1 百萬噸之間，視灌溉面積不同而有所改變。二期稻作之單日抽水量約在 2.5 至 3.2 百萬噸之間。此外，一期稻作與二期稻作之灌溉面積可於農委會農業統計年報上查得，然年報上僅記載 1999 年之後的資訊，故本次計算上暫以 1999 年之灌溉面積作為 1997 與 1998 年之資訊，可於後續年度進一步蒐集該項資料，使得稻作抽水量之估算更為精確。若觀察本區各年度之補注量，各年度之補注量則由 10 億噸至 17 億噸之間不等，略大於江崇榮等(2006)之結論。

表 5.4-3、濁水溪沖積扇水平衡分析表

年份	年儲蓄改變量	年抽水量	年補注量	年流出量	降雨量
1997	1.79	1,088.51	1,753.09	662.80	1,802.47
1998	105.20	909.94	1,532.30	492.85	2,497.23
1999	(-151.53)	971.38	1,527.04	709.65	1,725.77
2000	(-103.71)	1,098.74	1,393.65	400.21	1,622.12
2001	114.13	1,104.87	1,398.30	160.93	2,131.31
2002	(-200.97)	1,143.92	1,007.45	61.72	1,369.65
2003	(-211.08)	1,200.65	1,041.99	54.24	1,135.98
2004	297.78	1,065.95	1,215.61	-151.52	2,043.02
2005	208.45	979.28	1,598.22	441.11	2,681.98
平均	1.79	1,088.51	1,753.09	662.80	1,802.47
水量單位：$\times 10^6 (m^3)$ 降雨量單位：(mm)					

表 5.4-4、濁水溪沖積平均扇單日抽水量、一期與二期稻作抽水量表

年份	單日抽水量	一期稻作抽水量	二期稻作抽水量
1997	-2.31	-4.15	-3.20
1998	-2.31	-4.15	-3.20
1999	-2.31	-4.15	-3.20
2000	-2.31	-4.15	-3.00
2001	-2.31	-3.92	-3.14
2002	-2.31	-3.94	-2.90
2003	-2.31	-3.81	-2.54
2004	-2.31	-3.56	-2.52
2005	-2.31	-3.80	-2.57
平均	-2.31	-3.96	-2.92
單位：$\times 10^6$ 立方公尺			

如依據降雨事件統計各降雨場次對應的補注量、降雨量與降雨天數等資訊，從 1997 年至 2005 年合計 164 場降雨事件，圖 5.4-14 與 5.4-15 則分別呈現降雨量及降雨天數對補注量之關係圖，從圖面顯示降雨量與補注量呈現二次之關係。

本計劃已成功應用 Fortran 電腦程式語言，建立地下水位歷線法模式，模式可以選擇逐站之儲蓄水量進行各站之補注量、抽水量與流

失量估算，再進一步累加為全區資訊，或直接全區之儲蓄水量計算全區之補注量、抽水量與流失量估算。如選擇逐站計算方式，在側向交換量方面，可進一步應用達西公式釐清交換量之大小。而計算方式之選擇，則需仰賴各站水位資料之前期分析，對於濁水溪沖積扇而言，許多區域之退水曲線並不明顯，顯示枯水期之地下水系統並非僅受到抽水行為之影響，因此較適合直接以全區資訊進行計算。

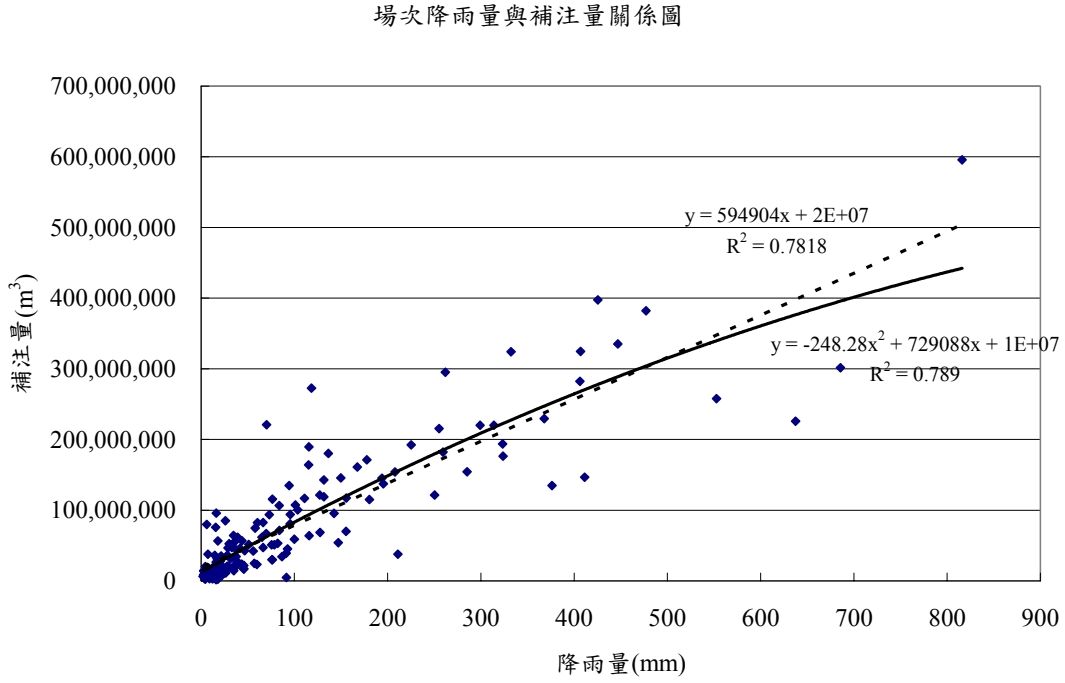


圖 5.4-14、場次降雨量與補注量關係圖

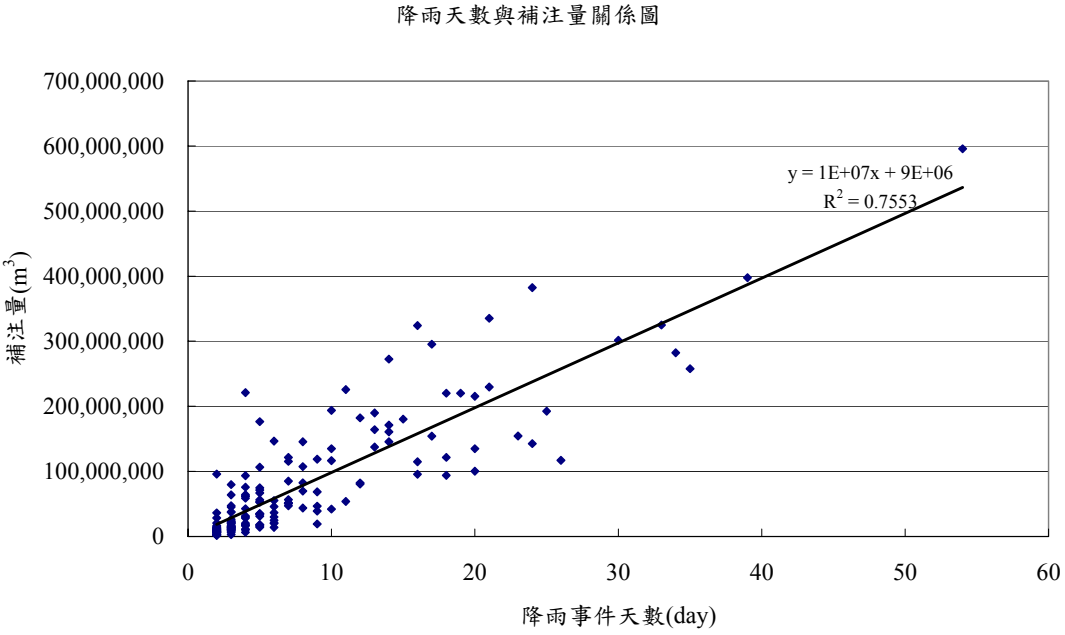


圖 5.4-15、場次降雨天數與補注量關係圖

第六章 地下水補注潛勢評估作業平台

「地下水補注潛勢評估作業平台」是提供使用者進行地下水補注區劃分之輔助工具，使用者除可利用本平台進行相關補注潛勢評估計算外，以視覺展示方式呈現不同區位補注能力強弱，迅速掌握補注潛勢在空間上之差異，並可選定地下水區，進行區域之補注量與抽水量估計，並展示補注量與抽水量在空間上之分布情形。

6.1 系統分析

圖 6.1-1 為地下水補注潛勢評估作業平台之系統架構圖，如圖所示系統元件包含十大項目：

(1) 地下水水位歷線法電腦程式。

(2) 修正型地下水水位歷線法電腦程式。

(3) 補注潛勢計算電腦程式。

(4) 基礎使用者介面

(5) 資料上傳使用者介面。

(6) 地下水水位資訊擷取元件。

(7) 地下水位儲存資料庫、水文地質參數資料庫與 GIS 圖層資料庫。

(8) 資料格式轉換元件。

(9) 模擬成果格式轉換元件。

(10) 模擬成果 GIS 展示元件。

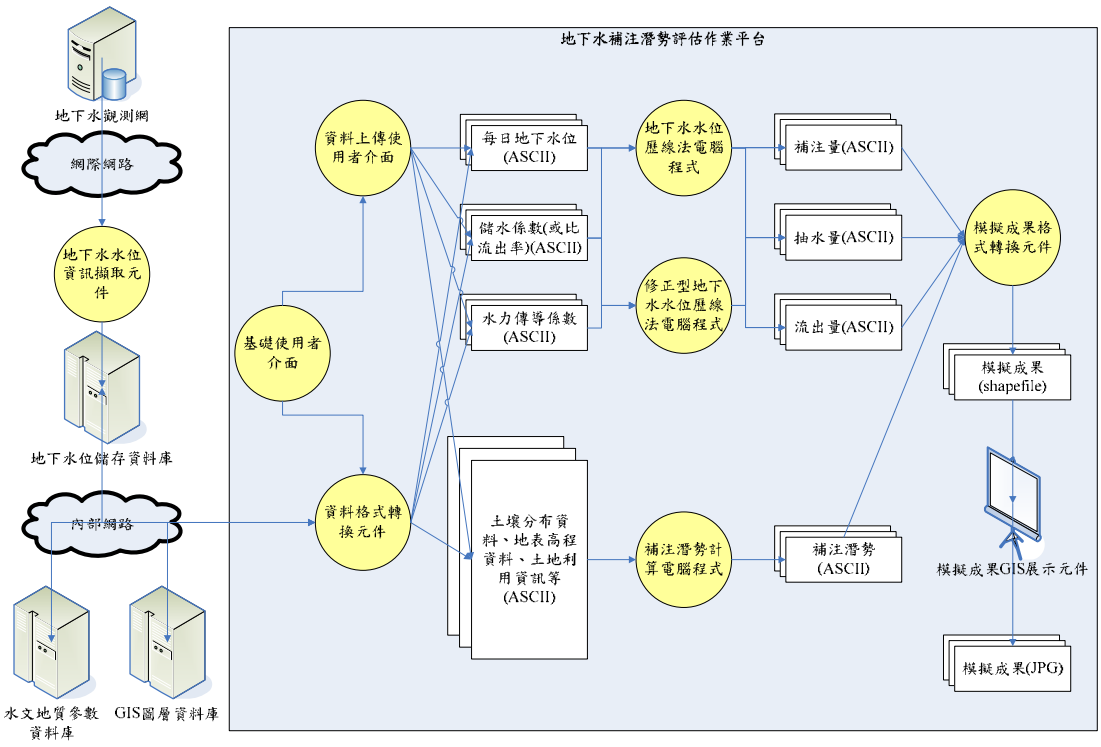


圖 6.1-1、地下水補注潛勢評估作業平台架構圖

本計畫地下水補注潛勢評估作業平台包含上述十大工作項目，98年度預定完成第(1)至第(7)項目，99 年度完成剩餘第(8)至第(10)項目，以下就各項目內容詳述。

第(1)至第(3)項元件之電腦程式為本計劃之核心工作項目，主要以 FORTRAN 等程式語言進行撰寫開發，其輸入檔需依據定義特定格式，必須預先整理為 ASCII 文字檔。「地下水位歷線法電腦程式」之輸入資料包含研究區域之每日地下水位與儲水係數或比流出率，而「修正型地下水位歷線法電腦程式」則需再增加該地區之透水係數；「補注潛勢計算電腦程式」之輸入資料則需要研究區域各網格之土壤分布比例與面積、降雨與地下水位相關性因子、各類土地利用之比例與面積、地下水位深度與地表高程資訊。前述三類資料都需要符合電腦程式所定義之格式，預先處理成 ASCII 格式之輸入檔。本平台提供兩類資料輸入流程，第一類係由使用者提供定義所需之輸入檔，第二類則由系統平台自動準備其輸入檔。

使用者若採取第二類資料輸入流程則在取得與更新地下水位資料上可有效減少工作量。目前地下水觀測網已於濁水溪沖積扇、屏東平原與蘭陽平原等區域建立大量之水位觀測井與自動觀測儀器，歷年來已經累積大量之地下水位資料，而如此龐大之地下水位觀測資料均

儲存於水利署之「水文水資源資料管理供應系統」上(如圖 6.1-2 所示)，可藉由網際網路與瀏覽器觀看、取得與下載，因此第(6)項之「地下水位資訊擷取元件」將以背景啟動方式定期啟動，自地下水觀測網網站上取得研究區域各水位觀測井之水位更新資料。

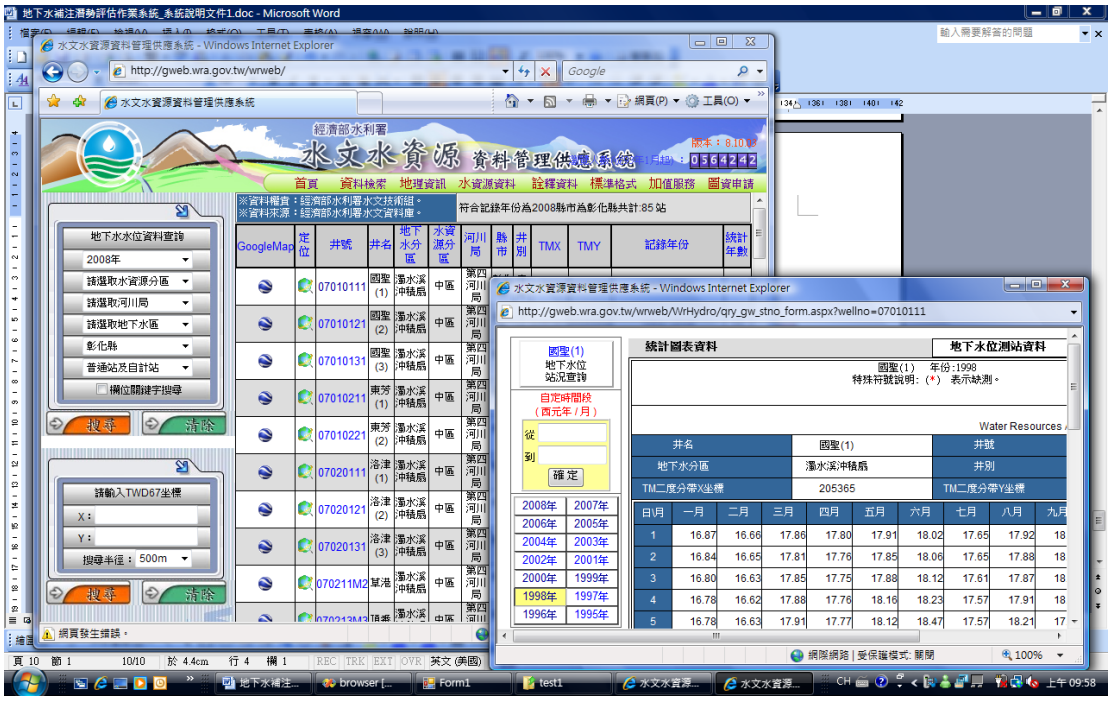


圖 6.1-2、經濟部水利署水文水資源資料管理供應系統

第(4)項元件之「基礎使用者介面(Basic user interface)」係提供使用者決定待計算之電腦程式，依據選定之電腦程式不同，所需之輸入資料亦為不同，接著使用者仍須決定準備使用之資料輸入流程，如欲使用第一類輸入流程，其後則自行啟動第(5)項之「資料上傳使用者介面」；如欲使用第二類輸入流程，使用者可用勾選的方式選擇研究區域與時段，系統將透過第八項之「資料格式轉換元件」，其將自第(7)項之「地下水位儲存資料庫、水文地質參數資料庫與 GIS 圖層資料庫」取得所需資料，並儲存為後續電腦程式之輸入檔。

第(5)項元件之「資料上傳使用者介面(Data upload user interface)」為第一類輸入流程所需之上傳介面，使用者需要依據各電腦程式定義之格式，自行建立輸入檔，再由本介面上傳。

圖 6.1-3 為濁水溪沖積扇國聖(1)站於 2003 年之每日觀測水位呈現之畫面為完整之表格形式，其格式為 HTML 格式，原始碼則如圖 6.1-4 所示。因此第(6)項「地下水水位資訊擷取」元件除了按照定義之期程，定期向「水文水資源資料管理供應系統」提出需求外，當伺

服器端回傳 HTML 格式之水位資訊後，本元件仍須解析 HTML 格式之水位資料，解析後再儲存於本地端之資料庫中。

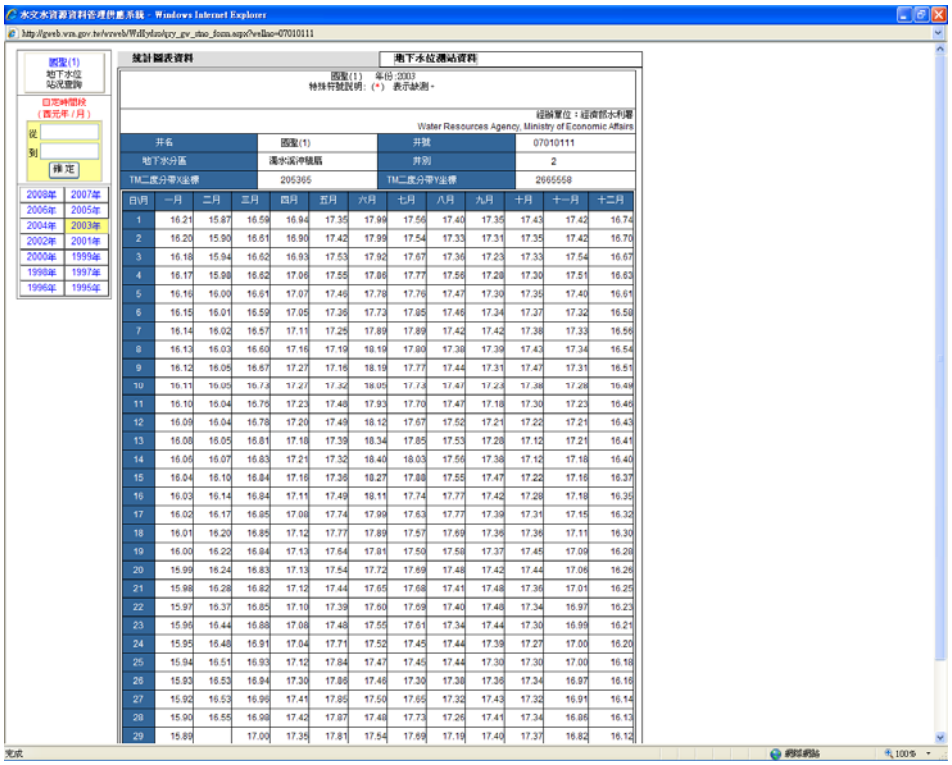


圖 6.1-3、國聖(1)之日觀測水位畫面

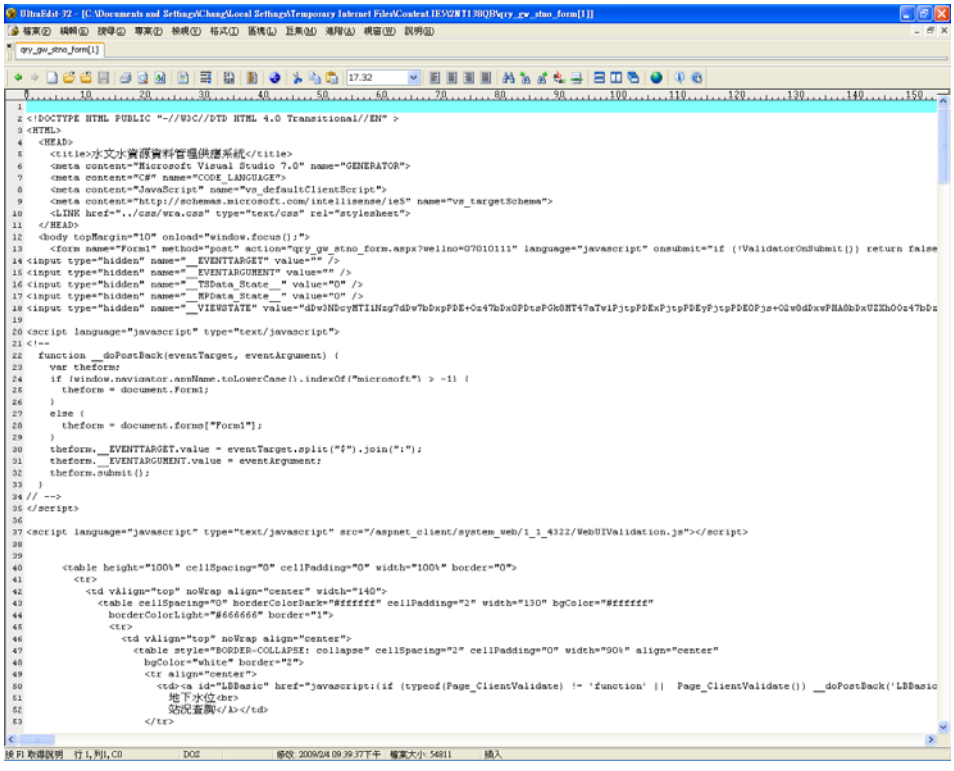


圖 6.1-4、國聖(1)之日觀測水位原始碼

第(7)項之「地下水位儲存資料庫、水文地質參數資料庫與 GIS 圖層資料庫」則可建置於內部網域中，而儲存本平台所需之各類資料包含研究區域之日地下水位資料、各項水文地質參數與相關所需之 GIS 圖層，其中「地下水位儲存資料庫」與「地下水水位資訊擷取元件」搭配使用，以儲存「擷取元件」所解析之地下水位更新資料；「水文地質參數資料庫」則儲存研究區域內各觀測井與其代表範圍所對應之透水係數與儲水係數等相關水文地質參數；「GIS 圖層資料庫」則儲存研究區域內相關所需之 GIS 圖層，其中包含土壤分布圖、地表高程圖(DTM)與土地利用圖、降雨與地下水位相關性因子、地下水位深度等圖層。

第(8)項之「資料格式轉換元件」則負責從第七項之各項資料庫中取得所需資料，並將資料依據第一至第三項之「電腦程式」所定義之格式輸出，自動建立輸入檔。因此第二類資料輸入流程需搭配第(6)至第(8)項元件運作，如此使用者僅需要勾選所需啟動之研究區域、時段與功能，系統將自行準備程式之輸入檔，再啟動電腦程式運算。

第(1)至第(3)項元件為本平台之核心，包含三種電腦程式；第(4)至第(8)項元件則與使用者介面及輸入檔建立有關；而第(9)至第(10)項元件則是與電腦程式之輸出檔有關，作為視覺化呈現計算成果之用。

第(9)項之「模擬成果格式轉換元件」是將電腦程式輸出之 ASCII 格式模擬成果，包含補注量、抽水量、流出量、補注潛勢與地下水位等空間分布資訊，透過克利金(Kriging)或線性內插等內插方法，將點位資料轉換為平面資料，在此以地理資訊系統(GIS)作為空間資料展示之介面，因此選用 GIS 地理資訊系統檔案格式，此外由於國內常使用之 GIS 流通格式為 Shapefile(.shp)格式，因此 Shapefile 將是系統之內建檔案格式。

第(10)項之「模擬成果 GIS 展示元件」則以地理資訊系統軟體開啟瀏覽「模擬成果格式轉換元件」所製作之 Shapefile 檔案，由於 Shapefile 檔案為向量式圖檔，因此在地理資訊系統中，使用者可以任意的縮放圖面。此外，在顯示上亦可以任意搭配其他現有的圖層，例如縣市鄉鎮圖、土地利用圖、土壤分布圖、河川水系圖或道路路線圖等。另外，地理資訊系統軟體內建的匯出(Export)功能，可將模擬成果繪製成 JPG 形式之圖檔，方便使用者使用於文件或提高檔案交換的流通性。

本項目以 SuperGeo 空間分析元件 SGSA2.dll 作為成果展示工具。該元件可將離散的點位數值，以空間內插方式(Interpolation)，計算出區域內的未知網格值。本計畫在此以反距離權重法(Inverse Distance Weight, IDW)作為演算內插計算的方法。

透過空間內差之內差結果，可以顏色區分數值變化，透過圖像方式便於使用者理解空間數值之變化，如圖 6.1-5 所示。其中，圖中各點表示原始離散之點位資料，透過空間內差方法即可將點位資料分布至整個研究區域。在圖像展示上，除了可以顏色變化來顯示數值變化趨勢，本計劃亦可以等值線法(isopleths Map、Contour Map)來表示，對於相同等值線上其數值一樣。

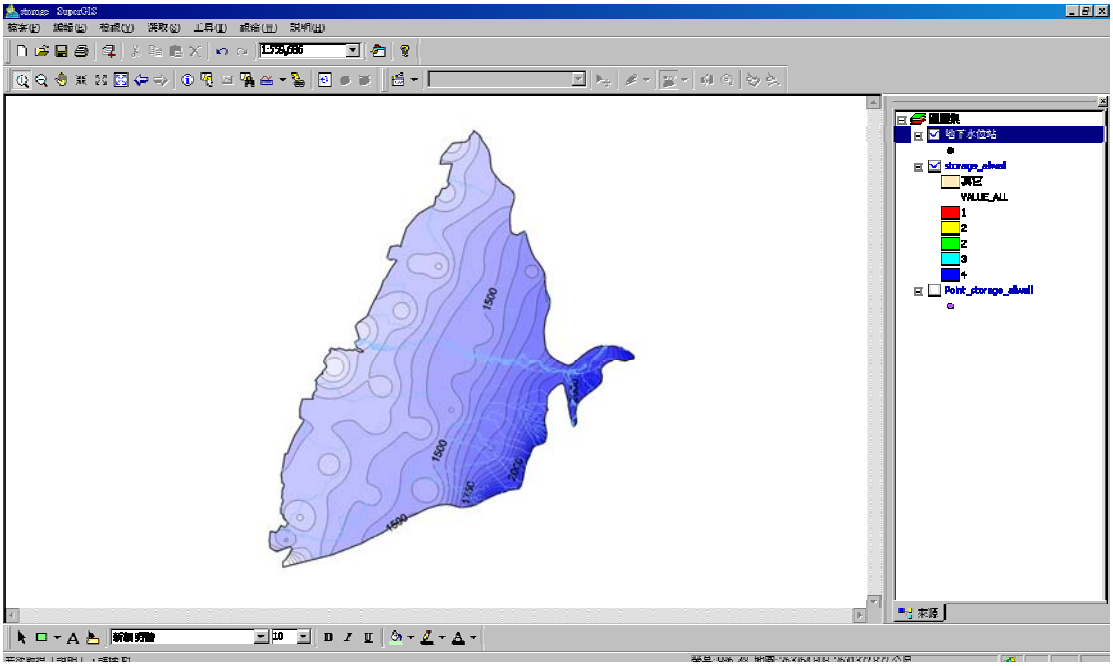


圖 6.1-5、內插演算輸出成果圖

6.2 軟體架構

本評估作業平台最重要的核心即為「地下水水位歷線法電腦程式」、「修正型地下水水位歷線法電腦程式」與「補注潛勢計算電腦程式」三支電腦程式，其類型近似傳統土木水利領域之數值計算，由於 FORTRAN 語言為傳統土木水利領域常用之程式語言，對於數值計算較為方便迅速，因此前述三支電腦程式將以 FORTRAN 語言撰寫。

在「基礎使用者介面」、「資料上傳使用者介面」與「資料格式轉換元件」方面，由於視窗版本之使用者介面與網際網路功能為其主

要門檻，因此傳統 FORTRAN 程式語言並不適合，在此使用 VBA 程式語言撰寫。

在「地下水水位資訊擷取元件」與「網路版本介面」等元件則需要運作於網路伺服器上，在此使用 ASP.Net 動態網頁語言。

在模擬成果展示方面，主要採用各式 GIS 相關之解決方案，表 6.2-1 為 GIS 專案相關軟體清單，主要平台為「桌上型 GIS 軟體」，若單位內大量使用下，在授權上可採用網路版授權，此部分國內常見之解決方案包含 ESRI 公司的 ArcGIS 與崧旭公司的 SuperGIS 等，藉由視窗展示功能，模擬成果可以迅速地從畫面上一目了然。此外，因應空間內插及其他系統相關需求，除了桌上型 GIS 軟體外，仍須有其他擴充模組以達到需求，包含「Spatial Analyst 空間分析模組」、「Spaital Staitistics Analyst 空間統計分析模組」與「67/97 座標轉換模組」。以下所列為本計劃所使用之作業平台與開發工具。

(1)作業平台: 使用分析工具為 SuperGeo 的桌上型 GIS 系統 SuperGIS 2.2 版(圖 6.2-1)。

(2)開發工具:

A. 介面表單開發：介面查詢開發使用 SuperGeo 客製化 VBA 開發工具。

B. 空間網格資料展示開發：使用 SuperGeo 共用核心元件 SGSA2.dll 空間分析模組元件開發。

C. 水文資料庫自動記錄程式：使用 Microsoft Visual Studio 2005 的 Web Browser 開發。

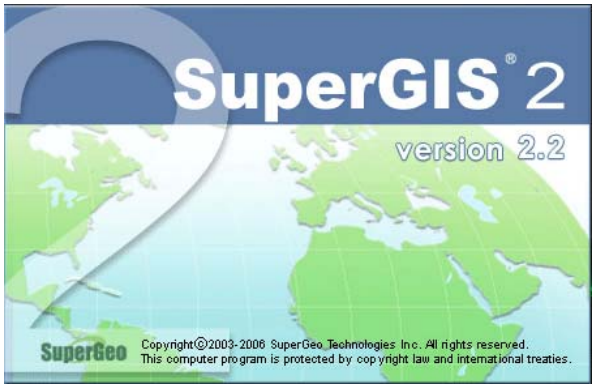


圖 6.2-1、SuperGIS 桌上型 GIS 系統

表 6.2-1、GIS 專案相關軟體清單表

項次	項目
1	桌上型 GIS 軟體 (網路版權)
2	GIS 軟體擴充模組-Spatial Analyst 空間分析
3	GIS 軟體擴充模組-Spaital Staitistics Analyst 空間統計分析
4	GIS 軟體擴充模組-67/97 座標轉換

6.3 系統實作

地下水補注潛勢評估作業平台十大工作項目中，第(1)至第(3)項目為以 Fortran 程式撰寫，已於前面章節描述。第(4)至第(7)項目中，第(6)項地下水水位資訊擷取元件為建立第(7)項地下水水位儲存資料庫、水文地質參數資料庫與 GIS 圖層資料庫必要之元件，本節將於 6.3-1 小節介紹。第(4)項基礎使用者介面及第(5)項目資料上傳使用者介面，可通稱為使用者介面，依資料來源並可分為「使用者自行建立」與「資料庫自動建立」，此部分規劃將於 6.3-2 小節介紹。

6.3.1 資料庫建立

(一) 地下水位、雨量儲存資料庫

經濟部水利署所維護之「水文水資源資料管理供應系統」（http://gweb.wra.gov.tw/wrweb/）儲存長期且大量之地下水位及雨量資訊(如圖 6.1-2 所示)，該項資訊提供國內水利方面之學者與相關計畫研究使用，為自動化地透過網際網路，取得歷年之地下水水位及雨量資訊，便於後續地下水補注推估程式所需，本計畫以 Microsoft Visual Studio 2005 作為開發環境，建立自動化擷取程式。程式開發上，首先使用 Microsoft Visual Studio 2005 中之 Web Browser 控制項，其為 ActiveX 元件(圖 6.3-1)，主要可以控制 Microsoft Internet Explorer 的網頁內容，包含使用者點選的動作，以便模擬人工按鈕的作業模式，達到自動化下載水文資料庫的目的。

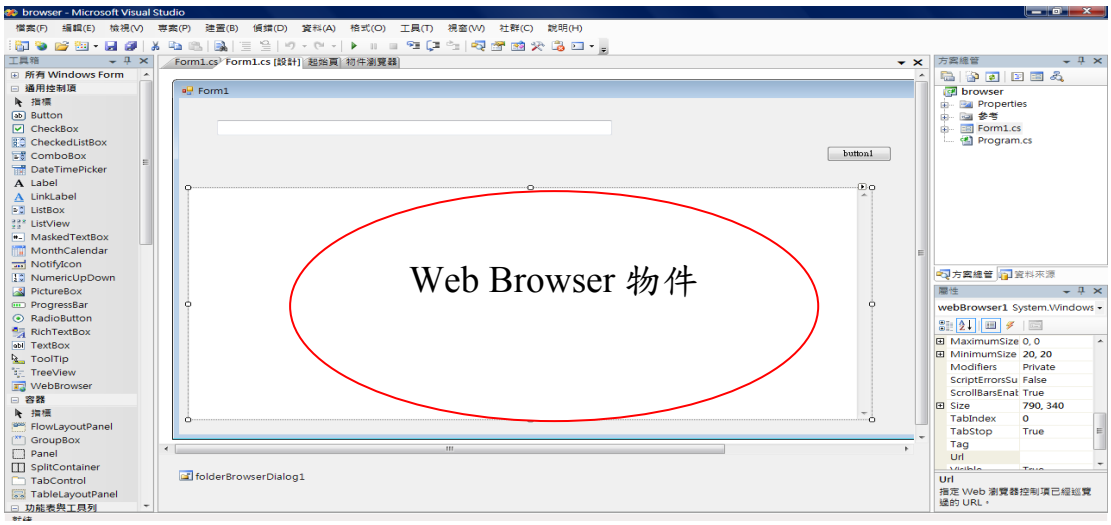


圖 6.3-1、系統開發畫面

執行地下水位資料下載程式之後，本程式自動將指定的測站的歷年地下水位資料及各雨量站資料，轉存成檔案(如圖 6.3-2)，減少人工資料下載的作業。對於本計畫執行所需要之基礎資料的自動獲取，有相當效率上的提昇。

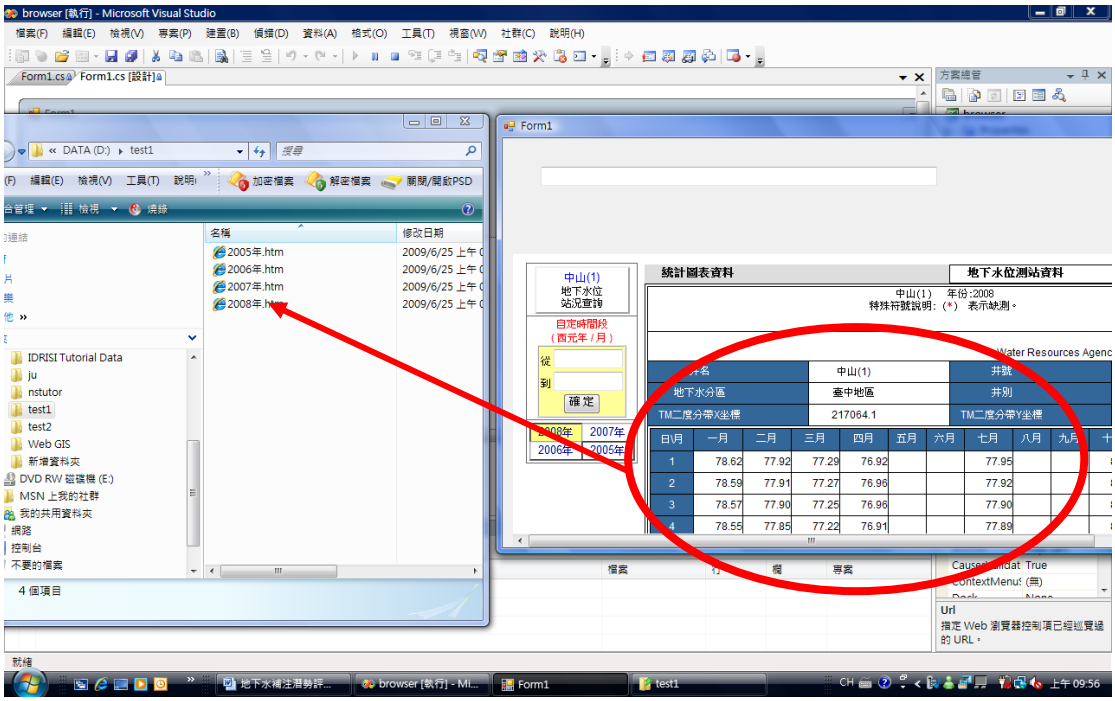


圖 6.3-2、將網頁內容轉存成檔案

在完成地下水位資料之自動下載後，本計劃另外建立解析程式解析下載之 HTML 格式之地下水位與雨量資料，目前先以 Microsoft Access 資料庫軟體儲存之，在資料表中建立時間與對應之時序值欄

位，如圖 6.3-3 所示，其為雨量資料庫中特定雨量站之資料庫資料。除了水利署提供之雨量資料外，本計劃另行蒐集了中央氣象局於濁水溪沖積扇之雨量資料，在此也一併儲存於雨量資料庫中。此項時序之地下水位資料庫與雨量資料庫之建立，以及對應之自動擷取程式，可以確保未來資料之更新。後續當使用者應用本作業平台進行水位歷線法程式之計算時，平台可自動從資料庫讀取對應之時序資料，供水位歷線法程式進行計算，藉此減輕使用者於時序之地下水位資料與雨量資料之準備。

整體而言，本作業平台、水文資料自動擷取程式與水文水資源資料管理供應系統三者之關係，如圖 6.3-4 所示，透過網際網路能定期將水文水資源資料管理供應系統之最新資料擷取並存入本地端之資料庫中，方便後續供評估作業平台使用。

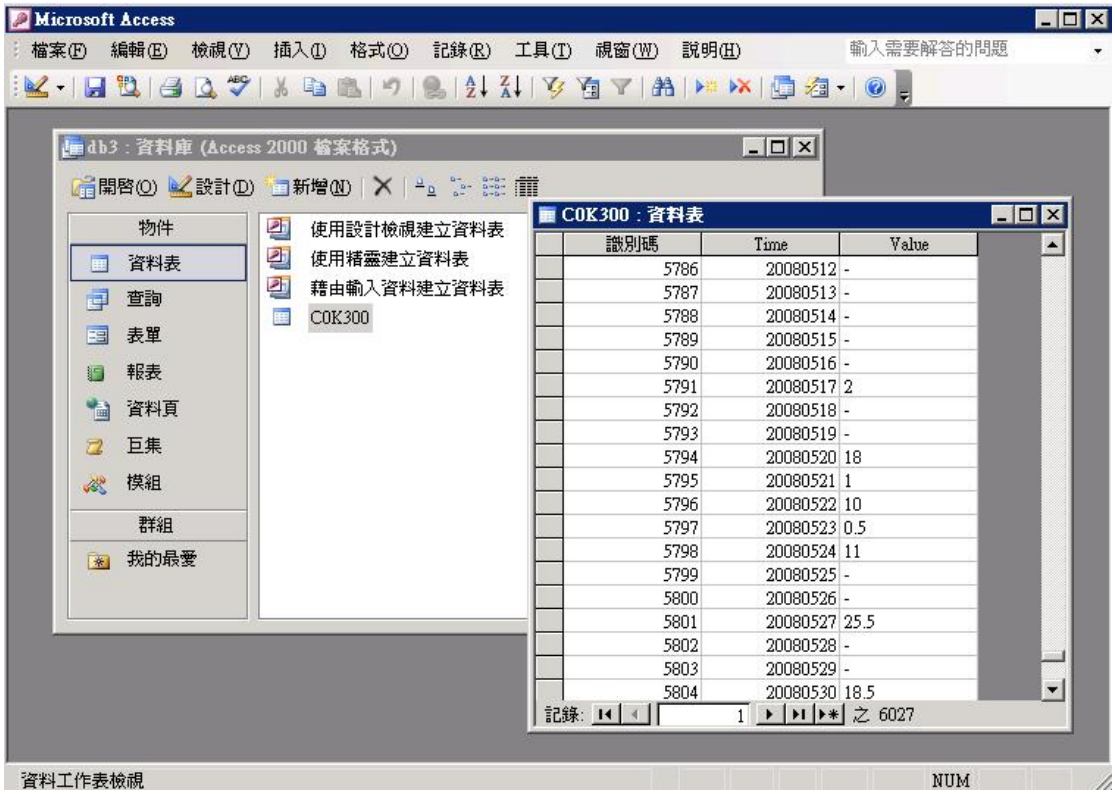


圖 6.3-3、雨量資料庫(C0K300)範例

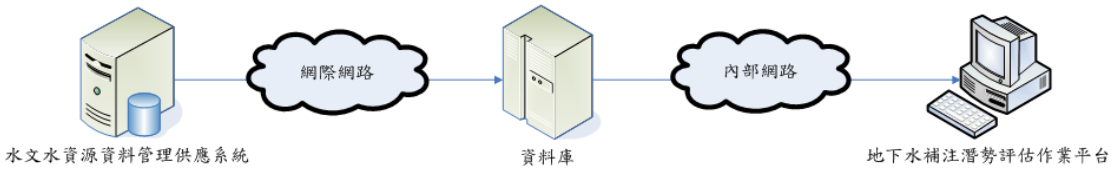


圖 6.3-4、地下水補注潛勢評估作業平台網路架構圖

(二) 水文地質參數資料庫

同樣的，本計劃將已收集之水文地質參數，如地下水井之座標、儲水係數及透水係數等，在此同樣存放於 Microsoft Access 資料庫軟體中，依各站建立對應之相關水文地質參數，可供後續計算評估使用。

(三) GIS 圖層資料庫

本計劃收集濁水溪沖積扇地下水區之所有 GIS 圖資，其中包含該區域的水區邊界圖及網格圖，以及土地利用、表層土壤種類、河系、平均降雨量、降雨與地下水位相關系、透水係數、單位蓄水量變化及硝酸鹽濃度等八種圖層，其分別對應前述之八種補注潛勢影響因子，在此建立 GIS 圖層資料庫。方便後續使用者從系統上載入該區之地下水區各種 GIS 圖資，以利各水區之 GIS 圖資之儲存、管理與分享。

由於影響補注潛勢因對於不同專家而言，或於不同水區上均有不同之考量，本計劃目前規劃八種補注潛勢影響因子，作為濁水溪沖積扇之主要因子，因此目前僅存放八項因子之圖資。但後續仍可因應水區之擴張，或不同專家學者之意見，存放其他影響因子之 GIS 圖資。

6.3.2 使用者介面規劃

地下水補注潛勢評估作業平台工作項目中第(4)項基礎使用者介面與第(5)項資料上傳使用者介面兩者，均為評估作業平台之前處理使用者介面(User Interface, UI)，其執行流程如圖 6.3-5 所示。由流程顯示，本評估作業平台首先可區分為兩個模組分別為「水位歷線法補注評估」模組及「地下水補注潛勢評估」模組，對於兩種模組均有「使用者自行建立」與「資料庫自動建立」兩類輸入方式，藉由不同輸入方式提供使用者使用上的彈性。

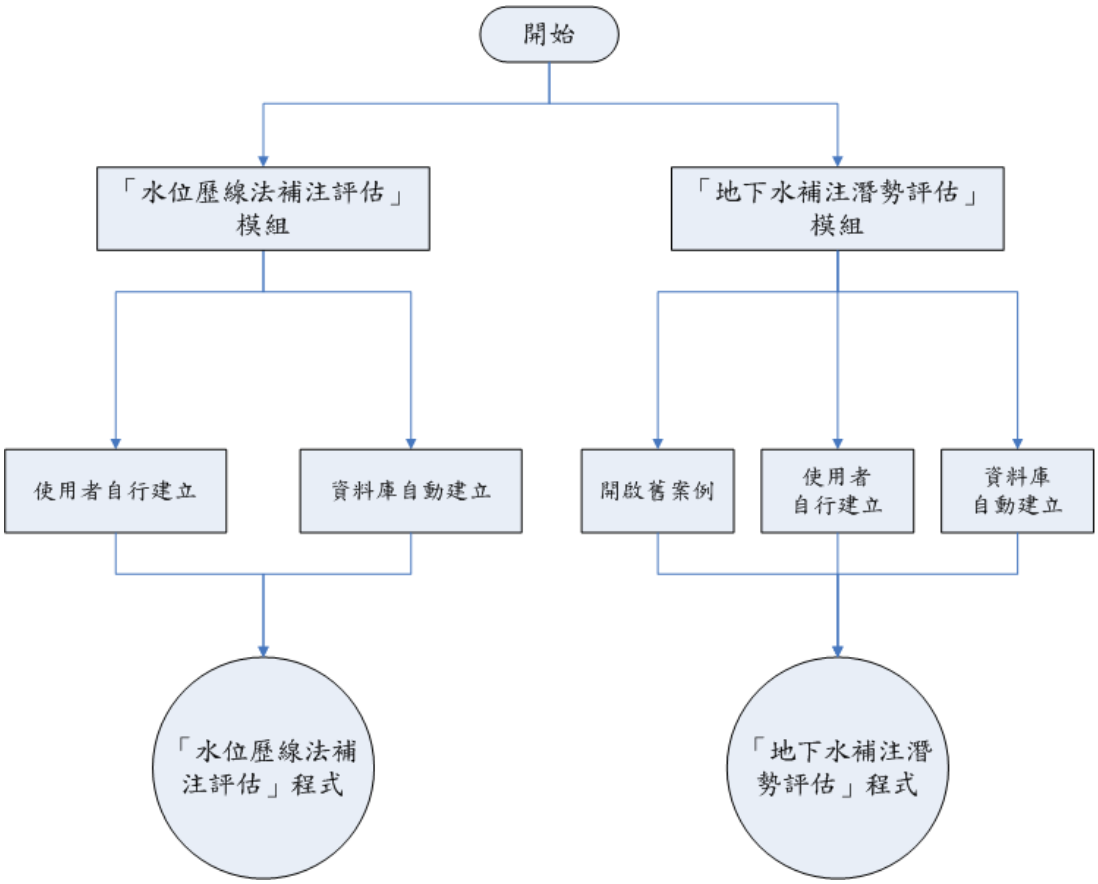


圖 6.3-5、地下水補注潛勢評估作業平台使用者介面執行流程圖

首先，如圖 6.3-6 所示，由 SuperGIS 之操作介面上啟動「地下水補注潛勢評估作業平台」之按鈕，作業平台使用者介面之主選單中可選擇「水位歷線法補注評估」或「地下水補注潛勢評估」兩種。

在各計算模組中所包涵的兩種輸入方式，「資料庫自動建立」介面是提供使用者僅需簡單設定幾項參數，而作業平台則會自動透過電腦程式由前述 6.3-1 小節描述之相關資料庫，補足計算所需之所有資料；而「使用者自行建立」介面則是提供使用者可自行以規定格式，輸入計算所需之資料，藉此作業平台在使用方便性與系統模擬能力兩者間取得平衡。以下將針對「水位歷線法補注評估」及「地下水補注潛勢評估」兩使用者介面各自描述。

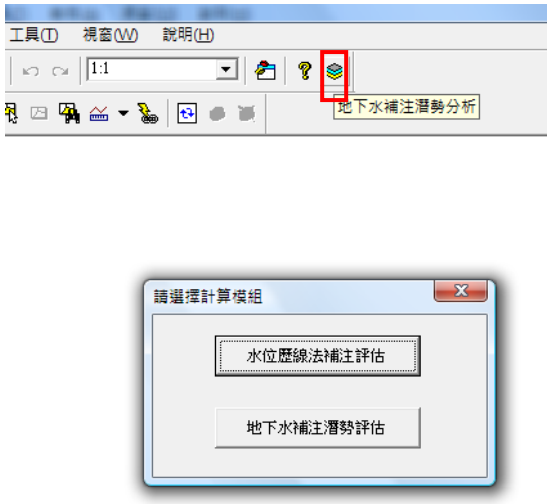


圖 6.3-6、地下水補注潛勢評估作業平台模組主選單

(一)「水位歷線法補注評估」模組

在主選單中選擇「水位歷線法補注評估」模組，便需選擇輸入方式，分別為「使用者自行建立」或「資料庫自動建立」兩者，如圖 6.3-7 所示。

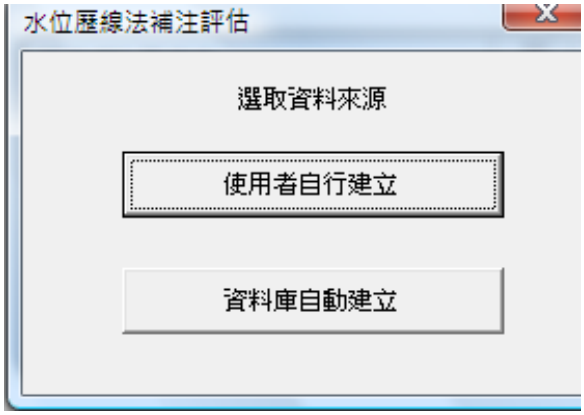


圖 6.3-7、水位歷線補注評估選取資料來源介面

1. 使用者自行建立

首先，使用者必須輸入欲計算之地下水區、運算型態及案例名稱(如圖 6.3-8 所示)，案例名稱亦會作為硬碟上之目錄。

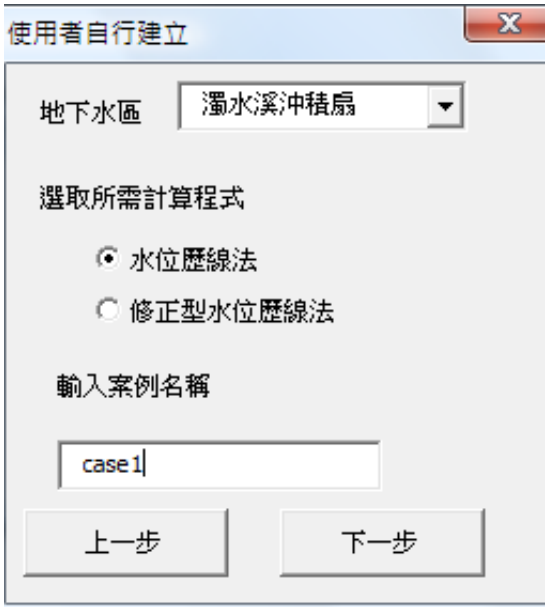


圖 6.3-8、使用者自行建立資料選取介面

其次，當完成前述之設定後，系統即自動於硬碟中建立對應之目錄，並依據選定之運算型態(「水位歷線法」或「修正型水位歷線法」)而有不同之輸入檔上傳欄位，分別由圖 6.3-9 與 6.3-10 所示，其中水位歷線法需上傳「水井資料」及「時序資料」兩者；而修正型水位歷線法因考量各井間之側向交換量，因此除了前述之兩類資料外，必須多上傳「相鄰水井資料」等相關資訊。使用者可以自行輸入檔案之路徑與檔名之方式，或以瀏覽的方式點選告知，將其上傳輸入並計算。介面上之「檢視輸入檔範例」按鈕，則提供使用者檢視程式輸入檔之設定說明，幫助使用者建立符合程式規範之輸入檔。

最後，完成輸入後，點選「開始計算」按鈕即開始計算，直至出現計算完畢訊息視窗，如圖 6.3-11 所示。

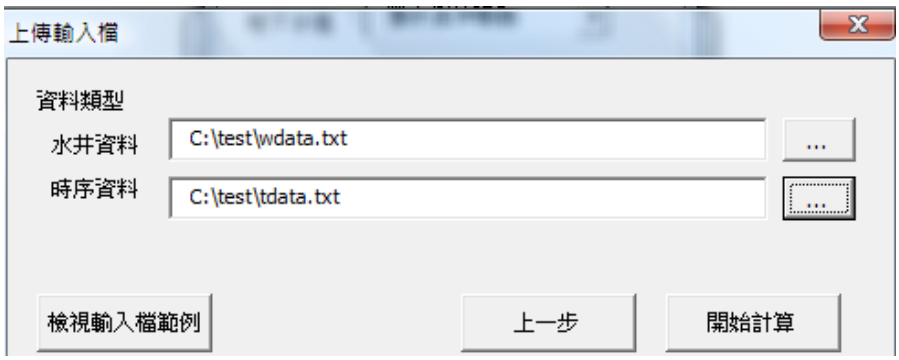


圖 6.3-9、水位歷線法上傳輸入檔介面

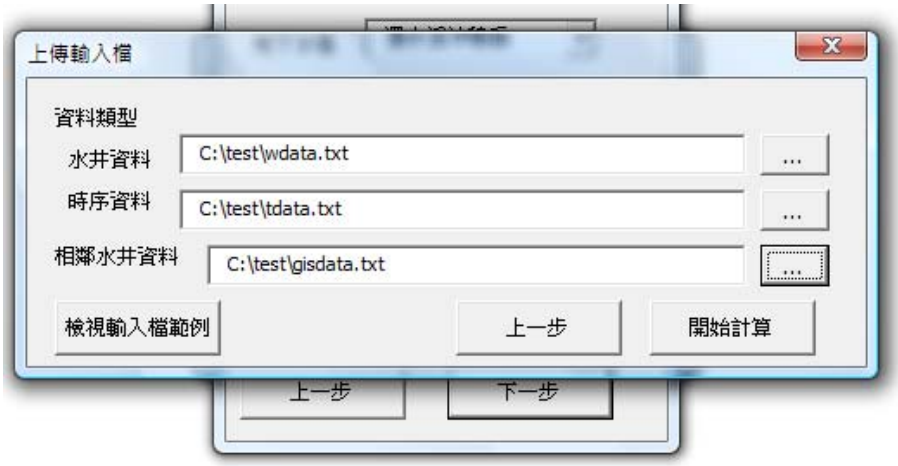


圖 6.3-10、修正型水位歷線法上傳輸入檔介面



圖 6.3-11、程式計算完畢訊息介面

2. 資料庫自動建立

首先，使用者必須輸入欲計算之地下水區、運算型態、案例名稱與計算之年份(如圖 6.3-12 所示)，案例名稱亦會作為硬碟上之目錄，系統會自動依據案例名稱建立對應之目錄。

其次，作業平台可依據選定之水區，並對照前述建立之地下水位資料庫，列出該區之表層觀測井井號(如圖 6.3-13 所示)，使用者可依據使用需求選取欲計算之觀測井。當選定完畢後，系統會自動依據挑選之觀測井座標，自動繪製與劃分對應之徐昇氏網格(Thiessen's Polygon)，並計算出各井之控制面積、鄰近井位之直線距離及相鄰邊長等空間幾何資訊。

最後，使用者需選定雨量資料之型態，其中包含「全區平均

雨量」、「平原區平均雨量」、「山區平均雨量」或以「自選雨量站」四種。自選雨量站可以下方之下拉式選單，挑選特定雨量站之觀測資料。「平原區平均雨量」則是以位在濁水溪沖積扇水區內部之所有雨量觀測站，自動由雨量資料庫中擷取，並以面積加權之方式計算。「山區平均雨量」則是以濁水溪沖積扇扇頂以上之其他雨量觀測站進行計算。「全區平均雨量」則是綜合平原區與山區之所有雨量觀測站來進行計算。



圖 6.3-12、資料庫自動建立資料選取介面

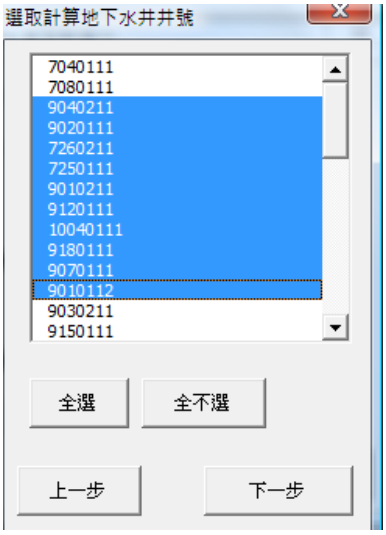


圖 6.3-13、選取計算地下井井號資料介面

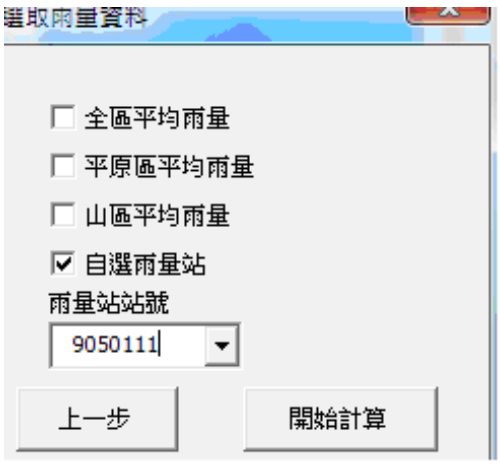


圖 6.3-14、選取雨量資料介面

(二)「地下水補注潛勢評估」模組

在主選單中選擇「地下水補注潛勢評估」模組，便需選擇輸入方式，分別為「開啟舊案例」、「使用者自行建立」或「資料庫自動建立」三者，如圖 6.3-15 所示。

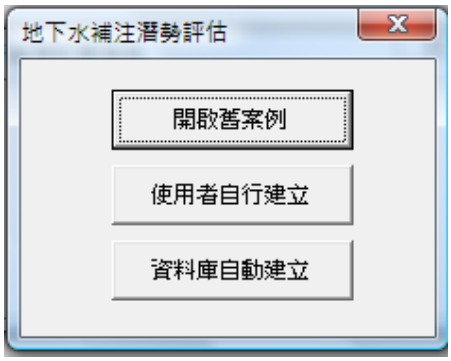


圖 6.3-15、地下水補注潛勢評估介面

1. 開啟舊案例

當選取「開啟舊案例」後，使用者可由此查看先前建立之案例評估結果。

2. 使用者自行建立

當使用者選取「使用者自行建立」後，使用者必須自行建立符合本作業平台規範之輸入檔，圖 6.3-16 即用以輸入自行建立之輸入檔。

首先，使用者需提供案例名稱，系統可依據案例名稱建立對應之目錄。其次，使用者需依據選定之水區，提供涵蓋水區之網格圖。最後，使用者需定義欲進行分析之影響因子名稱、因子分數表及該項因子之影響權重，權重值可為任意大於零之正實數。權重輸入完畢後，介面下方之「更新」鍵可計算出各因子間的權重百分比，按下「補注潛勢評估計算」即可呼叫計算程式，計算各網格之補注潛勢評估分數。

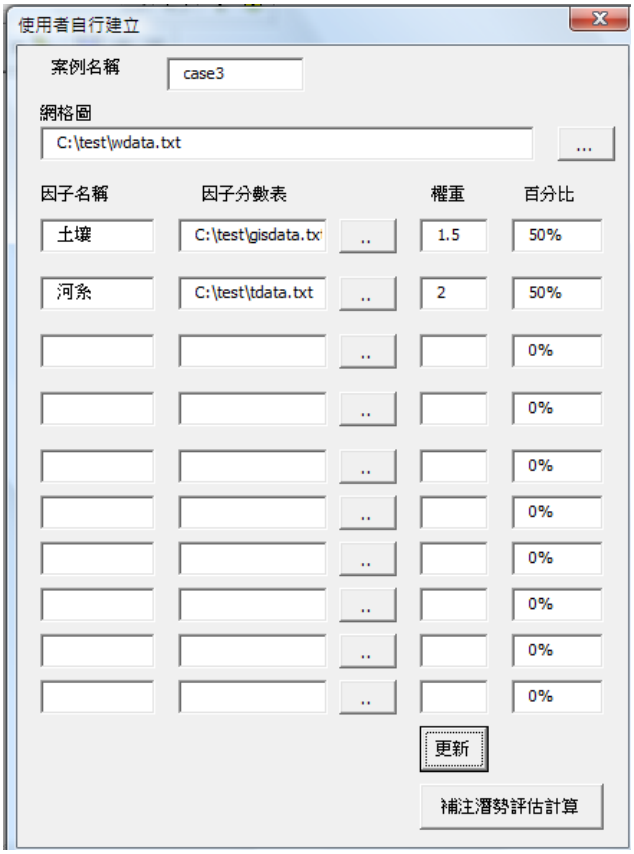


圖 6.3-16、使用者自行建立設定介面

3. 資料庫自動建立

當使用者選取「資料庫自動建立」後，使用者僅可應用系統預設之影響因子進行評估，目前本計劃規劃八種影響因子，如圖 6.3-17 所示。

首先，使用者需提供案例名稱，系統可依據案例名稱建立對應之目錄。其次，使用者僅需由預設之影響因子中，挑選待評估之影響因子。最後，當完成影響因子之挑選後，使用者需針對挑選之影響因子給定影響權重(如圖 6.3-18 所示)。本作業平台可依據前述選定之預設影響因子，提供對應之因子分數表，並將相關資訊以平台規範之格式製作成輸入檔，因此可以大幅減少使用者之負擔。

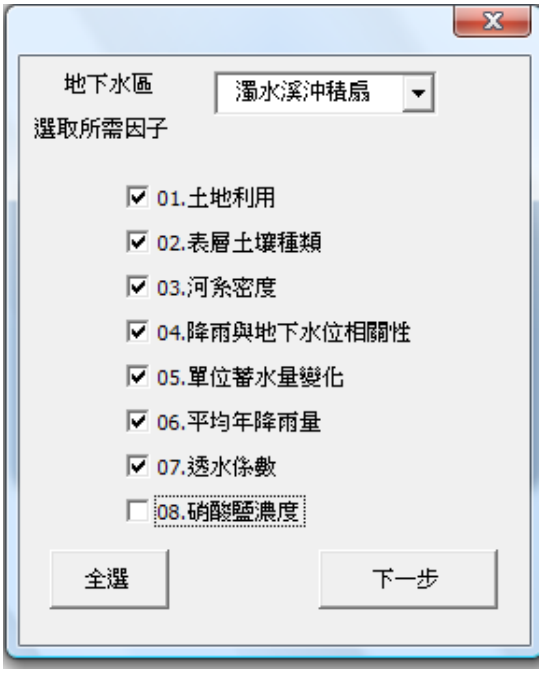


圖 6.3-17、選擇地下水區及補注潛勢因子介面

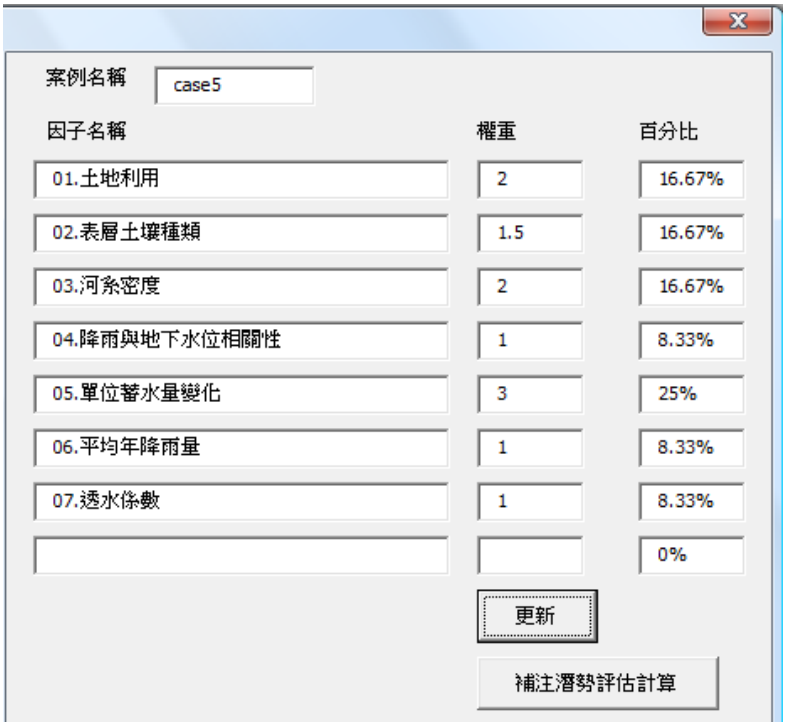


圖 6.3-18、補注潛勢因子設定介面

第七章 濁水溪沖積扇地下水數值模式建置

本章將說明濁水溪沖積扇之地下水數值模式建置流程及步驟。首先在 7.1 節簡介本計劃所採用之地下水數值模式 MODFLOW 之發展歷程，7.2 節說明本計劃地下水數值模式之建置流程及步驟，最後於 7.3 節說明本計劃將以前一節之建置流程建置濁水溪沖積扇之地下水流數值模式；依照計畫工作項目，本年度工作著重於濁水溪沖積扇地下水流數值模式之架構建置與相關參數輸入，因此 7.3 節乃著重於模式建置之流程說明為主。

7.1 地下水數值模式發展簡介

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，含水層種類可分為非受壓、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 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 5.0 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，因此本年度將採用美國地質調查局(U.S.G.S)發展的 MODFLOW 程式，先建立濁水溪沖積扇數值模式之架構，未來將再配合修正型地下水位歷線法推估之補注量及抽水量，作為數值模式之輸入值。

7.2 地下水數值模式建置流程

MODFLOW 的輸入資料包括一般地下水模式必需包含的初始條件、邊界條件與地下含水層地文參數（透水係數、含水層厚度等）。輸出項則主要為每一層地下含水層之水頭分佈，其他細節部分則包含了特定位置的洩降、模式水平衡等。茲將本模式所需之重要工作流程整理條列分為三大項：邊界條件與格網劃分、模式之輸入資料及參數檢定(如圖 7.2-1 所示)。

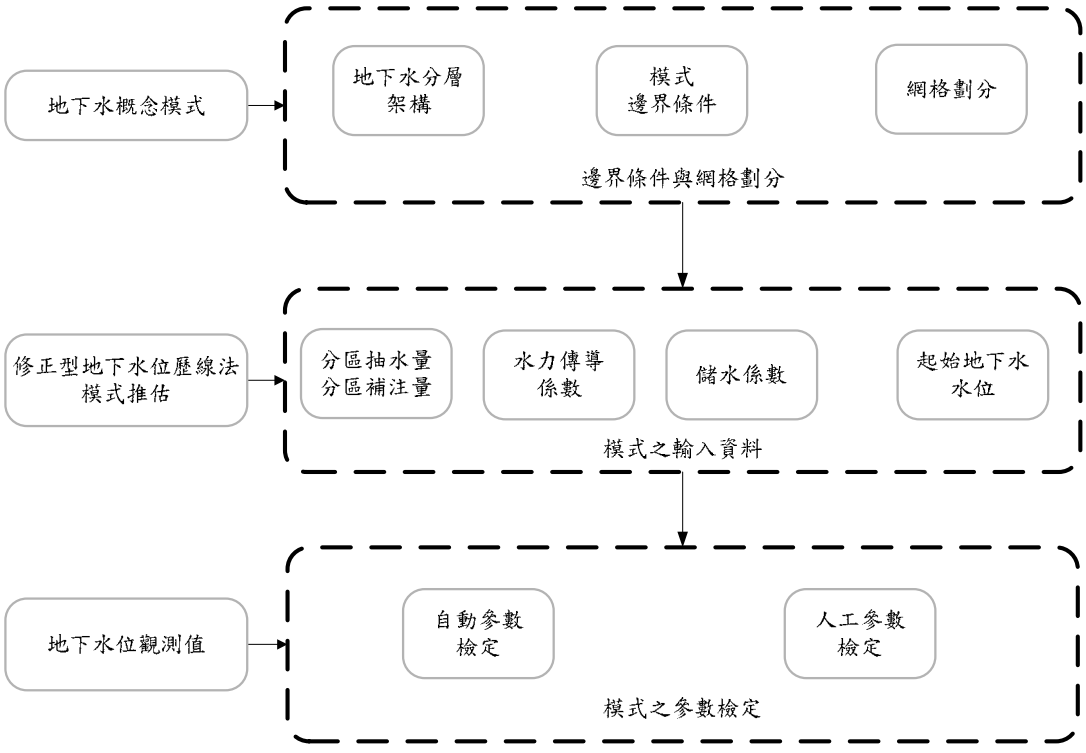


圖 7.2-1、地下水數值模式建置流程示意圖

本計劃在今年度將先建置濁水溪沖積扇之地下水數值模式，下一節將說明建置此模式所需之工作內容。

7.3 濁水溪沖積扇地下水數值模式建置

(一)邊界條件與格網劃分

1. 地下分層架構

MODFLOW 模擬的設定上，可將地下分層設定為受壓或非受壓含水層，並需輸入各分層之上部和底部之高程值。於經濟部中央地質調查所於民國 88 年完成之「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」中，以濁水溪沖積扇 72 站地層柱狀圖，完成平原地區水文地質剖面一至十二(深度至 300 公尺左右)，再依據丘陵及河谷區之 8 站地層柱狀圖，繪製水文地質剖面十三至十五（深度約達 250 公尺左右)，劃分出濁水溪沖積扇概念分層，依深度分別為含水層一、阻水層一、含水層二、阻水層二、含水層三、阻水層三及含水層四，濁水溪沖積扇模式共分為第一至七分層，如圖 7.3-1 所示。

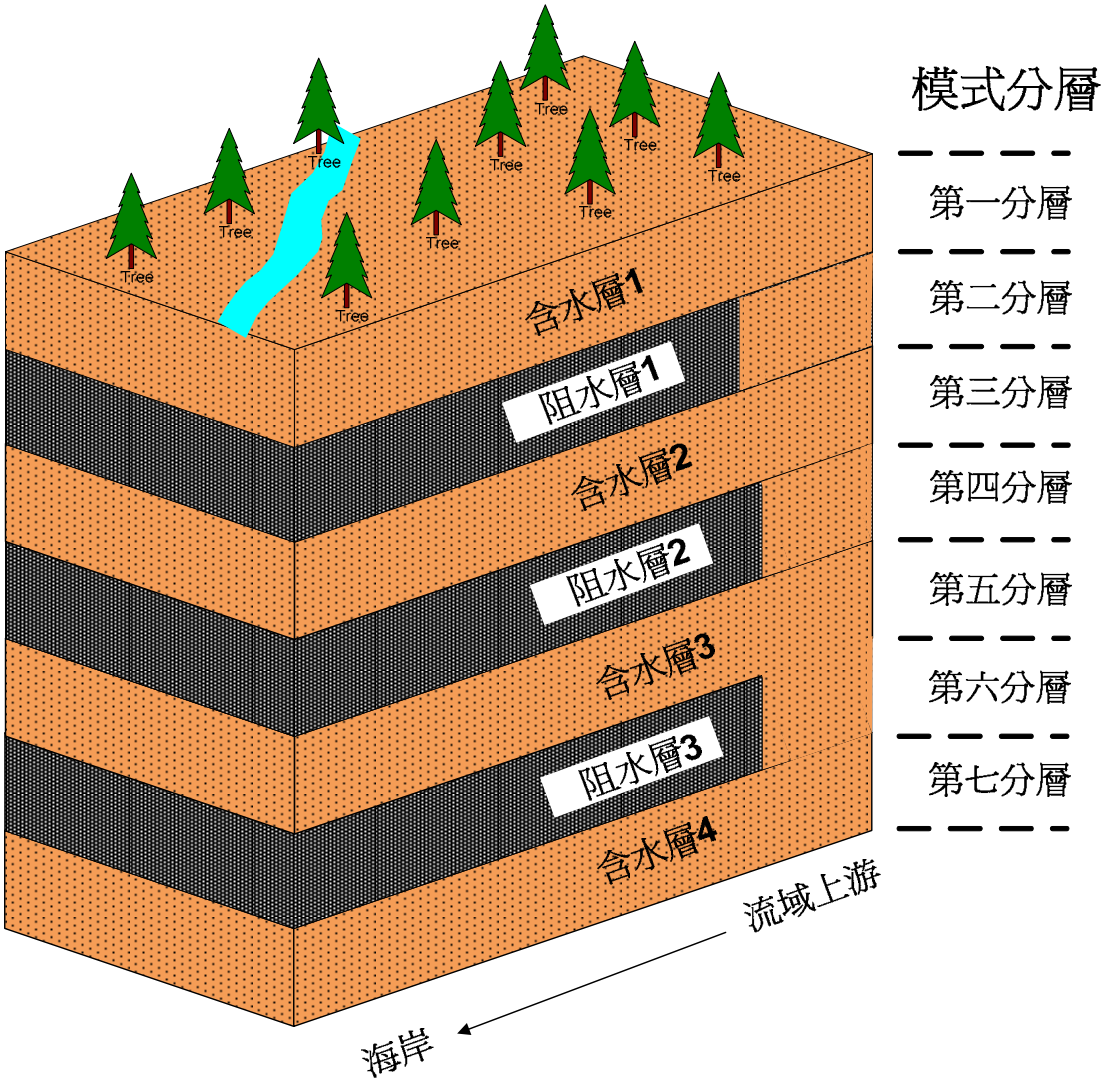


圖 7.3-1、濁水溪沖積扇概念分層

2. 模式邊界條件

根據中央地質調查所(1999)對於濁水溪沖積扇地下水邊界分析研判，提出概念性之邊界，如圖 7.3-2。

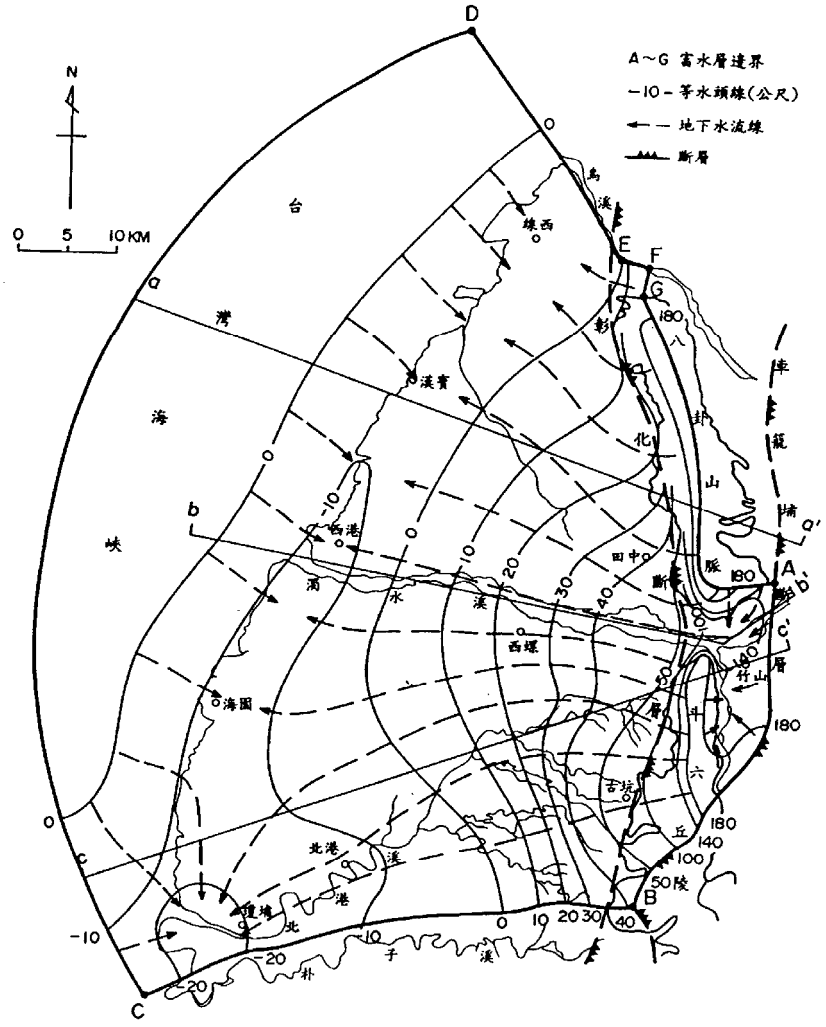


圖 7.3-2、濁水溪沖積扇地下水邊界之概念圖

a. AB 段

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

b. BC 段

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

c. CD 段

此段為含水層尖滅封閉於阻水層之位置，屬於零流邊界。

d. DEF 段

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

e. FG 段

本段邊界大致與地下水等水位線平行，隨時間之不同水位有昇降變化。

f. GA 段

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

3. 格網劃分

模式格網以 1 公里乘 1 公里之格網建構，所以每一層格網為南北方向 85 列與東西方向 75 行，共七層格網。如圖 7.3-3 所示。

並且由上述邊界條件，在 MODFLOW 模式中設定，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。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 7.3-4 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 7.3-5 所示)。圖中藍色網格為定水頭邊界，灰色網格為零流量。圖 7.3-6 所示為第 47 列剖面圖，水平向長度為垂向長度 30 倍。

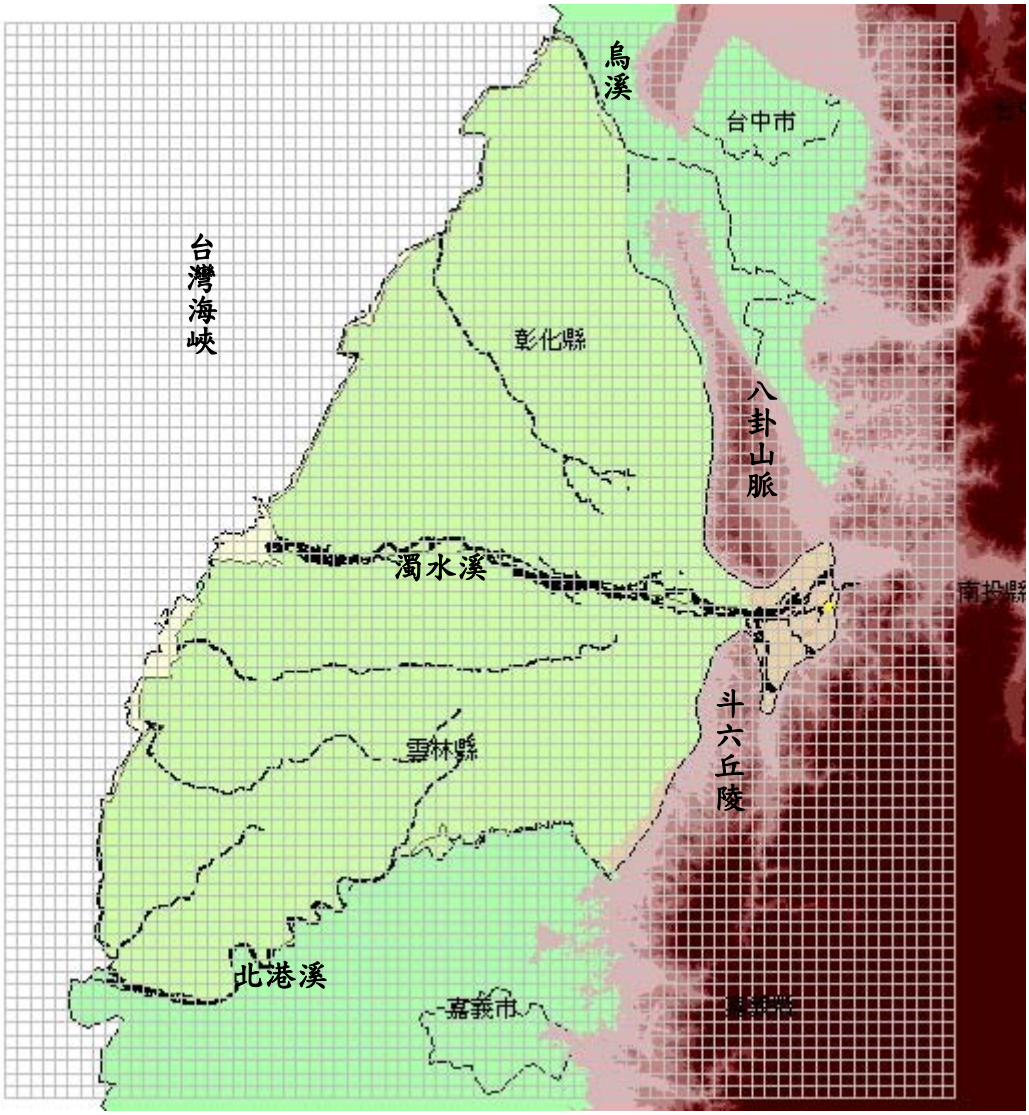


圖 7.3-3、濁水溪沖積扇模式之格網劃分

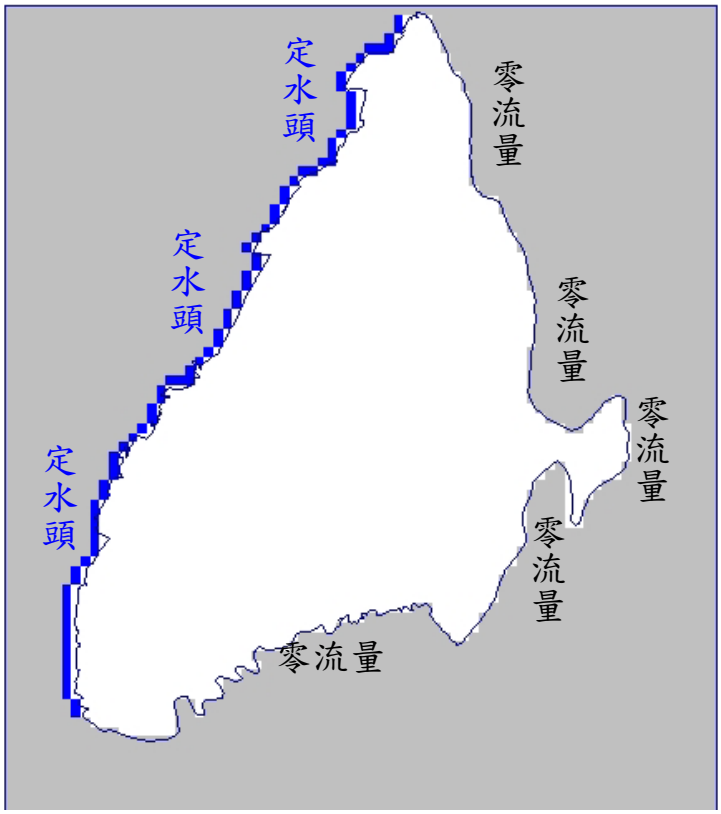


圖 7.3-4、濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網劃分

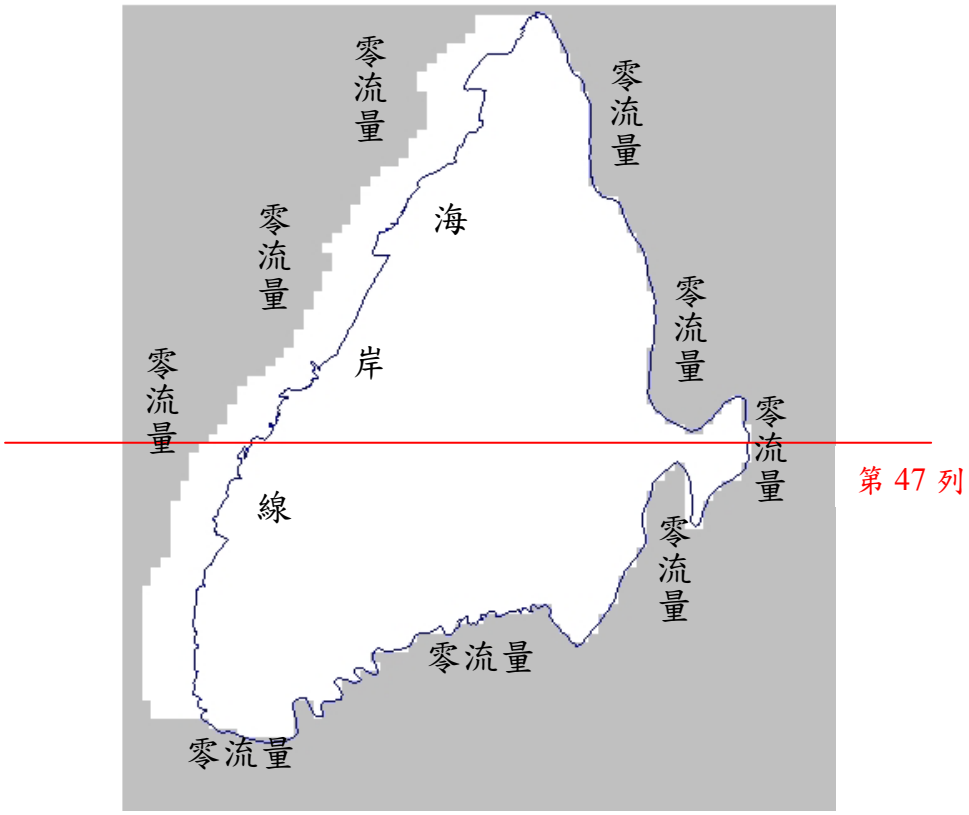


圖 7.3-5、濁水溪沖積扇模式第 2~7 分層格網劃分

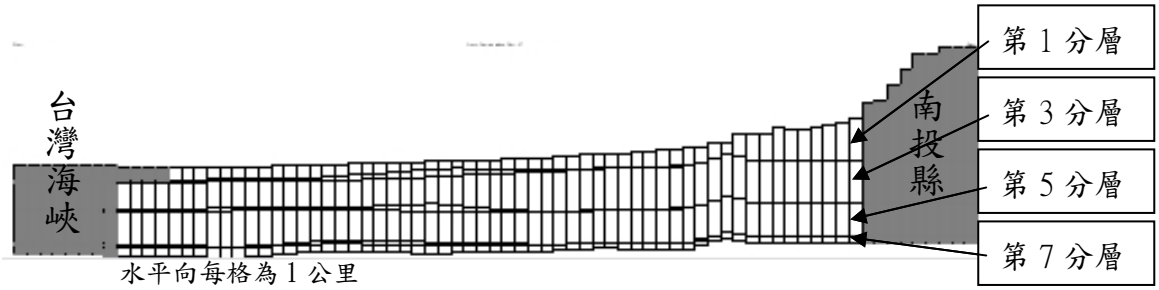


圖 7.3-6、濁水溪沖積扇模式第 47 列格網劃分剖面圖

(二)模式之輸入資料

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。以下將以濁水溪沖積扇為例，說明 MODFLOW 模式所需模式架構之地下水力學參數及源匯項輸入資料。各輸入資料敘述如下:

1. 透水係數

觀測站網建置時，各觀測井必進行單井或複井抽水試驗，因此分析所得各含水層之透水係數相當多，故後續以徐昇氏法分區得到透水係數分布，圖 7.3-7~圖 7.3-10 分別為模式第 1、3、5 及 7 分層之透水係數分區圖。而模式第 2、4、6 分層在下游部份為阻水層，其阻水層透水係數為參考 Fundamentals of Ground Water (Franklin W. Schwartz and Hubao Zhang, 2003)，設定為 4×10^{-3} (公尺/天)。此外，前述抽水試驗所得結果為水平向之透水係數，垂向透水係數則假設為水平向之 1/10。

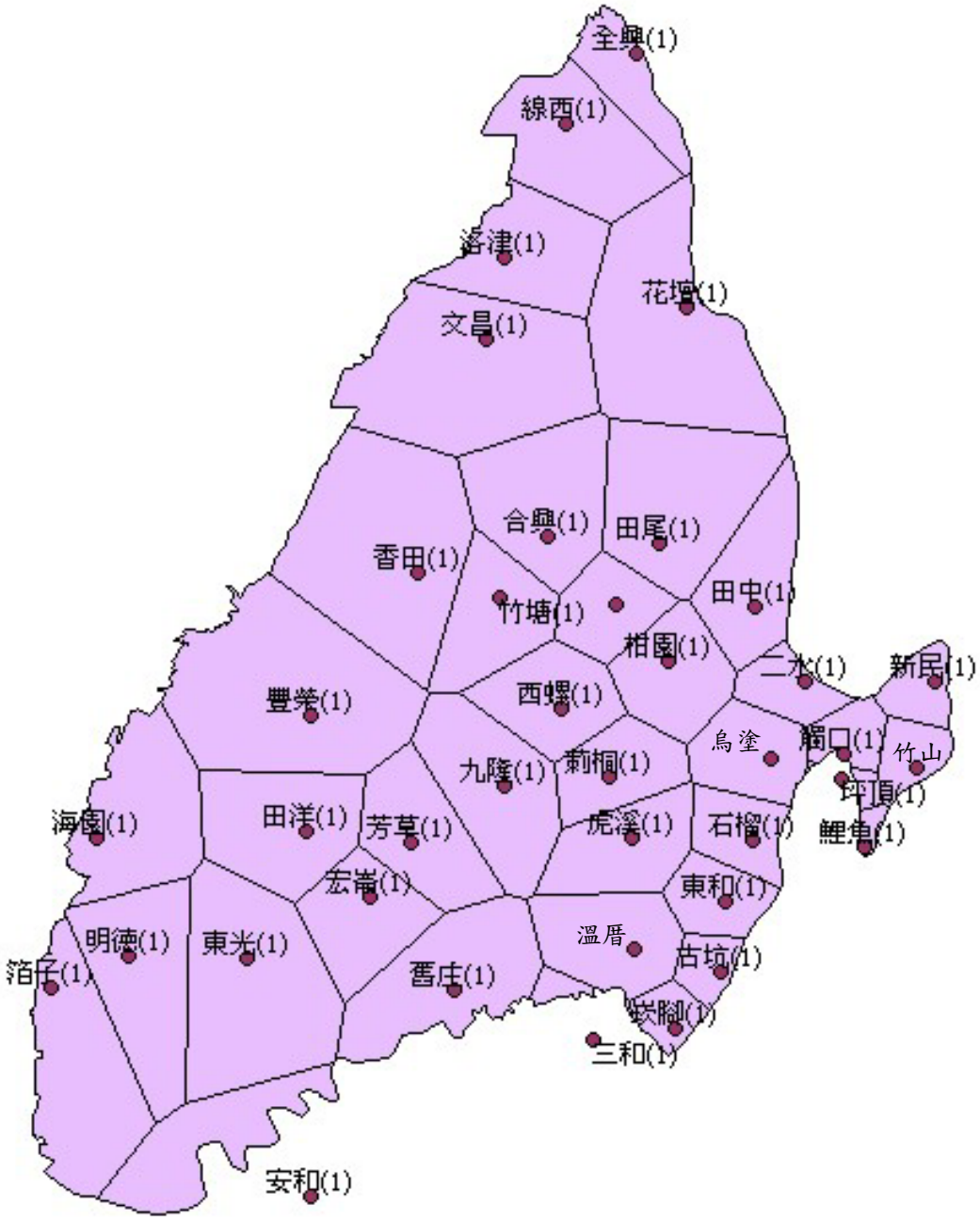


圖 7.3-7、濁水溪沖積扇模式第 1 分層徐昇氏網格分區

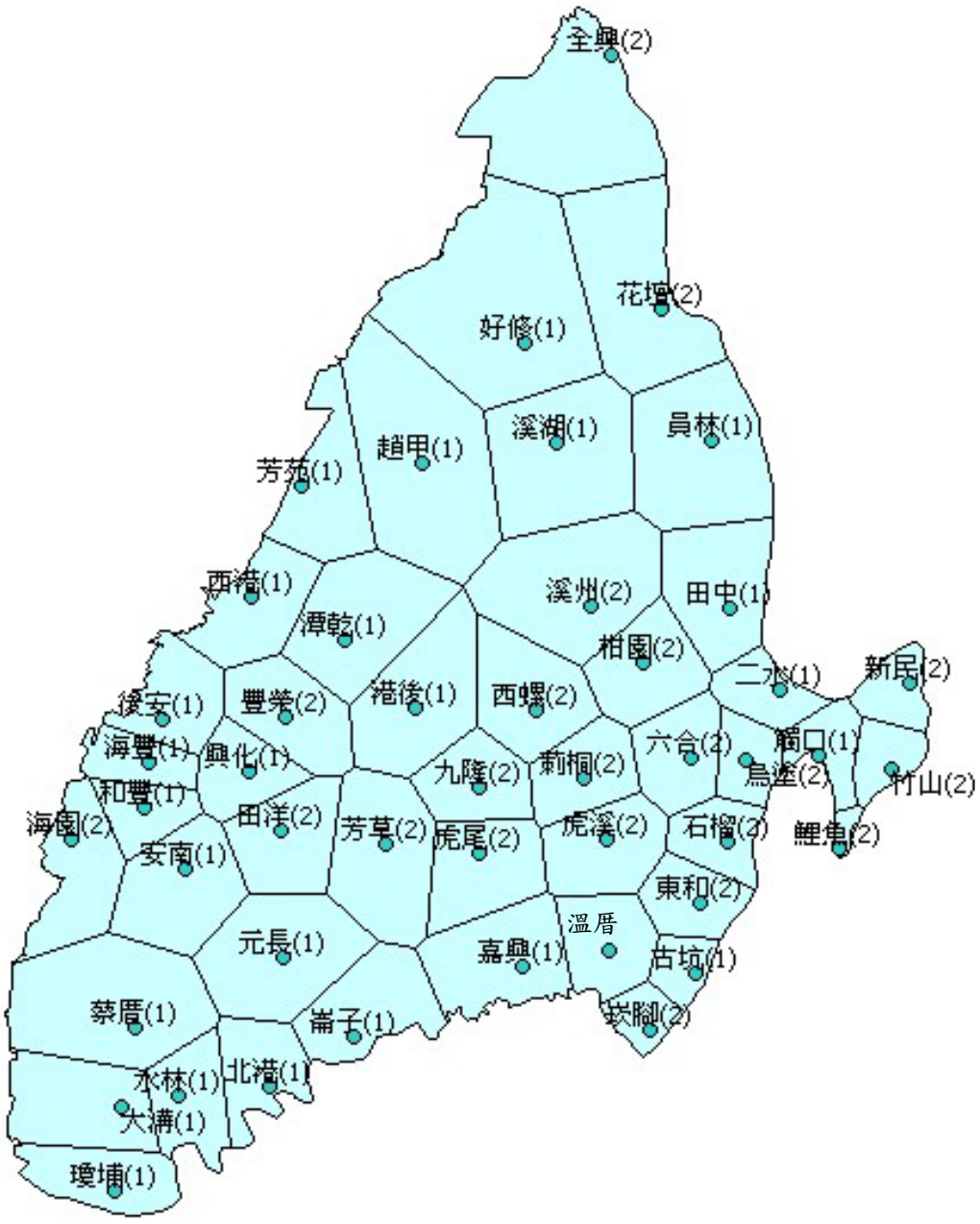


圖 7.3-8、濁水溪沖積扇模式第 3 分層徐昇氏網格分區

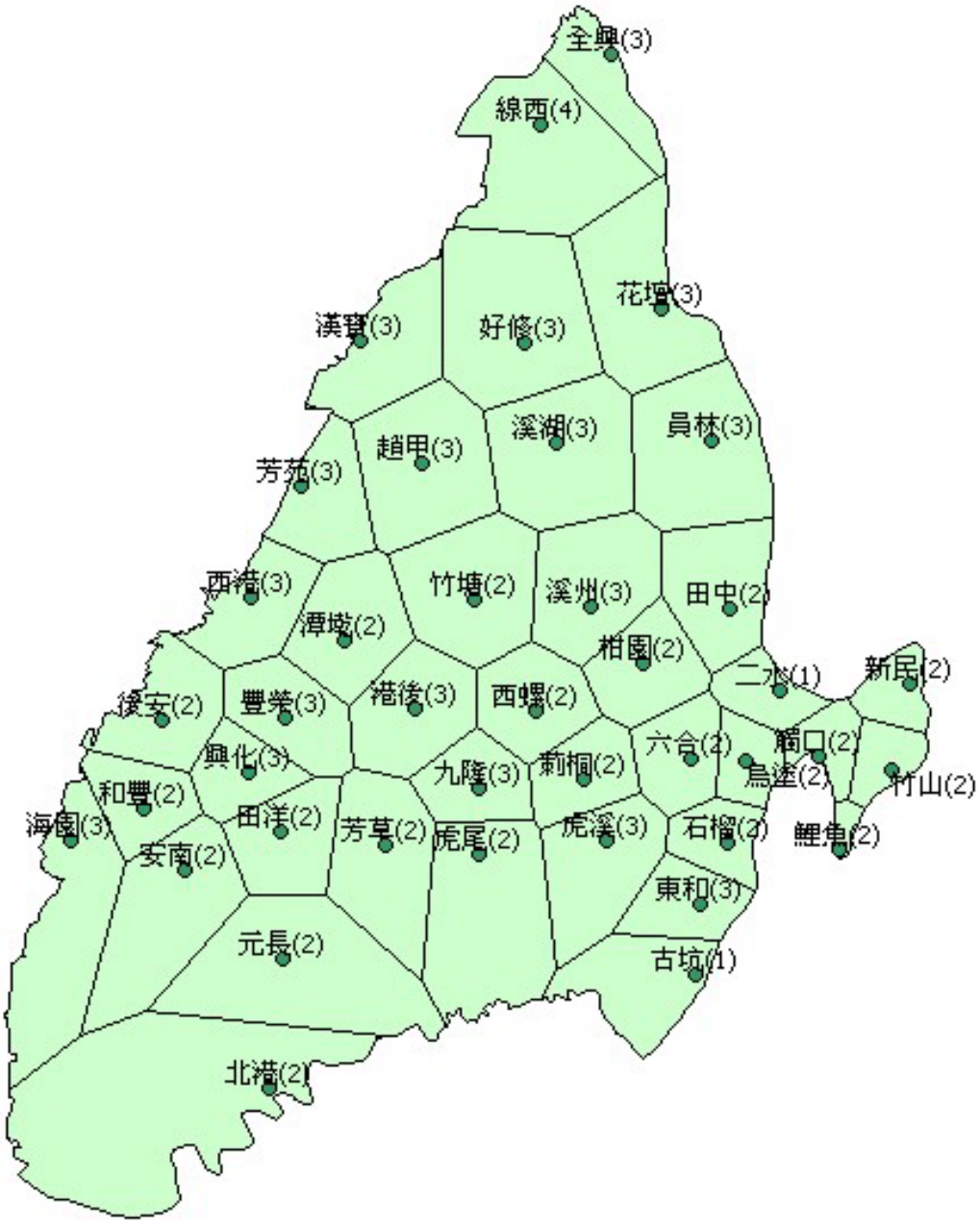


圖 7.3-9、濁水溪沖積扇模式第 5 分層徐昇氏網格分區

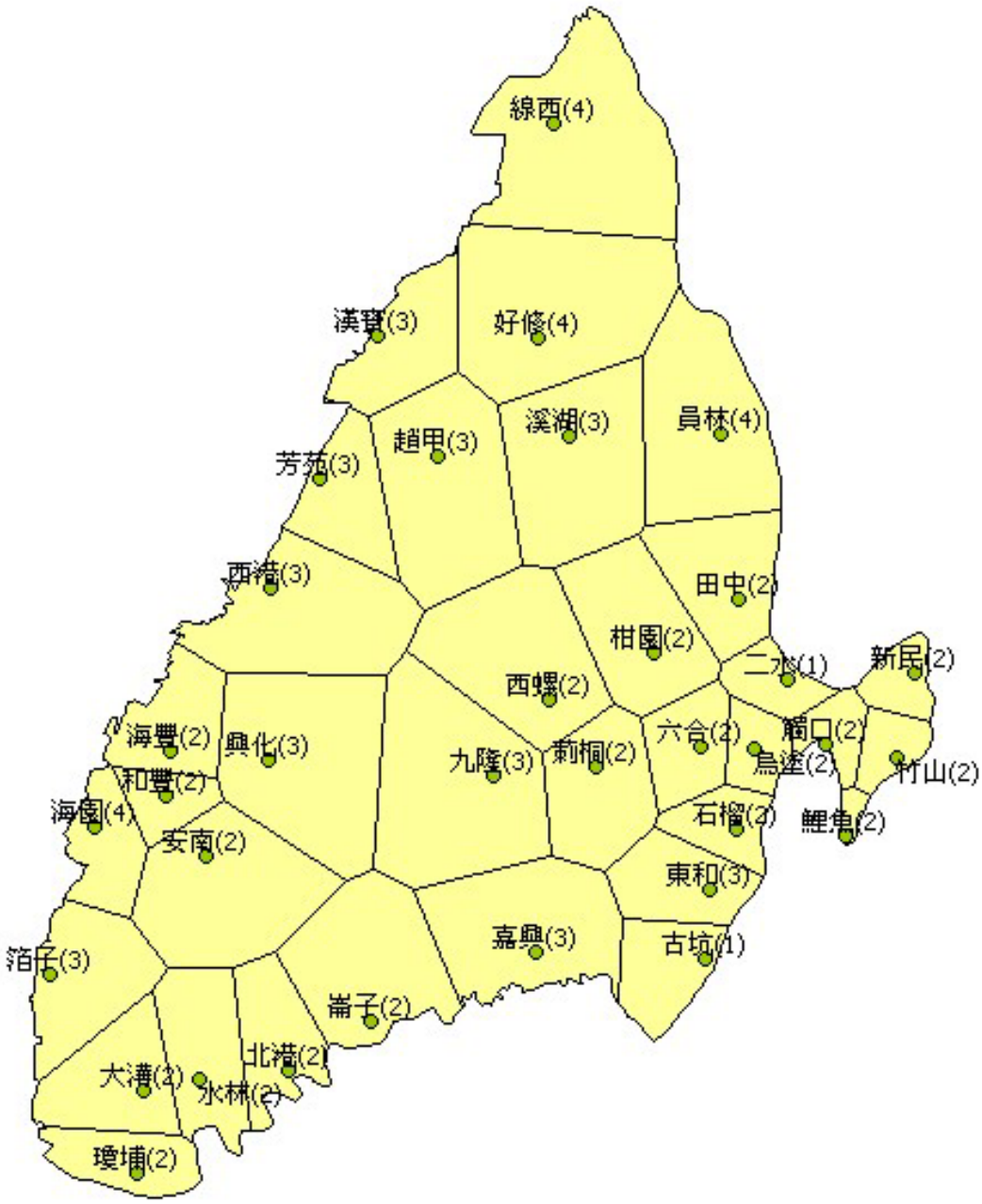


圖 7.3-10、濁水溪沖積扇模式第 7 分層徐昇氏網格分區

2. 儲水係數

由於儲水係數必須進行複井抽水試驗才能求得，但在觀測站網建置時，僅有 1/4 到 1/5 的觀測井進行複井抽水試驗，較透水係數資料少，所以將綜合考量試驗所得之觀測值與過去相關研究，配合分區或空間內插方法分配至各分區，並於後續模擬時，進行儲水係數之參數檢定與校正。由於本年度先進行穩態模式建構，所以尚不需要輸入儲水係數，將於後續年度計畫中進行暫態模擬時，予以檢定。

3. 起始地下水水位

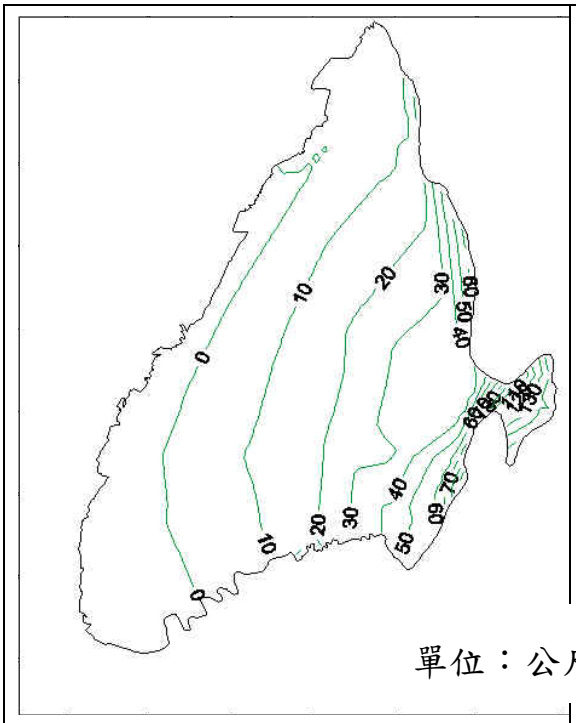
由於本年度先進行穩態模擬，所以其起始地下水位僅作為求解穩態水位之初始值。未來於暫態模擬時，將以濁水溪沖積扇有完整水位資料之年份，作為模式之起始模擬時間。

4. 抽水量、補注量

由於現地抽水量資料並不足夠，初步以民國 91 年水利署之「地下水資源整體營運規劃與綜合評估」報告中之濁水溪沖積扇模式之抽水量及補注量作為初始輸入值。未來將再配合修正型地下水位歷線法推估之補注量及抽水量，作為數值模式之抽水量與補注量輸入值。

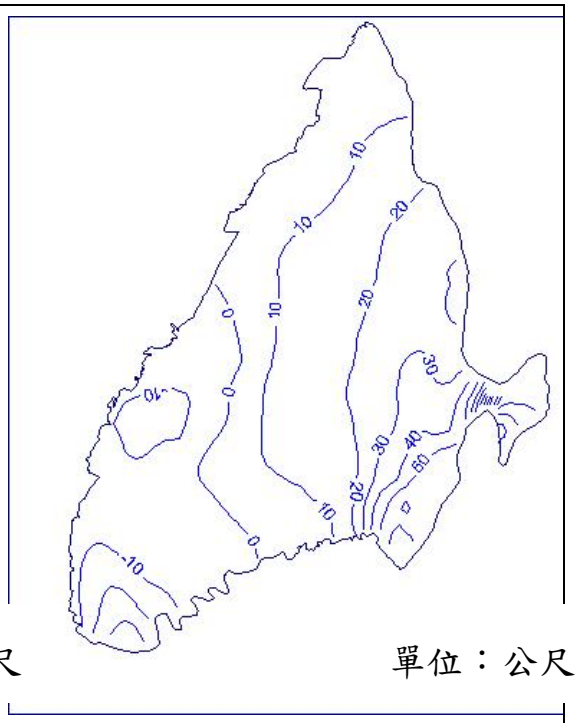
5. 模式之初步模擬

本年度先進行穩態初步模擬，以民國 89 年至民國 96 年濁水溪沖積扇各觀測井之觀測水位平均值，作為穩態模式之參照水位，初步人工率定之結果如圖 7.3-11 至 7.3-18 所示：



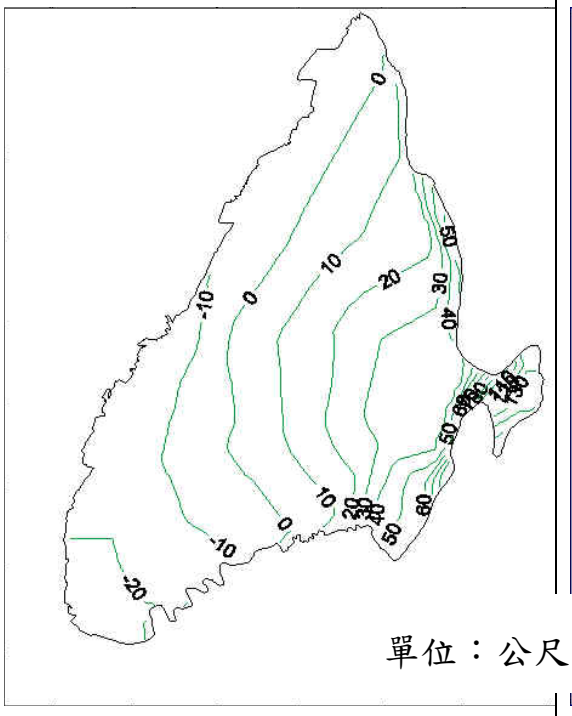
單位：公尺

圖 7.3-11、第 1 層平均觀測水位



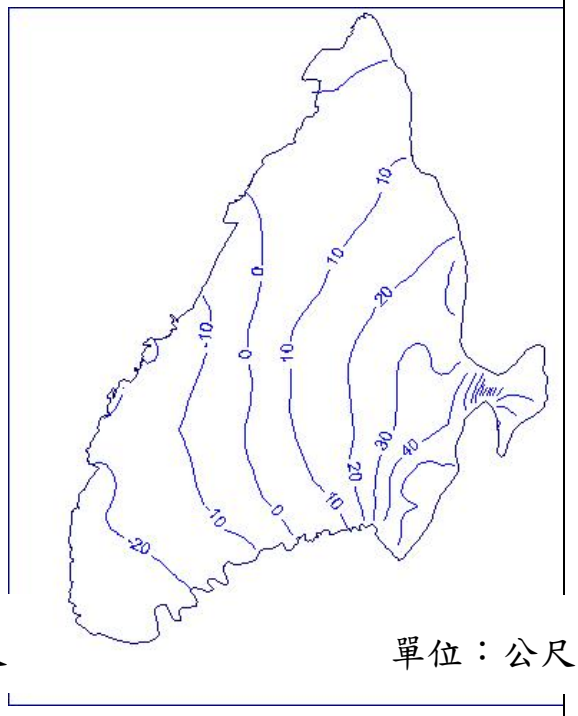
單位：公尺

圖 7.3-12、第 1 層穩態模擬水位



單位：公尺

圖 7.3-13、第 3 層平均觀測水位



單位：公尺

圖 7.3-14、第 3 層穩態模擬水位

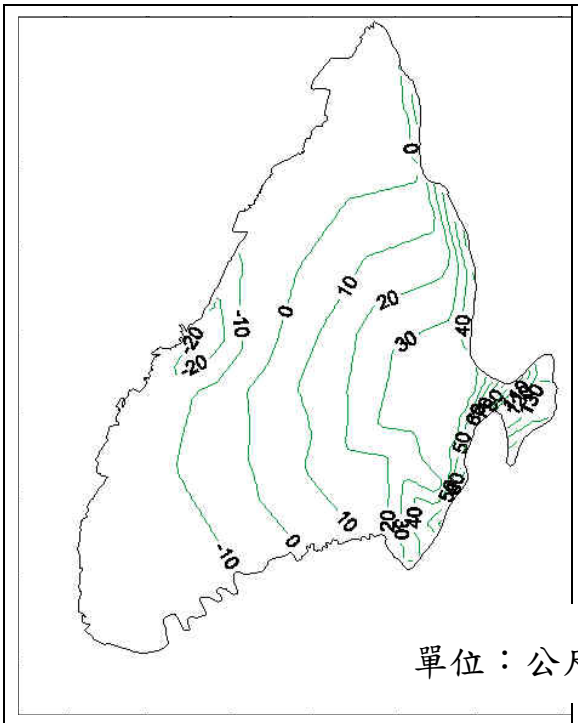


圖 7.3-15、第 5 層平均觀測水位

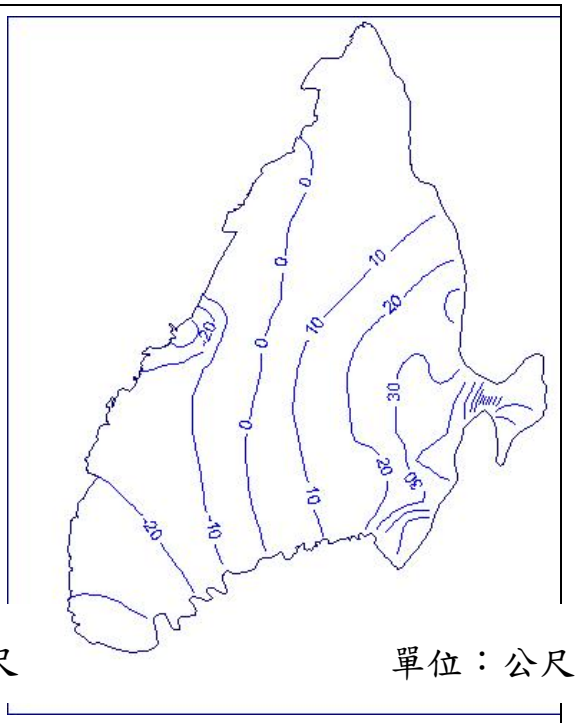


圖 7.3-16、第 5 層穩態模擬水位

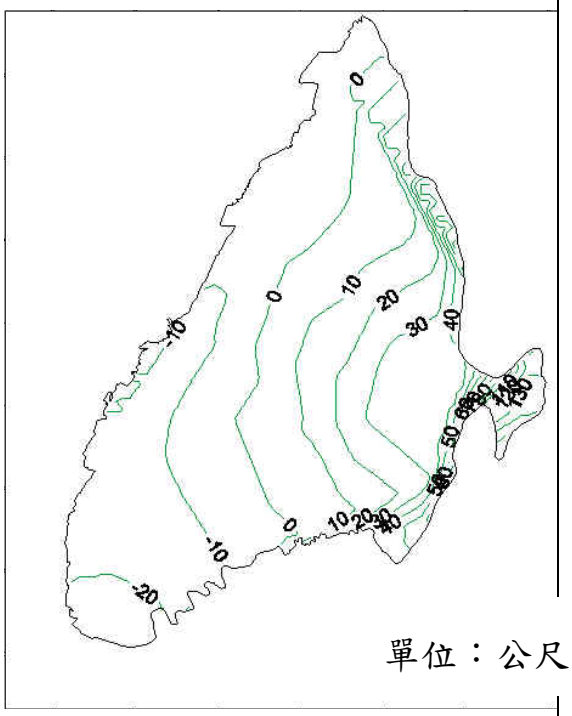


圖 7.3-17、第 7 層平均觀測水位

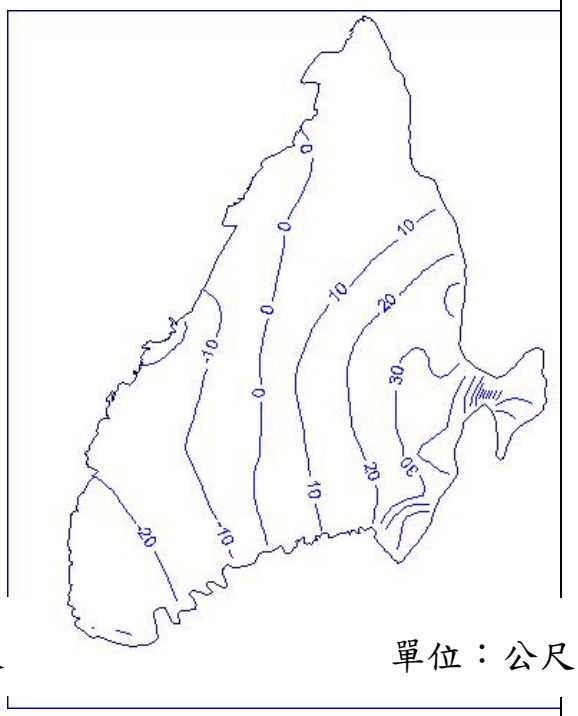


圖 7.3-18、第 7 層穩態模擬水位

參考資料

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 Libansensibilit´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. City of Issaquah (2009) Doing business in a wellhead protection area. http: www.ci.issaquah.wa.us.
8. 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.
9. Johnson, A.I. (1967) Specific yield- compilation of specific yields for various materials. U.S.G.S. Water-Supply Paper, 162-D, 74p.
10. Kendall, M.G. (1975) Rank correlation methods. 4th ed. Charles Griffin, London.
11. 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.
12. 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.
13. McNeely RN, Neimanis VP, Dwyer L. (1979) Water quality sourcebook – A guide to water quality parameters. Inland Waters Directorate, Water Quality branch, Ottawa.
14. Moench , A.F. (1994) Specific yield as determined by type-curve analysis of aquifer-test data. Ground Water 32/6, 949-957.

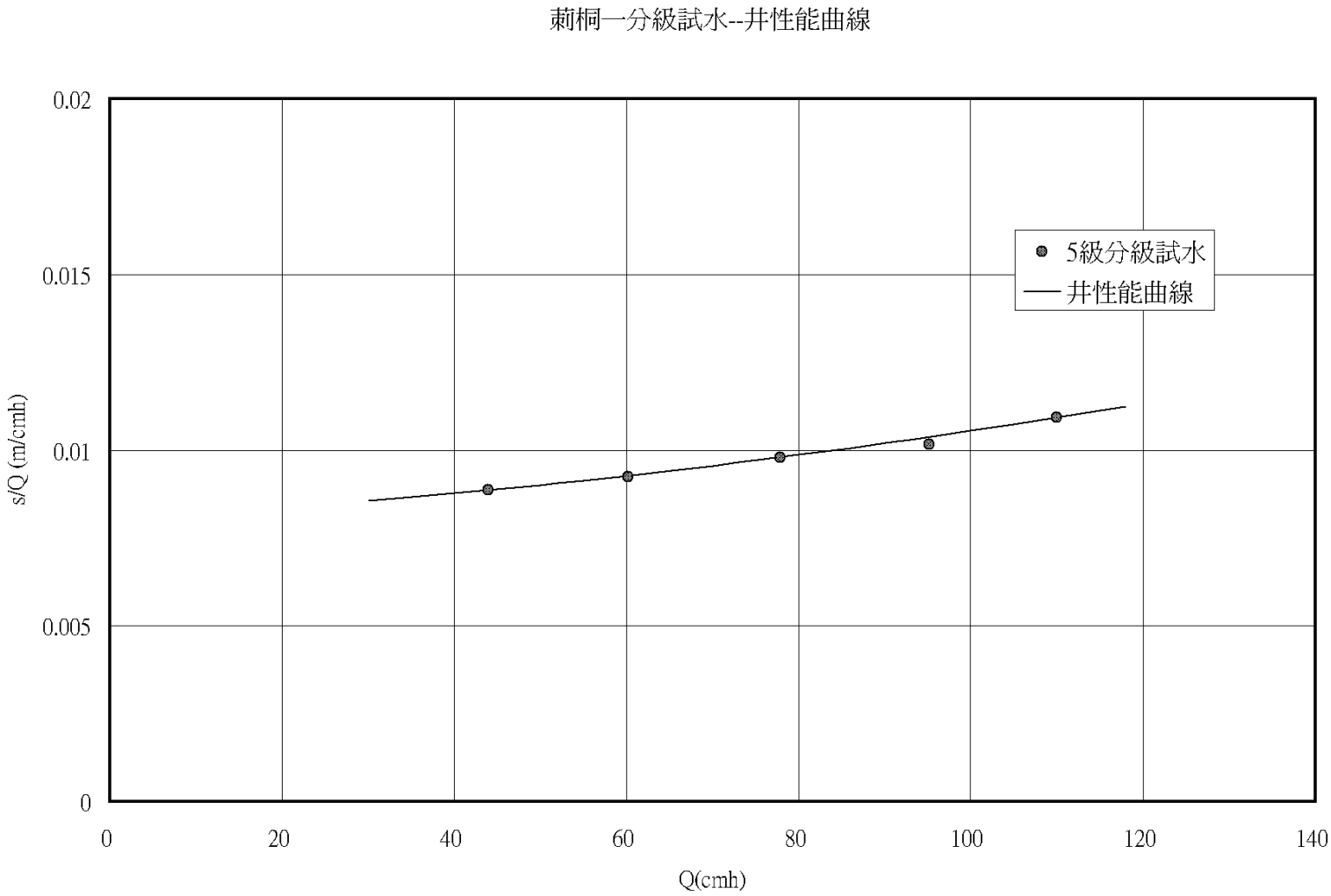
15. Moench, A.F. (2001) Accurate estimates of specific yield: are long-term aquifer tests really necessary? American Geophysical Fall Meeting 2001, abstract #H11E-02.
16. Mondal, N. C. and V. S. Singh (2004) A new approach to delineate the groundwater recharge zone in hard rock terrain,Current Science, Vol. 87, 5, 10.
17. Mukherjee, S. (1996) Targeting saline aquifer by remote sensing and geophysical methods in a part of Hamirpur-Kanpur, India, Hydrology Journal, 19, 53-64.
18. National Water Well Association,"DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings",USEPA,May 1985.
19. Nwnkwor, 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.
20. 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.
21. Rorabaugh, M.I. (1953) Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well. Proc. Sep. No. 362, ASCE. Vol. 79.
22. Schwartz, F.W., and Zhang, H. (2003) Fundamentals of ground water, John Wiley & Sons, New York.
23. 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.
24. 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.
25. 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。
26. 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。
27. 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。
28. 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，八十五年度報告，經濟部中央地質調查所。

29. 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。
30. 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。
31. 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。
32. 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。
33. 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。
34. 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。
35. 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，經濟部中央地質調所彙刊，第十八號，第 1-28 頁。
36. 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。
37. 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。
38. 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。
39. 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。
40. 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。
41. 林朝棨，1957，台灣地形。台灣省文獻會，共 423 頁。
42. 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。
43. 林俊男、賈儀平，2000，濁水溪沖積扇地下水補注區之劃定及保育原則之研討，經濟部水資源局。
44. 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。
45. 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。
46. 地下水工程處，1961，屏東平原地下水源勘查報告，共 74 頁。

47. 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。
48. 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。
49. 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。
50. 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。
51. 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。
52. 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。
53. 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。
54. 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
55. 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。
56. 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。
57. 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。
58. 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。
59. 劉聰桂，1993-2001，地下水定年分析，經濟部水利署出版。
60. 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。
61. 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。
62. 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。
63. 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。
64. 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。

65. 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。
66. 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。
67. 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。
68. 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。
69. 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。
70. 經濟部水資源局，1999，臺灣水文年報。
71. 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。
72. 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。
73. 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。
74. 環保署全國環境水質監測網（2009）- http://wqshow.epa.gov.tw/。
75. 經濟部水利署，2002，地下水資源整體營運規劃與綜合評估。

附錄一　莿桐與柑園站抽水試驗分析圖表


莉桐一分級試水--井性能曲線
0.02
0.015
0.01
0.005
0
s/Q (m/cmh)
0
20
40
60
80
100
120
140
Q(cmh)
5級分級試水
井性能曲線

薊桐站觀一抽水試驗分析(第一次)

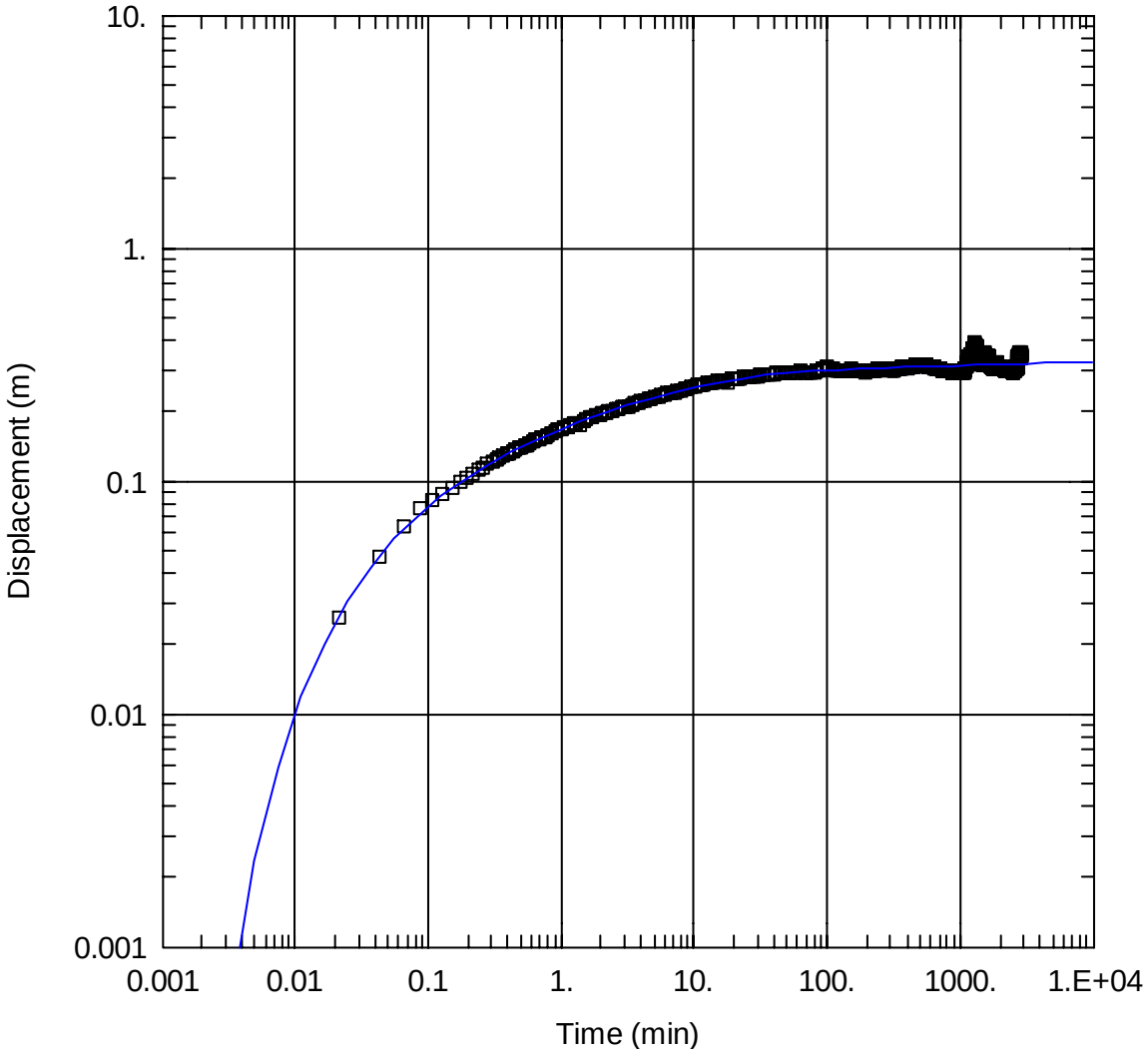
Client：經濟部中央地質調查所

Company：台糖公司台南區處

抽水井：抽水試驗井一

抽水量 Q = 110.0 cmh

井距 r = 13.46 m（抽水試驗井一 ~ 觀測井一）



SOLUTION

Aquifer Model：Leaky

Solution Method：Neuman-Witherspoon

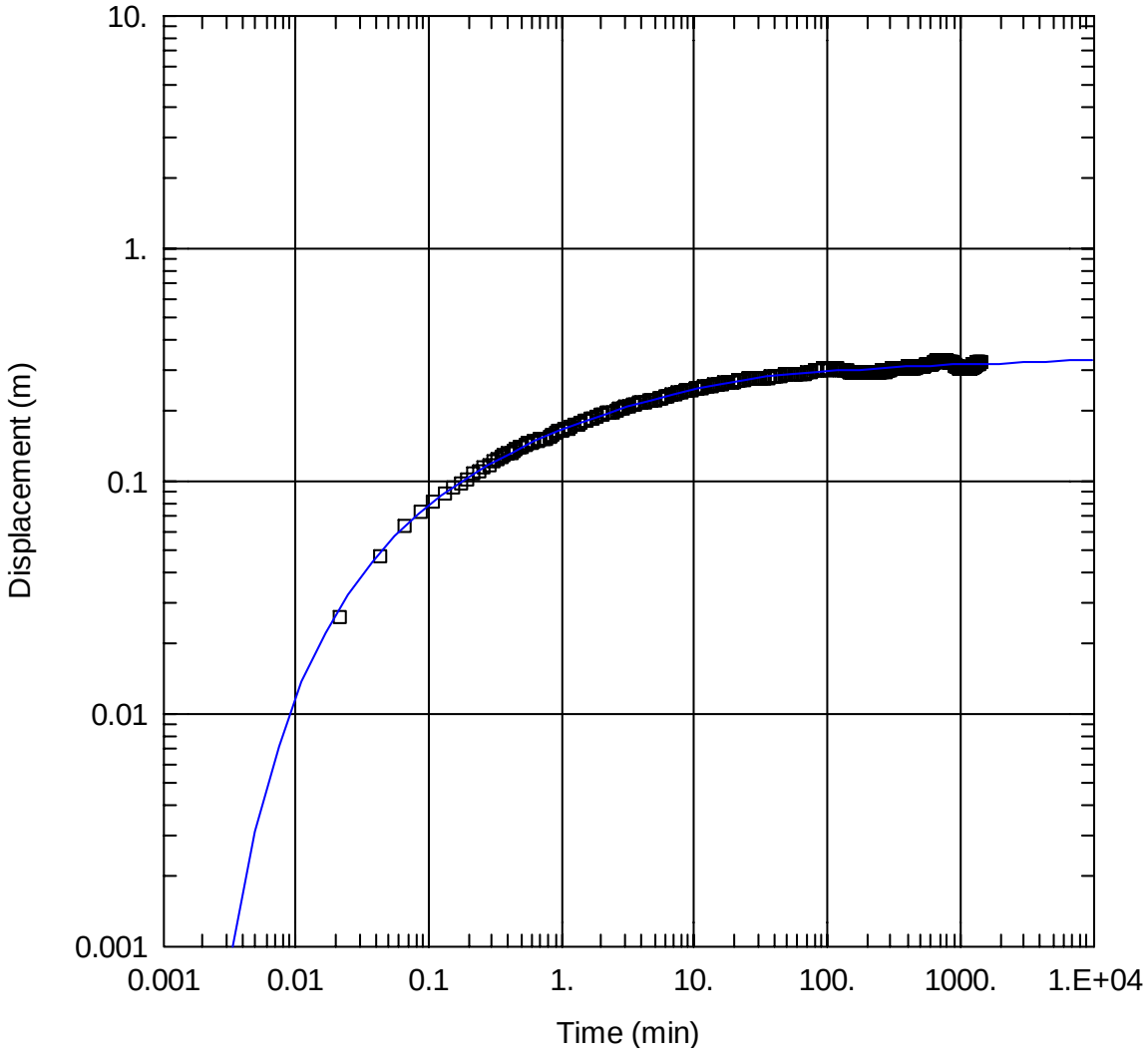
T =3.461 m^2/min

S = 0.0007299

r/B = 0.03485

蒜桐站觀一抽水試驗分析(第二次)

Client：經濟部中央地質調查所
Company：台糖公司台南區處
抽水井：抽水試驗井一
抽水量 Q = 110.0 cmh
井距 r = 13.46 m（抽水試驗井一 ~ 觀測井一）



SOLUTION

Aquifer Model：Leaky
Solution Method：Neuman-Witherspoon
T =3.718 m^2/min
S = 0.0006849
r/B = 0.02947

柑園抽一　分級試水

	第1級			第2級			第3級			第4級			第5級		
Q (cmh)	79.8			112.8			141.9			170.8			199.4		
靜水位 (m)	10.350			10.350			10.350			10.350			10.350		
time (min)	抽水位 (m)	修訂抽水位 (m)	洩降 (m)	抽水位 (m)	修訂抽水位 (m)	洩降 (m)	抽水位 (m)	修訂抽水位 (m)	洩降 (m)	抽水位 (m)	修訂抽水位 (m)	洩降 (m)	抽水位 (m)	修訂抽水位 (m)	洩降 (m)
2	11.400	11.400	1.050	11.781	11.784	1.434	12.126	12.132	1.782	12.450	12.459	2.109	12.820	12.832	2.482
5	11.400	11.400	1.050	11.782	11.785	1.435	12.120	12.126	1.776	12.451	12.460	2.110	12.842	12.854	2.504
10	11.400	11.400	1.050	11.783	11.786	1.436	12.130	12.136	1.786	12.455	12.464	2.114	12.850	12.862	2.512
15	11.400	11.400	1.050	11.787	11.790	1.440	12.132	12.138	1.788	12.460	12.469	2.119	12.856	12.868	2.518
20	11.400	11.401	1.051	11.788	11.792	1.442	12.135	12.141	1.791	12.463	12.472	2.122	12.856	12.868	2.518
25	11.400	11.401	1.051	11.790	11.794	1.444	12.140	12.147	1.797	12.466	12.476	2.126	12.860	12.872	2.522
30	11.403	11.404	1.054	11.790	11.794	1.444	12.142	12.149	1.799	12.470	12.480	2.130	12.880	12.893	2.543
40	11.406	11.407	1.057	11.791	11.795	1.445	12.145	12.152	1.802	12.471	12.481	2.131	12.885	12.898	2.548
50	11.411	11.412	1.062	11.791	11.795	1.445	12.145	12.152	1.802	12.472	12.482	2.132	12.890	12.903	2.553
60	11.415	11.417	1.067	11.793	11.798	1.448	12.145	12.153	1.803	12.473	12.484	2.134	12.890	12.904	2.554
80	11.417	11.419	1.069	11.794	11.799	1.449	12.145	12.153	1.803	12.476	12.487	2.137	12.901	12.915	2.565
100	11.418	11.421	1.071	11.794	11.800	1.450	12.145	12.154	1.804	12.482	12.494	2.144	12.910	12.925	2.575

柑園抽一 分級試水洩降資料ΔQ_i式分解表

t' (min)	1級(m)	2級（m）		3級（m）		4級（m）		5級（m）		分解係數			
	$s(Q_1,t)$	$s(Q_2,t)$	$s(Q_2,t')$	$s(Q_3,t)$	$s(Q_3,t')$	$s(Q_4,t)$	$s(Q_4,t')$	$s(Q_5,t)$	$s(Q_5,t')$	$\log\frac{400+t'}{t'}$	$\log\frac{300+t'}{t'}$	$\log\frac{200+t'}{t'}$	$\log\frac{100+t'}{t'}$
2	1.050	1.434	1.377	1.782	1.691	2.109	1.987	2.482	2.329	2.303	2.179	2.004	1.708
5	1.050	1.435	1.391	1.776	1.704	2.110	2.011	2.504	2.379	1.908	1.785	1.613	1.322
10	1.050	1.436	1.401	1.786	1.727	2.114	2.033	2.512	2.408	1.613	1.491	1.322	1.041
15	1.050	1.440	1.411	1.788	1.737	2.119	2.048	2.518	2.427	1.442	1.322	1.156	0.885
20	1.051	1.442	1.415	1.791	1.746	2.122	2.058	2.518	2.435	1.322	1.204	1.041	0.778
25	1.051	1.444	1.420	1.797	1.755	2.126	2.066	2.522	2.446	1.230	1.114	0.954	0.699
30	1.054	1.444	1.422	1.799	1.760	2.130	2.075	2.543	2.471	1.156	1.041	0.885	0.637
40	1.057	1.445	1.427	1.802	1.768	2.131	2.082	2.548	2.484	1.041	0.929	0.778	0.544
50	1.062	1.445	1.429	1.802	1.772	2.132	2.088	2.553	2.495	0.954	0.845	0.699	0.477
60	1.067	1.448	1.433	1.803	1.775	2.134	2.093	2.554	2.500	0.885	0.778	0.637	0.426
80	1.069	1.449	1.437	1.803	1.780	2.137	2.103	2.565	2.519	0.778	0.677	0.544	0.352
100=Δt	1.071	1.450	1.440	1.804	1.784	2.144	2.113	2.575	2.533	0.699	0.602	0.477	0.301
Q_i (cmh)	79.8	112.8		141.9		170.8		199.4		$\Delta s_1 = \frac{s(Q_1,t_2)-s(Q_1,t_1)}{\log t_2 - \log t_1}$			
ΔQ_i (cmh)	79.8	33.0		29.1		28.9				令 $t_2 = 10t_1$			
T (m^2/min)	7.254									得 $\Delta s_1 = 0.0336$			
$\frac{2.30\Delta Q_i}{4\pi T}$ (m)	0.0336	0.0139		0.0122		0.0122				$T = \frac{2.30\,Q_1}{4\pi\Delta s_1} =$ 7.254			

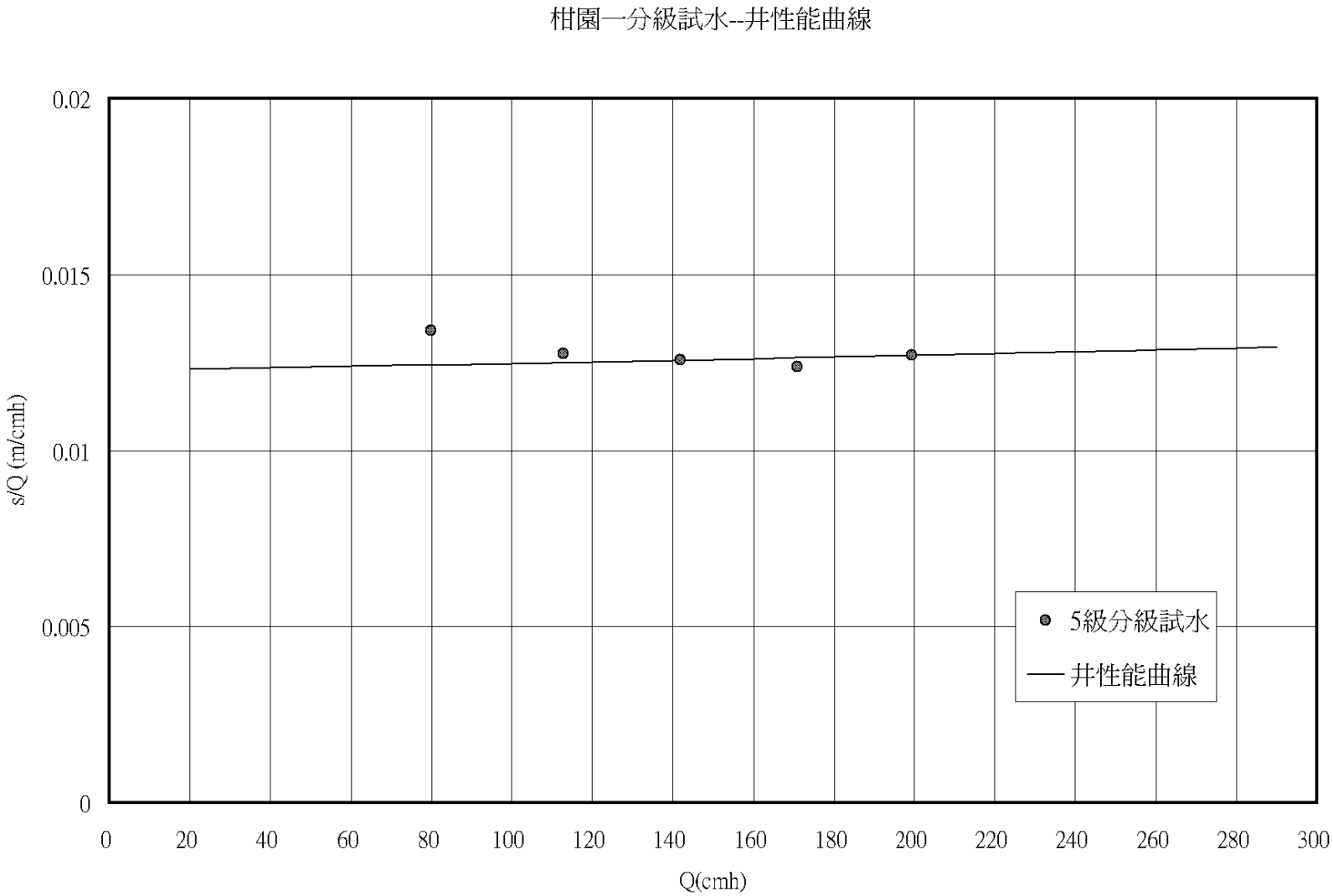
$$s(Q_n,t') = s(Q_n,t) - \sum_{i=1}^{n-1}\left[\frac{2.30\,\Delta Q_i}{4\pi T}\log\frac{(n-i)\Delta t+t'}{t'}\right]$$

2級 $s(Q_2,t') = s(Q_2,t) - \left[\frac{2.30\,\Delta Q_1}{4\pi T}\log\frac{100+t'}{t'}\right]$

3級 $s(Q_3,t') = s(Q_3,t) - \left[\frac{2.30\Delta Q_1}{4\pi T}\log\frac{200+t'}{t'} + \frac{2.30\Delta Q_2}{4\pi T}\log\frac{100+t'}{t'}\right]$

4級 $s(Q_4,t') = s(Q_4,t) - \left[\frac{2.30\Delta Q_1}{4\pi T}\log\frac{300+t'}{t'} + \frac{2.30\Delta Q_2}{4\pi T}\log\frac{200+t'}{t'} + \frac{2.30\Delta Q_3}{4\pi T}\log\frac{100+t'}{t'}\right]$

5級 $s(Q_5,t') = s(Q_5,t) - \left[\frac{2.30\Delta Q_1}{4\pi T}\log\frac{400+t'}{t'} + \frac{2.30\Delta Q_2}{4\pi T}\log\frac{300+t'}{t'} + \frac{2.30\Delta Q_3}{4\pi T}\log\frac{200+t'}{t'} + \frac{2.30\Delta Q_4}{4\pi T}\log\frac{100+t'}{t'}\right]$


柑園一分級試水--井性能曲線
0.02
0.015
0.01
0.005
0
s/Q (m/cmh)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
Q(cmh)
5級分級試水
井性能曲線

柑園站觀一抽水試驗分析

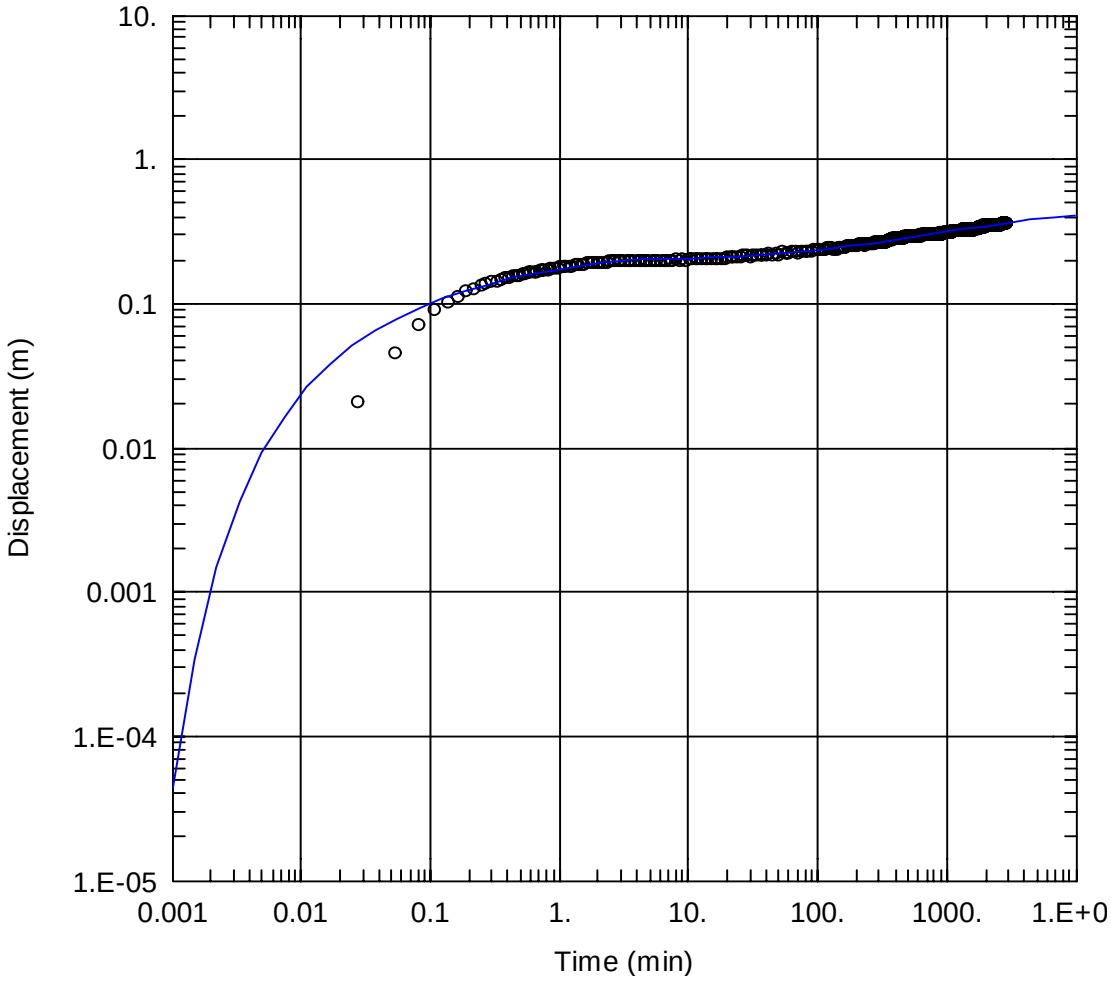
Client：經濟部中央地質調查所

Company：台糖公司台南區處

抽水井：抽水試驗井一

抽水量 Q = 199.4 cmh

井距 r = 15.90 m（抽水試驗井一 ~ 觀測井一）



SOLUTION

Aquifer Model：Unconfined

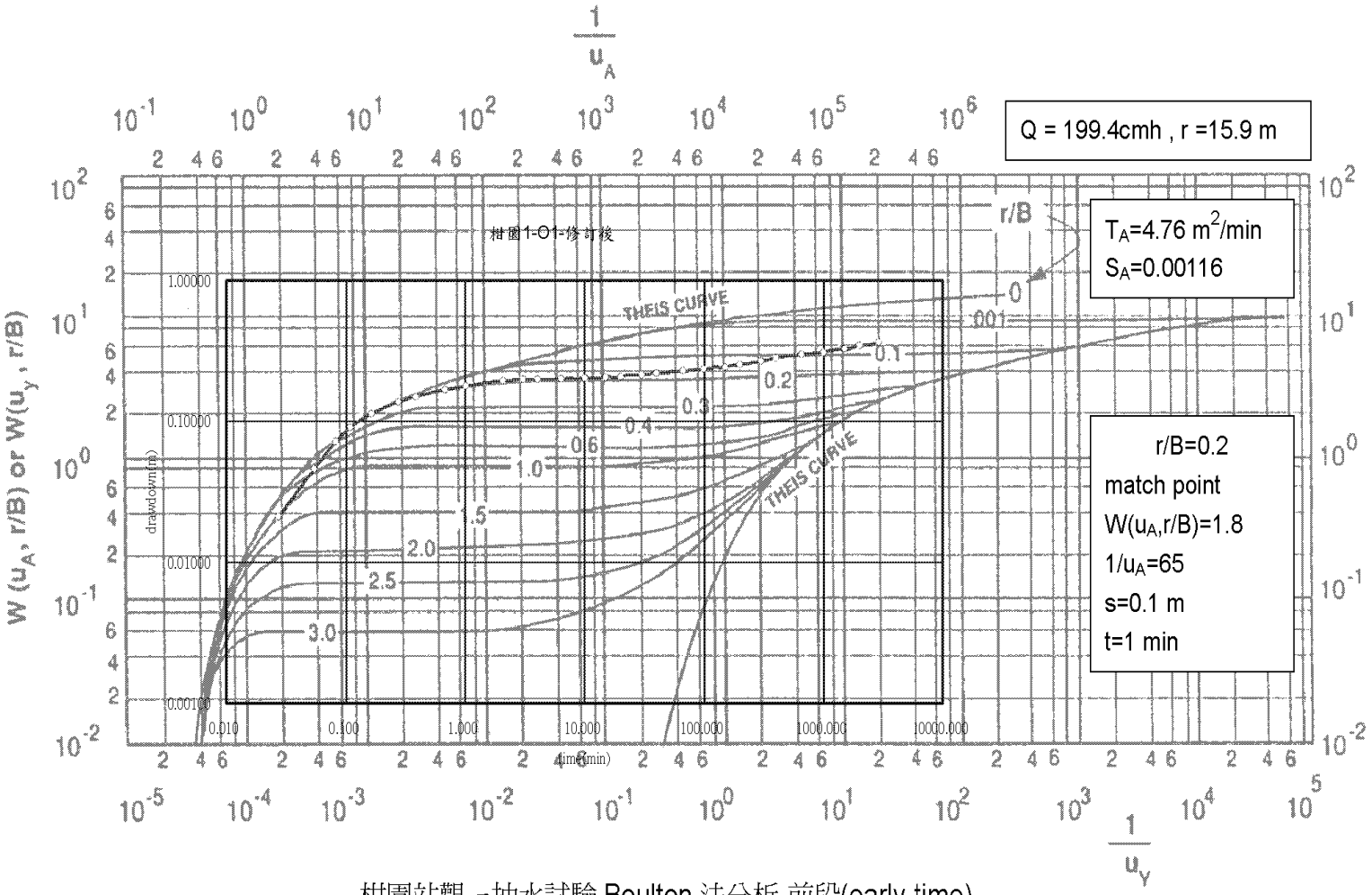
Solution Method：Neuman

T =6.054 m^2/min

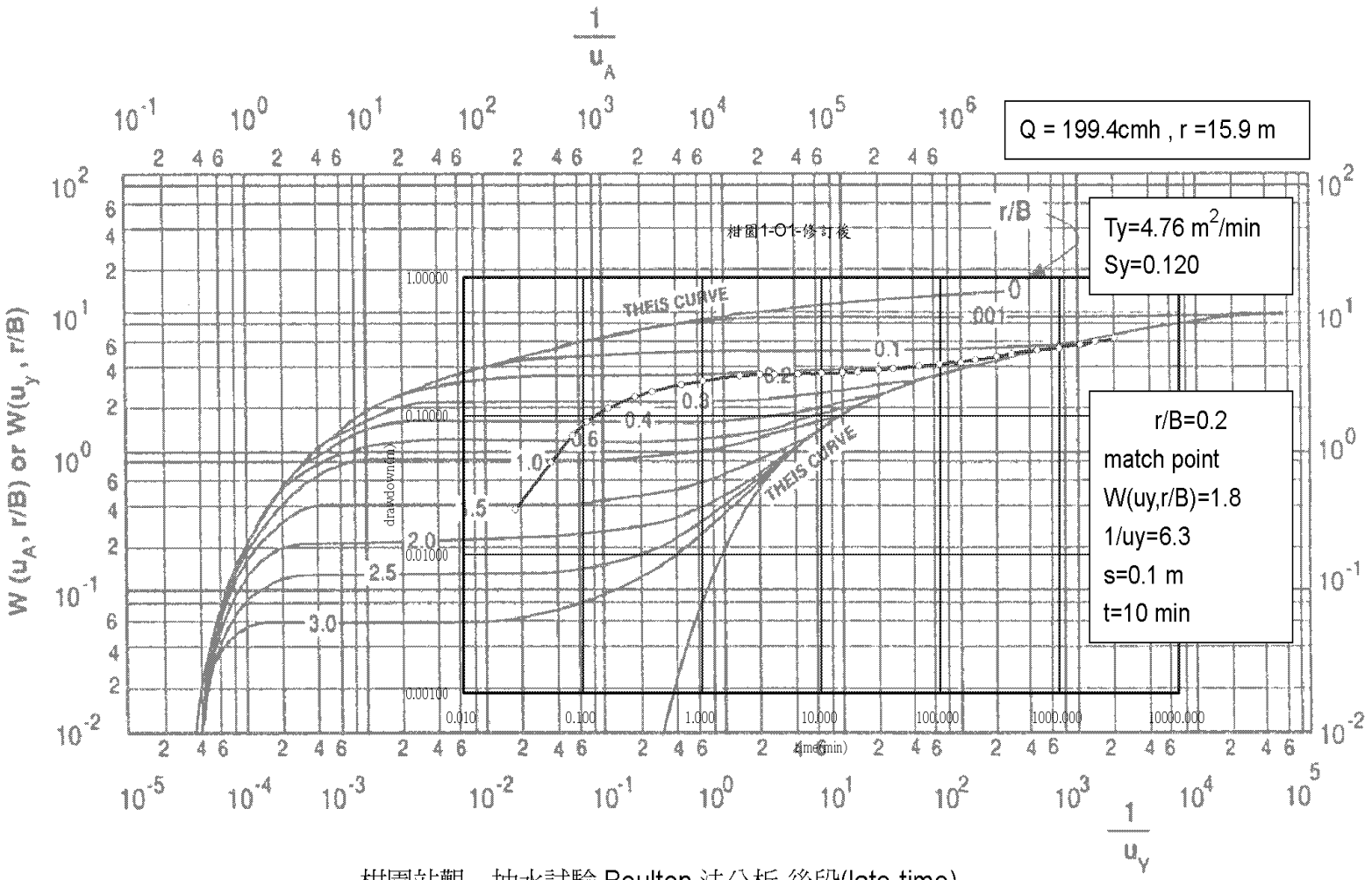
S = 0.0004856

Sy=0.0408

β= 0.00272



柑園站觀ー抽水試驗 Boulton 法分析-前段(early-time)



柑園站觀一抽水試驗 Boulton 法分析-後段(late-time)

柑園站民井一抽水試驗分析

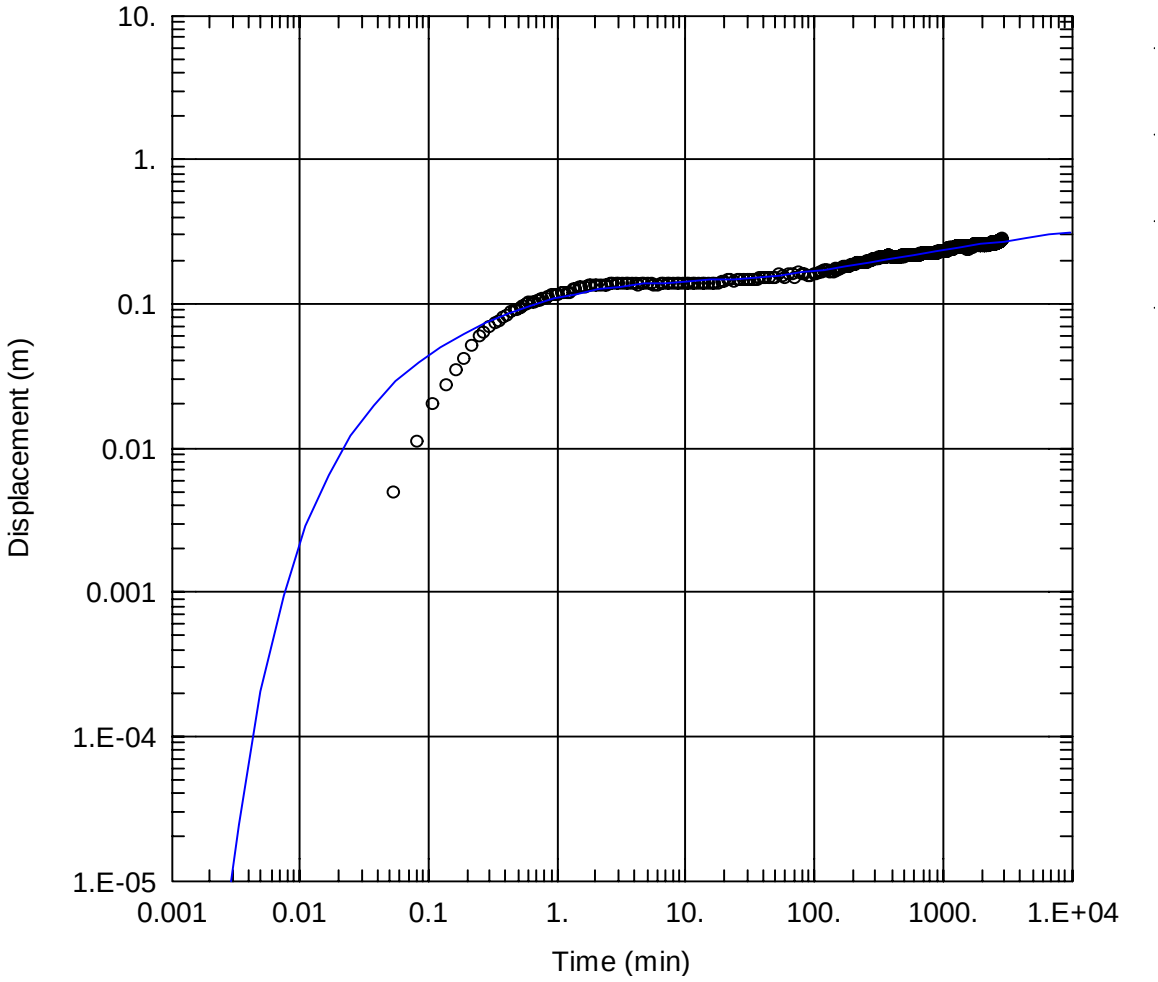
Client：經濟部中央地質調查所

Company：台糖公司台南區處

抽水井：抽水試驗井一

抽水量 Q = 199.4 cmh

井距 r = 33.80 m（抽水試驗井一 ~ 民井一）



SOLUTION

Aquifer Model：Unconfined

Solution Method：Neuman

T =7.835 m^2/min

S = 0.0004953

Sy=0.001444

β= 0.007478

附錄二 本年度計畫工作會議紀錄

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(1/4)

第 1 次工作會議記錄

一、 時間：98 年 3 月 24 日　上午 9:00

二、 地點：國立交通大學　工程二館 325 教室

三、 主持人：張教授良正、江副所長崇榮

四、 出席單位及人員：中央地質調查所、交通大學、陳文福教授、張竝瑜教授、台糖公司

五、 主席致詞：略　　記錄：陳瑞娥

六、 工作報告：張良正教授(略)、陳文福教授(略)、張竝瑜教授(略)

七、 會議結論：

(一)、地下水歷線法是分析補注事件達最高水位時之補注量。以日水位而言，各站之最高補注水位是同日發生的。

(二)、若探討在補注上升過程網格邊界交換量，或可看出在水位開始上升至達最高點之間之水平的交換量，還原各網格的真正補注量。地下水位歷線分析法，若考量時間差問題，應以時水位或更細的水位資料作評估，才能釐清各站補注水位之時差；並建議逐站作歷線分析，再歸併以分析全區水平衡模式。

(三)、在地下水補注潛勢評估因子的選定，除延續 DRASTIC 評估地下水污染潛勢的精神，及參考 Shaban(2006)所提出之因子權重比例外，請依研究區域的地下水補注之地質條件及水文變化為因子選定之依據。

(四)、關於複井抽水試驗之抽水井井位選擇條件，除考慮客觀環境因素外，應以位於非受壓地下水層之觀測井為優先考量，請陳教授與台糖公司再進行可行性替代方案之協調與討論。

(五)、地電阻調查資料解析，應利用地下水觀測網過去在研究區域所作的地質鑽探地表地電及井測調查成果，以交叉比對應用。測線位置的選擇可參考水文地質剖面，探測深度至少應至第一阻水層（T_1）的底部，第二地下水層（F_2）的上部。

八、14：00 散

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(1/4)

第 2 次工作會議記錄

一、 時間：98 年 4 月 16 日　上午 10:30

二、 地點：國立交通大學　工程二館 209 教室

三、 主持人：張教授良正

四、 出席單位及人員：崧旭資訊股份有限公司、交通大學

五、 主席致詞：略　　記錄：廖俊明

六、 工作報告：張良正教授(略)、陳文福教授(略)、張竝瑜教授(略)

七、 會議結論：

(一)、交通大學今年完成項次(1)(2)(3)三個程式的開發。請崧旭於今年七月前完成項次(4)(5)(6)(7)初步介面規劃、如何進行，並繳交期中資料；期末完成項次(4)(5)(6)(7)雛型建置，其中項次(7)地下水位儲存資料庫為完成建置、水文地質參數資料庫與 GIS 圖層資料庫為完成初步規劃。

(二)、於五月底～六月初進行第一次內部會議，討論目前進度及確認期中報告內容。六月底舉行第二次內部會議，於期中報告前討論是否有需要補充的地方。期末內部會議暫定在九月中及十月底。

(三)、資料上傳使用者介面由交通大學完成概念圖交予崧旭執行。

(四)、交通大學並提供水文地質參數資料與 GIS 圖層資料以利崧旭完成資料庫規劃建置，而地下水位資料由崧旭從水利署網站取得(使用程式擷取 html 資料)。

(五)、GIS 系統初期先以單機方式建置，待各項細部工作完成再上線測試。

(六)、資料庫屆時掛在地調所伺服器上。

(七)、雨量資料再確認，初期先以人為方式擷取。

八、13：30 散會

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(1/4)

第 3 次工作會議紀錄

一、 時間：98 年 4 月 24 日　上午 10:00

二、 地點：國立交通大學　工程二館 219 會議室

三、 主持人：張教授良正

四、 出席單位及人員：台糖台南區處、交通大學、海洋大學

五、 主席致詞：略　　記錄：廖俊明

六、 會議結論：

(一)交通大學於期中前完成地下水水位歷線法電腦作業流程規劃、各項潛勢因子、權重確定，以及圖層資料掌握，於期末完成地下水水位歷線法程式開發、濁水溪沖積扇網格劃分、地下水補注潛勢分析。

(二)崧旭資訊股份有限公司於期中報告前完成地下水補注潛勢評估作業平台介面規劃，於期末完成地下水補注潛勢評估作業平台雛形建置，期中地下水位儲存資料庫需完成建置，水文地質參數與 GIS 圖層資料庫為完成規劃。

(三)海洋大學已於竹塘完成 300 m 地電阻試測線，預計五月中前完成柑園地區試測線、五月底前完成至溪州測線。期中前完成一條 1 km 長測線及兩條 300 m 試測線，至年底共完成四條 1 km 測線。

(四)嘉南藥理科技大學已進行連續監測及水質化學分析，預計期中完成水質化學分析及莿桐到 6 月之連續監測資料。

(五)台糖台南區處持續處理柑園及莿桐用地協調，目前機具皆以備妥隨時可動工，初估自可動工開始約三週工作天可完成一站之鑿井、洗井、抽水試驗等工作，預計於七月前完成莿桐站作業，接著進行柑園站作業。

(六)預定在 5/26 進行第一次內部會議，討論目前進度及期中報告內容，並於 6/10 繳交期中報告予交通大學彙整，於期中報告前一週繳交至地調所供審查，期中報告時間約為七月初。另於 9 月中(暫定 9/15)進行第二次內部會議，10 月底(暫定 10/30)進行第三次內部會議。

七、12：00 散會

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(1/4)

第 4 次工作會議紀錄

一、 時間：98 年 6 月 8 日　下午 14:30
二、 地點：國立交通大學　工程二館 219 會議室
三、 主持人：張教授良正
四、 出席單位及人員：台糖台南區處、崧旭資訊股份有限公司、國立交通大學、國立臺灣海洋大學、嘉南藥理科技大學
五、 主席致詞：略　　記錄：廖俊明
六、 會議結論：

(一)降雨與地下水位相關性為一探討重點，因濁水溪沖積扇多數井均位於侷限含水層內，其水位變動應該來自停止抽水及上游水壓傳遞，需考慮是否為降雨所造成之變動，將先以於未侷限含水層之井進行分析，預計將其關係性定量化，最後轉成圖層分析。

(二)建議探討水質因子。水質因子:補注潛勢高處其硝酸鹽濃度會較高，預計加入水質因子探討。水溫因子:降雨後水溫變化越大表示含水層連通性越好，其補注潛勢高，但需考慮有無降雨前後水溫連續資料，若無連續資料則不考慮。水系因子:濁水溪流域週遭土壤約有六成是濁水溪補注的，深入探討水系對補注潛勢影響，並收集水系相關資料。

(三)坡度因子影響不大，僅有八卦山脈處較有明顯差異，因此暫不考慮。

(四)可考慮水文地質架構因子，例如井的柱狀圖，地調所有已數位化資料、地層柵狀圖、淺層厚度、滲透係數 K 值、淺層地電阻(泥層電阻低，礫石電阻高，電阻高補注潛勢高)，資料部份再詢問地調所。預計以地電阻譜測取代。

(五)地電阻調查目前已完成預計之兩試測點及一條測線，六月底前預計可再完成一條測線。

(六)水質調查方面:水質演化方面因沖積扇內並無明顯差異，因此僅分為火炎山段與沖積扇段分析。水質連續監測方面(莿桐、柑園、六合)預計 6/12 收 DATA，測導電度、水壓(水位)、溫度。收完會與降雨做比對，以解釋水位水溫導電度之變化。預計在期中報告前可整理好既有的水質演化、水質硝酸鹽之資料及本週收取之連續監測資料繳交。

(七)抽水試驗目前莿桐站已於 5/29 開挖，預計於明日 6/9 實施完工試水；另柑園站仍需待水利署第四河川局核可用地申請後才能進駐施工。

(八)地下水補注潛勢評估作業平台方面，目前因水利署網頁設定關係，只能手動擷取資料庫資料建立地下水位資料庫，未來嘗試擷取網頁的步驟錄製

成 SCRIPT，嘗試把網頁存成文字檔存入資料庫，並在未來進行更新，並同時詢問水利署相關人員是否有其他資料交換介面。並請崧旭協助尋找因子圖層來源給交通大學或提供現有圖層，例如土地利用、土壤種類、水系圖層。

七、16：30 散會

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(1/4)

第 5 次工作會議紀錄

一、 時間：98 年 9 月 16 日　上午 09:30

二、 地點：國立交通大學　工程二館 219 會議室

三、 主持人：張教授良正

四、 出席單位及人員：台糖台南區處、崧旭資訊股份有限公司、國立交通大學、國立臺灣海洋大學、嘉南藥理科技大學

五、 主席致詞：略　　記錄：陳祐誠 陳冠宇

六、 會議結論：

(一) 補注潛勢、補注量潛勢與地下水蘊藏量

1. 不以補注”量”潛勢名稱，只以補注潛勢即可。
2. 蘊藏量是不可用的，能使用的只有補注量。

(二) 補注潛勢因子探討

1. 統一計劃用詞，水力傳導係數 K 修改為透水係數，T 為導水係數。
2. 降雨與地下水位相關性的方法，可以三種雨量(沖積扇平均降雨、山區集水區平均降雨、全流域平均降雨)作為地下水位比較依據。
3. 流量對地下水位補注之影響是否考慮。
4. 潛勢因子分類應可分為地層內因(土地利用、表層土壤種類、水力傳導係數 K)、水文外因(河系密度、平均年降雨量)、綜合因數(降雨與地下水位相關性、單位蓄水量變化)。
5. 河系密度有無包含北港溪。
6. 硝酸鹽濃度還是放在關係圖中，亦可拿來做驗證。因為委員們對硝酸鹽濃度放在關係圖並無意見。

(三) 降雨與地下水位相關性

1. 雨量站位置圖中圖例需加大。
2. 將各地下水位站關係式最大最小站點於圖中標示出。
3. 關係式圖的表現直接以斜率分級表示。

(四) 數值模式建置

1. 模式東邊界是否考慮側流量補注量(參考吳清志文獻)。

(五) 結論

1. 地下水區和地調所之前的計畫統一。
2. 各章節應依邏輯撰寫，而非依承辦單位分類。
3. 計畫目的為地下水資源劃分。
4. 表層土壤四層直接平均，無須加權。

七、13：30 散會

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(1/4)

第 6 次工作會議紀錄

一、 時間：98 年 11 月 20 日　上午 09:00

二、 地點：國立交通大學　工程二館 219 會議室

三、 主持人：張教授良正

四、 出席單位及人員：台糖台南區處、國立交通大學、國立臺灣海洋大學、嘉南藥理科技大學

五、 主席致詞：略　　記錄：陳冠宇

六、 會議結論：

(一) 地電阻調查

1. .由地電阻調查推估地下水補注區邊界為一 400m~800m 過渡帶。

2. 竹塘站附近有將近 1km 的砂堤，會造成局部補注潛勢較高。

3. 工研院一維地電阻資料目前僅數化完成彰化地區，後續將會完成雲林地區。

4. 各測線附近可考慮補測一維資料。

(二) 水質調查分析

1. 田中及二水站之部分水源可能由山上分水嶺來。

2. 半數測站鹽化程度超過灌溉用水標準，後續可考慮其對飲用水影響。

3. 期末主要成果分導電度、地化、硝酸鹽等三部份。

4. 現地水質調查成果(污染現況)與地下水補注潛勢評估(較大尺度)做檢校對比之用。

5. 雲林縣鹽化較嚴重，推估是該地區大多使用地下水灌溉。

(三) 地下水補注潛勢評估

1. 竹塘、合興站 K 值相較於鄰近站顯得較高，在統計上若將局部極端值列入考量，會影響判斷，本計劃欲考量區域性之補注區劃分，因此 K 值因子暫不考慮竹塘及合興。

2. 硝酸鹽濃度改用以對照結果。

七、 13:00 散會

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(1/4)

本年度教育訓練

一、 時間：98 年 11 月 25 日　上午 10:00

二、 地點：經濟部中央地質調查所　第二會議室

三、 主持人：江副所長崇榮

四、 出席單位及人員：經濟部中央地質調查所、經濟部水利署、國立交通大學、崧旭資訊股份有限公司

五、 主席致詞：略　　記錄：廖俊明

六、 教育訓練內容：

(一) 地下水水位歷線法電腦流程作業

1. 地下水水位歷線法及修正型說明。
2. 程式撰寫計算補充說明。
3. 範例操作

(二) 屏東平原地下水收支自動化分析模組開發與說明

(三) 地下水補注潛勢評估標準程序

1. SuperGIS 空間資料處理說明。
2. 地下水補注潛勢評估範例。
3. 本計畫圖層處理成果展示。

七、 問題討論:

(一) 地下水水位歷線法程式每日計算出之流出量累加是否與全年蓄水變化量結果一樣

(二) 濁水溪逐站分析退水線難定義，並無固定明顯退水斜率，各站水力特性差異、人為影響差異。全區單一蓄水量歷線則無此問題。

(三) 旱季退水線流失量是否真的為 0?有可能為直接流到邊界外，需視系統為定。

(四) 投影片第 8 頁，W 應為常數。

(五) 投影片第 11 頁，流出量與網格交換量難分別，在網格內均為水平交換量，透過邊界才為流失量。修正型流出量與一般型流出量的定義不同。

(六) 一般型水位歷線法僅需要水位差，因此算蓄水量不需考慮厚度；修正型水位歷線法因達西公式需要含水層穿越面積，因此需考慮厚度。但須注意，若在受壓含水層以平均 h_{ij} 計算穿越面積會有問題。

(七) 以屏東平原地下水收支自動化分析模組進行資料補遺，其補遺規則需補遺時間，以相關係數大小選擇站別進行補遺，若該時間相關係數最大站也無資料，則選擇相關係數次大依序進行補遺。

(八) 雨量補遺避免補遺值產生負值，可取 LOG 進行。

(九) 分析結果顯示，屏東平原萬隆、餉潭、大響、枋寮及新埤地下水經由含水層直接往南流入海，可藉由水質採樣判定。

(十) 地下水補注潛勢評估中原始資料指的河系密度應為河系。

(十一) 後續潛勢高低請參考地調所顏色分層，方便判釋。

八、 16:30 散會

九、 教育訓練照片

















附錄三 期中報告審查意見及辦理情形

期中報告審查意見及辦理情形

壹、 時間：98 年 07 月 15 日(星期三)下午 2 時

貳、 地點：中央地質調查所第二會議室

叁、 主持人：江副所長崇榮　　記錄：陳瑞娥

肆、 出列席單位及人員：(詳如簽名單)

伍、 主辦單位報告：(略)

陸、 各單位及出席人員意見：

	委員綜合意見	辦理情形
1	本計畫研究方向正確，內容資料豐富，分析完整，已達預定進度目標。	感謝委員指教。
2	P35 式 3.1-1 網格和區塊的關係請加強說明。區塊面積是否必要？因為 DRASTIC 以各 Grid 諸因子之累積分數為潛勢，與 Grid 面積似無關。	感謝委員意見，本計畫部份因子如土地利用、表層土壤種類利用面積加權計算各因子網格之分數，因此網格面積大小直接影響潛勢分析結果在空間上的解析度。
3	請加強說明距離倒數平方內插法之原理和優缺點。	感謝委員意見，IDW 內插法是利用一組已知的資料來估算某一點的資料，更詳細的說，假設 A 點的資料未知，但鄰近 A 點的區域有一群已知的資料，那根據這些資料，並賦予各已知資料點一個權重（該權重係根據各點與 A 點的距離而定），將這些資料經加權平均後所獲得的資料用來估算 A 點的資料。 優點：不需調整任何參數，簡易且計算快速。 缺點：無法區分各不同內插點的精度(不確定性)。
4	請加強所選用八項因子之特性及與地下水補注之關係之說明。針對因子之間的因果程度值之評定，建議以表格方式處理，每一因子為因，其他七項因子為果，高因果程度 1 分，中程度 0.5 分，低或無 0 分，共評定 56 組，再累計各因子總分，作業較方便。	各因子之描述已於期末報告中補充說明。亦已經將因子關係圖表格化。

5	地下水位歷線法請再參考本所彙刊十九號「以地下水歷線分析法評估濁水溪沖積扇之地下水收支」一文。旱季退水線是前一年十月以後到當年四月少雨期之歷線消退線，於屏東平原呈一直線 L,在濁水溪沖積扇則一月下旬到二月上旬起產生另一斜率之直線（M),M 為夾雜 L 及一期稻作之抽水量，宜一併納入評估及分析程式中。	感謝委員意見，已遵照辦理。
6	地下水歷線法在屏東平原為逐站分析，再累加起來；在濁水溪沖積扇為先整合成單一歷線直接分析水平衡，兩種方法各有優缺點，前者可看出各站之補注水位和補注水量之略值，有助於降雨量對補注水位和水量在空間分布上之描繪。後者優點在於免除逐站分析之繁雜程序。程式發展是否包含此二方法？	感謝委員意見,本計畫程式發展已同時包含逐站分析及全區分析方法。
7	由於同一場次降雨造成之補注被假設各站各層水位均在同一日達到最高點，然後開始下降，亦即補注同日完成；因此在同一時間點之蓄水增加量即為總補注量，無須計算側向流動量。若扇頂先補注而水位先上升到最高水位，扇央和扇尾才陸續上升到最高水位，若第一層非受壓地下水層水位上升同步完成，並以其時間為準，取所有站當時之補注水位來求各站之補注水量，此時扇尾等站並非取其最高水位,則亦無須計算側向流動量。	感謝委員意見,假設某單場降雨事件橫跨數日,且其補注源假設都集中於扇頂一帶,水位之呈現並不會同時反應,將由扇頂往扇尾依序抬升,在空間上會有個補注峰往扇尾傳遞,類似明渠流之洪峰由上游往下游移動之現象。在估算上，如僅欲計算整場降雨事件對整個系統所造成之補注量,由於其計算時段涵蓋整個降雨事件時,因此在計算上可以簡化整個計算方式,僅以各站之補注後最高水位與補注前最低水位差值估算補注量即可,最後再累計各站補注量即為系統整體於該場降雨之補注量。但如果水位變化因為補注峰往下游傳遞關係,造成最高水位與最高水位之發生時間於上下游有時間差,在取最高水位與最低水位時,需要將時間差納入考量,以最上游站井之發生時間為基準,以免重複計算側向傳遞的水量。由此可知，顯示如欲忽略側向交換量之效應,在需慎選計

		算時段的起末。 但是如欲計算降雨事件中的特定水井之單日補注量時，需考量補注量之空間與時間分布時，計算時段為每一日特定小時，因此並不符合前述完成補注之假設，故仍欲忽略側向補注，容易造成空間分配上之誤差。
8	分級試水 ΔQ_i 式分解，表 6.1-4 Δs 和 T_1 均應用第一級試水資料分析，而不是定量試水或回昇試水資料。多井抽水試驗，觀測井洩降至少要 30 公分以上為宜，否則背景干擾值將影響分析成果。請利用背景 48 小時水位觀測資料，修正抽水洩降資料重新分析。	感謝委員意見，已依照審查意見修正分析。
9	爾後雙井試水應選在非受壓地下水層分佈區內，並考慮加大井徑到 10 吋，充分放大水量和觀測井洩降。	感謝委員意見，已遵照主辦單位指示辦理。
10	濁水溪沖積扇地下水補注源，大部分來自山區降雨，以河水方式流至扇頂附近補注地下水層，或以丘陵台地地下水形式側向補注地下水層，因此補注因子只考慮地下水觀測站臨近之雨量紀錄，未能考慮整體平原和山區之平均降雨量，似有所不足。包括表 3.2-1 平均降雨量和降雨與地下水位相關性，圖 6.2-22 和圖 6.2-23 均有類似問題。	感謝委員意見，本計劃已加入全區、平原區及山區平均降雨考量，初步結果如 4.1.2 節所示，將於明年度計畫更深入探討。
11	電導度、水壓、水溫連續監測使用儀器之精確度、安裝深度、監測頻率請加強說明。	感謝委員意見，已說明於內文中。
12	二維地電阻剖面探測電極排列及切換方式，解析原理測點定位等請加強說明。	感謝委員意見，已於 3.4.1 小節補充說明。
13	在地下水補注潛勢評估因子的選定，希望能先把所有可能的因子先獨立分析，例如「蓄水量變化因子」之水位變化與蓄水係數先分別分析，以釐清各單項變因造成的變化趨勢，再評估權重及是否相乘或個別列入等。	感謝委員意見，對地下含水層的補注，乃直接反應在蓄水量的變化，因此單以水位變化或儲水係數，皆不足以描述補注量的大小，因此本研究之蓄水量變化因子，乃是個完整獨立的因子。

14	本所擬劃訂之地下水補注敏感區，除了考量補注潛勢外，是否具儲存容量亦是重點；地下水層之岩性、厚度、是否受壓、地下水位變化量皆為重要指標。(雖資料密度受限，無法畫出理想的 S,Sy 等值圖，仍應將是否受壓因子當成主要因子)。	感謝委員建議，本計劃乃是探討地下水補注潛勢而非地下水蘊藏量的大小，因此因子的選定乃是以能直接影響補注量大小為考量。
15	請說明以 0-30 公分表層土壤為分析補注潛勢因子之理由。且本計畫以觀一為地下水位變化為考量研究對象，然而濁水溪沖積扇之重要抽水層亦包括觀二、觀三、觀四。	感謝委員建議，已將四層表層土壤種類(0~30cm, 30~60cm, 60~90cm, 90~150cm)皆納入計算。
16	觀一之地下水水層是否與觀二有所連通，值得列入考慮。	感謝委員意見，後續會列入考慮。
17	若以 0-30 公分表層土為補注潛勢因子，則沿海地帶（扇尾）反較粗粒之土壤，與一般粒度由扇頂向扇尾減少的趨勢稍有出入。	感謝委員建議，已將四層表層土壤種類(0~30cm, 30~60cm, 60~90cm, 90~150cm)皆納入計算。但結果仍顯示扇尾有較粗顆粒土壤的情形。
18	請考慮長期平均降雨量在時間及空間上是如何平均分配？是否須考慮降雨強度？	感謝委員建議，本計劃平均年降雨量因子是以各雨量站測得之各年雨量值，加總平均後可得各雨量站時間上平均分配年雨量，再經由內插得到研究區域空間之平均年雨量分佈。而年降雨量多寡會影響到年補注量，藉由長期平均降雨量評估區域之補注潛勢，因此不考慮降雨強度之影響，以長期平均之趨勢作為評估。
19	本計畫以八大因子來疊合進行補注區劃分，所展現成果，應與過去利用 DRASTIC 分類與地下水補注潛勢評估進行比較，以利了解其差異性，並再度確認八大因子間是否存在相關性，以期能實際運用於本計畫的目標。	感謝委員建議，本研究區域濁水溪沖積扇過去並無使用 DRASTIC 分類進行地下水補注潛勢評估的案例，僅有使用「類 DRASTIC」分類於「其他地區」進行地下水補注潛勢的案例，且採用的因子及因子數量皆不相同。要探討差異性僅能由因子選定的不同來探討，無法以成果做比較。

20	建議以依扇央、扇尾、扇頂之分區探討降雨與地下水位之關係後，判釋該觀測井為受壓或自由含水層；並探討烏溪、北港溪或海水對地下水層的補注效應。	感謝委員意見，經本計畫工作執行會議討論，目前降雨與地下水位相關性暫以全區、平原區及山區降雨進行評估。本計畫之補注潛勢區域的劃分，乃是做為未來地下水保護區的參考，因此主要注重在平原區域補注量大小的探討，至於其他沖積扇邊界之側流補注量，則將在地下水數值模式中再做考量。
21	請加強區分地下水補注潛勢與地下水補注量潛勢之差異性。	感謝委員意見，本計畫之補注潛勢評估，乃考量補注量的大小，惟在名稱部分仍沿用補注潛勢。
22	p.44 中討論降雨與地下水位相關性，請考慮對於水位變動小於 1 公分之資料其影響因素為何。	感謝委員意見，此部份之內容於期末報告中已重新分析檢討。
23	請討論硝酸塩氮污染之時序變化；建議水質 ND 值可採用 1/2(檢測最小精度)替代。	感謝委員意見，已說明於內文中。
24	請說明地下水補注潛勢因子中水質之權重值設為 0 之原因。請討論今年 6 月水質檢測硝酸塩氮濃度降低的原因；另建議 9 月水質檢測增加磷酸根離子項目 。	感謝委員意見，經過重新檢討分析過，補注潛勢因子已不考慮硝酸鹽濃度。6 月硝酸鹽濃度降低原因可能因污染源降低。增加磷酸根因期初沒有規畫,經費不足。
25	地電阻量測結果請與水文地質架構結合討論，抽水所造成的影響請進一步確認。	感謝委員意見，已於 3.4 節地電阻調查一節補充討論。
26	水質因子目前只考慮硝酸氮，請說明其是否會在地下水層中受到其他因素的影響而起反應；另外，是否也針對部分地下水層中之水質可能含有其他特殊成分，而在權重中做加減分之考量。	感謝委員意見，經過重新檢討分析過，補注潛勢因子已不考慮硝酸鹽濃度。
27	報告中對於 DRASTIC 引述之文獻，多數偏向於探討固結岩層之地下水議題，與本計畫以沖積層為標的者不同，且本計畫在理論建立上是引用 Shaban 文獻，其更特別是以石灰岩為探討的重點，更與沖積層有很大之差異，所以建議做適當之說明，以釐清理論之基本觀念。	感謝委員意見，本計劃所引用之 DRASTIC 參考文獻亦包含沖積平原之應用。至於 Shaban 之文獻，乃是提出因子權重分析的邏輯架構，其方法應用之範圍並不限於何種地層結構，惟在應用時，必須根據其研究區域特性選定適當之因

		子，並決定因子間邏輯關係。
28	報告之編輯請再加強：1、使用之語句前後一致，例如(表層)土壤種類；2、請以工作內容做為章節之區分，勿以執行工作之對象來區分；3、在進行因子分類時，請將同類性質者排序在一起，以增加邏輯性。4、由於本計畫是屬於地調所之成果，報告中使用之相關專有名詞，請設法與本所之用法一致。5、各因子如果只選用最具關鍵性之性質(例如 K 值、硝酸鹽)，建議將因子之用詞能更精準的定義。	感謝委員意見，已進行修正。
29	請加強說明圖 3.1-10 地下水位變化標準差。	感謝委員意見，圖 3.1-10 並無地下水位變化標準差，其已於 4.1.2.3 小節補充說明。
30	圖 2.1-2 不夠清晰；表 2.1-16 及 2.1-17 請註明來源；圖 3.1-7、圖 3.1-9 及圖 3.1-11 請註明單位；6.2.2 請與 6.1 合併；p.157 結論及 p.176 後續工作請匯整後一併列入最後一章。	感謝委員意見，圖 2.1-2、表 2.1-16-17、圖 3.1-7 -9 -11 已修改
31	p.195 濁水溪沖積扇概念分層共四地下水層及四阻水層，與圖 7.3-1 不一致，請修正。	感謝委員意見，已進行修正。

附錄四 期末報告審查意見及辦理情形

期末報告審查意見及辦理情形

一、 開會時間：98 年 12 月 8 日（星期二）下午 2：00

二、 開會地點：本所 2 樓第 2 會議室

三、 主持人：張組長郇生　　記錄：陳瑞娥

四、 出列席單位及人員：詳如出(列)席簽名單

五、 主席引言：略

六、 主辦單位說明：略

七、 承辦廠商簡報：略

八、 綜合討論：略

九、 委員綜合意見：

	委員綜合意見	辦理情形
1	本計畫研究方向正確，內容資料豐富，分析完整，可提供地下水補注區範圍確認，並提高未來各地下水區水文地質圖製作及地下水源評估之精度。	感謝委員指教。
2	有關地下水位變化、地下水位上升量、或地下水位之討論，請再詳細檢核。報告所用名詞請統一，例如「阻水層」而不是「難透水層」。圖表中所用名詞請統一改用中文名詞。	感謝委員意見，遵照辦理。
3	地下水位歷線法對於大區域邊界，例如斗六丘陵、八卦台地、北港溪或烏溪，請說明如何評估流入或流出量。	感謝委員意見，水位歷線法中，於降雨後退水段所求得之整個流域之「流出量」即為所有邊界交換量之總和，惟水位歷線法本身並無法計算各邊界分段之交換量。
4	請摘要說明地下水位歷線分析法是以何種電腦程式語言開發？	感謝委員意見，已補充說明。
5	結論一「表層觀測水位」宜用「淺層觀測水位」，請修正。T 值單位請修正為 m^2/min。	感謝委員意見，已修正。
6	第 1 頁「地下水觀測網整體計畫」執行期限為 81 年至 97 年；水文地質調查研究並完成 332 口，總長度 67231 公尺，請修正。	感謝委員意見，已修正。
7	表 2.1-1 表內容不完整，請修正。地電阻測線位置圖不清楚，請改善。	感謝委員意見，已修正。

8	3.3.3 及 3.4.5 章節標題為「結論與建議」及「結論」請修正。第 70 頁「斗六扇」請修正。第 78 頁圖 3.3-6 請標示地名及相關位置。第 84 頁圖 3.3-8 請修飾各項影響水質機制之示意方式。第 85 頁圖 3.3-9 溪水導電度歷線不易區分，請修正。	感謝委員意見，3.3.3 及 3.4.5 章節標題已更改為「成果分析」；斗六扇已更正。第 78 頁圖 3.3-6 已標示地名及相關位置。第 84 頁圖 3.3-8 已修飾。第 85 頁圖 3.3-9 溪水導電度歷線已修正。
9	表 3.1-2 中，H1000、S1000 請將定義列於符號表前面，S1000 與儲水係數 S 宜區隔。第 142 頁「由降雨趨勢來推補注量大小」請再加以檢討。第 146 頁「Rav」為平均日降雨量。第 148 頁請補充累積降雨量為「平均雨量」或「日雨量」。第 151 頁圖 4.1-13 請補充圖例說明。第 153 頁請定義水位標準差之計算方式。	感謝委員意見，表 3.1-2 已修改，S1000 改為&1000。第 146 頁「Rav」以更改為第平均日降雨量。148 頁「累積雨量」更改為「降雨量」，指各場次降雨事件之降雨量。第 151 頁圖 4.1-13 已補充圖例。第 153 頁水位標準差之計算方式已於報告中補充說明。
10	第 174 頁以 40 分以上為補注區劃設標準應為合理，唯仍須與其他方式再比較後再確定，特別是與地電阻剖面調查結果作比對。	感謝委員意見，已於前言一章補充，本計劃將於後續年度以其他方式比較，
11	引用站數或井數要清楚。第 144、145、146、164 頁等圖說文詞可再進一步改善。表 2.2-2 請增加單位說明，「宜梧」名詞請修正。	感謝委員意見，已遵照辦理。
12	第 243 頁阻水層透水係數設為 4×10-3 公尺/天，請說明其敏感度如何？	感謝委員意見，阻水層的 K 值因其數值很小，因此是否有空間上的變化，對於穩態模擬結果影響不大。本年度的數值模式乃是初步建置，為穩態模型，因此各項參數在下一年度仍有調整的空間。
13	請說明以相關係數選取水位資料之補遺，如何品管？	感謝委員意見，地下水位資料的缺漏，乃是一個很難以資料補遺的方式完全解決的問題。本研究採用線性相關的方式進行補遺，乃是在本計畫可行的範圍內最好的處理方式。
14	建議將本計畫總體目標及分年目標於前言中簡要描述，以利閱讀。各分項工作之目的應說明更清楚，並說明各項目之間有何關係？例如鑿井進行抽水試驗、水質調查及地電阻與其他主要工作項目之相關性？提供何種關	感謝委員意見，已於前言中補充。

	鍵資料？	
15	地下水水位歷線法所建立之相關性，應可再明確說明，所用之資料應有一致性，例如日平均水位及年平均水位。	感謝委員意見，本計劃地下水位均使用日水位資料，雨量資料則因考量，平均年降雨量補注潛勢因子以年雨量資料分析，而降雨量與地下水位變化相關性因子、地下水位歷線法則以日雨量及日地下水位分析。
16	地下水補注潛勢評估，應更清楚說明目標為何？是定性的補注區劃分或是年平均補注量的定量評估？	感謝委員意見，本計劃之補注潛勢評估結果乃是半定性之補注區劃分，需將下一年度之數值模式求得定量之結果，優化補注潛勢因子間之權重，以作為劃分主要補注區之依據。
17	請補充補注區劃分之定義說明。	感謝委員意見，本年度以補注潛勢分數 40 分為界線初步劃分補注區範圍，再利用下一年度之數值模式求得補注量結果、以及硝酸鹽濃度和地電阻之空間分佈趨勢做為補注潛勢因子間權重檢定之依據，再以客觀合理之潛勢分數加以劃分。
18	針對七個補注潛勢因子，應說明與潛勢評估之因果關係。其中河系密度不容易定義，建議以鄰近河川水位作潛勢因子。	感謝委員意見，本計畫所採用七大因子中，其中六大因子已於報告第四章 4.1.2 節中說明。另外，針對降雨與地下水位變化相關性亦已於修正報告中補充說明。
19	「扇頂、扇央、扇尾降雨與地水位相關性」建議修正為「各地降雨與扇頂、扇央、扇尾之地下水水位相關性」。	感謝委員意見，目前本計畫對區域平均降雨量的計算尚未進行扇頂、扇央及扇尾的區分，而是以如報告所示之平原區(包含整個沖積扇)、山區(沖積扇上游集水區)及全區(包含平原區與山區)進行分析，因此為避免混淆，於報告中改以受壓水井與非受壓水井兩類水井的方式呈現此項工作之結果。

20	建議將期中報告「扇頂補注區水文地質架構與參數」內容納入成果報告中。	感謝委員意見，已將期中報告「扇頂補注區水文地質架構與參數」內容納入成果報告中 3.1 節。

附錄五 本年度計劃出國研習訪查報告

出國報告(出國類別：開會)

赴加拿大參加32屆IAHR國際年會

服務機關：國立交通大學

姓名職稱：張良正教授

派赴國家：加拿大(溫哥華)

會議日期：98年 8月 9日至 8月 14日

目錄

目錄.....-1-

摘要.....-2-

壹、前言.....-3-

貳、行程.....-4-

參、工作內容.....-6-

肆、心得與建議.....-12-

摘要:

本屆(32 屆) IAHR 國際會議的主題，在探討維持環境永續的前提下，水利工程及水資訊科技應有的角色。且因為人類的活動大多集中在河川流域以及海岸地區，因此特別強調在流域(Watershed)及海岸(Coasts)環境的永續維護。

本屆會議在前述主題下又分為六大議題，包括：水利相關科學與工程技術之進展、民生相關之水利基礎設施、集水區與含水層的保育、海岸與近海地區人為與天然環境永續維護、水利資訊在整合式流域與海岸管理之進展、水利工程教育與訓練等。

壹、前言:

IAHR國際會議歷史悠久，為國際上水利工程及水資源方面最重要的會議之一，本屆會議日期為八月9日至14日共計6日，第一天主要是提供給參與學生的相關活動與教學課程，真正的會議議程乃是從10日(週一)開始，會議型式包括口頭簡報與海報張貼兩種。如前所述本屆會議有六大議題，各項議題進一步說明如下:

1. 水利相關科學與工程技術之進展

   本主題在展示與討論促成水利工程進步的新觀念及基本理論與技術的進展。

2. 民生相關之水利基礎設施

   本主題在探討與民生息息相關之能源、供水及水資源管理等相關工程與技術。

3. 集水區與含水層的保育

   本主題在探討地表水與地下水流動機制及人為活動對其之影響。

4. 海岸與近海地區人為與天然環境永續維護

   本主題在探討自然過程與工程設施，對海洋生物及海岸環境的影響。

5. 水利資訊在整合式流域與海岸管理之進展

本主題在探討水利資訊技術在流域與海岸監測與管理上的應用。

6. 水利工程教育與訓練

本主題在展示歷史上重大的水利工程事件，及對水利工程有重大貢獻的人物。

貳、會議行程:

第一日(8/9):

本日主要是給參與學生的教育訓練課程，包括: 水文量測之不確定性分析、天然河川與人工渠道中的亂流、河川橫向構造物中之魚道設計等三門課程。

第二日(8/10):

本日為大會正式會議的第一天，專題演講題目包括：「氣候變遷與其對水資源的衝擊」、「平滑粒子動力學(SPH)」。其它簡報及海報展示的範圍包括水利相關科學與工程技術之進展、民生相關之水利基礎設施、集水區與含水層的保育及水利資訊在整合式流域與海岸管理之進展等議題。

第三日(8/11):

本日專題演講題目為:「科學與政策於氣候變遷議題的對話 - 加拿大經驗」。簡報及海報展示的範圍則包括前述所有六大議題。

第四日(8/12):

本日專題演講題目為:「進入第二個世紀之美國與加拿大跨邊界水資源管理」。簡報及海報展示的範圍則包括前述所有六大議題，晚上則有為年輕學生舉辦之晚宴。

第五日(8/13):

本日專題演講題目為:「巴拿馬運河之擴建」。簡報及海報展示的範圍則包括前述所有六大議題，晚上則有 IAHR 會員大會及為所有與會者舉辦之晚宴。

第六日:

本日為本次會議最後一天，專題演講改為頒獎，有兩大獎項一為 IAHR 之 Ippen Award，Ippen Award 為紀念 IAHR 創辦人 Arthur Thomas Ippen 之獎項，另一為 IAHR 與 EWRI 聯合頒給之「Hunter Rouse 水利工程講座」。簡報及海報展示的範圍則仍包括前述所有六大議題，中午 11:00 至 11:30 則有大會閉幕典禮。

參、工作內容:

本團隊參與本次大會海報展示部份，海報內容如下:

Automatic Parameters Identification of Groundwater Model using Expert System

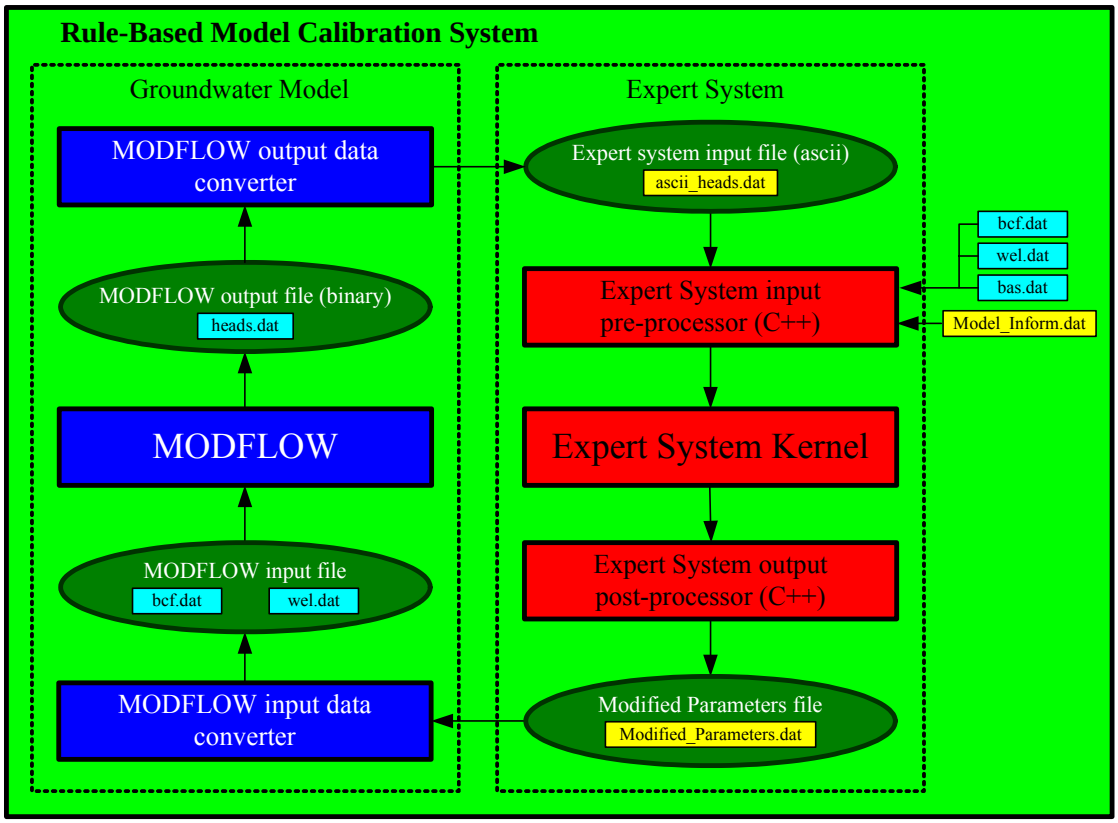
Chen-Che Pan Jui-Pin Tsai Liang-Cheng Chang Yu-Wen Chen
Department of Civil Engineering , National Chiao Tung University, Taiwan, ROC

ABSTRACT

This study integrates a rule-based expert system and a groundwater simulation model to develop an automatic groundwater parameters calibration system (RBMS). The system computes the parameter value automatically through inferring the parameter adjusting rules without extensively interacting with system user. The rules can be structured or non-structured. In this stage, the hydraulic conductivity and specific yield are the major parameters to be calibrated in the system.

The results demonstrate that the system can identify accurate parameter value. Beside the parameter values, the parameters estimation process is also easier to interpret than using only optimization method.

System Architecture



Expert System

This study adopts the software CLIPS to develop the expert system component of RBMS. CLIPS is written in C for portability and speed and has been installed on many different operating systems without code changes. Similar to the groundwater model component, there are data pre and post processing routing to process the input and output data of the expert system kernel.

Knowledge Base

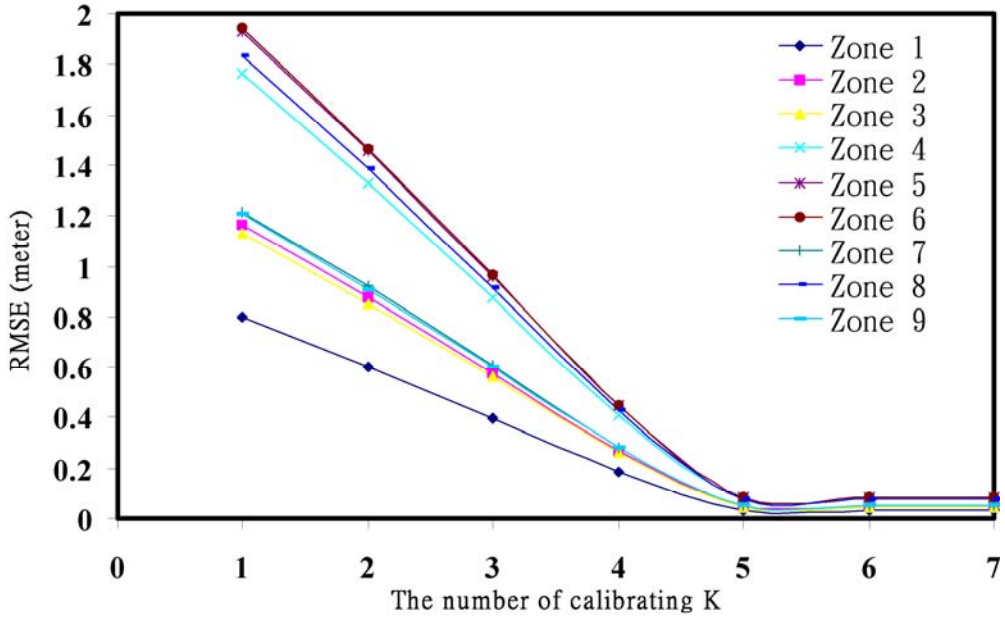
The expert system in RBMS is a rule base expert system. The rules in the expert system consist of calibration knowledge and experience.

The hydraulic conductivity (K) and Specific yield (Sy) are specified in zones. The expert system searches the model parameters according to the rules in knowledge base. The calibration knowledge and experience can easily expand by adding rules into the knowledge base without reprogramming and revising system architecture.

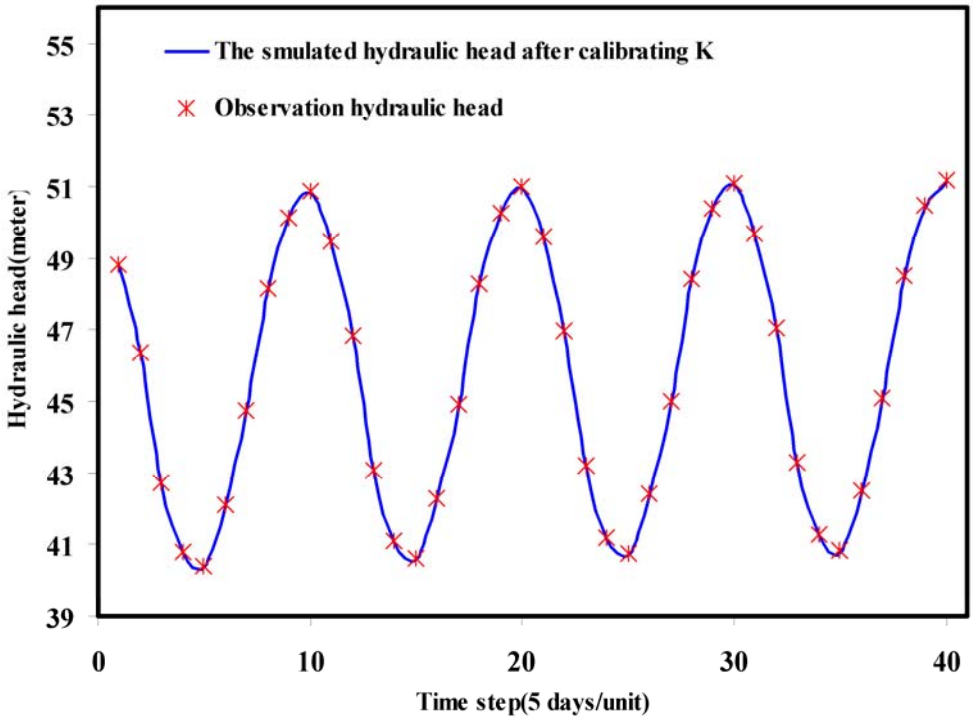
Case study and Result

The result of calibrating K for case I

	Target K(m/day)	**Initial K value(m/day)**	**Final K value(m/day)**
Zone 1	**40**	**60**	**39.37**
Zone 2	**15**	**22.5**	**14.76**
Zone 3	**25**	**37.5**	**24.6**
Zone 4	**13**	**19.5**	**12.79**
Zone 5	**35**	**52.5**	**34.45**
Zone 6	**15**	**22.5**	**14.76**
Zone 7	**35**	**52.5**	**34.45**
Zone 8	**12**	**18**	**11.81**
Zone 9	**42**	**63**	**41.33**



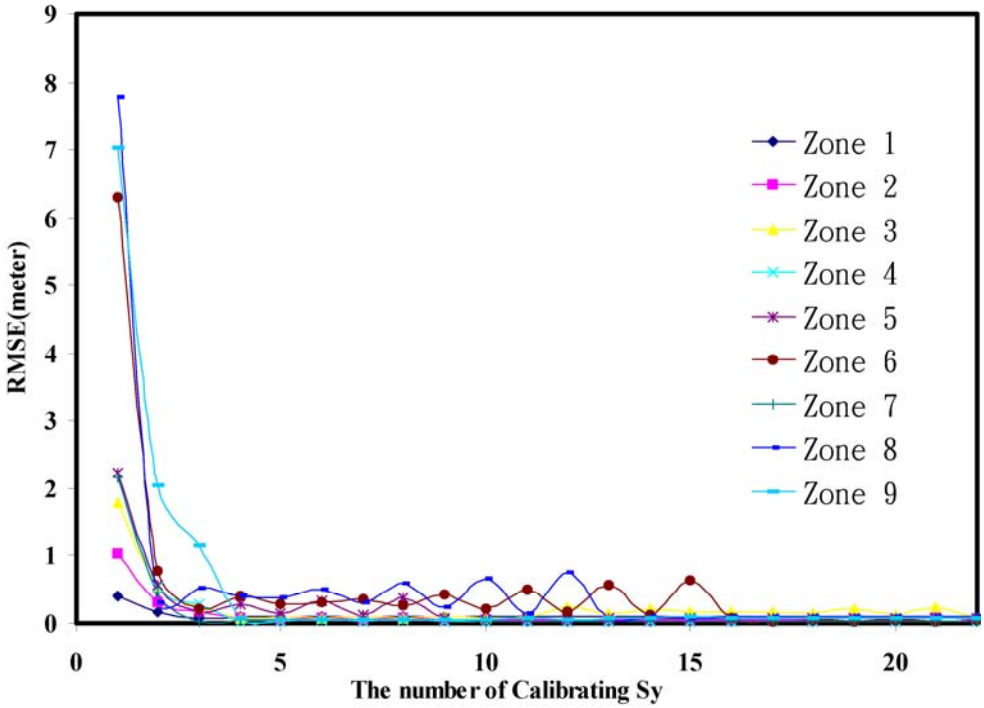
The convergence situation of each zone for case I



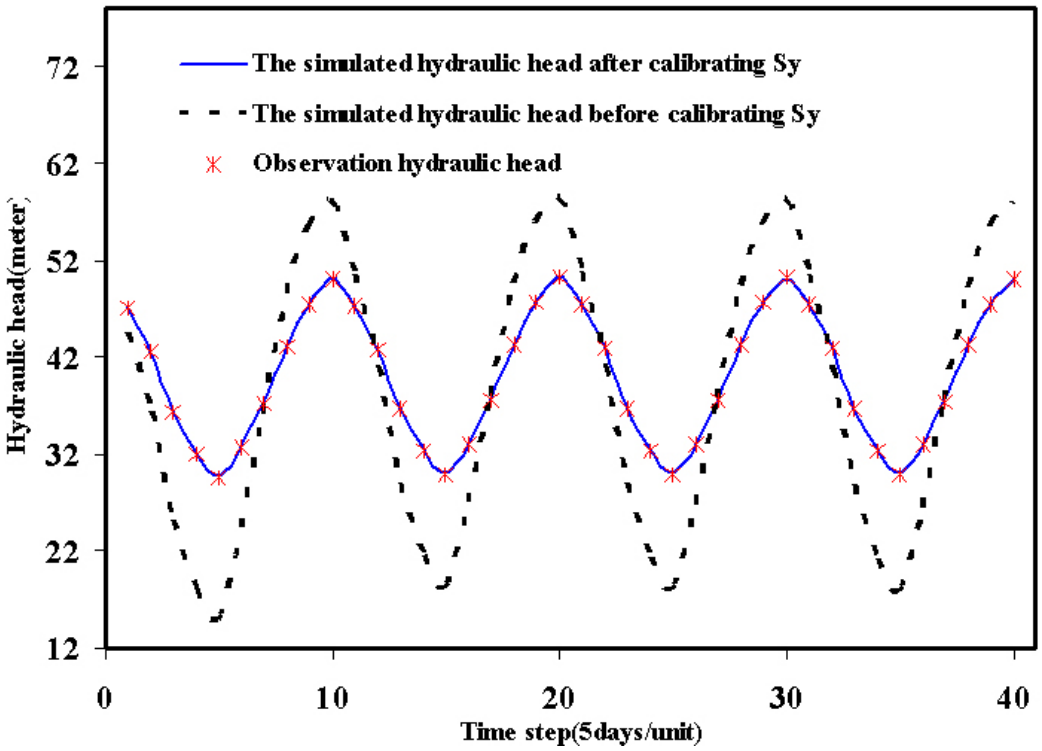
The final calibrating result of zone 3 for case I

The result of calibrating Sy for case II

	Target Sy value	Initial Sy value	Final Sy value
Zone 1	**0.26**	**0.5**	**0.285**
Zone 2	**0.3**	**0.1**	**0.287**
Zone 3	**0.25**	**0.5**	**0.256**
Zone 4	**0.29**	**0.1**	**0.287**
Zone 5	**0.26**	**0.5**	**0.264**
Zone 6	**0.23**	**0.1**	**0.231**
Zone 7	**0.27**	**0.5**	**0.272**
Zone 8	**0.21**	**0.1**	**0.212**
Zone 9	**0.2**	**0.5**	**0.201**



The convergence situation of each zone for case II



The final calibrating result of zone 8 for case II

Conclusion

As this study demonstrated, adding a rule and representing a professional's experience or preference by rules of expert system are flexible and easy. The proposed RBMS model can store the expert's experiences and the system efficiency and capability can increase through model applications. Beside, an expert system can output the rules-fired records and one can interpret the result of a calibration run through tracing the records.

肆、心得與建議:

IAHR 國際會議歷史悠久，向為國際上水利與水資源相關學門最重要的會議之一，本次的會議中，來自世界各國的專家學者，發表了各種水利與水資源包括地下水等相關議題的研究成果，本團隊與其它研究相互交流亦有豐碩的收獲。

另外，由會議 IAHR 安排的主題與演講中可以發現，IAHR 對於目前趨勢與基礎研究並重，並未有因趕流行而追逐議題的情形。氣候變遷為目前氣象、水文與水資源方面的重大議題，本次大會其亦為重點之一，惟其它基礎而重要的研究工作成果仍佔多數，顯現此大型學術組織永續經營的態度與作法。此外，IAHR 對於年青學生與學者特別重視，除了安排教育訓練課程外，並為其舉辦相關交誼活動，此點可供國內舉辦相關活動的參考。