經濟部

計畫編號：101-5926901000-03-01

臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估
地下水補注潛勢評估與地下水模式建置 (4/4)

Hydrogeology investigation and groundwater resource assessment for Taiwan：
Groundwater recharge estimation and model simulation (4/4)

期末報告

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
中華民國一〇一年十二月

計畫編號：101-5926901000-03-01

臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估
地下水補注潛勢評估與地下水模式建置 (4/4)

Hydrogeology investigation and groundwater resource assessment for Taiwan：
Groundwater recharge estimation and model simulation (4/4)

期末報告

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

中華民國一〇一年十二月

摘要

經濟部自民國 81 年起執行「臺灣地區地下水觀測網整體計畫」，於臺灣地區九個地下水區及恒春和澎湖地區，進行地下水觀測井網建置及水文地質調查研究，執行期程分三期共十七年。此計畫之執行除了建立臺灣地區之地下水觀測系統以及水文地質資料庫外，並進一步釐清了臺灣地區重要地下水區之水文地質架構，且據此初步釐訂濁水溪沖積扇和屏東平原之地下水補注區，惟後者仍有待進一步評估確認。本計畫係依據「臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估計畫」(98 年至 101 年)實施進度之規劃，分別進行濁水溪沖積扇及屏東平原地下水區之地下水補注潛勢評估與地下水模式建置，本年度為全程計畫之第四年，完成屏東平原之現地補充調查、建置分散型地下水歷線法、建置暫態數值模式，並綜合前述兩項結果於屏東平原區域抽水量與補注量等地下水水平衡評估，以及確認地下水主要補注區範圍等五大項目，並以主要補注區範圍建議與屏東平原區域抽水量與補注量推估等為本計畫最重要成果。

地下水主要補注區範圍之建議部分，本計畫綜合高補注潛勢區、高地電阻區與高溶氧區三者，並搭配岩心鑽探柱狀圖與數位地表高程(DTM)等資訊，得出屏東平原主要補注區分布。其主要範圍包含屏東平原北區與南區，北區包含旗山鄉、美濃鄉、高樹鄉、里港鎮、鹽埔鄉、長治鎮及內埔鄉，南區部分包含萬巒鄉、潮洲鄉與新埤鄉。

屏東平原區域抽水量與補注量之推估部分，本計畫綜合分散型地下水歷線法與數值模式之結果，推估得屏東平原全區之垂向補注量為 17.65 億噸，上游山邊側向流入量為 3.13 億噸，下游海岸側向流入量為 0.23 億噸，三項總合之系統總流入量為 21.01 億噸。於系統流出量方面：含水層一抽水量 1.33 億噸，含水層二抽水量 4.40 億噸，含水層三抽水量 4.12 億噸，流失量 11.11 億噸，四項總合之系統總流出量為 20.96 億噸。

在現地補充調查試驗部分，可區分為地電阻調查與水質調查兩項，本年度已完成 6620 公尺二維地電阻現地量測，並以其為基礎判識高電阻區域之分部布，屏東平原的高電阻區域邊界與沖積扇的扇緣雷同，大致分為南、北兩個分區，北側為荖濃-隘寮溪沖積扇補注區邊界，自吉洋觀測井之西側與里港觀測井之東邊，往南至九如觀測井之東側、海豐觀測井東側，向東南延續至建興觀測井西側，最後經老埤觀測井西側至東側大武山區；南側林邊-力力溪沖積扇補注區邊界則由萬巒觀測井之南側往西南，至潮州觀測井之東側後，從萬隆觀測井與新埤觀測井中繼續往南，最後經大響二觀測井之西方至屏東平原最南側。在水質調查方面，101 年調查屏東平原南部—林邊溪及力力溪扇頂至扇尾地區，共進行

地面水 12 處、地下水 29 站 65 口井採樣與化驗。完成了溶氧帶及硝酸鹽帶的範圍，以利補注區的判斷。並於調查得知地面水及扇頂地下水大都以碳酸氫鈣水質為主，只有少數地下水偏碳酸氫鈉。地下水歷年導電度與濁水溪扇頂比較，屏東地區扇頂地下水並沒有增加的趨勢。
關鍵字：分散型地下水歷線法、地下水模式、地下水補注潛勢與地電阻調查

結論與建議

一、結論

(一) 主要補注區劃定

本計畫綜合高補注潛勢區、高地電阻區與高溶氧區三者，並搭配岩心鑽探柱狀圖與數位地表高程(DTM)等資訊，得出屏東平原主要補注區分布。其主要範圍包含屏東平原北區與南區，北區包含旗山鄉、美濃鄉、高樹鄉、里港鎮、鹽埔鄉、長治鎮及內埔鄉，南區部分包含萬巒鄉、潮洲鄉與新埤鄉。

(二) 補注量及抽水量推估

本計畫應用分散型地下水歷線法進行評估，綜合屏東平原淺層與深層觀測井，分析取 1999~2010 年之水平衡。此外，分散型地下水歷線法亦針對事件降雨量與補注量進行線性回歸，如有 100(mm)之累積降雨降於屏東平原，約可貢獻將近 62 百萬噸之補注量。而於數值模式方面，則應用 MODFLOW 建立地下水數值模式，以 1999~2010 年地下水位資料進行淨補注量之檢定，平均檢定誤差約 0.4 公尺。

本計畫綜合分散型地下水歷線法與數值模式之結果，推估得屏東平原全區之垂向補注量為 17.65 億噸，上游山邊側向流入量為 3.13 億噸，下游海岸側向流入量為 0.23 億噸，三項總合之系統總流入量為 21.01 億噸。於系統流出量方面：含水層一抽水量 1.33 億噸，含水層二抽水量 4.40 億噸，含水層三抽水量 4.12 億噸，流失量 11.11 億噸，四項總合之系統總流出量為 20.96 億噸。

(三) 主要補注區對全區地下水系統水量、水質之影響

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

在水量方面，分別統計屏東平原與主要補注區之面積與垂向補注量，統計結果為屏東平原面積為 1231.26 平方公里，整體之垂向補注量為 17.65 億噸，主要補注區面積為 367.57 平方公里(約佔平原面積三成)，主要補注區內之垂向補注

量為 12.19 億噸(約佔整體垂向補注量七成)。因此若主要補注區內未妥善管理開發行為，而導致區域內透水面積大減，將大幅降低整體補注量，影響系統水平衡甚劇。

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

(四) 資料之檢視與補遺

本計畫全面檢視屏東平原地下水觀測網，自 1999 年至 2010 年間之地下水位資料，發現少數水井存在一定程度之誤差與缺漏，若直接應用將產生相當之誤導，故需進行資料校正與補遺。資料之缺漏部分，本計畫係以人工方式配合統計相關分析進行補遺，並逐站進行之。資料之誤差部分，疑似有一定程度之儀器校正誤差，此種誤差雖然可由資料明確顯示出，惟卻難以程式自動校正，故以人工方式逐站修正之。

(五) 現地補充調查試驗

1. 地電阻調查分析:

二維地電阻調查分析部分，本計畫 100 年度完成屏東平原地區共 7240 公尺二維地電阻現地量測，並進行一維地電阻半施蘭卜吉(Half-Schlumberger)探測結果之反演，地電阻量測之高電阻區域，與一維反演深度 30 公尺資料相符，除了在美濃與內埔測線有些微不同之外，其他段測線並沒有太大爭議。101 年度完成屏東平原地區共 6620 公尺二維地電阻現地量測，因屏東平原的沖積由大塊礫石快速轉變為砂泥互層，而非轉為砂層再轉為泥層，故屏東平原二維地電阻量測結果顯示，高電阻區域邊界與沖積扇的扇緣雷同，並可作為主要補注區判視之參考。剖面影像解析亦大致上反映了地質分佈之狀況，因此印證先前本計畫認為可以利用地電阻剖面影像描繪阻水層分佈之假設。

2. 水質調查分析:

地下水之高溶氧帶由高樹、新南至大響及枋寮等。硝酸鹽帶的分布再往西、分布更廣。扇頂地下水水大都以碳酸氫鈣水質為主，只有少數地下水偏碳酸氫鈉，此現象應為陽離子交換的結果。只有一口井導電度有偏高，有 2 口井的導

電度有增加的趨勢，與濁水溪扇頂比較，屏東地區扇頂地下水並沒有鹹化現象。屏東地區扇頂區的硝態氮濃度皆小於 10mg/l(環保署飲用水源水質標準)。統計沿海含水層共 27 口觀測井，87-101 年之導電度，前幾年有變鹹、但近年有變淡的趨勢。地下水氨態氮以西南靠海側較高，為泥質地層較多的中下游，可能由地層中的有機物溶解/降解。

二、建議

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

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

(三) 本年度已完成屏東平原地下水主要補注區劃設，惟在二維地電阻調查部分，因內埔觀測井至老埤觀測井附近場地不佳，因此無法取得最佳位置施測，故內埔老埤地區測線分布較為不足，參考中央地質調查所鑽鑿之屏科大 1 號井及 2 號井岩心紀錄後，本計畫研判此一地區屬於隆起之礫石台地，因此初步建議排除在補注區範圍之外，惟建議就此一地區未來可能增加地質鑽井以協助補注區劃設研判。

(四) 由於屏東地區為由數個發源於潮州斷層以西之山區沖積扇所共同組合而成，部分聯合幾個沖積扇之補注區，在各個沖積扇靠斷層之側向扇緣交接區域，也可能有厚層泥質地層存在，但因地電阻施測耗時較多，侑於期程之限制，因此無法就扇頂其餘部分進行普測，因此易忽略局部的扇緣泥層部分，建議將來對於扇頂部分進行更詳細之地電阻施測，以釐清局部泥層之延伸情況。

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

目錄

圖目錄

表目錄

第一章 前言

1.1 計畫緣起及目的

(一) 計畫緣起

經濟部自民國 81 年起執行「臺灣地區地下水觀測網整體計畫」，執行期程分三期，共十七年，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前進。

(二) 計畫背景

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，進行濁水溪沖積扇及屏東平原地下水區之全區地下水補注潛勢評估與地下水模式建置，逐年建立不同地下水區主要補注區的完整面貌，分析其補注機制、補注潛勢評估、水平衡分析、地下水流模擬、地下水層水文地質參數測定及地下水位水質監測，以提供地下水補注區範圍確認，提高各地下水區水文地質圖製作及地下水資源評估之精度。本「地下水補注潛勢評估與地下水模式建置」調查分析研究工作擬達成下列目標：

(1) 建立地下水區全區之地下水補注潛勢評估作業程序。

(2) 完成濁水溪沖積扇地下水主要補注區劃分。

(3) 完成屏東平原地下水主要補注區劃分。

(4) 完成濁水溪沖積扇地下水補注量、抽水量及補注潛勢評估。

(5) 完成屏東平原地下水補注量、抽水量及補注潛勢評估。

(三) 整體構想

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。

(四) 研究期程及區域

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。

1.2 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，以下將對本年度(101 年度)研究區域，屏東平原地下水及水文地質進行摘要描述。

1. 區域範圍

屏東平原位於臺灣之西南端，北與阿里山山脈的南端相隔，西接嶺口丘陵地，南接臺灣海峽，東以潮州斷層與中央山脈南端大武山山脈相隔，海拔 100 公尺以下之平原地帶面積約 1231.26 平方公里。本計畫參考中央地質調查所規劃之地下水區，其南北長約 50 公里，東西寬約 20 公里，地勢由東北向西南緩斜，內有高屏溪、東港溪及林邊溪流域等主要河川貫穿本區，注入臺灣海峽。

2. 水文地質架構

屏東平原深約 220 公尺內之水文地質分層，由上而下可劃分含水層一、阻水層一、含水層二、阻水層二、含水層三之 1、阻水層三及含水層三之 2 等七層。含水層極為發達，厚度大且延展遍佈全區；阻水層則間夾於含水層中，厚度遠小於含水層並且僅分布於平原南段，因此含水層只於南側有顯著之分隔，而北及東側則合而為一。本計畫依據中央地質調查所-台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，所繪製九條水文地質剖面為水文地質架構建置基礎，其中林園-枋山剖面如圖 1.2-1 所示，而屏東平原各阻水層分布區示意如圖 1.2-2 所示。

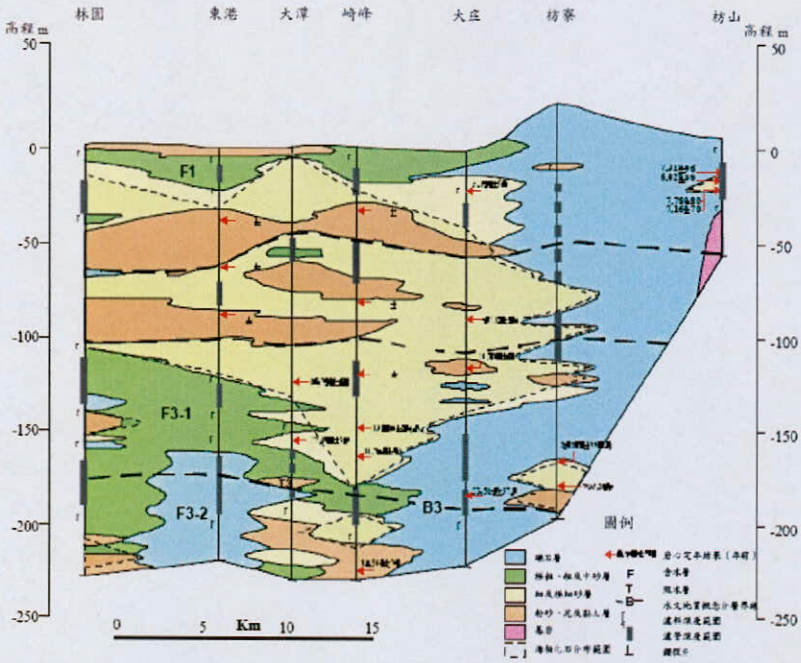


圖 1.2-1 林園-枋山水文地質剖面

圖 1.2-2 阻水層分布區示意圖

3. 地下水觀測

屏東平原屬於「臺灣地區地下水觀測網整體計畫」的辦理期程之第一階段(81年度至87年度)，因該沿海地區地層下陷較為嚴重，因此優先規劃實施。目前已建置地下水觀測站53站(132口)，抽水試驗站9站(23口)，水文地質調查站52站。圖1.1-9為屏東平原地下水觀測網分布圖。

4. 水文地質參數

屏東平原大致可區分為扇頂、扇央及扇尾區，扇頂區約位於吉洋、里港、彭厝、建興、赤山、萬隆、德興聯線以東，可稱為聯合沖積扇扇頂，大約是以礫石層頂部之深度為50公尺之等厚度線為界線；扇央區位於扇頂層區以西，至九曲、萬丹、崁頂、大庄聯線以東；扇尾區位於扇央區以西至沿海。扇央及扇尾為區域受壓含水層。各層的透水係數K除了少數在10^{-5}公尺/秒以外，其餘皆介於10^{-3}~10^{-4}公尺/秒之間，傳導率T介於3×10^{-5}~$15.1m^2/\min$之間，比容量Q/s介於0.004-654.5 cmh/m。含水層特性參數的算數平均值為扇頂大於扇央大於扇尾區，各含水層以含水層一最佳，含水層水力特性以扇頂最佳，扇央次之，扇尾最差。

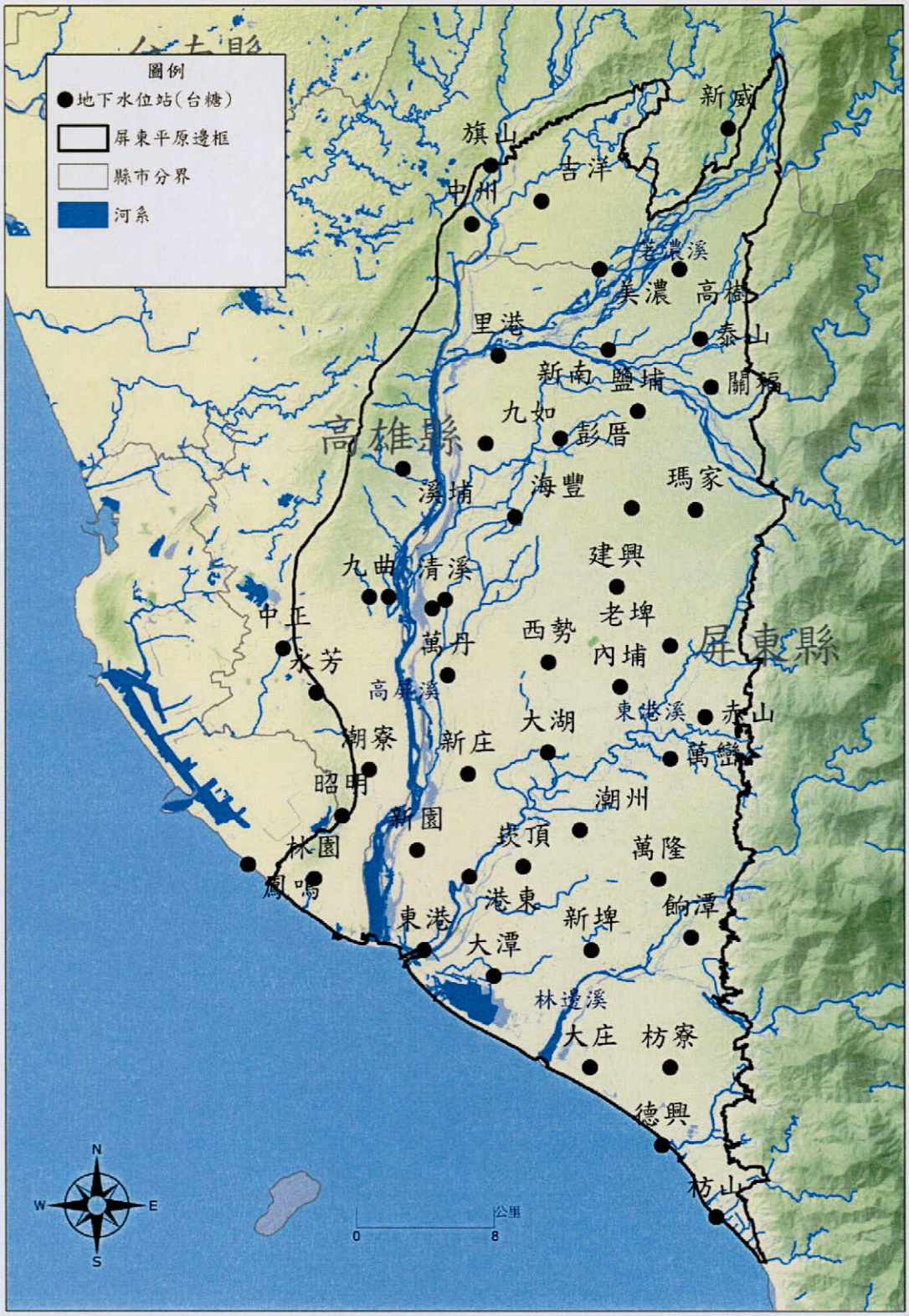


圖 1.2-3 屏東平原地下水觀測網站井分布圖

1.3 計畫工作項目及內容

1. 98 年度主要工作項目及成果概述如下：

(1) 資料蒐集及彙整

本計畫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。

(3) 地下水歷線法電腦作業流程規劃及程式開發

地下水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的參考，其中補注量更可與前述補注潛勢評估結果互相比較。

本計畫應用 Fortran 電腦程式語言，建立地下水歷線法模式，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。

本計畫建立之地下水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畫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，本計畫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 年度工作內容概述：

(1) 修正型地下水歷線法模式發展與比較

本工作項目為延續 98 年度地下水歷線法之研究成果，再加入側向交換量之考量，重新進行濁水溪沖積扇補注量評估，並與原地下水歷線法進行比較。

(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) 現地補充調查試驗

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，預計於六合站，以上部地下水層(F1)為主，鑽鑿抽水井 60 公尺深，埋設 12 吋 PVC 管進行複井抽水試驗以求取儲水係數。水質調查持續監測莿桐及柑園站之水位、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 年度工作內容概述：

(1) 資料收集及檢核

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。本計畫並將對屏東平原地下水位觀測資料進行全面性的校正與補遺。

(2) 屏東平原補注量及抽水量推估

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

(3) 屏東平原地下水補注潛勢評估

本年度以屏東平原為研究區域，參考相關文獻的作法，配合屏東平原水文地質特性，以土地利用、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，完成屏東平原補注潛勢評估。

(4) 屏東平原地下水主要補注區初步劃設

本項工作延續前述建立之屏東平原地下水補注潛勢評估之結果，配合二維地電阻現地量測，初步劃設屏東平原地下水主要補注區範圍。

(5) 地下水補注潛勢評估作業平台更新

本項工作將以前兩年度發展之平台為基礎，更新建置屏東平原地下水潛勢評估及水位歷線法相關分析所需之資料。

(6) 屏東平原穩態地下水數值模式建置與檢定

本年度為屏東平原地下水數值模式建置之第一年，本計畫採用美國地質調查局(U.S.G.S)發展的 MODFLOW 程式，依屏東平原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等，配合本計畫發展之專家系統參數檢定模式，進行穩態模擬模式的建置與檢定。

(7) 現地補充調查試驗

以地下水觀測井網現有井作為觀測井，選擇鄰近適當井位，以上部地下水層(F1)為主，鑽鑿抽水井，埋設 8 吋 PVC 管後進行複井抽水試驗，以求取儲水係數；水質調查將進行地下水採樣－扇頂 12 站共 26 口井，12 處地面水(每個沖積扇各 3 點、4 個沖積扇共 12 點)，共 38 個水樣，旱雨季各一次；地電阻調查方面，預計利用工研院於 84 年在屏東區域的一維半施蘭卜吉地電阻法探勘結果所得之視電阻率資料，初步分析判定屏東區之補注區邊界。並分區施作四子區域之地電阻平移式測線，總長度共計超過 3 公里。

4. 101(本)年度工作內容概述：

(1) 現地補充調查試驗

水質調查持續監測屏東扇頂即邊界地區，為了瞭解補注區及其邊界的水質變化，預計由北往南進行地下水採樣－第一次為 101 年 4-5 月採樣林邊溪地區 15 站共 30 口井，12 處地面水，共 42 個水樣。第二次為 101 年 9-10 月為力力溪沖積扇及沿海地區 14 站 35 口井。地電阻調查預計沿隘寮溪上游至下游方向，在三地門橋西側至關福、鹽埔等地下水觀測井測站間之扇頂區域，進行二維地電阻施測(本項預計完成總長 3 公里之地電阻施測);另外於林邊-力力溪沖積扇與北側荖濃-隘寮溪沖積扇間區域與北側至山區岩盤附近共完成總長約 2 公里之二維地電阻補充側線 。

(2) 建立並補充完成屏東平原沖積扇之地電阻率三維模型

預計將利用野外工作之成果，配合先前完成之三維初步電阻率空間模型與當地之鑽井與地質鑽探資料，可進一步運用繪出二維與三維之電性空間分布圖，並進一步交叉比對其他水文地質資料，提供運用地電阻率之空間分布劃

設補注區邊界之參考。

(3) 分散型地下水歷線法建置

原始型與修正型地下水歷線法係以地下水位、達西公式及水平衡方程式為基礎，進行之補注量、抽水量與交換量等之推估，本計畫延續原始型與修正型之概念，打破徐昇氏網格之限制，以內插演算法搭配地形變化與定水頭邊界條件等，推估三維網格之時序地下水位，藉由地下水平衡方程式與達西公式估算各網格之淨補注量，淨補注量之結果可作為暫態數值模式建置之起始值。

(4) 地下水暫態數值模式建置與分析及補注量與抽水量推估

以 100 年建置之屏東平原地下水穩態數值模式為基礎，擴充建置屏東平原地下水暫態數值模式，暫態數值模式可作為後續補注量與抽水量推估及各類衝擊分析之依據。此外，結合分散型水位歷線法與屏東平原暫態數值模式可呈現出補注量與抽水量在時間上與空間上之分布。

(5) 地下水主要補注區衝擊影響分析

完成暫態地下水數值模式建置後，搭配 MODPATH 水質模式進行水質傳輸模擬，評估主要補注區受污染後對屏東平原地下水含水層之影響範圍及可能影響之用水量。

(6) 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。

(五) 預期成果及交付項目

(1) 101(本)年度預期成果

i. 完成現地補充調查試驗及屏東平原的水質地化分析。
ii. 完成屏東隘寮溪扇頂區域及林邊溪-力力溪沖積扇地電阻補充調查。
iii. 進行屏東平原地電阻率三維模型。
iv. 分散型地下水歷線法建置。
v. 屏東平原地下水暫態數值模式建置與分析。
vi. 地下水主要補注區衝擊影響分析。
vii. 建立屏東平原沖積扇之地電阻率三維模型。
viii. 98-101 補注區邊界成果彙整與建議。

(2) 工作完成交付項目

i. 計畫成果報告書 30 本及光碟 30 份。(報告書以 Office Word 格式儲存，圖檔以 jpg 或一般繪圖與影像處理軟體可讀取之儲存格式)。
ii. 地下水補注潛勢評估作業平台建置。
iii. 現地補充調查資料光碟 30 份。

iv. 以水文地質資料為底圖、列出比例尺並以行政單位鄰里為界限劃分之屏東平原地下水主要補注區圖。

1.4 計畫研究流程

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

(一)地球物理補充調查

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

(二)地球化學補充調查

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

(三)水文地質鑽探及抽水試驗

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

(四)補注潛勢與地下水水平衡分析

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

(五)地下水主要補注區評估

地下水主要補注區評估流程如圖 1.4-1 所示，前述各項調查與分析結果皆可作為主要補注區劃分之依據，由地電阻調查結果並搭配電阻門檻值，可劃分出高電阻區域；由水質調查結果，可依據地下水溶氧量之高低分布，劃分出高溶氧區域；由補注潛勢分析結果，可劃分出高補注潛勢區域。依據前述三種調查分析結果，綜合三種結果並搭配數位地表地形(DTM)與岩芯柱狀圖進行綜合分析與探討，如不同調查結果有不同結論時，則需以專家知識判斷，進一步分析局部區域之邊界。

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

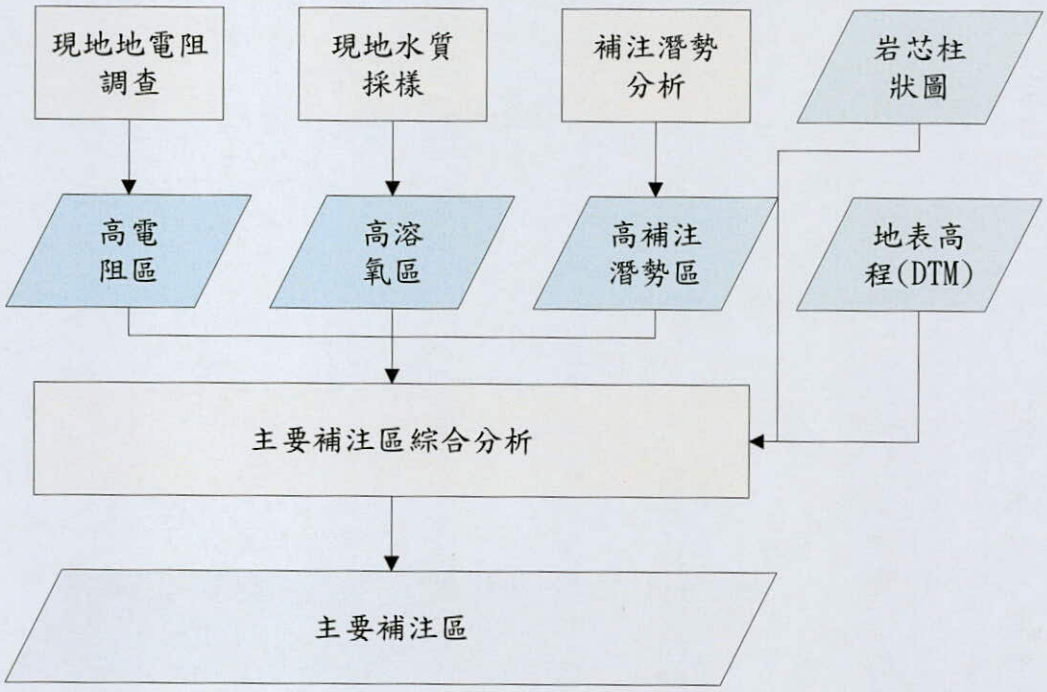


圖 1.4-1 主要補注區範圍建議評估流程

前述研究項目及相關工作細項之執行策略關係如圖 1.4-2 所示，其中「水文地質架構」為中央地質調查所於濁水溪沖積扇之調查成果，本計畫於此基礎上推動後續工作之進行，包括「地下水補注潛勢評估」、「現地補充調查試驗」、「水位歷線法」、「數值模式建置」、「補注量及抽水量推估」、「主要補注區之初步劃設」及「地下水資源影響評估」。圖中所描述之各個方塊代表各研究項目工作細項，各項目連線尾端之箭頭代表工作細項間之執行先後順序關係。

由圖可知，在執行「主要補注區初步劃設」前需先進行「地下水補注潛試評估」及「現地補充調查試驗」兩項工作細項，其中「現地補充調查試驗」工作細項則包含「水質檢測」及「二維地電阻調查」兩種現地調查試驗項目，而二維地電阻在施測前，除參考地質調查所之水文地質架構資訊外，亦需參考「地下水補注潛試評估」之分析成果，以規劃出合適之施測地點。之後利用上述「地下水補注潛試評估」、「二維地電阻調查」、「水質檢測」之成果，即高補注潛勢區域、高電阻區域、高溶氧區域，配合水文地質架構及地表地形，初步劃分出「主要補注區建議範圍」，詳細評估流程如圖 1.4-1。在執行「補注量及抽水量推估」時，本計畫以「水位歷線法」推估垂向補注量、總抽水量及邊界交換量，再以「數值模式建置」建立地下水數值模式並推估淺層含水層淨補注量、深層含水層之各分層抽水量及海岸側向流入量，之後綜合分析兩方法之推估成果，求得各進出地下水系統之水量，以利後續之水平衡分析。此外本計畫利用「數值模式建置」及「主要補注區初步劃設」之分析成果，執行「地下水資源影響評估」，分析主要補注區對濁水溪沖積扇地下水量及水質之影響。

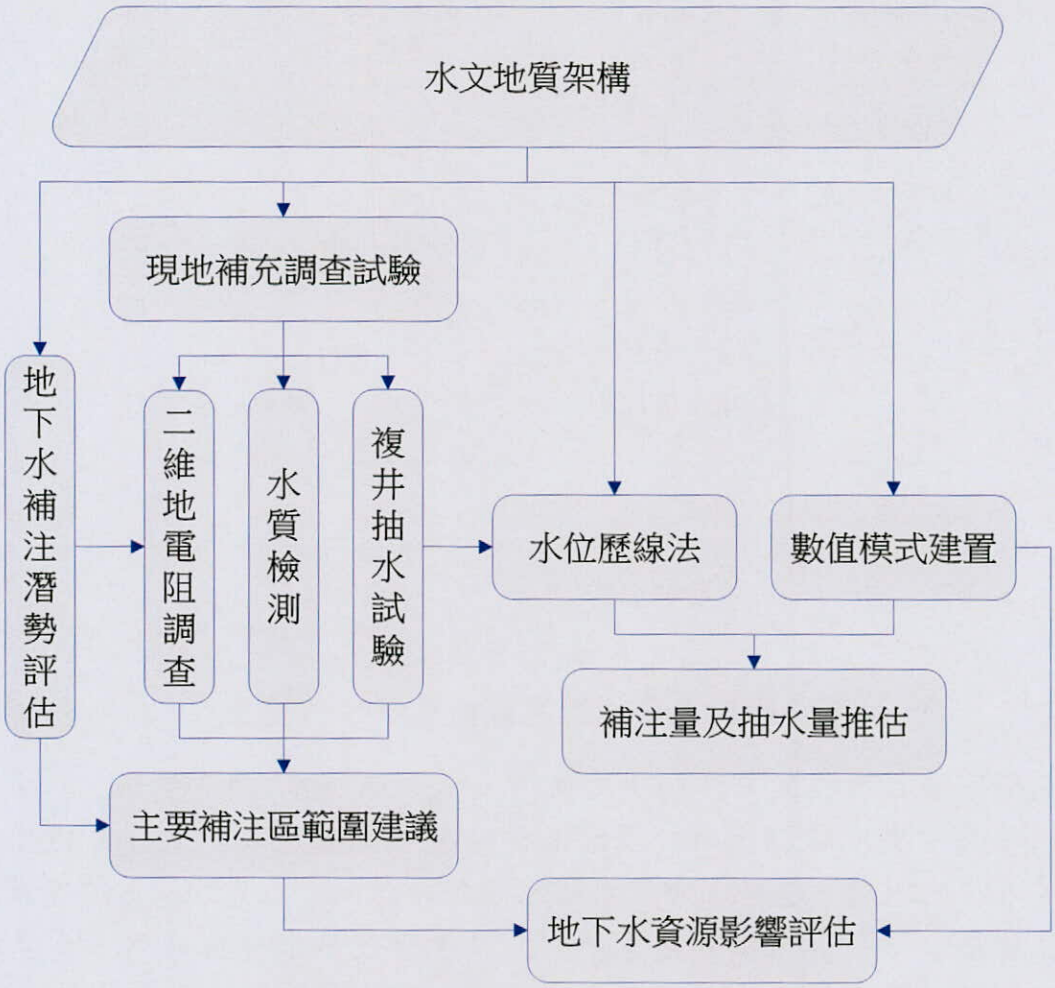


圖 1.4-2 各工作項目之相互關係圖

第二章 資料收集及彙整

本章節介紹本年度計畫之資料收集及彙整部分，其中包括：2.1 節之前期相關研究;2.2 節之相關資料蒐集,此節將介紹本計畫所蒐集之資料概況及其來源；2.3 節之地下水位資料品管及檢核，將介紹本計畫針對地下水位觀測資料缺漏的補遺方法，以及異常水位的處理方式；2.4 節之國內外地下水水資源保護現況，將介紹國外保護地下水補注區之作法，以為國內目前劃定與保護地下水補注區之參考。

2.1 前期相關研究

本計畫的主要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。

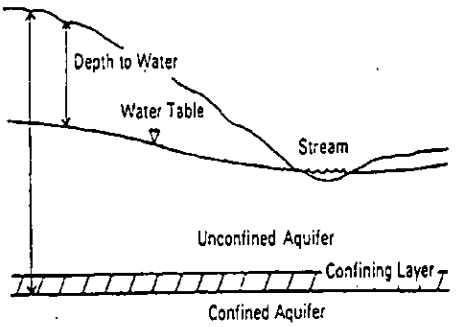


圖 2.1-1 在受壓含水層及非受壓含水層之地下水位深度

(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，如下式所示：

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

下標 r 代表分數值(Rating)

下標 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 2.1-1 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
Gpd/ ft^2	Cmd/m^2	(Rating)
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。

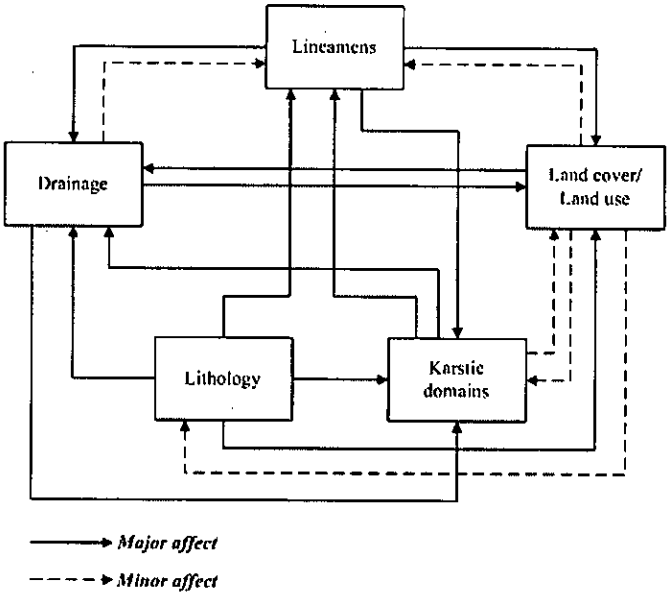


圖 2.1-2 地下水補注潛勢相互影響因子概念圖

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。

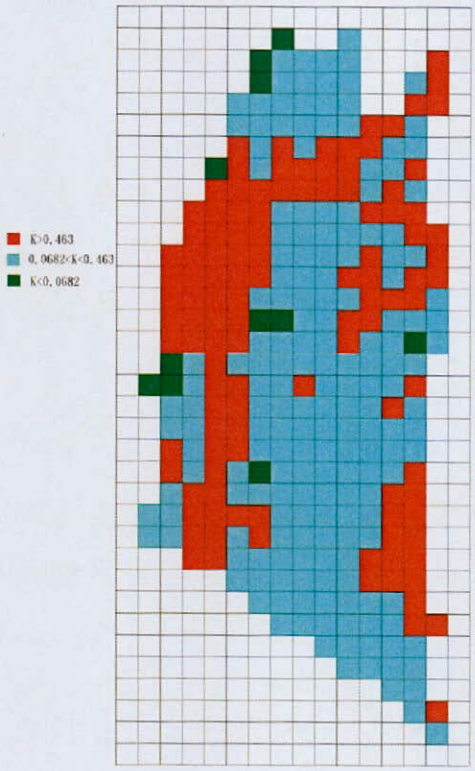
張良正(1999b)對屏東平原之地下水補注進行評估與分級，以飽和入滲率與

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。

本計畫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。



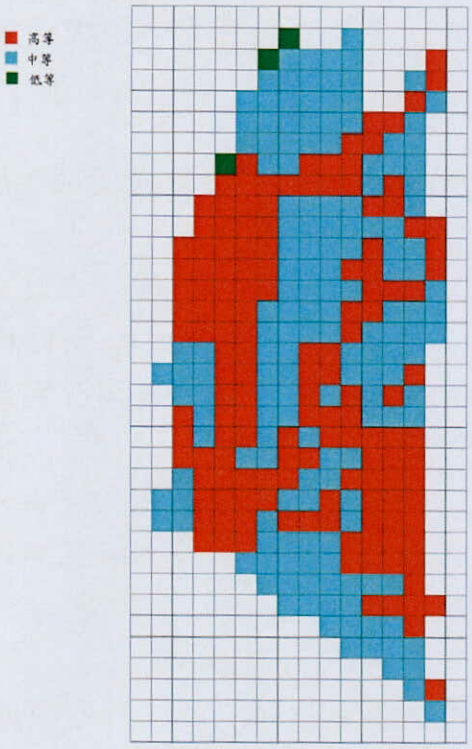


圖 2.1-3 屏東平原入滲潛勢分級區域圖　圖 2.1-4 屏東平原區域補注分級區域圖

(三)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，而江崇榮、陳瑞娥、賴慈華與黃智昭(2005)利用濁水溪沖積扇地下水區水文地質架構、地下水流系統特徵以及阻水層、地下水氚、溶氧和硝酸態氮濃度分布資料，可劃分出在扇頂附近之上部和中部地下水層之共同補注區，面積約 285 平方公里，如圖 2.1-3 所示。但以上研究皆未考量行政區域管理因素，江崇榮與陳瑞娥(2004)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，可參考經濟部水利署於民國 97 年 8 月 6 日公佈的「地下水管制區劃定作業規範」，該規範加入行政區域之考量，其劃定步驟可歸納為下列五大步驟：

1. 劃定檢討線：

   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. 劃定檢討範圍：

   (一)本島地區：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檢討範圍，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檢討範圍。

   (二)離島地區：全部範圍皆定為檢討範圍。

3. 檢討範圍網格化：

   將檢討範圍分割為長寬各一公里以下之正方形網格，再採用有參據資料網格之評分數據，經空間內插方法而得其他未有參據資料網格之評分數據。

訂定管制網格：

各網格採用八項因子評分，各項因子最高 100 分，各因子之給分標準在此不贅述，加權總分大於 45 分以上列為管制網格。

表 2.1-18 地下水管制區評估因子權重表

因子名稱	本島權重	離島權重
1.累積下陷量	15%	-
2.地層下陷速率	25%	-
3.地下水位下降幅度	25%	-
4.地下水位低於零水位線面積	15%	-
5.地下水位絕對高程	-	40%
6.地質條件	10%	10%
7.地面高程	10%	-
8.水質條件	-	50%

4. 劃定管制區：

(一)管制網格面積達其鄉(鎮、市、區)檢討範圍面積百分之八十以上時，以檢討範圍為管制區。

(二)管制網格面積未達其鄉(鎮、市、區)檢討範圍面積百分之八十時，以管制網格所在地段之外緣邊界為管制區。

(三)海埔新生地全區域均為管制區。

(四)屏東平原地下水補注量估計

屏東平原為臺灣重要地下水區之一，針對此區域進行之相關研究數量眾多，其中，進行抽水量相關評估研究有水利處(1968)、水資會(1982)及屏東農專(1988)以水井普查方式，推估屏東平原年抽水量，推估結果分別為每年抽 6.53 億噸、10.15 億噸及 20.59 億噸地下水。水資會(1995)利用水收支平衡法與數值模式，推估屏東平原 1988 年抽水量約 10.6 億噸。經濟部水資源局(1998)透過水收支平衡分析與安全出水量推估，得屏東平原年抽水量約 9.17 億噸。經濟部中央地質調查所(2004)，使用水位歷線法分析枯水期地下水位變化，評估屏東平原 1999 年至 2001 年之年平均抽水量約 15.18 億噸。經濟部中央地質調查所(2011)，透過水位歷線法及地下水數值模式，評估屏東平原 1999 年至 2010 年之年平均抽水量約 11 億噸。以上相關補注量推估研究成果列表如表 2.1-19 所示。

表 2.1-19 屏東平原地下水抽水量推估結果整理比較表(單位：億噸/年)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
	研究單位(年份)/方法	模擬深度/分層	蓄水變化量	抽水量	補注量	流失量	淨補注量	單位面積淨補注量
(1)	水利處(1968)/水井普查	-	-	6.53	-	-	-	-
(2)	水資會(1982)/水井普查	-	-	10.15	-	-	-	-
(3)	屏東農專(1988)/水井普查	-	-	20.59	-	-	-	-
(4)	吳建民與曾鈞敏(1994)/77 年數值模式	<50 公尺/1 層	-10.53	24.36	22.36	8.53	13.83	0.0114
(5)	水資會(1995)/77 年水收支平衡法	-	10.6	-	-	-	-	-
(6)	Ting(1997)/77 年數值模式	<170 公尺/3 層	-0.54	9.30	9.43	1.03	8.40	0.0069
(7)	張良正(1999)/86 年 7 月至 87 年 6 月數值模式	<100 公尺/1 層	3.79	10.93	X	X	14.72	0.0122
(8)	能邦科技顧問股份有限公司(2000)/86 年數值模式	250 公尺/3 層	5.22	12.66	18.93	1.31	17.62	0.0146
(9)	潘文健、李振誥(2002)/85 至 89 年數值模式	250 公尺/3 層	-	11.68	14.79	-	-	-
(10)	江崇榮等(2004)/88 至 90 年地下水歷線分析法	<100 公尺/1 層	0.28	15.72	20.66	4.66	16.00	0.0132
(11)	中央地質調查所(2011)/88 至 99 年地下水位歷線法	<100 公尺/1 層	0.06	11.01	15.06	3.98	11.08	0.009
(12)	徐年盛(2011)88 至 92、94 至 97 年地下水歷線分析法	250 公尺/3 層	0.11	14.08	17.57	3.38	14.19	0.0139

備註：(4)、(6)~(10)地下水區面積均為 1210 平方公里；(11)地下水區面積為 1230 平方公里
(12)地下水區面積為 1024 平方公里

2.2 研究資料蒐集

本計畫為了對屏東平原進行補注潛勢評估及補注量推估，蒐集屏東平原各項資料，如地下水位、雨量、儲水係數、透水係數、GIS 圖層等相關資料，詳述如下。

(一)地下水位、導水係數及透水係數資料

本計畫自臺灣地區地下水觀測網第一期計畫-屏東平原水文地質調查研究總報告，蒐集位於含水層 1(F1)、含水層 2(F2)及含水層 3(F3)深度內之地下水觀測井各約 43 口、28 口及 35 口之導水係數、透水係數等資料，並由經濟部水利署水文水資源資料管理供應系統取得各井每日地下水位資料，整理如表 2.2-1 至表 2.2-3 所示。其各井空間分佈圖如圖 2.2-1 至圖 2.2-3 所示。

其中吉洋工作站為替代吉洋站而選用為本計畫應用之觀測井，原因為兩站只相鄰數百公尺，另外吉洋工作站開孔深度為地下 10 米深遠比吉洋站 70 米深來的淺的許多，對於後續資料分析及模式建置助益較大，且兩站地下水位相當近似如圖 2.2-4 所示，故本計畫中將以吉洋工作站替代原吉洋站為該區域觀測井資料。

表 2.2-1 含水層 1(F1)43 口地下水觀測井資料列表

井名	Tmx(TWD67)	Tmy(TWD67)	T(m^2/min)	K(m/min)	蒐集資料區段
中正(1)	185015	2503504	0.1166	0.006478	1999~2010
石化(1)	187485	2487965	0.2669	0.01019	1999~2010
林園(1)	186809	2490130	0.4032	0.01614	1999~2010
潮寮(1)	190004	2496500	4.072	0.1314	1999~2010
永芳(1)	186942	2500950	0.568	0.03156	1999~2010
昭明(1)	188414	2493802	0.0028	0.0001074	1999~2010
溪埔(1)	191978	2513893	0.7586	0.04212	1999~2010
大樹(1)	191135	2510159	0.859	0.03582	1999~2010
土庫(1)	198425	2524645	4.63	0.08602	1999~2010
中洲(1)	195993	2528009	0.6914	0.01278	1999~2010
旗山(1)	197100	2531368	0.47	0.0348	1999~2010
吉洋工作站(1)	201510	2528640	8.1103	0.0588	1999~2010
美濃(1)	185015	2503504	0.0144	0.0012	1999~2010
新威(1)	203424	2533457	0.0001	0.0000042	1999~2010
清溪(1)	210915	2533502	0.2733	0.0114	1999~2010

表 2.2-1 含水層 1(F1)43 口地下水觀測井資料列表(續)

井名	Tmx(TWD67)	Tmy(TWD67)	T(m^2/min)	K(m/min)	蒐集資料區段
清溪(1)	210915	2533502	0.2733	0.0114	1999~2010
海豐(1)	194408	2506330	2.41	0.1608	1999~2010
潮州(1)	198476	2511130	0.3346	0.1032	1999~2010
東港(1)	202232	2492984	0.6899	0.04056	1999~2010
新庄(1)	193156	2485971	0.7103	0.02088	1999~2010
萬丹(1)	195738	2496246	0.4682	0.01638	1999~2010
繁華(1)	194540	2501970	1.5513	0.0648	1999~2010
九如(1)	196776	2515370	0.9834	0.01788	1999~2010
里港(1)	197514	2520447	1.9041	0.03342	1999~2010
鹽埔(1)	205622	2517240	1.6603	0.1194	1999~2010
彭厝(1)	201104	2515658	1.4629	0.0612	1999~2010
高樹(1)	208068	2525407	2.9	0.03336	1999~2010
泰山(1)	209266	2521392	0.9525	0.02268	1999~2010
新南(1)	203915	2520763	0.5753	0.0636	1999~2010
關福(1)	209883	2518620	1.531	0.02352	1999~2010
赤山(1)	209521	2499542	0.0199	0.004476	1999~2010
建興(1)	204395	2507086	1.5809	0.05268	1999~2010
老埤(1)	207504	2503670	0.4703	0.04554	1999~2010
西勢(1)	200397	2502704	0.2698	0.004956	1999~2010
大湖(1)	200368	2497500	2.0402	0.0726	1999~2010
新埤(1)	202895	2485957	0.1602	0.00798	1999~2010
萬隆(1)	206802	2490112	6.0212	0.1158	1999~2010
大響(1)	210206	2481360	4.2182	0.062032	1999~2010
餉潭(1)	208707	2486714	1.7232	0.04788	1999~2010
枋寮(1)	207476	2479160	15.107	0.3522	1999~2010
大庄(1)	202810	2477706	0.0862	0.00261	1999~2010
德興(1)	207000	2474613	1.196	0.03738	1999~2010
新園(1)	192774	2491800	0.7449	0.0441	1999~2010

表 2.2-2 含水層 2(F2)28 口地下水觀測井資料列表

井名	Tmx(TWD67)	Tmy(TWD67)	T(m^2/min)	K(m/min)	蒐集資料區段
東港(2)	193156	2485971	0.4912	0.0289	1999~2010
赤山(2)	209521	2499542	0.0262	0.0022	1999~2010
萬巒(1)	207498	2497135	1.2589	0.0370	1999~2010
崎峰(2)	197186	2480959	0.3382	0.0154	1999~2010
西勢(2)	200397	2502704	0.3313	0.0236	1999~2010
萬丹(2)	194540	2501970	0.7828	0.0148	1999~2010
新庄(2)	195738	2496246	0.2085	0.0139	1999~2010
建興(1)	204395	2507086	1.5809	0.0527	1999~2010
大潭(1)	197223	2484465	0.2136	0.0119	1999~2010
瑪家(2)	208976	2511539	0.665	0.0370	1999~2010
海豐(2)	198476	2511130	3.72	0.0465	1999~2010
泰山(1)	209266	2521392	0.9525	0.0227	1999~2010
高樹(2)	208068	2525407	2.1	0.0129	1999~2010
九如(1)	196776	2515370	0.9834	0.0179	1999~2010
中洲(1)	195993	2528009	0.6914	0.0128	1999~2010
美濃(2)	203424	2533457	0.6718	0.0240	1999~2010
內埔(1)	204467	2501222	1.65	0.0065	1999~2010
中正(2)	185015	2503504	0.1794	0.0064	1999~2010
九曲(1)	190013	2506511	1.1783	0.0169	1999~2010
清溪(2)	194408	2506330	1.9962	0.0356	1999~2010
大樹(2)	191135	2510159	1.431	0.0341	1999~2010
旗山(2)	197100	2531368	0.918	0.0173	1999~2010
吉洋(1)	201510	2528640	8.1103	0.0588	1999~2010
彭厝(1)	201104	2515658	1.4629	0.0612	1999~2010
新南(1)	203915	2520763	0.5753	0.0636	1999~2010
大湖(2)	200368	2497500	0.3762	0.0188	1999~2010
枋寮(2)	207476	2479160	0.404	0.0144	1999~2010
林園(2)	186809	2490130	0.202	6.49E-08	1999~2010
大響(2)	210206	2481360	1.184	0.0101	1999~2010

表 2.2-3 含水層 3(F3)35 口地下水觀測井資料列表

井名	Tmx(TWD67)	Tmy(TWD67)	T(m^2/min)	K(m/min)	蒐集資料區段
潮洲(2)	202232	2492984	0.6775	0.0075	1999~2010
東港(3)	193156	2485971	0.509	0.0242	1999~2010
大庄(2)	203310	2478206	1.1549	0.0350	1999~2010
港東(2)	195798	2490241	0.3872	0.0302	1999~2010
萬巒(2)	207498	2497135	0.3411	0.0244	1999~2010
崎峰(3)	197186	2480959	0.1035	0.0021	1999~2010
西勢(4)	200397	2502704	1.7549	2.09E-07	1999~2010
萬丹(3)	194540	2501970	1.0847	0.0236	1999~2010
新庄(3)	195738	2496246	1.3772	0.1062	1999~2010
潮寮(2)	190004	2496500	1.7	0.0340	1999~2010
新園(2)	192774	2491800	1.6484	0.0337	1999~2010
新埤(2)	202895	2485957	1.0643	0.0313	1999~2010
建興(2)	204395	2507086	1.8435	0.0768	1999~2010
大潭(2)	197223	2484465	0.5632	0.0352	1999~2010
瑪家(3)	208976	2511539	0.1015	0.0051	1999~2010
海豐(3)	198476	2511130	0.1299	0.0108	1999~2010
鹽埔(2)	205622	2517240	0.6152	0.0453	1999~2010
泰山(2)	209266	2521392	0.7712	0.0322	1999~2010
九如(2)	196776	2515370	0.4341	0.0181	1999~2010
里港(2)	197514	2520447	0.4015	0.0143	1999~2010
中洲(2)	195993	2528009	0.7642	0.0153	1999~2010
永芳(2)	186942	2500950	0.0715	0.0026	1999~2010
萬隆(2)	207302	2489612	0.1308	0.0054	1999~2010
九曲(2)	190013	2506511	0.171	0.0143	1999~2010
清溪(3)	194408	2506330	0.5229	0.0145	1999~2010
大樹(3)	191135	2510159	1.207	0.0201	1999~2010
吉洋(2)	201510	2528640	0.4753	0.0149	1999~2010
彭厝(2)	201104	2515658	1.4317	0.1194	1999~2010
關福(2)	209883	2518620	0.675	0.0070	1999~2010
大湖(3)	200368	2497500	1.4388	0.0164	1999~2010
德興(2)	207000	2474613	0.2419	0.0089	1999~2010
赤山(3)	209521	2499542	0.0048	0.0001	1999~2010
老埤(2)	207504	2503670	0.4939	0.0164	1999~2010
昭明(2)	188414	2493802	0.114	2.64E-08	1999~2010

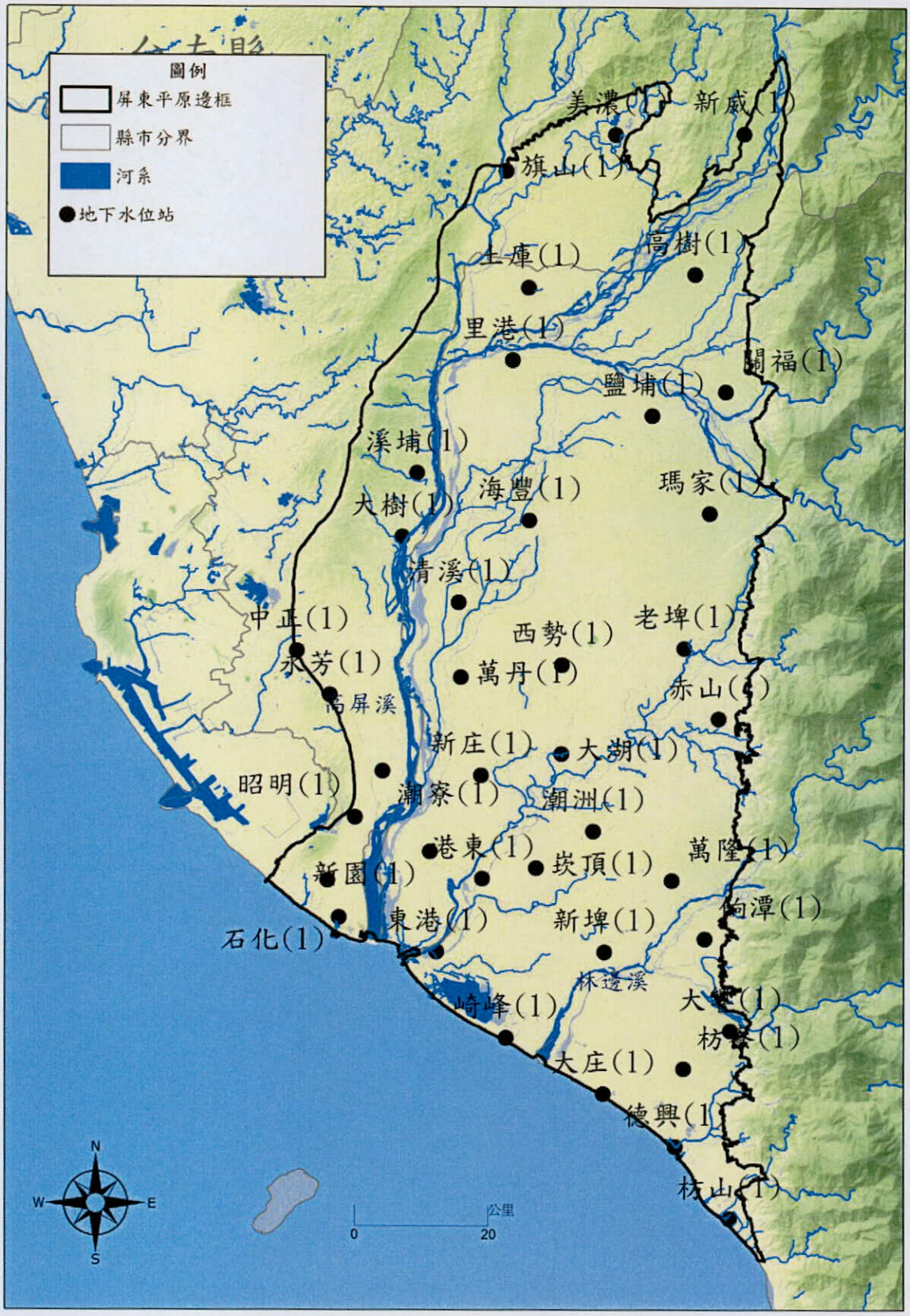


圖 2.2-1 含水層 1(F1)43 口地下水觀測井分布圖

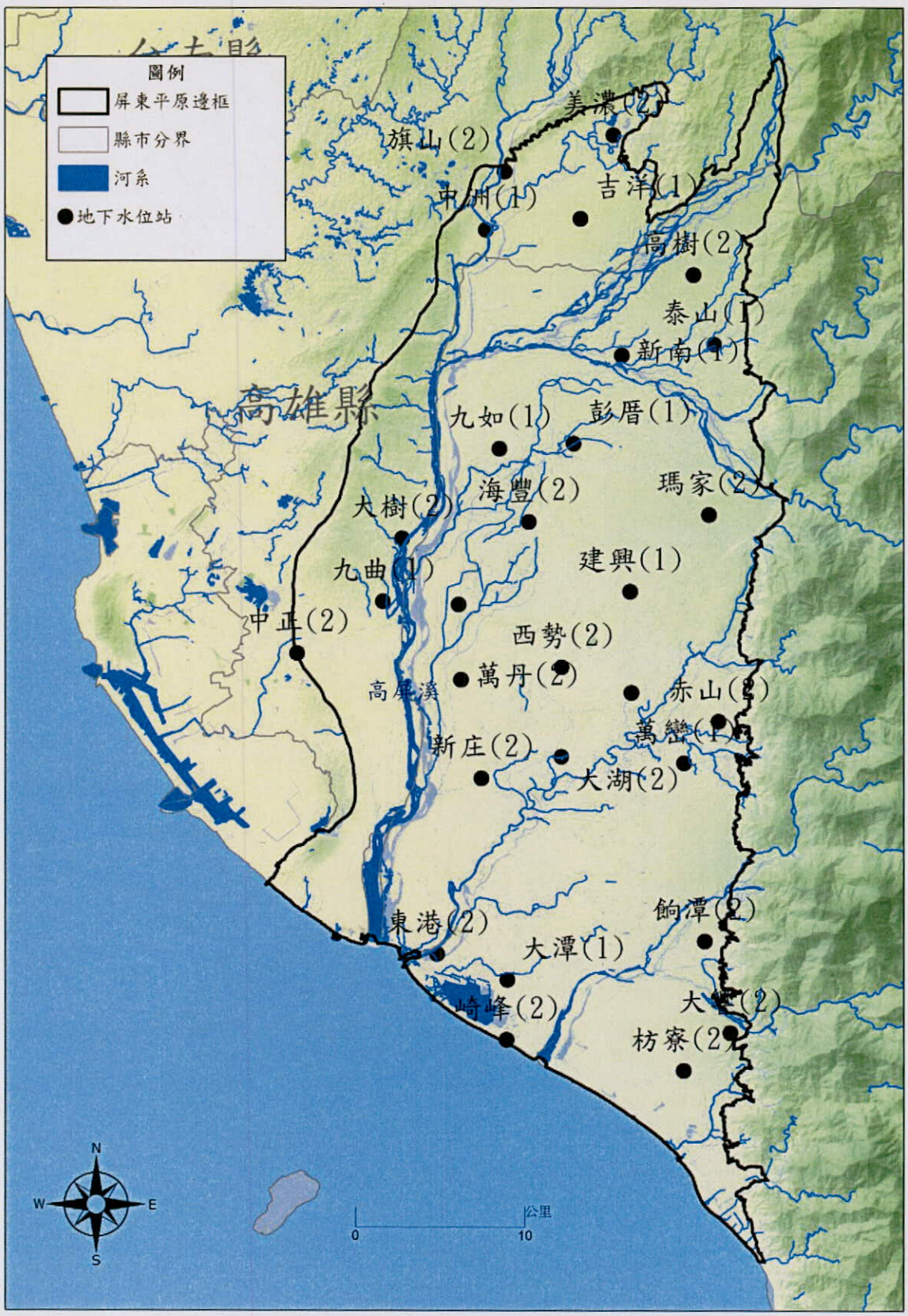


圖 2.2-2 含水層 2(F2)28 口地下水觀測井分布圖

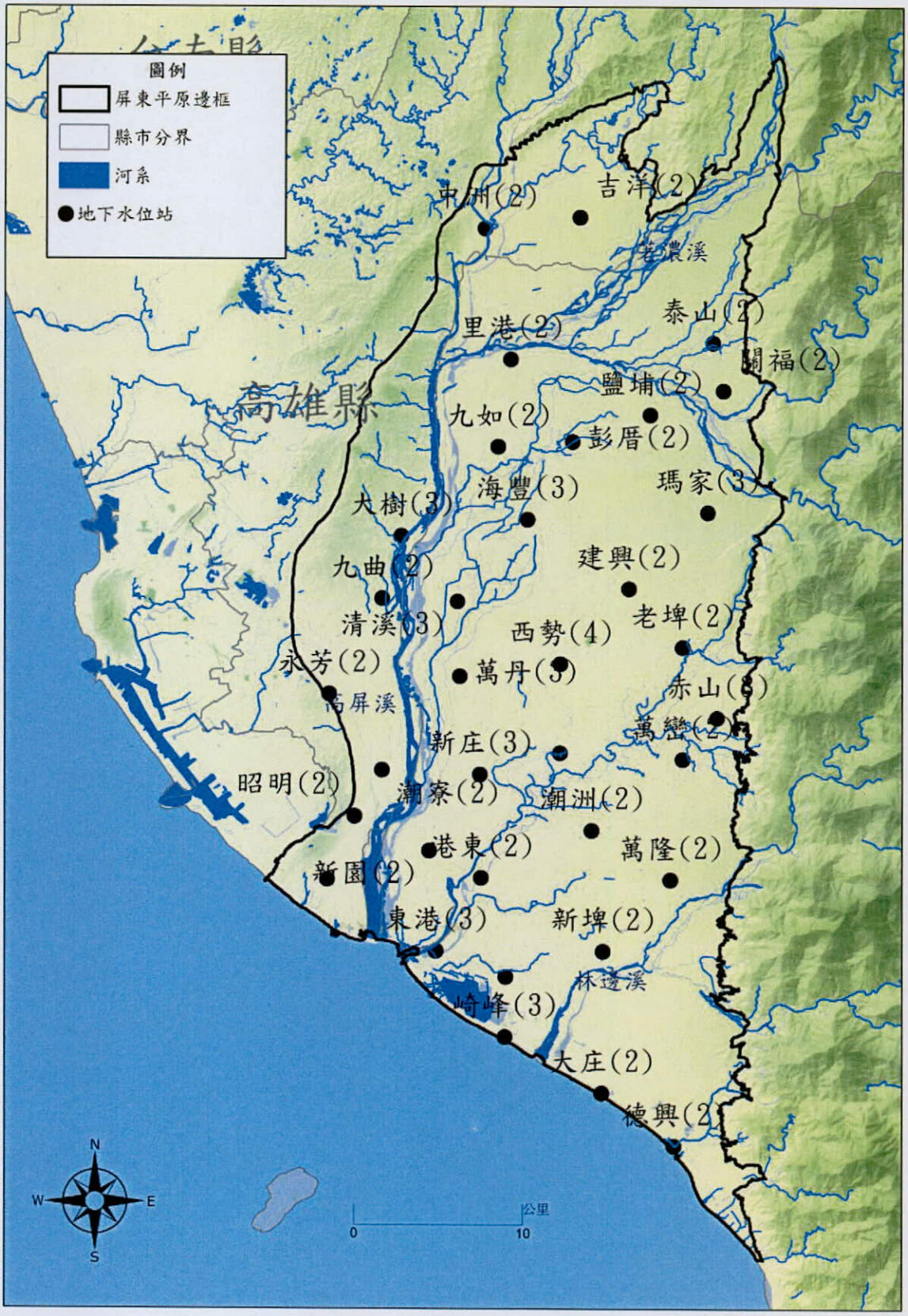


圖 2.2-3 含水層 3(F3)35 口地下水觀測井分布圖

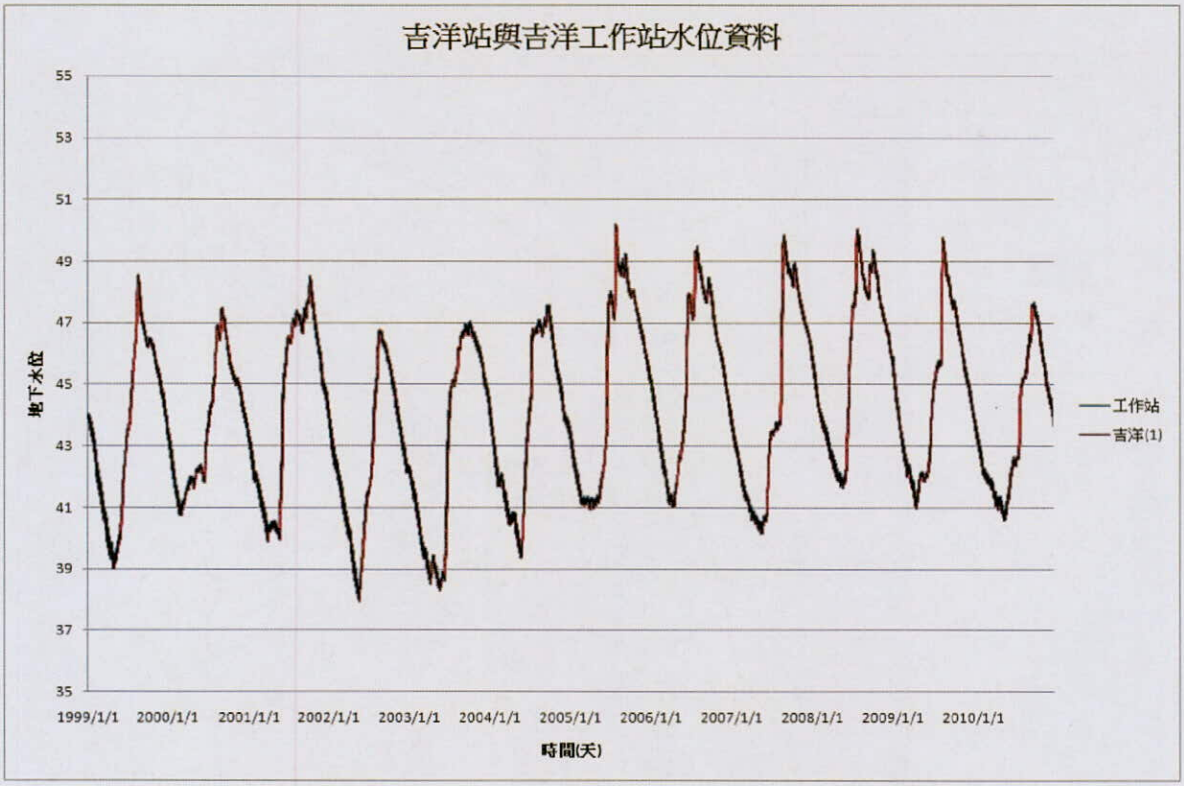


圖 2.2-4 吉洋站與吉洋工作站地下水位關係圖

(二)儲水係數資料

本計畫參考江崇榮、黃智昭及陳瑞娥(2004)「中央地質調查所彙刊第十七號」，以及江崇榮、黃智昭及陳瑞娥(2002)「中央地質調查所屏東平原自然補助」之研究，以及屏東平原複井抽水試驗之實測儲水係數資料等，如表 2.2-4。

表 2.2-4 屏東平原複井抽水試驗實測儲水係數

井名	Tmx	Tmy	儲水係數
旗山(1)	197100	2531368	0.193
潮寮(1)	190004	2496500	0.071
大樹(1)	191135	2510159	0.188
大樹(2)	191135	2510159	0.0000429
大樹(3)	191135	2510159	0.000144
大樹(4)	191135	2510159	0.0004
海豐(1)	194408	2506330	0.239
海豐(2)	194408	2506330	0.0000712
海豐(3)	194408	2506330	0.0000974
內埔(1)	204588	2501296	0.00155
內埔(2)	204588	2501296	0.00074
潮寮(2)	190004	2496500	0.00164
潮寮(3)	190004	2496500	0.000636
關福(2)	209883	2518620	0.000294

(六) 雨量資料

中央氣象局於屏東平原設有許多雨量站，可提供詳細的降雨資料。其中中央氣象局於高雄市、屏東縣共有雨量站約 49 站，本計畫蒐集位於屏東平原及上游山區其中 20 站資料，如表 2.2-5 所示，其相關位置圖如圖 2.2-5 所示。

表 2.2-5 本計畫蒐集中央氣象局雨量站資訊

站名	縣市	Tmx	Tmy	蒐集資料區段
旗山	高雄市	197271	2531089	1999~2010
吉東	高雄市	203729	2527039	1999~2010
大津	高雄市	212865	2532181	1999~2010
里港	屏東縣	197497	2522414	1999~2010
新園	屏東縣	201730	2517140	1999~2010
溪埔	屏東縣	191845	2513576	1999~2010
屏東	屏東縣	198527	2514875	1999~2010
麟洛	屏東縣	203096	2506647	1999~2010
潮州	屏東縣	201825	2492932	1999~2010
南州	屏東縣	199438	2488418	1999~2010
三地門	屏東縣	212160	2512466	1999~2010

表 2.2-5 本計畫蒐集中央氣象局雨量站資訊(續)

站名	縣市	Tmx	Tmy	蒐集資料區段
大寮	屏東縣	190771	2501461	1999~2010
赤山	屏東縣	209728	2499277	1999~2010
龍泉	屏東縣	208294	2507709	1999~2010
來義	屏東縣	210652	2492200	1999~2010
枋寮	屏東縣	207775	2474398	1999~2010
月眉	高雄市	201978	2541409	1999~2010
古夏	屏東縣	212747	2519047	1999~2010
力里	屏東縣	210882	2481219	1999~2010
春日	屏東縣	210894	2474852	1999~2010

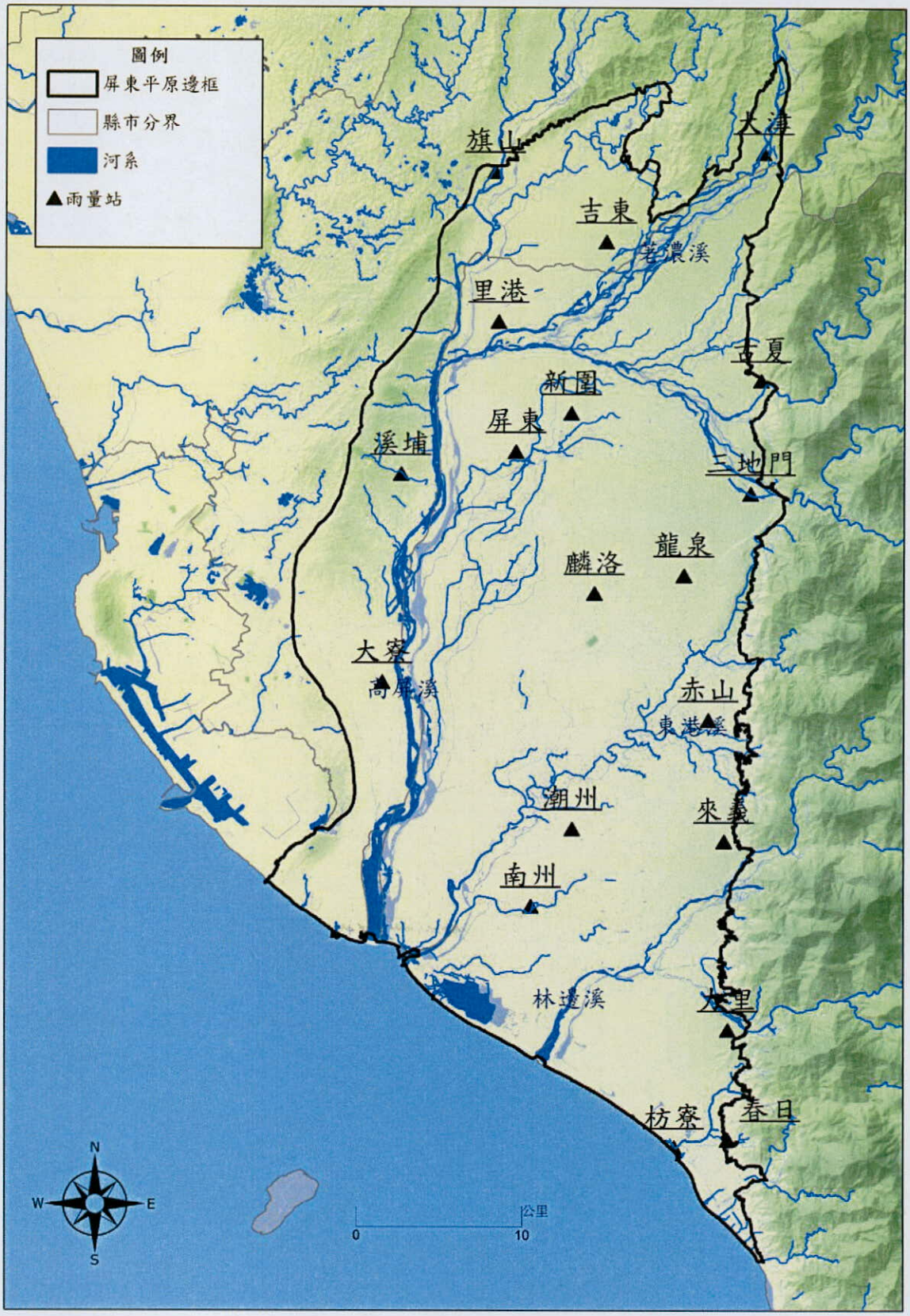


圖 2.2-5 中央氣象局屏東平原雨量站位置圖

(七) GIS 圖層資料

本計畫進行濁水溪沖積扇補注潛勢評估，需大量地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)圖資，除研究之地下水區基本圖資外，尚需依考量之補注潛勢因子蒐集對應之 GIS 圖資，部分點位資料也藉由內插至各網格製作成圖面之 GIS 圖資，本計畫蒐集之圖資來源如表 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	配合行政院農業委員會農業試驗所(1980 年)之圖層檔案，本計畫自行數化土壤種類後得到	台灣地區地下水觀測網第一期計畫-屏東平原水文地質研究總報告
降雨與地下水位相關性	本計畫製作	降雨量：中央氣象局 地下水位：經濟部水利署
平均年降雨量	本計畫製作	中央氣象局、經濟部水利署
單位蓄水量變化	本計畫製作	地下水位：經濟部水利署 儲水係數：中央地質調查所彙刊第十九號
透水係數	本計畫製作	K 值：台灣地區地下水觀測網第一期計畫-屏東平原水文地質研究總報告
河系密度	經濟部水利署	經濟部水利署

2.3 地下水位資料品保及品管

2.3.1 地下水位資料缺漏及補遺

本年度將資料由 1999 至 2010 年的資料進行檢驗時，發現屏東平原各觀測站淺層水井少量的水井有連續性資料缺漏情況，此情形比濁水溪沖積扇在 1997 及 2004 年皆普遍有長時間且連續短缺資料的情況好很多，如表 2.3-1 所示，表中呈現各水井各年缺漏百分比，可知 1999~2010 年的缺漏百分比大約在 3%以下，整體資料完整度相當好，本計畫進一步將各井缺漏資料的時間以年代分佈圖呈現(圖 2.3-1)，其中縱軸表示水井名稱、橫軸表示年份，而有顏色的色塊表示該井資料缺漏所對應之時段，此資料缺漏年份分布圖，可明白顯示出 1999 至 2010 年資料的缺漏分布。

表 2.3-1 1999-2010 年淺層水井地下水位原始資料缺漏統計表

站名	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
中正(1)	0%	1%	0%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
石化(1)	0%	1%	0%	0%	0%	15%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
林園(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
潮寮(1)	0%	1%	0%	22%	12%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
永芳(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
昭明(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
溪埔(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	12%	0%
大樹(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
中洲(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
旗山(1)	0%	1%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
吉洋工作站(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	5%	14%	12%	15%
美濃(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	12%	28%	16%
新威(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	39%	8%	15%
清溪(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
海豐(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%
潮州(1)	0%	6%	0%	0%	0%	1%	0%	6%	0%	0%	2%	3%
東港(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	2%	0%
新庄(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%
萬丹(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

表 2.3-1 1999-2010 年淺層水井地下水位原始資料缺漏統計表(續)

站名	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
繁華(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	0%
九如(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
土庫(1)	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	1%	0%	1%	3%
里港(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
鹽埔(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
彭厝(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	24%
高樹(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%
泰山(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	17%
新南(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
關福(1)	42%	1%	0%	0%	0%	34%	12%	0%	0%	0%	0%	0%
關福(1)	42%	1%	0%	0%	0%	34%	12%	0%	0%	0%	0%	0%
赤山(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	7%	0%
建興(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
老埤(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	5%	0%	0%
西勢(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
大湖(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
新埤(1)	1%	1%	0%	0%	19%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
萬隆(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	7%	13%	0%	0%	0%	0%
大響(1)	1%	0%	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	22%	8%
鉤潭(1)	21%	2%	7%	5%	5%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	0%
枋寮(1)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4%
大庄(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	8%
德興(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	8%
新園(1)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	12%
平均	2%	1%	0%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	2%	3%	3%

表 2.3-2 1999-2010 年地下水位原始資料缺漏時段分類列表

井名	≦10 天	>10 天	缺漏日期及時段
新威(1)	1	5	1998/1/1~1998/7/9、2000/2/2、2000/10/5、2008/3/1~2008/3/11、2008/5/13~2008/7/10、2008/9/2~2008/10/16、2008/12/3~2009/1/31、2010/8/7~2010/9/30
高樹(1)	2	0	2000/2/2、2000/10/5、2009/07/13~2009/0715
泰山(1)	2	3	2000/2/1、2000/10/4、2005/7/20~2005/8/7、2009/7/17~2009/9/3、2010/6/1~2010/7/31
關福(1)	4	12	1998/1/1~1998/7/9、1999/1/21~1999/2/4、1999/3/25~1999/4/8、1999/5/14~1999/5/31、1999/6/10~1999/7/6、1999/7/12~1999/7/15、1999/7/24~1999/8/4、1999/8/9~1999/8/31、1999/9/13~1999/10/20、2000/2/1、2000/10/4、2004/7/2~2004/8/31、2004/10/13~2004/10/17、2004/10/23~2004/12/20、2005/3/22~2005/4/18、2005/6/28~2005/7/11
瑪家(1)	3	2	2000/1/24、2000/9/26、2004/7/29~2004/7/31、2008/8/2~2008/10/1、2010/11/2~2010/12/31
老埤(1)	3	1	2000/1/20、2000/9/25、2000/12/28~2000/12/31、2008/2/11~2008/2/28
赤山(1)	4	2	1998/1/1~1998/7/8、2000/1/18、2000/9/20、2006/3/12、2006/3/20、2009/11/3~2009/11/29
萬巒(1)	2	0	2000/1/5、2000/9/5
萬隆(1)	3	3	2000/1/4、2000/9/4、2005/9/7~2005/9/30、2006/6/10~2006/6/26、2006/7/14~2006/7/15、2006/8/3~2006/8/31
餉潭(1)	4	6	1998/1/1~1998/7/8、1999/4/4~1999/4/7、1999/6/10~1999/6/22、1999/8/8~1999/10/4、1999/12/23、2001/6/2~2001/6/26、2002/6/11~2002/6/39、2003/6/18~2003/7/7、2005/4/25~2005/5/1、2005/6/15~2005/6/19
大響(1)	7	4	1998/6/8、1998/7/5~1998/7/10、1999/6/17~1999/6/20、1999/12/21、2000/8/30、2001/5/10~2001/5/25、2004/5/24、2009/07/03~2009/07/30、2009/10/02~2009/11/23、2010/09/20~2010/09/29、2010/10/1~2010/10/21
旗山(1)	2	2	1998/1/1~1998/7/7、2000/1/31、2000/10/2、2001/9/19~2001/9/30
吉洋(1)	4	3	1998/1/1~1998/7/7、2000/1/27、2000/10/3、2009/7/25~2009/8/2、2009/8/6~2009/9/30、2009/10/3~2009/10/7、2009/10/10~2009/10/31
吉洋工作站(1)	2	7	2000/1/27、2000/10/3、2005/7/22~2005/8/2、2007/1/15~2007/1/31、2008/1/18~2008/2/9、2008/8/6~2008/9/3、2009/1/1~2009/2/6、2009/2/14~2009/2/19、2010/2/9~2010/3/3、2010/12/2~2010/12/31
中州(1)	2	0	2000/1/31、2000/10/2
土庫(1)	5	2	2000/1/27、2000/10/3、2006/4/16~2006/5/8、2006/6/1~2006/6/3、2007/6/8~2007/6/9、2009/8/28~2009/8/31、2010/9/27~2010/10/7

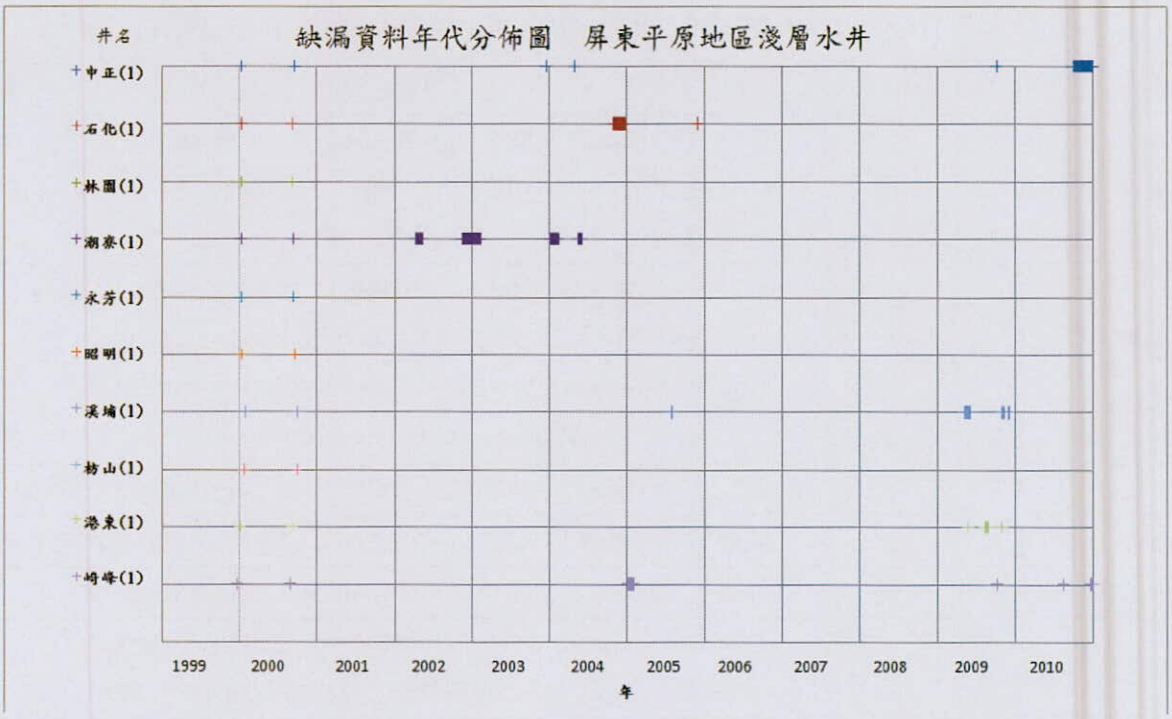
表 2.3-2 1999-2010 年地下水位原始資料缺漏時段分類列表(續)

井名	≦10 天	>10 天	缺漏日期及時段
美濃(1)	6	7	2000/1/31、2000/10/3、2007/2/4~2007/3/2、2007/3/7~2007/3/31、2007/4/4~2007/4/7、2007/4/19~2007/4/22、2007/10/12~2007/10/15、2008/11/4~2008/12/16、2009/9/5~2009/9/30、2009/10/10~2009/11/29、2009/12/2~2009/12/10、2009/12/16~2009/12/31、2010/01/26~2010/01/31、2010/02/27~2010/04/01
里港(1)	2	0	2000/1/25、2000/9/27
新南(1)	2	1	1998/1/1~1998/7/9、2000/2/1、2000/10/4
鹽埔(1)	2	0	2000/1/24、2000/9/26
溪浦(1)	6	1	2000/1/27、2000/10/2、2005/7/24~2005/8/2、2009/05/07~2009/06/06、2009/10/28~2009/11/2、2009/11/9、2009/11/26~2009/12/1
九如(1)	2	0	2000/1/25、2000/9/27
彭厝(1)	2	3	1998/1/1~1998/7/8、2000/1/25、2000/9/27、2010/1/19~2010/4/1、2010/5/8~2010/5/20
大樹(1)	2	1	1998/1/1~1998/7/7、2000/1/26、2000/9/28
海豐(1)	3	0	2000/1/19、2000/9/21、2009/2/24~2009/3/3
繁華(1)	2	2	1998/1/1~1998/7/8、2000/1/20、2000/9/25、2009/1/11~2009/3/2
九曲(1)	3	0	2000/1/26、2000/9/28、2010/11/20~2010/11/21
清溪(1)	2	0	2000/1/19、2000/9/21
前進(1)	2	3	1998/1/1~1998/6/27、2000/1/19、2000/9/21、2005/6/30~2005/8/15、2007/9/8~2007/11/26
西勢(1)	2	0	2000/1/17、2000/9/19
內埔(1)	4	3	2000/1/20、2000/9/19、2001/10/9~2002/5/28、2004/7/7~2004/8/8、2005/9/6~2005/10/14、2006/5/2、2006/6/29
中正(1)	5	2	1998/1/1~1998/7/7、2000/1/13、2000/9/18、2003/12/17~2003/12/20、2004/4/30~2004/5/1、2009/10/07~2009/10/08、2010/9/27~2010/12/31
永芳(1)	2	0	2000/1/12、2000/9/14
萬丹(1)	2	0	2000/1/11、2000/9/13
潮寮(1)	2	5	2000/1/12、2000/9/14、2002/4/10~2002/5/13、2002/11/17~2003/2/13、2004/1/17~2004/2/12、2004/5/18~2004/6/1
新園(1)	6	2	1998/1/1、1998/10/7~1998/10/13、2000/1/6、2000/9/6、2006/6/9~2006/6/12、2009/12/7、2010/7/15~2010/8/2、2010/12/8~2010/12/31
港東(1)	4	2	1998/1/1~1998/7/7、2006/1/6、2006/9/6、2009/5/25、2009/08/10~2009/08/31、2009/10/31

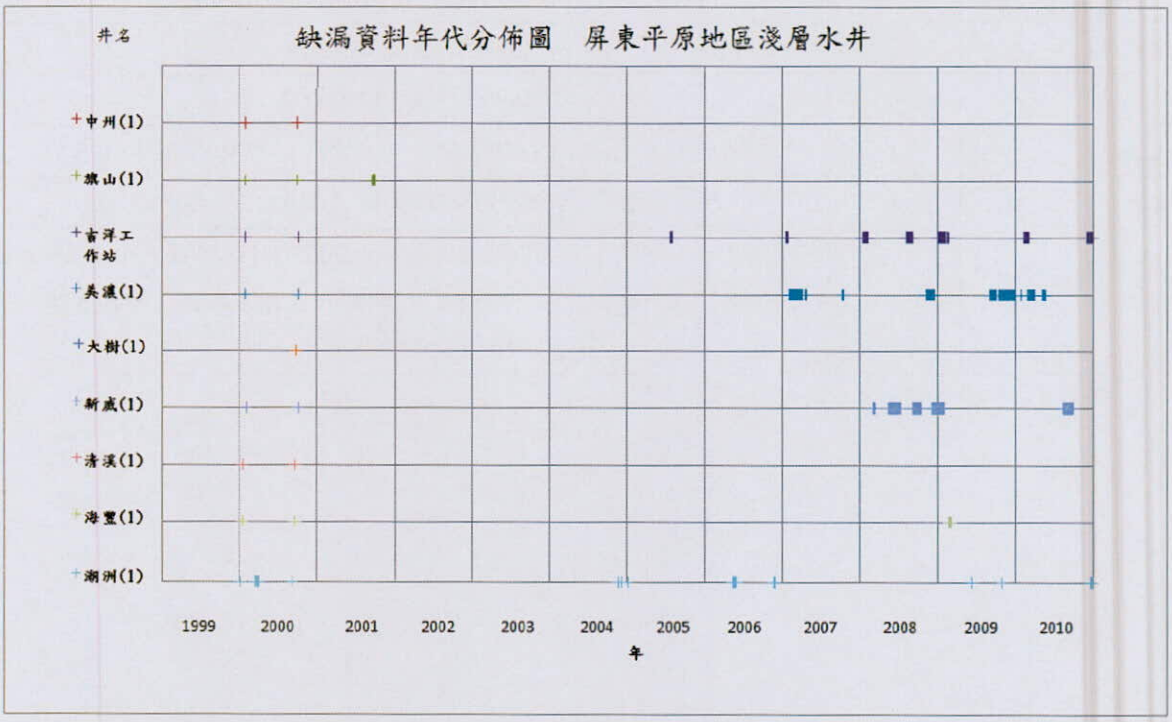
表 2.3-2 1999-2010 年地下水位原始資料缺漏時段分類列表(續)

井名	≦10 天	>10 天	缺漏日期及時段
崁頂(1)	7	0	2000/1/5、2000/9/5、2007/4/12~2000/4/17、2007/8/19~2007/8/22、2008/6/28~2008/6/30、2008/7/18~2008/7/24、2008/7/28~2008/8/4、2010/9/1~2010/9/19
潮州(1)	9	1	2000/1/5、2000/3/15~2000/4/4、2000/9/5、2004/11/20~2004/11/21、2004/12/4、2005/1/2、2006/5/13~2006/5/16、2006/5/22~2006/6/1、2009/6/7~2009/6/11、2009/10/30、2010/12/19~2010/12/28
林園(1)	2	0	1998/1/6~1998/1/11、2000/9/17
石化(1)	3	1	2000/1/10、2000/9/7、2004/10/28~2004/12/21、2005/11/26~2005/11/28
東港(1)	4	0	2000/1/3、2000/8/31、2007/10/31~2007/11/7、2009/6/28~2009/7/4
大潭(1)	3	1	2000/1/3、2006/6/2~2006/6/12、2009/10/28、2010/11/16~2010/11/17
新埤(1)	3	4	1998/2/14~1998/3/2、1999/1/30~1999/2/1、2000/1/4、2000/9/4、2003/6/1~2003/6/30、2003/8/21~2003/9/30、2004/5/3~2004/6/2
崎峰(1)	4	3	1998/1/21~1998/2/6、1999/12/22、2000/8/29、2005/1/5~2005/1/31、2009/10/9、2010/8/16、2010/12/16~2010/12/31
建興(1)	2	0	2000/1/20、2000/9/25
枋山(1)	2	0	1999/12/21、2000/8/28
大庄(1)	3	1	1999/12/22、2006/8/1~2006/8/5、2007/9/21、2010/5/2~2010/5/31
枋寮(1)	3	1	1999/12/23、2000/8/30、2009/4/4、2010/12/8~2010/12/23
德興(1)	11	2	1998/1/1~1998/7/7、1999/12/21、2000/8/28、2009/3/11、2009/3/30、2009/4/4、2009/4/27、2009/4/29、2009/5/2、2009/5/6、2009/5/15、2009/5/24、2010/5/2~2010/5/30

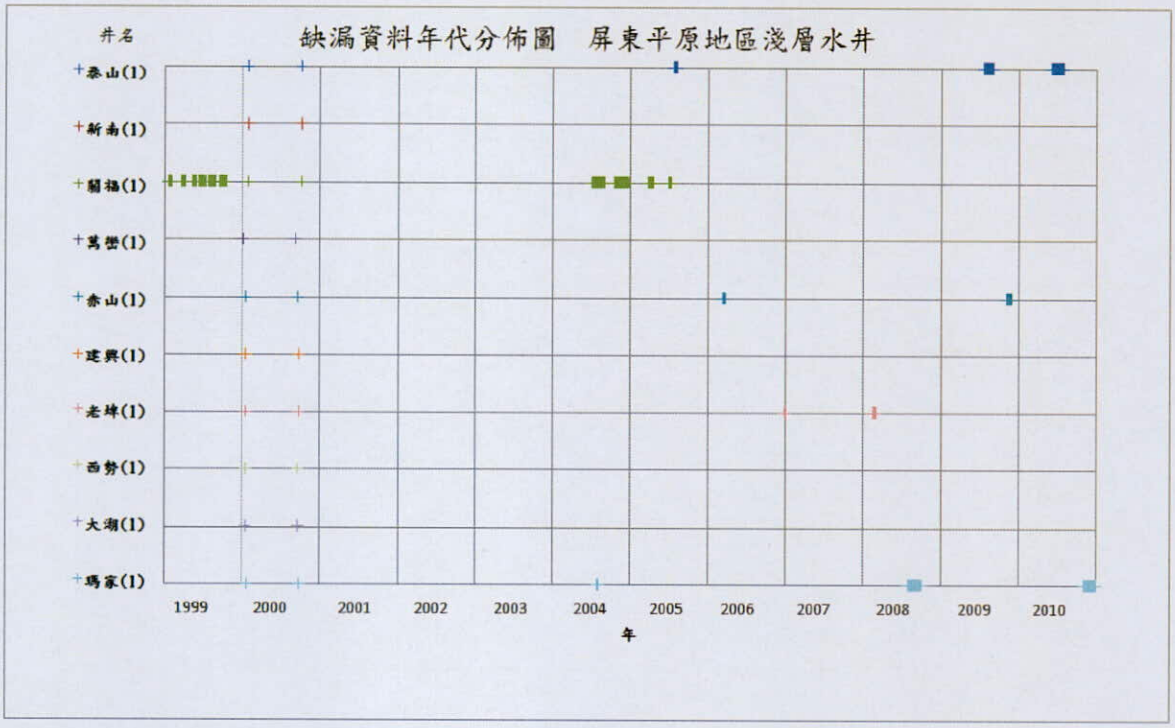
(a)


井名
缺漏資料年代分佈圖　屏東平原地區淺層水井
中正(1)
石化(1)
林園(1)
潮寮(1)
永芳(1)
昭明(1)
溪埔(1)
枋山(1)
港東(1)
崎峰(1)
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
年

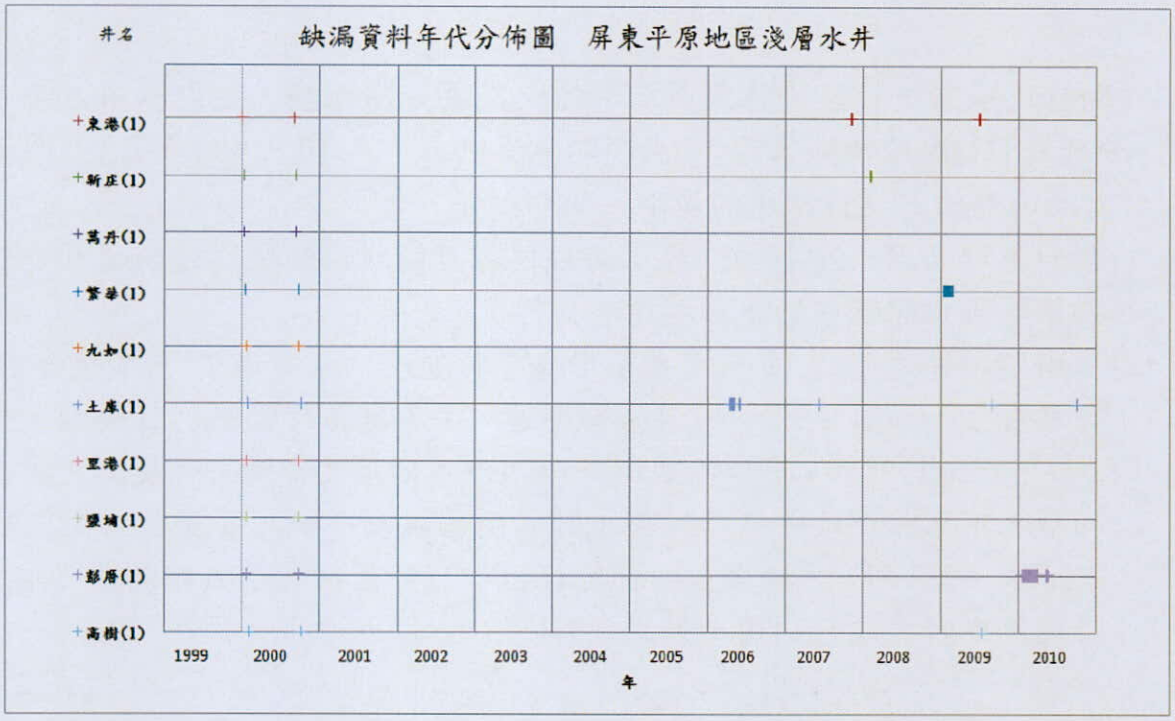
(b)


井名
缺漏資料年代分佈圖　屏東平原地區淺層水井
中州(1)
旗山(1)
吉洋工作站
美濃(1)
大樹(1)
新威(1)
清溪(1)
海豐(1)
湖洲(1)
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
年

(c)


缺漏資料年代分佈圖　屏東平原地區淺層水井
井名
泰山(1)
新南(1)
關福(1)
萬巒(1)
赤山(1)
建興(1)
老埤(1)
西勢(1)
大湖(1)
瑪家(1)
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
年

(d)


缺漏資料年代分佈圖　屏東平原地區淺層水井
井名
東港(1)
新庄(1)
萬丹(1)
警察(1)
九如(1)
土庫(1)
里港(1)
鹽埔(1)
彭厝(1)
高樹(1)
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
年

(e)

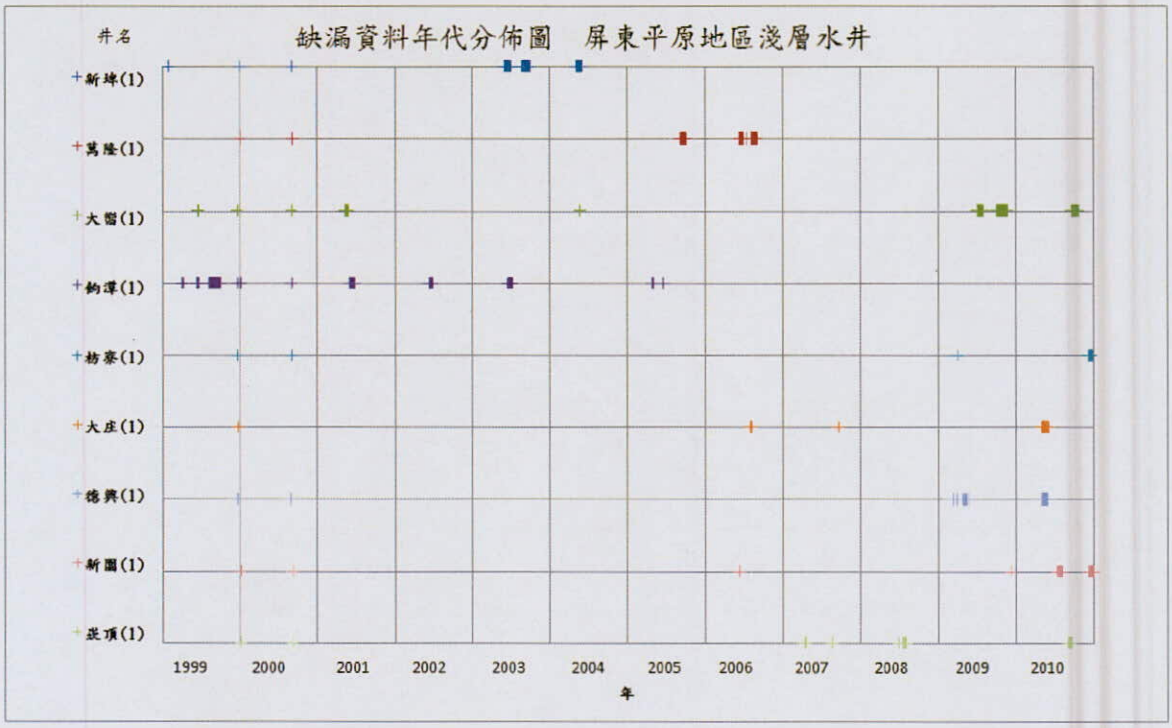


圖 2.3-1 地下水位缺漏資料年代分佈圖

經過前述缺漏統計後，將缺漏資料的天數區分為兩類，並以不同方法進行補遺，分別為：(1)連續缺漏未達 10 天；(2)連續缺漏超過 10 天，如表 2.3-2 所示。分別針對此兩類缺漏進行補遺的情形，說明如下：

(1) 資料連續缺漏未達 10 天：缺漏時段內各點資料以該缺漏段兩端點之資料為準，再以線性內插進行補遺，如圖 2.3-2 所示。

(2) 資料連續缺漏超過 10 天：本年度為資料連續缺漏超過 10 天訂定一標準作業程序，如圖 2.3-3。先將資料篩選，去除可信度較低的資料點，如圖 2.3-4 泰山(1)所示。再與該觀測井同站但不同層之觀測井，或與該觀測井同層之不同相鄰站井進行配對，計算兩兩觀測井觀測資料數列之相關係數如表 2.3-3 所示，藉由相關係數找出水位變化最相近之觀測井，再由線性迴歸方程式進行補遺，如式 2.3-1。

$$x_j^t = a_i^j x_i^t + b_i^j \quad \text{(式 2.3-1)}$$

式(2.3-1)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。

若發現線性迴歸補遺後之水位歷線有不平順的連結，則由兩點內插進行補遺，使得水位歷線不會有驟升或驟降的情況產生，如圖 2.3-4 所示。圖 2.3-5(a)顯示繁華(1)為線性迴歸補遺後之水位歷線，紅色圓圈部分為補

遺段，該區段兩端點與原始水位連結處產生不平順的情況，此時使用兩端內插的方法，使補遺資料能夠平順且圓滑的呈現，如圖 2.3-5 (b)所示。

(a) (b)

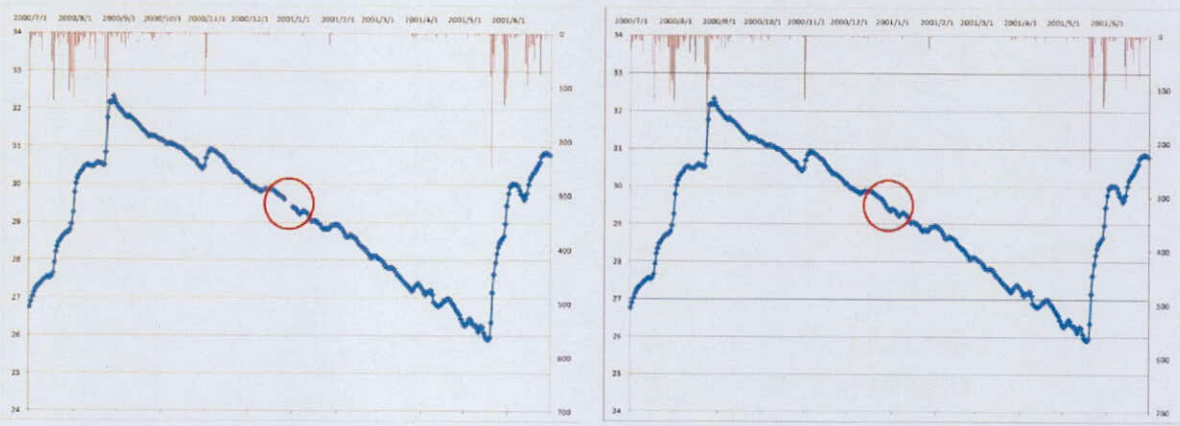


圖 2.3-2 地下水位資料缺漏未達 10 天以缺漏段兩端點為準以線性內插進行補遺，以老埤(1)為例：(a)補遺前；(b)補遺後

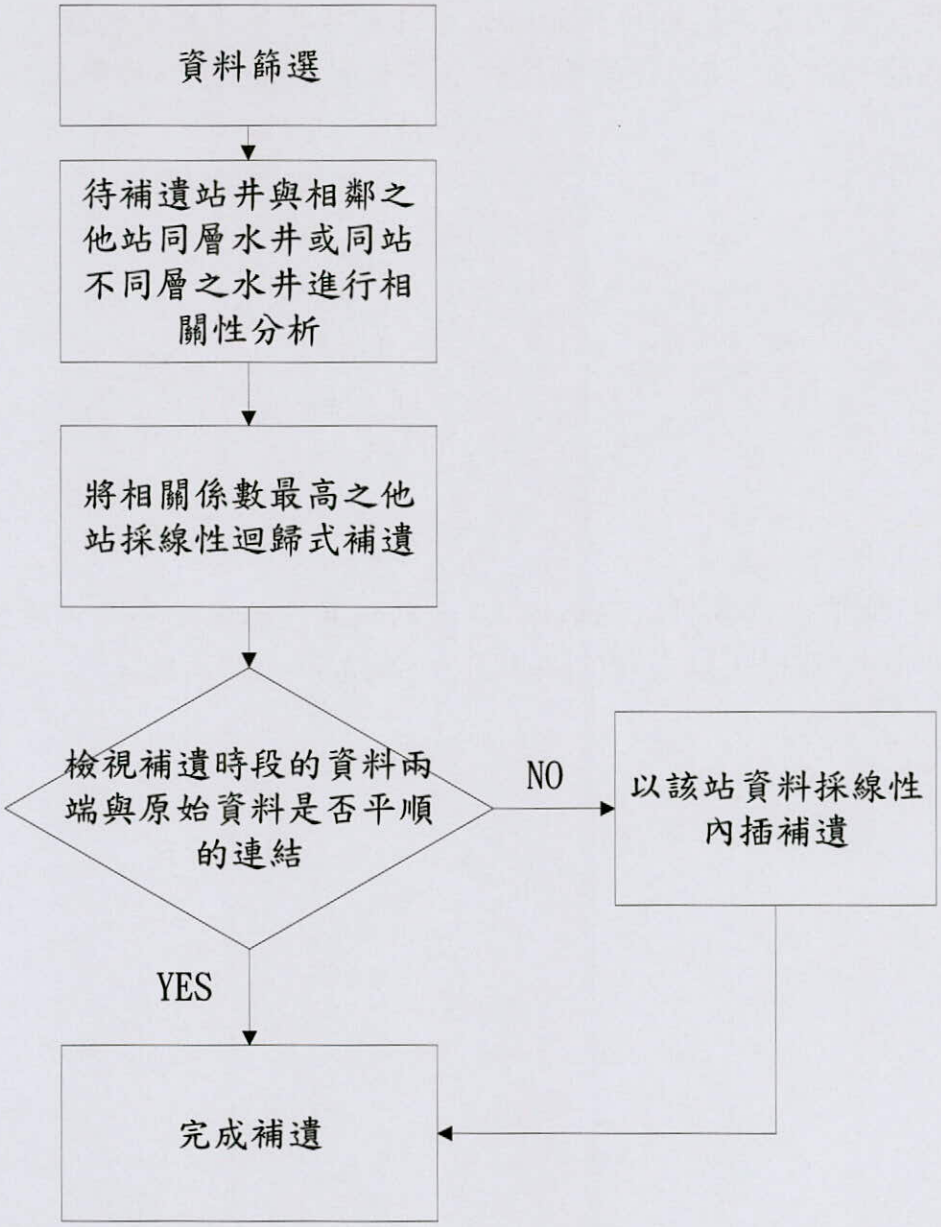
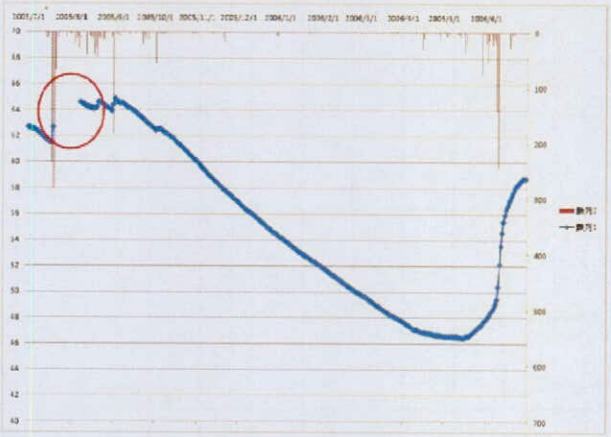


圖 2.3-3 地下水位資料連續缺漏超過 10 天之補遺標準作業程序

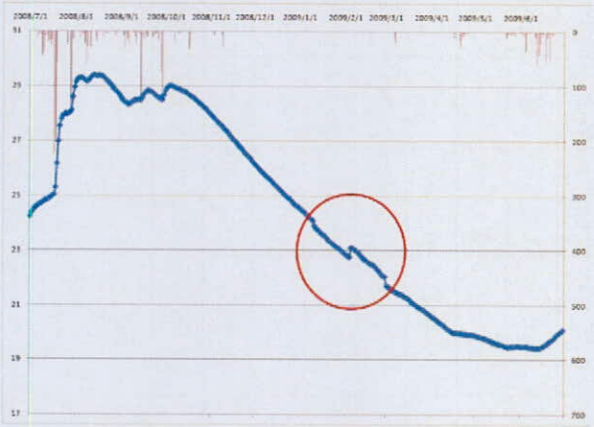
(a)



(b)

圖 2.3-4 篩選可信度較低的資料點後再以線性迴歸進行補遺：(a)原始水位；(b)線性迴歸補遺後水位

(a)



(b)

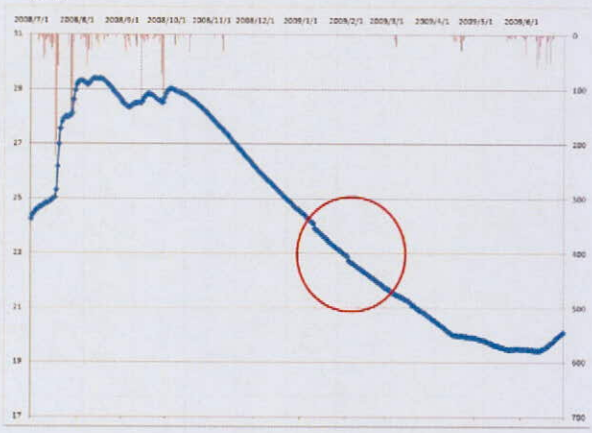


圖 2.3-5 依標準作業流程之水井補遺結果，以繁華(1)為例分別用：(a)線性迴歸補遺；(b)以缺漏段兩端點資料為準進行線性內插補遺

表 2.3-3 缺漏超過 10 天之觀測井與鄰近其他水井時序資料之間的相關係數列表

待補遺觀測井		相關係數最高		同站其他水井		同站其他水井		鄰近水井		鄰近水井		鄰近水井		鄰近水井		鄰近水井	
井號	井名	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數
12210111	新威(1)	旗山(1)	0.71651	新威(2)	0.347525			旗山(1)	0.71651	吉洋(1)	0.507031	美濃(1)	0.505548	高樹(1)	0.444429		
13110211	泰山(1)	泰山(2)	0.999882	泰山(2)	0.999882			關福(1)	0.98784	高樹(1)	0.983224	新南(1)	0.954791				
13110411	關福(1)	關福(2)	0.99951	關福(2)	0.99951			泰山(1)	0.988	鹽埔(1)	0.985314	瑪家(1)	0.949389	新南(1)	0.933816		
13280111	瑪家(1)	瑪家(2)	0.999844	瑪家(2)	0.999844	瑪家(3)	0.999472	關福(1)	0.949389	繁華(1)	0.985919	建興(1)	0.965703	老埤(1)	0.959706		
13130311	老埤(1)	建興(1)	0.992615	老埤(2)	0.982576			建興(1)	0.992615	內埔(1)	0.958339	赤山(1)	0.903608				
13150211	萬隆(1)	萬隆(2)	0.99639	萬隆(2)	0.99639			餉潭(1)	0.965661	新埤(1)	0.696841	潮州(1)	0.569592	萬巒(1)	0.969279		
13150411	餉潭(1)	大響(1)	0.97471	餉潭(2)	0.902077			大響(1)	0.97471	萬隆(1)	0.965661	新埤(1)	0.785055				
13150311	大響(1)	大響(2)	0.999266	大響(2)	0.999266			枋寮(1)	0.908244	餉潭(1)	0.97471	水底寮(1)	0.932739	大庄(1)	0.57137		
12190211	旗山(1)	中州(1)	0.927143	旗山(2)	0.918468			中州(1)	0.927143	吉洋(1)	0.887808	新威(1)	0.71651				
12200311	吉洋(1)	吉洋工作站	0.99898	吉洋(2)	0.957257			吉洋工作站	0.99898								
12200111	吉洋工作站	吉洋(1)	0.99898					吉洋(1)	0.99898								
13090111	土庫(1)	中州(1)	0.980617					中州(1)	0.980617	美濃(1)	0.779662	里港(1)	0.938984	新南(1)	0.860286	吉洋	0.912476
12200211	美濃(1)	美濃(2)	0.999007	美濃(2)	0.999007			土庫(1)	0.779662	高樹(1)	0.78846	吉洋(1)	0.881629				
13060111	繁華(1)	繁華(2)	0.999812	繁華(2)	0.999812			建興(1)	0.990897	海豐(1)	0.931806	瑪家(1)	0.985919	彭厝(1)	0.967061		
13010311	前進(1)	九曲(1)	0.924689					九曲(1)	0.924689	清溪(1)	0.707785	萬丹(1)	0.857635	大樹(1)	0.890473	海豐(1)	0.557769
13130211	內埔(1)	萬巒(1)	0.960155	內埔(2)	0.940357			萬巒(1)	0.960155	老埤(1)	0.958339	赤山(1)	0.922214	建興(1)	0.94646	大湖(1)	0.736086

表 2.3-3 缺漏超過 10 天之觀測井與鄰近其他水井時序資料之間的相關係數列表(續)

待補遺觀測井		相關係數最高		同站其他水井		同站其他水井		鄰近水井		鄰近水井		鄰近水井		鄰近水井		鄰近水井	
井號	井名	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數	井名	相關係數
13020111	潮州(1)	潮州(2)	0.82381	潮州(2)	0.82381			萬隆(1)	0.569592	大湖(1)	0.619687	崁頂(1)	0.738213	萬巒(1)	0.802595	新庄(1)	0.65639
64110111	鳳鳴(1)	林園(1)	0.972926					林園(1)	0.972926	石化(1)	0.852559	昭明(1)	0.910826	潮寮(1)	0.964514		
12020111	石化(1)	林園(1)	0.900513	石化(2)	0.787732			林園(1)	0.900513	鳳鳴(1)	0.852559	昭明(1)	0.735642	港東(1)	0.557105		
13150111	新埤(1)	大響(1)	0.758534	新埤(2)	0.708163	新埤(3)	0.711661	大潭(1)	0.753316	萬隆(1)	0.586445	餉潭(1)	0.687188	崁頂(1)	0.628391	大響(1)	0.758534
13120211	赤山(1)	赤山(2)	0.993339	赤山(2)	0.993339	赤山(3)	0.743423	內埔(1)	0.922214	老埤(1)	0.903608	萬巒(1)	0.912484				
12040111	溪埔(1)	大樹(1)	0.901239	溪埔(2)	0.811826	溪埔(3)	0.740651	大樹(1)	0.901239	海豐(1)	0.800806	九如(1)	0.893667	九曲(1)	0.832887		
13180211	港東(1)	大湖(1)	0.845568	港東(2)	0.332679	港東(3)	0.450599	新園(1)	0.250253	崁頂(1)	0.414744	東港(1)	0.60265	石化(1)	0.557105	大湖(1)	0.845568
12030111	潮寮(1)	新庄(1)	0.942795					新庄(1)	0.942795	昭明(1)	0.661839	永芳(1)	0.768728	新園(1)	0.824058		
13160311	大庄(1)	大庄(2)	0.80541	大庄(2)	0.80541			枋寮(1)	0.7181	德興(1)	0.093693						
13170111	新園(1)	新庄(1)	0.856697	新園(2)	0.808836			潮寮(1)	0.824058	港東(1)	0.250253	新庄(1)	0.856697				
13100211	彭厝(1)	彭厝(2)	0.999452	彭厝(2)	0.999452			繁華(1)	0.967061	九如(1)	0.680672	鹽埔(1)	0.975843				
13160411	德興(1)	枋山(1)	0.543635	德興(2)	0.381248	德興(3)	0.193344	大庄(1)	0.093693	枋山(1)	0.543635						
12010111	中正(1)	永芳(1)	0.67951	中正(2)	0.645908			永芳(1)	0.67951	九曲(1)	0.318797	潮寮(1)	0.265282				
13190111	崎峰(1)	港東(1)	0.69241	崎峰(2)	0.420742	崎峰(3)	0.304745	大潭(1)	0.492191	塭豐(1)	0.378004	東港(1)	0.459414	港東(1)	0.69241		

2.3.2 地下水位資料異常及處理

本計畫整理了屏東平原淺層水井 1999 年至 2010 年的水位資料，經過前一節所述資料補遺，再次檢視各井之水位歷線圖，可發現某些時段水位的異常突生或突降，並不符合整體連續變化之趨勢，檢討其原因可能為：儀器校調之偏差。以下表列本計畫整理之異常時段：

表 2.3-3 屏東平原淺層地下水觀測井水位之異常時段列表

推測之異常原因	井名	異常水位之時段
儀器校調之偏差	昭明	2008/11/28~2008/12/28
	中洲	2009/3/22~2009/4/20

水位異常的現象為異常時段兩端的水位驟升或驟降，但兩端點之間的水位變化趨勢卻屬於合理變化的情況，推測其發生原因是由於人為的儀器校調所造成的量測偏差。由於此類水位異常變化明顯非物理機制所造成，處理此異常段時，保留期間之變化趨勢，將驟升或驟降之水位差扣除或加回，當異常段之資料經過處理後，其水位歷線顯然較為合理，如圖 2.3-6 及圖 2.3-7 所示。

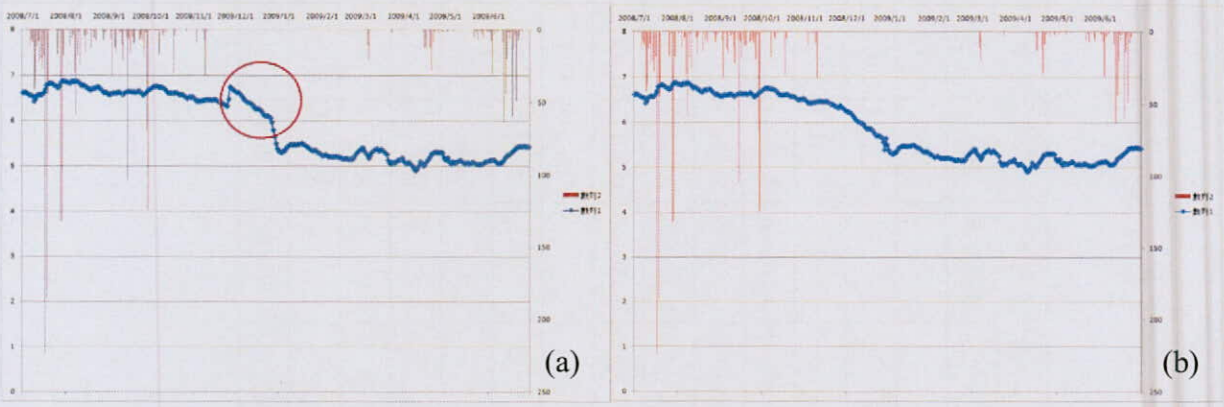


圖 2.3-6 昭明(1)井因儀器校調偏差之水位異常資料：(a)處理前；(b)處理後

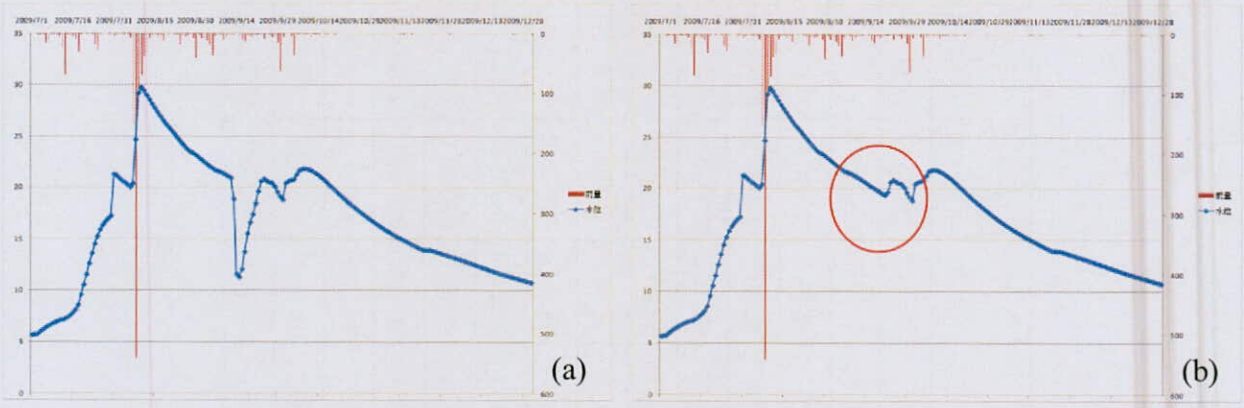


圖 2.3-7 大潭(1)井因儀器校調偏差之水位異常資料：(a)處理前；(b)處理後

2.4 國內外地下水水資源保護現況

為了保護珍貴的水資源，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)，以下回顧這些案例，並討論台灣可以借鏡之處。

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

美國華盛頓州「重要含水層補注區」(Critical Aquifer Recharge Area, CARA)的劃設，為保護地下水飲用水源之水質與水量而設。法源依據為「成長管理法」(Growth Management Act)，理由為事前的保育比污染事後的清除省錢，美國環保署估計事後的清除費比事前的保育費用高達 5 至 200 倍(USEPA, 1995)。

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

該含水層及補注區的劃設可經由水文地質調查為之。保護的標的不只是水質，尚包括補注水量，例如水泥鋪面的禁止，以免減少雨水入滲量。保護的優先次序考慮使用現況及未來使用，主事者需親自調查該區的現有水井，並衡量未來的開發需求，以訂出保護的優先次序。

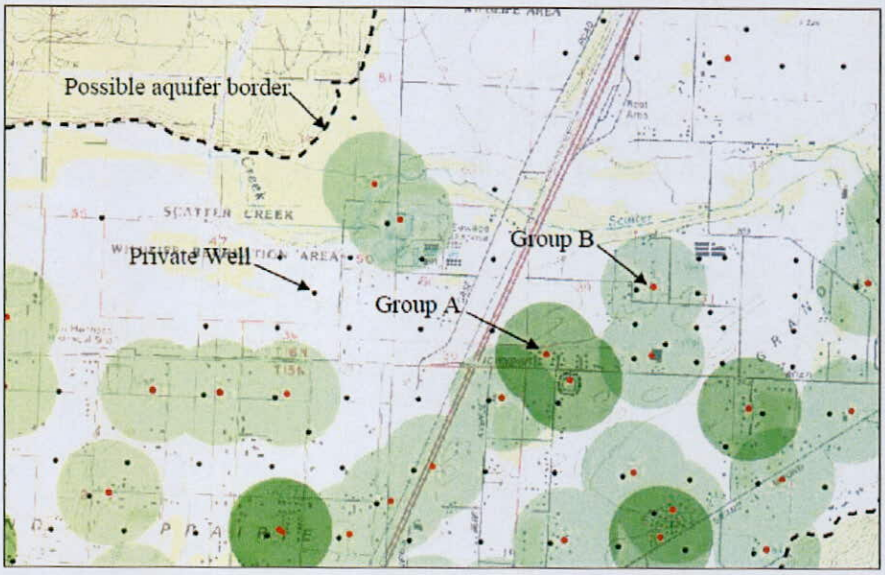


圖 2.4-1 辨別標示出井頭保護帶(圖中紅點為水井、綠圈為井頭保護帶)

步驟：共有 8 個步驟(Morgan, 2005)。

(1)辨別(Identify)：地下水資源在哪裡？水井的分布？井的使用現況？水資源的現況及含水層的分布。針對飲用水水井，標出井頭保護帶(圖 2.4-1)。「安全飲用水法」(Safe Drinking Water Act, SDWA)也提供飲用水水井之保護法源依據。該法規定需調查飲用水源附近之潛在的污染源(potential contamination sources)。除了公有井列為第一順位保護，私有井(家戶使用)也應加以保護。

井頭保護帶(Wellhead Protection Zones)：為一緩衝帶，在該水井為中心之某半徑範圍內設立保護帶。依水井之重要性，以半年、一年、五年、十年的緩衝時間設立保護範圍。即在保護帶外之污染進入含水層後，需夠長的時間才會進到水井中，以保護水源(USEPA, 1989)。

(2)污染敏感度(Susceptibility)：指自然條件是否容易受到污染，例如地下水面、土壤層、含水層、不透水層的分布及水文參數等。區域性的地下水污染敏感圖通常可用 Drastic 方法產生(圖 2.4-2 及圖 2.4-3)。

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

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

(5)劃設(Designate)重要含水層補注保護區：明確在地圖上指出範圍，標出潛在的污染區，標出含水層範圍及性質，標出飲用水源水井，並綜合說明劃設此區對飲用水源之重要性(圖 2.4-4)。

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

(7)確實執行(Ensure)保育管理計畫。

(8)水量管理：除了飲用水優先抽用，應維持河川基流量，以維持河川生態。

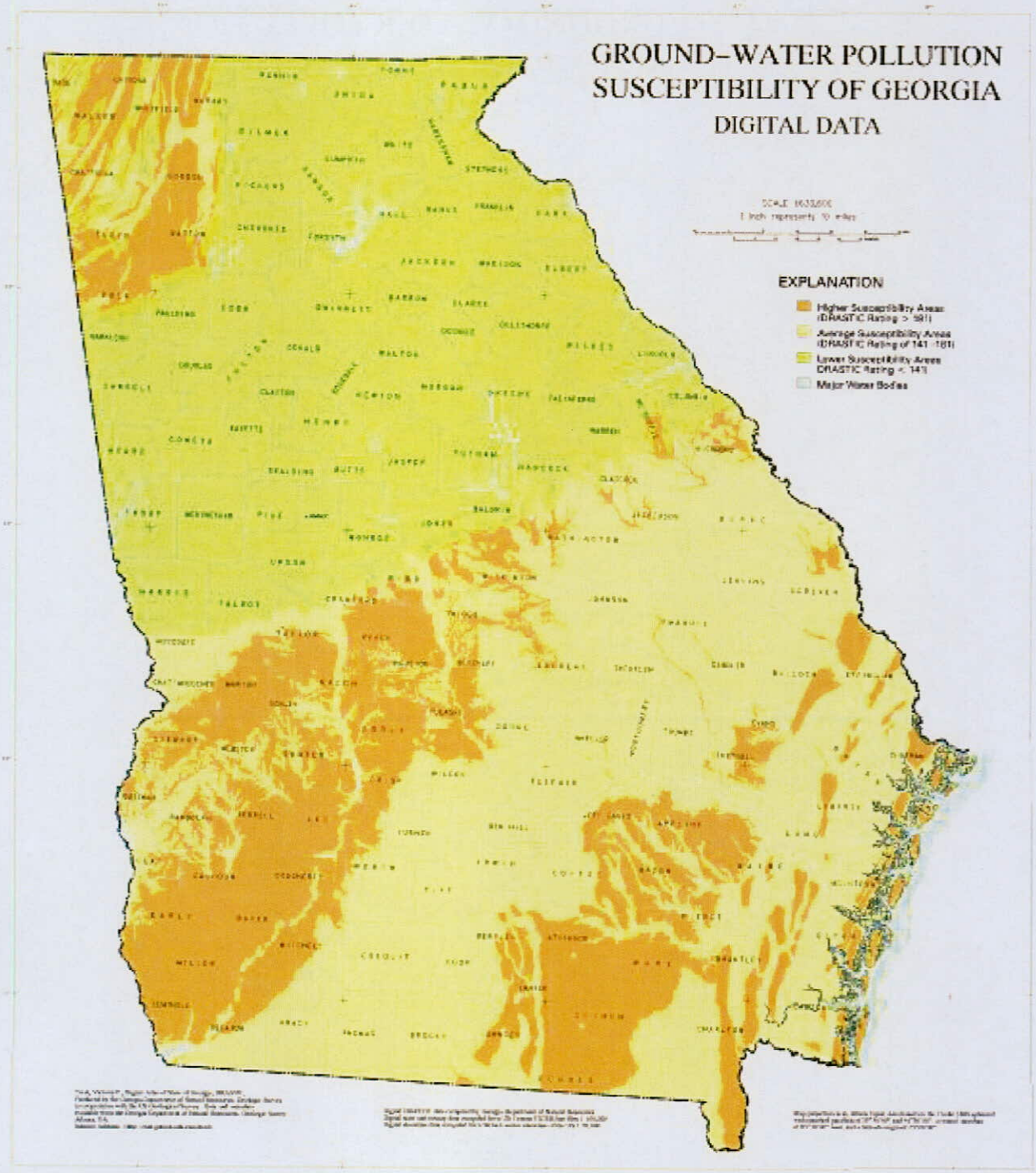


圖 2.4-2 美國 Georgia 州之污染敏感圖

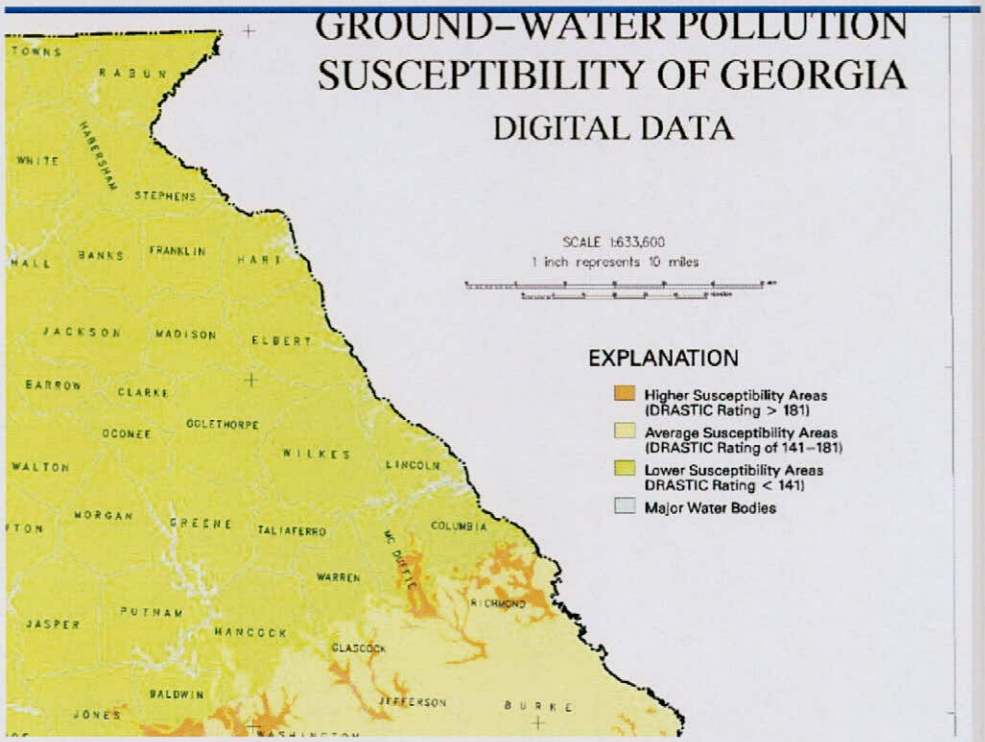


圖 2.4-3 美國 Georgia 州之污染敏感圖局部放大

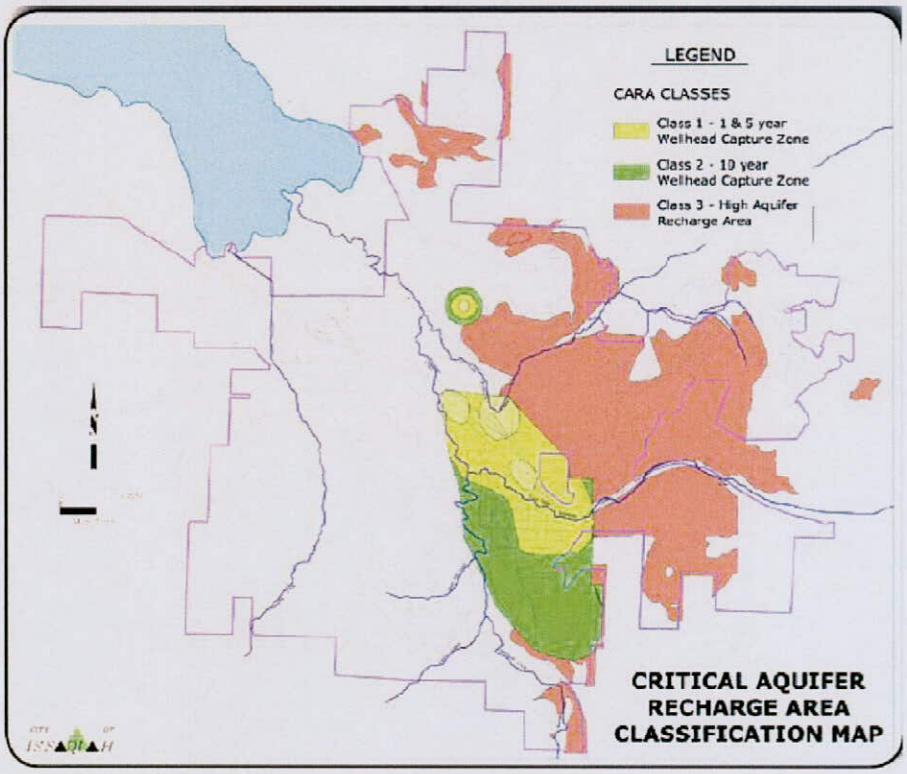


圖 2.4-4 重要地下水補注保護區的劃設，美國華盛頓州 Issaquah 市，分成三類：第一區為 1-5 年的井頭保護區、第二區為 10 年的井頭保護區、第三區為高補注區。

地方政府的執行層面，圖 2.4-4 為美國華盛頓州 Issaquah 市「重要地下水補注保護區的劃設」，分成三類：第一區為 1-5 年的井頭保護區、第二區為 10 年的井頭保護區、第三區為高補注區。圖 2.4-5 及圖 2.4-6 為華盛頓州 King County「重要地下水補注保護區」的分布圖(King County, 2010)。所有位於第一區及第二區的工商業，持有一定數量以上的危害化學物質，需擬定 BMP(Best Management Practice)計畫，載明化學物質的清單、處理方法、儲存方法、廢棄方法等(City of Issaquah, 2009)。

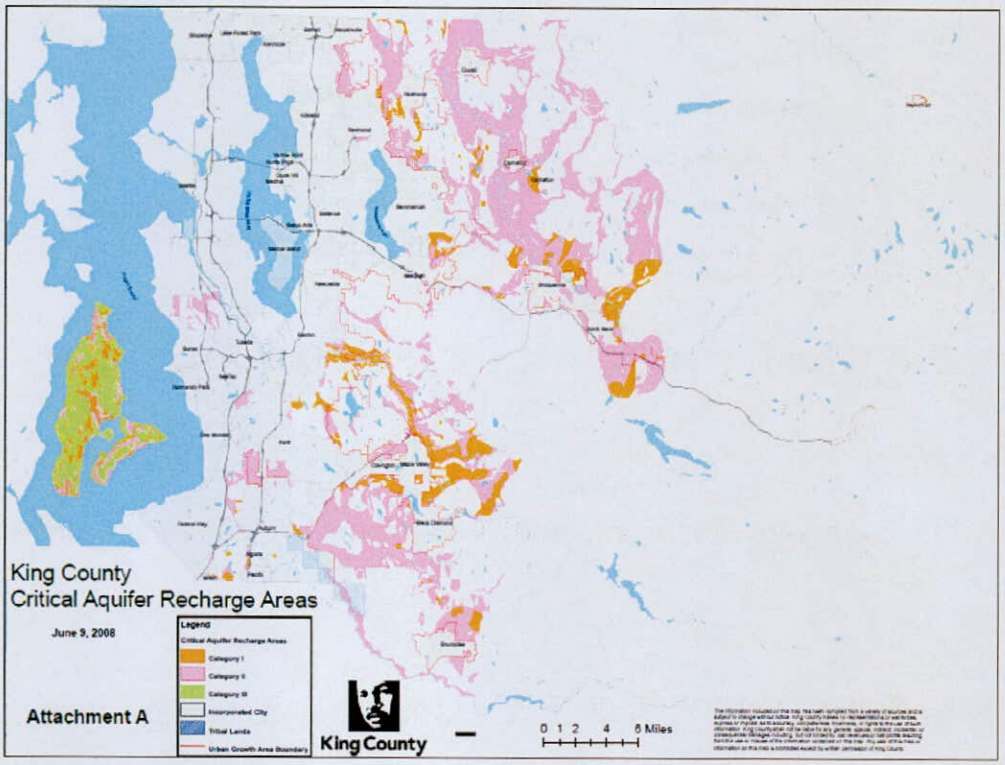


圖 2.4-5 重要地下水補注保護區的劃設，美國華盛頓州 King County，也是分成三類。

資料來源：http://www.kingcounty.gov/environment/waterandland/groundwater/maps-reports/maps.aspx

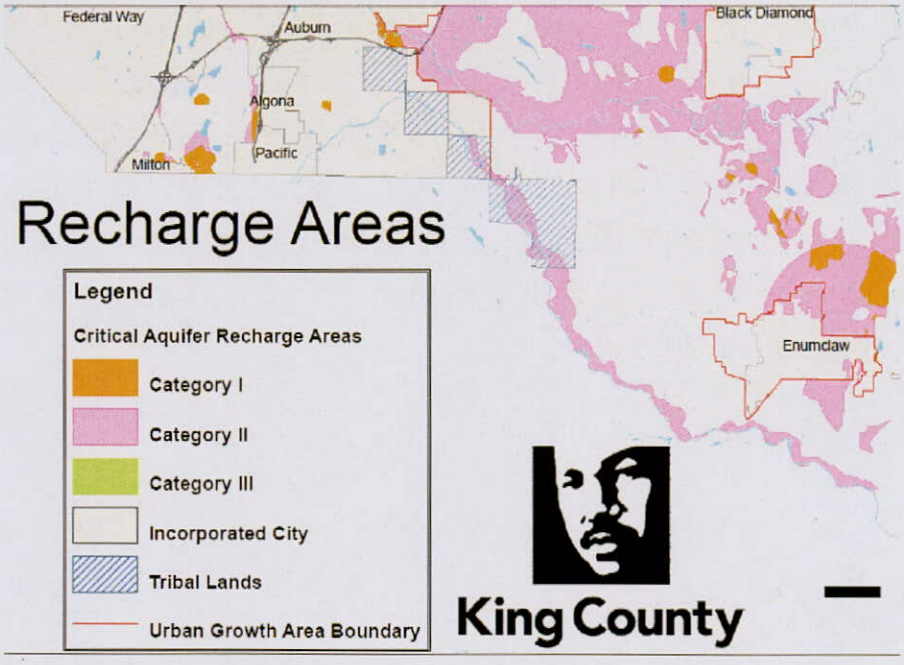


圖 2.4-6 重要地下水補注保護區的劃設，美國華盛頓州 King County，局部放大。

(資料來源：

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

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

美國喬治亞州的地下水補注區屬於水資源保護區(Water Resource Districts)的一部份。該州的水資源保護區分為四類：地下水補注區、濕地、水源集水區、河流(Georgia Department of Natural Resources, 2010)。其中地下水補注區的劃設，主要依據喬治亞自然資源部的第 18 號水文圖(Hydrological Atlas 18, 1989 Edition)，根據圖上的補注範圍(圖 2.4-7)，再依據第 20 號水文圖－地下水污染敏感圖(groundwater pollution susceptibility map)(圖 2.4-8)，將地下水補注區分成三類：高危險、中危險及低危險。

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

文地質師進行補查。

地下水補注區之土地使用法規(Georgia Department of Natural Resources, 2010)：

(1) 地上油槽及化學槽，超過 660 加侖，需有預備的空槽(萬一偵測到洩漏時、可緊急接替)。

(2) 農業廢棄物掩埋場需有不透水材料襯墊。

(3) 社區需設污水道及污水處理設施。

(4) 社區若沒有自設污水處理設施，需將污水送至公有污水廠處理。

(5) 污水處理若不合規定，不得核發建照。

(6) 持有危害物(hazardous materials)超過一萬磅，危害物的定義根據 Resource Conservation and Recovery Act 第 312 條，需鋪設不透水材料襯墊，並通過防洩漏及防火之法規。

(7) 新設污水廠需鋪設不透水材料襯墊。

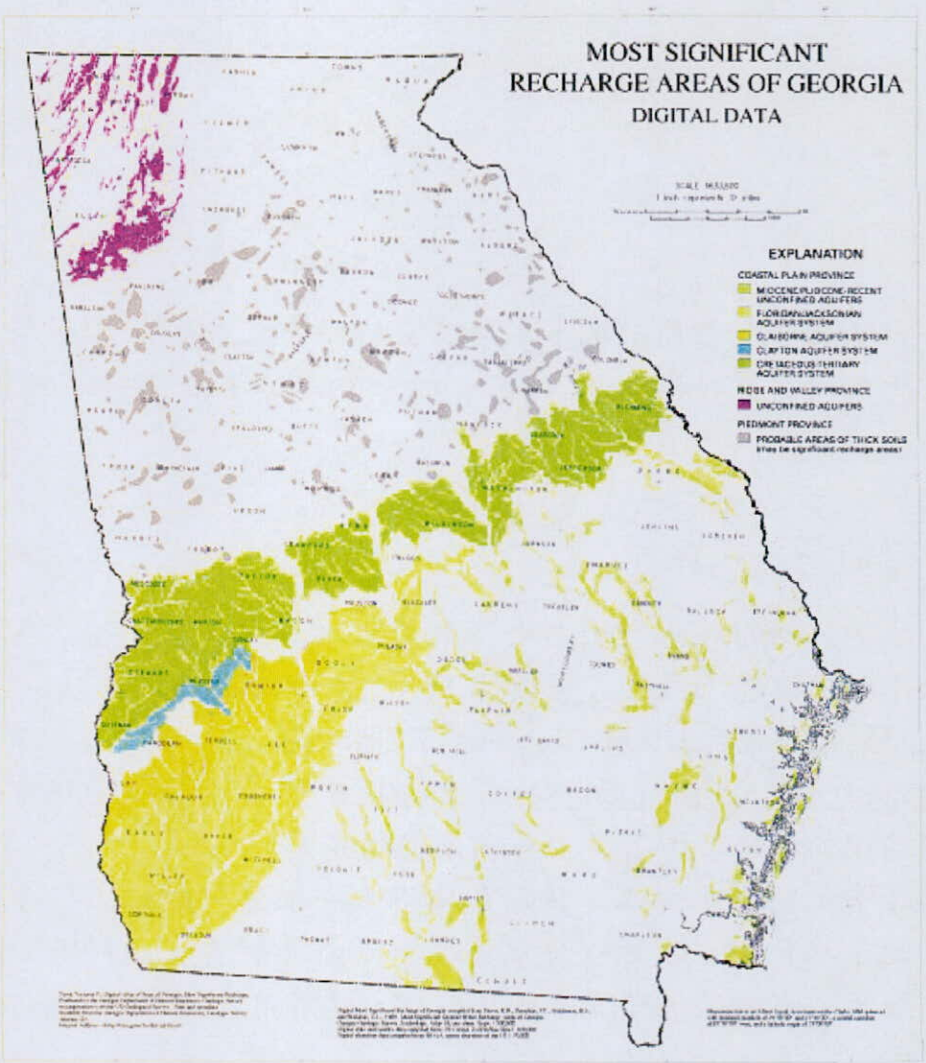


圖 2.4-7 美國喬治亞州的地下水補注區(數值圖來源：美國地質調查所之地

圖資料庫 http://csat.er.usgs.gov/statewide/layers/recharge.html)

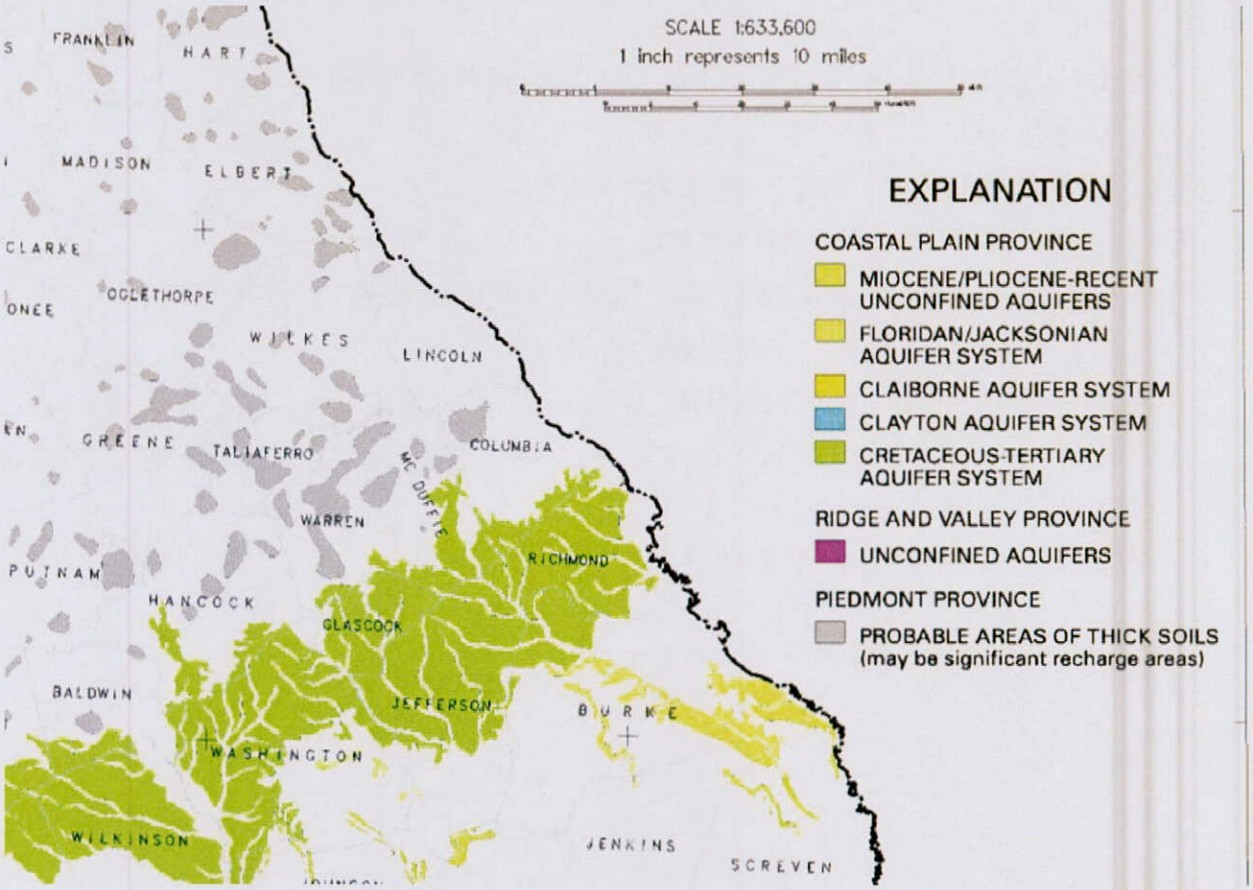


圖 2.4-8 美國喬治亞州的地下水補注區局部放大圖及圖例(數值圖來源：美國地質調查所之地圖資料庫 http://csat.er.usgs.gov/statewide/layers/recharge.html)

2.4.3 台灣的地下水保護

台灣的水源保護以環保署公告之「飲用水水源水質保護區」為之，目前只有公告地面水之保護區，並沒有保護地下水之水源(圖 2.4-9)。

根據環保署土壤及地下水污染整治網的公告 http://sgw.epa.gov.tw/public/index.asp，屏東縣共有 10 處污染列管場址(表 2.4-1)，其中位於內埔鄉的場址，即屬於主要補注區的範圍。

為保護珍貴的地下水資源，特別是飲用水的水源，應儘速公告「地下水補注區」或「地下水飲用水水源水質保護區」，並管制其土地利用，防範污染，國外的案例顯示，事後的清理除了曠日費時，其費用也比事前管制高出許多。

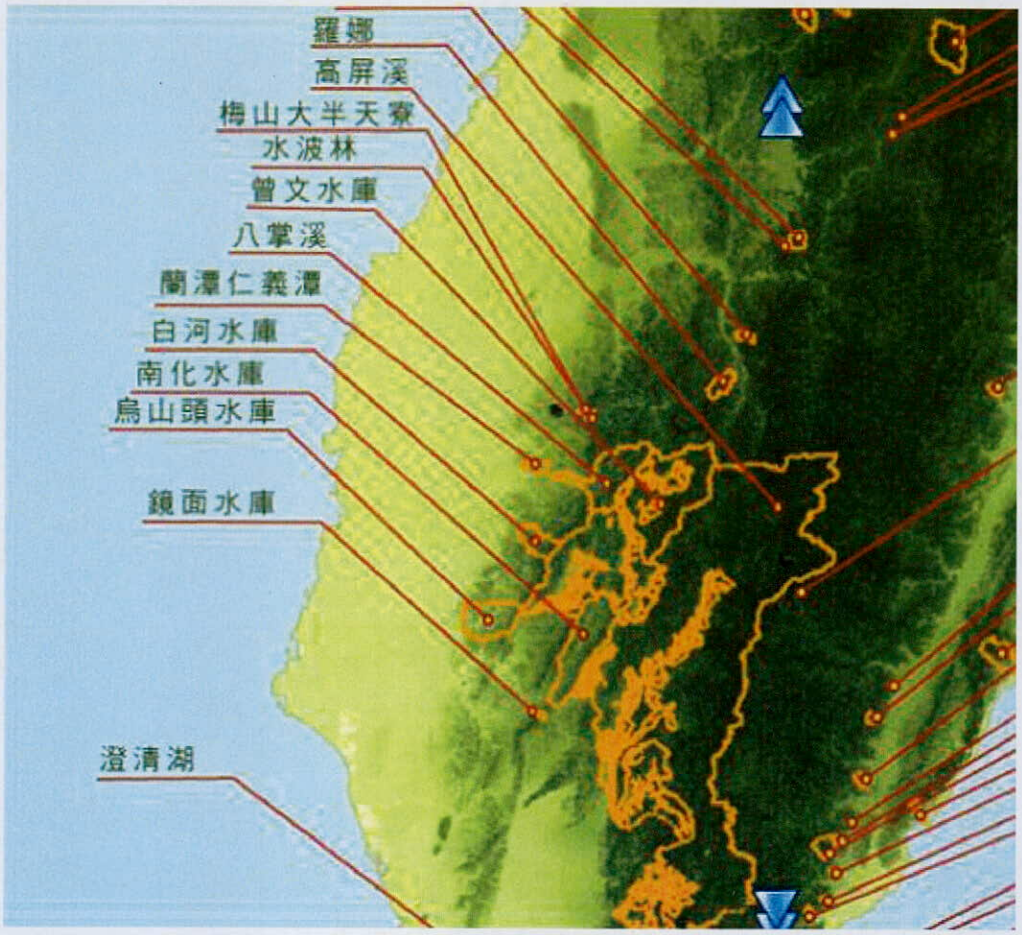


圖 2.4-9 環保署公告之飲用水水源水質保護區，目前並不含地下水水源，網址：http://wsserver.epa.gov.tw/

表 2.4-1 環保署公告之屏東縣土壤及地下水污染列管場址

場址名稱	場址坐標	場址地址	場址種類	公告日期	土壤/地下水污染物
川流加油站	X：203762，Y：2483375	屏東縣佳冬鄉昌隆村大豐路 786 號	加油站	2008/9/4	苯;總石油碳氫化合物/苯;甲苯;奈
加祿加油站	無坐標資料	屏東縣枋山鄉加祿村加祿路 157 號	加油站	2008/11/24	總石油碳氫化合物/無
內埔加油站	無坐標資料	屏東縣內埔鄉東寧村南寧路 422 號	加油站	2008/10/15	總石油碳氫化合物/無
全部實業股份有限公司	無坐標資料	屏東縣麟洛鄉中山路 563 號	工廠	2009/8/21	鉛;總石油碳氫化合物/無
屏東縣九如鄉九清段 1340 地號	無坐標資料	屏東縣九如鄉九清段 1340 地號	農地	2009/6/1	鉻;鎳;鋅;總石油碳氫化合物/無

表 2.4-1 環保署公告之屏東縣土壤及地下水污染列管場址(續)

場址名稱	場址坐標	場址地址	場址種類	公告日期	土壤/地下水污染物
屏東縣長治鄉長興段 1357-13 號(現為榮興段 161 地號)	X：205075.051951，Y：2508188.99053	屏東縣長治鄉長興段 1357-13 號(現為榮興段 161 地號)	非法棄置場址	2010/4/22	無/苯
屏東縣長治鄉番子寮段 243-110 部分地號	X：204387.241123，Y：2509104.3489	屏東縣長治鄉番子寮段 243-110 部分地號	非法棄置場址	2010/7/13	鉻;鎳;銅;鋅;鉛/無
屏東縣長治鄉榮華段 1682 部分地號	X：204666.8，Y：2508953.1	無	非法棄置場址	2010/7/13	鉻;鎘;鎳;銅;鋅;鉛/無
屏東縣萬丹鄉新安段 1438 及 1439 地號(大鼎飼料廠)	X：197505，Y：2500959	屏東縣萬丹鄉新安段 1438、1439 地號(大鼎飼料廠)	非法棄置場址	2005/11/28	鎘;鎳;鉻;銅;鉛;鋅;/無
屏東縣新園鄉新洋段 325、416、419、428、429、430、431、432-6(部分)地號	X：194390.64，Y：2495493.45	屏東縣新園鄉新洋段 325、416、419、428、 429、430、431、432-6(部分)地號	非法棄置場址	2005/11/28	砷;鉻;銅;汞;鎳;鉛;鋅/無

第三章 現地補充調查試驗與主要補注區綜合分析

屏東平原是台灣最重要的地下水資源區之一，與濁水溪共同提供了全台超過 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)。扇頂區除了是地下水資源豐富的區域，也是屏東沖積扇地區地下水的源頭，一旦遭受污染，將對全區地下水資源將產生很大的衝擊。

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，以提供地下水水質保護區劃定的重要參考，本年度本項補充調查分為兩大工作：(1)以地球物理探測方法，補充調查扇頂水文地質分界帶分佈；(2)調查扇頂補注區域的地下水位時空演變及可能機制，並藉由地球物理時序監測之結果，探求可能的水文地質參數。

3.1 屏東地區扇頂地電阻測勘

本調查工作採用地電阻調查方法，初步佈線規劃參考補注潛勢分析評估，再由地質鑽井岩心與地表調查等資料判定之屏東平原補注區邊界，100 年度已由南至北沿扇頂向扇尾方向，完成 21 條二維地電阻影像剖面測線，每條二維地電阻影像測線總長度約為 400 公尺，已畫出初判之高電阻區域邊界，以協助補注區之劃設，101 年度之工作重點，將在初判之高電阻區域邊界附近增加資料點，以協助詳查上一年度未完全進行調查或尚有疑義之區域，協助完成扇頂補注區之劃設工作。

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侷限含水層(Unconfined aquifer)，甚至是較深層之受壓侷限含水層(Confined aquifer)；而漸至沖積扇尾地區，近地表之沉積物則逐漸轉變為厚層之泥層，形成良好之難透水層(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，礫石層具有較高之視電阻率(約 10~100 Ohm-m)，而泥層視電阻率則極低(約 1~10 Ohm-m)，依上述礫石層與泥

層之電阻特性，因此可由地電阻剖面上辨識出沖積層之礫石與泥層分布之情況，配合已有之鑽井資料，即可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。預期在測線完成後，配合該區域的鑽井資料，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。(圖 3.1-1)

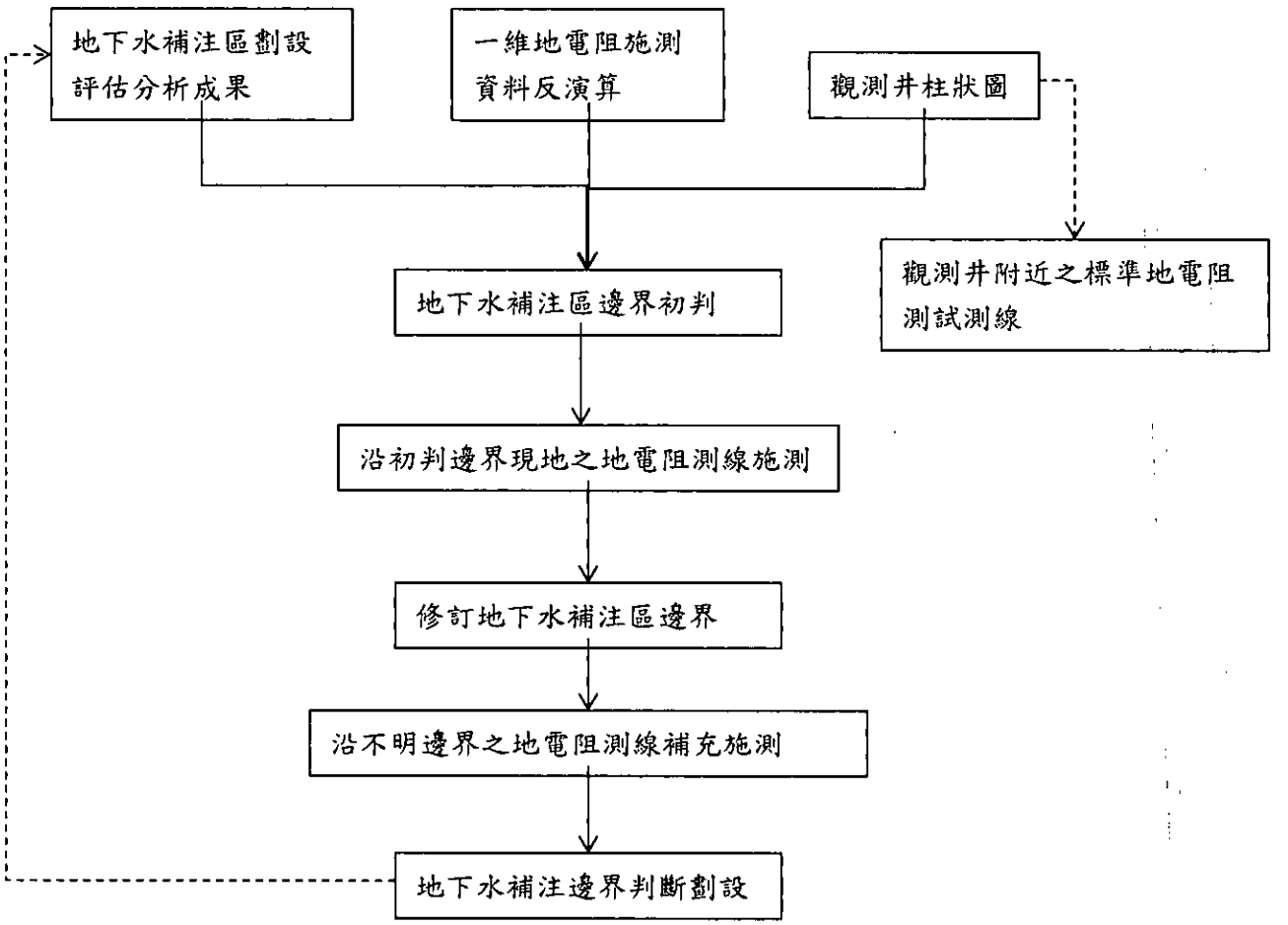


圖 3.1-1 利用地電阻方法補充調查地下水補注區邊界之作業流程示意圖

3.1.1 二維地電阻調查原理

（一）地電阻率測勘原理

一般影響地下地層電阻的因素有岩性、礦物組成、含水量、孔隙率、孔隙水組成及溫度等，當地層層序變化造成明顯的層間電阻率對比，或是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，就適合用

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 3.1-2)，根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)。

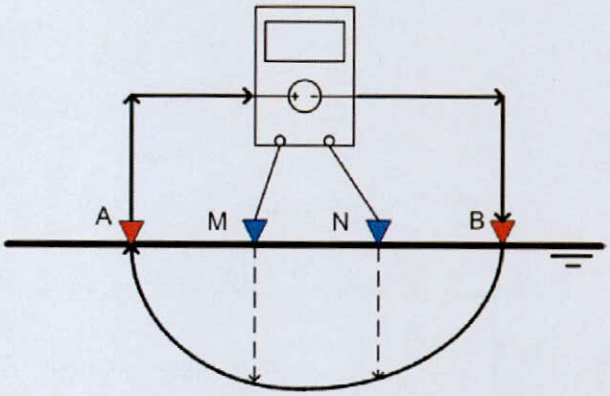


圖 3.1-2 地電阻探測儀器示意圖

根據歐姆定律，電流(I)與電壓(V)成正比，與電阻(R)成反比

$V = I R$ .....(式 3.1-1)

當電流通過不同的地質材料時會因為電阻性質不同，而測得不同的電位差；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

$$R = \rho \frac{l}{A}$$ .....(式 3.1-2)

$$\rho = R \frac{A}{l}$$ .....(式 3.1-3)

上式中，R 為電阻，ρ 為電阻率， l 為電流流線的長度， A 為電流線的總截面積。在任一均質的地表通入電流強度為 I 之直流電，因為空氣為絕緣體，所以電流會由導入點呈放射狀向外流出，成為一個半球面(如圖 3.1-2)體。而電流是等量的分配在每一個地方，故距離通入電流之 r 處，電位(V)也相等，且在均質的地表定義極薄的殼層為 dr。

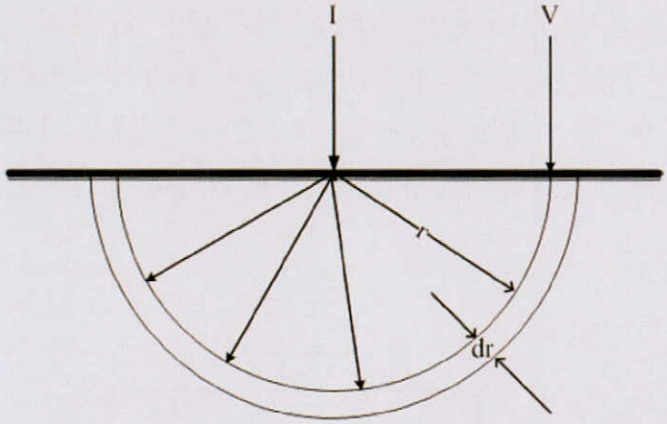


圖 3.1-3 電流流動示意圖

透過歐姆定律(3.1)式定義電位差穿過此殼層電位差為

$$dv = I(R) = I\left(\rho\frac{l}{A}\right) = I\left(\rho\frac{dr}{2\pi r^2}\right) \quad \text{.....(式 3.1-4)}$$

故距單電流極 D 之任一點其電位為

$$V = \int_D^{\infty} dv = \frac{I\rho}{2\pi}\int_D^{\infty}\frac{dr}{r^2} = \frac{\rho I}{2\pi D} \quad \text{.....(式 3.1-5)}$$

運用上述原理，可進行地電阻法(Geoelectric Resistivity Method)之測勘，原理為：假設在均質的地面上任意佈上四根電極(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 3.1-3，根據此即可計算該地層的視電阻率(Apparent Resistivity)由式 3.1-5 推出

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

$$\rho = \frac{\Delta V 2\pi}{I}\left[\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}}\right) - \left(\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{BN}}\right)\right]^{-1} \quad \text{.....(式 3.1-6)}$$

令

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

式 3.1-6 可進一步縮寫為下式：

$$\rho = \frac{\Delta V}{I}K \quad \text{.....(式 3.1-7)}$$

其中，ΔV：電位差，$V_{\overline{AM}}, V_{\overline{BM}}, V_{\overline{AN}}, V_{\overline{BM}}$：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

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：溫奈排列(Wenner Array)、施蘭卜吉排列(Schlumberger Array)、雙偶極排列(Dipole-dipole Array)及雙極排列(Pole-pole Array)等。

溫奈排列法優點在於其排列方式為對稱，且排列時電位極位於電流極之間，可克服大部分之隨機雜訊(random noisy)，以減少實驗造成的誤差，且施測總展距適當，不會如雙極排列法需將遠端電極拉至施測展距十倍遠，可減少實際在野外測試時候操作性與避免因電極較遠而造成雜訊過大的情形，整體相較之下訊號比較其他方式為高，訊號品質較好。

雙偶極排列法優點在於此法較不受到地形限制，且施測容易，但在施測上相當耗時，主要依加大間距獲取較深層之電性地層資料。一般而言，施蘭卜吉排列與溫奈排列較常應用於地層平緩區域作垂直探勘(Sounding)；雙極排列與雙偶極排列則較常運用於剖面探勘(Profiling)。通常測深與電極間距成正比，但因訊號在深處會衰減，所以以溫奈排列實際可得測線長度五分之一的測深。

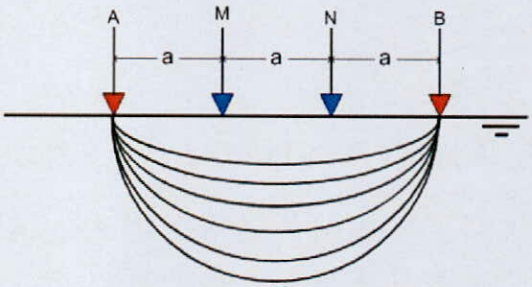


圖 3.1-4 溫奈排列(Wenner Array)排列方式示意圖

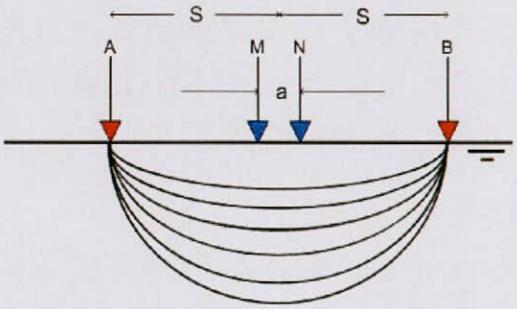


圖 3.1-5 施蘭卜吉排列(Schlumberger Array)排列方式示意圖

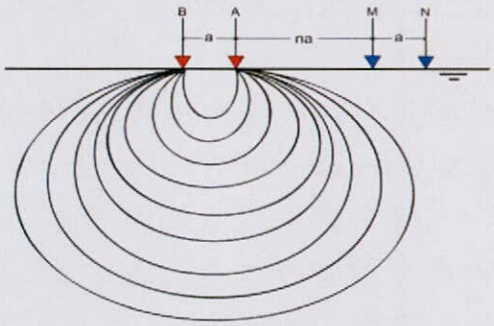


圖 3.1-6 雙偶極排列(Dipole-dipole Array)排列方式示意圖

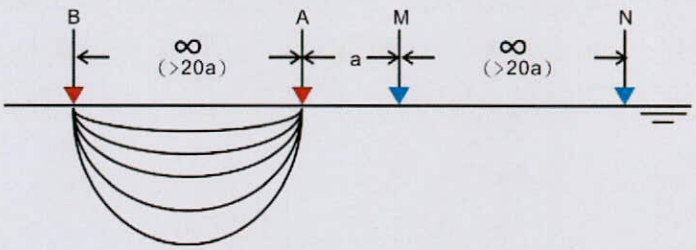


圖 3.1-7 雙極排列(Pole-Pole Array)排列方式示意圖

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

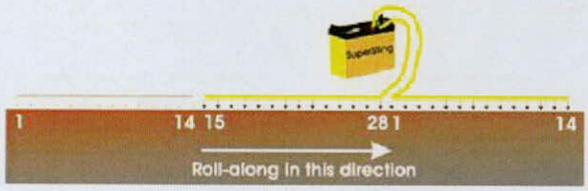


圖 3.1-8 二維地電阻剖面影像探測示意圖

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 Smart Cable 系統，進行快速、高密度之地電阻影像剖面量測。本計畫所採用的反演算數值軟體為 AGI 所開發出之二維地電阻影像逆推反算程式 EarthImager 2D^{TM}。此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。

3.1.2 二維地電阻現地施測方式

本調查工作預計採用地電阻調查方法，再由地質鑽井岩心與地表調查等資料判定之屏東平原補注區邊界。100 年度已沿扇頂區域由北至南調查，各區域均由扇頂至扇尾施作約兩條二維地電阻影像剖面測線；今年度(101)將在初判之高電阻區域邊界附近增加測線，確保資料完整性。

98 年度工作中曾以輪替式測線之做法調查濁水溪北岸之地下水補注區邊界，輪替式測線之做法是採用兩條固定間距之二維電極陣列(Electrode array)，沿一條測線方向，以交互輪替移動的方式進行施測(如圖 3.1-9)。由於二維地電阻影像方法之測深決定於電極陣列之長度，因此聯合兩條電極陣列可達之測深遠較單一電極陣列較大，而輪替式的方式則每次移動僅需移動一條電極陣列，在時間上較有效率。輪替式的施測方式，運用單次 400 公尺之施測方式，根據圖 3.1-8 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，以提供高電阻區域範圍劃設之用。

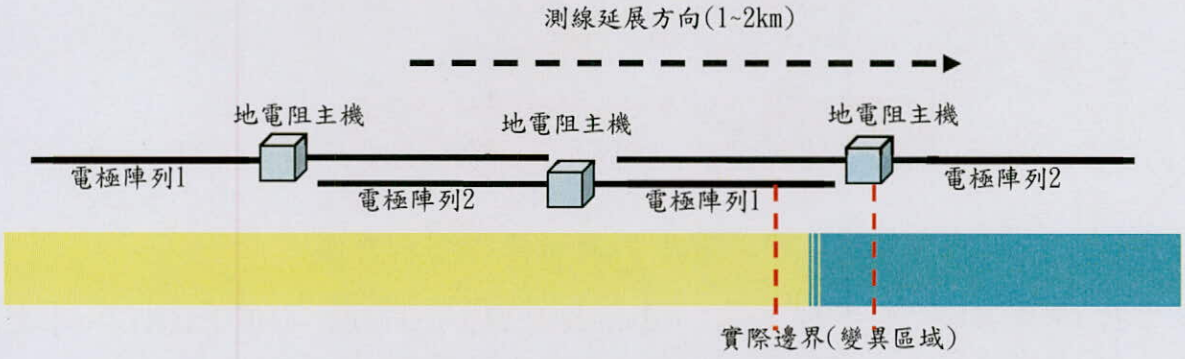


圖 3.1-9 地電阻輪替式(Roll-along)陣列施測方式示意圖

但是根據 98、99 年度於彰化、雲林地區施測之經驗，屏東地區由於人為開發較密集，很難沿連續測線進行施測。故本年度以改良式的平移測線設計，沿扇頂往扇尾方向進行平移式二維施測(如圖 3.1-10)，並視人為構造物分布規劃測區測線以減少不必要的干擾。這種施測方式主要是針對尋找地表下構造或岩性不連續邊界時所使用。初次測點開始進行地電阻施測後，若從反演算影像研判初次測點並未找到地表下變異邊界，則平移方向指向疑似區域進行第二測點之施作。若第二測點之反演算影像特性已和初次測點完全迥異，則平移至第一測點及第二測點連線之中點，藉以包夾、逼近地表下構造或岩性不連續邊界並予以劃定。

預計採用之每條電極陣列之電極間距為 10 公尺，單次施測長度約為 400 公尺，估計測深約可達 50-70 公尺，根據目前本區之鑽探資料顯示，近地表發現之約 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高電阻區域邊界劃設調查之用。

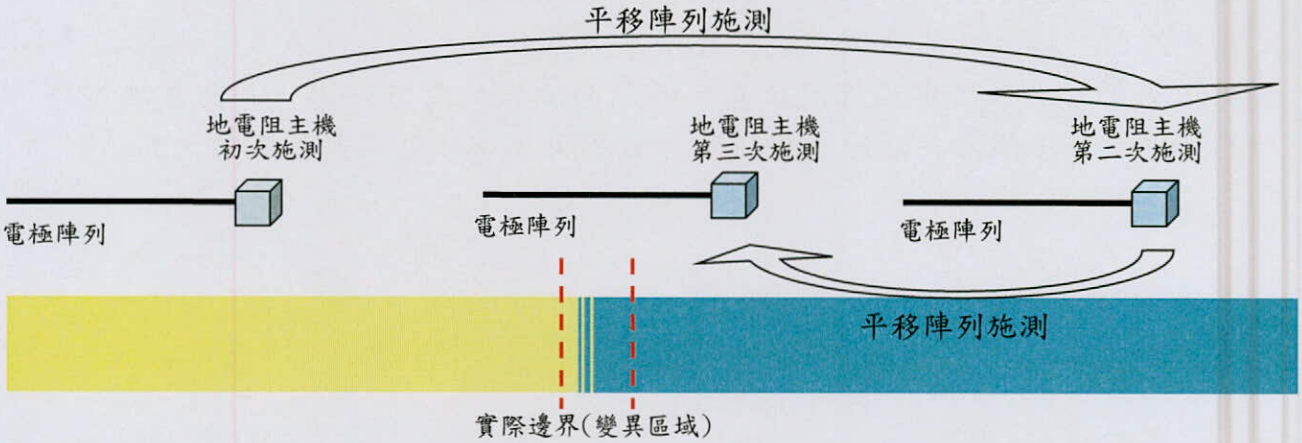


圖 3.1-10 地電阻平移式陣列施測方式示意圖

根據 99 年度之二維地電阻剖面工作成果，發現所研判之補注區邊界，較原先由雲林地區一維地電阻之 50 公尺半展距分佈圖 50 Ohm-m 視電阻率等值線之邊界要更往扇頂靠近，大約相當於 50 公尺半展距分佈圖視電阻率 60 Ohm-m 等值線之分佈位置。因此由過去屏東平原地區一維地電阻、地質鑽探及地下水井井測資料，初步大致沿 50 公尺半展距分佈圖視電阻率 60 Ohm-m 等值線分佈研判本區之扇頂高電阻區域邊界(如圖 3.1-11)。

但是由於屏東平原有高屏溪、東港溪與林邊溪三大主要河流流貫;根據 98、99 年度於彰化、雲林地區的濁水溪流域工作經驗，若是調查區域僅受單一水系作用，水文地質狀況相對會比多河系作用之區域單純許多。再加上不同區域有相異的地質、地理條件，如 98、99 年度於彰化、雲林地區的濁水溪流域與本年度之屏東平原區域地質環境及沉積物來源完全相異，因此彰化雲林地區與屏東平原的電性地層特徵可能差異甚大。為了避免複雜的水文地質條件與電性地層特徵的差異影響本年度的判斷與調查結果，去年度(100)屏東平原的調查工作主要利用平移測線方法的設計，但優先於分區測線之主要觀測井旁進行施測，建立分區測線之主要標準觀測井岩心與二維地電阻剖面的對比，以利資料比對正確性。如此，可在第一時間內確實找出高電阻區域邊界於各區測線內與觀測井的約略相對位置。今年度較精確的高電阻區域邊界劃定，仍依照平移式測線施測方法以二維地電阻剖面影像繼續判定求得較精確的邊界位置。

以觀測井為主軸的分區測線規劃與野外二維地電阻資料實測，加上岩心資料比對驗證，配合工研院一維施蘭卜吉法視電阻率資料與反演算結果，預計可獲得精準的高電阻區域邊界劃定。

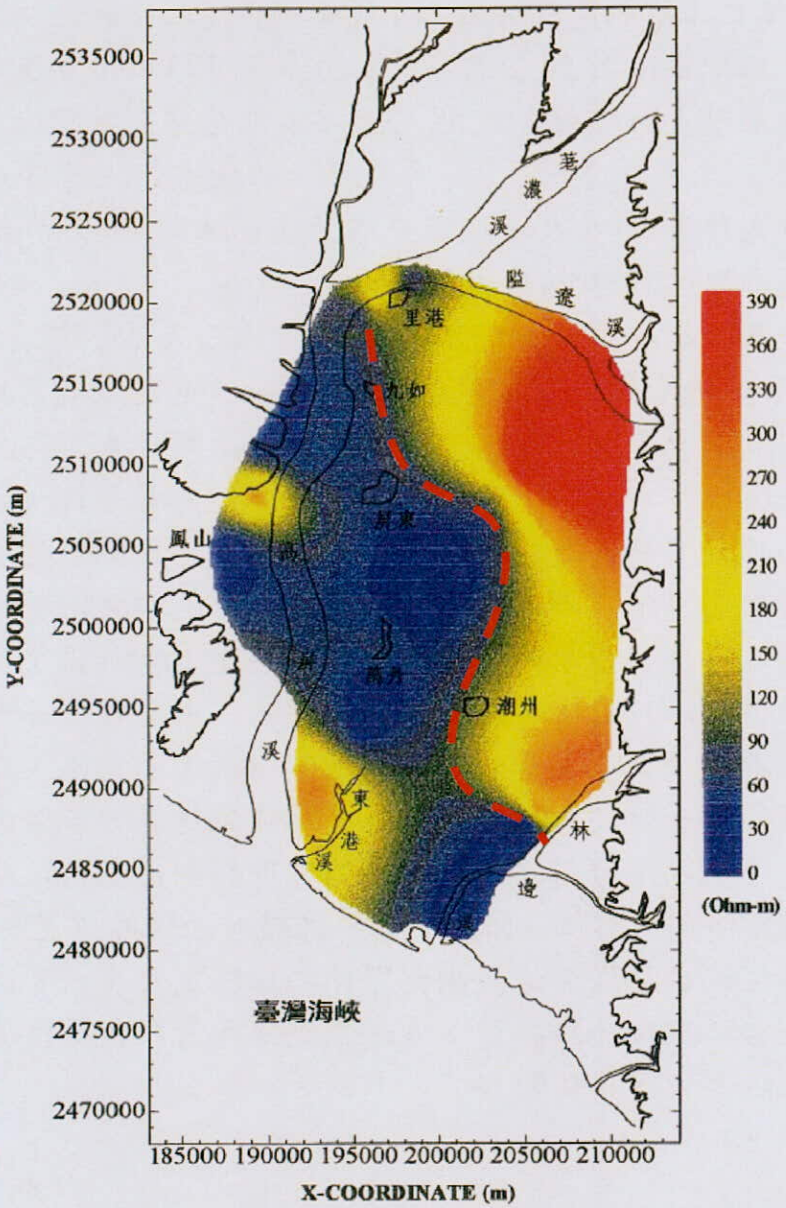


圖 3.1-11 屏東平原 50 公尺半展距一維地電阻分布圖與 100 年度地電阻推測邊界位置圖(紅色虛線為由 60 Ohm-m 等值線推測之高電阻區域邊界)

本年度(101)調查工作預計於屏東平原去年度(100)初估邊界(如圖 3.1-12)之頭尾增加測線，將於旗山、美濃、吉洋、萬巒、赤山、內埔、老埤等地下水觀測井測站連線附近，以確立高電阻區域邊界之頭尾，進行地電阻施測。

另外，將在關福、瑪家地下水觀測井之間測量，期望在此利用地電阻影像得到枯豐期之地下水位變化，進而作為推估潮州斷層山邊側流量之參考。

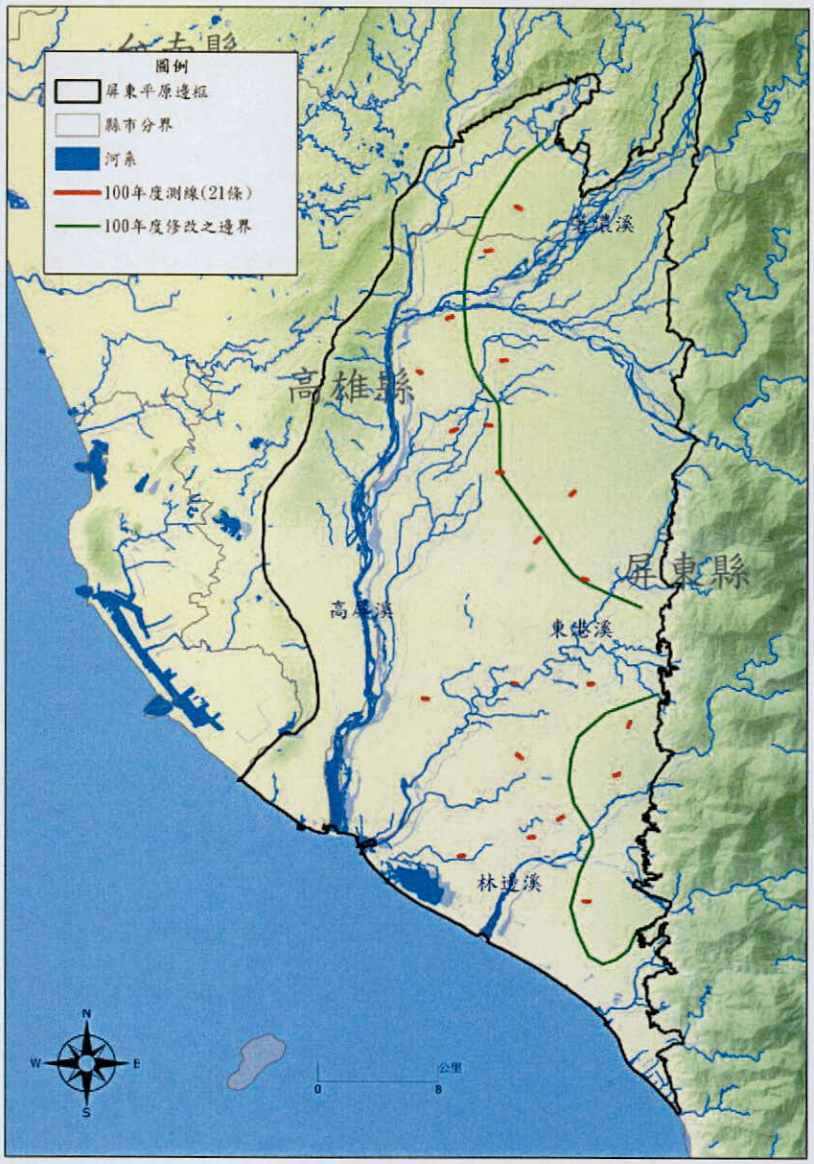


圖 3.1-12 屏東平原 100 年度高電阻區域邊界(綠線)以及 100 年度地電阻測線位置分佈(紅點)圖

101 年度調查包括以下工作項目:

1. 高電阻區域邊界補充調查:

本年度預計在屏東平原內，在 100 年度判定之邊界附近：老埤-赤山-萬巒測區(如圖 3.1-13)，以及吉洋-美濃測區(如圖 3.1-13)，施作總長度 2 公里以上之地電阻平移式測線，由於二維測線沿著由扇頂至扇尾方向之測線進行施測調查，因此在邊界分佈之調查中，可能有部分區域之地層分佈須再進行詳察驗證，因此高電阻區域邊界補充調查係為補足去年度測線在空間中涵蓋之不足部分或有疑義之部分進行補充，並與現有觀測井之岩心紀錄，以增加分析之可信度，如此以平移測線的方法，包夾、逼近邊界進一步得到更精確的泥層及礫層分布。

2. 重點區域地電阻補充調查:

今年度預計在隘寮溪南、北岸施作地電阻測線，三地門橋-關福-瑪家測區(如圖 3.1-13)，將於枯水期與豐水期施測，施作總長度 3 公里以上之地電阻平移式測線，測線平行隘寮溪道方向(西北-東南)進行調查，除了得到潮州斷層通過隘寮溪附近的地質電性關係，期望能得到隘寮溪的地下水水位坡度情況，進一步助於推求潮州斷層流入的山邊側流量。利用較高解析度之地電阻影像協助辨識地下水水位的變化。本計畫已於 4 月完成估水期測線，8 月完成豐水期測線。

3. 建立以沖積扇地電阻率分佈，協助補注區劃設之標準分析流程：

利用上述之野外工作之成果，配合當地之鑽井與地質鑽探資料，可進一步運用繪出二維與三維之電性空間分布圖，並進一步交叉比對其他水文地質資料，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。

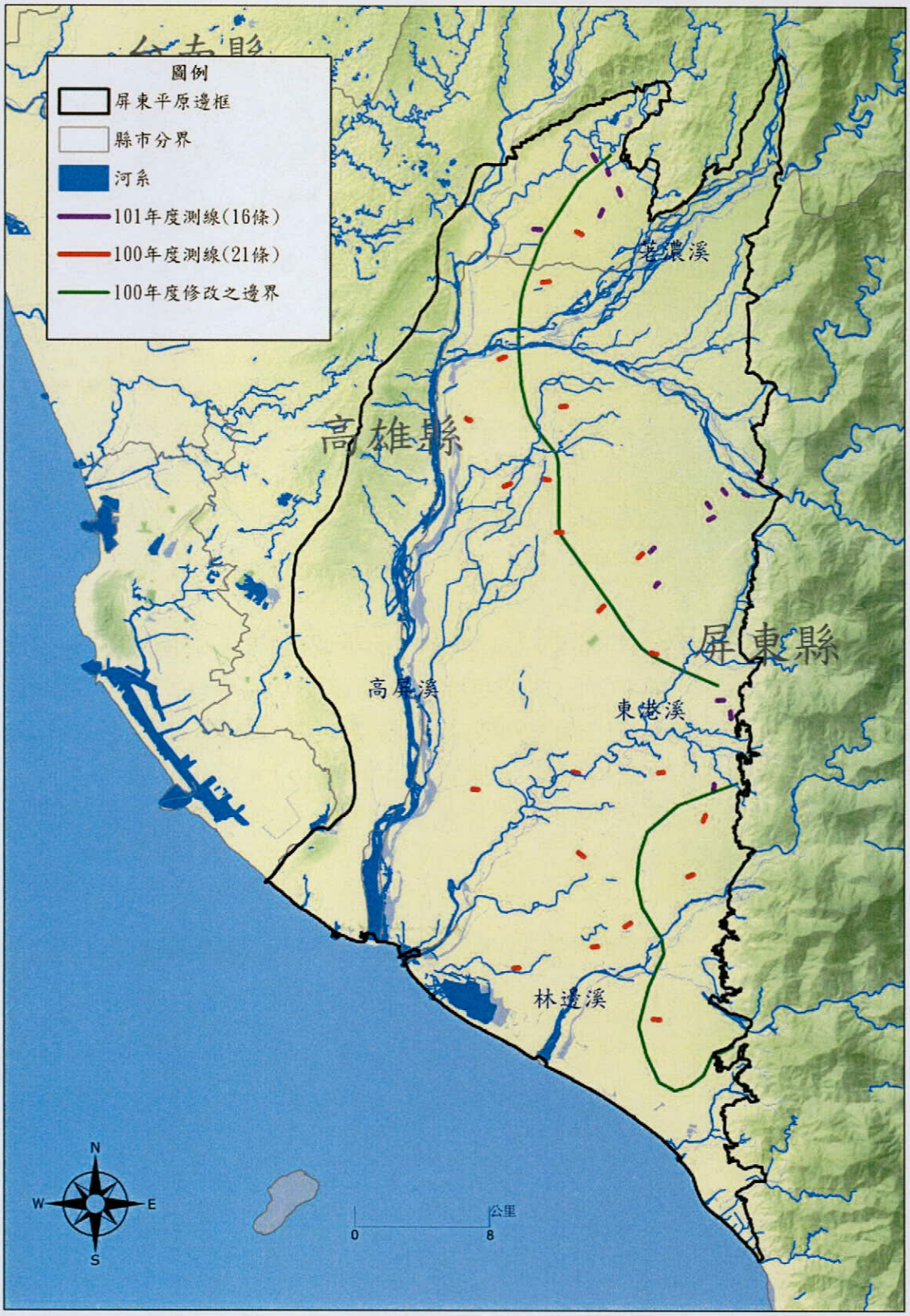


圖 3.1-13 屏東平原 100 年度地高電阻區域初估邊界(綠線)以及 101 年度地電阻測線位置分佈(紫點)圖

3.1.3 二維地電阻現地施測結果

本調查工作已於屏東平原完成(1) 高電阻區域邊界補充調查：老埤-赤山-萬巒測區共 1140 公尺，以及吉洋-美濃測區共 1900 公尺，屏科大補測共 660 公尺。(2)重點區域地電阻補充調查:三地門橋-關福-瑪家測區豐枯水期共 2920 公尺，總長度為 6620 地電阻剖面量測。量測之初步判釋結果敘述如下:

(1) 高電阻區域邊界補充調查(老埤-赤山-萬巒)測線地電阻率剖面與觀測井岩性比對

萬巒觀測井位於萬巒鄉佳佐國小內，去年度已在觀測井之西南方約 1000 公尺處之土溝進行施測，以及萬巒-萬隆測線，位於萬巒觀測井之東南方約 3300 公尺處、萬隆觀測井東北方約 3800 公尺處之農用道路旁；因在此兩測線中為本計畫所求之地下水補注區邊界，故在此增加另一條萬巒邊界測線，位於萬巒觀測井東南方 2000 公尺處(如圖 3.1-14)，得到更精確之高電阻區域邊界。

依照去年度(100)實作經驗，形成難透水層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 100~300 Ohm-m) 較砂泥層(約 1~100 Ohm-m)為高。由地電阻剖面(如圖 3.1-15)可發現，萬巒邊界測線電阻率均在 100 Ohm-m 以上，依照基本原理與岩心比對結果，高電阻率地層(>75Ohm-m)在本區應為礫石層之反應。因此，確定屏東平原南區的高電阻區域邊界應在本測線與西北方的萬巒測線中間。

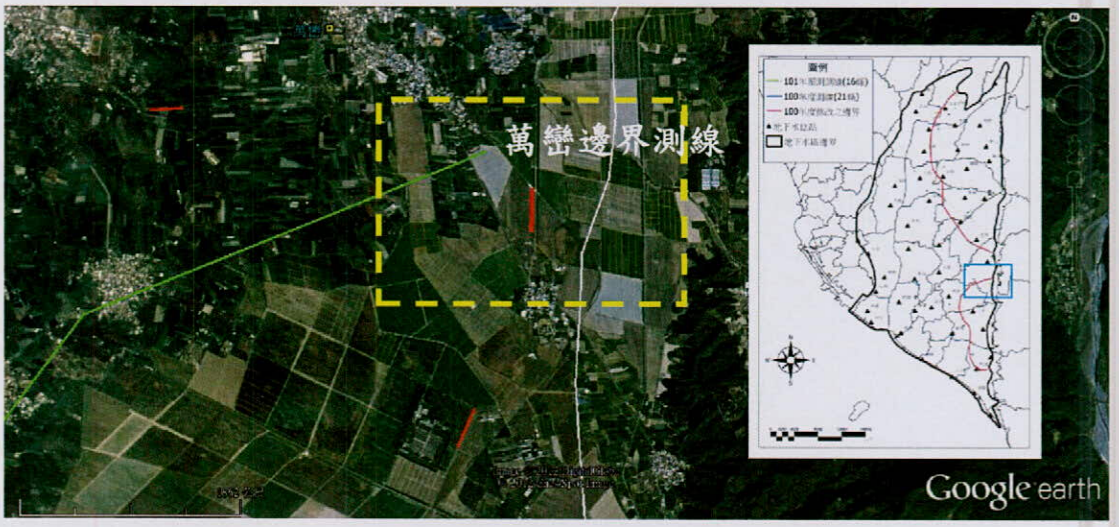


圖 3.1-14 萬巒邊界測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

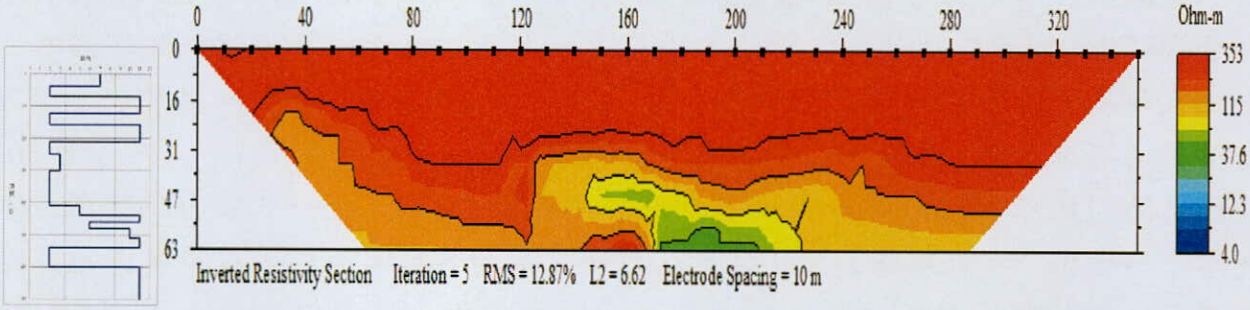


圖 3.1-15 萬巒邊界二維地電阻影像剖面與萬巒觀測井岩心資料對比結果

另一口觀測井—赤山觀測井位於萬巒鄉赤山國小內，標準測線施測於赤山觀測井東方約 600 公尺的樹林內，如圖 3.1-16。

而圖 3.1-17 則顯示赤山地區之 380 公尺地電阻影像剖面與赤山觀測井岩心資料。比對赤山觀測井岩心資料所顯示在其井下僅 10 m 內及 35-40m 處部分為礫石層分佈，礫石層呈局部凸鏡狀體分佈於泥層或砂泥互層之中。

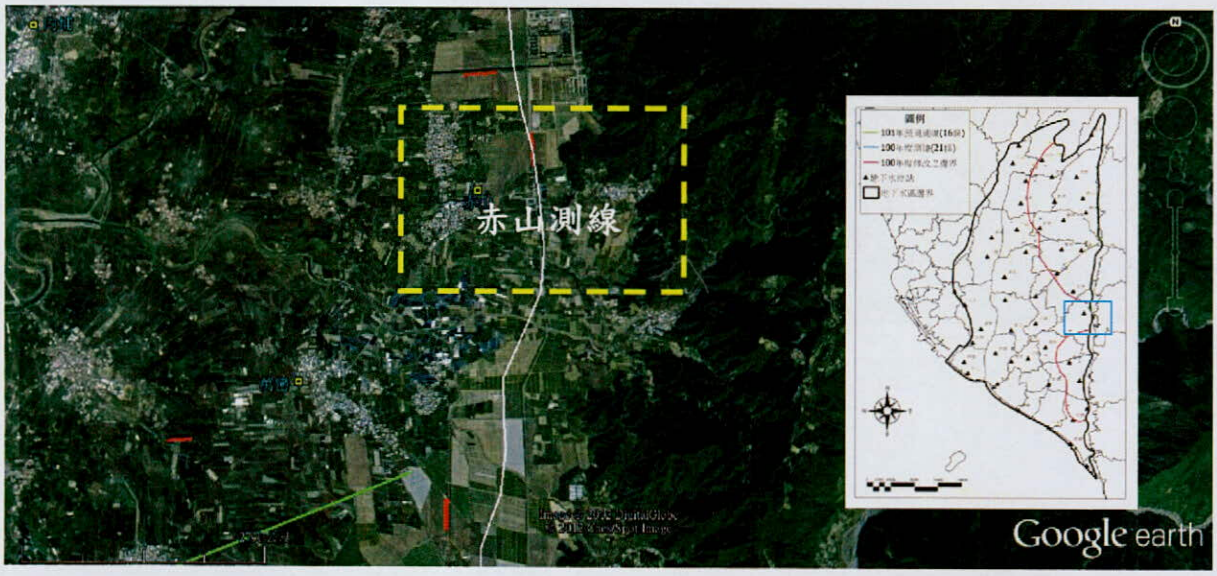


圖 3.1-16 赤山測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

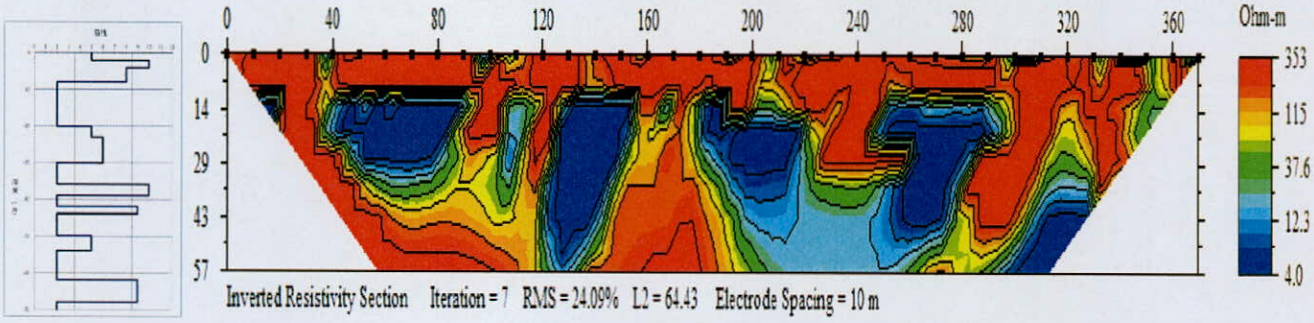


圖 3.1-17 赤山二維地電阻影像剖面與赤山觀測井岩心資料對比結果

老埤觀測井之井下岩心紀錄為礫石夾泥層；而內埔觀測井除在 24-28 公尺處，以及 56-70m 有礫石層外，主要均為砂層。而本次施測之老埤邊界測線，在其二維地電阻反演算影像剖面(如圖 3.1-19)中的 0-20 公尺深處範圍內，出現完整的高電阻率礫石層反應，另外，在本測線 40-80 公尺處的 20-50 公尺深，以及 160-360 公尺處的同樣深度範圍，電阻率值多低於 100 Ohm-m，此一低電阻率構造，與觀測井相比對，可能反應 20-60 公尺深之夾層泥層影響。由於本處與其他標準扇頂礫石層之相當高電阻率的反應迥異，因此應是屬於礫石與泥層夾雜的扇緣地帶中，因此本計畫判斷此一測線位置已處於扇頂補注區之範圍之外。

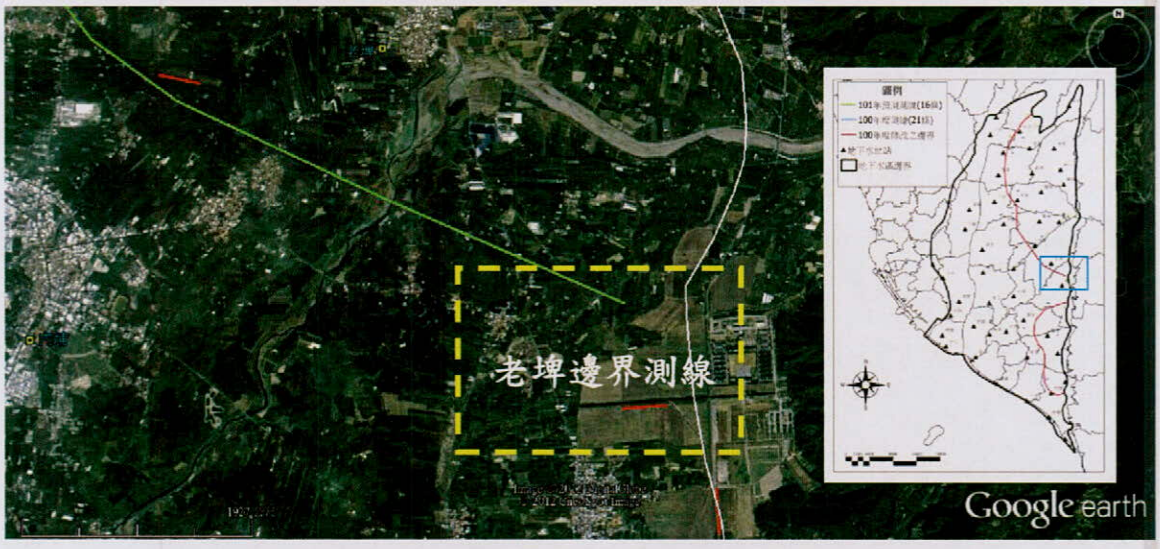


圖 3.1-18 老埤邊界測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

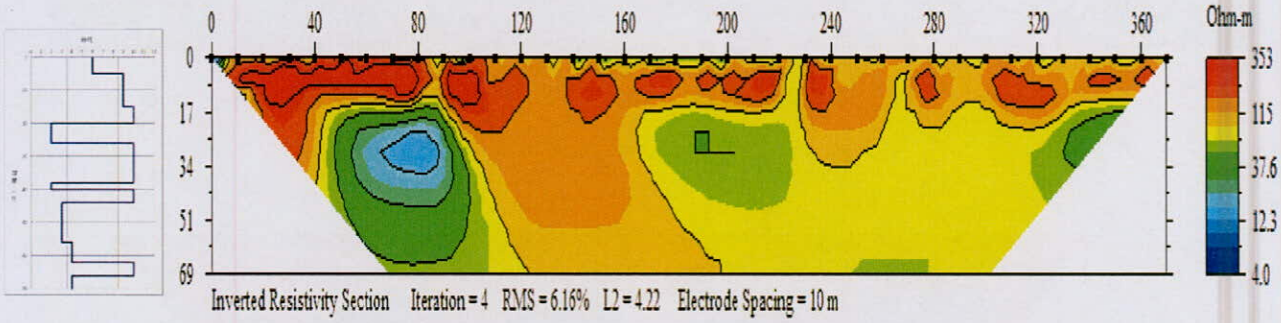


圖 3.1-19 老埤邊界二維地電阻影像剖面與老埤觀測井岩心資料對比結果

依據地表高程變化資料，建興以東至潮州斷層間高層有劇烈變化，由海拔高 50 公尺爬深至 130 公尺以上，屬臺地地形，故在建興觀測井之東北方約 2500 公尺處增加屏科 A 測線(如圖 3.1-20)，以及建興觀測井東側 1300 公尺處增加屏科 B 測線(如圖 3.1-22)。

圖 3.1-20 屏科 A 測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

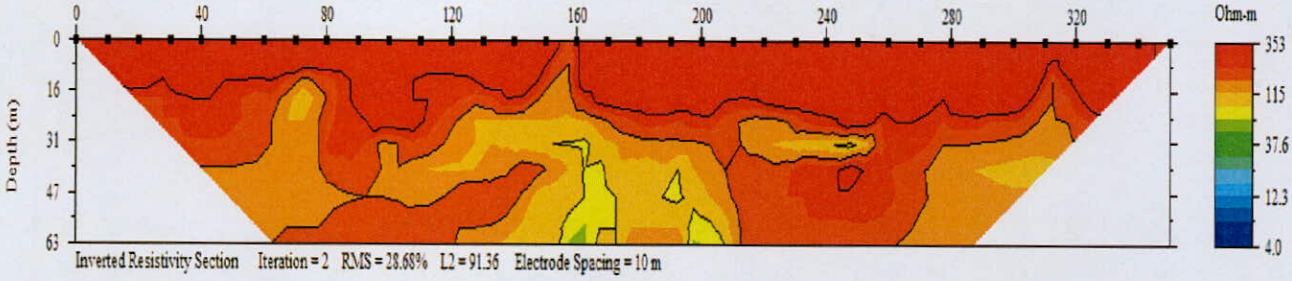


圖 3.1-21 屏科 A 測線二維地電阻影像剖面

圖 3.1-21 顯示屏科 A 側線 360 公尺地電阻影像剖面。整體為高電阻之礫石層分佈。

圖 3.1-22 屏科 B 測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

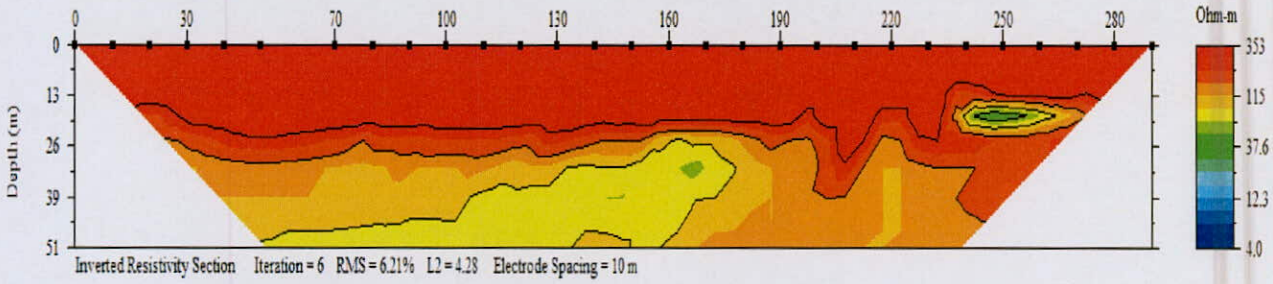


圖 3.1-23 屏科 B 測線二維地電阻影像剖面

由圖 3.1-21 與圖 3.1-23 得知該區域為高電阻值區，但建興觀測井至老埤觀測井之間無良好的施測場地，故依照現有的地電阻影像剖面，屏東平原高電阻區域邊界應過建興觀測井後，往東南至老埤觀測井南方延續至扇頂。

去年度已在吉洋觀測井之南方約 700 公尺處之道路旁量測，所得之 380 公尺地電阻影像剖面比對吉洋觀測井岩心資料所顯示，皆為礫石層。故今年在觀測井西南2000公尺處增加吉洋B測線(如圖3.1-24)。吉洋B測線之地電阻剖面(如圖 3.1-25)可發現，吉洋 B 測線僅在 0-15 公尺深出現高電阻率反應，其餘電阻率均在 40 Ohm-m 左右，依照與岩心比對結果，此測線下之低電阻率層應為低電阻率之難透水層。因此，本計畫判斷屏東平原北區的高電阻區域邊界在本測線與吉洋測線中間之位置。

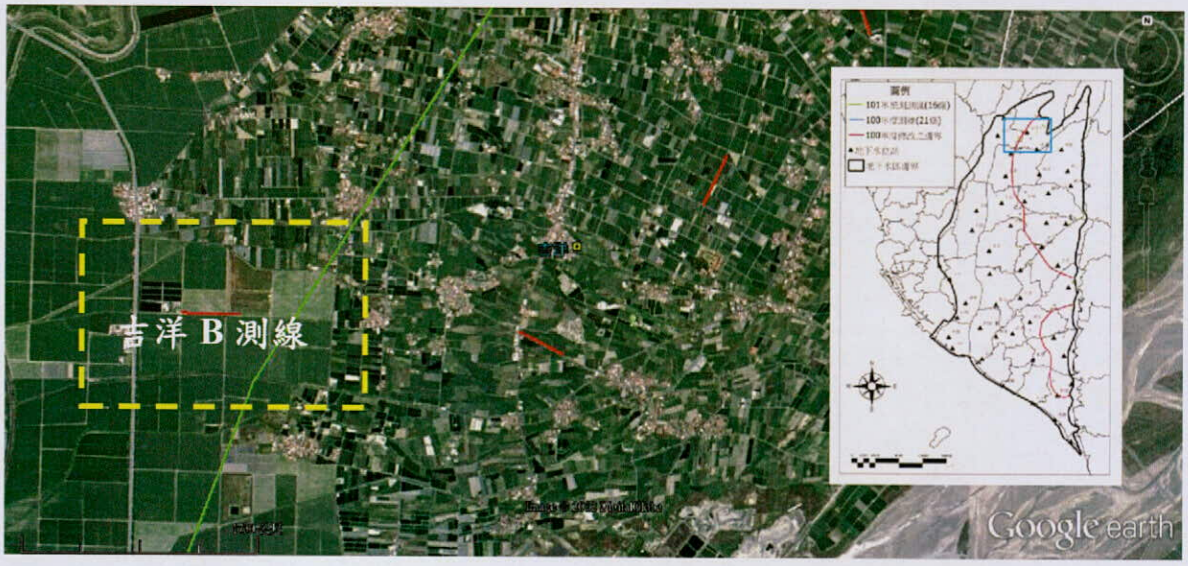


圖 3.1-24 吉洋 B 測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

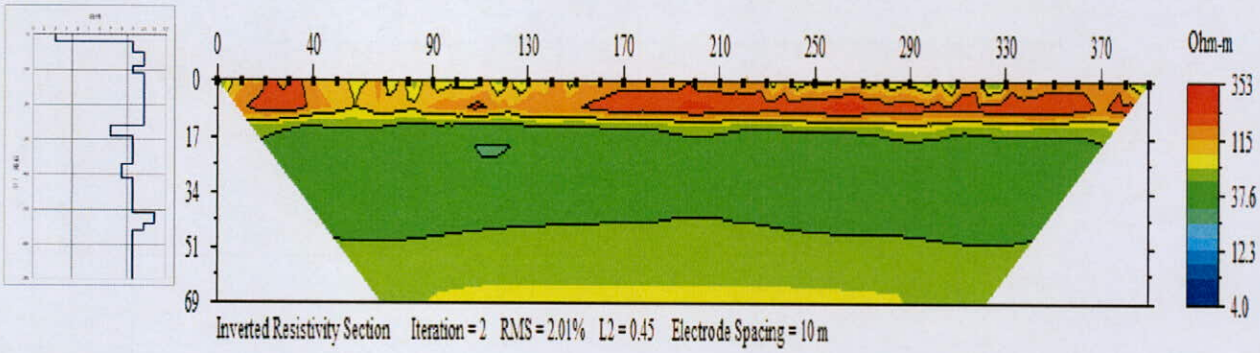


圖 3.1-25 吉洋 B 二維地電阻影像剖面與吉洋觀測井岩心資料對比結果

另外，為求得精準屏東平原北區之高電阻區域邊界，本計畫在吉洋觀測井東北方補充施做兩條地電阻測線，分別為觀測井東北方 1000 公尺處之美濃 A 測線(如圖 3.1-26)、東北方 2700 公尺處之美濃 B 測線(圖 3.1-28)。

圖 3.1-27 顯示美濃 A 測線之 400 公尺地電阻影像剖面與吉洋觀測井岩心資料。比對吉洋觀測井岩心資料所顯示皆為高電阻率之電性地層，研判應為厚層之礫石層分佈。

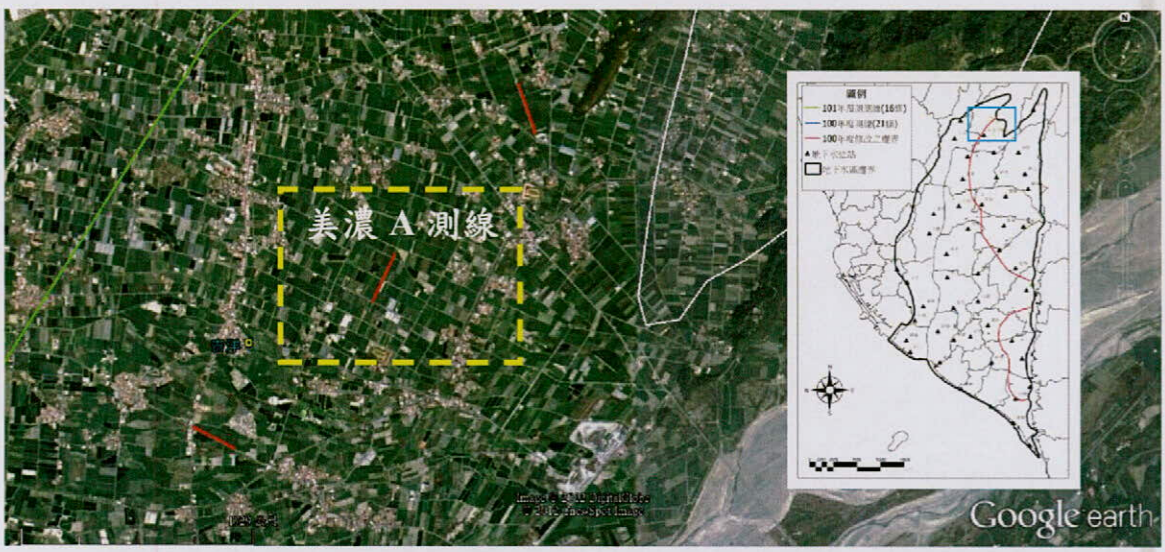


圖 3.1-26 美濃 A 測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

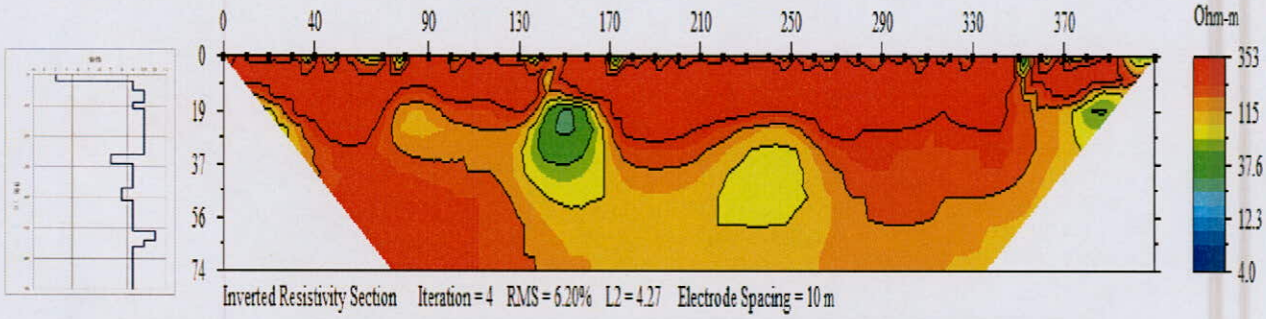


圖 3.1-27 美濃 A 二維地電阻影像剖面與吉洋觀測井岩心資料對比結果

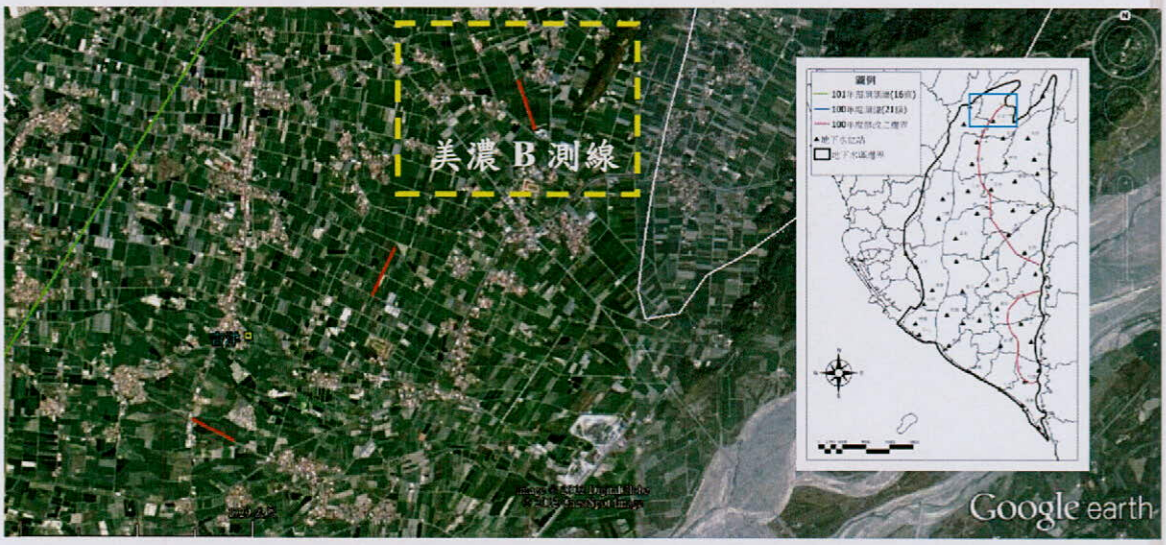


圖 3.1-28 美濃 B 測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

圖 3.1-29 顯示美濃 B 測線之 400 公尺地電阻影像剖面與吉洋觀測井岩心資料。比對吉洋觀測井岩心資料所顯示 40 公尺深仍皆為礫石層分佈，故屏東平原北區高電阻區域邊界在此測線之北側。

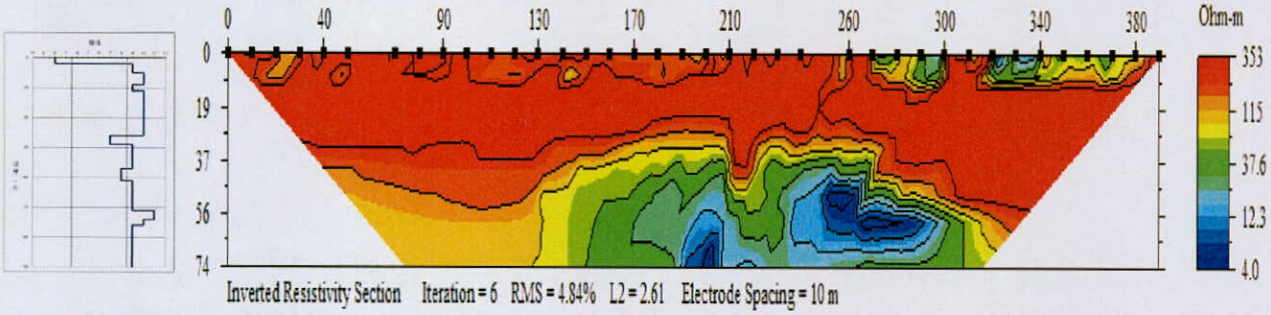


圖 3.1-29 美濃 B 二維地電阻影像剖面與吉洋觀測井岩心資料對比結果

由以上美濃 A 測線及美濃 B 測線得知，屏東平原北區地下水補注區邊界在美濃 B 測線之西北側，故為了得到精準位置，本計畫在吉洋觀測井東北方 3100 公尺處增加美濃 C 測線(如圖 3.1-30)。

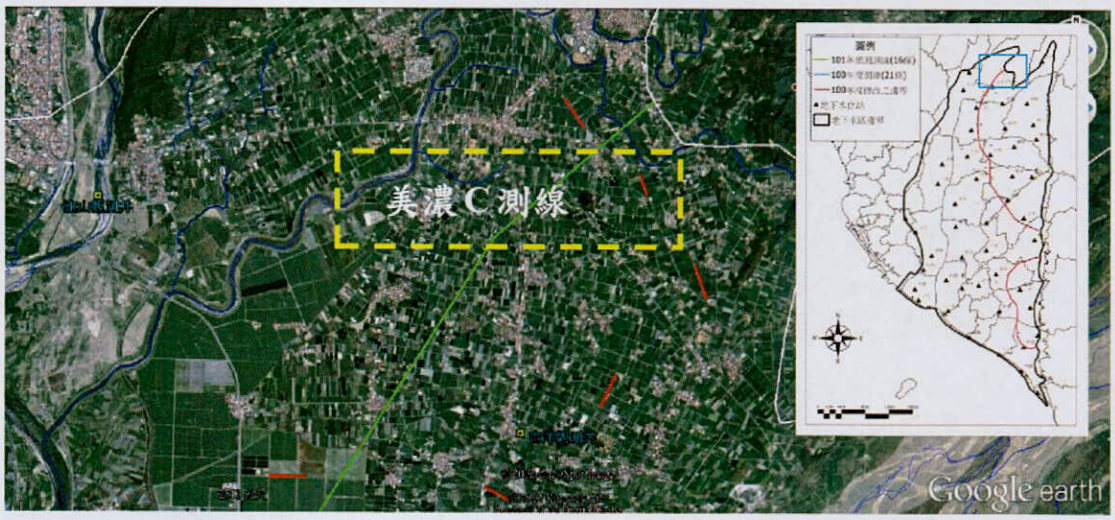


圖 3.1-30 美濃 C 測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

而圖 3.1-31 顯示美濃 C 測線之 280 公尺地電阻影像剖面與吉洋觀測井岩心資料。比對吉洋觀測井岩心資料所顯示仍為 100 Ohm-m 以上高電阻率之電性地層，研判應為厚層之礫石層分佈，故在此測線之西北方 1000 公尺處增加美濃 D 測線(如圖 3.1-32)，期望夾擊出高電阻區域邊界。

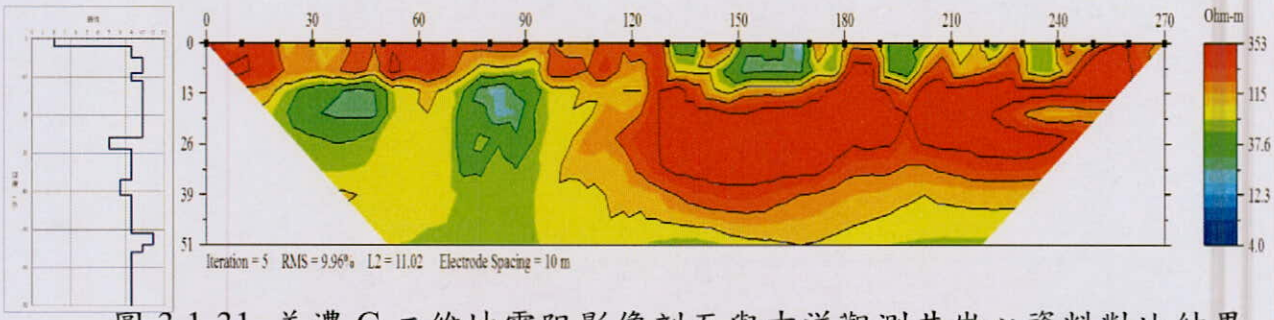


圖 3.1-31 美濃 C 二維地電阻影像剖面與吉洋觀測井岩心資料對比結果

美濃 D 測線之地電阻剖面(如圖 3.1-33)可發現，美濃 D 測線僅在 0-40m 深出現低電阻率反應，依照與岩心比對結果，此測線下之低電阻率層應為低電阻率之難透水層。因此，本計畫判斷屏東平原北區的高電阻區域邊界在美濃 D 測線與美濃 C 測線中間之位置。

圖 3.1-32 美濃 D 測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

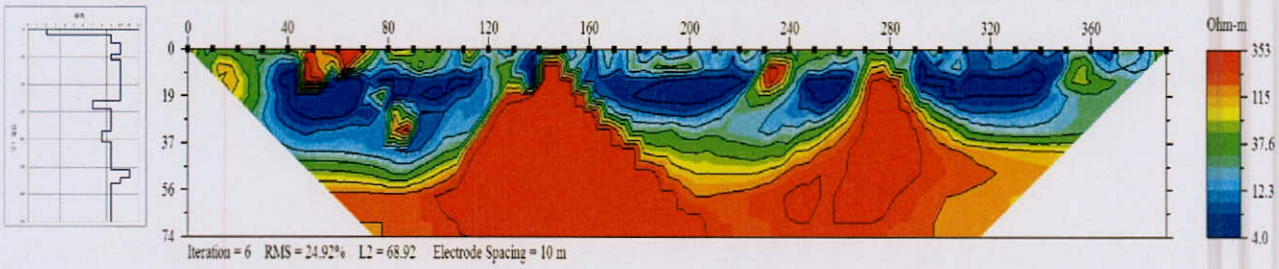


圖 3.1-33 美濃 D 二維地電阻影像剖面與吉洋觀測井岩心資料對比結果

(2) 重點區域地電阻補充調查(三地門橋-關福-瑪家)測線地電阻率剖面與觀測井岩性比對

瑪家觀測井位於瑪家鄉瑪家國中內，考慮實際可測量點位後，在觀測井之西北方 400 公尺處、東北方 1300 公尺處、東北方 2000 公尺處以及東北方 3400 公尺處，分別量測瑪家 A 測線(如圖 3.1-34)、瑪家 B 測線(如圖 3.1-37)、隘寮溪南岸測線(如圖 3.1-40)、隘寮溪北岸測線(如圖 3.1-43)。

而圖 3.1-35 與圖 3.1-36 分別顯示瑪家 A 測線 300 公尺枯水期，以及豐水期之地電阻影像剖面與瑪家觀測井岩心資料。比對瑪家觀測井岩心資料所顯示，全為高電阻值之礫石層，且電阻值遠高於扇尾及扇央，為了瞭解礫石層細部分佈，本計畫將 color_bar 調高至 800 Ohm-m，可明顯看出瑪家 A 測線高電阻值為的細部差異。

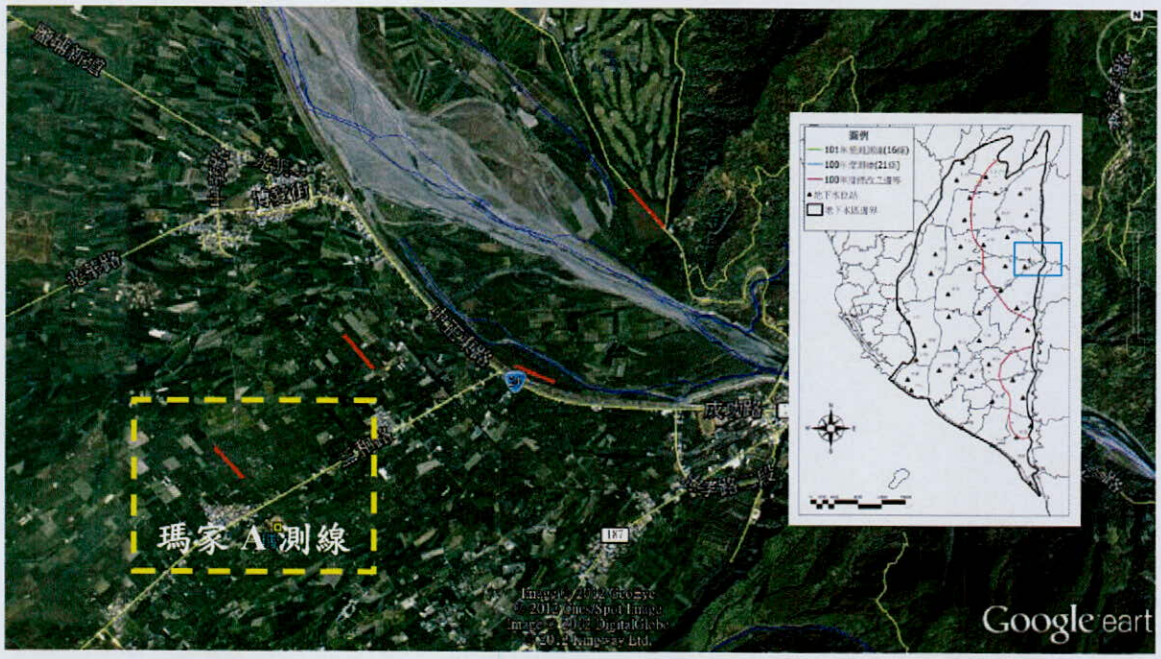


圖 3.1-34 瑪家 A 測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

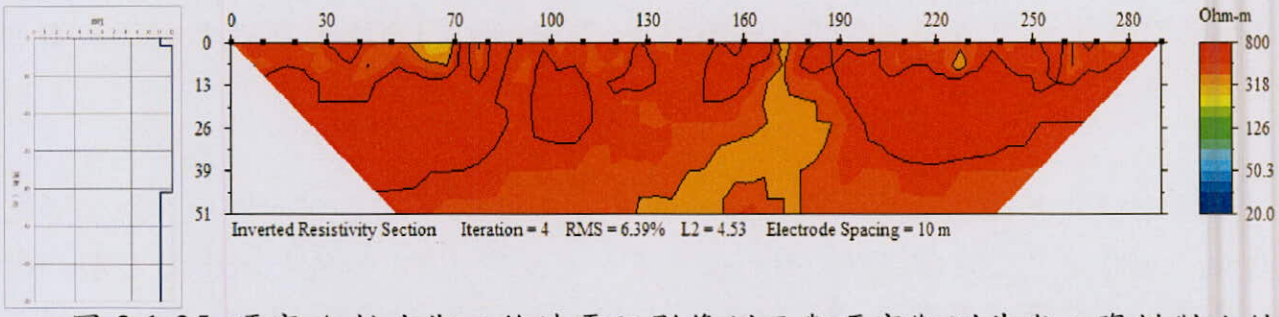


圖 3.1-35 瑪家 A 枯水期二維地電阻影像剖面與瑪家觀測井岩心資料對比結果

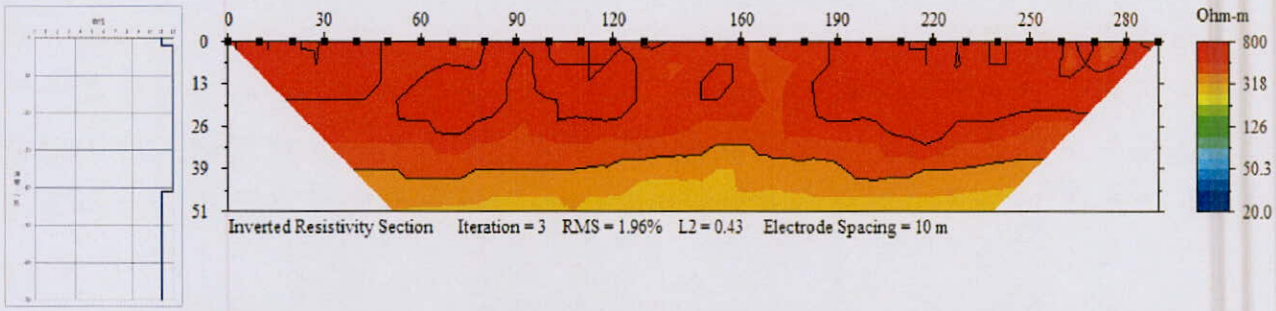


圖 3.1-36 瑪家 A 豐水期二維地電阻影像剖面與瑪家觀測井岩心資料對比結果

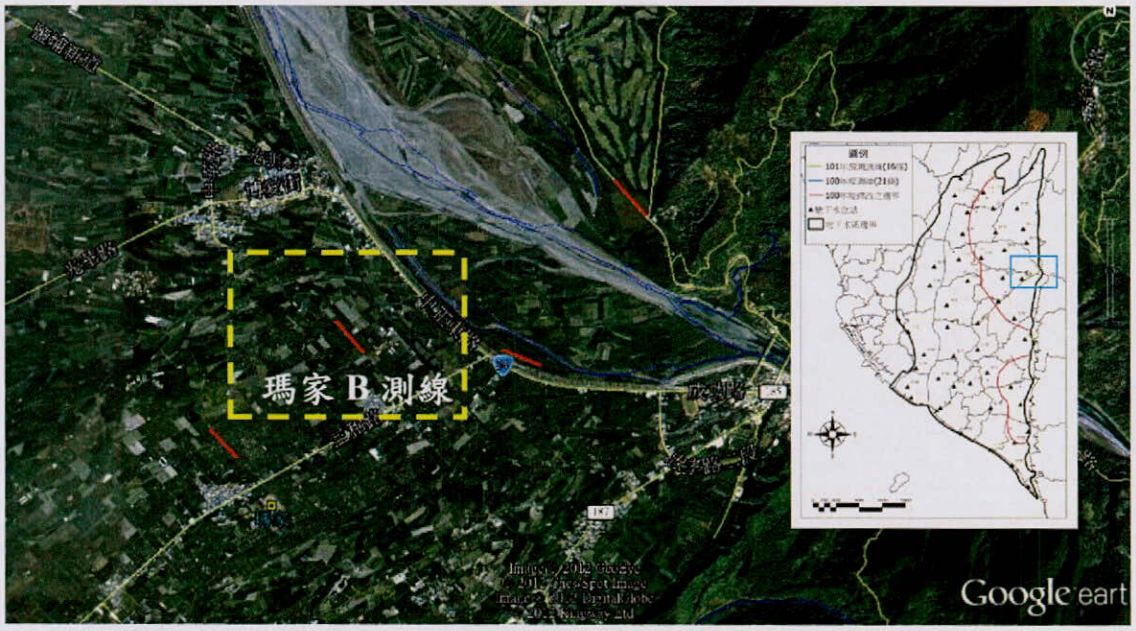


圖 3.1-37 瑪家 B 測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

而圖 3.1-38 與圖 3.1-39 分別顯示瑪家 B 測線 300 公尺枯水期，以及豐水期之地電阻影像剖面與瑪家觀測井岩心資料。與瑪家 A 相同豐水期之較低電阻明顯從 50 公尺深抬升至 40 公尺深，推測為其水位變化所影響。

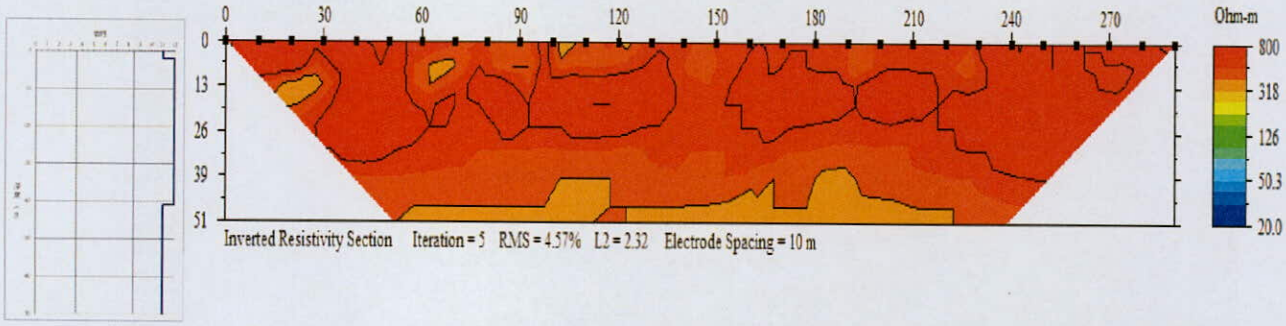


圖 3.1-38 瑪家 B 枯水期二維地電阻影像剖面與瑪家觀測井岩心資料對比結果

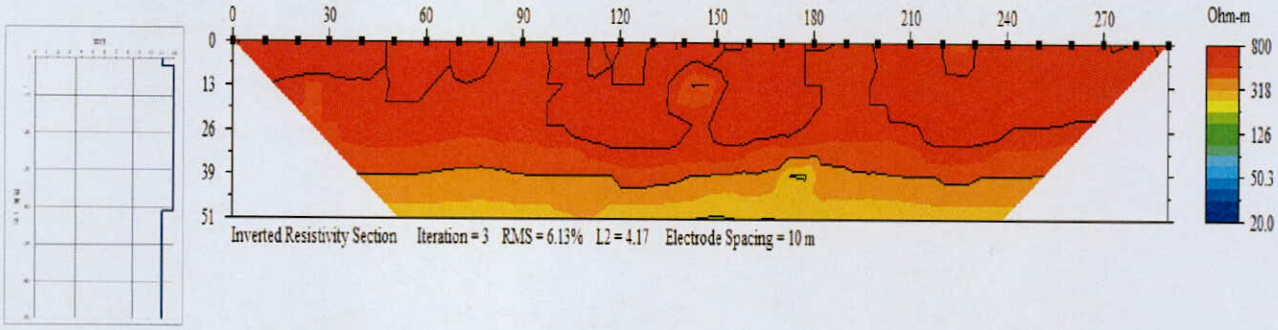


圖 3.1-39 瑪家 B 豐水期二維地電阻影像剖面與瑪家觀測井岩心資料對比結果

另外，欲求得精準斷層附近之水位變化，在隘寮溪南岸之水果園施測一條 300 公尺之測線，圖 3.1-41 與圖 3.1-42 分別顯示隘寮溪南岸測線枯水期，以及豐水期之地電阻影像剖面。與上述兩測線相同，此測線高程較瑪家 B 測線高約 10 公尺，仍看出豐水期之較低電阻明顯從 40 公尺深抬升至 30 公尺深，推測為其水位變化所影響。

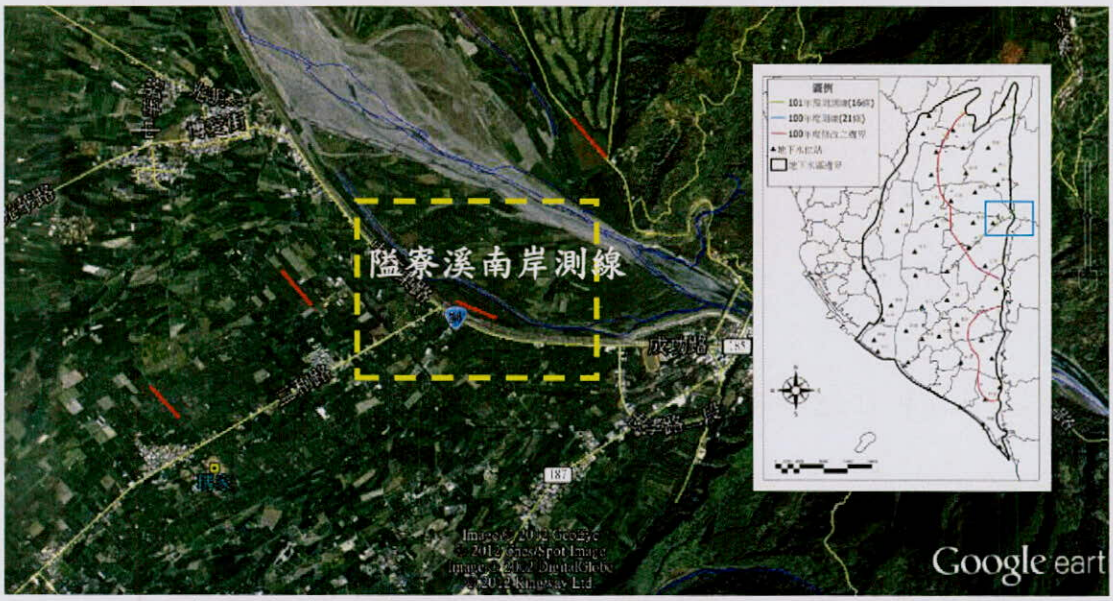


圖 3.1-40 隘寮溪南岸測線之佈設位置圖。施測方式選用 Schlumberger 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

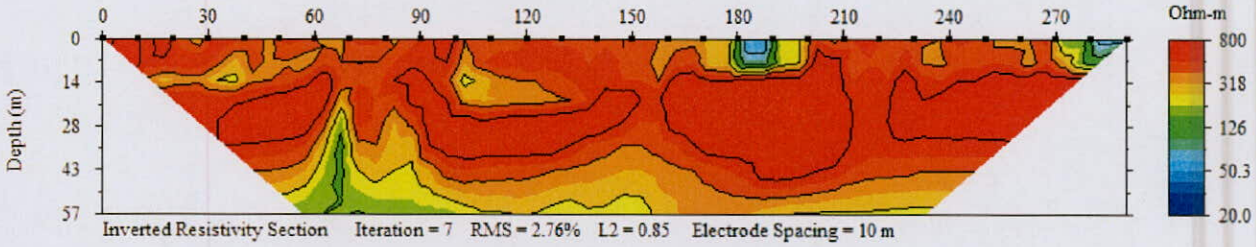


圖 3.1-41 隘寮溪南岸枯水期二維地電阻影像剖面

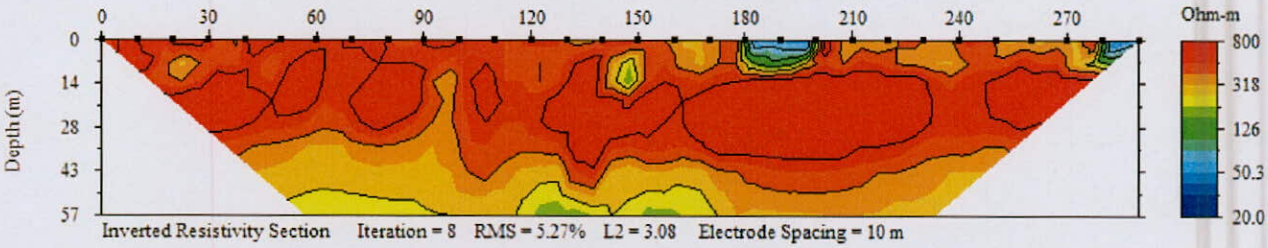


圖 3.1-42 隘寮溪南岸豐水期二維地電阻影像剖面

圖 3.1-44、圖 3.1-45 則顯示隘寮溪北岸之測線，360 公尺之枯水期與豐水期地電阻影像剖面。此測線枯水期剖面東側出現錯動之中高電阻值，本計畫初判為斷層之所造成的現象，但在豐水期再次量測後，推測該區是受礫石組成的差異所影響，不過仍然可看見較低電阻明顯抬升。

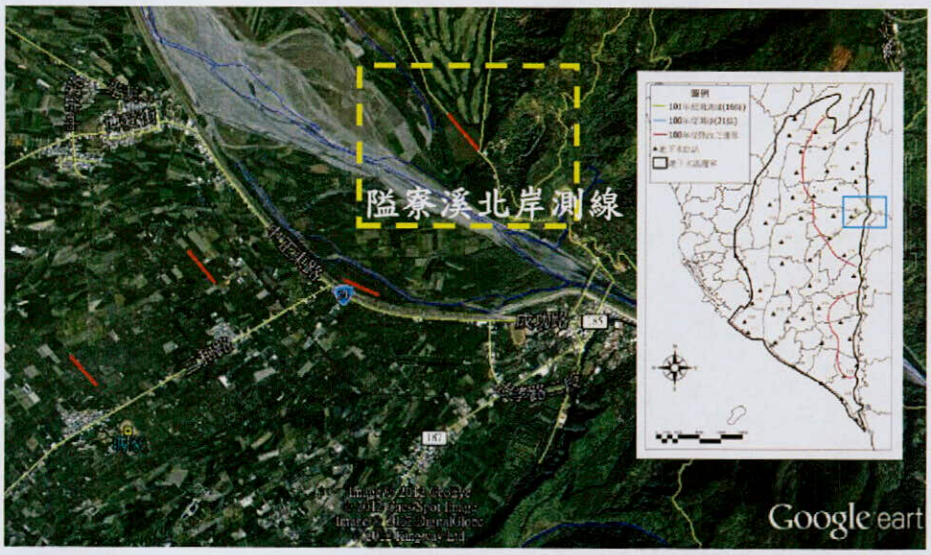


圖 3.1-43 隘寮溪北岸測線之佈設位置圖。施測方式選用 Schlumberger 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

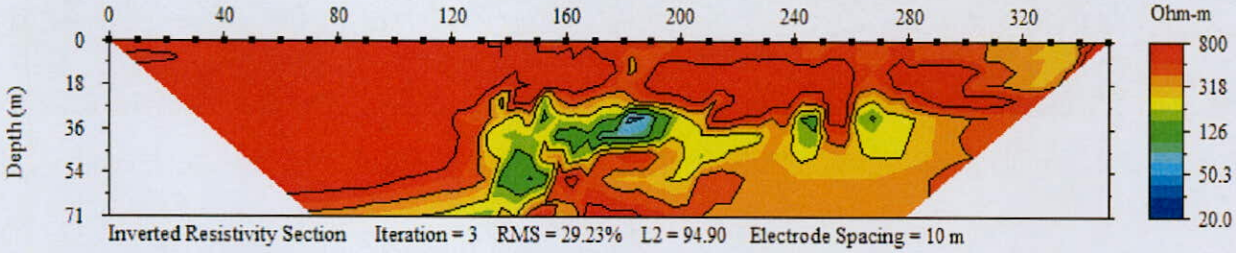


圖 3.1-44 隘寮溪北岸枯水期二維地電阻影像剖面

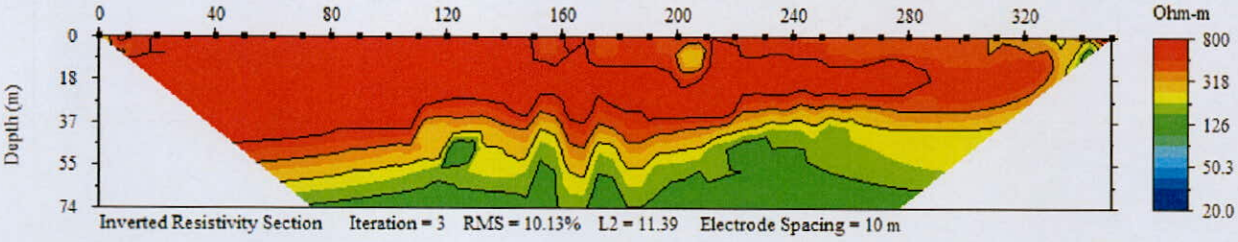


圖 3.1-45 隘寮溪北岸豐水期二維地電阻影像剖面

為了更了解瑪家觀測井之水位變化，豐水期時在瑪家觀測井之西南方 300 公尺處增加瑪家 C 測線，圖 3.1-47 顯示瑪家 C 測線豐水期之地電阻影像剖面與

瑪家觀測井岩心資料。雖此測線無枯水期資料，仍可由剖面看出 20 至 30 公尺深以下出現較低電阻，由瑪家觀測井鑿井之地下水位資料位於 10 公尺深處，與本計畫所測得之剖面相符，故推測此較低電阻為其地下水位面。

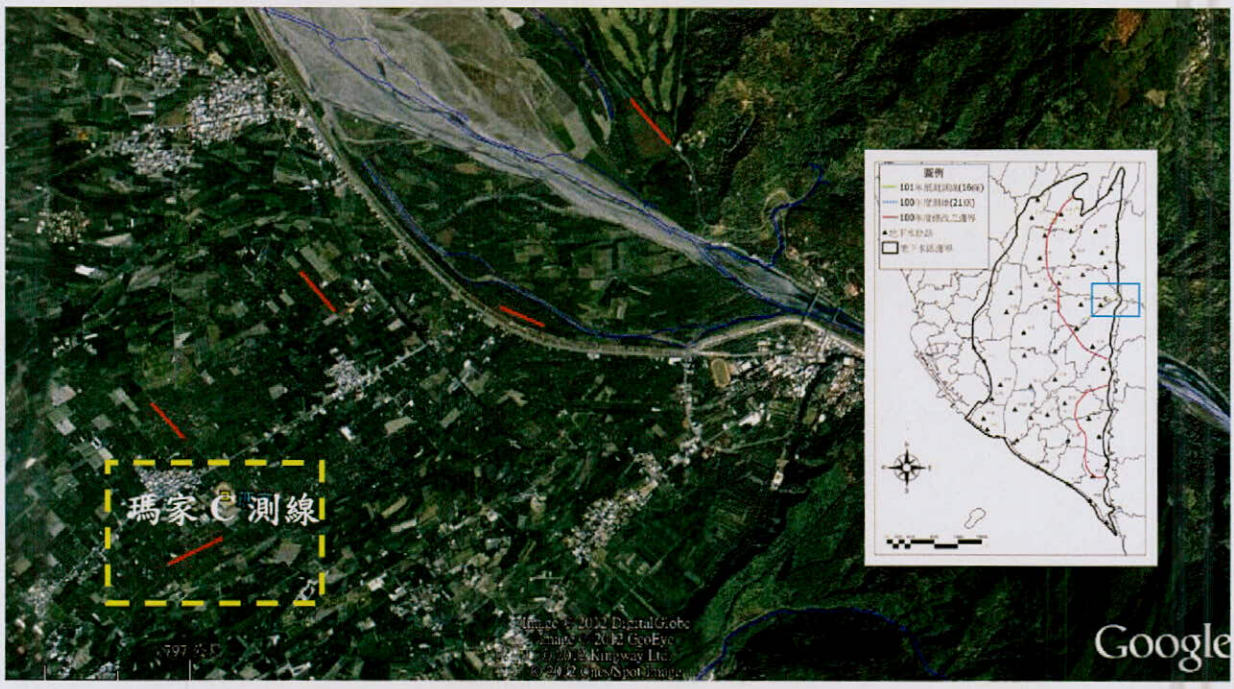


圖 3.1-46 瑪家 C 測線之佈設位置圖。施測方式選用 Wenner 方法。黃色虛線圖框中對應藍色框位置。

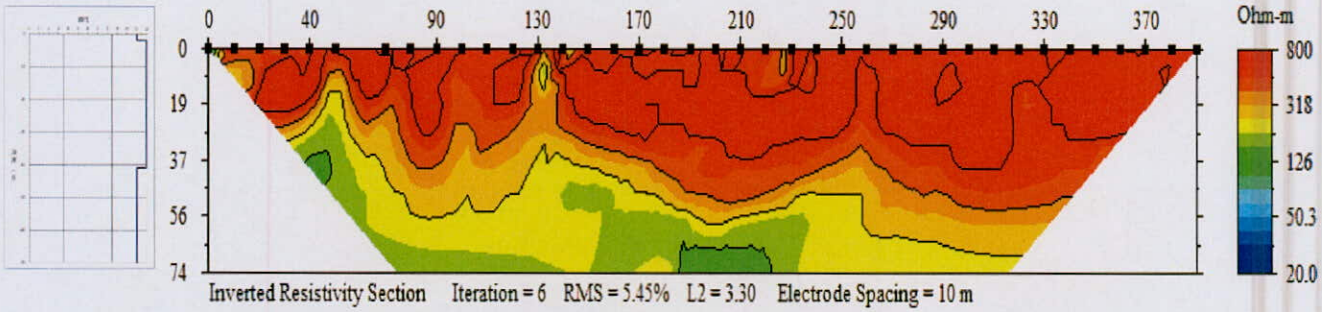


圖 3.1-47 瑪家 C 豐水期二維地電阻影像剖面與瑪家觀測井岩心資料對比結果

3.1.4 一維與二維地電阻資料彙整

工研院曾於 1995 年在屏東平原完成了大範圍的一維地電阻水文地質調查探勘(如圖 3.1-47)，使用施蘭卜吉排列(Schlumberger 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，而根據下列公式計算地層的電阻率 ρ_a。

$\rho_a = K(V/I)$ .....(式 3.1-8)

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。

圖 3.1-48 顯示屏東平原由工研院能源與資源研究所(1995)所作一維地電阻井下探測測點位置分佈。本年度利用二維地電阻剖面資料與鄰近一維電測資料，以及觀測井相關資料進行比對，藉以驗證二維地電阻資料之正確性。

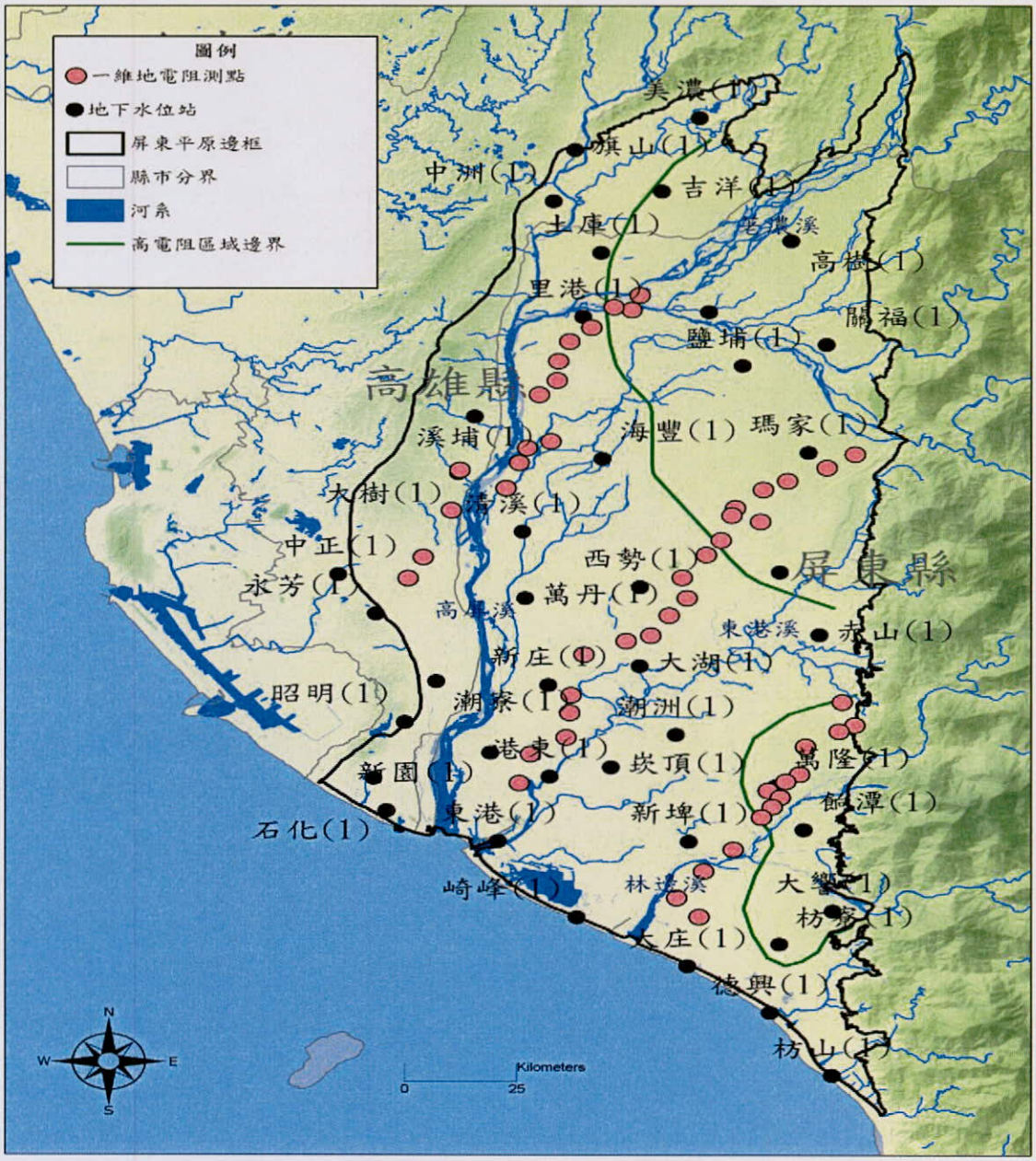


圖 3.1-48 一維地電阻測點位置

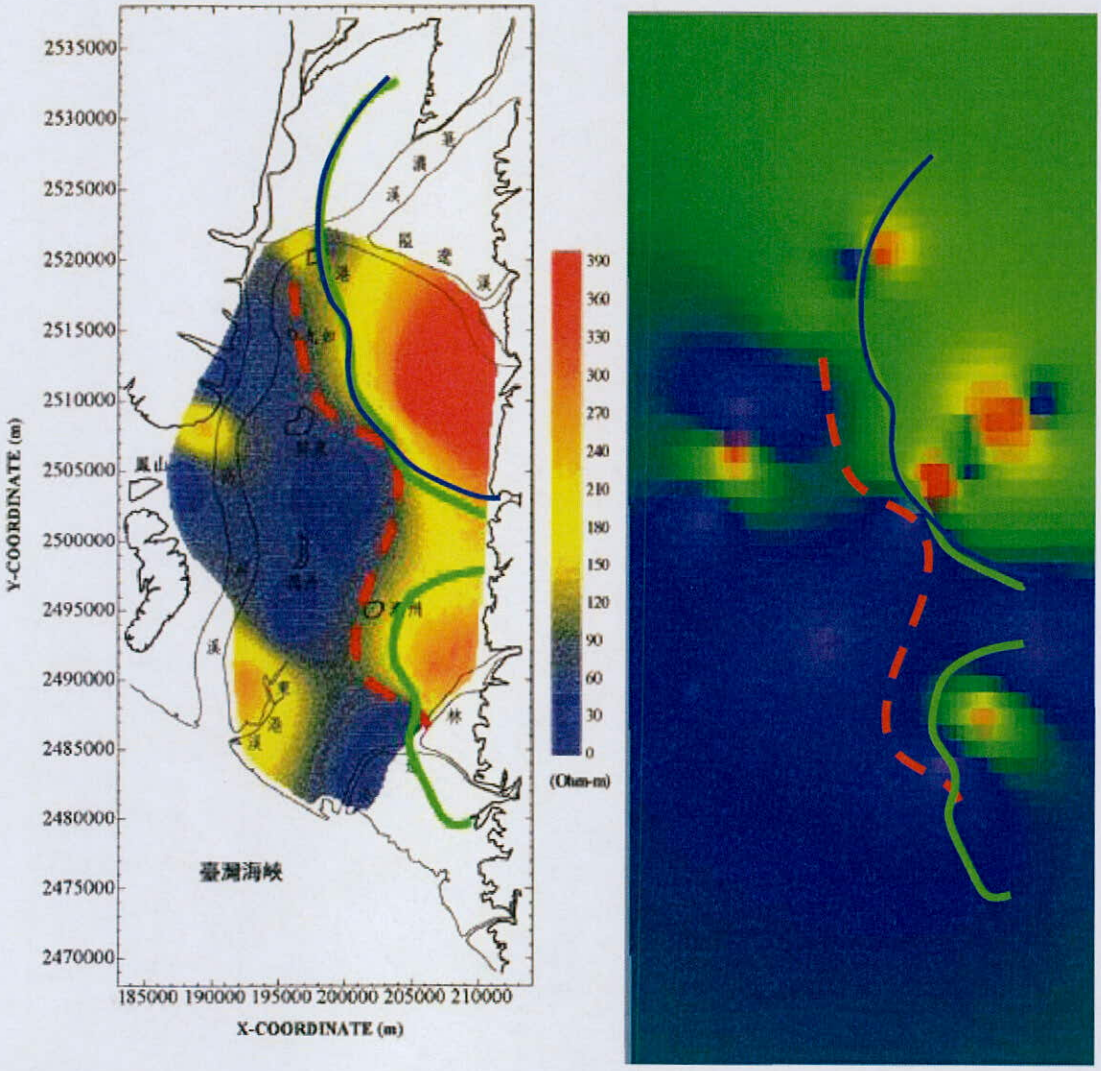


圖3.1-49 一維地電阻半施蘭卜吉(Half-Schlumberger)測深法所獲得之反演資料，左為工研院反演算結果(1995)，右為重新反演結果 (-30公尺)。紅線為100年度之推測邊界，綠線為100年度修改後之邊界，北區藍色線為101年最後研判之高電阻區域邊界。

一維地電阻半施蘭卜吉(Half-Schlumberger)測深法的結果(圖3.1-49)，與屏東平原電阻區域邊界以一維地電阻反演資料深度30公尺比較後，大致吻合，與3D影像也幾近相同(圖3.1-50)。

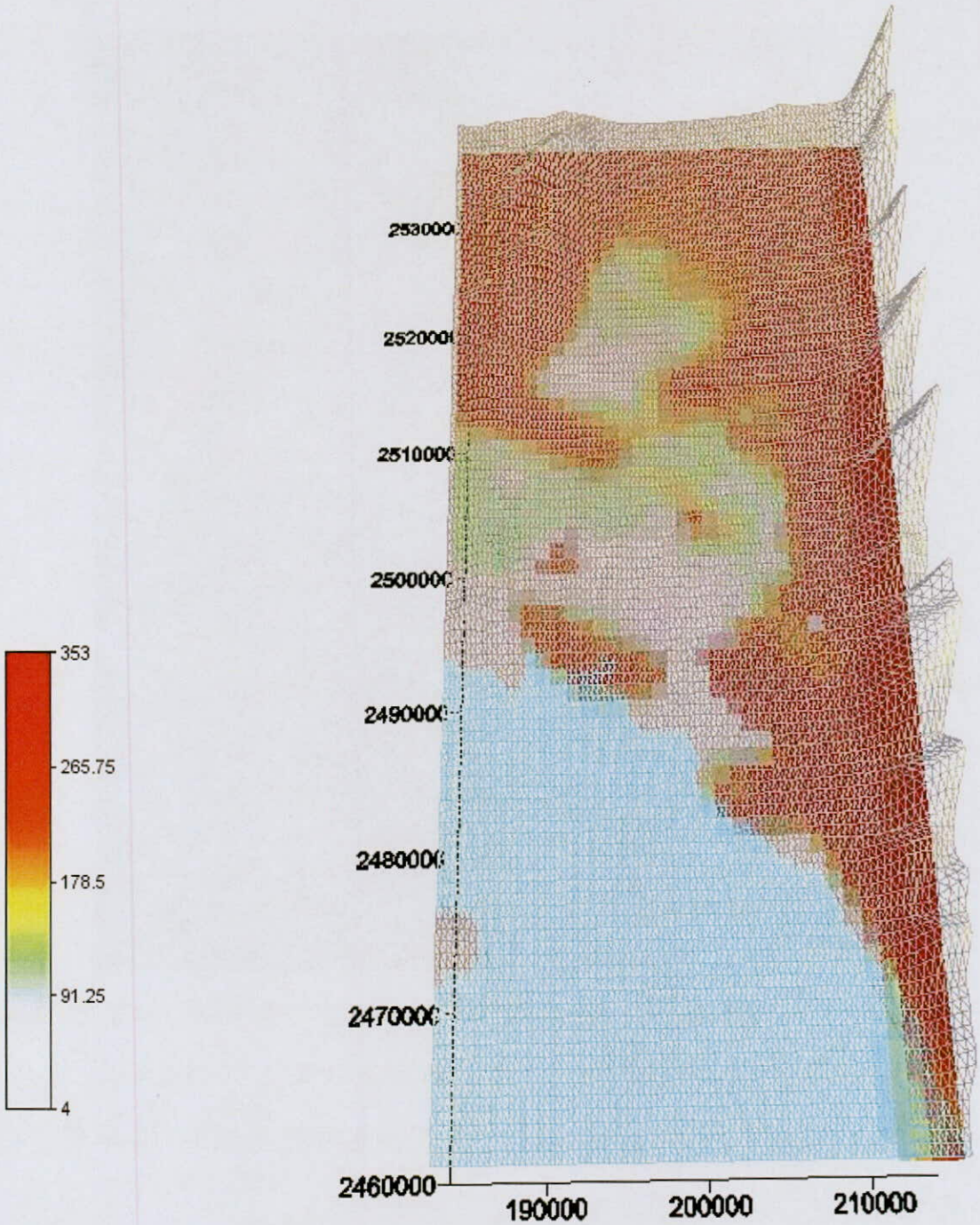


圖 3.1-50 屏東平原電性三維影像。綜合圖 3.1-43 之一維資料以及實際量測之二維影像剖面反演後的電性三維影像。圖中上層的網格線為地形檔，此圖給予實際地表上之地形面貌與地下之電性結構。

3.1.5 應用地電阻於補注區初步分析

比對一維與二維地電阻彙整資料，可發現藉由高解析度(電極間距 10 公尺左右)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，滲透性佳之礫石層，其形狀並非延伸性良好的「單層」水平層，可能為不斷重疊出現或局部尖滅之凸鏡體狀構造。由各處長測線結果來看，高電阻率所代表之礫石層，分布形狀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，大致上可反映地質分佈狀況。也因此印證先前本計畫認為可以利用地電阻剖面影像，描繪阻水層分佈之假設。依照 99 年度工作經驗，本計畫研判補注區與非補注區間，並不存在一個明顯的界線(boundary line)，而是一個漸變的轉換帶。主要特徵是礫石層出現延續性變差，且斷續出現頻率減少之情形。

由於屏東平原為數個發源於東側中央山脈南段之河流，共同沖積而成，與濁水溪沖積扇相比，本區各個沖積扇空間分布之坡度較陡，範圍均較小，也因此礫、砂、泥分佈之幾何型態，不若濁水溪主要沖積扇沉積物之空間分布規律。往往由很粗之礫石堆積物，在很近的距離間，變化成礫泥或砂泥互層之扇央沉積物，因此經由岩心與觀測井資料對比後，本區推測淺部補注區邊界，應位於扇頂之相當高電阻率(>70 Ohm-m)之礫石層，到低電阻率(具有 50-60Ohm-m 以下電阻率)之砂泥或礫泥互層之邊界上。因此本區之高電阻區域邊界，北側始於吉洋觀測井之西側與里港觀測井之東邊，往南至九如觀測井之東側、海豐觀測井東側，向東南延續至建興觀測井西側，最後過建興觀測井後往東南延伸至扇頂；南側則由萬巒觀測井之南側往西南劃，至潮州觀測井之東側後，從萬隆觀測井與新埤觀測井中繼續往南，最後經大響二觀測井之西方至屏東平原最南側(圖 3.1-51)。

圖 3.1-51 屏東平原高電阻區域邊界

3.2 屏東平原扇頂地面水及地下水水質調查分析

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)。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)，台灣目前雖已有地質法在做地下水區的保育工作，仍需極需進行此基礎調查研究。

為了配合地下水補注潛勢研究，增加補注計算及補注區劃定的精度，本項工作補調查扇頂補注區的水質，探討水質地化背景，瞭解補注區的地下水來源、地化特性、時空之演變及其機制，以提供地下水水質保護區劃定的重要參考。本計畫於 100 年調查屏東之北部荖濃溪及隘寮溪扇頂及邊界地區(圖 3-2-1)；101 年著重調查屏東平原之南部—林邊溪及力力溪扇頂至扇尾地區。

大區域的地下水常有氧化還原帶的分布。缺氧的水體受微生物還原作用，原有之溶氧消耗盡後，因能量多寡，依次會將硝酸鹽、硫酸鹽等還原為氮氣及硫離子，還原反應由溶氧還原至甲烷生成依次發生。地下水由補注區到受壓含水層，水中物質會因空氣被地層隔絕，沿流徑之地層沉積物中有機質因長時間降解(放出電子)，消耗許多有氧物質(例如溶氧)，故含水層由上游往下游，產生還原帶(Chapelle, 2001)，例如溶氧還原帶、硝酸鹽還原帶、鐵還原帶、硫酸根還原帶、甲烷生成帶等(圖 3-2-2)。

區域性大範圍的地下水質調查，可以依此分類各還原帶。以濁水溪地區為例：扇頂為地下水補注區，地下水中含溶氧及硝酸鹽，基本上氨及硫離子濃度很微量。扇中及扇尾進入受壓水層，不含溶氧，氨及硫離子濃度升高。進入最扇尾(雲林沿海地區)有些觀測井已可測到甲烷氣。本計畫之工作項目之一，即調查地下水之溶氧及硝酸鹽濃度，以釐清溶氧帶及硝酸鹽還原帶之分布位置，以供地下水補注區及保護區劃設之參考。

屏東地區地層以多個沖積扇組成，標高由東向西降低，扇頂處以厚層礫石層為主，分別向西、西北、西南扇狀展開，地層向西砂、泥層厚度漸厚，層次漸多。地下水的流向，基本受到沖積扇地層控制，流向有兩個主要分量，由東向西(沖積扇)及由北向南(由陸至海)，合成區域流向為由東北向西南流。

屏東地區的水文地質概況如(圖 3-2-3), 該剖面由東北向西南, 顯示深度約 250 公尺內的地質概況(經濟部中央地質調查所,1997)。東北部地層(萬隆)分層較不明顯, 主要的阻水層(泥層)可能只有一至二層, 地下水上下流通限制較少。西南部地層(港東至林園)分層明顯, 大致有二層主要的阻水層(泥層), 地下水上下流通已受限制。若以深度作為分層參考，第一含水層的深度約在 0-60m, 第二含水層的深度約在 60-120m, 第三含水層的深度約在 120-250m, 第三含水層又可分為兩段, 但需注意, 不同含水層分層深度隨區域而變。

由前期研究可知，屏東平原之地下水導分布如圖 3-2-4 所示，全區之導電度約 137~50400 μS/cm，靠山區的地下水水質較淡，靠海側的地下水部分已經鹽化，如東港、崎峰等。屏東地區地下水的硝態氮濃度分布如圖 3-2-5 所示，也以補注區的地下水中最高。若以 0.5 mg/L 為界, 顯示第一含水層的分布最廣, 達平原的 1/2 面積, 往第二含水層分布面積仍可達 1/3, 至第三含水層分布較局限，只有在隘寮溪及林邊溪兩沖積扇的扇頂部份。根據地下水工程處的調查(1961)，本區 40 年前地下水的硝態氮濃度約在 0.2mg/L 以下。近年高濃度的硝酸態氮，可能源自農田化肥、生活污水及畜牧廢水。

本計畫在計畫成果說明主要包含八個部份：(1)了解地下水之氧化還原帶，以協助補注區之判斷；(2)瞭解扇頂水質地化特性；(3)瞭解地面水之水質；(4)地下水導電度現況及歷年變化趨勢；(5)導電度垂向剖面；(6)地下水硝酸鹽濃度現況及歷年變化趨勢。(7)沿海地下水鹽化；(8)地下水之氨態氮分布。前 6 項為原提出之研究題目，後 2 項為期初審查委員所建議。

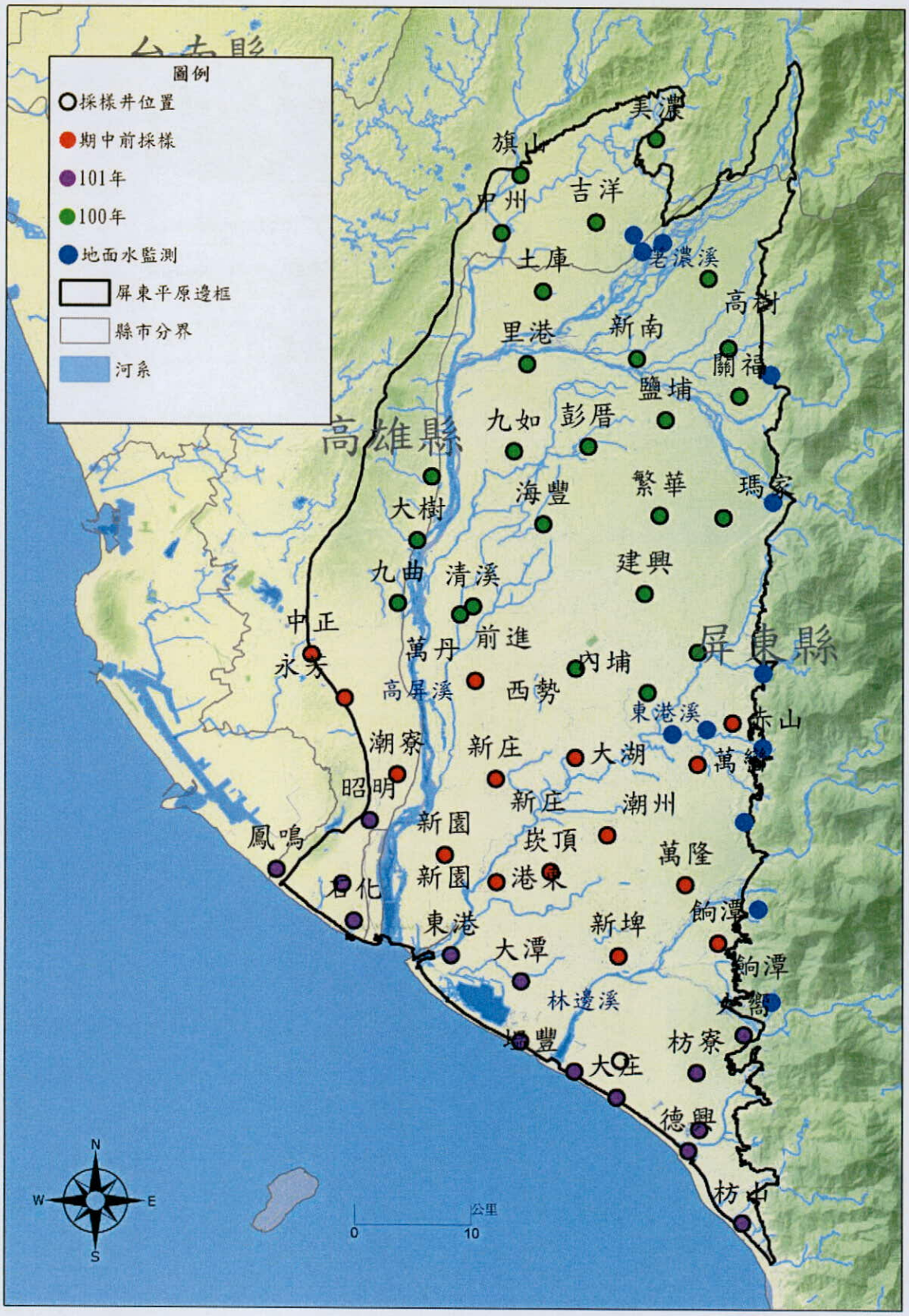


圖 3.2-1 研究區域及採樣井位置

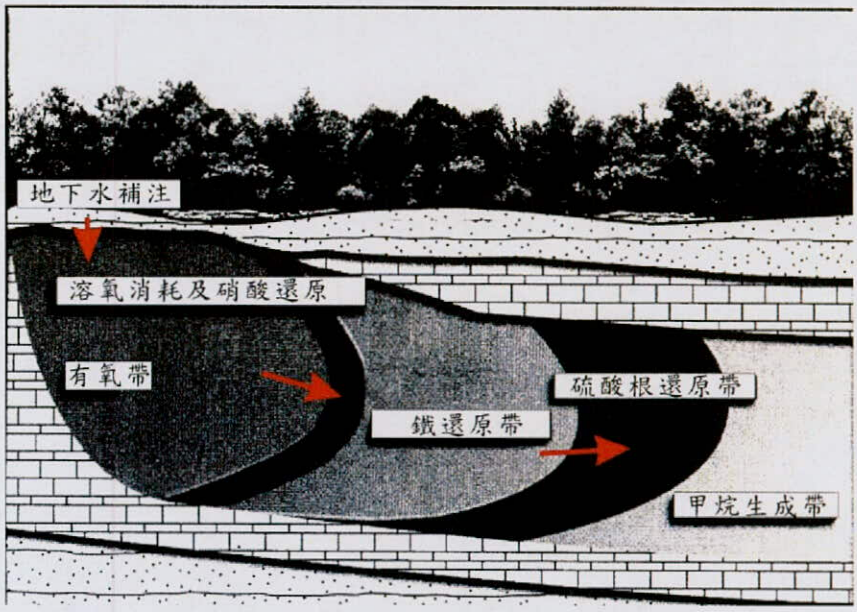


圖 3.2-2 地下水還原系列示意圖(Chapelle,2001)

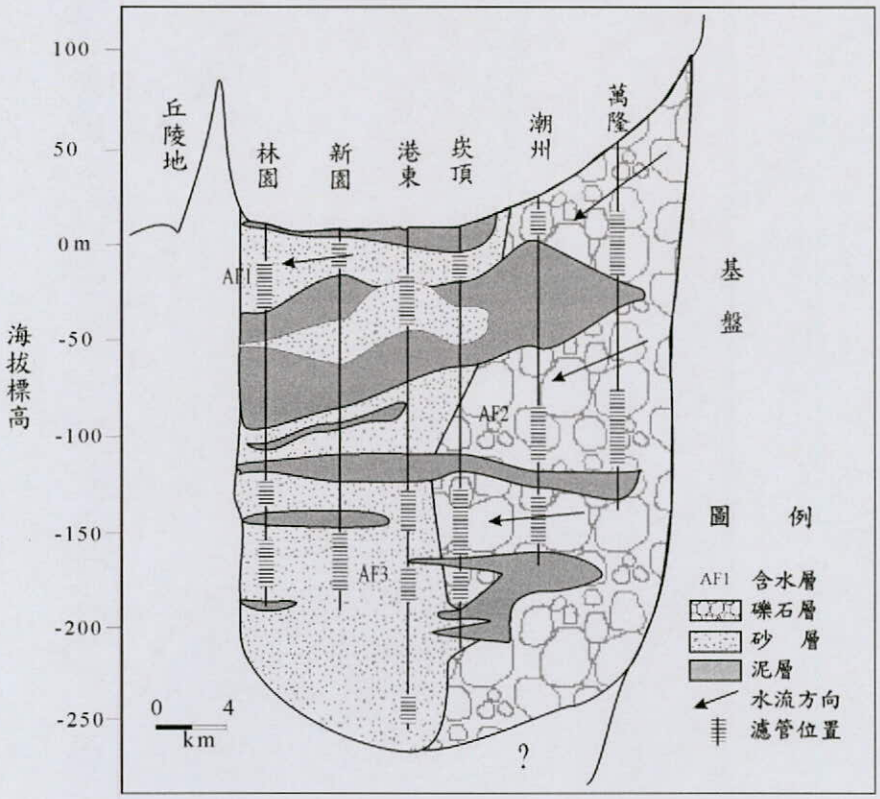


圖 3.2-3 水文地質剖面

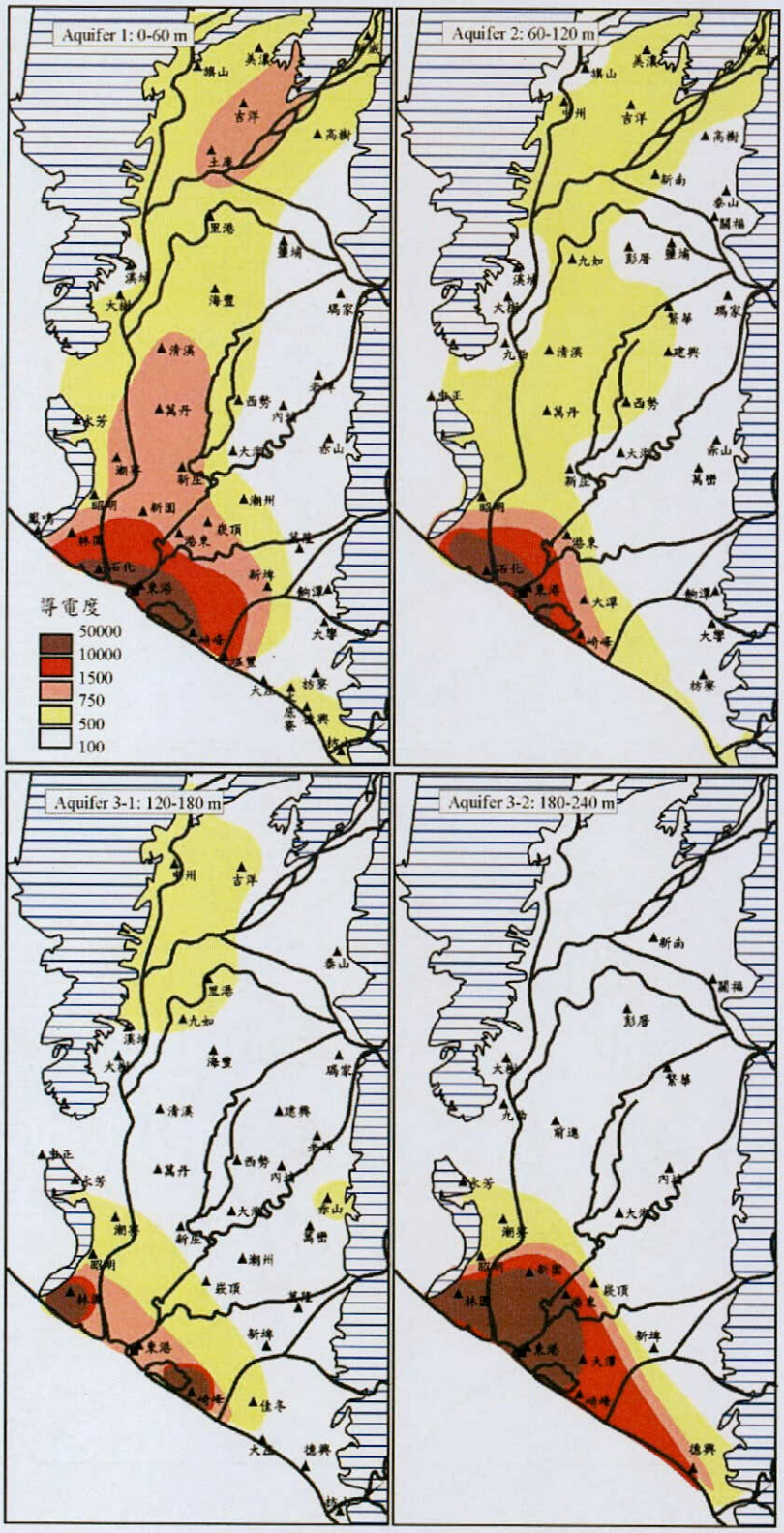


圖 3.2-4 地下水導電度分布圖(2001 年)

(資料來源：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。)

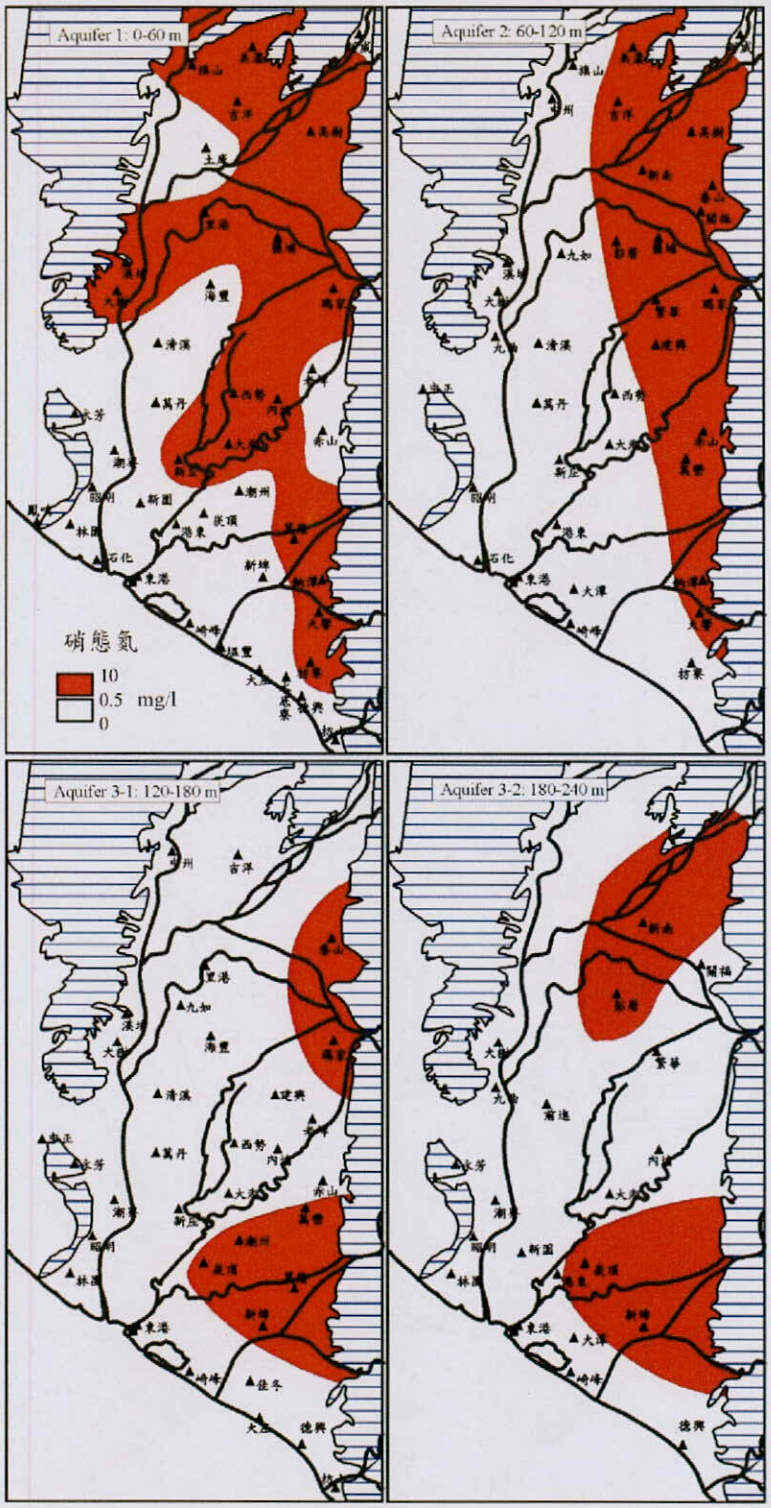


圖 3.2-5 地下水硝態氮濃度分布圖(2001 年)

(資料來源：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。)

3.2.1 研究方法與步驟

地下水採樣與化驗：研究方法為文獻資料收集、統計分析、地下水水質採樣分析、地面水水質採樣分析及水質地化理論探討等。本計畫的採樣點，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，1995，1999，2002；台糖公司地下水中心，1999-2004)。為了瞭解補注區及其邊界的水質變化，預計由北往南進行地下水採樣－第一次為 101 年 4-5 月採樣林邊溪地區 15 站共 30 口井(表 3-2-1 及表 3-2-2)，12 處地面水(每個沖積扇各 3 點、4 個沖積扇共 12 點)，共 42 個水樣(圖 3-2-1)。第二次為 101 年 9-10 月力力溪沖積扇及沿海地區。

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、氧化還原電位等。使用美國 Hydrolab 水質測棒，經校正後放入井內濾水管深度量測(圖 3-2-6)。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 3-2-3)。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 3-2-4)。

圖 3.2-6 美國 Hydrolab 水質測棒

表 3.2-1 屏東地區之地下水觀測站

編號	年度	縣市	站名	住址
1	84	屏東市	清溪	屏東市清溪里建國路 291 號 (省第七河川局)
2	85	屏東市	海豐	屏東市海豐里海豐街 3 號(海豐國小)
3	87	屏東市	前進	屏東市台糖屏東總廠六塊厝農場(農場內)
4	78	屏東縣	塭豐	屏東縣佳冬鄉塭豐海堤邊側
5	78	屏東縣	水底寮	屏東縣枋寮水底寮天時村
6	79	屏東縣	土庫	屏東縣里港鄉土庫村(三和國小)
7	84	屏東縣	里港	屏東縣里港鄉過江村過江路 41 號 (里港國小)
8	84	屏東縣	瑪家	屏東縣瑪家鄉三和村三和巷 16 號 (瑪家國中)
9	84	屏東縣	建興	屏東縣內埔鄉建興村建興路 216 號 (榮華國小)
10	84	屏東縣	西勢	屏東縣竹圍鄉西勢村光明路 8 號 (西勢國小)
11	84	屏東縣	新庄	屏東縣萬丹鄉新庄村 43 號 (新庄國小)
12	84	屏東縣	新園	屏東縣新園鄉媽祖路 49 號 (新園國小)
13	84	屏東縣	萬巒	屏東縣萬巒鄉佳佐村佳佐路 59 號 (佳佐國小)
14	84	屏東縣	新埤	屏東縣新埤鄉新埤村新華路 165 號 (新埤國小)
15	84	屏東縣	萬隆	屏東縣新埤鄉萬隆村中山路 26 號 (萬隆國小)
16	84	屏東縣	大潭	屏東縣東港鎮大潭里大潭路 93 號 (大潭國小)
17	84	屏東縣	崎峰	屏東縣林邊鄉崎峰村裕後路 2 號 (崎峰國小)
18	85	屏東縣	高樹	屏東縣高樹鄉高樹村華光路 32 號(高樹國小)
19	85	屏東縣	泰山	屏東縣高樹鄉泰山村產業路 225 號(高泰國中)
20	85	屏東縣	鹽埔	屏東縣鹽埔鄉鹽南村光復路 90 號(鹽埔國小)
21	85	屏東縣	九如	九如鄉東寧村九如路二段 226 號(九如國小)
22	85	屏東縣	萬丹	屏東縣萬丹鄉社皮村 73 號(社皮國小)
23	85	屏東縣	老埤	屏東縣內埔鄉老埤村壽比路 116 號(泰安國小)
24	85	屏東縣	內埔	屏東縣內埔鄉內埔村廣濟路 2 號(內埔國小)
25	85	屏東縣	潮洲	屏東縣潮洲鎮光春里光春路 311 號(光春國小)
26	85	屏東縣	崁頂	屏東縣崁頂鄉崁頂村中正路 119 號(崁頂國小)
27	85	屏東縣	大響	屏東縣新埤鄉新力路 830 號(臺糖大響營農場)
28	85	屏東縣	枋寮	枋寮鄉太源村太源路 36 號(東海國小太源分校)
29	85	屏東縣	枋山	屏東縣枋山鄉加祿村會社 28 號(加祿國小)
30	85	屏東縣	東港	東港鎮興東里中正路一段 10 號(東港國小)
31	85	屏東縣	大庄	屏東縣枋寮鄉大庄村下寮遊樂區(海鷗公園)
32	87	屏東縣	赤山	屏東縣萬巒鄉赤山村建興路 40 號(赤山國小)
33	87	屏東縣	德興	屏東縣枋寮鄉枋寮村德興路 197 號(德興國小)
34	87	屏東縣	新南	屏東縣高樹鄉新南村興店路 5 號(新南國小)

表 3.2-1 屏東地區之地下水觀測站(續)

編號	年度	縣市	站名	住址
35	87	屏東縣	彭厝	屏東縣鹽埔鄉洛陽村七份路 21 號(彭厝國小)
36	87	屏東縣	大湖	屏東縣竹田鄉泗洲村洲中路 40 號(大湖國小)
37	87	屏東縣	關福	屏東縣高樹鄉廣福村中央路 60 號(關福國小)
38	87	屏東縣	餉潭	屏東縣新埤鄉南州糖廠興華農場(農場內)
39	87	屏東縣	繁華	屏東縣長治鄉繁華村水源路 96 號(繁華國小)
40	87	屏東縣	港東	屏東縣崁頂鄉復興路 96 號(港東國小)
41	79	高雄縣	石化	林園鄉仙尾村石化三路(林園石化工業區)
42	79	高雄縣	吉洋	美濃鎮吉東里(高雄農田水利會吉洋工作站)
43	84	高雄縣	溪埔	高雄縣大樹鄉溪埔村 23 號 (溪埔國小)
44	84	高雄縣	九曲	高雄縣大樹鄉九曲村九曲路 15 號 (九曲國小)
45	84	高雄縣	林園	高雄縣林園鄉林園村忠孝西路 20 號 (林園國小)
46	85	高雄縣	中州	高雄縣旗山鎮中洲里(堤防樁 1K+100)
47	85	高雄縣	永芳	高雄縣大寮鄉永芳村鳳林三路 499 號(永芳國小)
48	85	高雄縣	潮寮	高雄縣大寮鄉潮寮路 61 號(潮寮國中)
49	85	高雄縣	美濃	高雄縣美濃鎮東門里民族路 36 巷 2 號(東門國小)
50	87	高雄縣	旗山	高雄縣旗山鎮旗山糖廠(糖廠內)
51	87	高雄縣	新威	高雄縣六龜鄉新興村新威路 212 號(新威國小)
52	87	高雄縣	中正	高雄縣鳳山市勝利路 2 號(中正國小)
53	87	高雄縣	大樹	高雄縣大樹鄉中興南路新立巷 2 號(大樹國小)
54	87	高雄縣	吉洋	高雄縣美濃鎮吉東里(水利會吉洋工作站)
55	87	高雄縣	鳳鳴	高雄縣小港區鳳鳴路 191 號(鳳鳴國小)
56	87	高雄縣	昭明	高雄縣大寮鄉鳳林一路 300 巷 80 號(昭明國小)

表 3.2-2 研究採樣之觀測井

編號	井號	站名	濾水管		靜水位	X	Y	Z	分層
			起點 m	終點 m	m	m	m	m	
1	13250111	枋山(1)	3	36	6.17	210142	2470440	6.89	1
2	13160411	德興(1)	6	18	4.27	207000	2474613	3.58	1
3	13160421	德興(2)	111	126	19.78	207000	2474613	3.58	3-1
4	13160431	德興(3)	162	174	9.78	207000	2474613	3.58	3-2
5	131613T1	水底寮	28	70	3.57	207650	2475845	7.96	1
6	13160311	大庄(1)	28	40	11.50	202810	2477706	2.90	1
7	13160321	大庄(2)	151	193	14.91	202810	2477706	2.9	3-1
8	13160211	枋寮(1)	40	94	36.11	207476	2479160	31.52	1
9	13160221	枋寮(2)	111	135	34.70	207476	2479160	31.52	2
10	132113T1	塭豐	31	52	10.38	200355	2479195	2.690	1
11	13190111	崎峰(1)	14	26	4.43	197199	2480945	3.47	1
12	13190121	崎峰(2)	51	72	12.17	197199	2480945	3.47	2
13	13190131	崎峰(3)	114	132	10.43	197199	2480945	3.47	3-1
14	13190141	崎峰(4)	181	202	4.68	197199	2480945	3.47	3-2
15	132151	佳冬(4)	156	180	3.97	203012	2479839	7.223	3-1
16	13150311	大響(1)	47	65	41.78	210206	2481360	44.87	1
17	13150321	大響(2)	92	110	41.41	210206	2481360	44.87	2
18	13030111	大潭(1)	48	60	6.75	197221	2484469	3.42	2
19	13030121	大潭(2)	161	188	2.10	197221	2484469	3.42	3-2
20	13030211	東港(1)	9	18	2.64	193156	2485971	3.00	1
21	13030221	東港(2)	72	84	4.99	193156	2485971	3.00	2
22	13030231	東港(3)	126	138	4.03	193156	2485971	3.00	3-1
23	13030241	東港(4)	165	195	5.36	193156	2485971	3.00	3-2
24	12020111	石化(1)	12	47	4.19	187485	2487965	3.99	1
25	12020121	石化(2)	74	104	4.19	187485	2487965	3.99	2
26	13180211	港東(1)	30	48	4.45	195798	2490241	4.37	1
27	13180221	港東(2)	123	141	5.60	195798	2490241	4.37	2
28	13180231	港東(3)	168	186	6.40	195798	2490241	4.37	3-2
29	13180241	港東(4)	240	264	6.73	195798	2490241	4.37	4
30	13170111	新園(1)	6	24	8.92	192774	2491800	5.98	1
31	13170121	新園(2)	165	189	9.13	192774	2491800	5.98	3-2
32	1202011	林園(1)	24	42	4.39	186809	2490130	5.04	1
33	1202021	林園(2)	114	138	3.13	186809	2490130	5.04	3-1

表 3.2-2 研究採樣之觀測井(續)

編號	井號	站名	濾水管		靜水位	X	Y	Z	分層
			起點 m	終點 m	m	m	m	m	
34	1202031	林園(3)	168	192	3.42	186809	2490130	5.04	3-2
35	12030311	昭明(1)	22	34	2.43	188414	2493802	8.91	1
36	12030321	昭明(2)	108	132	1.45	188414	2493802	8.91	2
37	12030331	昭明(3)	174	192	1.59	188414	2493802	8.91	3-1
38	12030341	昭明(4)	216	228	1.98	188414	2493802	8.91	3-2
39	64110111	鳳鳴(1)	24	48	9.60	182982	2490949	10.56	1
40	12030111	潮寮(1)	6	21	8.02	190004	2496500	9.02	1
41	12030121	潮寮(2)	110	140	8.02	190004	2496500	9.02	3-1
42	12030131	潮寮(3)	182	194	8.57	190004	2496500	9.02	3-2
43	12030211	永芳(1)	38	56	10.67	186942	2500950	18.56	1
44	12030221	永芳(2)	133	145	22.52	186942	2500950	18.56	3-1
45	12030231	永芳(3)	190	214	23.08	186942	2500950	18.56	3-2
46	12010111	中正(1)	27	45	9.85	185015	2503504	16.34	2
47	12010121	中正(2)	89	113	20.58	185015	2503504	16.34	3-1
48	13050111	新庄(1)	9	36	5.67	195738	2496246	10.67	1
49	13050121	新庄(2)	67	73	6.77	195738	2496246	10.67	2
50	13050131	新庄(3)	96	126	6.88	195738	2496246	10.67	3-1
51	13180111	崁頂(1)	18	30	6.35	198929	2490845	9.26	1
52	13180121	崁頂(2)	142	166	1.70	198929	2490845	9.26	3-1
53	13180131	崁頂(3)	186	198	1.46	198929	2490845	9.26	3-2
54	13020111	潮州(1)	12	24	4.91	202232	2492984	16.66	1
55	13020121	潮州(2)	118	184	6.45	202232	2492984	16.66	3-1
56	13150111	新埤(1)	12	24	3.47	202895	2485957	12.28	1
57	13150121	新埤(2)	122	146	11.78	202895	2485957	12.28	3-1
58	13150131	新埤(3)	165	177	4.85	202895	2485957	12.28	3-1
59	13150141	新埤(4)	193	205	10.58	202895	2485957	12.28	3-2
60	13150211	萬隆(1)	44	66	27.10	206802	2490112	44.78	1
61	13150221	萬隆(2)	144	168	18.60	206802	2490112	44.78	3-1
62	13120111	萬巒(1)	66	90	11.01	207502	2497136	29.32	2
63	13120121	萬巒(2)	124	136	14.62	207502	2497136	29.32	3-1
64	13120211	赤山(1)	33	45	3.15	209521	2499542	27.03	1
65	13120221	赤山(2)	84	96	3.52	209521	2499542	27.03	2
66	13120231	赤山(3)	158	191	0.19	209521	2499542	27.03	3-1

表 3.2-2 研究採樣之觀測井(續)

編號	井號	站名	濾水管		靜水位	X	Y	Z	分層
			起點 m	終點 m	m	m	m	m	
67	13140211	大湖(1)	15	27	4.92	200368	2497500	11.09	1
68	13140221	大湖(2)	61	73	0.00	200368	2497500	11.09	2
69	13140231	大湖(3)	132	162	-1.15	200368	2497500	11.09	3-1
70	13140241	大湖(4)	208	217	-3.46	200368	2497500	11.09	3-2
71	13150411	餉潭(1)	24	60	19.13	208707	2486714	37.33	1
72	13150421	餉潭(2)	84	96	16.65	208707	2486714	37.33	2
73	13050211	萬丹(1)	18	36	9.22	194540	2501970	16.73	1
74	13050221	萬丹(2)	66	90	9.59	194540	2501970	16.73	2
75	13050231	萬丹(3)	132	174	10.07	194540	2501970	16.73	3-1
76	13010111	清溪(1)	9	21	5.53	194408	2506330	19.65	1
77	13010121	清溪(2)	66	90	5.42	194408	2506330	19.65	2
78	13010131	清溪(3)	174	198	8.05	194408	2506330	19.65	3-1
79	13010311	前進(4)	235	247	5.24	193652	2505845	18.25	3-2
80	12040211	九曲(1)	99	114	23.03	190015	2506507	27.01	2
81	12040221	九曲(2)	186	198	16.65	190015	2506507	27.01	3-2
82	12040311	大樹(1)	18	36	13.46	191135	2510159	23.82	1
83	12040321	大樹(2)	84	108	14.11	191135	2510159	23.82	2
84	12040331	大樹(3)	141	168	12.23	191135	2510159	23.82	3-1
85	12040341	大樹(4)	226	244	7.89	191135	2510159	23.82	3-2
86	12040111	溪埔(1)	15	33	11.85	191978	2513893	29.14	1
87	12040121	溪埔(2)	68	80	2.55	191978	2513893	29.18	2
88	12040131	溪埔(3)	120	144	-10.70	191978	2513893	29.18	3-1
89	13130211	內埔(1)	94	142	3.87	204588	2501296	22.92	3-1
90	13130221	內埔(2)	187	199	-1.00	204588	2501296	22.92	3-2
91	13140111	西勢(1)	15	33	3.29	200397	2502704	17.97	1
92	13140121	西勢(2)	46	52	3.50	200397	2502704	17.97	2
93	13140131	西勢(3)	67	73	1.91	200397	2502704	17.97	2
94	13140141	西勢(4)	109	148	1.40	200397	2502704	17.97	3-1
95	13130311	老埤(1)	24	42	10.34	207504	2503670	35.15	1
96	13130321	老埤(2)	124	154	8.64	207504	2503670	35.15	3-1
97	13130111	建興(1)	42	72	9.58	204395	2507086	36.98	2
98	13130121	建興(2)	118	142	9.21	204395	2507086	36.98	3-1
99	13060111	繁華(1)	70	94	23.68	205264	2511656	44.22	2

表 3.2-2 研究採樣之觀測井(續)

編號	井號	站名	濾水管		靜水位	X	Y	Z	分層
			起點 m	終點 m	m	m	m	m	
100	13060121	繁華(2)	216	246	23.39	205264	2511656	44.22	3-2
101	13280111	瑪家(1)	42	72	42.30	208976	2511539	81.75	1
102	13280121	瑪家(2)	116	134	40.47	208976	2511539	81.75	2
103	13280131	瑪家(3)	174	192	38.26	208976	2511539	81.75	3-1
104	13010211	海豐(1)	14	26	4.56	198476	2511130	33.34	1
105	13010221	海豐(2)	108	144	1.51	198476	2511130	33.34	3-1
106	13010231	海豐(3)	187	202	5.82	198476	2511130	33.34	3-1
107	13080111	九如(1)	64	106	7.82	196776	2515370	34.62	2
108	13080121	九如(2)	180	204	13.21	196776	2515370	34.62	3-1
109	13100211	彭厝(1)	83	107	3.08	201104	2515658	35.61	2
110	13100221	彭厝(2)	192	204	2.07	201104	2515658	35.61	3-2
111	13100111	鹽埔(1)	24	42	15.16	205622	2517240	58.10	1
112	13100121	鹽埔(2)	106	160	15.59	205622	2517240	58.10	2
113	13090211	里港(1)	33	36	9.18	197514	2520447	38.41	1
114	13090221	里港(2)	144	174	10.87	197514	2520447	38.41	3-1
115	13110411	關福(1)	48	72	12.97	209883	2518620	75.06	2
116	13110421	關福(2)	162	186	14.21	209883	2518620	75.06	3-2
117	13110311	新南(1)	86	110	7.89	203915	2520763	52.69	2
118	13110321	新南(2)	220	238	8.00	203915	2520763	52.69	3-2
119	13110111	高樹(1)	48	72	36.74	208068	2525407	87.62	1
120	13010121	高樹(2)	114	138	35.21	208068	2525407	87.62	2
121	13110211	泰山(1)	62	104	13.86	209266	2521392	67.25	2
122	13110221	泰山(2)	165	189	18.36	209266	2521392	67.25	3-1
123	13090111	土庫	10	46	2.28	198425	2524645	40.93	1
124	12200111	吉洋	10	35	4.98	201510	2528640	54.10	1
125	12200311	吉洋(1)	90	120	14.07	200032	2529333	54.53	2
126	12200321	吉洋(2)	192	216	12.20	200032	2529333	54.53	3-1
127	12190111	中州(1)	60	114	7.63	195993	2528009	39.44	2
128	12190121	中州(2)	174	204	7.55	195993	2528009	39.44	3-1
129	12200211	美濃(1)	30	36	3.88	205000	2533450	54.03	1
130	12200221	美濃(2)	52	70	3.98	205000	2533450	54.03	2
131	12190211	旗山(1)	8	20	10.26	197100	2531368	43.8	1
132	12190221	旗山(2)	62	92	12.10	197100	2531368	43.8	2

表 3.2-3 檢驗方法與儀器偵測極限

	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：發光光度計法	APHA(19th) 3500-Na D	0.50	mg/l
12	K：發光光度計法	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 3.2-4 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. 導電度 (at25℃) EC	μS/cm	-----	-----	750
6. 總溶解固體 TDS	mg/L	-----	500	-----
7. 鈣 Ca	mg/L	-----	-----	-----
8. 鎂 Mg	mg/l	-----	-----	-----
9. 硬度 Hard	mg/L	-----	-----	-----
10. 鉀 K	mg/L	-----	-----	-----
11. 鈉 Na	mg/L	-----	-----	-----
12. 總鹼度 Alk.	mg/L	-----	-----	-----
13. 氯鹽 Cl^-	mg/L	-----	250	175
14. 硫酸根 SO_4^{-2}	mg/L	-----	250	200
15. 硝酸鹽氮 NO_3^--N	mg/L	-----	10.0	-----

*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

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)、加上本計畫所檢驗的數據，以探討水質之時間演變。

本計畫在水質之趨勢分析上，使用 Mann-Kendall 法(Kendall, 1975)，其中顯著值 S 以式 3.2-1 定義之：

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

.....(式 3.2-1)

$sign(X_j-X_k)=1$ 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：

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

.....(式 3.2-2)

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

若 S=0 則 Z=0

若 S>0 則 $Z=(S-1)/[VAR(S)]^{1/2}$

若 S<0 則 $Z=(S+1)/[VAR(S)]^{1/2}$

.....(式 3.2-3)

分布機率 f(z)

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-z^2}{2}}$$

.....(式 3.2-4)

一般以 90－95%為顯著水平，本計畫以 90%為判斷是否有顯著趨勢。

3.2.2 資料分析結果

(一) 地下水之溶氧及硝酸鹽帶

本年度採樣之地下水溶氧及硝酸鹽濃度如表 3.2-5，空間分布如圖 3.2-7。圖 3-2-7 中藍虛線部分為任一層含水層之溶氧>1mg/l，此區域由高樹、新南至大響及枋寮等。大致上與扇頂區的範圍一致(除了大湖、新庄等 4 口井)，而地下水保護區的劃設可參考地質鑽探資料，將沒有上覆泥層、且有巨厚含水層的區域，列為優先保護區域。此區域往往也是地下水中的溶氧帶，但並不必然完全重疊。因為溶氧的分布，除了從補注水源攜帶來，也受到地層中的有機質降解而消耗。地質鑽探資料目前並沒有有機質的含量，學界對於地層中有機質含量與溶氧消耗之間的關係研究仍缺乏。

硝酸鹽帶的分布通常比溶氧帶更往下游，在扇頂區的西側及溪南側(圖 3-2-7)，硝酸鹽可能來自化學氮肥或生活汙水，但在缺氧環境下會還原成亞硝酸

鹽及氮氣，因此硝酸鹽的濃度除了受到來源區濃度的影響，地層的氧化還原環境也會影響其濃度。一般而言，硝酸鹽濃度高的地層，應離補注區較近。

表 3.2-5 100-101 年度地下水之溶氧等基本水質

編號	站名	導電度	pH	溶氧	氧化還原電位	硝態氮
		μS/cm		mg/l	mV	mg/l
1	枋山(1)	642	7.05	1.45	88	1.25
2	德興(1)	28100	7.69	0.37	-206	1.47
3	德興(2)	2111	7.55	0.43	-340	0.42
4	德興(3)	3210	7.45	0.33	-125	0.47
6	大庄(1)	846	7.74	0.22	-247	0.73
7	大庄(2)	412	7.62	0.28	-222	0.03
8	枋寮(1)	402	7.23	2.46	75	1.78
9	枋寮(2)	487	7.30	3.54	91	0.16
11	崎峰(1)	51900	6.91	0.25	-365	0.37
12	崎峰(2)	3050	7.69	0.22	-147	0.65
13	崎峰(3)	825	7.84	0.43	-134	0.70
14	崎峰(4)	2780	7.21	0.35	-164	2.64
16	大響(1)	415	7.44	6.58	125	3.15
17	大響(2)	298	7.34	5.47	142	0.67
18	大潭(1)	933	7.58	0.37	-136	1.13
19	大潭(2)	15500	6.59	0.31	-175	1.15
20	東港(1)	2700	8.22	0.46	-184	0.67
21	東港(2)	15800	7.03	0.32	-152	0.80
22	東港(3)	1860	7.31	0.44	-185	1.20
23	東港(4)	50900	7.13	0.13	-111	0.59
24	石化(1)	5610	7.36	0.28	-192	2.44
25	石化(2)	1415	7.39	0.37	-124	1.34
26	港東(1)	2620	7.77	<0.2	50	1.14
27	港東(2)	2720	7.63	<0.2	-165	0.18
28	港東(3)	30300	6.47	<0.2	-134	0.58
29	港東(4)	14200	6.86	<0.2	-157	0.91
30	新園(1)	1106	7.08	2.75	40	5.66
31	新園(2)	49800	7.05	0.56	-152	1.41
32	林園(1)	940	7.44	0.27	-124	0.46
33	林園(2)	26900	6.73	0.14	-136	3.34
34	林園(3)	30000	6.80	0.35	-147	2.92

表 3.2-5 100-101 年度地下水之溶氧等基本水質(續)

編號	站名	導電度	pH	溶氧	氧化還原電位	硝態氮
		μS/cm		mg/l	mV	mg/l
35	昭明(1)	625	7.41	0.23	-115	0.16
36	昭明(2)	1204	7.30	0.48	-241	0.13
37	昭明(3)	628	7.47	0.32	-223	0.12
38	昭明(4)	1429	7.41	0.17	-247	0.56
39	鳳鳴(1)	1024	7.70	0.15	-69	2.19
40	潮寮(1)	1032	7.44	0.45	-150	0.23
41	潮寮(2)	733	7.55	1.42	78	1.56
42	潮寮(3)	593	7.66	1.85	85	1.53
43	永芳(1)	1166	7.39	0.42	-83	1.71
44	永芳(2)	492	7.69	<0.2	-150	0.24
45	永芳(3)	568	7.23	<0.2	-243	0.17
46	中正(1)	613	7.34	0.22	-106	0.10
47	中正(2)	659	7.31	<0.2	-147	0.15
48	新庄(1)	971	7.26	1.55	58	0.64
49	新庄(2)	485	7.52	1.06	-56	0.73
50	新庄(3)	502	7.61	<0.2	-138	0.39
51	崁頂(1)	363	7.70	0.76	-135	0.51
52	崁頂(2)	369	7.62	0.82	-186	0.85
53	崁頂(3)	341	7.75	0.61	-102	0.52
54	潮州(1)	750	7.43	<0.2	-165	0.23
55	潮州(2)	360	7.45	<0.2	-134	1.12
56	新埤(1)	482	7.36	<0.2	-113	0.27
57	新埤(2)	348	7.57	<0.2	-143	0.34
58	新埤(3)	346	7.53	<0.2	-167	0.53
59	新埤(4)	364	7.59	<0.2	-127	0.43
60	萬隆(1)	332	7.56	3.52	155	1.11
61	萬隆(2)	345	7.28	6.32	75	0.19
62	萬巒(1)	449	7.24	4.12	68	5.21
63	萬巒(2)	487	7.14	<0.2	-154	0.83
64	赤山(1)	359	7.35	0.32	-167	0.85
65	赤山(2)	448	7.34	0.21	-178	0.33
66	赤山(3)	790	7.25	<0.2	-214	0.12

表 3.2-5 100-101 年度地下水之溶氧等基本水質(續)

編號	站名	導電度	pH	溶氧	氧化還原電位	硝態氮
		μS/cm		mg/l	mV	mg/l
67	大湖(1)	346	6.96	0.88	-65	0.89
68	大湖(2)	361	7.23	0.64	-132	0.35
69	大湖(3)	599	7.24	4.67	86	5.80
70	大湖(4)	501	7.57	<0.2	-158	0.57
71	餉潭(1)	253	7.62	0.84	-12	2.53
72	餉潭(2)	487	7.46	0.67	-134	0.34
73	萬丹(1)	830	7.45	<0.2	-180	0.32
74	萬丹(2)	540	7.68	<0.2	-134	0.16
75	萬丹(3)	355	7.88	<0.2	-206	0.27
76	清溪(1)	541	7.38	0.37	-172	0.10
77	清溪(2)	645	7.50	0.21	-191	0.43
78	清溪(3)	425	7.67	0.45	-126	0.21
80	九曲(1)	435	7.49	0.31	-149	0.35
81	九曲(2)	440	7.43	0.18	-146	0.01
82	大樹(1)	557	6.82	0.58	-57	2.33
83	大樹(2)	208	6.82	0.35	-134	2.27
84	大樹(3)	396	7.10	0.26	-172	0.30
85	大樹(4)	308	7.15	0.09	-191	0.01
86	溪埔(1)	277	6.55	0.67	60	4.06
87	溪埔(2)	275	6.83	0.85	75	0.23
88	溪埔(3)	375	7.20	0.36	-115	1.14
89	內埔(1)	361	7.43	0.89	85	1.48
90	內埔(2)	446	7.47	0.23	-148	0.34
91	西勢(1)	523	7.50	1.15	64	1.66
92	西勢(2)	472	7.67	0.39	-116	0.73
93	西勢(3)	822	7.21	0.15	-171	0.32
94	西勢(4)	555	7.41	0.08	-165	2.92
95	老埤(1)	195	6.52	4.21	151	2.15
96	老埤(2)	402	7.42	0.28	-204	0.32
97	建興(1)	639	7.31	5.63	179	5.85
98	建興(2)	484	7.52	4.69	112	3.09
99	繁華(1)	640	7.41	3.65	156	4.63

表 3.2-5 100-101 年度地下水之溶氧等基本水質(續)

編號	站名	導電度	pH	溶氧	氧化還原電位	硝態氮
		μS/cm		mg/l	mV	mg/l
100	繁華(2)	460	7.47	3.22	145	0.82
101	瑪家(1)	594	7.30	6.32	285	2.41
102	瑪家(2)	481	7.28	3.21	167	2.11
103	瑪家(3)	310	7.08	1.54	172	1.10
104	海豐(1)	721	7.42	0.24	-178	0.12
105	海豐(2)	369	7.50	0.18	-147	1.44
106	海豐(3)	487	7.47	0.31	-145	0.07
107	九如(1)	547	7.36	0.27	-148	0.39
108	九如(2)	685	7.65	0.24	-264	0.06
109	彭厝(1)	456	7.48	3.58	212	4.62
110	彭厝(2)	315	7.40	2.87	145	4.11
111	鹽埔(1)	597	7.48	5.98	147	1.25
112	鹽埔(2)	421	7.38	4.78	175	3.80
113	里港(1)	546	7.42	4.98	145	1.88
114	里港(2)	598	7.55	0.14	-147	0.41
115	關福(1)	453	7.42	3.57	158	0.84
116	關福(2)	384	7.48	0.32	-174	0.29
117	新南(1)	582	7.54	4.65	174	3.19
118	新南(2)	521	7.76	6.58	199	1.45
119	高樹(1)	572	7.46	6.45	145	0.77
120	高樹(2)	539	7.43	2.57	152	1.09
121	泰山(1)	225	6.97	3.72	188	4.63
122	泰山(2)	195	7.06	5.44	225	1.37
123	土庫	621	7.28	0.11	-174	0.02
124	吉洋	776	7.65	0.29	-157	3.50
125	吉洋(1)	597	7.58	0.01	-135	1.05
126	吉洋(1)	574	7.72	0.23	-174	0.43
127	中州(1)	554	7.53	0.21	-142	1.45
128	中州(2)	591	7.62	0.24	-124	0.49
129	美濃(1)	550	7.75	0.61	-87	0.64
130	美濃(2)	568	7.34	0.24	-75	1.72
131	旗山(1)	901	7.08	0.35	-144	6.75
132	旗山(2)	512	7.44	0.25	-114	0.36

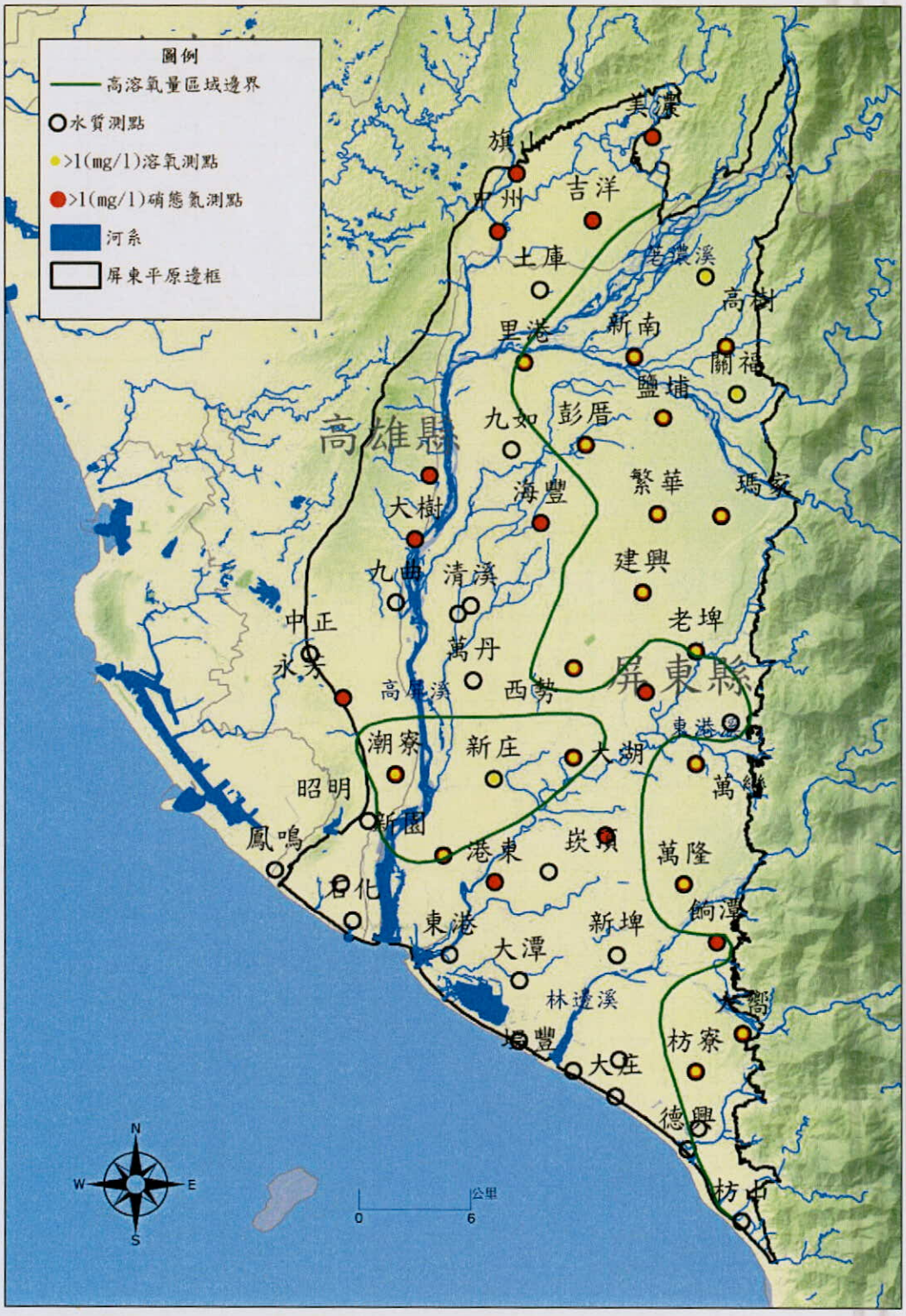


圖 3.2-7 屏東平原地下水之溶氧與硝態氮濃度分布，綠色線以東為溶氧大於 1mg/l 的區域

(二)扇頂水質地化特性

扇頂地下水水之主要離子成份如表 3.2-6，離子百分比如表 3.2-7。扇頂地下水總數 26 樣本中大都以碳酸氫鈣水質為主(圖 3.2-8)，碳酸氫根約占 50-70%、鈣離子約占 50-75%。只有 4 個樣本有明顯不同，其中枋寮二以碳酸氫鈉為主，碳酸氫根 77%、鈉離子 86%；萬隆二、萬鑾二及吉洋二以以碳酸氫鈣鈉為主，碳酸氫根 70-96%、鈣離子 30-60%、鈉離子 30-50%。

此現象應為陽離子交換的結果。地下水補注後，因流徑變長，水中的鈣離子會與地層中的鈉離子交換，因二價的陽離子，比一價的鈉離子更容易被地層吸附。萬隆二、萬鑾二及吉洋二的深度都比一號井來得深，因此流徑也都比較長，所以可能發生陽離子交換作用。

表 3.2-6 扇頂地下水之主要離子成份(mg/l)

編號	井名	導電度	碳酸氫根	氯離子	硫酸根	鈣離子	鎂離子	鈉離子	鉀離子
8	枋寮(1)	406	197	7.20	39.8	51.9	22.6	9.30	1.90
9	枋寮(2)	416	198	15.8	25.7	9.20	2.70	96.7	2.20
16	大響(1)	260	97	4.30	27.7	36.9	11.80	6.20	2.10
17	大響(2)	260	102	4.40	28.3	35.0	11.40	8.70	2.10
60	萬隆(1)	308	120	4.30	39.2	51.2	11.70	5.50	1.70
61	萬隆(2)	329	132	6.00	33.1	26.6	11.40	33.9	1.30
62	萬巒(1)	456	161	7.70	39.1	68.7	19.80	10.8	3.10
63	萬巒(2)	453	254	4.60	1.80	46.1	10.50	52.4	2.70
97	建興(1)	670	282	8.70	63.4	107	21.10	13.7	1.90
98	建興(2)	431	147	4.90	68.4	76.2	13.00	8.60	2.60
99	繁華(1)	497	173	6.50	64.5	85.4	15.60	8.00	1.40
100	繁華(2)	421	166	4.00	59.9	65.2	14.80	14.1	1.60
101	瑪家(1)	428	192	5.80	74.0	62.4	18.40	8.30	1.80
102	瑪家(2)	374	141	4.50	66.3	60.9	13.10	8.40	3.80
103	瑪家(3)	392	133	4.30	68.4	66.5	11.90	8.50	1.60
109	彭厝(1)	412	134	5.90	57.1	66.7	14.80	8.50	1.40
110	彭厝(2)	270	94.0	4.90	30.5	40.0	9.30	10.3	1.60
111	鹽埔(1)	382	131	4.10	63.8	63.7	14.10	6.40	1.20
112	鹽埔(2)	339	111	4.40	48.5	51.2	13.70	7.50	1.20
117	新南(1)	529	198	6.90	92.3	91.3	16.10	14.3	1.70
118	新南(2)	485	163	5.50	86.9	82.2	14.90	13.3	1.70
119	高樹(1)	588	189	7.50	123	102.1	18.00	15.5	1.60
120	高樹(2)	534	168	6.60	106	90.5	17.00	14.3	3.00
124	吉洋	810	324	11.5	112	148.2	21.30	19.1	3.90
125	吉洋(1)	516	182	6.90	93.2	86.3	16.10	16.4	1.80
126	吉洋(2)	534	227	8.50	60.4	70.0	10.40	50.6	3.20

導電度 μS/cm 25℃

表 3.2-7 扇頂地下水之主要離子成份百分比

編號	井名	碳酸氫根	氯離子	硫酸根	鈣離子	鎂離子	鈉鉀離子
8	枋寮(1)	76%	5%	19%	53%	38%	9%
9	枋寮(2)	77%	11%	13%	9%	5%	86%
16	大響(1)	70%	5%	25%	59%	31%	10%
17	大響(2)	70%	5%	25%	56%	30%	14%
60	萬隆(1)	68%	4%	28%	67%	26%	7%
61	萬隆(2)	72%	6%	23%	35%	25%	40%
62	萬巒(1)	72%	6%	22%	61%	29%	10%
63	萬巒(2)	96%	3%	1%	42%	16%	42%
97	建興(1)	75%	4%	21%	69%	23%	8%
98	建興(2)	61%	3%	36%	71%	20%	8%
99	繁華(1)	65%	4%	31%	72%	22%	6%
100	繁華(2)	67%	3%	31%	63%	24%	13%
101	瑪家(1)	65%	3%	32%	62%	30%	8%
102	瑪家(2)	60%	3%	36%	66%	24%	10%
103	瑪家(3)	59%	3%	38%	70%	21%	9%
109	彭厝(1)	62%	5%	33%	67%	25%	8%
110	彭厝(2)	67%	6%	27%	61%	24%	15%
111	鹽埔(1)	60%	3%	37%	68%	25%	7%
112	鹽埔(2)	62%	4%	34%	63%	28%	9%
117	新南(1)	61%	4%	36%	69%	20%	10%
118	新南(2)	58%	3%	39%	69%	21%	10%
119	高樹(1)	53%	4%	44%	70%	20%	10%
120	高樹(2)	54%	4%	43%	68%	21%	11%
124	吉洋	67%	4%	29%	73%	18%	9%
125	吉洋(1)	58%	4%	38%	67%	21%	12%
126	吉洋(2)	71%	5%	24%	53%	13%	34%

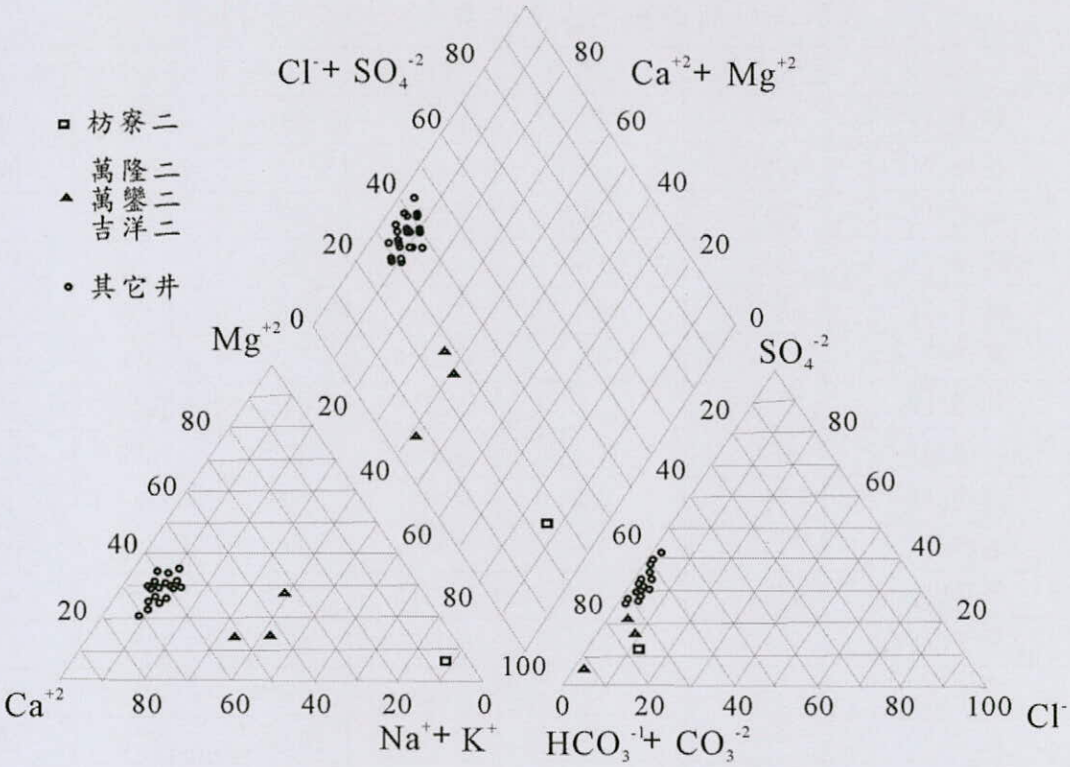


圖 3.2-8 扇頂地下水之主成份三角圖

(三) 地面水之水質

地面水的基本水質，溫度約 24-28℃、pH 約 7.1-7.9、氧化還原電位約 195-333mV、導電度約 156-773 μS/cm(表 3.2-8)。主要離子成分顯示，以碳酸氫鈣為主(圖 6.2-9)，只有萬金、萬巒、西方與來義的鈉離子稍高，前三點的硝酸鹽濃度也高，可能受生活汙水排放影響。

地面水與扇頂地下水比較(圖 3-2-10；表 3.2-10)，地下水的硫酸根偏高，可能受到化學肥料的影響，或是沉積物中板岩屑含有的硫化金屬(例如黃鐵礦)氧化的結果；地面水的鈉離子偏高，可能是生活汙水的影響。

扇頂地下水中的溶氧及硝態氮應來自於地面水，根據本年度的地面水採樣，顯示地面水的溶氧約 3-7mg/l(表 3.2-8)；硝態氮的濃度則以東港溪上游明顯濃度較高，約 1.4-3.3mg/l、其餘都在 1mg/l 以下(表 3.2-9)。

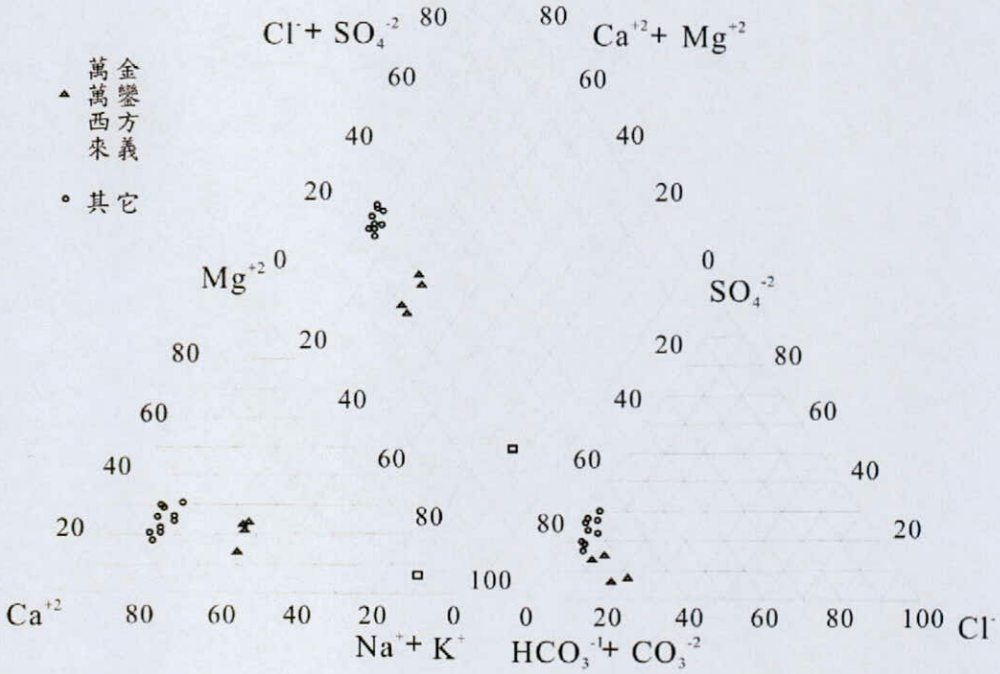


圖 3.2-9 地面水之主要離子分類

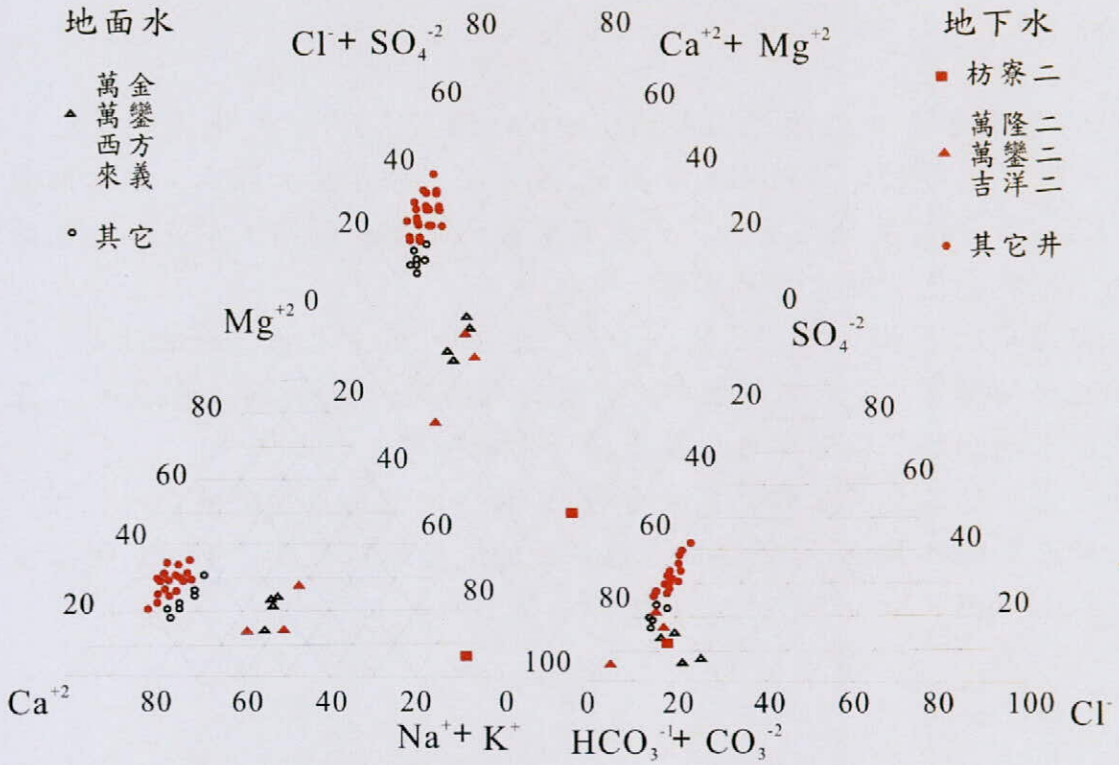


圖 3.2-10 地面水與地下水之主要離子

表 3.2-8 地面水之基本水質(2012 年)

	站名	溫度℃	pH	氧化還原電位 mV	導電度 μS/cm	溶氧 mg/l	備註
第一次採樣 3 月	1. 高美	25.18	7.33	195	635	6.23	溝渠
	2. 吉安	25.24	7.85	257	650	6.32	溝渠
	3. 福田	26.38	7.66	258	586	5.78	溝渠
	4. 山地門	26.75	7.54	263	564	6.14	隘寮溪
	5. 萬安	23.45	7.21	286	262	4.44	東港溪
	6. 文樂	27.23	7.14	296	156	5.75	林邊溪
	7. 萬金	25.15	7.74	333	773	4.95	東港溪
	8. 萬巒北	25.57	7.32	312	462	4.54	東港溪
	9. 西方	24.75	7.46	319	272	5.32	東港溪
	10. 來義	24.74	7.63	241	457	4.37	林邊溪
	11. 力力	26.62	7.48	282	448	5.34	力力溪
	12. 口社	無水					口社溪
第二次採樣 9 月	1. 高美	26.75	7.11	174	578	6.47	溝渠
	2. 吉安	28.32	7.78	268	514	6.58	溝渠
	3. 福田	28.45	7.62	219	574	5.46	溝渠
	4. 山地門	27.12	7.67	273	532	6.54	隘寮溪
	5. 萬安	28.21	7.35	284	247	4.12	東港溪
	6. 文樂	28.46	7.17	294	177	5.33	林邊溪
	7. 萬金	27.62	7.72	387	762	4.75	東港溪
	8. 萬巒北	26.47	7.82	346	475	4.47	東港溪
	9. 西方	26.78	7.57	341	287	5.67	東港溪
	10. 來義	25.26	7.49	247	491	4.55	林邊溪
	11. 力力	25.19	7.77	269	473	5.17	力力溪
	12. 口社	27.44	7.61	157	314	6.47	口社溪

表 3.2-9 地面水之硝態氮濃度(mg/l)

站名	2012 年 3 月	2012 年 9 月	備註
1. 高美	0.32	0.77	溝渠
2. 吉安	0.24	0.45	溝渠
3. 福田	0.16	0.98	溝渠
4. 山地門	<0.05	0.58	隘寮溪
5. 萬安	1.29	1.74	東港溪
6. 文樂	0.57	0.32	林邊溪
7. 萬金	3.46	2.47	東港溪
8. 萬巒北	2.38	2.74	東港溪
9. 西方	2.29	1.36	東港溪
10. 來義	0.61	0.24	林邊溪
11. 力力	0.24	0.41	力力溪
12. 口社	無水	0.44	口社溪

表 3.2-10 主要離子成分

	地名	導電度	碳酸氫根	氯離子	硫酸根	鈣離子	鎂離子	鈉離子	鉀離子
第一次 4月	高美	635	255	10.6	66.1	85.4	13.4	18.6	2.7
	吉安	650	237	8.1	55.7	71.9	11.4	17.6	2.7
	福田	586	257	11.9	60.3	75.4	13.8	17.2	2.7
	山地門	564	220	12.1	61.5	78.4	13.7	14.8	2.7
	萬安	262	115	12.9	25.9	30.7	11.6	7.1	1.9
	文樂	156	55	3.6	9.4	14.9	1.7	2.9	0.7
	萬金	773	390	14.8	55.4	55.9	22.6	60.7	3.4
	萬巒北	462	256	14.3	31.8	45.2	13.5	45.1	3.7
	西方	272	115	9.9	25.4	35.1	4.8	18.6	2.4
	來義	457	185	9.7	35.7	35.7	11.4	36.1	2.1
	力力	448	185	9.3	30.7	51.4	14.2	9.8	2.4
	口社	無水							
第二次 9月	高美	578	255	10.4	55.4	65.8	13.7	18.4	2.5
	吉安	514	230	8.57	55.7	61	9.47	17.6	2.5
	福田	574	256	11.6	60.8	75.1	14.7	14.6	2.47
	山地門	532	215	13.6	62.1	77.7	12.5	15.6	2.1
	萬安	247	128	15.9	26.4	29.4	12.2	9.7	2.7
	文樂	177	74.9	4.3	11.1	14.9	6.7	8.1	2.8
	萬金	762	382	14.6	47.3	64.2	21	55.3	3.7
	萬巒北	475	235	13.7	17.3	32.7	10.9	29.1	5.7
	西方	287	119	11.9	27.6	19.4	9.15	19.7	2.74
	來義	491	230	14.6	30.8	39.6	12.3	27.8	3.2
	力力	473	259	10.3	26.5	47.8	13.3	13.4	3.6
	口社	314	147	10.8	15.4	29.6	15.4	8.7	1.4

導電度 μS/cm at 25℃、其餘 mg/l

分析環保署位於隘寮沖積扇扇頂的隘寮堰監測數據可知，溪水的導電度約200-700 μS/cm(圖 3.2-11)，導電度有明顯的季節變化，雨季的導電度明顯較低，應是地面逕流與雨水稀釋所致；旱季的導電度較高—應是山區地下水流入河水。隘寮溪由扇頂往下游，共有 5 個地面水的監測站，位於扇頂區的隘寮堰與南華橋(圖 3.2-12)，導電度的變化相近，但進入中下游後(里港橋等 3 站)，因有其他河流匯入(里港橋有荖濃溪匯入)，或有都市排水匯入(九如橋及昌濃橋)，溪水的導電度漸漸升高。

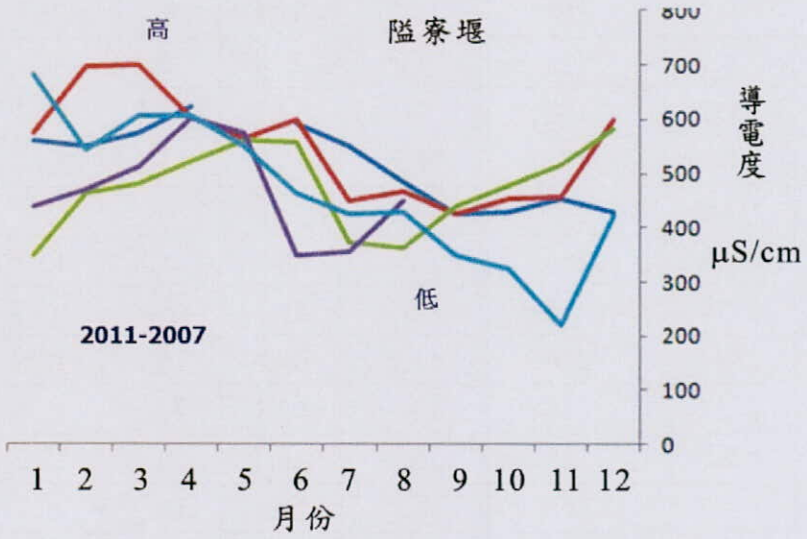


圖 3.2-11 隘寮堰 2007-2011 年地面水之導電度

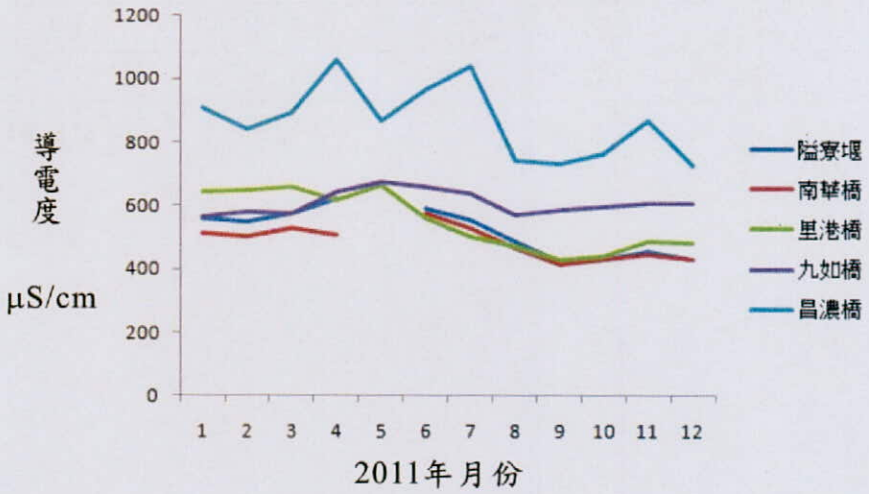


圖 3.2-12 隘寮溪-高屏溪流域地面水之導電度

比較隘寮沖積扇的地下水與溪水，發現兩者數值接近。2011 年隘寮堰的導電度為 420-620 μS/cm、平均為 516 μS/cm(圖 3.2-11)，鄰近的瑪家站地下水為 594-481-310 μS/cm(分別為第一、二、三含水層)，可以推論隘寮沖積扇的地下水應是隘寮溪補注為主，但是為何瑪家站的地下水有往深層變淡的趨勢，仍不清楚。

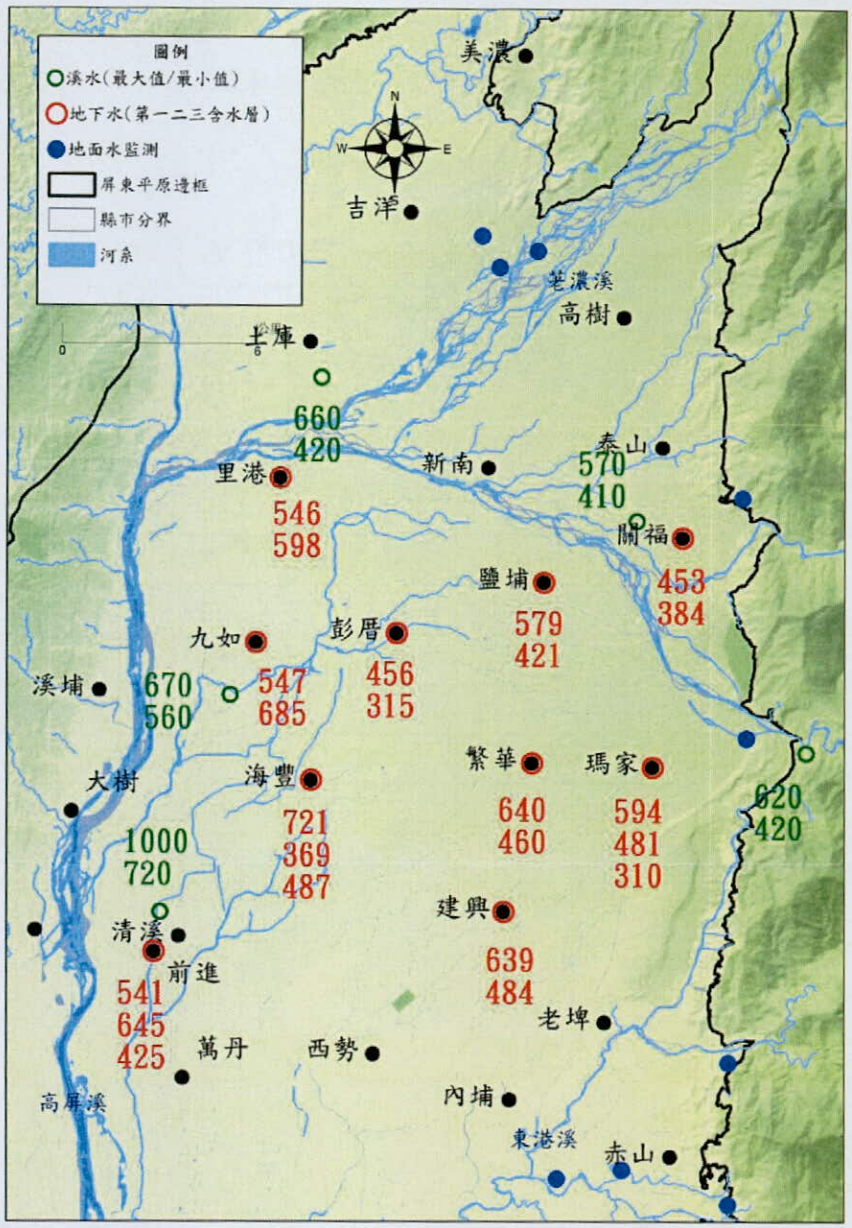


圖 3.2-13 隘寮溪流域地面水與地下水之導電度

(四) 地下水歷年導電度

地下水歷年的導電度資料如表 3.2-11 至表 3.2-13 所示，可分為四部份討論：荖濃溪地區導電度約 400-1000 μS/cm(圖 3.2-14)、隘寮溪地區 200-700 μS/cm(圖 3.2-15)、林邊溪 200-500 μS/cm(圖 3.2-16)、力力溪 200-550 μS/cm(圖 3.2-16)。屏東扇頂區的地下水導電度大都偏低，僅吉洋觀測井導電度偏高，以 2011 年為例，吉洋的導電度為 776 μS/cm，其餘井皆小於 750 μS/cm(灌溉用水標準)。

經由 Mann-Kendall 趨勢統計，大響(1)及瑪家(1)的導電度有增加的趨勢；枋寮(2)及鹽埔(2)的導電度有減少的趨勢。相較於濁水溪扇頂，屏東扇頂地區並沒有明顯的導電度升高現象(表 3.2-14)。

表 3.2-11 荖濃溪沖積扇地下水歷年導電度

年	新南(1)	新南(2)	高樹(1)	高樹(2)	吉洋(舊)	吉洋(1)	吉洋(2)
1998	459	485	450	425	513	436	439
1999			497	474	771		
2000	589	510	562	496	766	545	569
2001	566	505	553	498	993	513	556
2002	536	503	476	464	749	492	544
2003	432	485	545	481	818	494	522
2004	540	475	511	512	802	515	530
2005	526	468	561	503	806	516	535
2007	566	482	430	446		458	440
2009	490	424			647		
2011	582	521	572	539	776	597	574

表 3.2-12 隘寮溪沖積扇地下水歷年導電度

年	建興(1)	建興(2)	繁華(1)	繁華(2)	瑪家(1)	瑪家(2)	瑪家(3)	彭厝(1)	彭厝(2)	鹽埔(1)	鹽埔(2)
1998	406	541	463	204	361	348	392	472	321	383	374
1999	618	413			418	397	388			424	399
2000	669	459	551	446	525	429	375	433	290	433	430
2001	666	454	544	443	508	444	259	424	283	444	387
2002	623	426	537	408	409	412	250	391	275	396	348
2003	680	438	478	415	438	412	211	404	267	378	344
2004	743	427	469	419	457	412	227	412	270	385	346
2005	646	422	462	398	511	408	386	416	278	386	343
2007			442	314		389	365	376	257	428	292
2009	538	373									
2011	639	484	640	460	594	481	310	456	315	597	421

表 3.2-13 林邊溪與力力溪沖積扇地下水歷年導電度

年	枋寮(1)	枋寮(2)	大響(1)	大響(2)	萬隆(1)	萬隆(2)	萬巒(1)	萬巒(2)
1998	506	541	256	234	259	342	380	447
1999	444	489	257	262	326	344	437	444
2000	483	531	259	251	337	357	484	486
2001	393	491	265	274	344	349	373	476
2002	498	497	259	269	322	343	498	467
2003	448	474	260	252	293	328	456	476
2004	470	492	269	257	304	330	460	461
2005	459	463	262	264	317	333	459	455
2007	497	420	325	259	355	334	413	423
2009			177	187	288	309		
2011	402	487	415	298	332	345	449	487

表 3.2-14 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
枋寮(1)	10	393	506	-7	-0.5	0.59	無
枋寮(2)	10	420	541	-25	-2.1	0.03	減少
大響(1)	11	177	415	28	2.1	0.03	增加
大響(2)	11	187	298	9	0.6	0.53	無
萬隆(1)	11	259	355	3	0.1	0.88	無
萬隆(2)	11	309	357	-15	-1.1	0.28	無
萬巒(1)	10	373	498	3	0.18	0.86	無
萬巒(2)	10	423	487	16	1.3	0.18	無
建興(1)	10	406	680	7	0.5	0.59	無
建興(2)	10	373	541	-13	-1	0.28	無
繁華(1)	9	463	640	-10	-0.9	0.35	無
繁華(2)	9	204	460	-1	-1.5	0.64	無
瑪家(1)	9	361	594	18	1.7	0.08	增加
瑪家(2)	10	348	481	6	0.4	0.65	無
瑪家(3)	10	211	392	-17	-1.4	0.15	無
彭厝(1)	9	376	472	-10	-0.9	0.35	無
彭厝(2)	9	257	321	-14	-1.3	0.17	無
鹽埔(1)	10	378	597	9	0.7	0.47	無
鹽埔(2)	10	292	430	-19	-1.6	0.10	減少
新南(1)	10	432	598	2	0.09	0.92	無
新南(2)	10	424	521	-16	-1.3	0.17	無
高樹(1)	10	430	572	9	0.7	0.47	無
高樹(2)	10	425	539	19	1.6	0.11	無
吉洋	10	513	993	5	0.3	0.72	無
吉洋(1)	9	436	597	10	0.9	0.34	無
吉洋(2)	9	439	574	1	0.2	0.95	無

數據時間：1998－2011

S 統計值(Mann Kendall Statistic)，S 為正值為增加趨勢；負值為減少趨勢

Z 標準化(Normalized Test Statistic)

趨勢判定：90%顯著區間(level of significance)

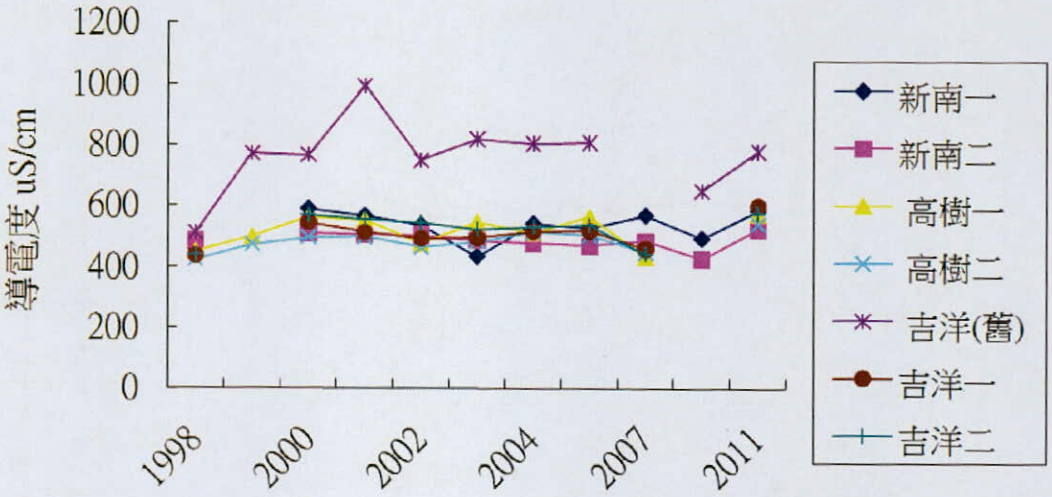
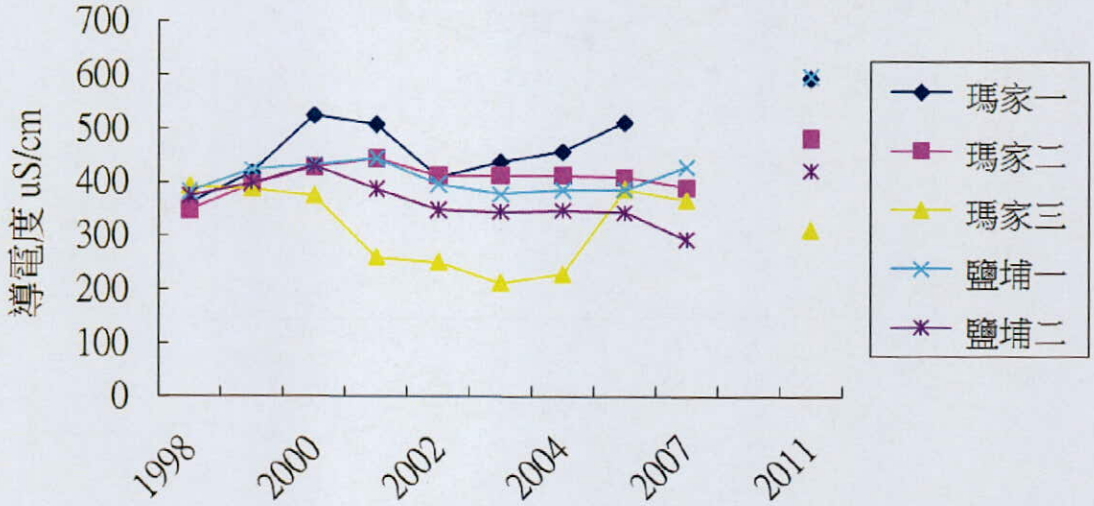


圖 3.2-14 荖濃溪沖積扇地下水歷年導電度



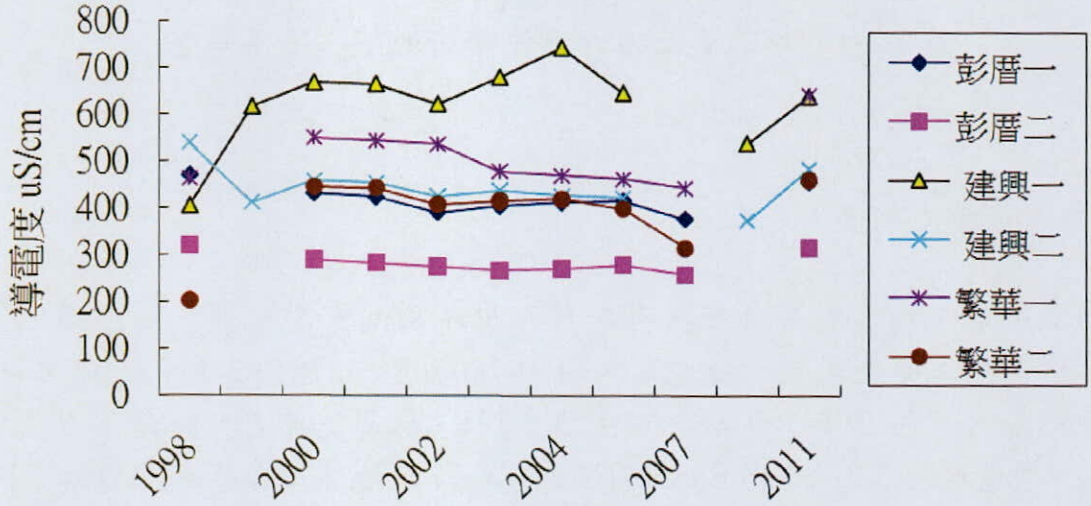


圖 3.2-15 隘寮溪沖積扇地下水歷年導電度

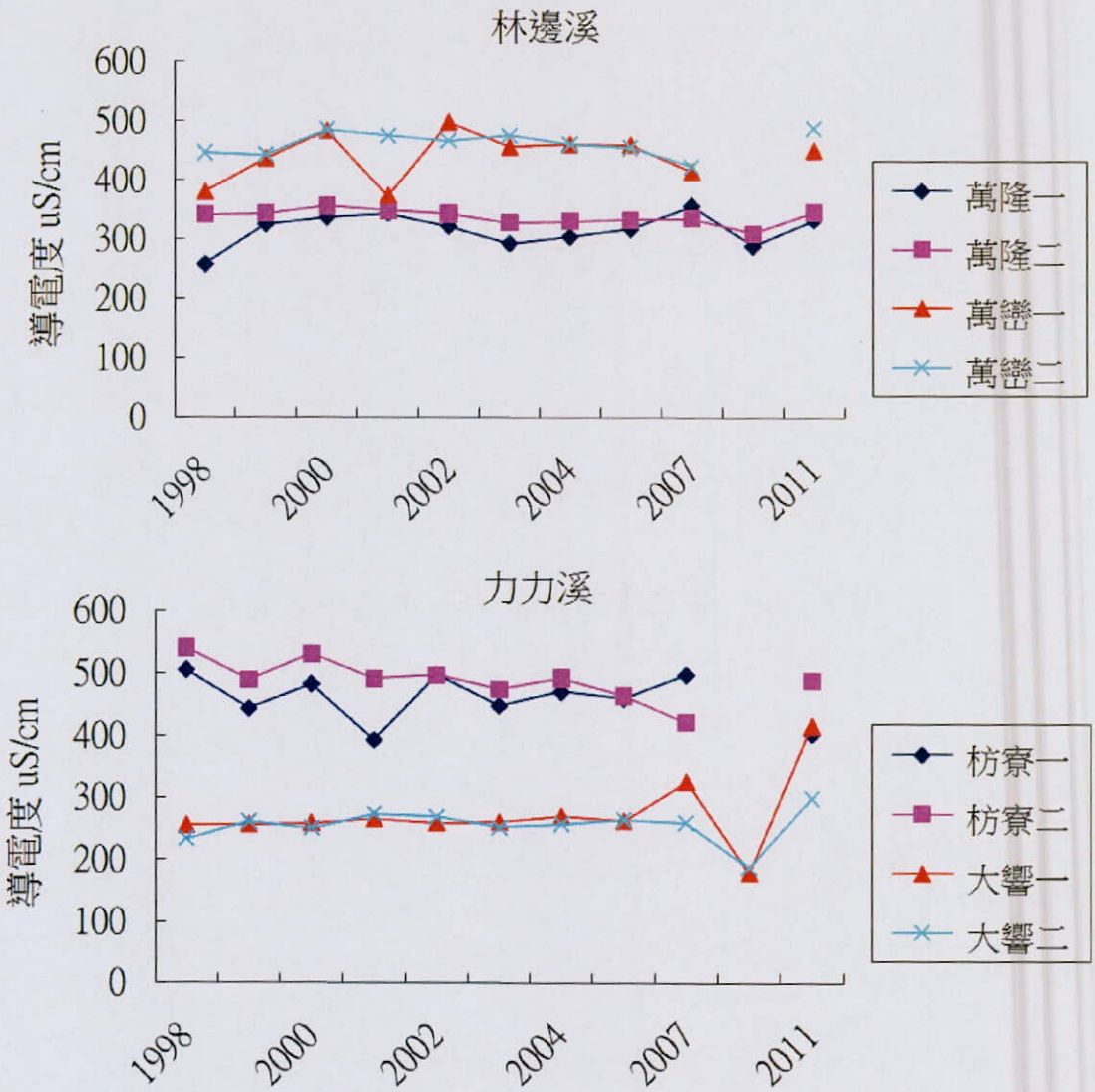
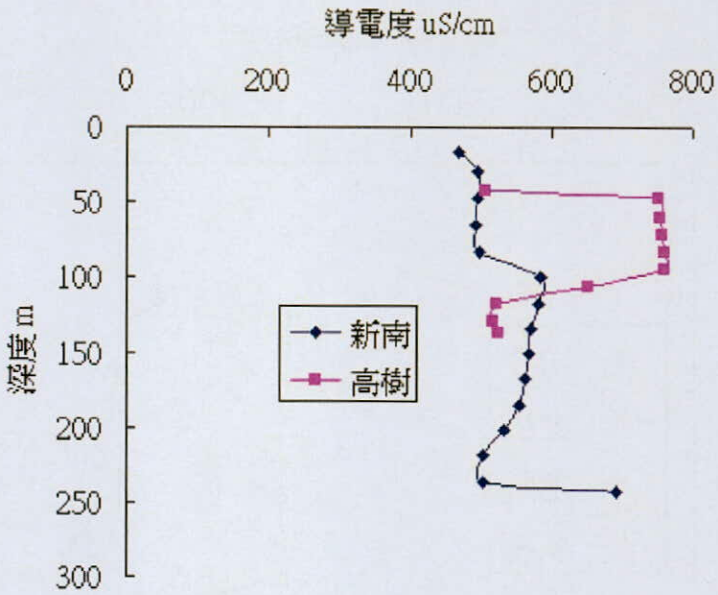


圖 3.2-16 林邊溪及力力溪沖積扇地下水歷年導電度

(五) 導電度垂向剖面

觀測井的垂向導電度分布，可能反應出不同的水質來源，荖濃溪地區垂向導電度以高樹二變化最大，導電度約 450-780 μS/cm(圖 3.2-17)、隘寮溪地區以鹽埔變化最大、約 300-580 μS/cm(圖 3.2-17)、林邊溪及力力溪地區以萬隆二變化最大、導電度約 220-500 μS/cm(圖 3.2-18)。屏東地區扇頂區的導電度皆不大。



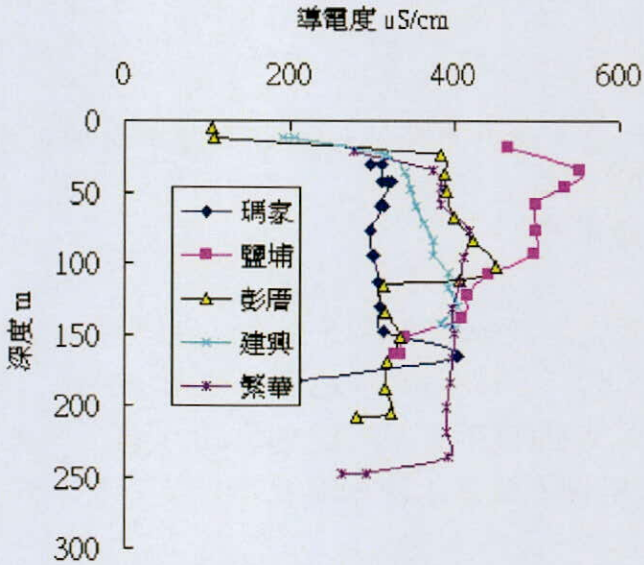


圖 3.2-17 荖濃溪及隘寮溪沖積扇觀測井垂向地下水導電度

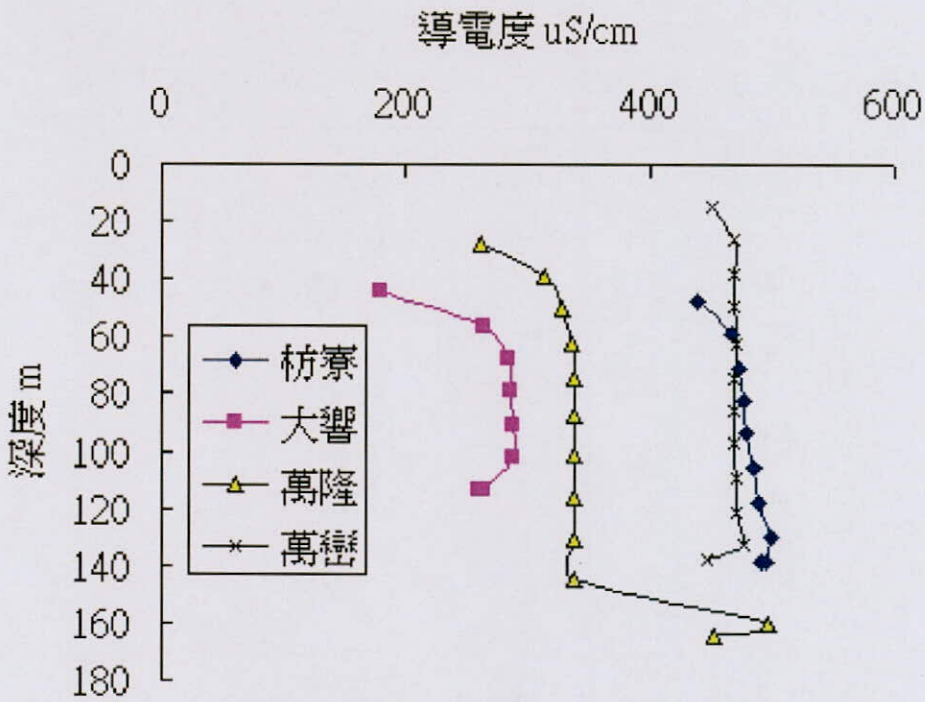


圖 3.2-18 林邊溪及力力溪沖積扇觀測井垂向地下水導電度

(六)地下水歷年硝酸鹽濃度

地下水歷年的硝態氮濃度如表 3.2-15 至表 3.2-18 所示。2011 年荖濃溪地區以吉洋最高，濃度為 3.50 mg/l；隘寮溪地區以建興一最高，濃度為 5.85 mg/l；林邊溪及力力溪地區以萬巒(1)最高，濃度為 5.21 mg/l。屏東地區扇頂區的硝態氮濃度皆小於 10mg/l(環保署飲用水源水質標準)。

表 3.2-15 100-101 年之溶氧與硝態氮(mg/l)

編號	站名	溶氧	硝態氮	編號	站名	溶氧	硝態氮
1	枋山(1)	1.45	1.25	34	林園三	0.35	2.92
2	德興(1)	0.37	1.47	35	昭明一	0.23	0.16
3	德興(2)	0.43	0.42	36	昭明二	0.48	0.13
4	德興(3)	0.33	0.47	37	昭明三	0.32	0.12
5	水底寮			38	昭明四	0.17	0.56
6	大庄(1)	0.22	0.73	39	鳳鳴一	0.15	2.19
7	大庄(2)	0.28	0.03	40	潮寮一	0.45	0.23
8	枋寮(1)	2.46	1.78	41	潮寮二	1.42	1.56
9	枋寮(2)	3.54	0.16	42	潮寮三	1.85	1.53
10	塭豐			43	永芳一	0.42	1.71
11	崎峰(1)	0.25	0.37	44	永芳二	<0.2	0.24
12	崎峰(2)	0.22	0.65	45	永芳三	<0.2	0.17
13	崎峰(3)	0.43	0.70	46	中正一	0.22	0.10
14	崎峰(4)	0.35	2.64	47	中正二	<0.2	0.15
15	佳冬(4)			48	新庄一	1.55	0.64
16	大嚮(1)	6.58	3.15	49	新庄二	1.06	0.73
17	大嚮(2)	5.47	0.67	50	新庄三	<0.2	0.39
18	大潭(1)	0.37	1.13	51	崁頂一	0.76	0.51
19	大潭(2)	0.31	1.15	52	崁頂二	0.82	0.85
20	東港(1)	0.46	0.67	53	崁頂三	0.61	0.52
21	東港(2)	0.32	0.80	54	潮州一	<0.2	0.45
22	東港(3)	0.44	1.20	55	潮州二	<0.2	0.43
23	東港(4)	0.13	0.59	56	新埤一	<0.2	0.27
24	石化(1)	0.28	2.44	57	新埤二	<0.2	0.34
25	石化(2)	0.37	1.34	58	新埤三	<0.2	0.53
26	港東(1)	<0.2	1.14	59	新埤四	<0.2	0.43
27	港東(2)	<0.2	0.18	60	萬隆一	3.52	1.11
28	港東(3)	<0.2	0.58	61	萬隆二	6.32	0.19
29	港東(4)	<0.2	0.91	62	萬巒一	4.12	5.21
30	新園(1)	2.75	5.66	63	萬巒二	<0.2	0.83
31	新園(2)	0.56	1.41	64	赤山一	0.32	0.85
32	林園(1)	0.27	0.46	65	赤山二	0.21	0.33
33	林園(2)	0.14	3.34	66	赤山三	<0.2	0.21

表 3.2-15 100-101 年之溶氧與硝態氮(mg/l)(續)

編號	站名	溶氧	硝態氮	編號	站名	溶氧	硝態氮
67	大湖(1)	0.88	0.89	100	繁華二	3.22	0.82
68	大湖(2)	0.64	0.67	101	瑪家一	6.32	2.41
69	大湖(3)	4.67	5.80	102	瑪家二	3.21	2.11
70	大湖(4)	<0.2	0.57	103	瑪家三	1.54	1.10
71	餉潭(1)	0.84	0.33	104	海豐一	0.24	0.12
72	餉潭(2)	0.67	0.35	105	海豐二	0.18	1.44
73	萬丹(1)	<0.2	0.32	106	海豐三	0.31	0.07
74	萬丹(2)	<0.2	0.16	107	九如一	0.27	0.39
75	萬丹(3)	<0.2	0.27	108	九如二	0.24	0.06
76	清溪(1)	0.37	0.10	109	彭厝一	3.58	4.62
77	清溪(2)	0.21	0.43	110	彭厝二	2.87	4.11
78	清溪(3)	0.45	0.21	111	鹽埔一	5.98	1.25
79	前進(4)	0.32	0.48	112	鹽埔二	4.78	3.80
80	九曲(1)	0.31	0.35	113	里港一	4.98	1.88
81	九曲(2)	0.18	0.01	114	里港二	0.14	0.41
82	大樹(1)	0.58	2.33	115	關福一	3.57	0.84
83	大樹(2)	0.35	2.27	116	關福二	0.32	0.29
84	大樹(3)	0.26	0.30	117	新南一	4.65	3.19
85	大樹(4)	0.09	0.01	118	新南二	6.58	1.45
86	溪埔(1)	0.67	4.06	119	高樹一	6.45	0.77
87	溪埔(2)	0.85	0.23	120	高樹二	2.57	1.09
88	溪埔(3)	0.36	1.14	121	泰山一	3.72	4.63
89	內埔(1)	0.89	1.48	122	泰山二	5.44	1.37
90	內埔(2)	0.23	0.34	123	土庫	0.11	0.02
91	西勢(1)	1.15	1.66	124	吉洋	0.29	3.50
92	西勢(2)	0.39	0.73	125	吉洋一	0.01	1.05
93	西勢(3)	0.15	0.31	126	吉洋二	0.23	0.43
94	西勢(4)	0.08	2.92	127	中州一	0.21	1.45
95	老埤(1)	4.21	3.46	128	中州二	0.24	0.49
96	老埤(2)	0.28	0.35	129	美濃一	0.61	0.64
97	建興(1)	5.63	5.85	130	美濃二	0.24	1.72
98	建興(2)	4.69	3.09	131	旗山一	0.35	6.75
99	繁華(1)	3.65	4.63	132	旗山二	0.25	0.36

表 3.2-16 荖濃溪沖積扇地下水歷年硝態氮濃度(mg/l)

井名	新南(1)	新南(2)	高樹(1)	高樹(2)	舊吉洋	吉洋(1)	吉洋(2)
1998	0.27	0.30	1.92	1.95		0.30	0.49
1999			2.39	1.84	8.41		
2000	5.38	1.51	2.72		7.42	2.41	<0.05
2001	1.13	0.61	1.88	0.89	2.14	0.85	
2002	2.18	2.65	1.61	2.15	3.80	1.09	
2003	3.49	1.56	4.53	1.96	5.94	1.81	<0.05
2004	4.05	1.50	2.85	2.96	5.23	1.82	<0.05
2005	3.55	1.41	5.57	2.86	3.93	1.61	<0.05
2007	4.31	1.54	2.38	1.69		4.30	<0.05
2009	3.36	2.04	4.55	1.14		1.37	<0.05
2011	3.19	1.45	0.77	1.09	3.50	1.05	0.43

表 3.2-17 隘寮溪沖積扇地下水歷年硝態氮濃度(mg/l)

井名	建興(1)	建興(2)	繁華(1)	繁華(2)	瑪家(1)	瑪家(2)	瑪家(3)	彭厝(1)	彭厝(2)	鹽埔(1)	鹽埔(2)
1998	8.41	2.51	2.75	0.85	ND	1.12	0.16	3.57	1.48	22.4	23.2
1999	12.5	0.38			2.39	2.59	0.91			1.87	5.98
2000	9.64		6.82	0.55	3.05			4.12	1.65	2.23	
2001	3.69		1.93	0.23	1.43	0.83	0.19	1.90	0.77	1.00	1.30
2002	5.96	2.67	4.33	0.54	1.44	2.09	0	2.61	2.39	1.50	2.34
2003	10.4	3.22	3.25	0.40	1.80	0.16	0	4.82	2.07	0.11	1.37
2004	17.3	2.67	3.38	0.66	3.10	1.69	0.30	6.08	2.75	1.52	2.88
2005	10.43	2.57	5.09	0.70	4.57	1.98	1.27	5.41	2.75	1.64	3.07
2007	6.57	2.71	6.34	0.72		2.57	1.47	4.58	3.99	0.80	3.03
2009	9.01	3.30	3.92	0.69	3.52	2.26	1.41	6.32	7.24	1.68	2.58
2011	5.85	3.09	4.63	0.82	2.41	2.11	1.10	4.62	4.11	1.25	3.80

表 3.2-18 林邊溪與力力溪沖積扇地下水歷年硝態氮濃度(mg/l)

井名	枋寮(1)	枋寮(2)	大響(1)	大響(2)	萬隆(1)	萬隆(2)	萬巒(1)	萬巒(2)
1998	4.46	2.13	2.84	0.74	2.71	0.36	29.0	0.62
1999	3.68	0.40	0.61	0.78	3.02	0.23	8.41	0.15
2000	5.76		4.85		2.28		9.45	
2001	1.19		0.30	0.36	0.59		2.85	
2002	0.45		2.72	0.99	1.95	<0.05	3.92	<0.05
2003	2.28	<0.2	0.23	0.26	1.16	2.95	8.31	<0.05
2004	2.93	0.85	4.30	0.56	1.39	0.26	9.80	0.19
2005	3.64	0.48	0.75	0.70	1.18	0.16	9.89	0.09
2007	4.96	0.51	3.95	0.75	0.99	0.16	10.5	<0.05
2009	4.86	0.51	1.76	0.83	1.17	0.16	9.49	<0.05
2011	1.78	0.16	3.15	0.67	1.11	0.19	5.21	0.83

(七)沿海地下水鹽化現況

水質鹽化監測以導電度(EC)為監測標準，大於 750 μS/cm 代表該水層已不適合飲用，監測之目的為瞭解鹹水之分布範圍且監測其是否有擴大或減少之趨勢。屏東地區地下水鹽化主要發生在東港沿海(圖 3.2-19)，深層鹽化程度較淺層嚴重，第 3-2 層(180-240m)鹽水範圍達新園及港東，往內陸約 5-6 km，除大庄站外，沿海岸之地下水皆已鹽化。

統計沿海含水層共 27 口觀測井，從 87 年至 101 年之導電度(表 3.2-19)，前幾年有變鹹、但近年有變淡的趨勢，統計中間值從 2120 μS/cm 增加為 7320 μS/cm，但 2012 年減為 2780 μS/cm。統計平均值從 12948 μS/cm 增加為 16417 μS/cm，2012 減為 9742 μS/cm。

分析本區含水層鹽化的原因，應是地下水持續超抽所導致，統計近 14 年來的靜水位(表 3.2-20)顯示，本區低於海平面的水位達 44-68%，塭豐及德興一帶，100m 深的含水層靜水位深達海面下 5-9 m 之間。觀測站如新園二及林園二，於 87-88 年間從淡水變成鹹水。2012 年水位低於海平面的井較少，約 44%。

表 3.2-19 屏東沿海監測井之歷年導電度(μS/cm)

編號	井名	87 年	88 年	89 年	90 年	91 年	101 年
2	德興(1)	1174		24500	18180	22900	28100
3	德興(2)	425		699	580	642	2111
4	德興(3)	2120		6810	6720	5610	3210
6	大庄(1)	401	391	414	398	406	846
7	大庄(2)	280	348	379	372	373	412
10	塭豐	7640	5383	5700	6610	4780	
11	崎峰(1)	21100	46960	56600	53200	53600	51900
12	崎峰(2)	2025	5593	6980	5180	7440	3050
13	崎峰(3)	1455	881	861	10500	7320	825
14	崎峰(4)	1159	1406	2160	1587	1712	2780
18	大潭(1)	3700	786	858	764	834	933
19	大潭(2)	3620	9498	11530	11220	10900	15500
20	東港(1)	35300	41160	46200	42500	41200	2700
21	東港(2)	20600	15620	18810	19600	11140	15800
22	東港(3)	44500	971	1020	1041	1112	1860
23	東港(4)	32500	44570	53900	50900	46800	50900
24	石化(1)	28700	15390	2020	44900	9520	5610
25	石化(2)	42700		38900	38400	32600	1415
26	港東(1)	1019		846	724	688	2620
27	港東(2)	539		905	1336	3080	2720
28	港東(3)	13220		38600	38100	35100	30300
29	港東(4)	47400		52400	50000	39600	14200
30	新園(1)	981	1289	1150	1265	1157	1106
31	新園(2)	1081	42650	51600	49000	47200	49800
32	林園(1)	14290	876	890	977	845	940
33	林園(2)	765	24730	29700	28000	27800	26900
34	林園(3)	20900	25890	31000	29400	28900	30000
平均	共 27 筆	12948	14968	17979	18943	16417	9742
中值		2120	5383	5700	6720	7320	2780

表 3.2-20 屏東沿海鹽化監測井之歷年靜水位

編號	井名	87 年 12 月	88 年 2 月	89 年 9 月	90 年 8 月	91 年 5 月	101 年 9 月
2	德興(1)		-0.026	0.112	0.19	0.048	0.44
3	德興(2)		-9.556	-2.382	-5.98	-12.46	-8.30
4	德興(3)		-1.206	1.624	0.3	-6.375	-5.14
6	大庄(1)	-2.915	-4.038	-4.82	-3.595	-7.306	-5.95
7	大庄(2)					-4.42	-6.83
10	塭豐	-9.85	-8.038	-7.113	-10.08	-14.581	
11	崎峰(1)	-1.1	-1.424	-0.433	-1.025	-1.4	-0.54
12	崎峰(2)	-6.312	-5.089	-3.408	-7.05	-7.821	-2.25
13	崎峰(3)	-3.182	-3.261	-2.328	-5.085	-6.052	-1.26
14	崎峰(4)	1.455	1.764	1.864	1.863	1.153	2.27
18	大潭(1)	-1.995	-1.283	-0.638	-1.16	-3.038	-0.35
19	大潭(2)	1.889	2.064	2.42	2.3	1.408	3.38
20	東港(1)	-0.111	-0.074	0.662	0.525	0.26	0.65
21	東港(2)	0.14	0.418	0.642	0.36	-1.88	1.74
22	東港(3)	-0.904	-0.239	-0.039	-0.69	-0.455	0.86
23	東港(4)	-1.492	-1.192	-0.984	-1.435	-2.02	-0.12
24	石化(1)	-0.378	-0.201	0.188	-0.195	-1.017	0.16
25	石化(2)		0.279	0.873	0.429	-0.205	0.85
26	港東(1)		0.251	0.702	0.693	0.24	1.94
27	港東(2)		1.045	1.365	1.235	0.12	2.54
28	港東(3)		0.172	-0.253	0.354	-1.07	0.55
29	港東(4)		0.808	1.371	1.2	-0.295	2.18
30	新園(1)	-1.415	-0.884	-0.714	-0.67	-1.65	-0.09
31	新園(2)	-1.904	-2.091	-0.774	-1.78	-3.07	-0.73
32	林園(1)	1.01	0.965	2.359	1.485	0.37	1.9
33	林園(2)	2.026	1.77	2.936	2.34	1.388	2.69
34	林園(3)	2.247	1.792	3.404	2.95	1.492	3.09
平均		-1.27	-1.05	-0.13	-0.87	-2.54	-0.24
低於 0m		68%	59%	48%	48%	68%	44%

靜水位為海拔標高(m)

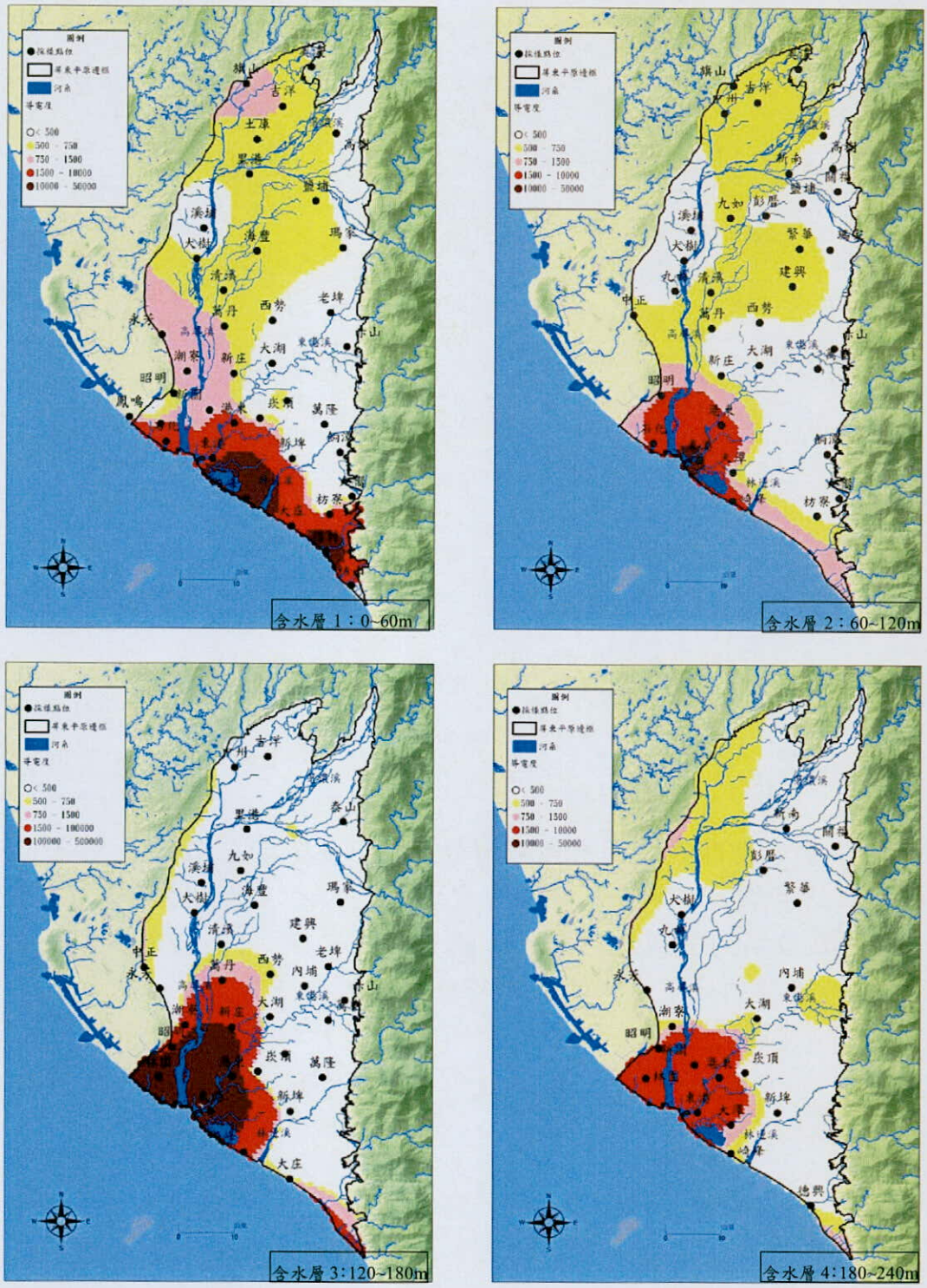


圖 3.2-19 屏東平原 2012 年地下水之導電度

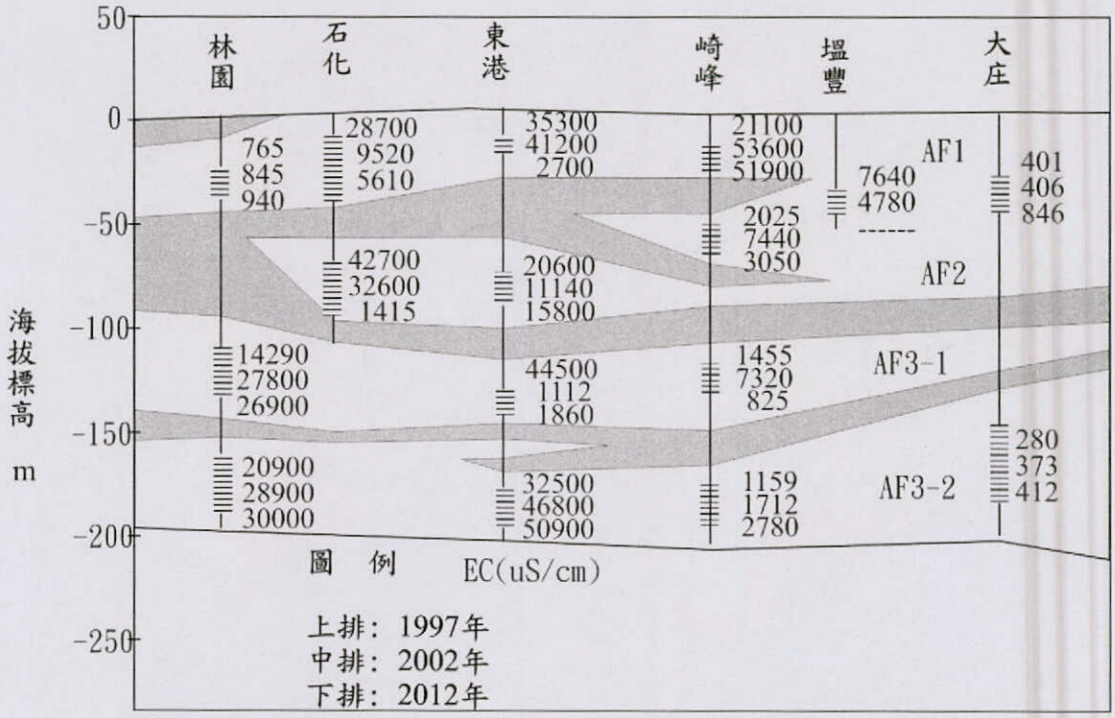


圖 3.2-20 沿海地下水之導電度(1997-2012 年)

(八)地下水之氨態氮現況

本區地下水的氨態氮以西南靠海側較高，92 年度共有 42 口大於 1 mg/L，94 年有 32 口，101 年度有 30 口(22%)，其中以東港四的濃度最高，達 18.7 mg/L (表 3.2-21)。氨態氮較高的區域為泥質地層較多的中下游，可能由地層中的有機物溶解/降解，但較淺部的地下水，不排除可能遭受人為汙染。

表 3.2-21 地下水之歷年氨態氮濃度

編號	井名	87 年	88 年	89 年	92 年	93 年	94 年	101 年
1	枋山(1)	0.47	0.07	0.08	0.14	0.11		ND
2	德興(1)	0.37		4.33	0.93	1.45		1.37
3	德興(2)	0.86		2.94	2.45	6.53	4.50	3.65
4	德興(3)	0.58		6.51	4.87	4.01	25.50	5.44
5	水底寮	ND	1.05	1.02	0.51	1.68		
6	大庄(1)	0.10	0.90	0.85	0.27	1.03	1.80	1.17
7	大庄(2)	2.24	0.06	0.05	ND	ND		ND
8	枋寮(1)	0.14	0.05	N.D.	0.49	ND		ND
9	枋寮(2)	0.26	N.D.	N.D.	0.58	ND		ND
10	塭豐		6.62	4.64	2.50	18.0	8.50	
11	崎峰(1)	0.09	1.34	0.80	0.26	0.38		0.49
12	崎峰(2)	0.10	4.28	5.12	2.33	12.2	8.60	5.57
13	崎峰(3)	0.91	14.5	10.6	19.1	13.8		10.2
14	崎峰(4)	0.66	17.0	22.6	16.2	0.47	31.2	12.9
15	佳冬(4)	0.43			ND	ND		
16	大響(1)	1.54	N.D.	N.D.	0.28	ND		ND
17	大響(2)	1.23	0.06	N.D.	0.12	ND		ND
18	大潭(1)	0.41	18.9	17.6	12.2	21.2	21.30	16.3
19	大潭(2)	0.32	43.3	37.5	11.0	8.60	74.00	18.7
20	東港(1)	2.62	4.02	4.67	11.1	3.65		7.12
21	東港(2)	9.64	18.5	14.5	9.46	20.1	13.50	10.8
22	東港(3)	10.6	14.9	11.8	10.5	15.3	49.10	16.4
23	東港(4)	5.36	18.8	14.5	10.3	13.8	103.50	18.7
24	石化(1)		11.7	15.1	8.14	25.0		9.57
25	石化(2)	13.4		13.2	8.58	8.63		6.77
26	港東(1)	0.44		1.79	0.89	2.17	2.10	1.49
27	港東(2)	0.85		0.59	0.36	0.49	1.70	0.88
28	港東(3)	0.26		3.74	1.94	0.16		0.73
29	港東(4)	0.53		4.32	1.63	ND		1.82
30	新園(1)	ND	0.19	0.13	ND	ND		ND
31	新園(2)	1.34	8.65	8.39	3.26	0.22		4.58
32	林園(1)	0.07	1.64	1.39	0.76	0.78	1.5	1.12
33	林園(2)	0.04	15.1	13.1	16.2	1.14	51.1	13.4
34	林園(3)	ND	8.70	16.7	15.7	5.36	62.1	5.11

ND<0.025mg/l

表 3.2-21 地下水之歷年氨態氮濃度(續)

編號	井名	87 年	88 年	89 年	92 年	93 年	94 年	101 年
35	昭明(1)	0.24		0.13	0.04	0.05		0.29
36	昭明(2)	0.12		0.11	0.38	0.25		0.37
37	昭明(3)	0.09		0.11	0.07	0.05		0.12
38	昭明(4)	0.07		0.09	0.17	5.83	1.4	2.47
39	鳳鳴(1)	0.43		0.26	0.31	0.29		0.35
40	潮寮(1)	0.95	0.56	0.48	0.22	1.05		0.88
41	潮寮(2)	1.42	0.77	1.89	0.46	3.52	2.60	1.74
42	潮寮(3)	1.09	1.29	7.23	0.79	3.58	3.10	1.69
43	永芳(1)	1.68	2.98	4.11	2.32	4.27	4.30	2.74
44	永芳(2)	1.84	0.24	0.24	0.64	0.42	1.00	0.85
45	永芳(3)	3.92	0.38	0.50	0.30	0.79	1.40	0.98
46	中正(1)	0.70		0.28	0.63	1.19	2.00	1.22
47	中正(2)	0.64		0.19	0.66	0.60	1.30	0.61
48	新庄(1)	ND	0.24	4.20	0.33	0.63		0.53
49	新庄(2)	ND	0.25	0.87	1.13	1.56	1.80	1.47
50	新庄(3)	ND	N.D.	0.32	0.22	ND		ND
51	崁頂(1)	ND	N.D.	N.D.	ND	ND	5.10	ND
52	崁頂(2)	0.41	0.11	N.D.	ND	ND		ND
53	崁頂(3)	0.10	0.11	N.D.	ND	ND		ND
54	湖州(1)	0.33	2.09	1.55	1.57	2.86	2.50	1.81
55	湖州(2)	1.25	0.14	N.D.	0.41	ND		ND
56	新埤(1)	0.33	6.71	8.51	0.25	1.80		1.84
57	新埤(2)	0.41	0.14	N.D.	0.44	ND		0.44
58	新埤(3)	0.38	0.33	N.D.	0.36		6.20	0.54
59	新埤(4)	0.91	0.09	N.D.	0.37	ND		ND
60	萬隆(1)	ND	N.D.	N.D.	1.48	ND		ND
61	萬隆(2)	0.05	0.12	N.D.	0.07	ND		ND
62	萬巒(1)	0.04	0.10	N.D.	0.54	ND		ND
63	萬巒(2)	0.81	0.24	0.58	0.16	0.21	1.20	0.66
64	赤山(1)	2.07		0.88	0.63	0.44		0.37
65	赤山(2)	0.54		0.07	0.27	0.14		0.91
66	赤山(3)	0.50		0.49	0.68	0.07	1.90	1.02
67	大湖(1)	0.95		0.55	0.51	0.65		0.24
68	大湖(2)	0.12		0.75	ND	ND		ND

表 3.2-21 地下水之歷年氨態氮濃度(續)

編號	井名	87 年	88 年	89 年	92 年	93 年	94 年	101 年
69	大湖(3)	0.30		0.05	ND	ND		ND
70	大湖(4)	0.33		0.52	0.41	0.42	1.30	ND
71	餉潭(1)	0.40		N.D.	0.07	ND		ND
72	餉潭(2)	0.35		N.D.	0.74	0.21		ND
73	萬丹(1)	0.11	0.35	0.30	0.20	0.18		ND
74	萬丹(2)	0.64	0.39	N.D.	ND	ND		ND
75	萬丹(3)	0.25	0.34	0.07	ND	ND		ND
76	清溪(1)	0.12	0.43	0.68	0.49	1.49		0.64
77	清溪(2)	ND	0.15	N.D.	0.27	ND		ND
78	清溪(3)	ND	0.39	0.07	0.23	0.14		ND
79	前進(4)	0.31		0.11	0.57	0.21		ND
80	九曲(1)	ND	0.15	0.15	ND	ND		ND
81	九曲(2)	0.11	0.14	0.07	ND	ND		ND
82	大樹(1)	1.04		0.06	0.31	0.15		0.28
83	大樹(2)	0.45		N.D.	ND	ND		ND
84	大樹(3)	1.01		N.D.	ND	ND		ND
85	大樹(4)	0.62		N.D.	ND	ND		ND
86	溪埔(1)	0.10	0.07	N.D.	0.21	ND		ND
87	溪埔(2)	ND	N.D.	N.D.	ND	ND		ND
88	溪埔(3)	0.07	0.16	N.D.	0.09	ND		ND
89	內埔(1)	0.16	N.D.	N.D.	ND	ND		ND
90	內埔(2)	0.08	0.30	N.D.	ND	ND		ND
91	西勢(1)	0.17	0.09	0.05	ND	ND		ND
92	西勢(2)	0.34	0.95	0.39	0.33	0.60	0.50	0.42
93	西勢(3)	0.29	0.15	N.D.	0.04	ND		ND
94	西勢(4)	0.14	0.19	N.D.	0.27	ND		ND
95	老埤(1)	0.11	N.D.	N.D.	0.15	ND		ND
96	老埤(2)	0.22	N.D.	N.D.	ND	ND		ND
97	建興(1)	0.08	0.07	N.D.	0.35	ND		ND
98	建興(2)	0.26	N.D.	N.D.	ND	ND		ND
99	繁華(1)	0.50		N.D.	ND	ND		ND
100	繁華(2)	0.72		N.D.	ND	ND		ND
101	瑪家(1)	0.28	0.12	0.05	0.07	ND		ND
102	瑪家(2)	ND	0.10	N.D.	0.25	ND		ND

表 3.2-21 地下水之歷年氨態氮濃度(續)

編號	井名	87 年	88 年	89 年	92 年	93 年	94 年	101 年
103	瑪家(3)	ND	0.09	0.23	ND	ND		ND
104	海豐(1)	1.10	0.17	0.12	0.51	0.22		0.36
105	海豐(2)	ND	0.07	N.D.	ND	ND		ND
106	海豐(3)	0.77	0.22	0.05	0.43	0.36	0.50	0.50
107	九如(1)	0.53	0.19	0.18	0.29	0.26		0.25
108	九如(2)	0.17	0.13	N.D.	ND	ND		ND
109	彭厝(1)	0.77		N.D.	ND	ND		ND
110	彭厝(2)	0.54		0.11	ND	ND		ND
111	鹽埔(1)	0.68	0.05	N.D.	0.22	ND		ND
112	鹽埔(2)	0.07	N.D.	N.D.	ND	ND		ND
113	里港(1)	0.09	N.D.		ND	ND		ND
114	里港(2)	0.45	0.11	0.14	0.66	ND		ND
115	關福(1)	0.54		N.D.	ND	ND		ND
116	關福(2)	0.26		N.D.	ND	ND		ND
117	新南(1)	0.67		N.D.	0.24	ND		ND
118	新南(2)	0.75		0.11	0.06	ND		ND
119	高樹(1)	0.11	N.D.	N.D.	0.04	ND		ND
120	高樹(2)	0.70	0.05	0.07	ND	ND		ND
121	泰山(1)	0.14	0.12	N.D.	0.06	ND		ND
122	泰山(2)	0.13	N.D.	N.D.	ND	ND		ND
123	土庫		0.09	0.06	0.42	0.15		0.13
124	吉洋		N.D.	N.D.	1.19	1.05		1.55
125	吉洋(1)	0.21		N.D.	0.08	ND		ND
126	吉洋(2)	0.38		0.24	0.46	0.38		0.21
127	中州(1)	0.53	0.07	N.D.	ND	ND		ND
128	中州(2)	0.69	0.26	0.24	ND	ND		ND
129	美濃(1)	0.68	0.25	1.57	0.15	0.14	0.60	0.36
130	美濃(2)	0.45	N.D.	0.07	0.05	ND		ND
131	旗山(1)	0.64		0.08	0.44	0.52		0.34
132	旗山(2)	0.57		1.20	0.49	0.78	1.30	0.84

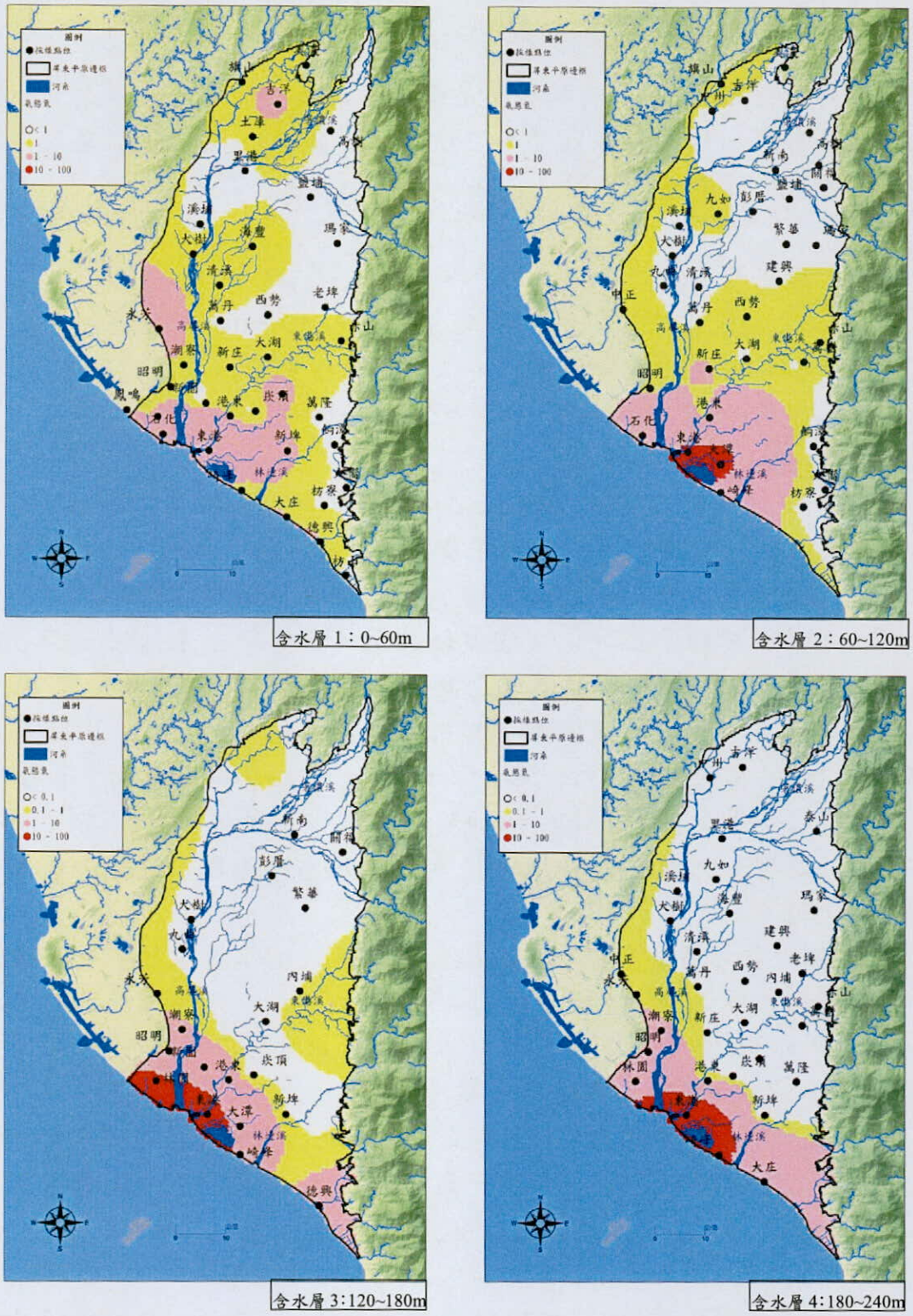


圖 3.2-21 屏東平原 2012 年地下水之氨態氮分布

3.2.3 地下水水質調查成果彙整

今年度共進行地面水 12 處採樣、旱雨季各一次。地下水採樣共 29 站 65 口井。化驗項目有現場檢測：導電度、溫度、pH、溶氧、氧化還原電位；實驗室化驗：碳酸氫根、硫酸根、氯離子、鈣、鎂、鈉、鉀、硝酸鹽、氨氮，總共 14 項。

水質調查成果可摘錄為下列 8 點：

1. 地下水之氧化還原帶：溶氧帶之含水層溶氧>1mg/l，此區域由高樹、新南至大響及枋寮等。硝酸鹽帶的分布再往西、分布更廣(如圖 3.2-7 所示)。溶氧帶與地下水保護區(沒有上覆泥層、且有巨厚的含水層)的劃設範圍相近，但並不必然完全重疊。

2. 扇頂水質地化特性：扇頂地下水水大都以碳酸氫鈣水質為主，只有少數地下水偏碳酸氫鈉，此現象應為陽離子交換的結果。

3. 地面水之水質：地面水的溶氧約 3-7mg/l，硝態氮的濃度則以東港溪上游明顯濃度較高，主要離子成分以碳酸氫鈣為主，只有萬金、萬巒、西方與來義的鈉離子稍高，前三點的硝酸鹽濃度也高，可能受生活汙水排放影響。

4. 地下水歷年導電度：僅吉洋觀測井導電度偏高，如吉洋於 2011 年的導電度為 776 μS/cm，其餘井皆小於 750 μS/cm(灌溉用水標準)。經由 Mann-Kendall 趨勢統計，有 2 口井的導電度有增加的趨勢—大響(1)及瑪家(1)；有 2 口井的導電度有減少的趨勢—枋寮(2)及鹽埔(2)。與濁水溪扇頂比較，屏東地區扇頂地下水並沒有鹹化現象。

5. 觀測井的垂向導電度分布，可能反應出不同的水質來源，荖濃溪地區垂向導電度以高樹二變化最大，導電度約 450-780 μS/cm、隘寮溪地區以鹽埔變化最大、約 300-580 μS/cm、林邊溪及力力溪地區以萬隆(2)變化最大、導電度約 220-500 μS/cm。屏東地區扇頂區的導電度皆不大。

6. 地下水歷年硝酸鹽濃度：林邊溪及力力溪地區以萬巒(1)最高、濃度為 5.21 mg/l；隘寮溪地區以建興(1)最高、濃度為 5.85 mg/l；荖濃溪地區以吉洋最高、濃度為 3.50 mg/l。屏東地區扇頂區的硝態氮濃度皆小於 10mg/l(環保署飲用水源水質標準)。

7. 沿海地下水鹽化之現況：統計沿海含水層共 27 口觀測井，從 87 年至 101 年之導電度，前幾年有變鹹、但近年有變淡的趨勢，統計中間值從 2120 μS/cm 增加為 7320 μS/cm，但 2012 年減為 2780 μS/cm。統計平均值從 12948 μS/cm 增加為 16417 μS/cm，2012 減為 9742 μS/cm。

8. 地下水氨態氮之現況：以西南靠海側較高，92 年度共有 42 口大於 1 mg/L，

94 年有 32 口，101 年度有 30 口(22%)，其中以東港四的濃度最高，達 18.7 mg/L 。氨態氮較高的區域為泥質地層較多的中下游，可能由地層中的有機物溶解/降解，但較淺部的地下水，不排除可能有人為汙染。

3.3 主要補注區範圍綜合分析

前述 3.1 及 3.2 節分別以地球物理方法與地球化學方法，針對屏東平原進行現地調查，二維地電阻調查結果中，礫石材質之地電阻遠高於泥質材質，因此高地電阻區域亦可呈現屏東平原高補注區域；在水質採樣調查中，地下水溶氧量之高低亦可呈現局部區域之補注能力，因此地下水高溶氧區域亦可作為補注能力高低之佐證。

本節以補注潛勢訂定研究區域補注能力之空間分布，由於其是以潛勢分數之相對高低，作為補注能力強弱之空間分布依據。因此如欲訂定絕對數值，以作為主要補注區之劃分門檻，則需要搭配其他調查方法與調查結果，本計畫以高地電阻區域與高溶氧區域作為基準，以三者空間分布趨勢最為接近為原則，決定補注潛勢門檻分數，屏東平原之門檻分數為 56 分。在 3.1 節二維地電阻調查結果中，礫石之地電阻遠高於泥質，因此高地電阻區域亦可呈現屏東平原高補注區域；在水質採樣調查中，地下水溶氧量之高低亦可呈現局部區域之補注能力，因此地下水高溶氧區域亦可作為補注能力高低之佐證。

圖 3.3-1 為屏東平原主要補注區分布圖，其綜合前述高補注潛勢區、高地電阻區與高溶氧區三者，並搭配岩心鑽探柱狀圖與數位地表高程(DTM)等資訊繪製而成。其主要範圍包含屏東平原北區與南區，北區包含旗山鄉、美濃鄉、高樹鄉、里港鎮、鹽埔鄉、長治鎮及內埔鄉，與部分萬巒鄉，南區部分包含萬巒鄉、潮洲鄉與新埤鄉。由於部分地區不同數據，對於補注能力之評判則有不同之結論，在此特別提出說明，主要在於四個區域，由北至南分別為里港一帶、老埤一帶、萬巒一帶與餉潭一帶。

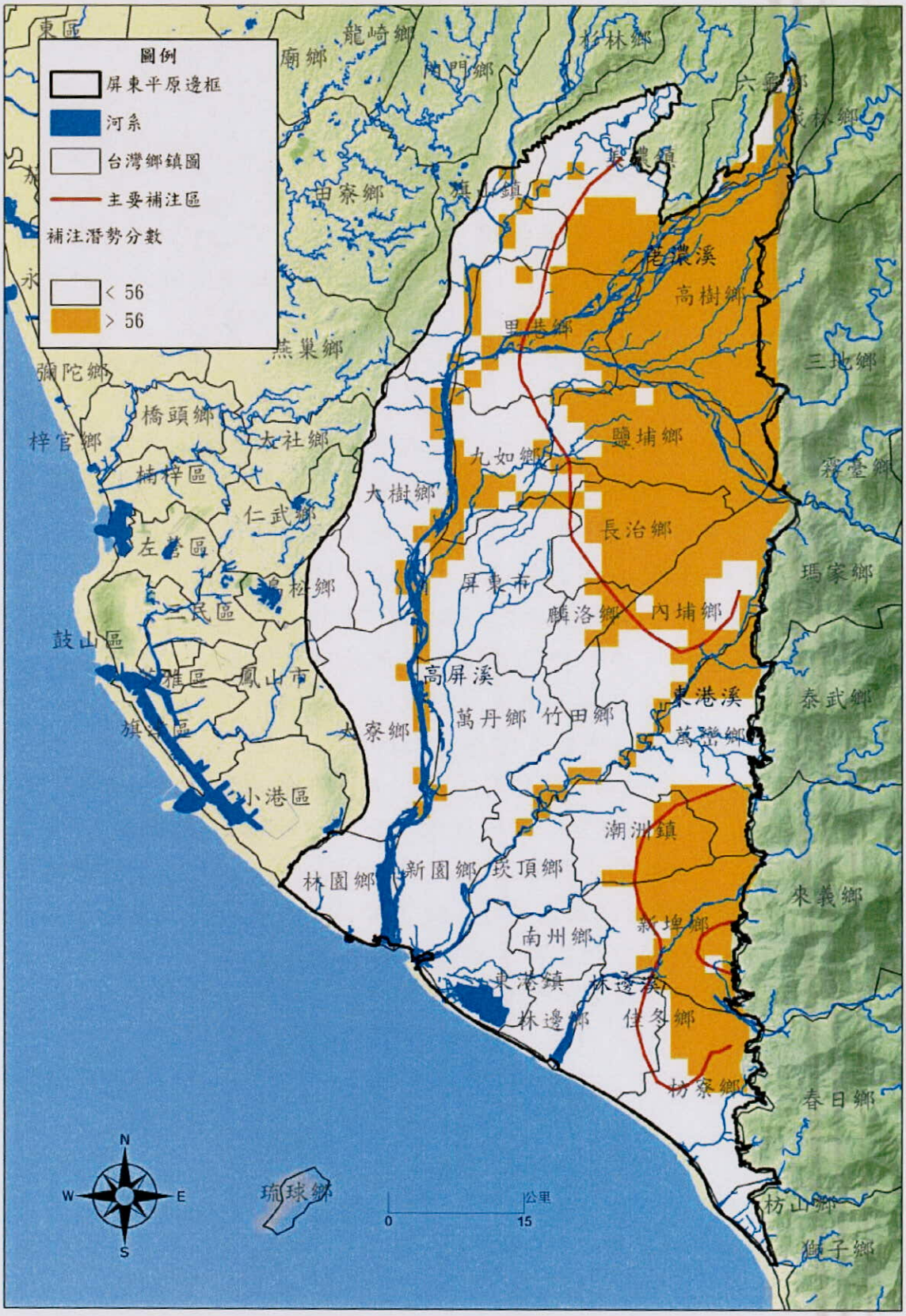


圖 3.3-1 地下水主要補注潛勢分數分布區

(1) 里港一帶主要補注區邊界：

圖 3.3-2 為里港一帶之主要補注區綜合分析圖，圖中綠線為高電阻區邊界，其分別由 N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7 與 N14 所描繪而成。圖 3.3-3 為 N3 測線之二維地電阻影像剖面圖，其 17 至 55 公尺間之地電阻值約為 40(ohm-m)，屏東平原高電阻門檻值為 70(ohm-m)，則顯現 N3 測線(鄰近里港站)位於主要補注區外，故測線由里港以東經過，亦即主要補注區位於里港站以東。

然其他調查結果則有不同之結論，以里港(1)之地下水溶氧量為 4.98(mg/l)，其開篩位於地表下 36 至 66 公尺間，顯現在此深度之地下水受到大量之外界補注量之影響。圖 3.3-4 為里港站之岩心鑽探柱狀圖，地表下至 15 公尺間缺少岩心記錄，但往下至 70 餘公尺皆為砂或礫石等，亦可證明地表下 70 餘公尺間之高透水性。

由於地電阻的結論與其他資訊相違背，可能是里港站鄰近區域的沈積同時受到北方旗山一帶山區土質之影響，因此土壤特性與東方潮州斷層之土質不一致，造成砂質土壤之地電阻率較低之原因。基於上述原因，本計畫則將本區域之主要補注區邊界往西延伸，使其涵蓋里港站，如圖 3.3-3 所示。

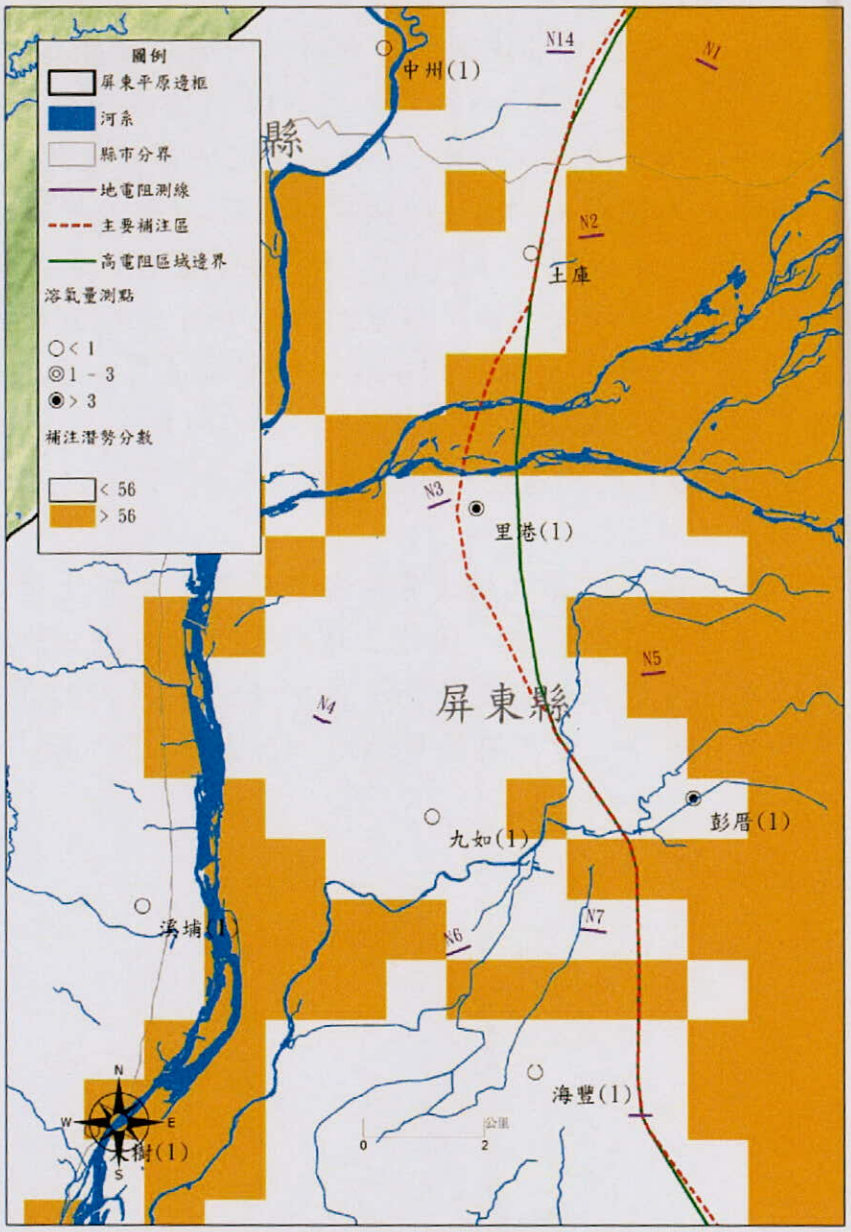


圖 3.3-2 主要補注區綜合分析圖(里港一帶)

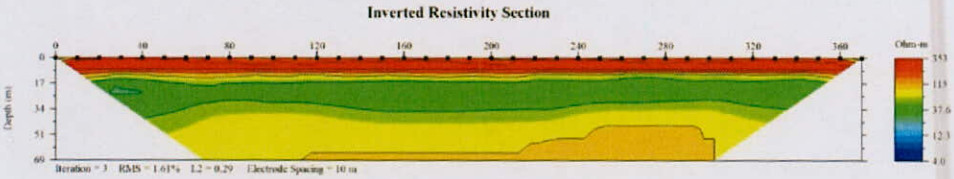


圖 3.3-3 N3 二維地電阻影像剖面圖

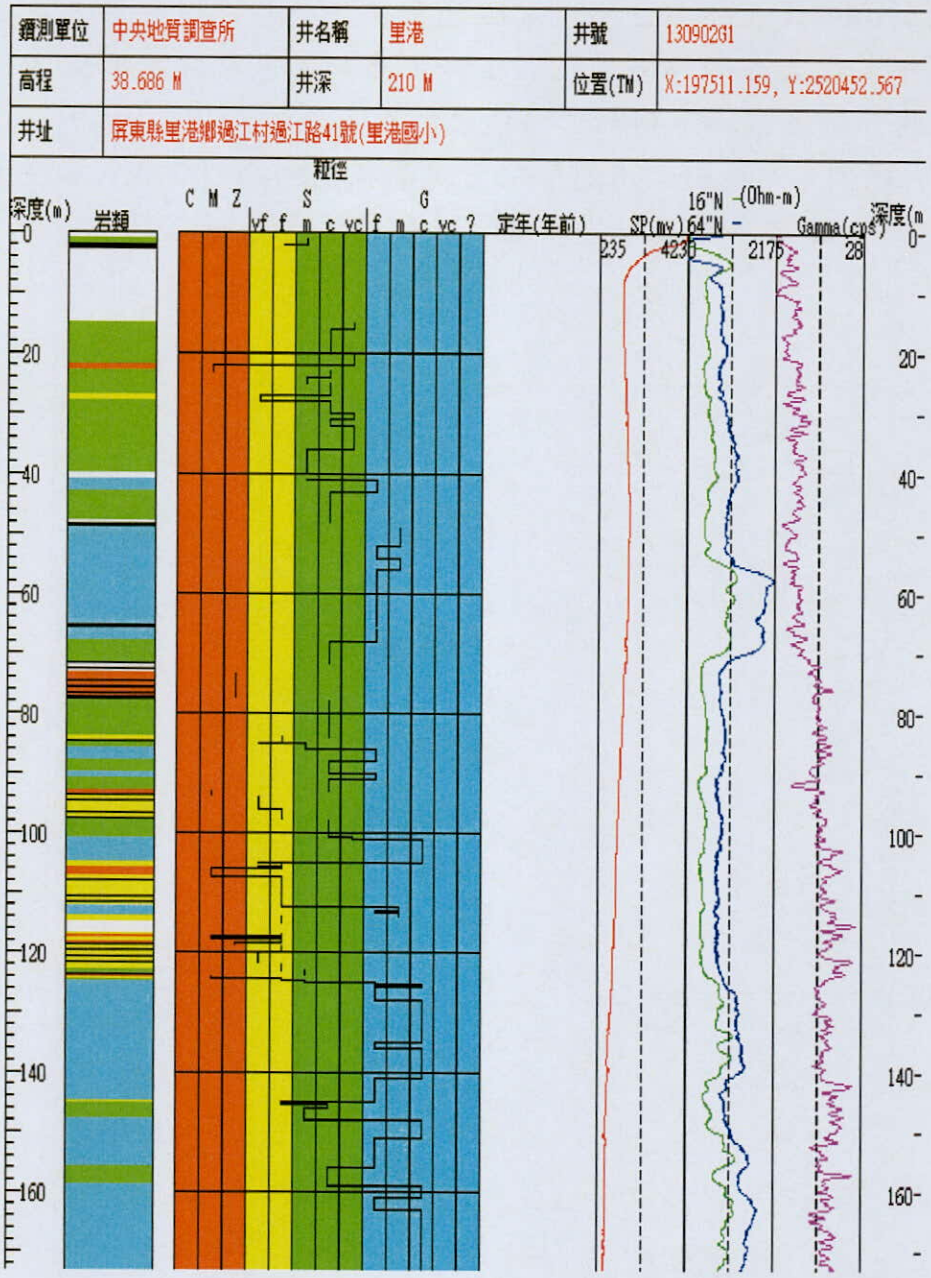


圖 3.3-4 里港岩心柱狀圖

(2) 老埤一帶主要補注區邊界：

圖 3.3-5 為老埤一帶的主要補注區綜合分析圖，其中亦呈現了地表高程變化。老埤(1)之地下水溶氧量為 4.21(mg/l)，其開篩位於地表下 24 至 42 公尺間，圖 3.3-6 為老埤站之岩心鑽探柱狀圖，第一含水層位於地表至地表下 44 公尺間，在地表下 20 公尺處，約有 5 公尺厚的泥層阻隔，顯現該站高溶氧應受到鄰近區域水平流入之影響，而非垂直入滲補注造成的。圖 3.3-7 為老埤站之二維地電阻影像剖

面圖，影像剖面中代表礫石之高地電阻已呈現局部凸鏡體狀，且夾雜於代表砂泥之低電阻中。由此可知該區域已經位於主要補注區與非主要補注區之過渡帶中。綜合上述分析，該站不列入主要補注區中。

此外，在建興、老埤與潮州斷層間出現高程上的劇烈變化，屬於臺地地形，如圖 3.3-5 所示，由於本計畫以平原區之主要補注區為研究對象，故不列入考量範圍。

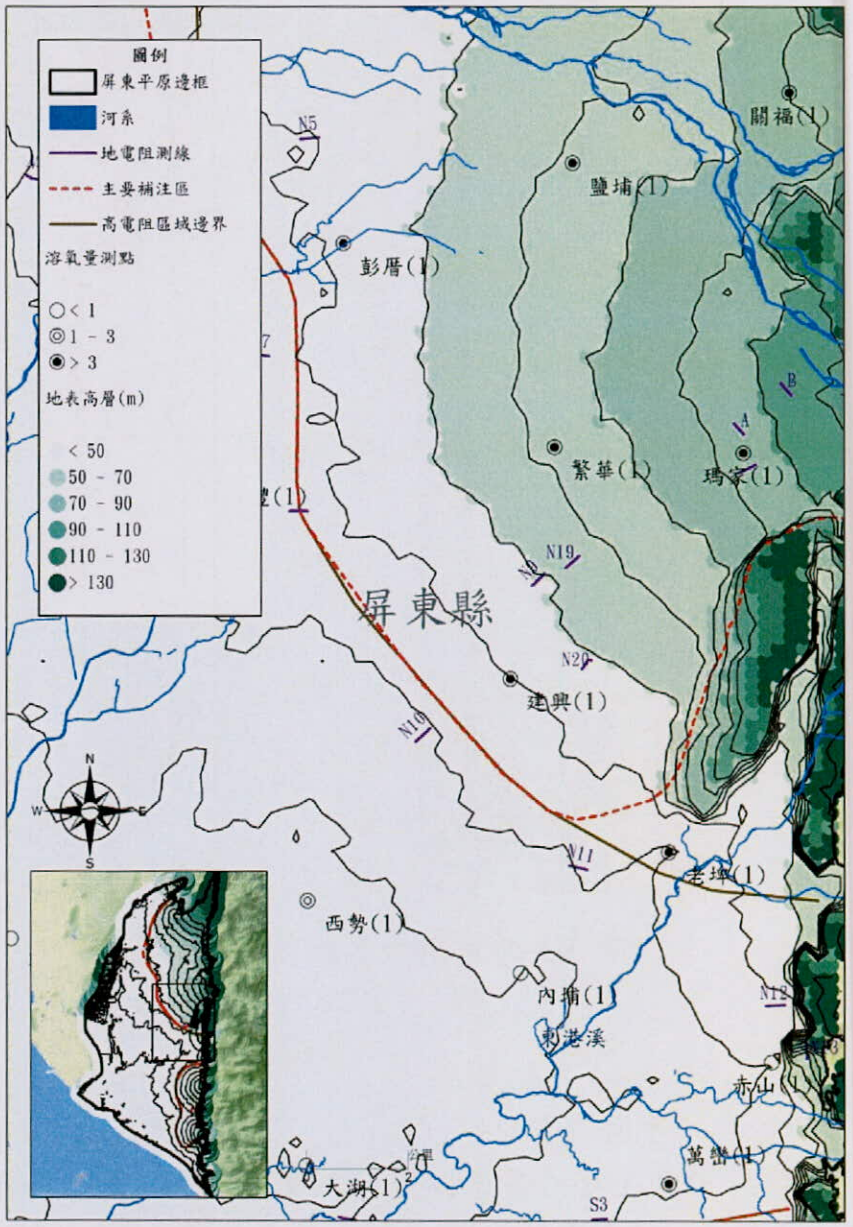


圖 3.3-5 地表高程變化圖(老埤一帶)

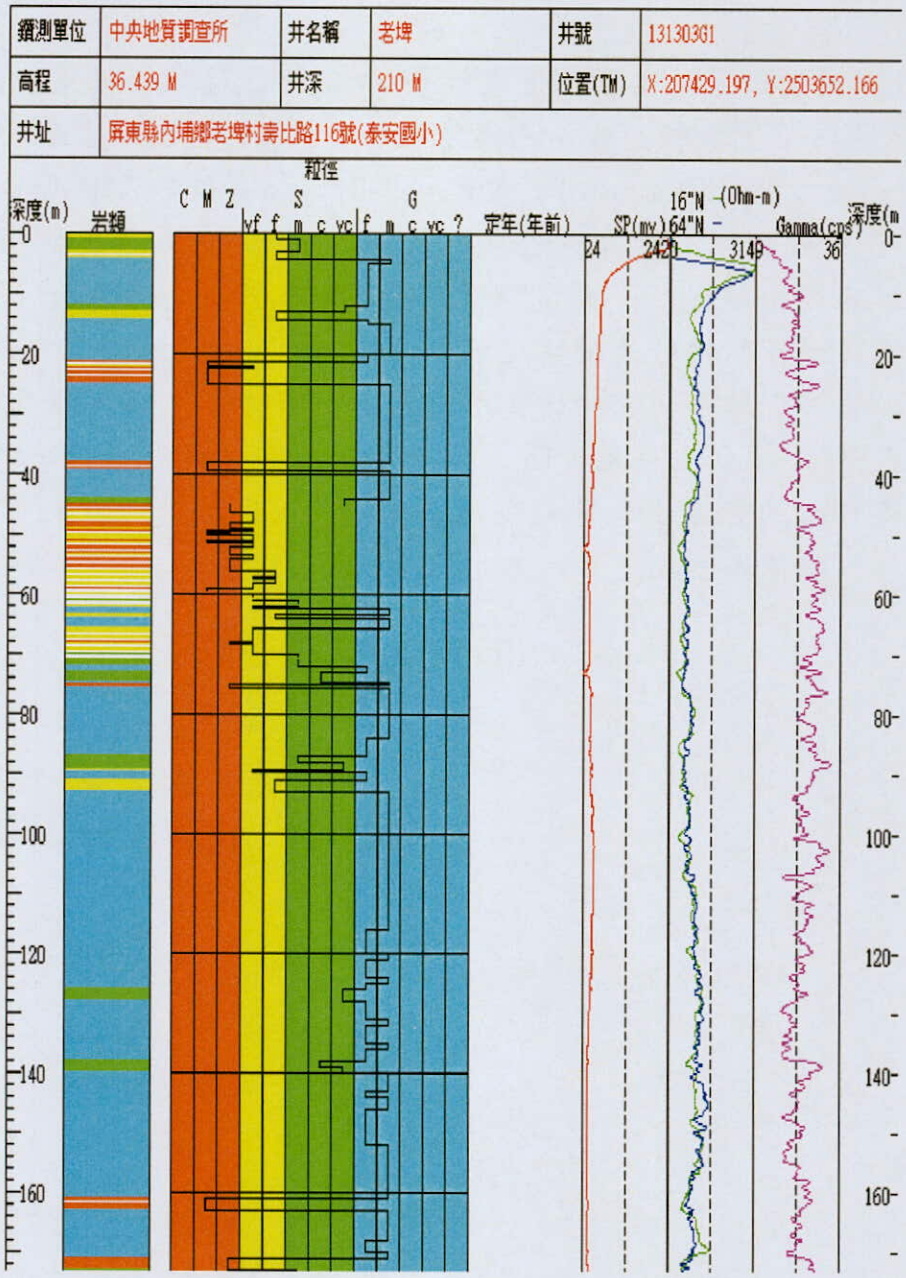


圖 3.3-6 老埤站岩心柱狀圖

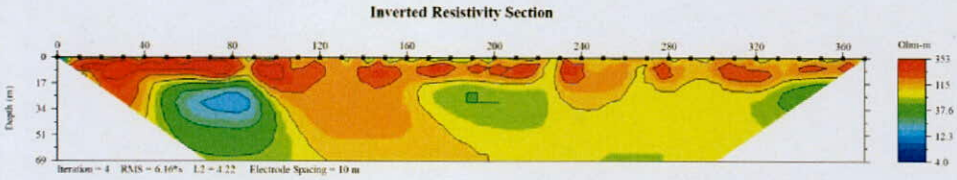


圖 3.3-7 N12 老埤二維地電阻影像剖面圖

(3) 萬巒一帶主要補注區邊界：

圖 3.3-9 為萬巒一帶之主要補注區綜合分析圖，該區域由南至北依序由 S9、S4、S-11 與 S3 四條測線所描繪，測線結果如圖 3.3-9 至 3.3-12 所示，測線結果以 S-11 開始出現低於 75(Ohm-m)之訊號，S3 則完全是低於 75(Ohm-m)之訊號，故顯現 S-11 應位於補注能力轉弱之過渡帶上。圖 3.3-13 則是萬巒站之岩心鑽探柱狀圖，地層不斷出現泥質，顯現該區域之垂直入滲能力應不佳。綜合上述結果，主要補注區邊界應位於萬巒站至 S-11 測線之間。

但是以水質調查結果而言，卻有不同結論。萬巒(1)之溶氧量為 4.12(mg/l)，開篩位於地表下 60 至 80 公尺之間，屬於高溶氧量。其原因可能是側向流入，且含水層砂礫部份的有機質含量較少，所以溶氧消耗較慢。在此則依據高電阻區域邊界作為主要補注區之邊界。

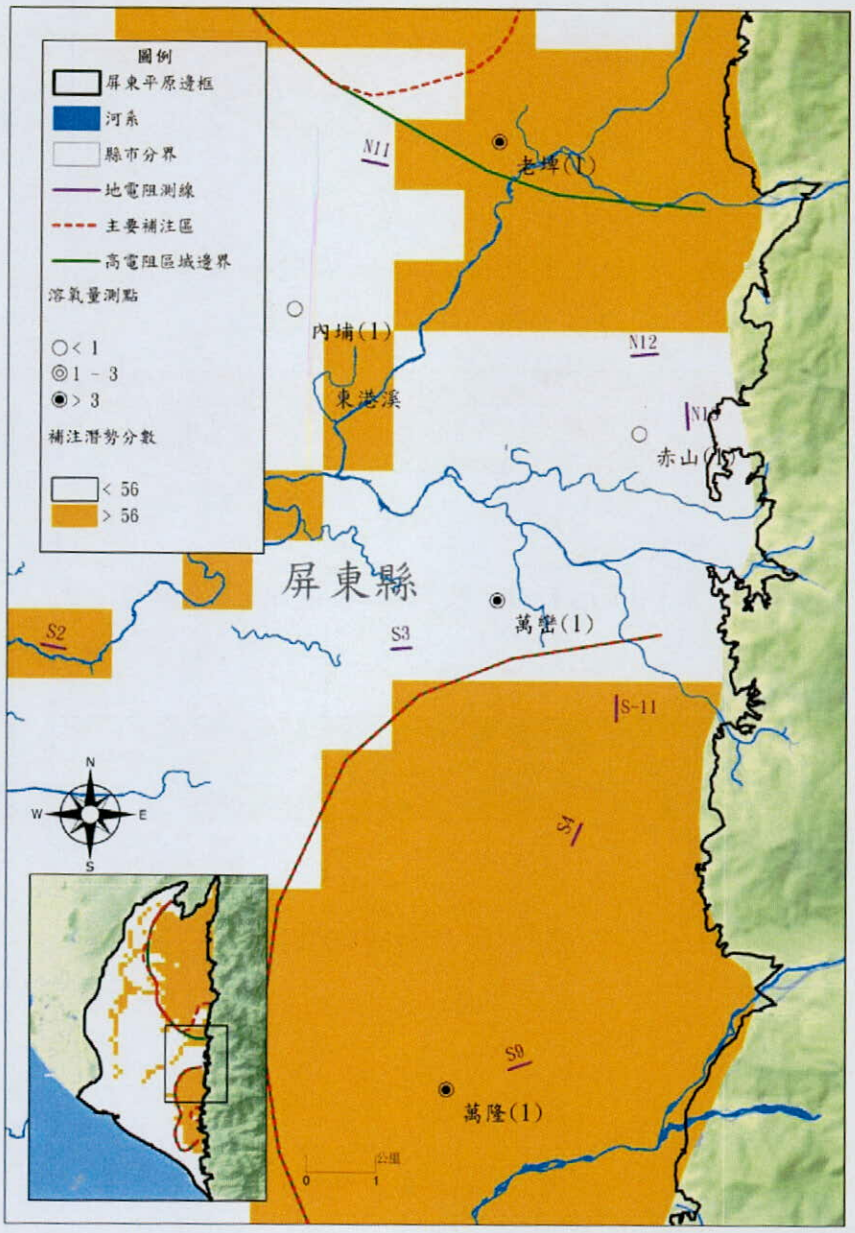


圖 3.3-8 主要補注區綜合分析圖(萬巒一帶)

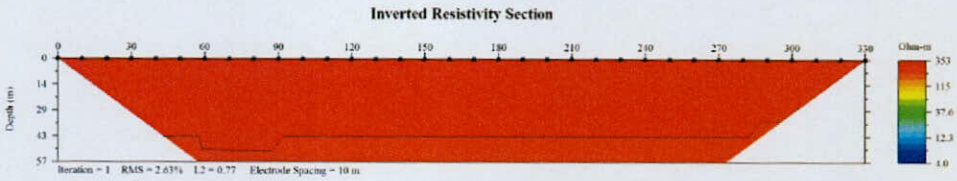


圖 3.3-9 S9 測線二維地電阻影像剖面

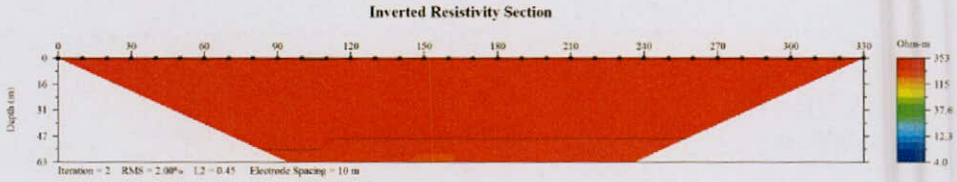


圖 3.3-10 S4 測線二維地電阻影像剖面

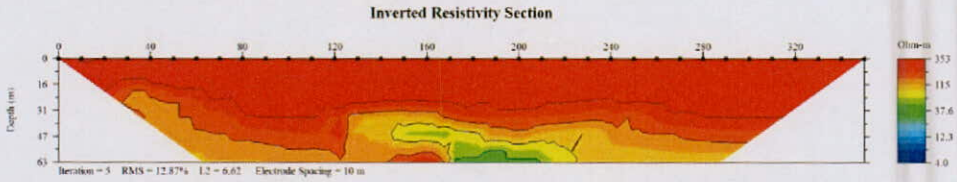


圖 3.3-11 S-11 測線二維地電阻影像剖面

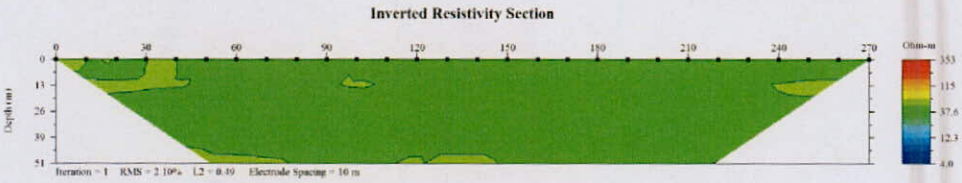


圖 3.3-12 S3 測線二維地電阻影像剖面

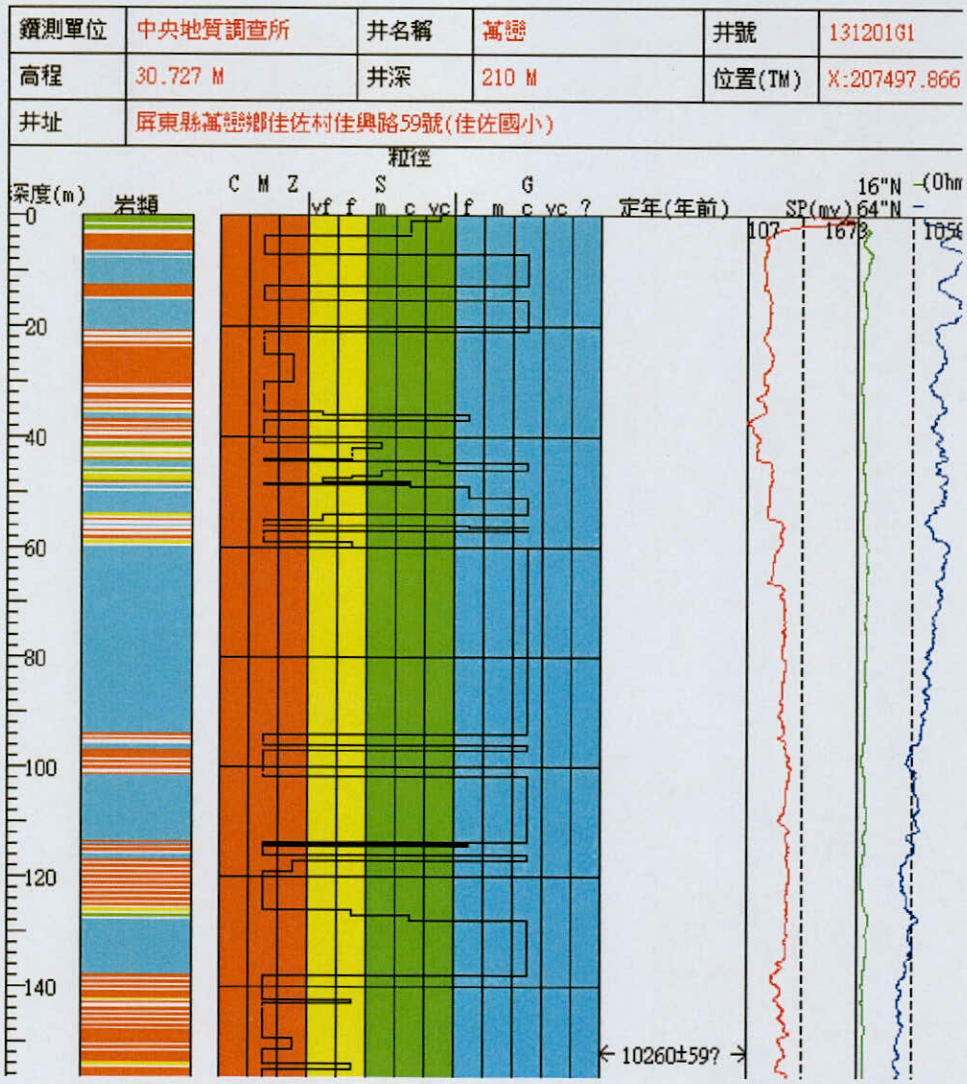


圖 3.3-13 萬巒岩心柱狀圖

(4)餉潭一帶主要補注區邊界：

最後，圖 3.3-14 為南方主要補注區之綜合分析圖，由於地電阻測線多往西南方下游搜尋高電阻的邊界，然餉潭緊鄰潮州斷層，因此並無地電阻之影像剖面可供評判。本區域僅有水質資料與岩心鑽探柱狀圖可供評估分析，餉潭(1)之水質溶氧為 0.84(mg/l)，其溶氧相對較低，其開篩位於地表下 24 至 60 公尺間，從圖 3.3-15 之餉潭岩心鑽探柱狀圖來看，該站存在許多泥質，其厚度厚於砂或礫石。

該區域為來社溪與力力溪分別由南北環繞，至西邊匯集成林邊溪，餉潭站位於來社溪與力力溪兩個沖積扇邊緣，亦即為兩沖積扇之分水嶺處，故表層堆積大量泥質存在，不應列入主要補注區中。本計畫以平行於兩河流流線之方式，將餉潭站與鄰近區域從主要補注區移除。

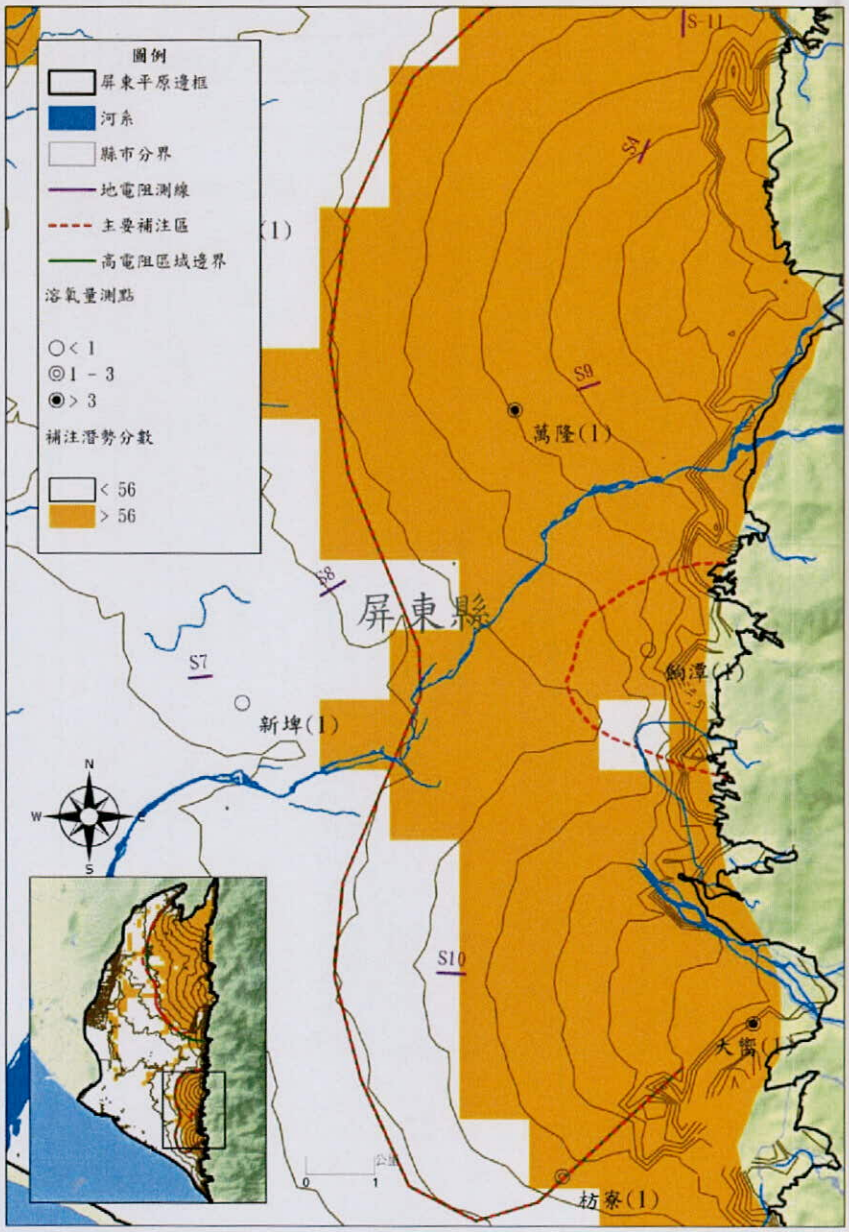


圖 3.3-14 主要補注區綜合分析圖(餉潭一帶)

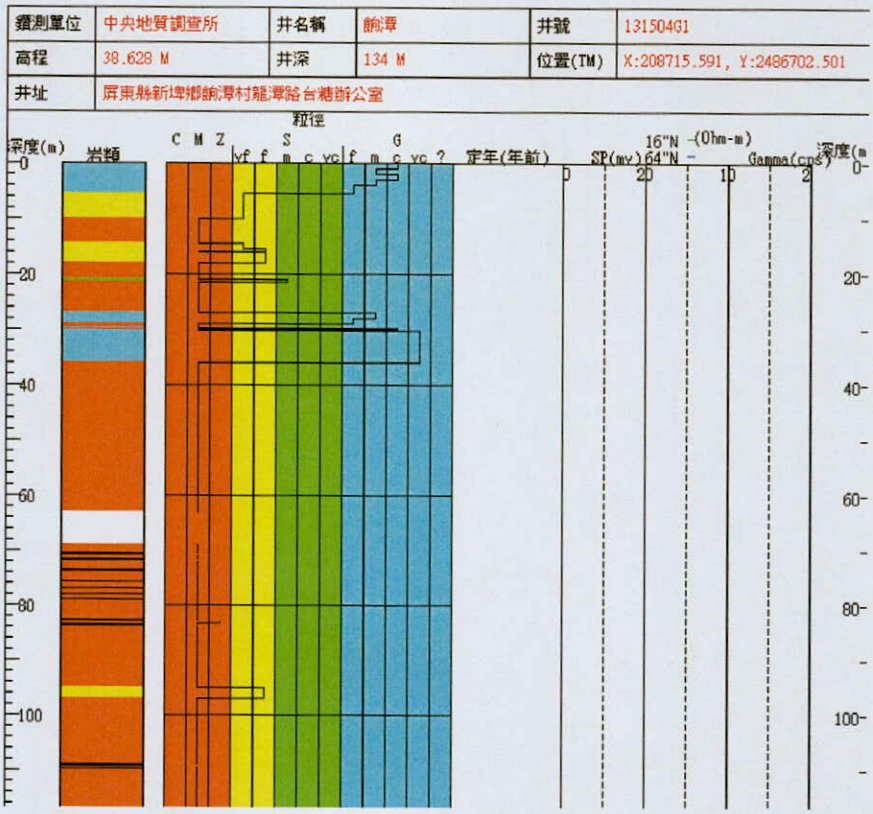


圖 3.3-15 餉潭岩心柱狀圖

第四章地下水歷線法分析

4.1 分散型地下水歷線法理論概述

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

圖 4.1-1 為多層系統的地下水分層示意圖，其中地下水系統會由多個含水層與阻水層交互間雜，阻水層結構多存在於下游區域，延伸至上游區域則會逐漸尖滅，因此上游區域則呈現上下通透。然而過去運用原始型或修正型地下水歷線法，皆是以第一層的觀測水位進行，由於通透區之不同分層觀測水位皆趨近於一致，因此顯現在通透區之最表層水位反應，為該區域上下分層抽水之綜合效應，圖 4.1-2 為原始型或修正型地下水歷線法之地下水系統圖(江崇榮等人,2006; 張良正等人,2009; 張良正等人,2010; 張良正等人,2011) ，其系統含全區第一層與通透區的下層。惟後續分析將與地下水數值模式比較，而地下水數值模式之系統較近似於圖 4.1-1，分析比較上較為複雜。因此本計畫延伸原始型與修正型地下水歷線法之概念，惟以圖 4.1-1 為概念系統，同時取用上下不同分層之觀測水位，以內插演算法結合，稱為分散型地下水歷線法。

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

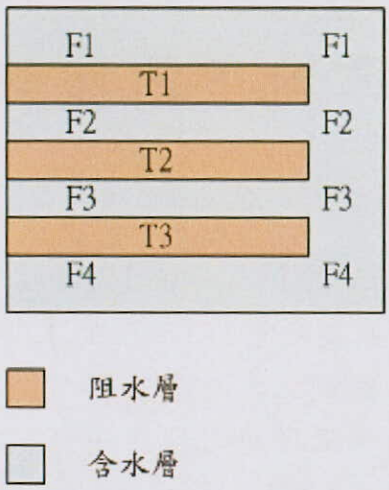


圖 4.1-1 地下水系統分層示意圖

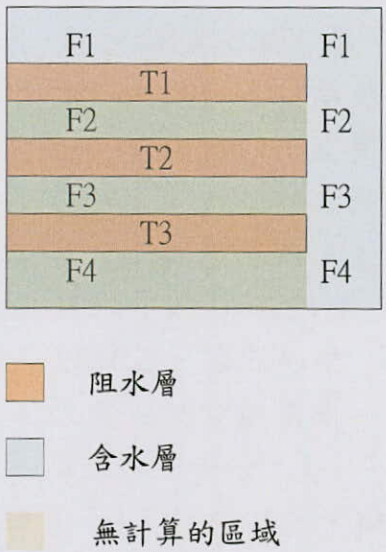


圖 4.1-2 原始型或修正型地下水歷線法之地下水系統圖

4.1.1 地下水位內插

以地下水觀測水位為基礎，以河川觀測水位或邊界條件等為輔，搭配水文地質架構，以分層式距離倒數平方法內插推估系統水位($h^t_{i,j,k}$)。內插演算法是以控制點之數值為基礎，以加權平均的方式推估空間上任意點之數值，不同內插方法有不同之權重估算方式。圖 4.1-1 為控制點控制點設置的示意圖。

地下水系統之水文地質架構影響地下水流動與水位變化，一般而言在含水

層中因透水性良好，因此多僅有水平流動，而無垂向流動，故在水力梯度方面可假設垂向之水力梯度為 0 ；在阻水層的部份，則多為垂向流動，故阻水層上下方之含水層則具有垂向水力梯度；在觀測井濾孔開篩方面，大多數開篩會坐落於相同分層中，因此在此假設濾孔開篩範圍之水位推估值應等於觀測水位。為呈現上述特性，控制點的給定則依據下列條件，將觀測水位設定於控制點上。

濾孔開篩位置：依據濾孔開篩範圍，將控制點給在濾孔開篩的上緣與下緣，因此可確保後續內插上，在此深度範圍內之推估值與觀測水位一致。

濾孔上方或下方有阻水層：如圖 4.1-3 所示，若濾孔上方或下方有阻水層存在，則在阻水層之下緣或上緣高程處，加入一個控制點。如此可確保在相同分層中，垂向之推估水位一致，無垂向水力梯度；在跨越阻水層時，由於阻水層的上下緣均有控制點，其分別由上下兩觀測井之觀測水位給定，因此若分層觀測值呈現水位差，則阻水層位置之推估值亦會呈現垂向水力梯度。

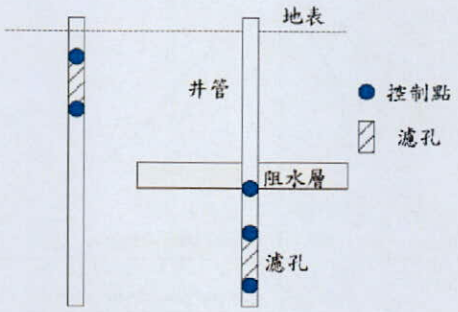


圖 4.1-3 控制點設置示意圖

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

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

4.1.2 蓄水量計算

$$S_i^t = \begin{cases} n_i A_i \times (t_i - b_i) + s_{s,i} A_{v,i} \times (h_i^t - t_i) \times (t_i - b_i) & Confined \\ \quad = s_{s,i} A_{v,i} \times + s_{s,i} A_{v,i} \times (h_i^t - t_i) + Const & \\ s_{y,i} A_{v,i} \times (h_i^t - b_i) & Unconfined \end{cases} \quad \text{(式 4.1-1)}$$

其中，h_i^t 與 S_i^t 分別代表時刻 t 於第 i 個控制體積蘊藏之水位與地下水儲蓄水量，$S_{s,i}$ 與 $S_{i,y}$ 則分別代表土壤之比儲率(specific storage) 與比流出率(specific yield)，b_i、t_i 與 $A_{v,i}$ 則分別代表控制體積之底部高程、頂部高程與俯視面積。藉由式(4.1-1) 與前述之內差水位即可求得控制體積內的蓄水量變化。

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

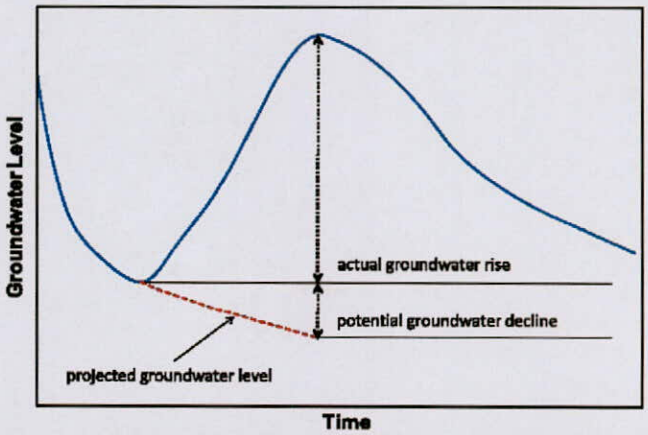


Fig. 3 Potential groundwater decline curve (*dashed red line*) and measured groundwater level (*solid blue line*) resulting from recharge in an unconfined aquifer (after Healy and Cook 2002)

圖 4.1-4 區域降雨歷線與地下水位歷線起伏變化示意圖

圖 4.1-4 為區域降雨歷線與地下水歷線起伏變化示意圖，圖中顯示兩個階段，在降雨事件之前，地下水歷線持續下降，直降雨事件發生為止；當降雨事件發生期間，地下水位迅速抬升，此時水位達至最高點。發生為止；當降雨事件發生期間，地下水位迅速抬升，此時水位達至最高點。Healy and Cook (2002) 將稱為地下水位潛在下降量(potential groundwater decline) ，可視為系統因河川出滲、邊界流出，甚至人工抽水等行為，導致地下水位持續下降，如降雨期間該下降機制仍持續作用，因降雨實質補注造成之水位抬昇量應為觀測到之抬昇量，再加上潛在下降量。

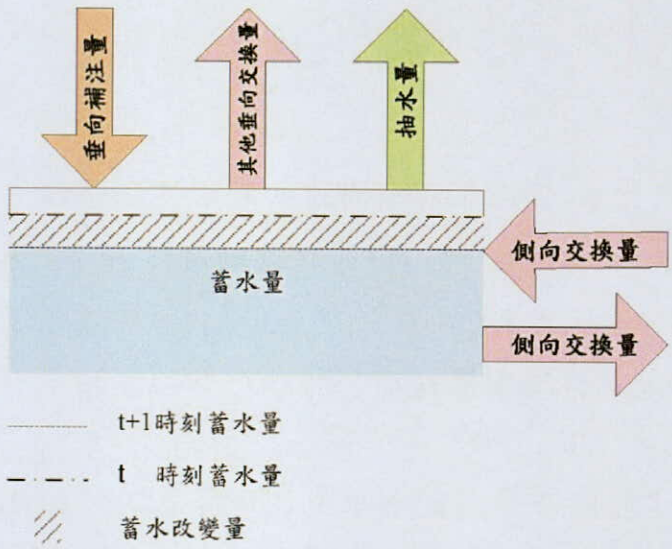


圖 4.1-5 控制體積進出水量概念模型示意圖

圖 4.1-5 為表層水層之概念模型圖，式(4.1-2) 為系統之水平衡方程式，系統之蓄水量變化，受到抽水量、補注量、側向交換量與其他垂向交換量之影響。其他垂向交換量包含河川出滲量與系統對外部之流失量等。前述所謂之地下水潛在下降量，即為水平衡方程式中的抽水量與其他垂向交換量之和。

$$S_i^t - S_i^{t-1} = \Delta S_i^{t,t-1} = I_i^{t,t-1} - W_i^{t,t-1} - VE_i^{t,t-1} + HE_i^{t,t-1} \quad \text{(式 4.1-2)}$$

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

式(4.1-1) 為控制體積內之水位與蓄水量之轉換關係式，其中因應含水層型態之不同，其計算式亦不同。對於非拘限含水層而言，蓄水量可應用比流出率計算；而對於拘限含水層而言，蓄水量之絕對數值應以孔隙率估算填滿孔隙之水量，與以比儲率計算之彈性蓄水部分，然填滿孔隙之水量不為時間之函數，而為一定值，因此後續估算蓄水改變量($\Delta S_i^{t,t-1}$) 時，該定值會彼此對消，因此在計算上可忽略不計。

式(4.1-3) 是以達西公式計算水平流量，並環繞加總可得與鄰近控制體積之水平交換量。另外，藉由參數 ω 與加權平均的方式，計算時刻 $t-1$ 至 t 間之水平交換量。

$$HE_i^{t,t-1}=\left\{\omega\sum_{j=1}^{M}\left[-\overline{K}_{ij}\frac{h_i^t-h_j^t}{l_{ij}}\right]+(1-\omega)\sum_{j=1}^{M}\left[-\overline{K}_{ij}\frac{h_i^{t-1}-h_j^{t-1}}{l_{ij}}\right]\right\}\times A_{h,ij}$$ … .....(式 4.1-3)

$j\in\vec{R}_i$

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

$$\rightarrow I_i^{t,t-1}-W_i^{t,t-1}-VE_i^{t,t-1}=\Delta S_i^{t,t-1}-HE_i^{t,t-1}$$ .....(式 4.1-4)

由於地下水歷線法是以觀測水位為運算基礎，因此藉由觀測水位，搭配式(4.1-1) 與(4.1-3) 即可求得$\Delta S_i^{t,t-1}$與$HE_i^{t,t-i}$，如依據已知與未知來作分類，將已知項置放於右方，未知項則放於左方，即可改寫為式(4.1-4) ，等號左方之$I_i^{t,t-i}$、$W_i^{t,t-i}$與$VE_i^{t,t-i}$等三項則留待後續推估。由於枯水期間，因缺少降雨而無補注事件，因此枯水期之水位變化與水平交換，則是受到人工抽水($W_i^{t,t-i}$) 與其他垂向交換($VE_i^{t,t-i}$) 之影響。

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

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

$$\frac{dS^t}{dt}=f(S^t)$$ .....(式 4.1-5)

$$\rightarrow=-\alpha-\exp\left[\beta\times(S^t-\gamma)\right]$$ .....(式 4.1-6)

4.2 地下水歷線法綜合分析

圖 4.2-1 呈現了 1999 年至 2010 年間屏東平原之蓄水量與降雨量之歷線圖，圖中顯示降雨量於四五月間增加，而十月份時轉而趨弱，地下水位亦有類似的反應，四五月間迅速上升，至十月份時則逐漸下降。雖然屏東平原枯水期可確定為十月至來年之四五月為止，但期間仍間雜間雜小幅降雨，對水位或蓄水量仍有微幅影響。

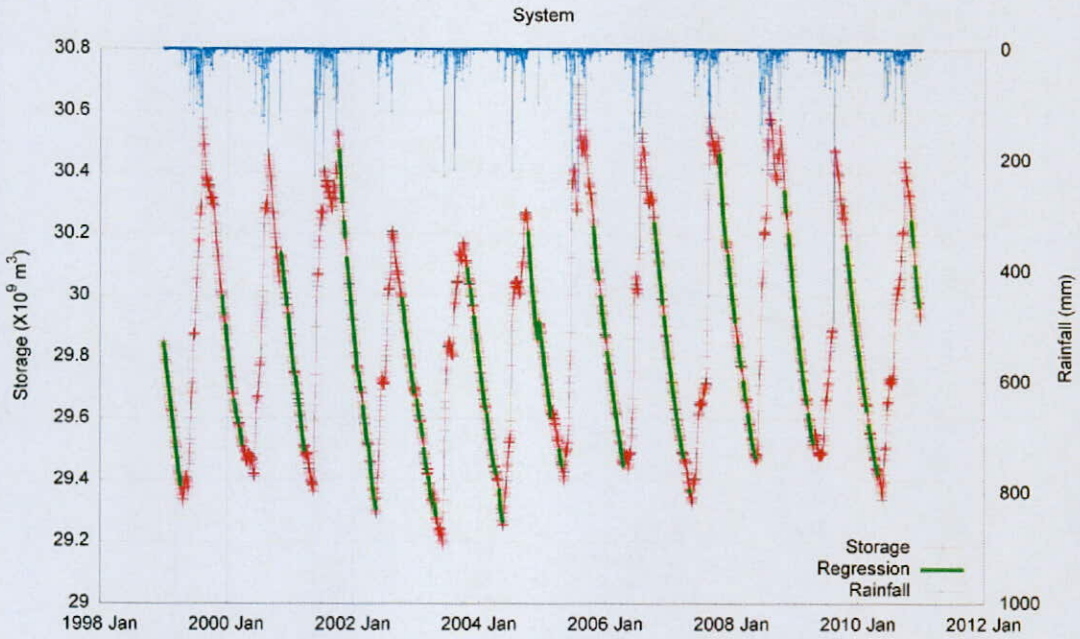


圖 4.2-1 屏東平原全系統蓄水量與降雨量歷線圖

為濾除小幅降雨對地下水歷線法之影響，本計畫以 $5(mm/day)$ 降雨強度為門檻值，若有高於門檻值之降雨事件發生，則不納入枯水段之計算。圖上綠線是以枯水段之蓄水量，搭配二次多項式曲線(式(4.2-1)) 迴歸，由於迴歸式為可微分方程式，其一階微分型態為式(4.2-2) ，即可求得各枯水段之退水斜率，以此方式可有效避免雜訊與誤差之影響，而正確取出退水趨勢。

$y = ax^2 + bx + c$ .....(式 4.2-1)

$y' = 2ax + b$ .....(式 4.2-2)

將前述所得枯水段蓄水量之迴歸式與其一階導函數繪於圖面上，橫軸為蓄水量，縱軸為單位時間蓄水量減少率，如圖 4.2-2 所示。以迴歸分析建立蓄水量對退水斜率之迴歸式，如式(4.2-3) 所示。

$$MRC = -0.003166 - \exp\left[2.447543 \times \left(S^t - 32.526880\right)\right](\times 10^9 m^3 / day)$$

.....(式 4.2-3)

迴歸式中包含常數項與指數項，該迴歸式最小值應等於其常數項(即 -0.003166)，假設系統內水位最低時、蓄水量最少時，對外流失量為零，該系統之抽水量即等於該常數項，因此屏東平原平均每日抽水量應為 $-0.003146 \times 10^9 = -3.146 \times 10^6 (m^3 / day)$，每日抽取 3.146 百萬噸地下水，其餘部分則為其他垂向交換量之效應。

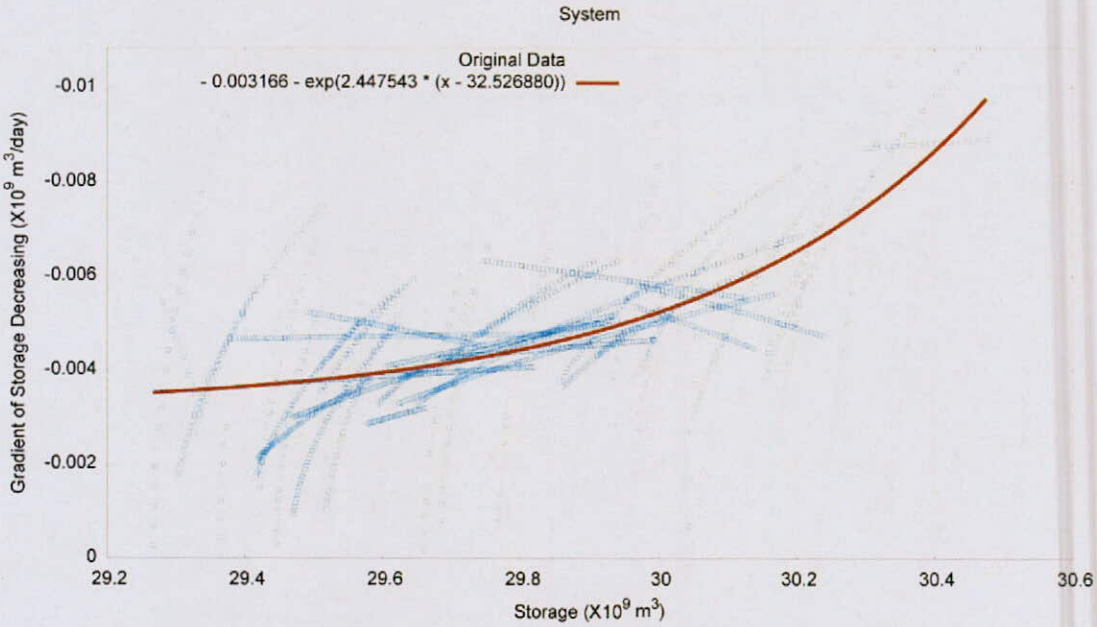


圖 4.2-2 屏東平原蓄水量與蓄水量退水斜率分布圖

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

本計畫以式(4.2-3) 為系統之主要退水線(MRC) ，以年為單位進行水平衡分析，分析結果如表 4.2-1 ，其為地下水歷線法之系統水平衡分析表，表中分析 1999 至 2010 十二年間之水平衡，十二年間之相對豐水年(2005) 之年雨量為 3,294(*mm*) ，相對枯水年(2002) 之年雨量為 1,266(*mm*) 而相對豐水年之抽水量、邊界交換量與補注量分別為 9.70、10.55 與 20.66 億噸，而相對枯水年則為 10.28、4.97 與 12.99 億噸，十二年間之平均值為 9.85、7.75 與 17.66 億噸。

圖 4.2-3 分析各降雨事件之累積降雨量，以及對應之垂向補注量，建立兩者之迴歸關係，式(4.2-4) 為其迴歸式，式中顯示如某降雨事件之累積降雨量為 100(*mm*)，該場降雨所能產生之補注量應為 62.31×10^6 (噸) ，亦即將近 62 百萬噸。

圖 4.2-4 則進一步以降雨事件之長度，建立平均降雨量與平均垂向補注量之關係。相較於圖 4.2-3 其迴歸效果較差。

表 4.2-1 屏東平原地下水歷線法之水平衡分析表

年份	年儲蓄改變量[a]	抽水量[a]	邊界交換量[a]	補注量[a]	降雨量[b]
1999	21.3	-955.4	-818.8	1,795.5	2,701
2000	-0.1	-991.0	-691.8	1,682.7	2,296
2001	31.8	-962.5	-992.3	1,986.7	2,959
2002	-225.5	-1,027.5	-496.9	1,298.9	1,266??
2003	108.7	-1,014.8	-480.0	1,603.5	1,701
2004	44.1	-1,014.8	-538.7	1,597.6	1,658
2005	41.5	-970.5	-1,054.7	2,066.7	3,294?
2006	-70.2	-986.3	-832.9	1,749.0	2,560
2007	203.7	-962.5	-869.1	2,035.3	2,780
2008	-42.4	-982.3	-1,157.6	2,097.5	3,014
2009	-127.7	-1,014.8	-718.0	1,605.1	2,091
2010	88.4	-938.0	-651.7	1,678.1	2,664
總計	73.6				
平均	6.1	-985.0	-775.2	1,766.4	2,415

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

$$f(x) = 0.623132x + 1.900324 \quad \text{(式 4.2-4)}$$

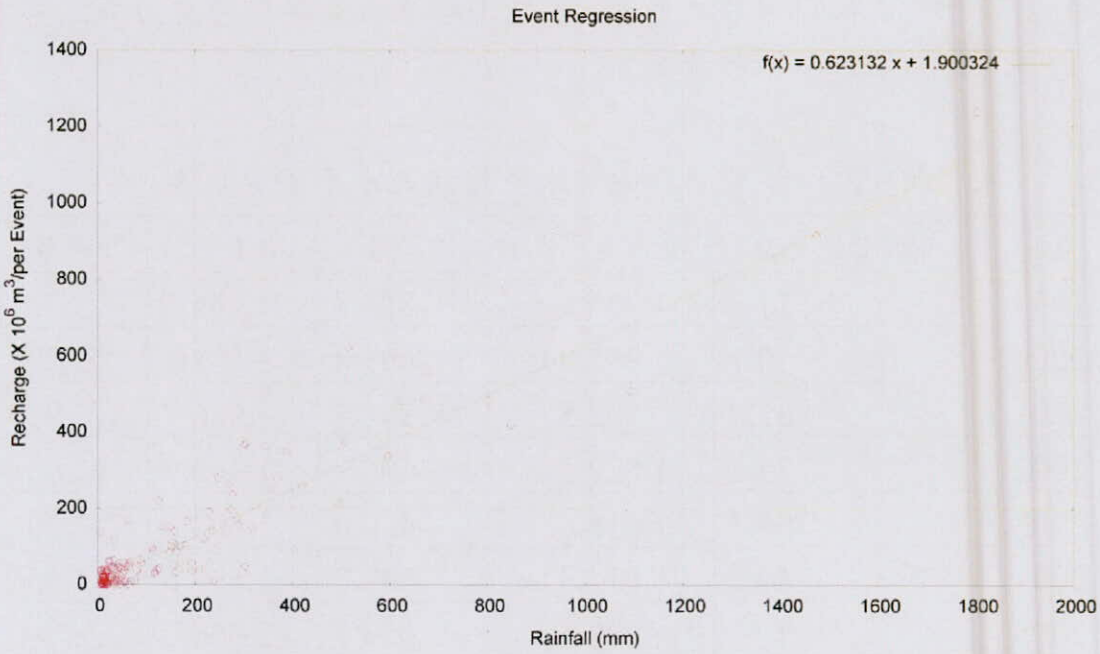


圖 4.2-3 屏東平原降雨事件累積降雨量對累積垂向補注量分布圖

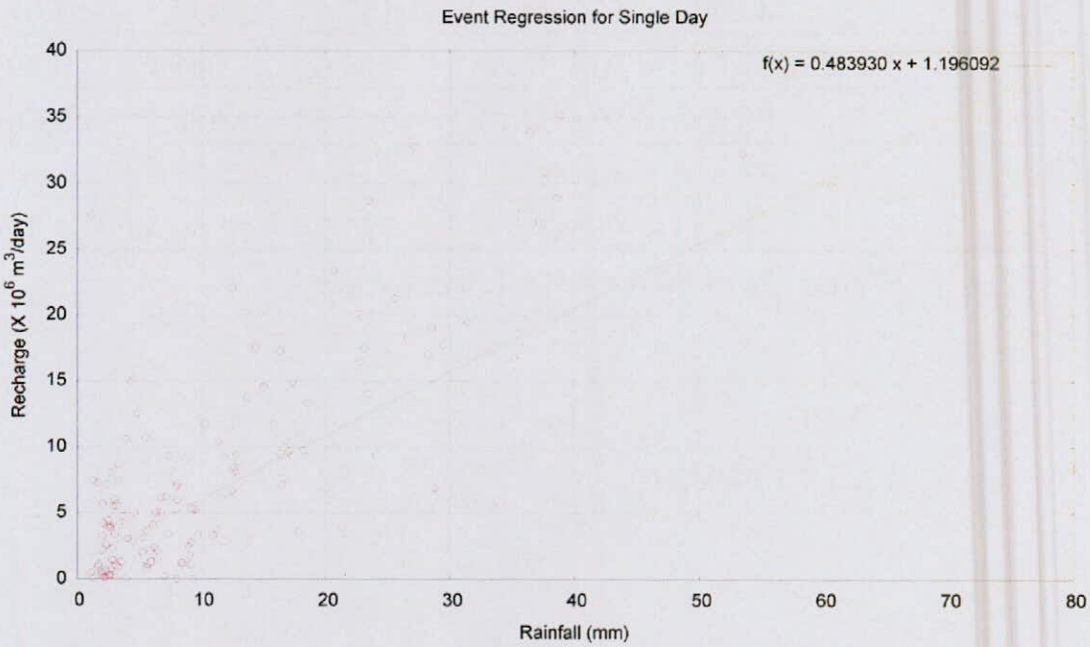


圖 4.2-4 屏東平原降雨事件平均降雨量對平均垂向補注量分布圖

第五章 地下水數值模擬與應用分析

本章將說明屏東平原之地下水數值模式建置流程、水平衡分析及主要補注區對研究區域地下水系統於水量及水質之影響。首先在 5.1 節說明地下水數值模式之建置流程及步驟，5.2 節簡介本計畫所採用之地下水數值模式 MODFLOW 之發展歷程，並展示屏東平原之地下水模式建置及參數檢定成果。於 5.3 節中對檢定完成之模式進行補注量與抽水量之統計分析，以進一步了解屏東平原地下水系統概況。最後於 5.4 節中，首先應用模式檢定及水平衡分析成果，分析主要補注區對整體地下水系統補注之影響程度，之後應用 MODPATH 套件，分析主要補注區域受汙染時，對整體地下水資源之影響。

5.1 地下水數值模式建置與應用流程

本計畫地下水數質模式之建置及後續應用分析流程如圖 5.1-1 所示，可分為五大部分，依序為邊界條件與網格劃分、模式資料輸入、模式參數檢定、水平衡分析及模式應用(如圖 5.1-1 所示)。本計畫採用美國地質調查局開發之 MODFLOW 地下水流模擬模式模擬研究區域之地下水流系統(見 5.2.1 MODFLOW 簡介)。在以 MODFLOW 建模時，首先需先定義研究區域之空間切割，模擬期距，分層架構及邊界條件等設定，接著再設定初始條件與含水層參數(如透水係數、儲水係數、含水層厚度等)；其輸出資訊則包含各含水層之地下水位分佈、洩降分佈、模式水平衡等。在給定建模所需之基本資料後，本計畫應用規則式專家系統(見 5.2.4 參數檢定方法)進行淨補注量檢定，檢定模擬期距(1999 年~2010 年)中，各月份之表層淨補注量與深層抽水量。在水平衡分析時，因本計畫乃以參數檢定方式檢定表層淨補注量，因此需再以分散型地下水位歷線法之分析結果，將模式之表層淨補注量分離出表層垂向補注量、表層抽水量及流失量。最後本計畫進一步分析主要補注區對整體地下水系統於水量及水質之影響，其中在水量的評估部分，本計畫分析主要補注區對整體地下水系統之補注量影響程度，而在水質之評估部分，本計畫以檢定後之地下水模式搭配 MODPATH 進行污染範圍分析，評估主要補注區受汙染後，對整體地下水系統之影響。

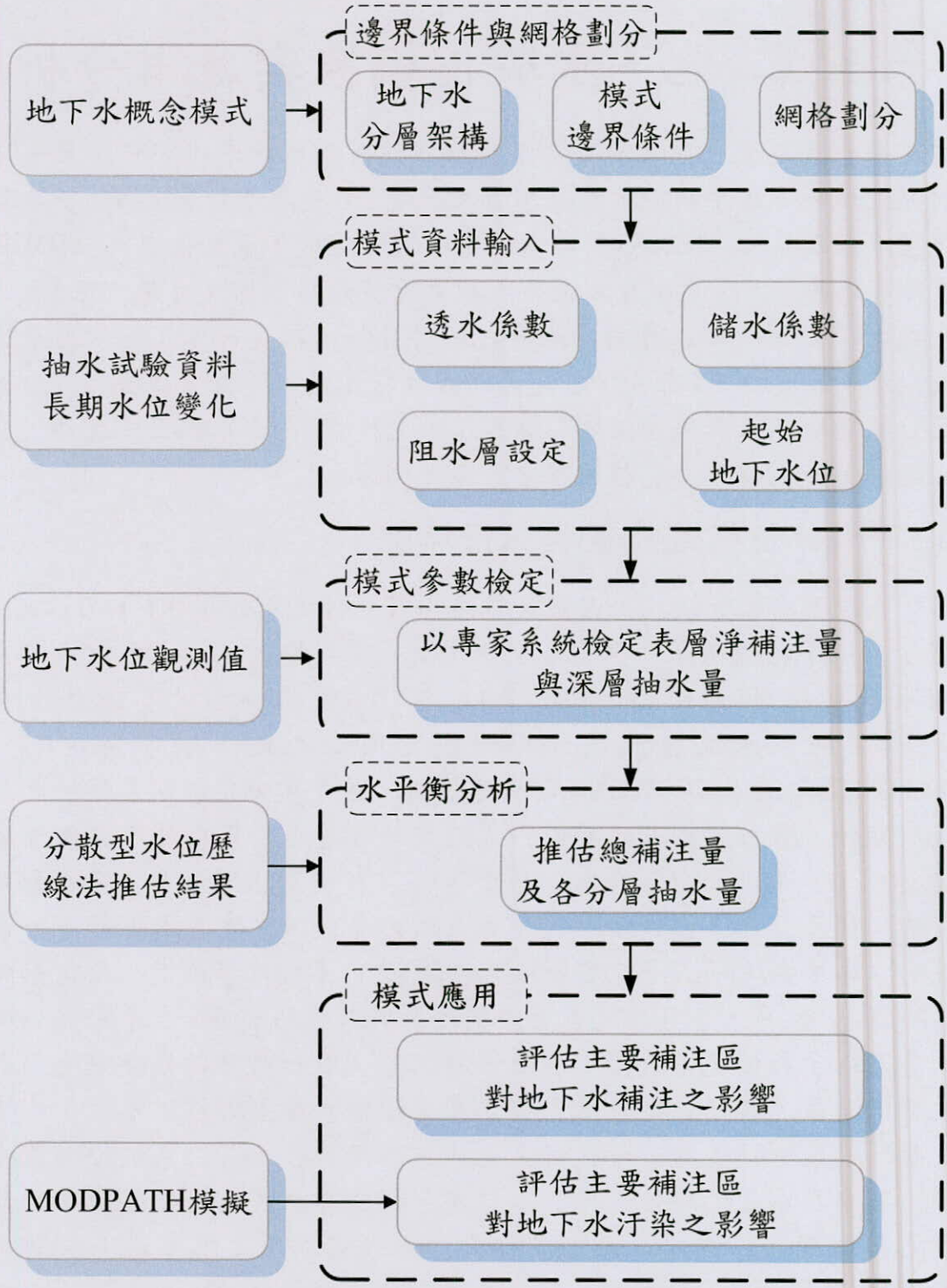


圖 5.1-1 地下水數值模式建置與應用流程示意圖

5.2 地下水暫態數值模式建置

5.2.1 MODFLOW 簡介

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

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

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

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

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

5.2.2 邊界條件與格網劃分

1.地下分層架構

MODFLOW 模擬之設定上，可將含水層型態設定為拘限含水層或非拘限含水層，並需分別輸入各分層之上部高程和底部高程。本計畫參考中央地質調查所於民國 91 年出版之「台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報告」，以屏東平原 53 站地層柱狀圖，完成水文地質剖面一至十三(深度最深至 300 公尺左右)，劃分出屏東平原概念分層，依深度分別為含水層一、阻水層一、含水層二、阻水層二、含水層三之一、阻水層三及含水層三之二，屏東平原模式共分為第一至七分層，如圖 5.2-1 所示，本章將含水層一視為淺層含水層，含水層二以下之含水層視為深層含水層。

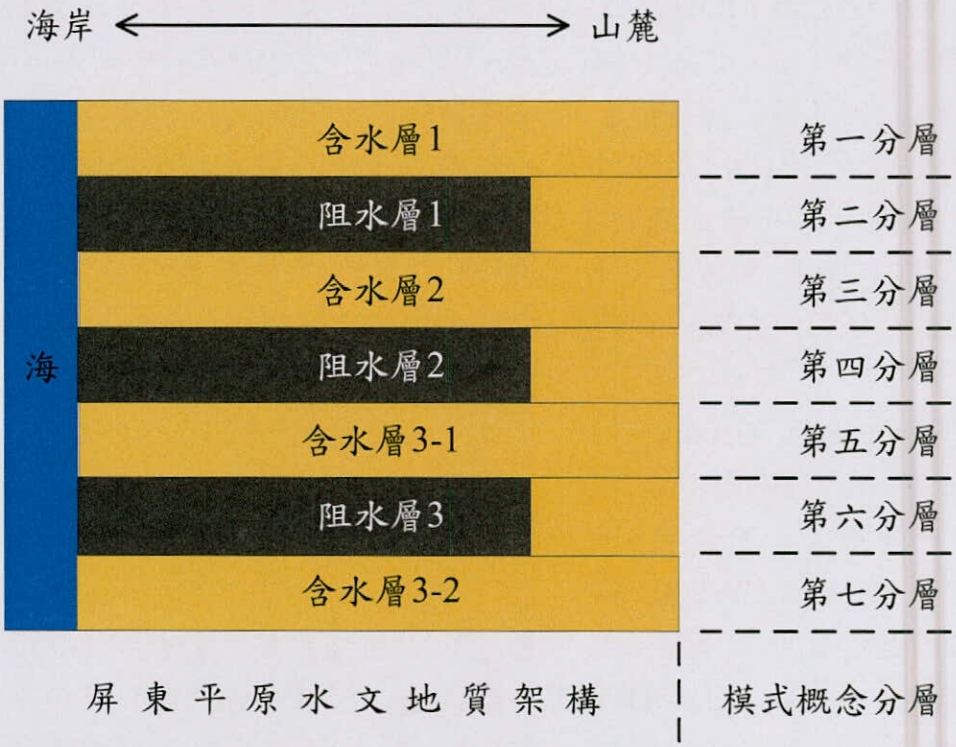


圖 5.2-1 屏東平原概念分層

2.模式邊界條件與格網劃分

就平面上而言，本模式研究區域大抵以中央地質調查所劃定之底岩分布區域為界，忠實描述平原之地下水分區特性。模式北以旗山溪及荖濃溪上游一帶之低山為界；西界為高屏溪西岸之丘陵；東接中央山脈南端之西斜面，走向大致上與潮州斷層一致，南界為海洋，面臨台灣海峽。

格網劃分上，南北方向將模擬區域分為 78 列，東西方向分為 30 行。考量資料密度及計算精度，本計畫採用 1 公里乘 1 公里之等間距格網，此外由於第七分層(含水層 3-2)因觀測井數量僅 11 口，且集中於屏東平原南部區域，因此無論在地質參數或是水位資訊上均不足以提供建模所需，故本計畫只取第一分層至第五分層建置數值模式，其中第一分層包含部分非受壓含水層與部分受壓含水層，第二分層以下均為受壓含水層，屏東平原地下水區如圖 5.2-2 所示。

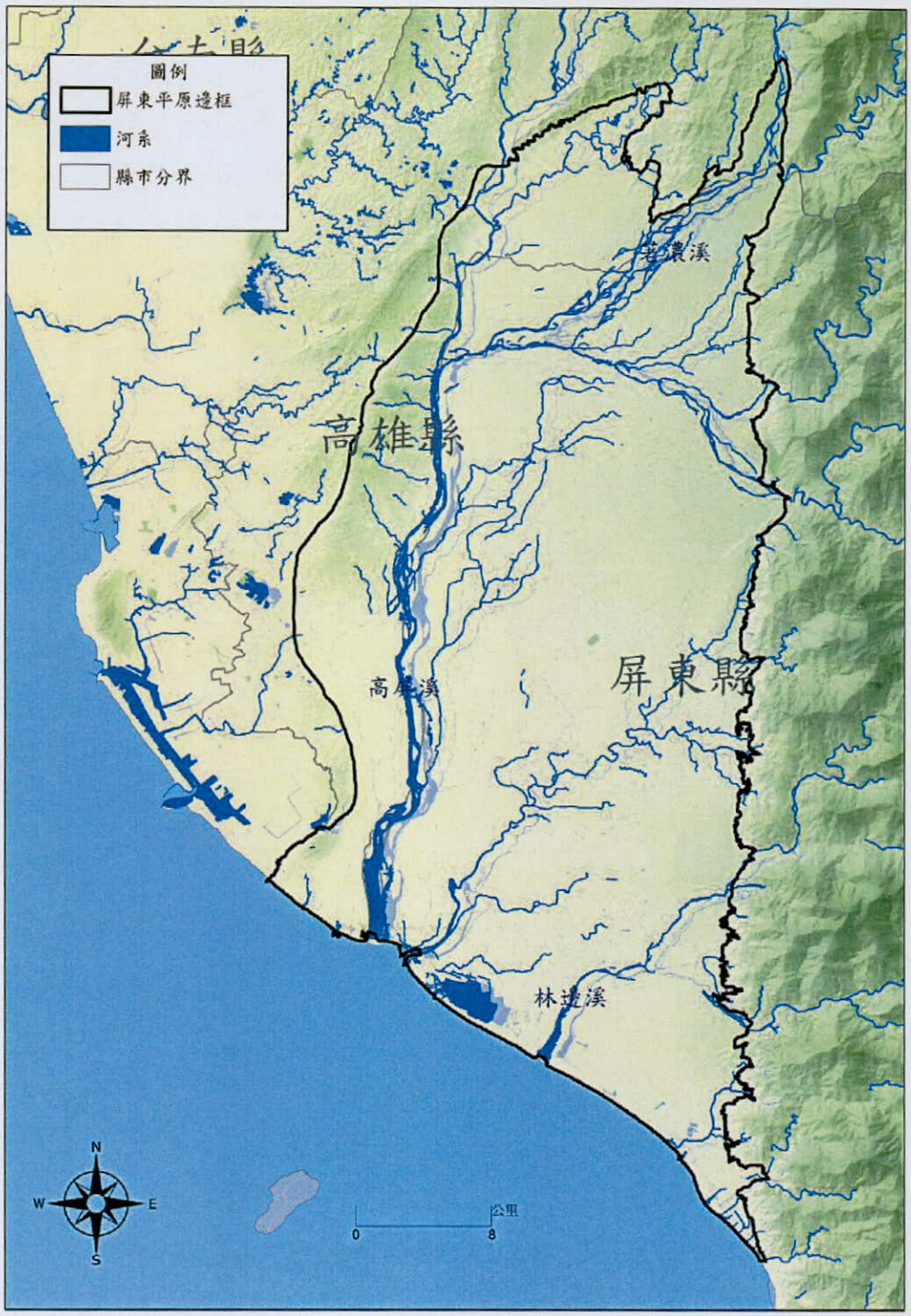


圖 5.2-2 屏東平原地下水模擬區域

邊界條件設定上假設東、西與北之區域邊界其地質特性無水流流動，設定為零流量 (No flow)邊界(Neumann boundary condition)，但在東側部分因與潮州斷層相鄰，有大量山邊側流量流入，故在右方邊界河流出山口處以給定水頭方式模擬山邊側流量，並假設出山口處之總水頭高為最近之觀測井的水頭高加上兩處間之高層差，因此設定口社溪出山口總水頭高為關福(1)水位高加 10 公尺，隘寮溪出山口總水頭高為瑪家(1)水位高加 17 公尺，萬安溪出山口總水頭高為老埤(1)水位高加 11 公尺，來社溪出山口總水頭高為萬隆(1)水位高加為 20 公尺，力力溪出山口總水頭高為大響(1)水位高；另於屏東平原西南處建有鳳山水庫，因終年蓄水，有固定入滲，故以定水頭方式模擬水庫入滲，並設定水庫底部高層為總水頭高，固定其為 44 公尺；南方邊界以海拔負 10 公尺等高線作為邊界，設為定水頭，水位高為 0 公尺，邊界條件設定如圖 5.2-3 所示，白色部分為模擬區域，灰色格網設定為零流量，藍色格網設定為給定水頭。

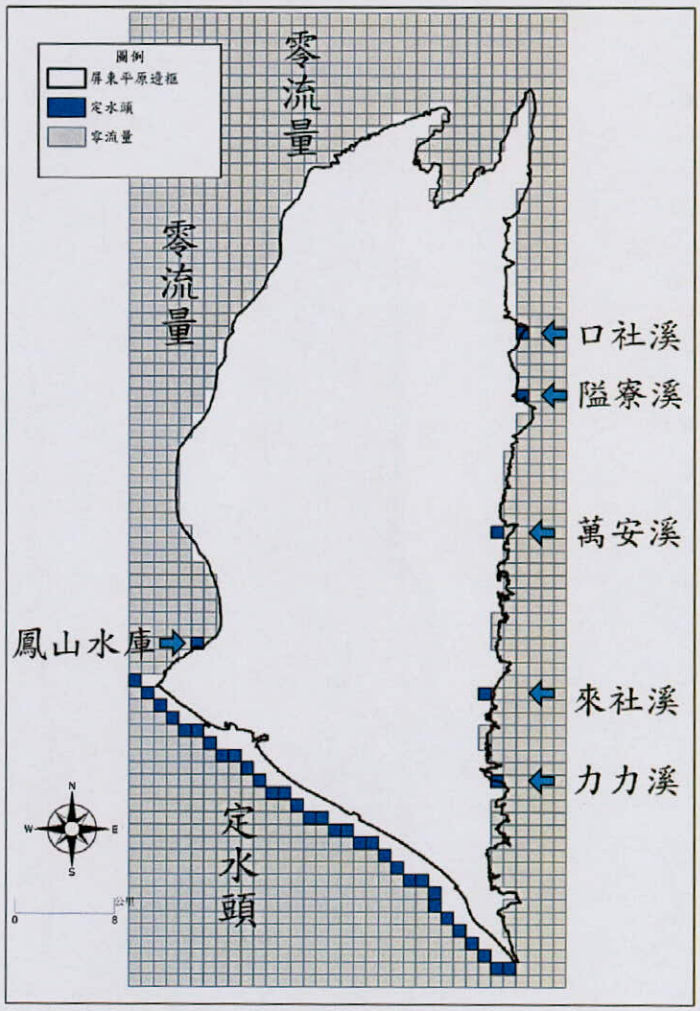


圖 5.2-3 屏東平原邊界條件格網劃分

5.2.3 模式資料輸入

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

1.透水係數

觀測站網建置時，各觀測井必進行單井或複井抽水試驗，因此幾乎各觀測井於不同含水層均擁有其導水係數(Transmissivity，T 值)現地試驗值，但因MODFLOW 模式所需參數為透水係數(Hydraulic Conductivity，K 值)，因此台灣地區地下水觀測網第一期計畫所得之導水係數，再除以含水層厚度(b)即可轉換求得透水係數，後續再以徐昇氏法分區將點位型式之數值推估至整個屏東平原，圖 5.2-4~圖 5.2-6 分別為模式第 1、3 及 5 分層之徐昇氏分區圖。而概念分層中之第 2 及 4 分層為阻水層，其分布範圍位於平原中、下游區域，模式於平原中、下游區域阻水層之透水係數乃參考 Fundamentals of Ground Water (Franklin W. Schwartz and Hubao Zhang, 2003)中建議之值域，在此設定為 4×10^{-3} (公尺/天)。此外，由於抽水試驗所得結果為水平向之透水係數，故在此假設垂向透水係數為水平向之 1/50。

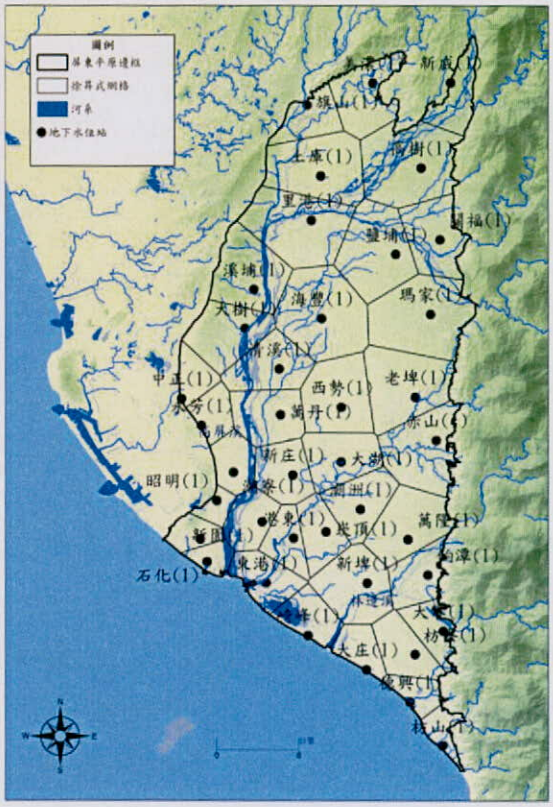


圖 5.2-4 含水層 1 昇式分區

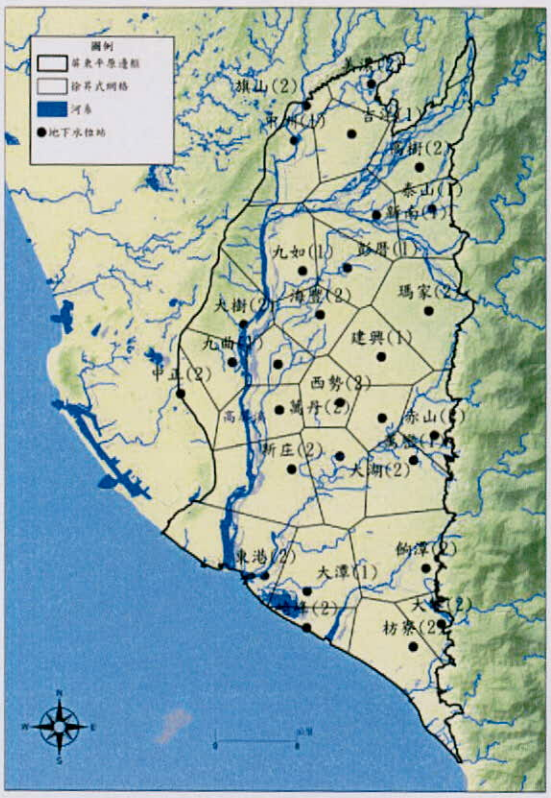


圖 5.2-5 含水層 2 昇式分區

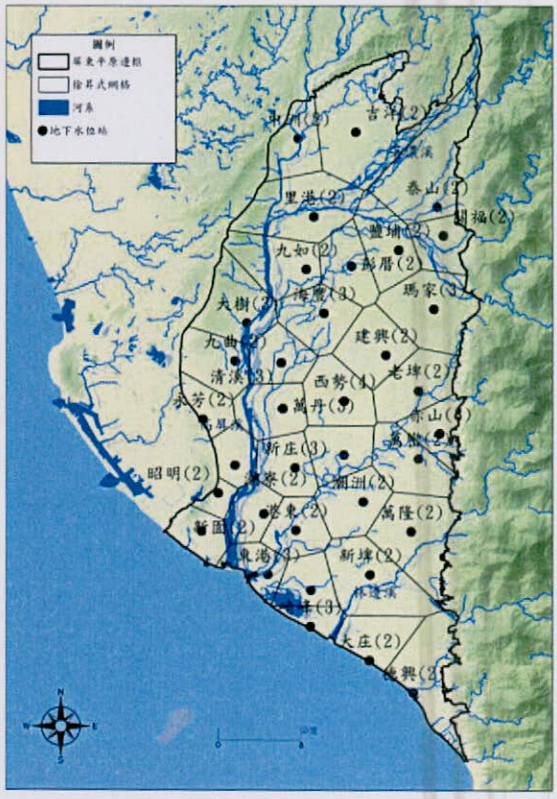


圖 5.2-6 含水層 3 昇式分區

2.儲水係數

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

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

3.阻水層設定

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

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

4.起始地下水水位

對於暫態模式而言，初始地下水位代表模式之初始條件，不同初始條件影響模擬結果極巨，因此應選取適當之初始水位以得到較佳之模擬結果。本計畫建置之地下水系統模擬期距為 1999 年~2010 年，為月模擬，模擬起始時刻為西元 1999 年 1 月，因此以西元 1998 年 12 月之平均水位作為起始水位。

5.抽水量、補注量

由於現地抽水量資料較不完整，且地下水補注為未知，故本計畫將以專家系統(見 5.2.4 參數檢定方法) 檢定淺層淨補注量與深層抽水量，再結合分散型地下水位歷線法之分析成果分離淺層垂向補注量、淺層抽水量及流失量。

本計畫設定之模擬時刻長度為月，參數檢定之依據為各觀測井之月平均水位，此外，本計畫採用徐昇氏法進行參數分區，以降低參數維度。

5.2.4 參數檢定方法

1.參數檢定變數說明

MODFLOW 三維地下水模式乃以有限差分法進行數值離散，其在空間離散上採用矩形網格，因此每一模擬網格皆為一六面體，如圖 5.2-7 所示，模式中各網格之每一面與其相鄰網格之流量，皆可以達西公式計算，因此當水位與透水係數已知時，六面體與四周網格之交換量(flux)即可求得。然而，若此網格位於含水層一時，其與地表接觸的面並無法以達西公式計算，該平面之水量進出乃藉由地表補注(Recharge)或是人為抽水進出該網格，因此本計畫在進行參數檢定時，於含水層一檢定所得之量值即為補注與抽水之綜合效應，無法拆開，因此本計畫定義含水層一所檢定之量值為淺層淨補注量(Net recharge)。在含水層一以下之各個網格，其內部水量進出網格之形式除了因與相鄰網格之水位差造成之交換量外，亦可透過源流(source)或沉流(sink)之形式進出網格，意即將水量以抽水井或補注井之形式取出或注入該網格，惟在深層含水層中，幾乎不可能發生補注之行為，因此本計畫設定深層含水層僅能抽水而不能補注，故深層含水層檢定之量值即為抽水量。

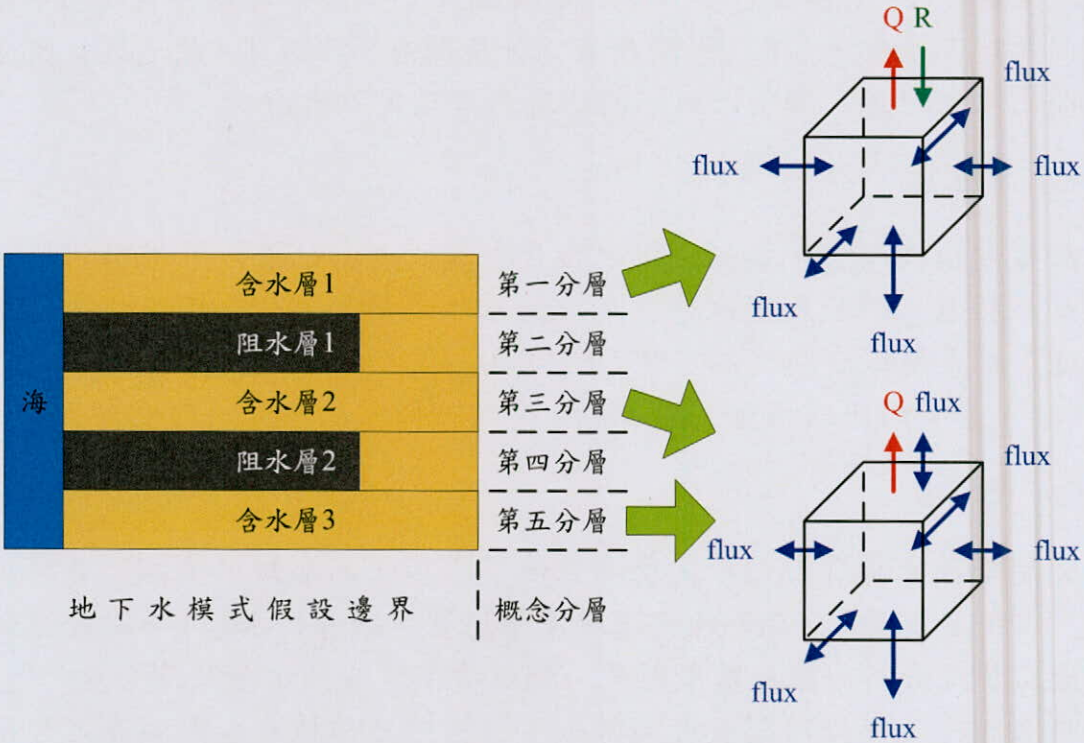


圖 5.2-7 地下水模式流量計算概念圖

2.參數檢定方法介紹

建立地下水模式之過程中，參數檢定乃必要的步驟，而一般的參數檢定方法可分為「人工參數檢定」與「自動參數檢定」。人工參數檢定在推估參數時，過程不但複雜、冗長，且需要花費許多時間，進行檢定的人員除了需具備相關地下水知識外，亦須具有參數檢定之經驗與技巧。此外，如何將一位專家的參數檢定知識轉移給其他需進行人工參數檢定之人員也是相當不易。人工參數檢定雖有上述缺點，惟其在進行參數推估時，參數的修正常存在定性上的邏輯或經驗的判斷，檢定的過程中人與模式的不斷互動，因此人工參數檢定雖然繁瑣且費時費工，但檢定本身除了可對問題有更深入的了解外，檢定者若是一個有經驗的專家，其結果往往較不易發生孛離現地物理特性的情形。

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

本計畫採用專家系統進行參數檢定，期能在保有自動化參數優選檢定的快速及方便的同時，亦能保有人工參數檢定之彈性，並能累積整合專家之經驗，使得參數檢定的工作更易進行。由於專家系統與地下水模擬 MODFLOW 系統之資料使用格式不同，必須透過檔案格式之轉換，使屏東平原地下水模式之資訊，能在此兩種系統中流通使用。圖 5.2-8 為參數檢定之系統架構，可瞭解資訊在兩種系統中傳遞的情形。

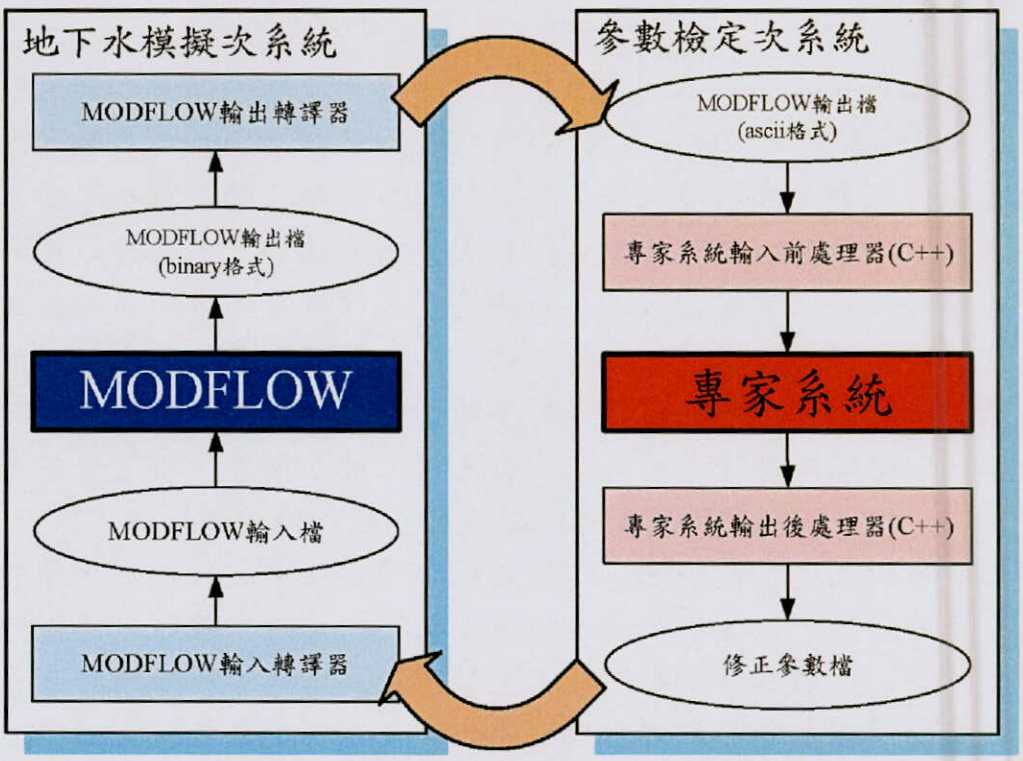


圖 5.2-8 地下水參數檢定系統架構圖

3.專家系統介紹

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

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

4.知識庫之規則建立

在建立專家系統之前，必須先擷取參數檢定之經驗及知識。對於一般參數檢定之經驗，可歸類為以下：

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

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

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

5.參數檢定流程

利用專家系統進行參數檢定流程如圖 5.2-9 所示，在參數檢定開始後，系統首先初始化參數值，即淨補注量及抽水量，並讀入相關參數的設定資訊，如分區設定、觀測井位置、觀測水位等。在完成初始參數設定後，接著執行地下水模式 MODFLOW，獲得各個時刻之模擬地下水位，下一步則判斷第一個時刻各分區之觀測水位與模擬水位之誤差(以下稱為檢定誤差)是否均小於容許誤差，本計畫以 2 公尺為容許誤差。

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

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

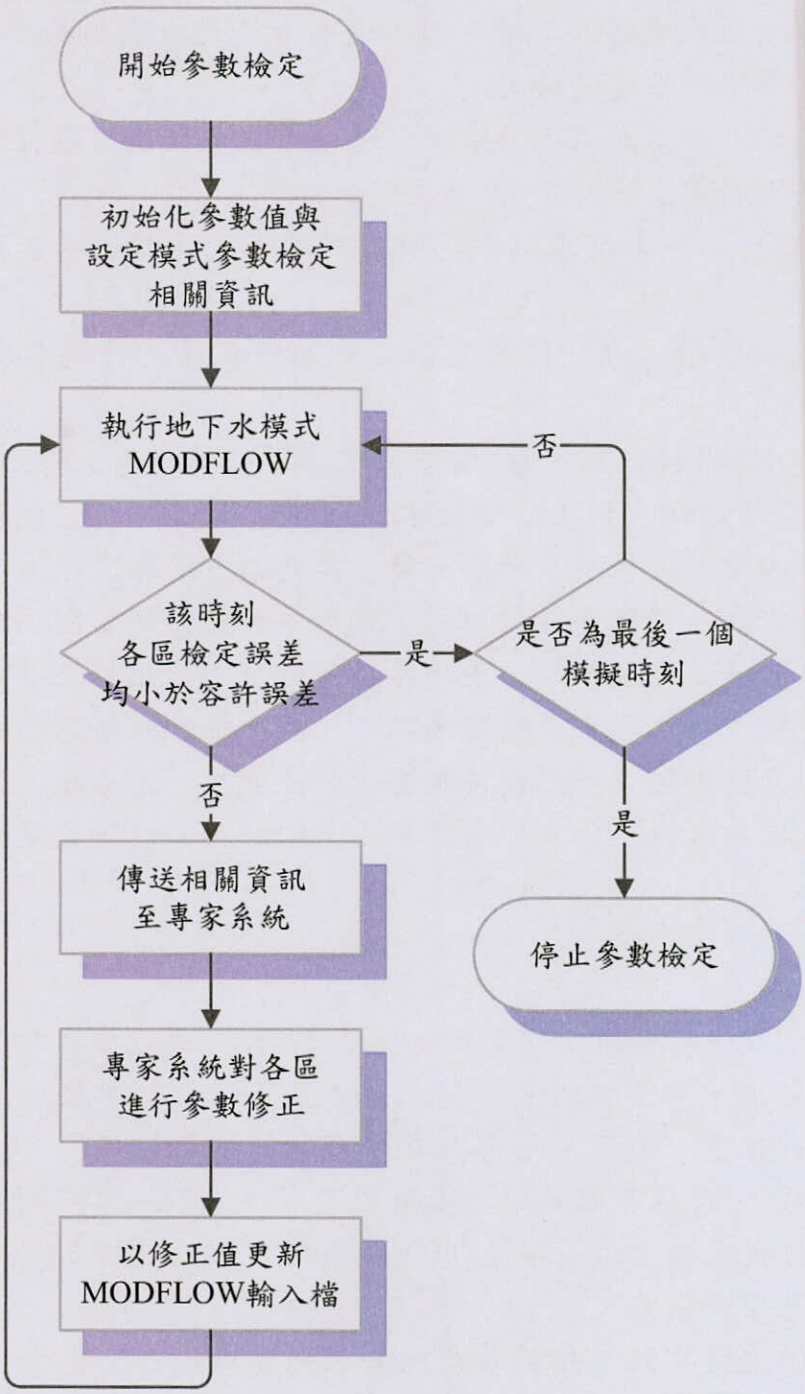


圖 5.2-9 參數檢定流程

5.2.5 檢定誤差統計分析

本暫態模式模擬設定一時刻長度為一個月，以西元 1999 年至西元 2010 年屏東平原各觀測井之月平均水位，作為暫態模式各時刻之參照水位，設定各分區最大容許誤差值為 2 公尺進行參數檢定，檢定後全區全時刻均方根誤差為 0.429 公尺，以下將以各分層誤差空間分布及誤差統計進行說明。

1.檢定成果之誤差空間分布

此部份主要呈現檢定誤差在空間上的分佈。圖 5.2-10 ~ 5.2-12 分別為屏東平原第一分層、第三分層與第五分層各時刻所有模擬值之均方根誤差等值圖，等值線的間距為 0.1 公尺。圖中顯示均方根誤差皆小於 1 公尺，檢定成果良好。

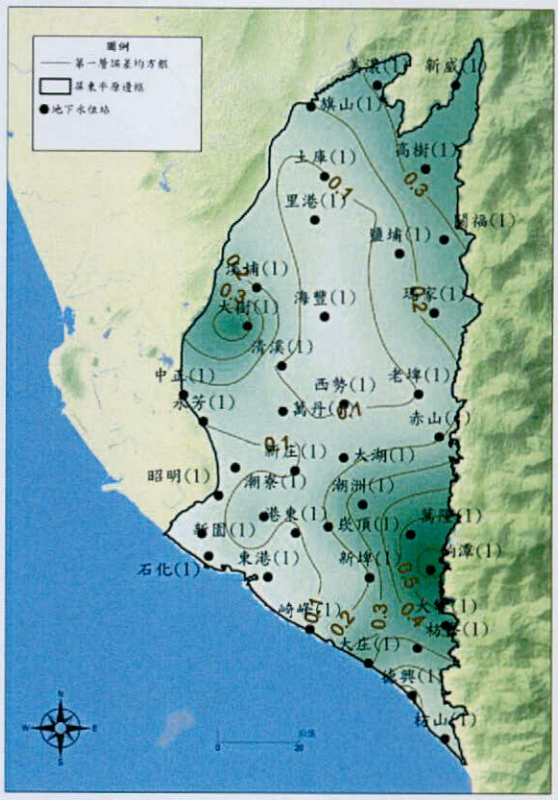


圖 5.2-10 第一分層誤差均方根

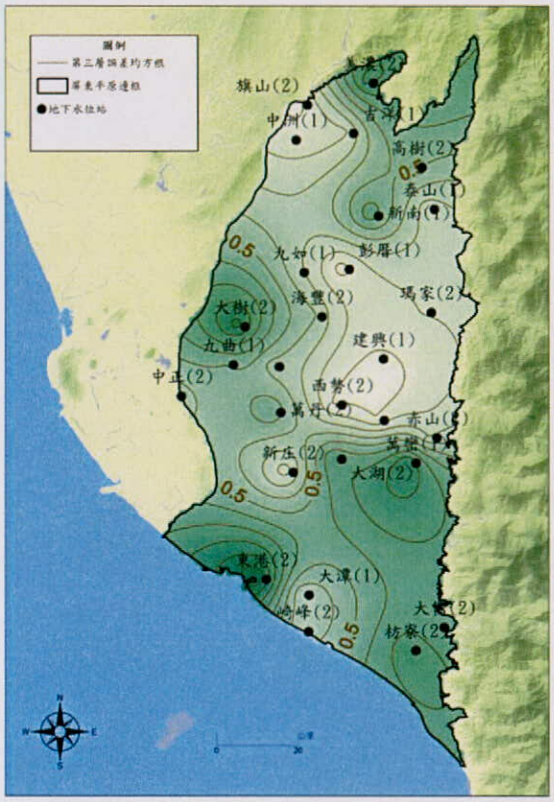


圖 5.2-11 第三分層誤差均方根

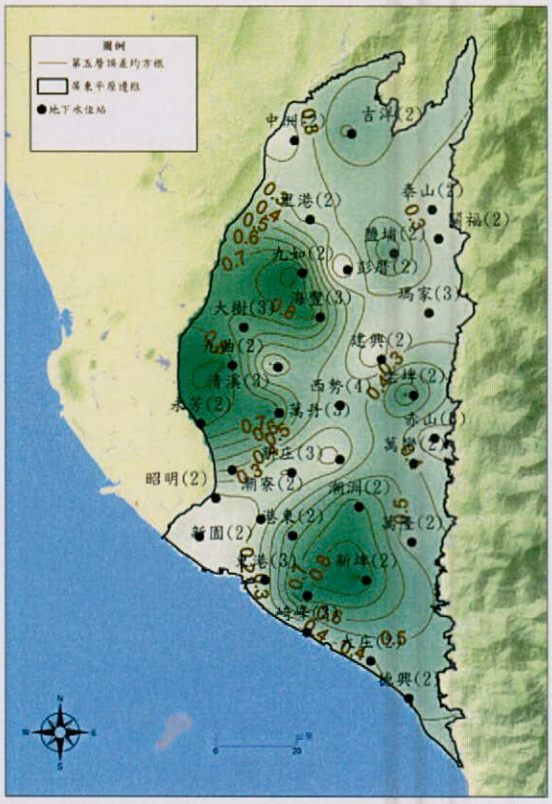


圖 5.2-12 第五分層誤差均方根

2.檢定成果之誤差空間分布

此部份主要呈現檢定誤差在時間上的分佈。將各月份均方根誤差依時間排序，如圖 5.2-13 所示。圖中均方根誤差最大值為 0.627 公尺，最小值為 0.284 公尺，其餘均方根誤差均在 0.3-0.6 公尺之間，顯示檢定成效良好，檢定誤差皆能維持在一定區間內。

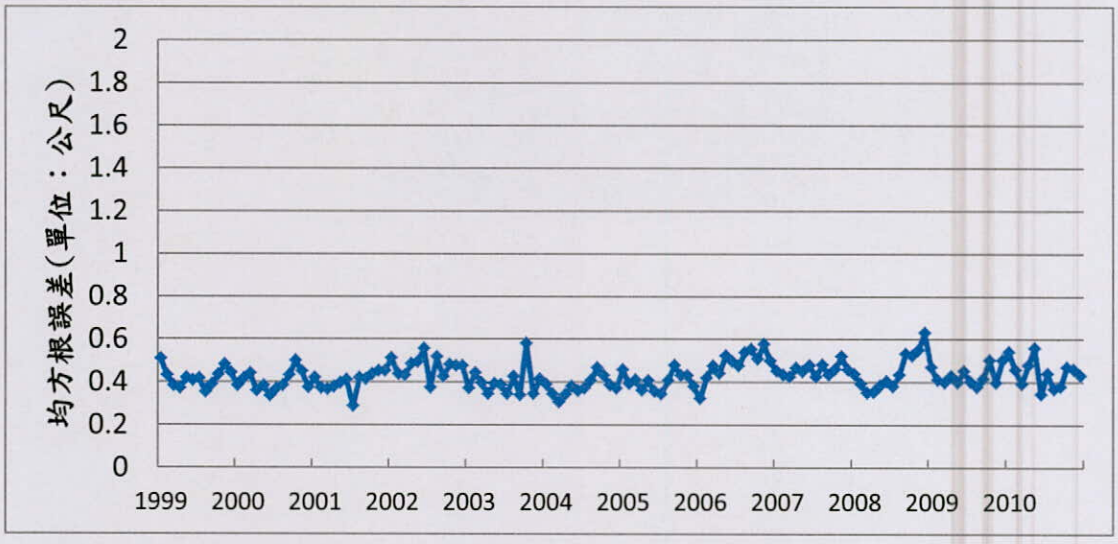


圖 5.2-13 各月份均方根誤差變化圖(1999-2010)

3.檢定成果之誤差統計

將 1999 年至 2010 年所有模擬誤差以 0.4 公尺為誤差區間進行統計，並將此結果繪製成誤差主體圖，如圖 5.2-14 所示，由圖可知 80%的誤差在-0.4 公尺與+0.4 公尺之間，檢定成果良好。

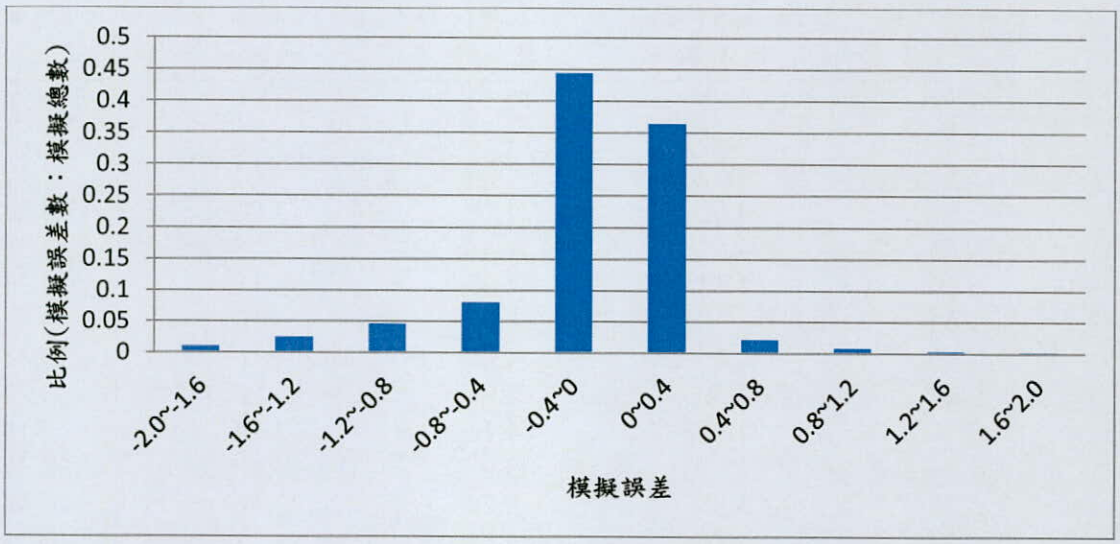


圖 5.2-14 模擬水位誤差主體圖(1999-2010)

5.3 地下水補注量與抽水量分析

本節說明由模式檢定所得之表層淨補注量、含水層二抽水量、含水層三抽水量、山邊側流入量及海岸淨流入量，如表 5.3-1 所示。

表 5.3-1 模式檢定所得參數

年分	第一層(F1) 淨補注量	第三層(F2) 抽水量	第五層(F3) 抽水量	山邊 側流入	海岸 淨流入
1999	5.92	4.73	4.34	3.11	0.20
2000	5.37	4.45	4.25	3.12	0.24
2001	5.87	4.59	4.36	3.14	0.19
2002	2.97	4.62	4.18	3.02	0.27
2003	6.85	4.52	4.31	3.15	0.30
2004	5.20	4.32	4.23	3.11	0.31
2005	5.64	4.38	4.03	3.10	0.28
2006	4.49	4.65	4.01	3.16	0.31
2007	6.90	4.30	3.91	3.20	0.22
2008	4.96	4.29	4.11	3.14	0.14
2009	3.04	4.09	3.93	3.10	0.21
2010	5.23	3.83	3.74	3.16	0.15
平均	5.20	4.40	4.11	3.13	0.23

(單位：億噸/年)

由表可知，第一含水層之淨補注量值約介於 2.97~6.90 億噸之間，年平均約為 5.20 億噸；第二含水層之抽水量值約介於 3.83~4.73 億噸之間，年平均約為 4.40 億噸，第三含水層之抽水量值約介於 3.74~4.34 億噸之間，年平均約為 4.11 億噸，山邊側流入量值約介於 3.02~3.20 億噸之間，年平均約為 3.13 億噸，海岸淨流入量值約介於 0.14~0.31 億噸之間，年平均約為 0.23 億噸。以上歸納可得深層抽水量、山邊側流入量與海岸淨流入量皆屬相對穩定之量值，而含水層一之淨補注量則變化幅度較大。由於本計畫在含水層一所檢定之量值為淨補注量，而此淨補注量為垂向補注量、第一層抽水量及流失量之總和，若要分離出此三個量值，則需以前一章所提之分散型地下水位歷線法輔助推求，此部分將於後續文章說明。

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

首先介紹地下水系統之各項分量，如圖 5.3-1 所示，一般台灣平原區地下水系統之水量進出可分為垂向補注量、山邊側流量、沿海流入量、各含水層抽水量及流失量，由這些分量及相應之蓄水變化量達成系統水平衡。其中垂向補注

量為降雨及地表逕流入滲地下水之補注；山邊側流量為由潮州斷層側向流入之補注；沿海流入量為海水流入地下水之水量；各含水層抽水量為地下水各分層之人工抽水；流失量如地下水由河川之出滲量及出滲至地表之自流量。

分散型地下水位歷線法與數值模式因其計算分析之原理與假設不同，故兩者之地下水系統需進行相當程度之簡化，以下將分別說明之。圖 5.3-2 為分散型地下水位歷線法之系統概念圖，其系統分量包含垂向補注量、抽水量、邊界交換量及儲蓄改變量，其中，抽水量則為各含水層之抽水量總和，邊界交換量則為沿海流入量、山邊側流量與流失量之總和。而數值模式之系統概念圖如圖 5.3-3 所示，其系統分量可分為沿海流入量、山邊側流量、淺層淨補注量、深層抽水量(含水層二及含水層三之抽水量)及儲蓄改變量，其中淨補注量為垂向補注量、含水層一之抽水量及流失量總和。上述兩種方法因原理與假設不同而對原地下水系統各有所簡化，難以單一方法求得地下水系統之各分量，因此本計畫以此兩方法之成果，換算出地下水系統之各分量值，換算公式說明如下：

分散型地下水位歷線法之邊界交換量(Bh)為沿海流入量、山邊側流量及流失量之總和，其中山邊側流量、及沿海流入量可由模式求得，因此經過換算後可求得流失量，如式(5-1)所示。

分散型地下水位歷線法之抽水量則為各分層抽水量之總和，而含水層二與含水層三之抽水量可由模式求得，因此可以換算出含水層一之抽水量，如式(5-2)所示。

模式檢定之淨補注量則為垂向補注量、含水層一抽水量及流失量之總和，而流失量與含水層一之抽水量已由式(5-1)與式(5-2)求得，因此可換算出垂向補注量，如式(5-3)所示。

$$B_h = COAST_m + FAULT_m + LOSS \quad \text{(式 5-1)}$$

B_h = 邊界交換量，下標 h 代表由水位歷線法取得

$COAST_m$ = 沿海流入量，下標 m 代表由數值模式取得

$FAULT_m$ = 山邊側流量，下標 m 代表由數值模式取得

LOSS = 流失量

$$PUMP_h = PF2_m + PF3_m + PF1 \quad \text{(式 5-2)}$$

$PUMP_h$ = 抽水量，下標 h 代表由水位歷線法取得

$PF2_m$ = 含水層二(F2)抽水量，下標 m 代表由數值模式取得

$PF3_m$ = 含水層三(F3)抽水量，下標 m 代表由數值模式取得

PF1 = 含水層一(F1)抽水量

$$NET\ RECHARGE_m = LOSS + PF1 + RECHARGE \quad \text{(式 5-3)}$$

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

LOSS = 流失量

PF1 = 含水層一(F1)抽水量

RECHARGE = 垂向補注量

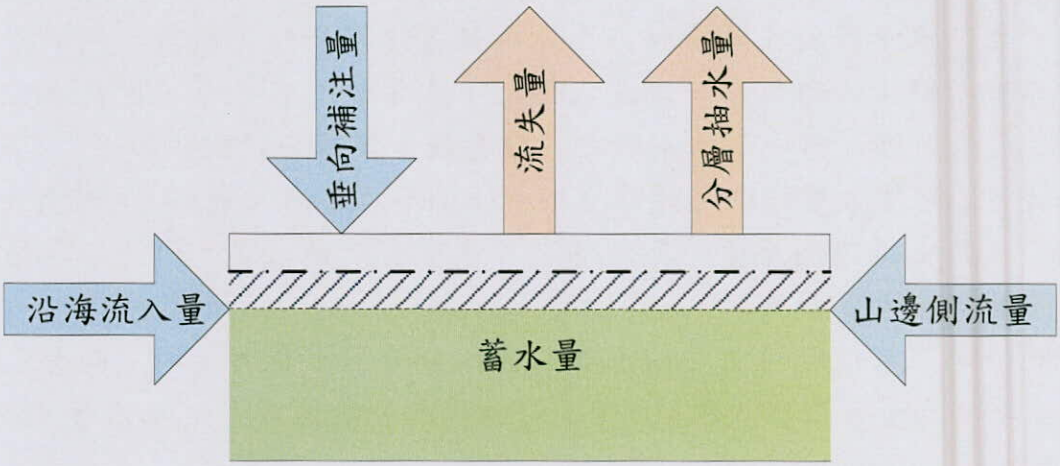


圖 5.3-1 進出地下水系統各項分量概念圖

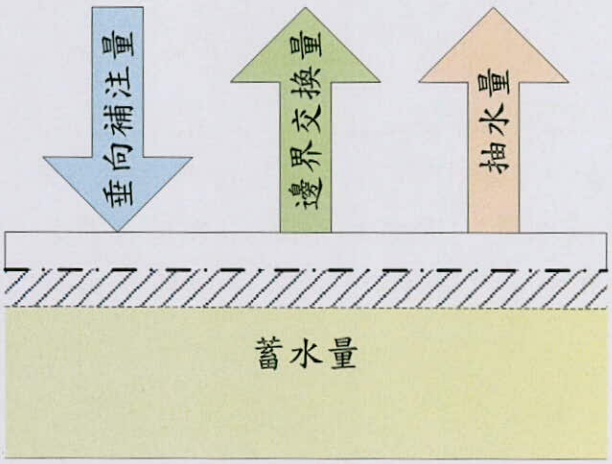


圖 5.3-2 分散型地下水位歷線法水平衡概念圖

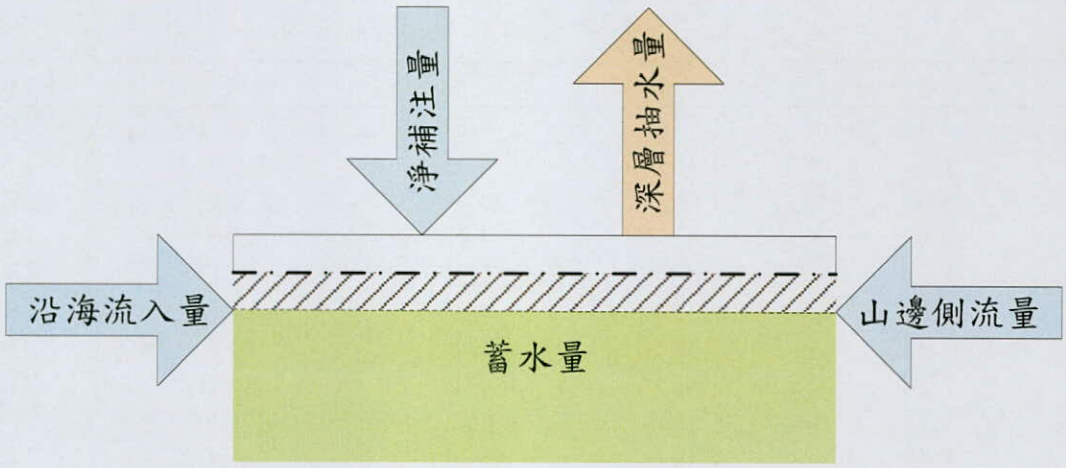


圖 5.3-3 數值模式水平衡概念圖

表 5.3-2 分別為各分層抽水量及流失量之統計結果，圖 5.3-4 則為各含水層抽水量與流失量之歷線分布。表 5.3-3 分別統計各流入量，包含垂向補注、山邊側向流入及海岸淨流入，圖 5.3-5 則說明地下水系統之補注來源，由圖可知，垂向補注(ie.降雨及河川補注)為屏東平原之主要補注來源。表 5.3-4 則統整各年份屏東平原系統總流入量與總流出量，藉以觀察各年份儲蓄改變量之變化趨勢。綜合表 5.3-2 至表 5.3-4 之結果可知，在系統流出之量值部分，12 年中之最大系統總流出量為 24.68 億噸，最小系統總流出量為 18.40 億噸，平均總流出量為 20.96 億噸；平均總抽水量為 9.85 億噸，平均流失量為 11.11 億噸。在系統流入之量值部分， 12 年之最大系統總流入量為 24.52 億噸，最小系統總流入量為 15.99 億噸，平均總流入量為 21.01 億噸，平均垂向補注量為 17.65 億噸，平均側向流入量(山邊側流入+海岸淨流入)為 3.36 億噸。

表 5.3-2 各分層抽水量與流失量

年分	第一層(F1)	第三層(F2)	第五層(F3)	流失量	總流出量
1999	0.48	4.73	4.34	11.50	21.05
2000	1.21	4.45	4.25	10.28	20.19
2001	0.67	4.59	4.36	13.25	22.87
2002	1.47	4.62	4.18	8.26	18.53
2003	1.32	4.52	4.31	8.25	18.40
2004	1.60	4.32	4.23	8.81	18.96
2005	1.29	4.38	4.03	13.93	23.63
2006	1.20	4.65	4.01	11.80	21.66
2007	1.41	4.30	3.91	12.11	21.73
2008	1.42	4.29	4.11	14.86	24.68
2009	2.13	4.09	3.93	10.49	20.64
2010	1.81	3.83	3.74	9.83	19.21
平均	1.33	4.40	4.12	11.11	20.96

(單位：億噸/年)

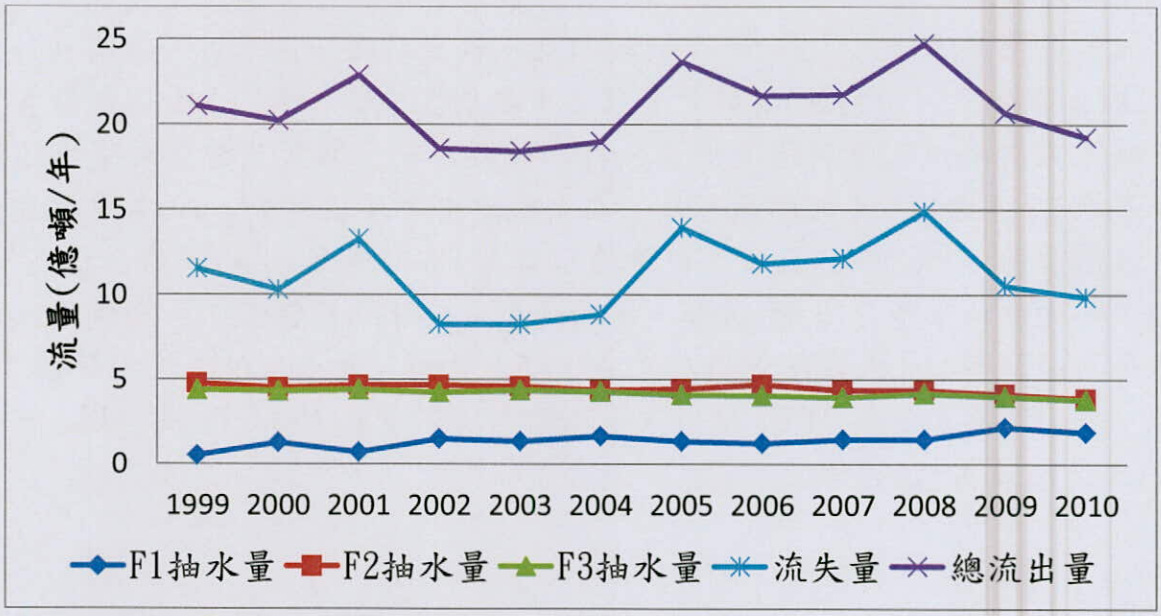


圖 5.3-4 屏東平原年系統流出量

表 5.3-3 垂向補注、山邊側流入與海岸淨流入量

年分	垂向補注	山邊側流入	海岸淨流入	總流入量
1999	17.91	3.11	0.20	21.22
2000	16.86	3.12	0.24	20.22
2001	19.79	3.14	0.19	23.12
2002	12.70	3.02	0.27	15.99
2003	16.42	3.15	0.30	19.87
2004	15.61	3.11	0.31	19.03
2005	20.85	3.10	0.28	24.23
2006	17.49	3.16	0.31	20.96
2007	20.42	3.20	0.22	23.84
2008	21.24	3.14	0.14	24.52
2009	15.66	3.10	0.21	18.97
2010	16.88	3.16	0.15	20.19
平均	17.65	3.13	0.23	21.01

(單位：億噸/年)

圖 5.3-5 屏東平原年系統流入量

表 5.3-4 系統總流入量、總流出量與年儲蓄改變量

年分	系統總流入量	系統總流出量	年儲蓄改變量
1999	21.22	21.05	+0.17
2000	20.22	20.19	+0.03
2001	23.12	22.87	+0.25
2002	15.99	18.53	-2.54
2003	19.87	18.40	+1.47
2004	19.03	18.96	+0.07
2005	24.23	23.63	+0.60
2006	20.96	21.66	-0.70
2007	23.84	21.73	+2.11
2008	24.52	24.68	-0.16
2009	18.97	20.64	-1.67
2010	20.19	19.21	+0.98
平均	21.01	20.96	+0.05

(單位：億噸/年)

為觀察屏東平原蓄水量之變化，本計畫將年儲蓄改變量依時間序列作圖，如圖 5.3-6 所示，由圖可知 2007 年增加量最大，儲蓄量增加 2.11 億噸；2002 年減少量最多，儲蓄量減少 2.54 億噸； 再進一步觀察近 12 年間之累積儲蓄量，如圖 5.3-7 所示，以 1998 年為基準，設其累積儲蓄量為零，後續年分持續累加年儲蓄改變量。由圖可知，2007 年之蓄水量在 12 年間為最高，2002 年之蓄水量在 12 年間為最低，再將歷年累積儲蓄量與年雨量對比可發現，儲蓄改變量與當年及前一年降雨量有相當關係，當降雨量相較前一年驟減時，儲蓄量會大量減少，當降雨量持續維持在豐沛水準時，儲蓄量會持續增加，並至某一儲蓄量水準後幾乎持平。

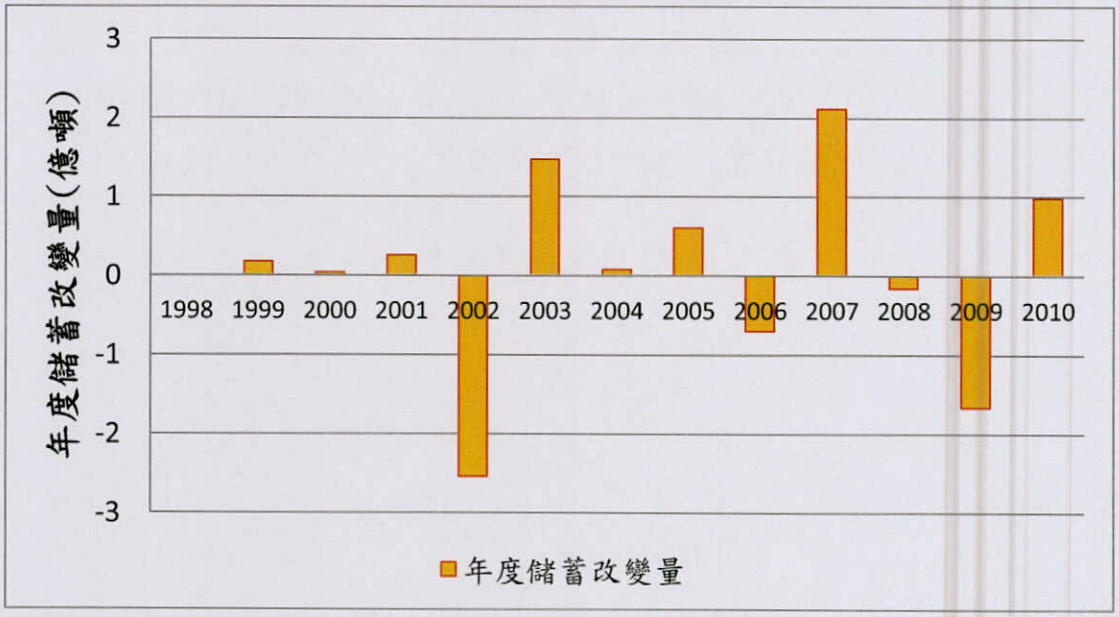


圖 5.3-6 屏東平原年儲蓄改變量

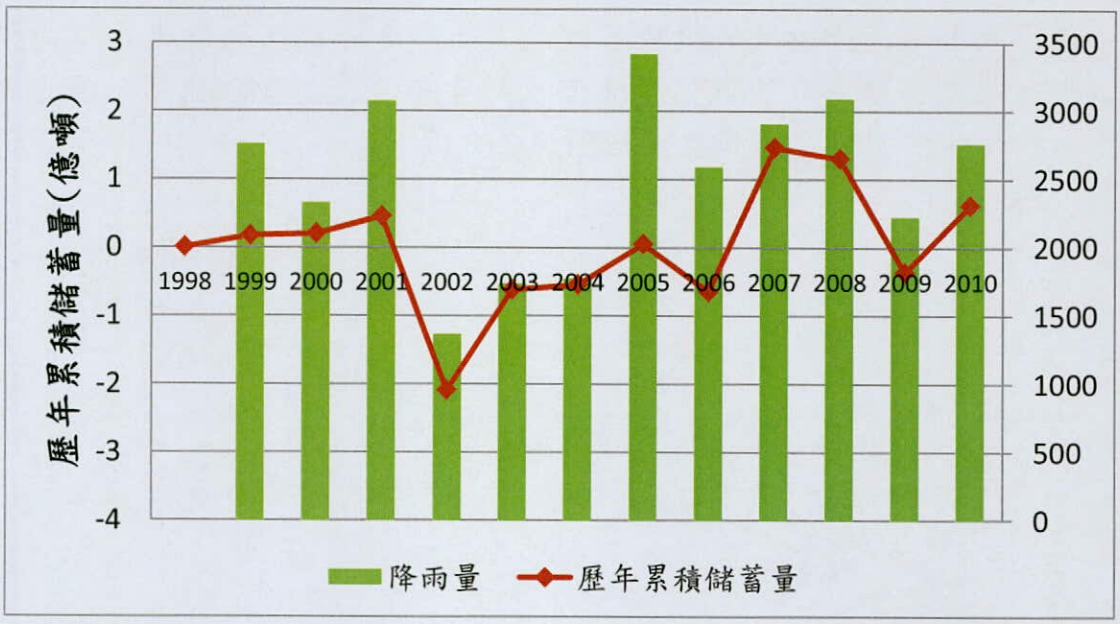


圖 5.3-7 屏東平原歷年累積儲蓄量

圖 5.3-8 為補注量與抽水量隨時間變化關係圖，圖中顯示垂向補注量隨雨季與旱季交替而有明顯變化，雨季時垂向補注量顯著增加，旱季時垂向補注量大減，而山邊及海岸流入量、總抽水量變化較不明顯，雖量值有所增減，但均維持在一定區間內，隨時間推移，未有大幅度變動。

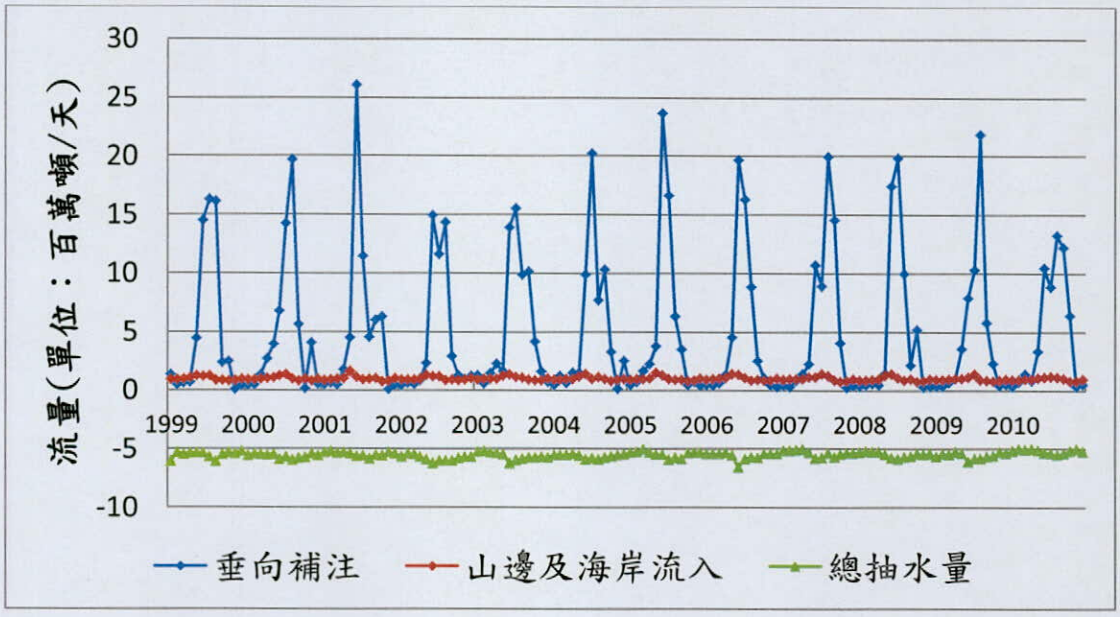


圖 5.3-8 補注量與抽水量變化圖

圖 5.3-9 為月雨量與垂向補注量關係圖，由圖中之線性迴歸線可知，月降雨量愈大，垂向補注量愈高，但非完全線性相關，其原因為降雨入滲量與降雨延時、降雨強度及土壤飽和度有關，當降雨延時短、強度大時，地表水入滲相對

較低，使得大部分降雨由地表逕流方式流失，即會造成降雨量大，垂向補注量低的情形，反之持續多天的低強度降雨，則會有較大之垂向補注，因此經由降雨對垂向補注關係回歸後，其線性相關係數不高。

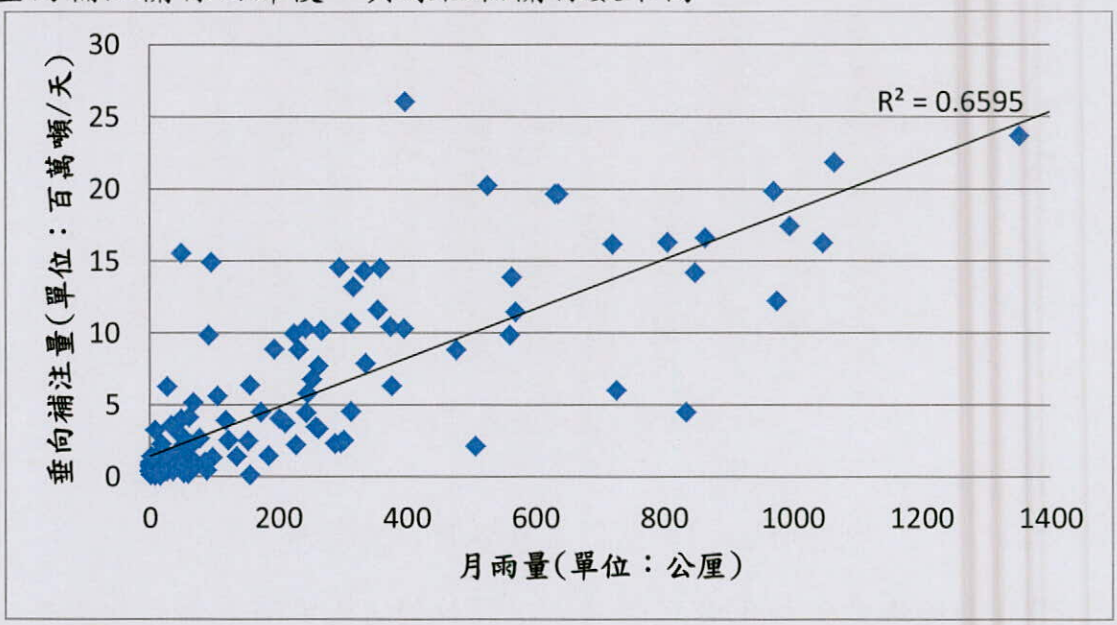


圖 5.3-9 月雨量與垂向補注量關係圖

5.4 主要補注區對地下水資源影響分析

1.主要補注區對地下水系統補注之影響分析

為進一步了解主要補注區對整體地下水系統之補注影響程度，本計畫分別統計主要補注區之補注量與其所占整體補注量之百分比，表 5.4-1 為歷年屏東平原垂向補注量與主要補注區垂向補注量所占百分比，由表可知，2002 年主要補注區之垂向補注量所占比例最高，約為 72.73%，而 2010 年主要補注區之垂向補注量所占比例最低，約為 65.41%。接著由表 5.4-2 分析，可再進一步探討主要補注區對整體地下水系統補注之重要性：屏東平原總面積約 1231.26 平方公里，主要補注區面積約 367.57 平方公里，主要補注區面積占屏東平原總面積 29.85%，而屏東平原年平均垂向補注量為 17.65 億噸，主要補注區年平均垂向補注量為 12.19 億噸，因此可求得主要補注區之垂向補注量占整體垂向補注量之 69.07%。由此可知，若主要補注區內無妥善管制開發行為，未來將導致區域內透水面積大減，大幅降低整體補注量，影響系統水平衡極劇。

表 5.4-1 主要補注區補注量與整體補注量關係表

年分	屏東平原 垂向補注量	主要補注區 垂向補注量	主要補注區 補注量百分比
1999	17.91	11.91	66.49
2000	16.86	11.79	69.90
2001	19.79	13.81	69.76
2002	12.70	9.24	72.73
2003	16.42	11.38	69.28
2004	15.61	10.80	69.19
2005	20.85	14.09	67.60
2006	17.49	12.24	70.00
2007	20.42	14.23	69.67
2008	21.24	14.93	70.28
2009	15.66	10.73	68.49
2010	16.88	11.04	65.41
平均	17.65	12.19	69.07

(單位：億噸/年)

表 5.4-2 主要補注區面積及垂向補注量統計表

面積(km^2)		補注量(億噸/年)	
屏東平原	1231.26	屏東平原	17.65
主要補注區	367.57	主要補注區	12.19
百分比	29.85%	百分比	69.07%

2.主要補注區對地下水系統汙染之影響分析

完成地下水數值模式之建置與檢定後，以檢定完成之水流模式搭配 MODPATH 汙染傳輸模式，假設無妥善管理主要補注區內的污染行為，模擬主要補注區受汙染後之可能影響範圍。MODPATH (Pollock, 1994)亦是由美國地質調查局(U.S.G.S)所開發，其為 MODFLOW 模式之後置處理程式，因其利用水流模式模擬之水流流場，再以水流流場模擬汙染質點之移動路徑，其僅考量傳流(Advection)相，MODPATH 並不考量擴散項(Diffusion Term)及土壤吸附力(Adsorption)等效應，且假設污染質點單方面受到水流流場影響，並影響流場(蔡英傑，2006；陳祐誠，2009)。

本計畫以 MODPATH 於主要補注區內任意位置之地表設置污染源，觀察污染質點之行經路徑，質點流經範圍即為汙染範圍。水流模式係採去年度建置之穩態模式，模擬期距分別為 100 年及 200 年，藉此推估污染物質可能之傳輸範圍，傳輸範圍如圖 5.4-1 至圖 5.4-3 所示，依序為 F1、F2 與 F3 之水質影響範圍圖，紅線畫分區域即為主要補注區，土黃色區域為 100 年後之汙染傳輸範圍，綠色區域為 200 年後之汙染傳輸範圍。

圖中顯示持續污染 100 年後，部分汙染物質逐漸由淺層含水層(F1)垂直滲入深層含水層(F2 與 F3)，部分污染物質則水平且持續往下游傳輸，至 200 年後，污染物已經幾乎污染整個淺層含水層(F1)，直至下游沿海區域。

觀察屏東平原之水流流場，扇頂區域(即主要補注區)之水平向水力梯度大於扇尾，因此其水平流速亦有類似趨勢，故大部分汙染物質多在 F1 中水平流動，快速地流出主要補注區外，如圖 5.4-1 所示。此外，由圖 5.4-2 與圖 5.4-3 可知，部分汙染物質則垂向滲入深層含水層，該區位主要位於北區之高樹站、關福站與泰山站等，各分層觀測水位均存在垂向水位差，在此垂向水力梯度之影響下，故造成污染質之垂向傳輸，造成汙染質垂向入侵深層含水層。

綜合前述分析可知，北區主要補注區若未妥善管理而遭汙染，大部分汙染質將在淺層含水層中流動，少部分汙染質流入深層含水層，因此將對淺層含水層及部分深層含水層之用水產生安全上之疑慮，而南區主要補注區若遭汙染，雖以現況模擬，汙染質看似未進入深層含水層，然該區之水文地質架構亦是由透水性良好之礫石及粗砂所組成，若往後大規模開發，大量抽取深層地下水，即會導致地下水流場改變，此時就極有可能造成深層地下水之重大影響，因此建議不論於北區或南區之主要補注區，其在開發後，均為易影響整體淺層及深層地下水之區域，應盡速完成妥善之保育規劃。

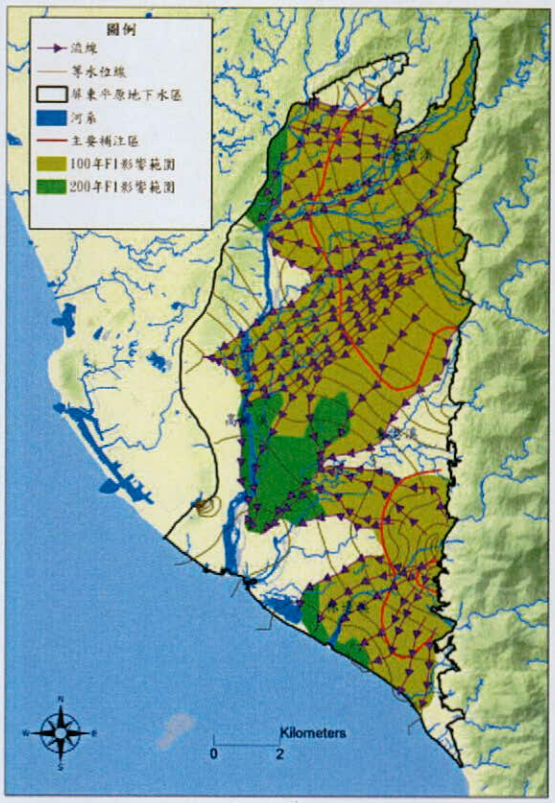


圖 5.4-1 水質影響範圍圖(F1)

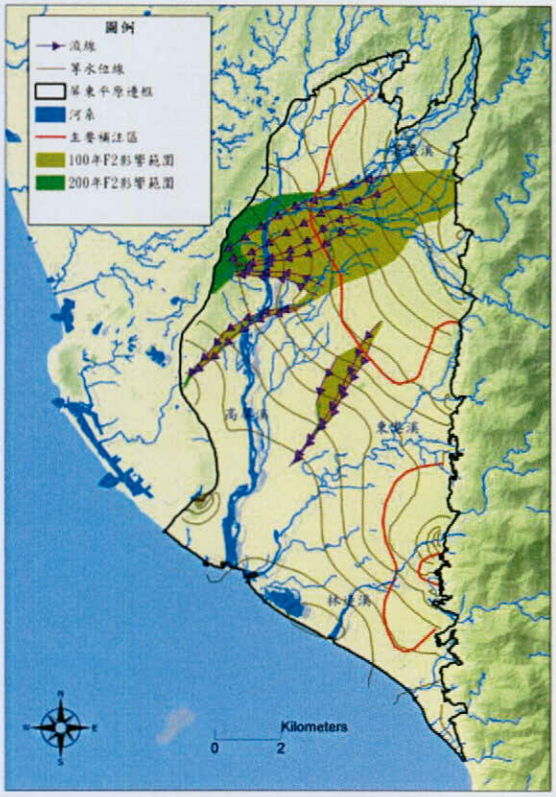


圖 5.4-2 水質影響範圍圖(F2)

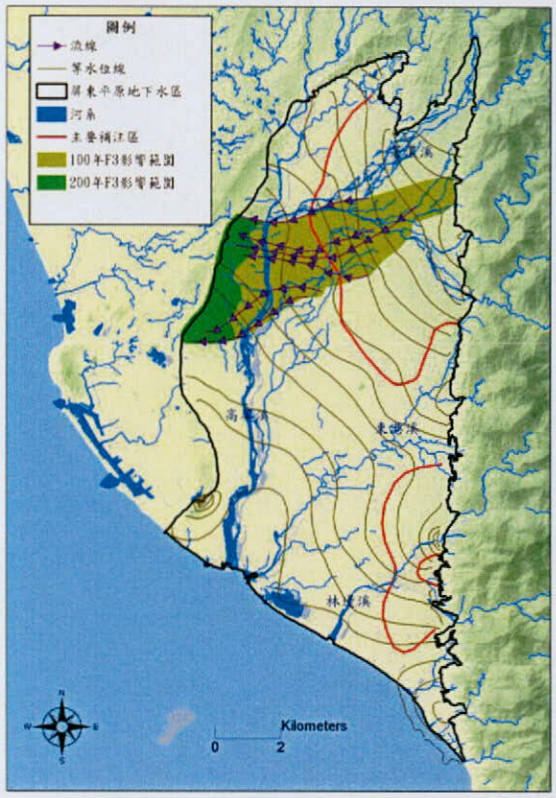


圖 5.4-3 水質影響範圍圖(F3)

參考文獻

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

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

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

台灣地區地下水觀測網第一期計畫，水文地質調查研究及建檔，八十五年度報告，經濟部中央地質調查所。
44. 中興工程，1998，濁水溪沖積扇地表地下水聯合運用第二階段－濁水溪沖積扇地下水人工補注計畫規劃報告，經濟部水利處。
45. 中興工程，2006，濁水溪沖積扇地面地下水聯合運用管理模式建立與機制評估，經濟部水利署。
46. 平成股份有限公司，1996，濁水溪中游地區地下水補注調查與評估。中興工程顧問股份有限公司。
47. 田巧玲、張炎銘、林維侃、蔡明坤，1996，濁水溪沖積扇之地下水水文概況。濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，第 207－221 頁。
48. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2002，屏東平原之地下水補注區，經濟部中央地質調查所彙刊，第十五號，第 17-47 頁。
49. 江崇榮、陳瑞娥，2004a，屏東平原地下水水源保護區劃定之芻議，經濟部中央地質調查所彙刊，第十七號，第 1-19 頁。
50. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2004b，屏東平原地下水補注量及抽水量之評估，經濟部中央地質調查所彙刊，第十七號，第 21-51 頁。
51. 江崇榮, 黃智昭, and 陳瑞娥(2004). 屏東平原地下水補注量及抽水量之評估. 經濟部中央地質調查所彙刊, 17:21-51
52. 江崇榮、陳瑞娥、賴慈華、黃智昭，2005，濁水溪沖積扇地下水區之補注區與補注源探討，經濟部中央地質調所彙刊，第十八號，第 1-28 頁。
53. 江崇榮, 黃智昭, and 陳瑞娥(2006a). 以地下水位歷線分析法評估濁水溪沖積扇之地下水收支. 經濟部中央地質調查所彙刊, 19:61-90.
54. 江崇榮, 黃智昭, and 陳瑞娥(2006b). 以地下水歷線分析法評估濁水溪沖積扇之地下水收支. 經濟部中央地質調查所彙刊, 19:61-90
55. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2006，以地下水歷線分析法評估濁水溪沖積扇之地下水收支，經濟部中央地質調查所彙刊第十九號，第 61-90 頁。
56. 江崇榮，2008a，相等延時分級抽水試驗資料分析之原理與方法。經濟部中央地質調查所彙刊，第二十一號，第 1-21 頁。
57. 江崇榮，2008b，不等延時分級抽水試驗資料分析之原理與方法。經濟部中央地質調查所彙刊，第二十一號，第 23-41 頁。
58. 李昭順、吳景濂，1996，濁水溪沖積扇之抽水試驗，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，第 165-179 頁。
59. 李天浩、林國峰、劉振宇，1997，濁水溪沖積扇扇頂平原地區地表垂向補注量估計，台灣省水利處，96P。
60. 林朝棨，1957，台灣地形。台灣省文獻會，共 423 頁。
61. 林再興，1998，彰化地層下陷區地下水入滲補注及安全出水量之評估，經濟部水資源局。
62. 林俊男、賈儀平，2000，濁水溪沖積扇地下水補助區之劃定及保育原則之研

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

82. 葉文工，1998，台灣沿海地區地下水超抽改善方案研擬與評估，經濟部水資源局。
83. 經濟部中央地質調查所，1995，濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告，共102 頁。
84. 經濟部中央地質調查所，1997，屏東平原水文地質調查研究報告，共 163 頁。
85. 經濟部中央地質調查所，1999，濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告，共129 頁。
86. 經濟部中央地質調查所，2002，臺灣地區地下水觀測網第一期計畫屏東平原水文地質調查研究總報告。
87. 經濟部中央地質調查所，2002，屏東平原地下水自然補注之研究。
88. 經濟部水資源局，1996、1997，台灣地區地下水觀測網第一期計畫-濁水溪沖積扇地下水觀測井建置及相關試驗八十五、八十六年度報告。
89. 經濟部水資源局，1999，台灣地區地下水觀測網第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告。
90. 經濟部水資源局，1999，臺灣水文年報。
91. 經濟部水利署，2007，規畫設計、監造「95 年度地層下陷區地下水觀測站井建置維護計畫」專題報告(1/2):規劃設計及監造工作。
92. 臺糖公司地下水中心，1999-2004，台灣地區地下水觀測網水質調查分析，經濟部水利署出版。
93. 農業工程研究中心，2007，96 年度台灣地區地下水質檢測分析與評估計畫，經濟部水利署出版。
94. 經濟部水利署，2002，地下水資源整體營運規劃與綜合評估。
95. Anderson MP (2005) Heat as a ground water tracer. Ground Water 43/6, 951-968.
96. 經濟部、行政院農委會、內政部，2005，彰化雲林地區地層下陷防治計畫。
97. 農業工程研究中心，2000，濁水溪沖積扇地下水補注區之劃定及保育原則之研訂。經濟部水資源局出版。
98. 張良正等人(2011). 臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估|地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(3/4). 經濟部中央地質調查所計畫報告. Technical report, 經濟部中央地質調查所.
99.

網頁部分：

City of Issaquah (2009) Doing business in a wellhead protection area, http://www.ci.issaquah.wa.us。

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

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

King County (2010) , http://www.kingcounty.gov/environment/waterandland/groundwater/maps-repor

ts/maps.aspx

Washington Dept. of Community Trade and Economic Development, 2003. Critical Areas Assistance Handbook – Protecting Critical Areas within the Framework of the Washington Growth Management Act, 83 pp. http://qa.cted.wa.gov/DesktopModules/CTEDPublications/CTEDPublicationsView.aspx?tabID=0&alias=CTED&lang=en&ItemID=976&MId=944&wversion=Staging

Washington Dept. of Community Trade and Economic Development, 2004. *GMA Update: Issues to Consider When Reviewing and Evaluating Critical Areas Regulations and Natural Resource Lands Designations*, 3 pp. http://cted.wa.gov/DesktopModules/CTEDPublications/CTEDPublicationsView.aspx?tabID=0&alias=CTED&lang=en&ItemID=1022&MId=944&wversion=Staging

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

附錄 A 屏東平原觀測水位

附錄 A 屏東平原觀測水位

表 A-1 爲屏東平原與鄰近區域觀測站網列表，圖 A-2 至 A-48 爲屏東平原所有水位站。

表 A-1屏東平原與鄰近區域觀測站網列表

站號	站名	X坐標*	Y坐標*	井頂高[1]	站號	站名	X坐標*	Y坐標*	井頂高[1]
120101	中正	185015	2503504	14.18	120201	石化	187485	2487965	4.67
120202	林園	186809	2490130	4.07	120301	潮寮	190004	2496500	8.23
120302	永芳	186942	2500950	16.60	120303	昭明	188414	2493802	6.58
120401	溪埔	191978	2513893	29.14	120403	大樹	191135	2510159	23.31
121901	中洲	195993	2528009	38.40	121902	旗山	197100	2531368	45.28
122001	吉洋工作站	201510	2528640	54.39	122002	美濃	203425	2525409	52.70
122101	新威	210915	2533502	153.13	130101	清溪	194408	2506330	19.94
130102	海豐	198476	2511130	33.64	130201	潮洲	202232	2492984	16.36
130302	東港	193156	2485971	2.37	130501	新庄	195738	2496246	10.31
130502	萬丹	194540	2501970	15.56	130601	繁華	205264	2511656	60.06
130801	九如	196776	2515370	34.75	130901	土庫	198425	2524645	*
130902	里港	197514	2520447	38.69	131001	鹽埔	205622	2517240	58.97
131002	彭厝	201104	2515658	40.84	131101	高樹	208068	2525407	89.72
131102	泰山	209266	2521392	68.78	131103	新南	203915	2520763	52.04
131104	關福	209883	2518620	77.15	131202	赤山	209521	2499542	31.37
131301	建興	204395	2507086	38.04	131303	老埤	207504	2503670	36.44
131401	西勢	200397	2502704	20.38	131402	大湖	200368	2497500	12.16
131501	新埤	202895	2485957	12.97	131502	萬隆	206802	2490112	45.98
131503	大響	210206	2481360	55.58	131504	鉤漳	208707	2486714	38.63
131602	枋寮	207476	2479160	32.71	131603	大庄	202810	2477706	3.00
131604	德興	207000	2474613	3.65	131701	新園	192774	2491800	4.33
131801	崁頂	198929	2490845	9.50	131802	港東	195798	2490241	3.28
131901	崎峰	197186	2480959	3.72	132501	枋山	210142	2470440	8.17
132801	瑪家	208976	2511539	83.31					

* UTM 二度分帶座標；[1] 單位：(m) height

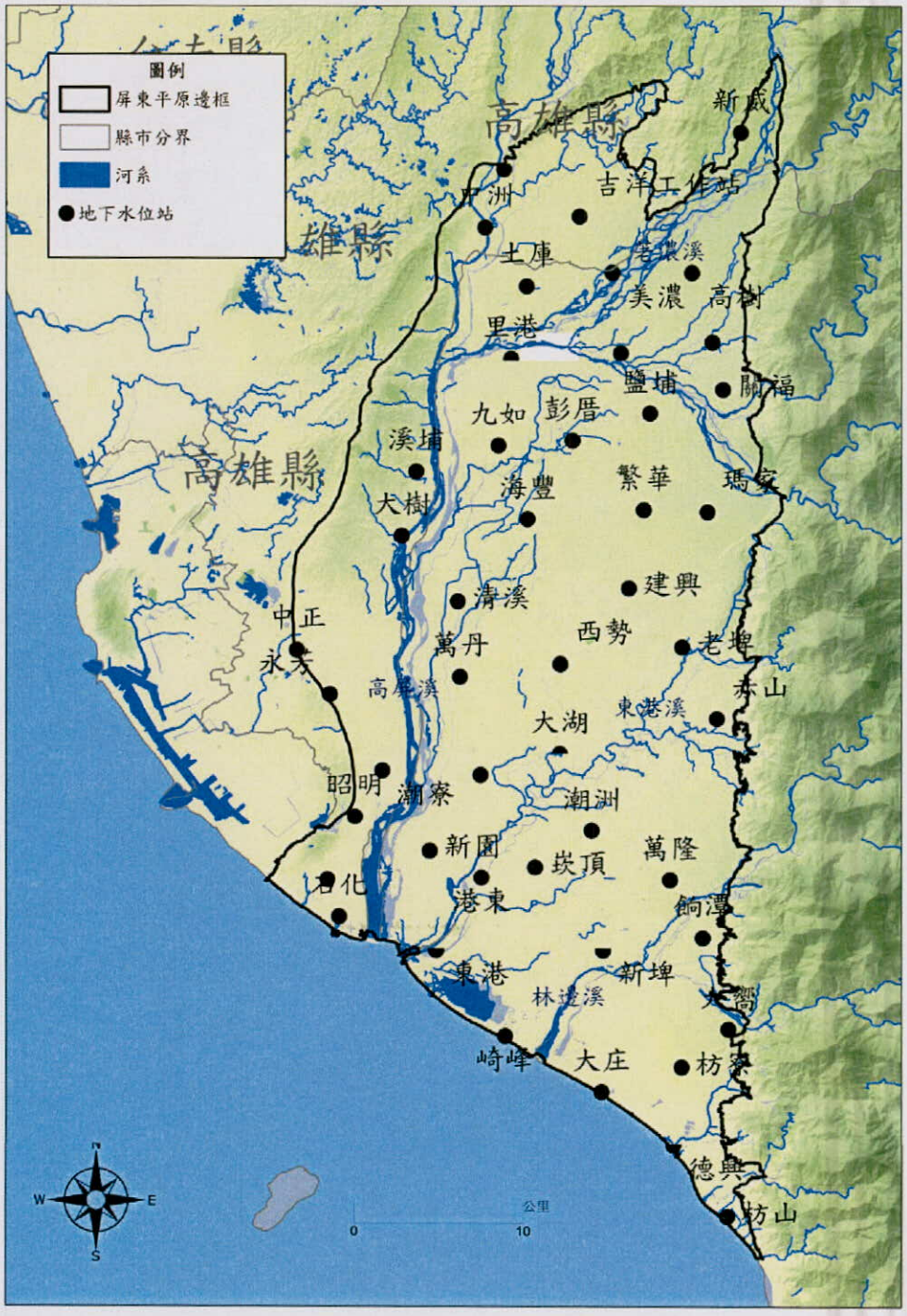


圖 A-1 屏東平原站網分布圖

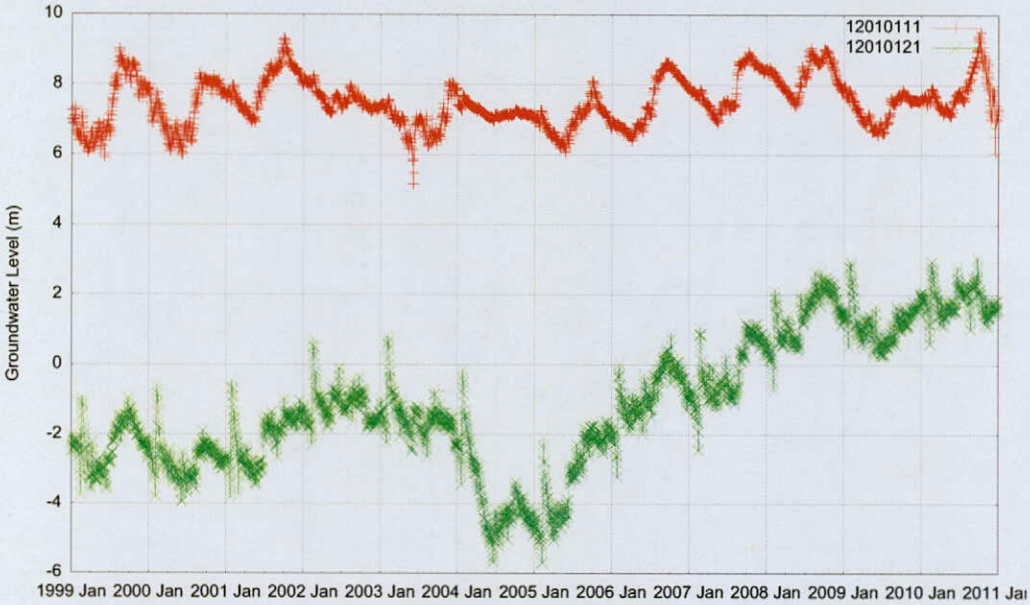


圖 A-2 中正站地下水位歷線圖

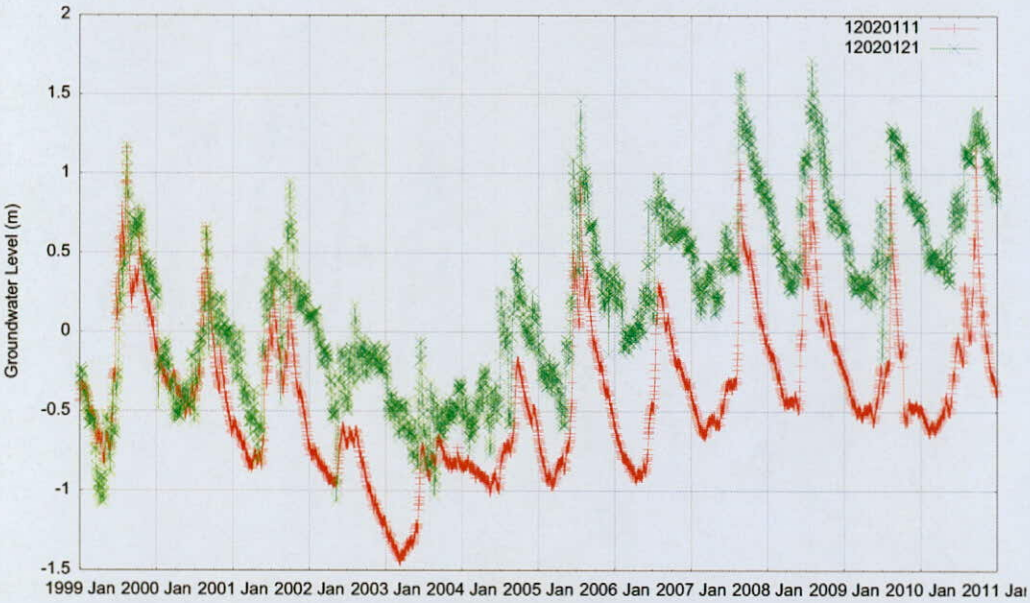


圖 A-3 石化站地下水位歷線圖

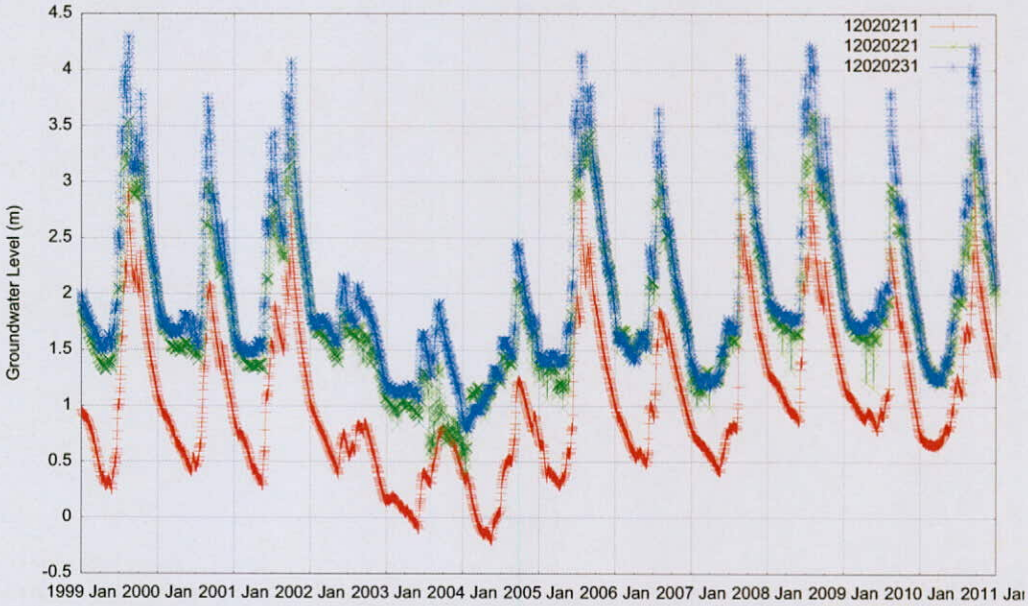


圖 A-4 林園站地下水位歷線圖

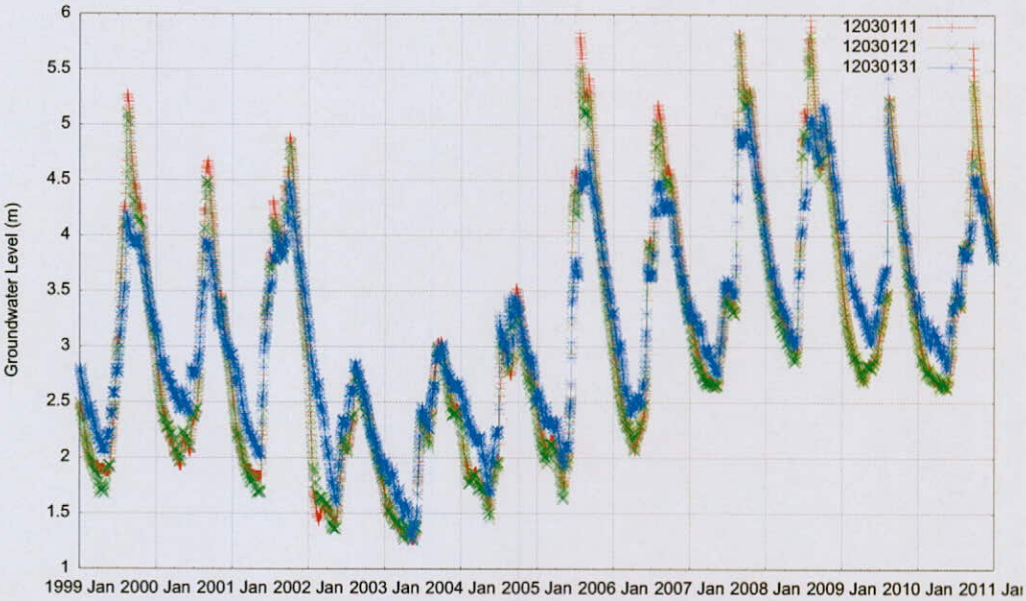


圖 A-5 潮寮站地下水位歷線圖

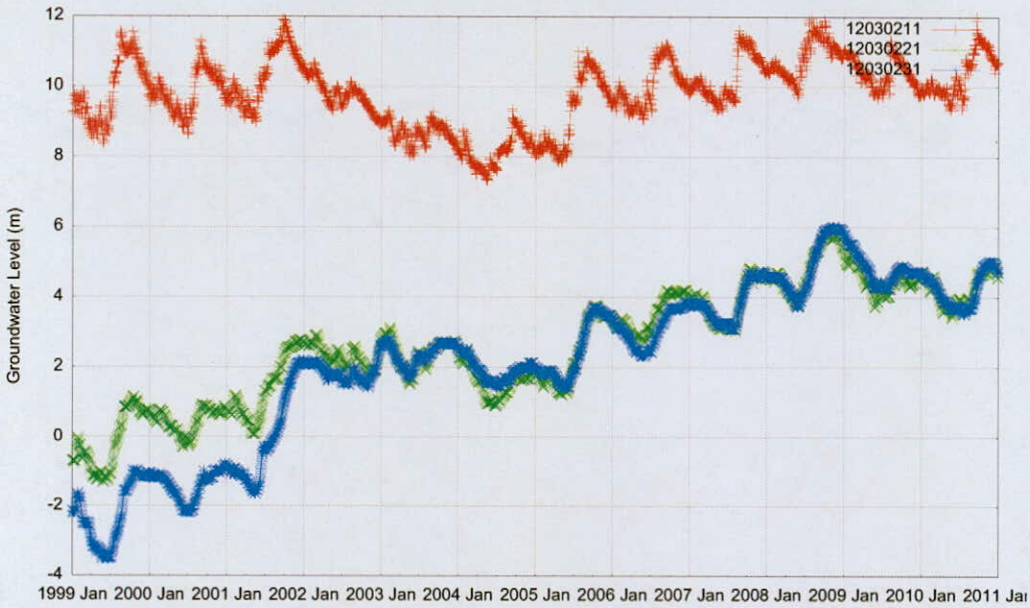


圖 A-6 永芳站地下水位歷線圖

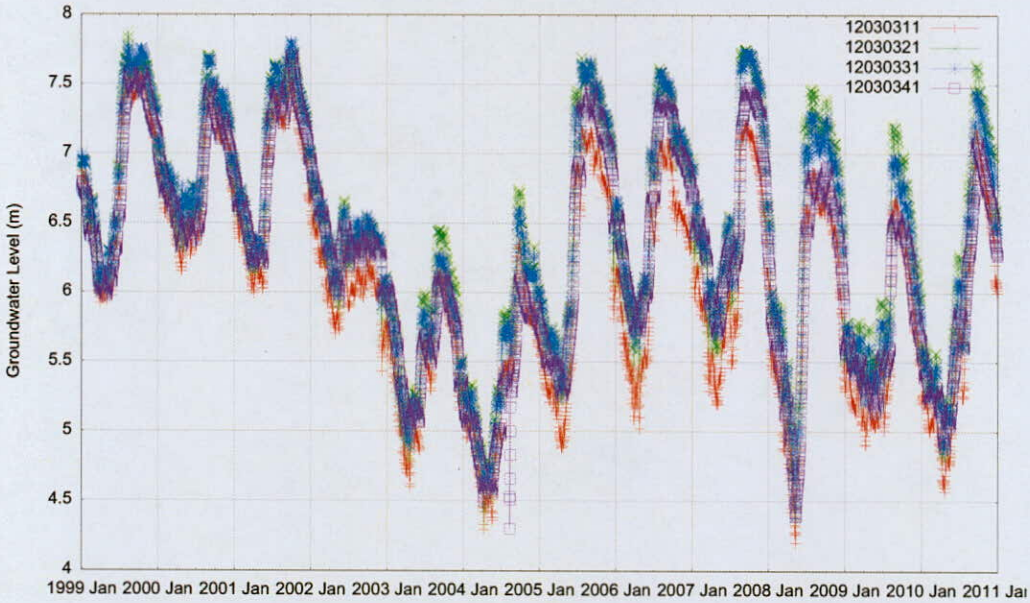


圖 A-7 昭明站地下水位歷線圖

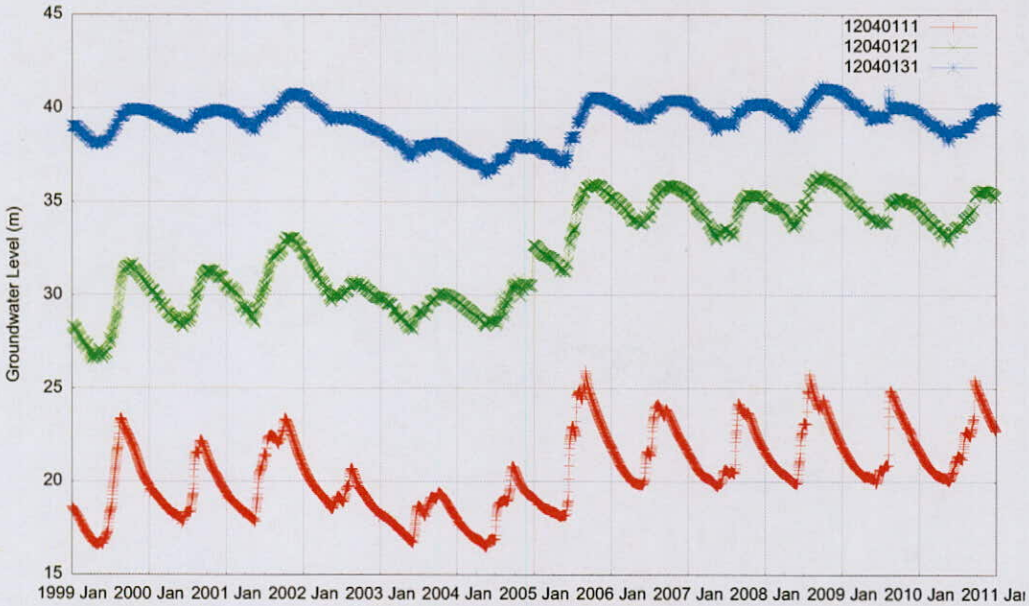


圖 A-8 溪埔站地下水位歷線圖

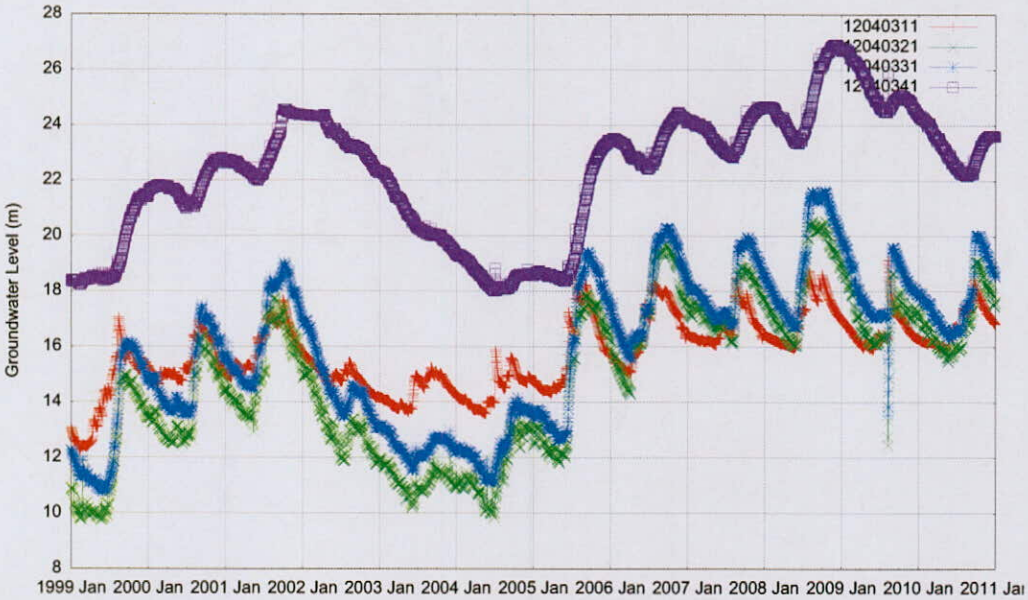


圖 A-9 大樹站地下水位歷線圖

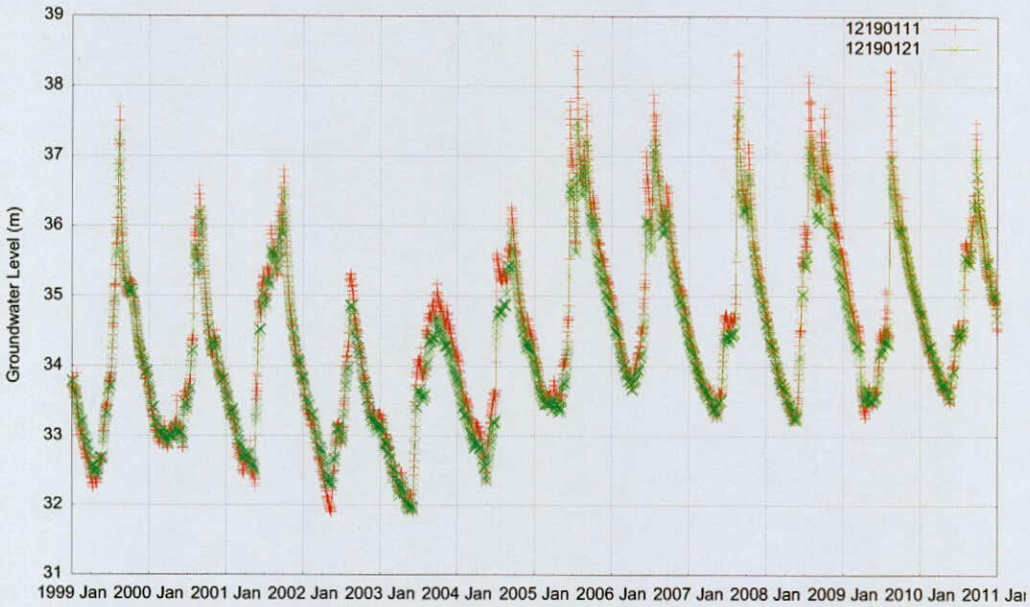


圖 A-10 中洲站地下水位歷線圖

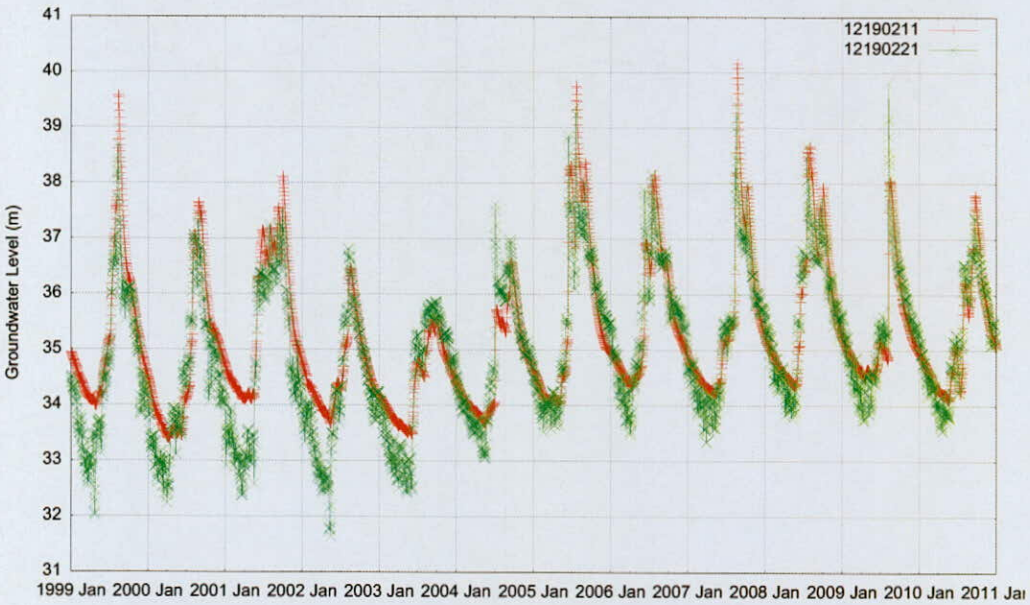


圖 A-11 旗山站地下水位歷線圖

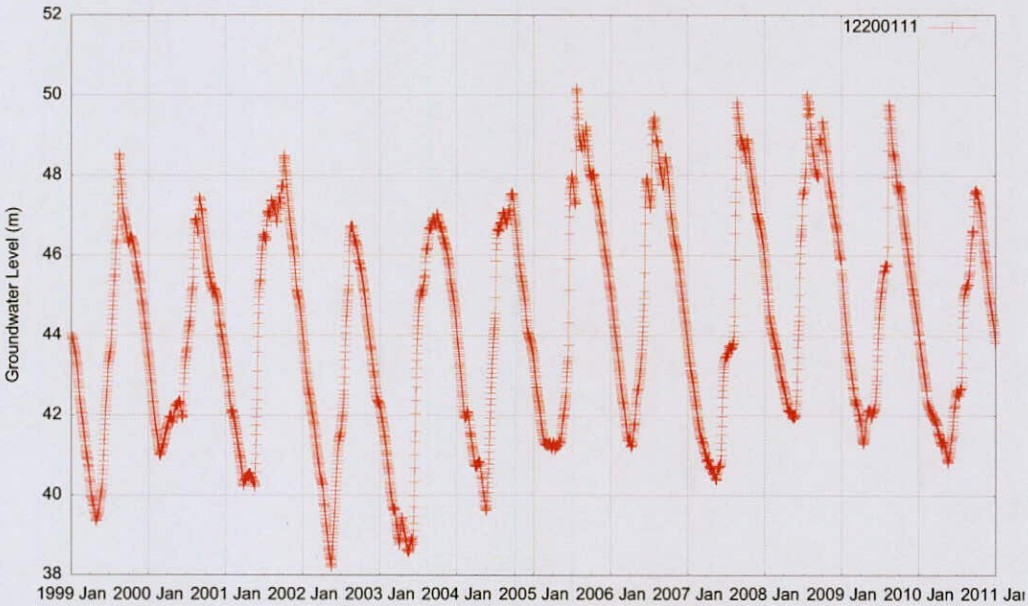


圖 A-12 吉洋工作站地下水位歷線圖

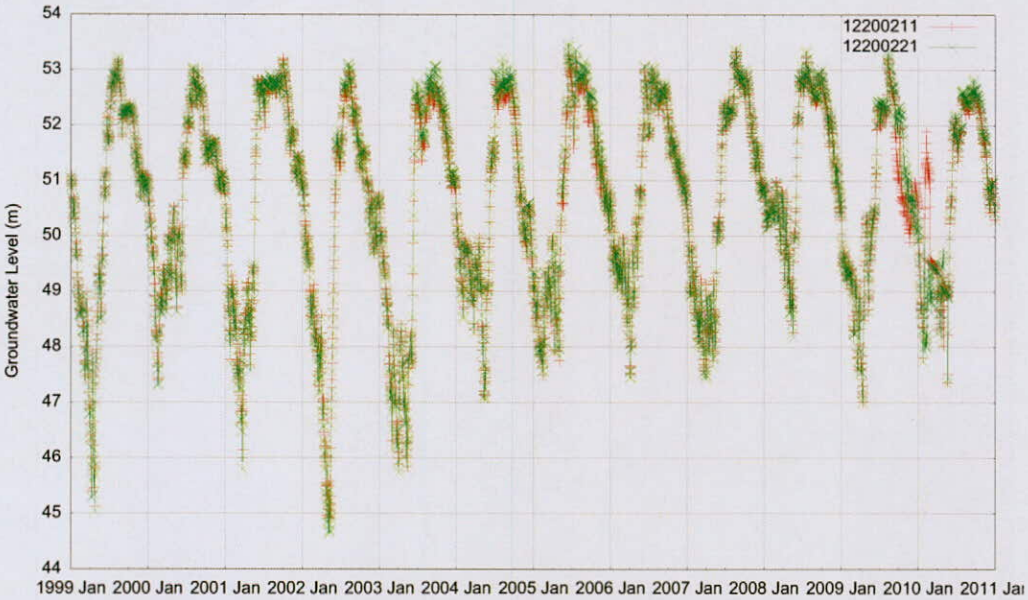


圖 A-13 美濃站地下水位歷線圖

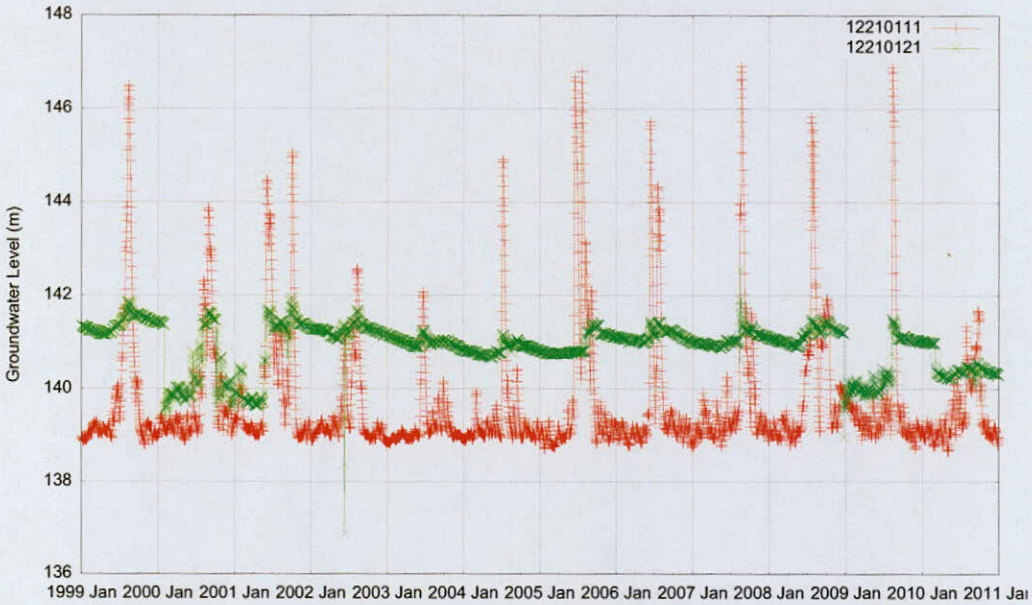


圖 A-14 新威站地下水位歷線圖

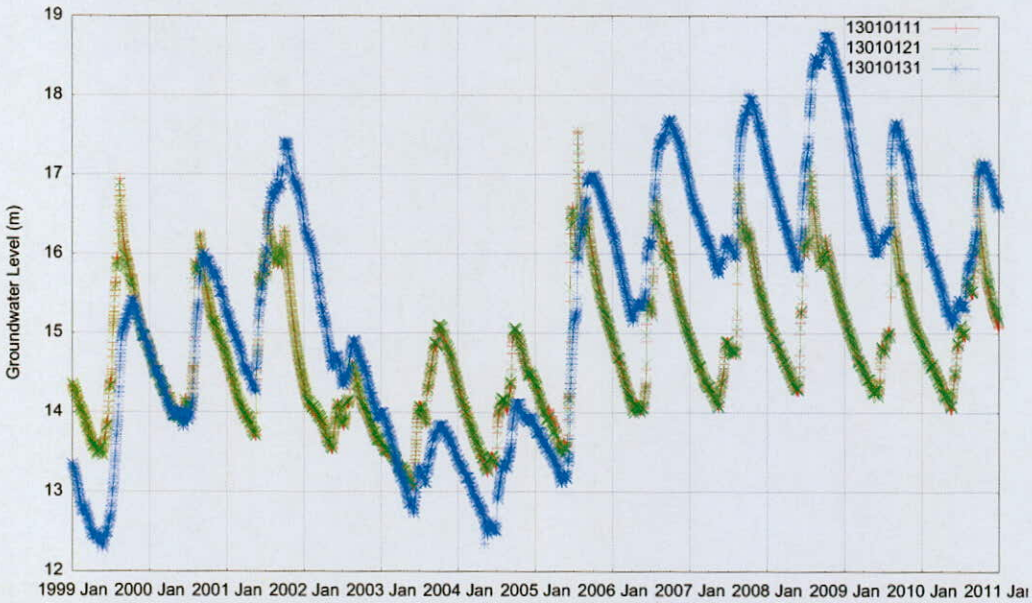


圖 A-15 清溪站地下水位歷線圖

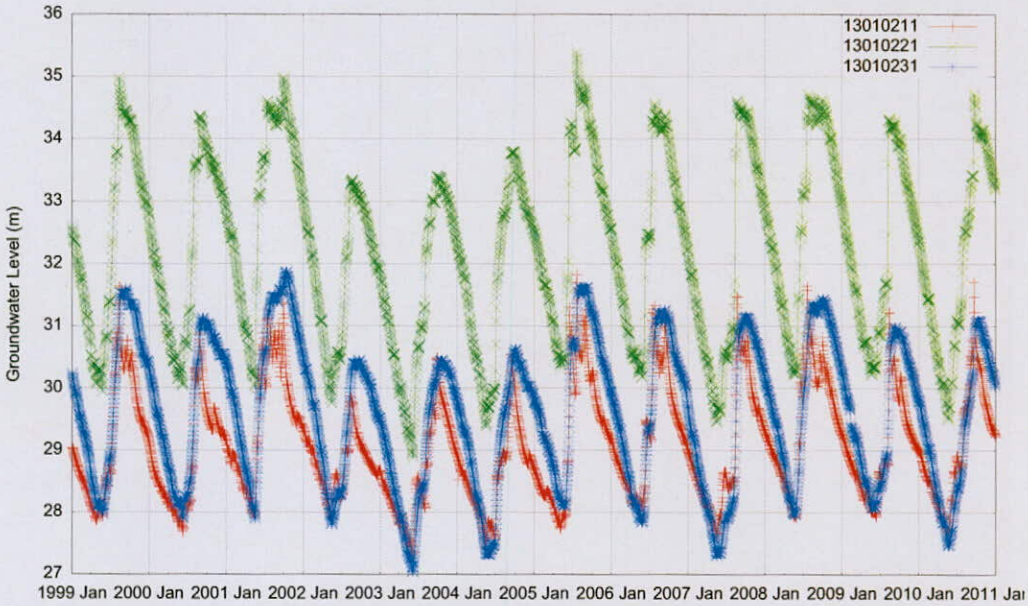


圖 A-16 海豐站地下水位歷線圖

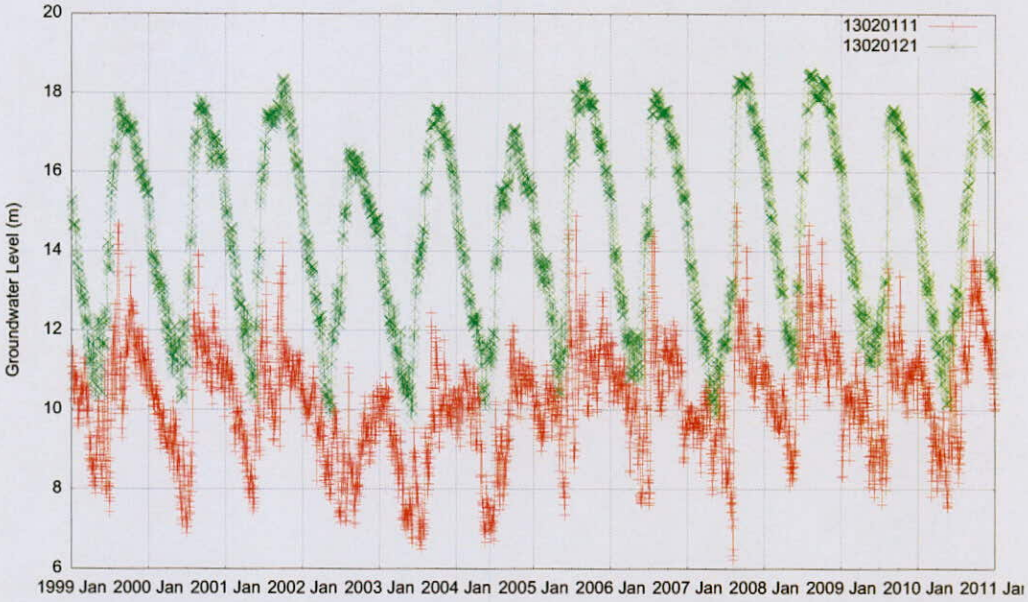


圖 A-17 潮洲站地下水位歷線圖

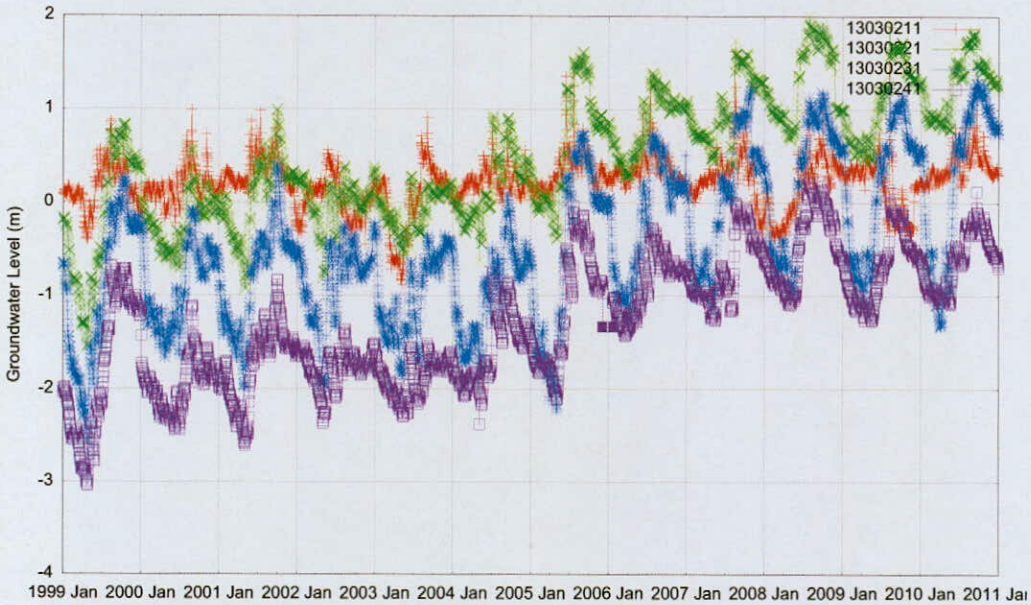


圖 A-18 東港站地下水位歷線圖

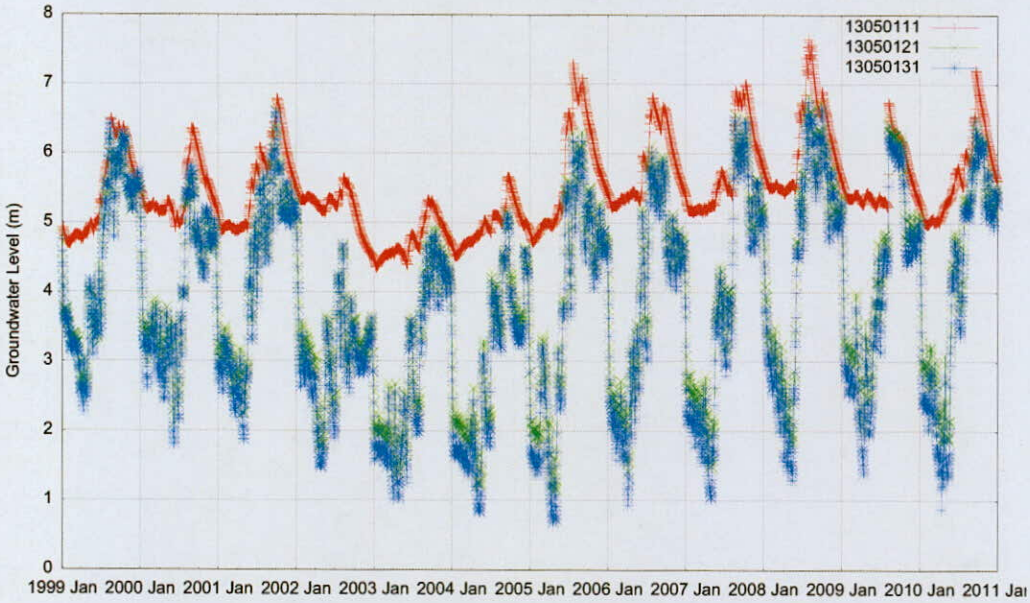


圖 A-19 新庄站地下水位歷線圖

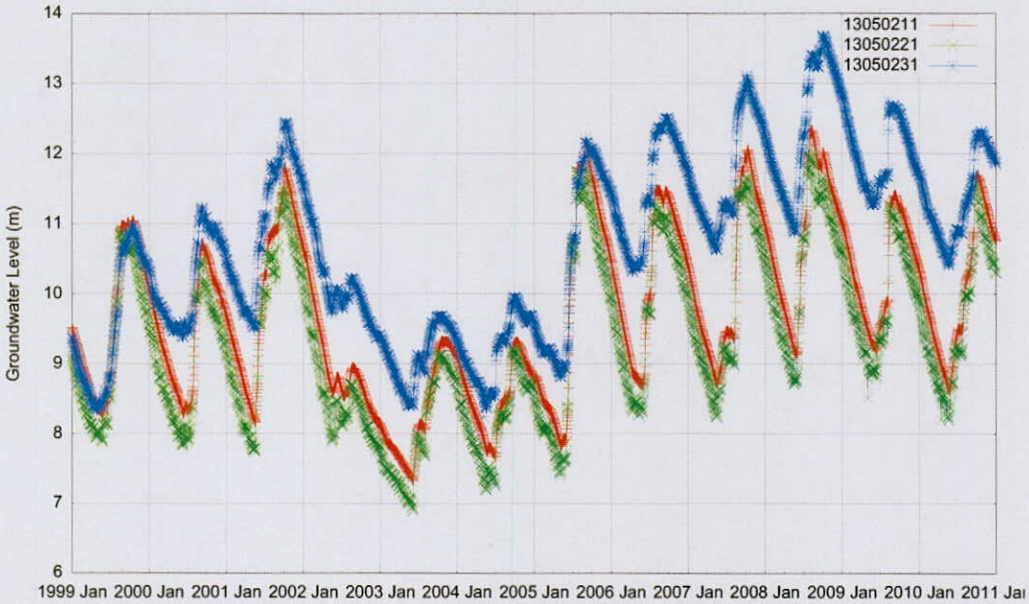


圖 A-20 萬丹站地下水位歷線圖

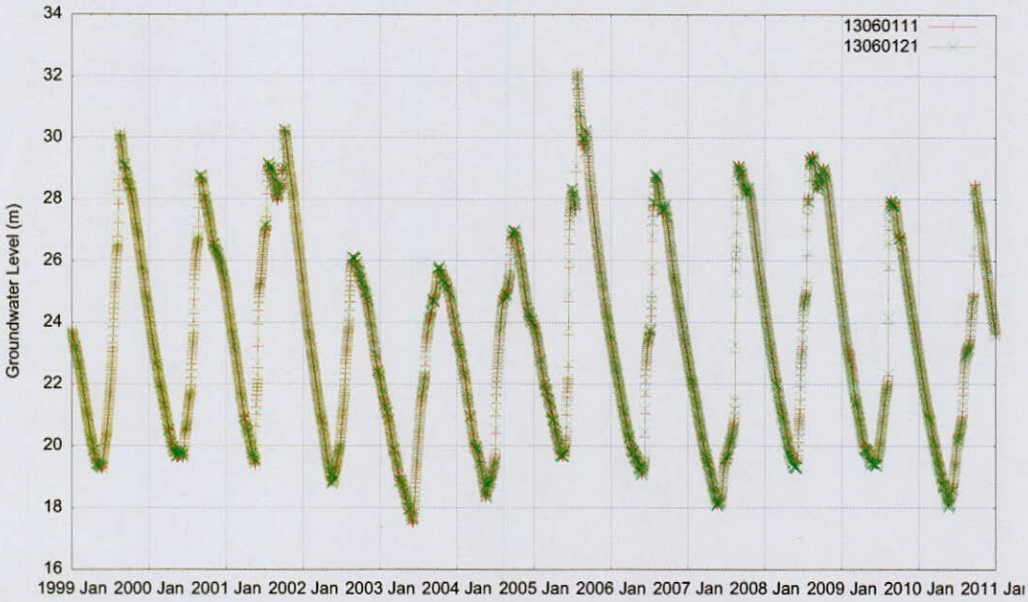


圖 A-21 繁華站地下水位歷線圖

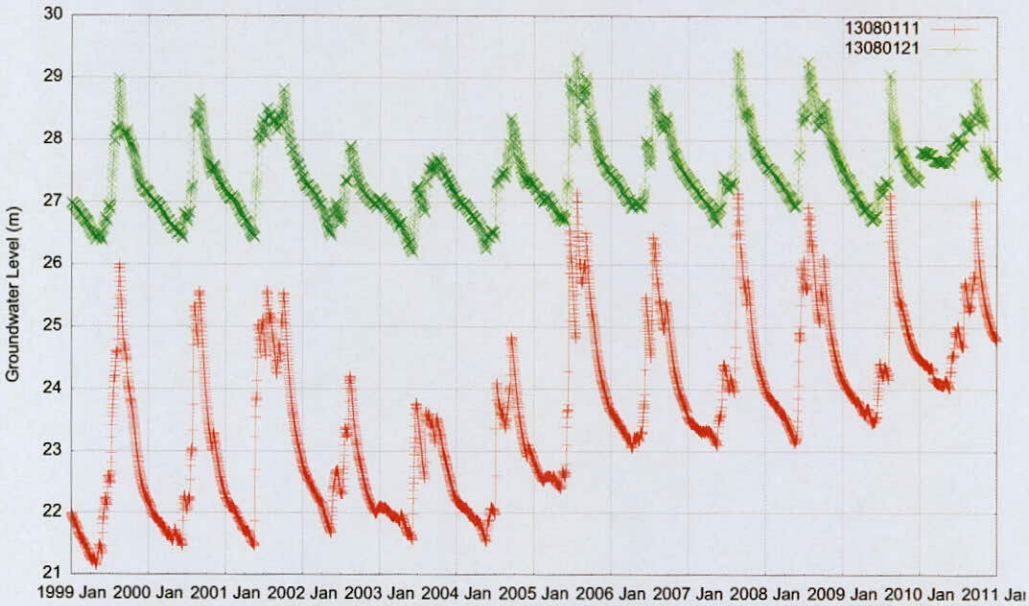


圖 A-22 九如站地下水位歷線圖

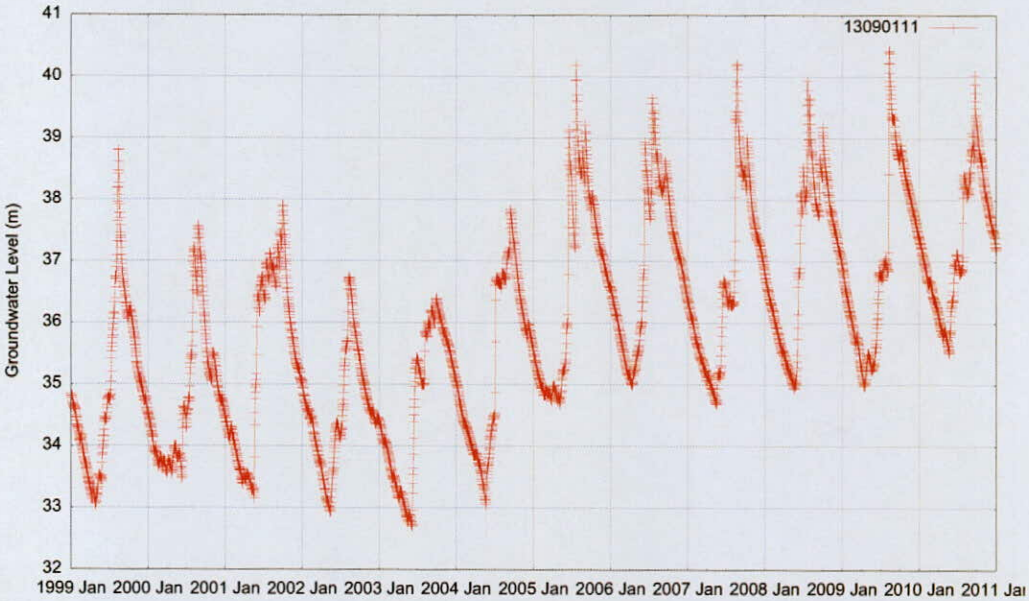


圖 A-23 土庫站地下水位歷線圖

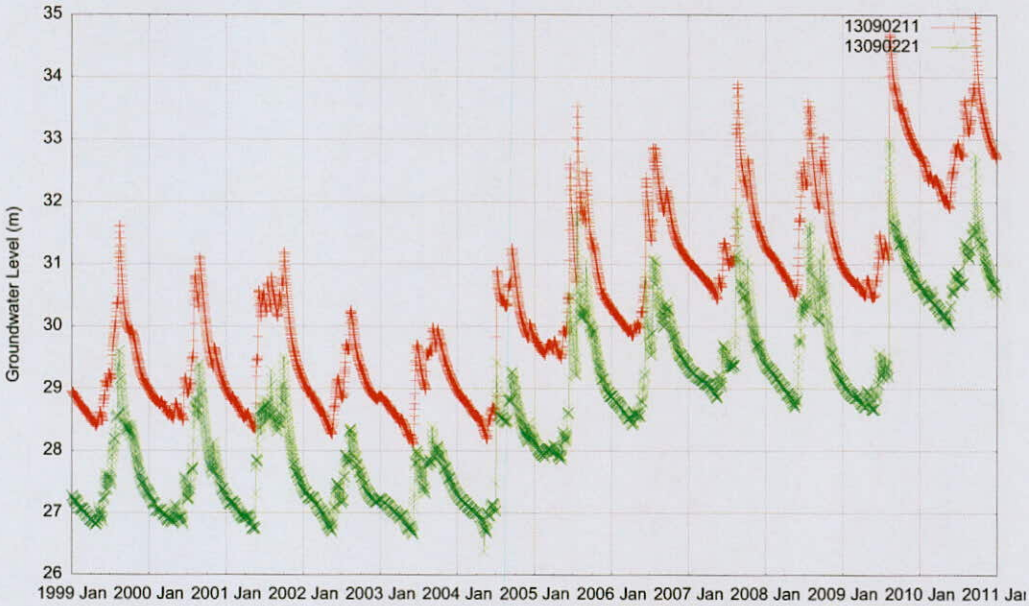


圖 A-24 里港站地下水位歷線圖

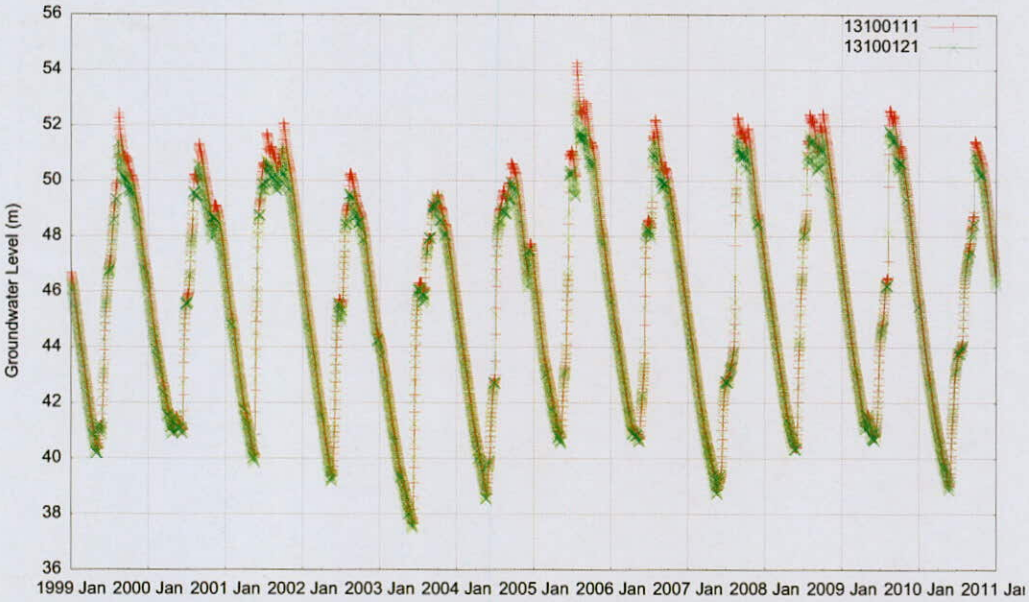


圖 A-25 鹽埔站地下水位歷線圖

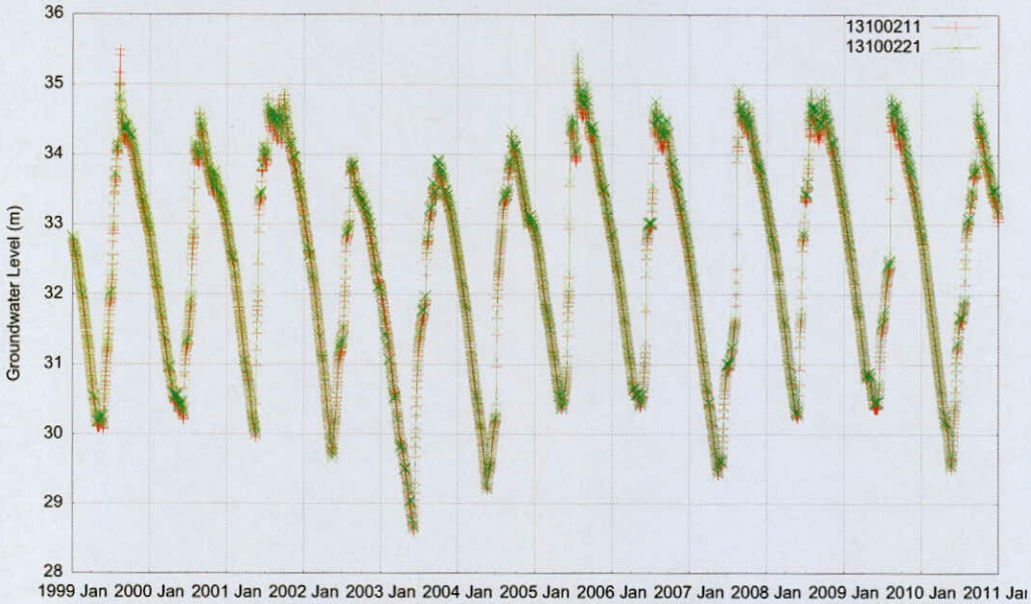


圖 A-26 彭厝站地下水位歷線圖

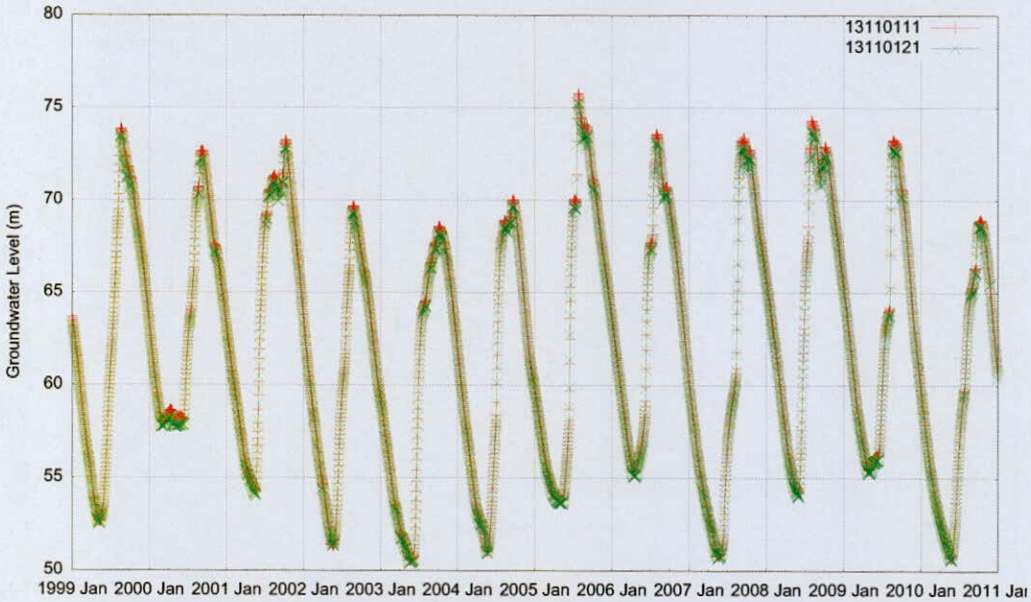


圖 A-27 高樹站地下水位歷線圖

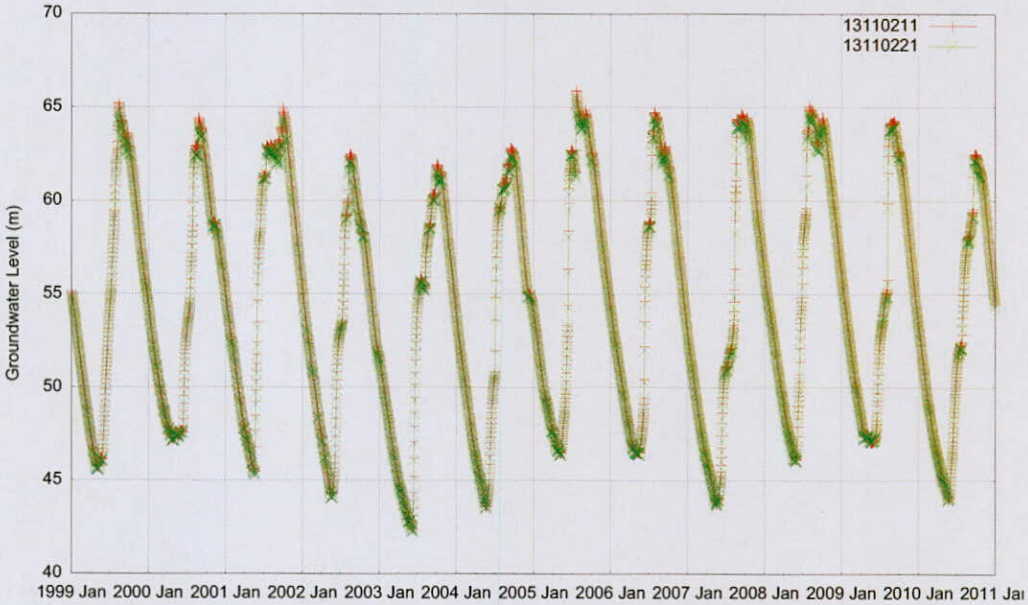


圖 A-28 泰山站地下水位歷線圖

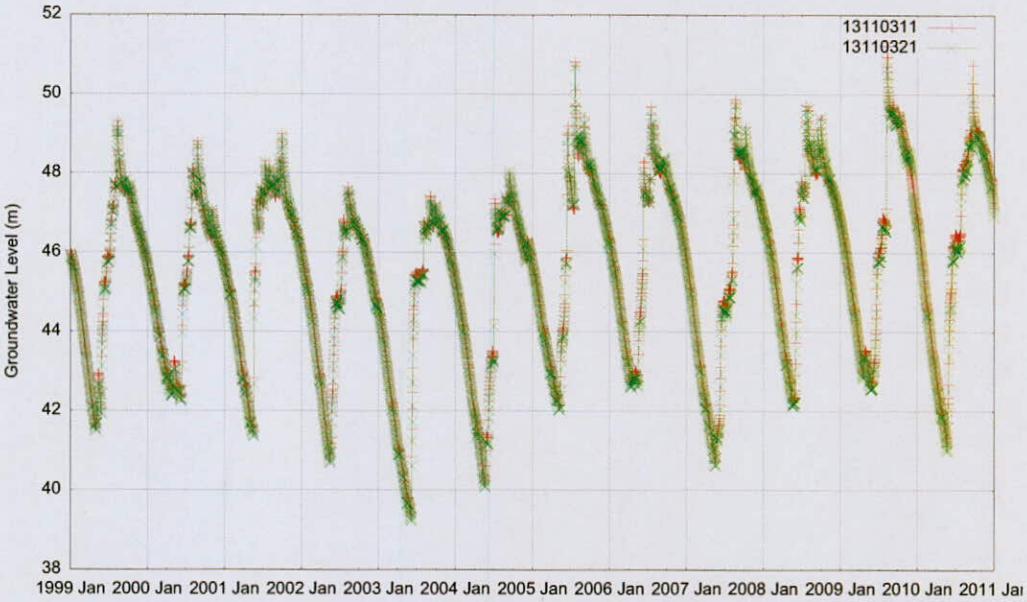


圖 A-29 新南站地下水位歷線圖

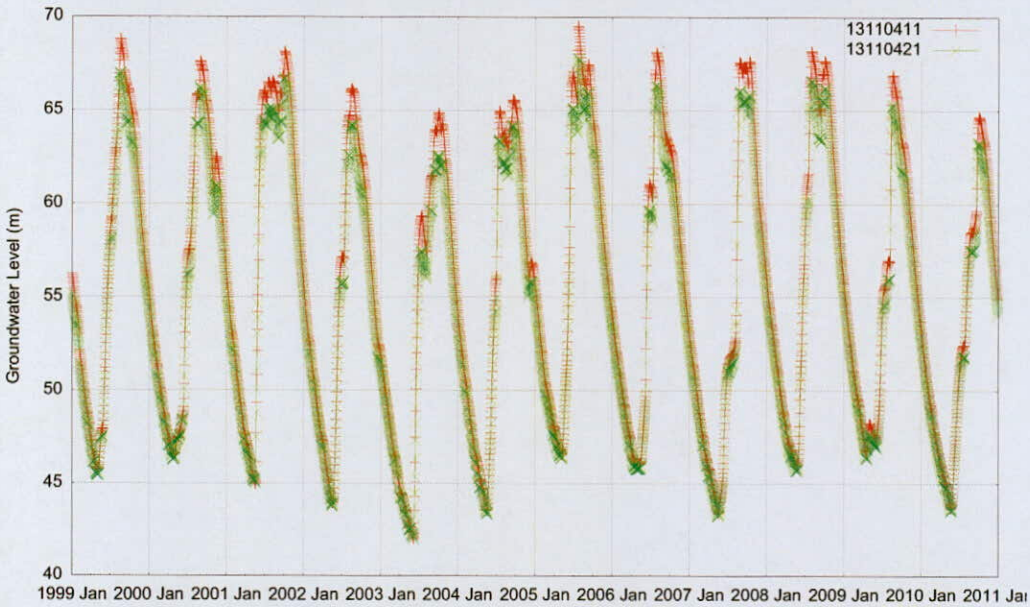


圖 A-30 關福站地下水位歷線圖

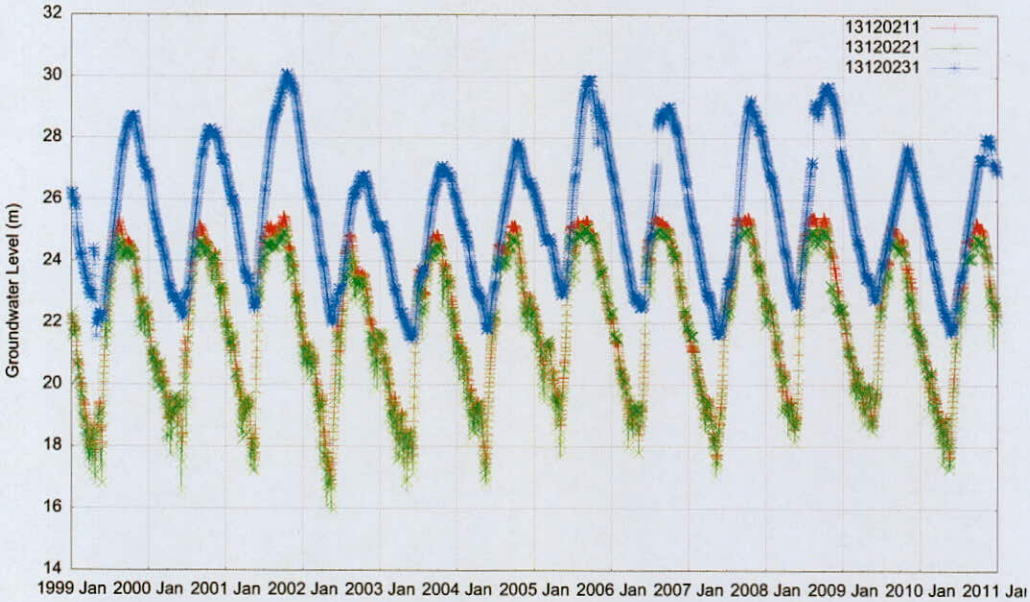


圖 A-31 赤山站地下水位歷線圖

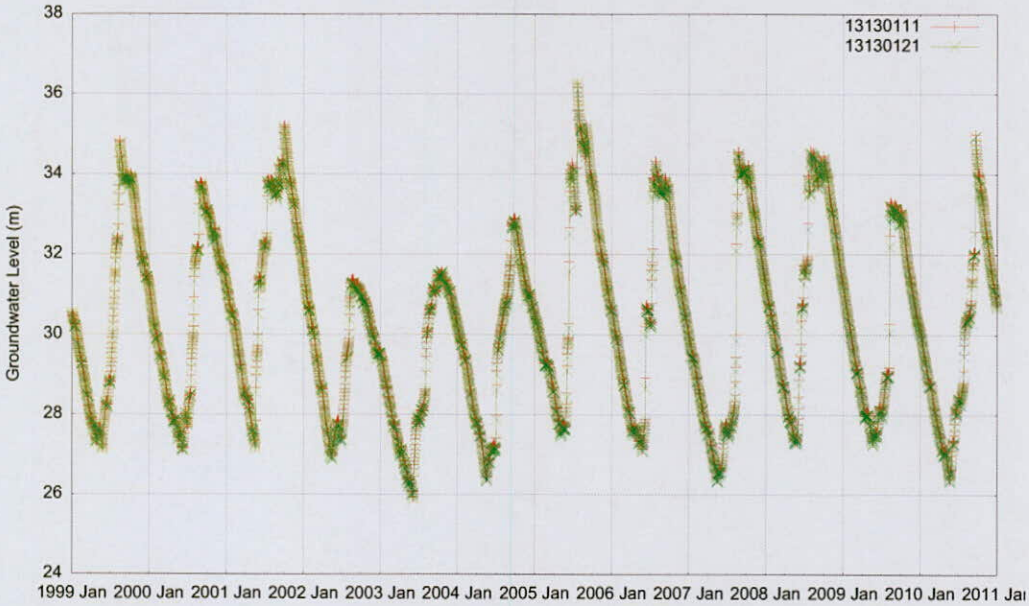


圖 A-32 建興站地下水位歷線圖

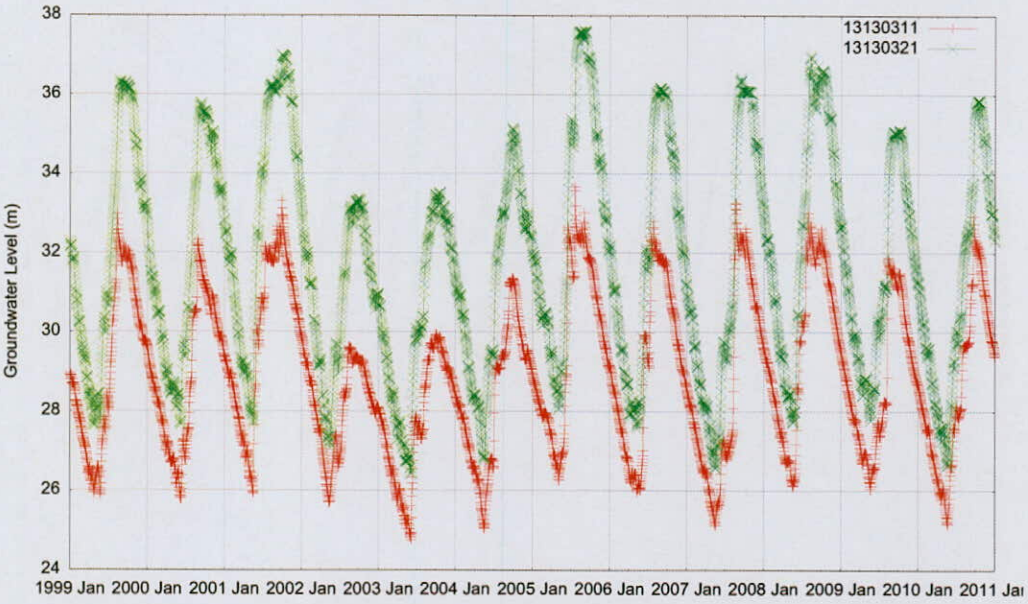


圖 A-33 老埤站地下水位歷線圖

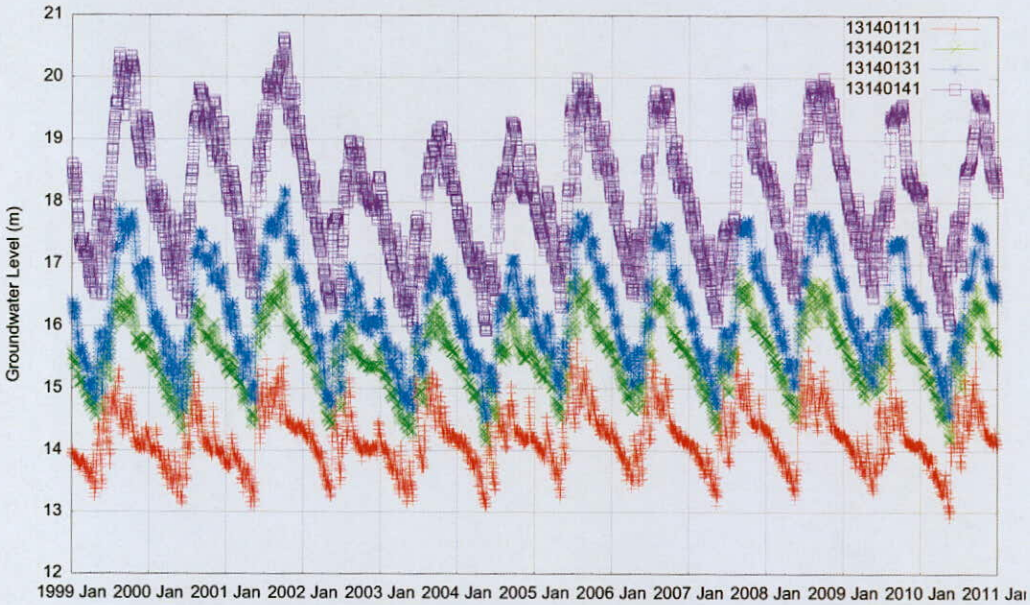


圖 A-34 西勢站地下水位歷線圖

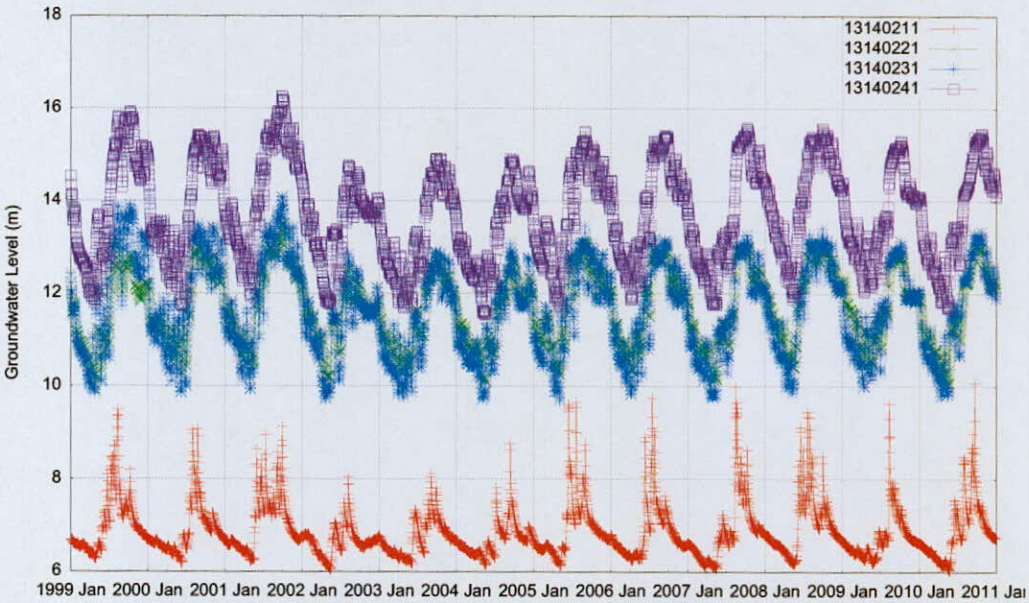


圖 A-35 大湖站地下水位歷線圖

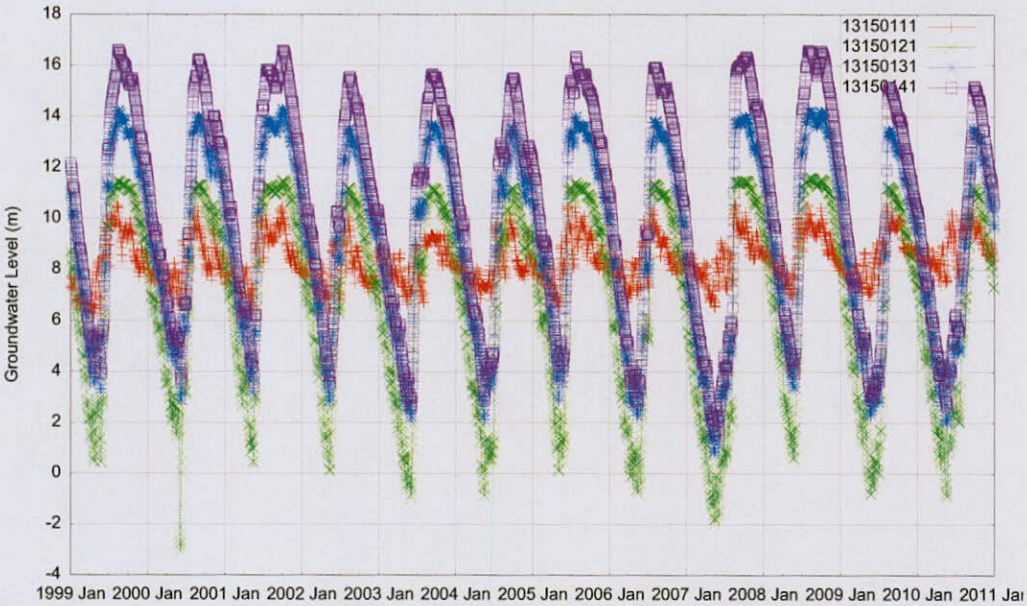


圖 A-36 新埤站地下水位歷線圖

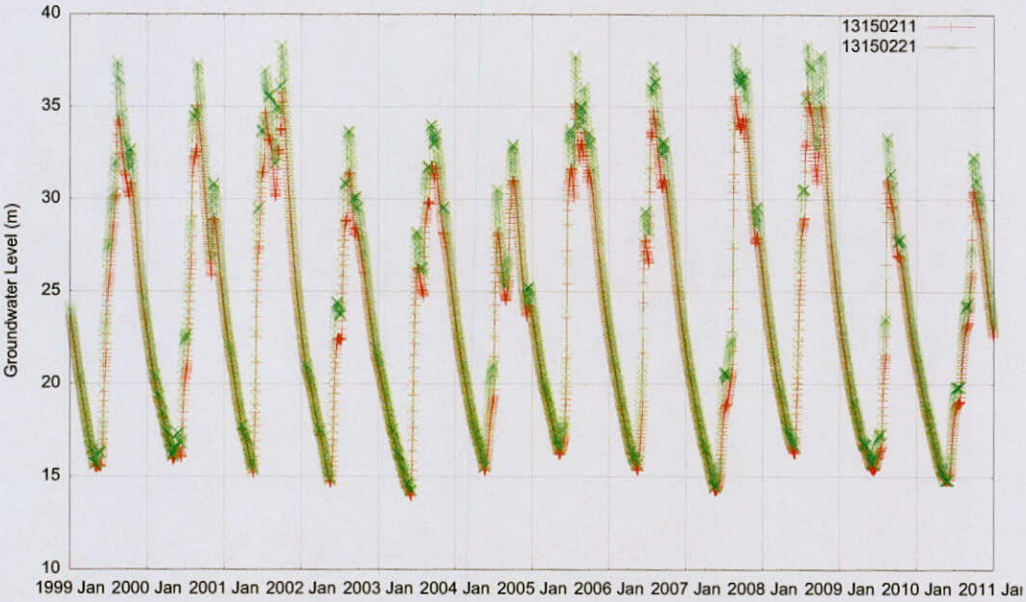


圖 A-37 萬隆站地下水位歷線圖

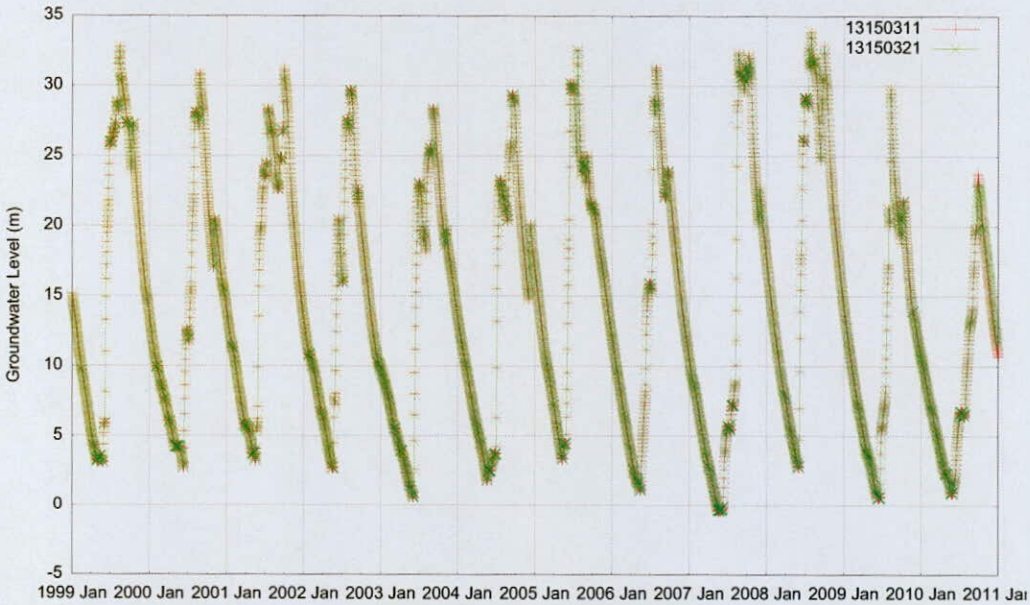


圖 A-38 大嚮站地下水位歷線圖

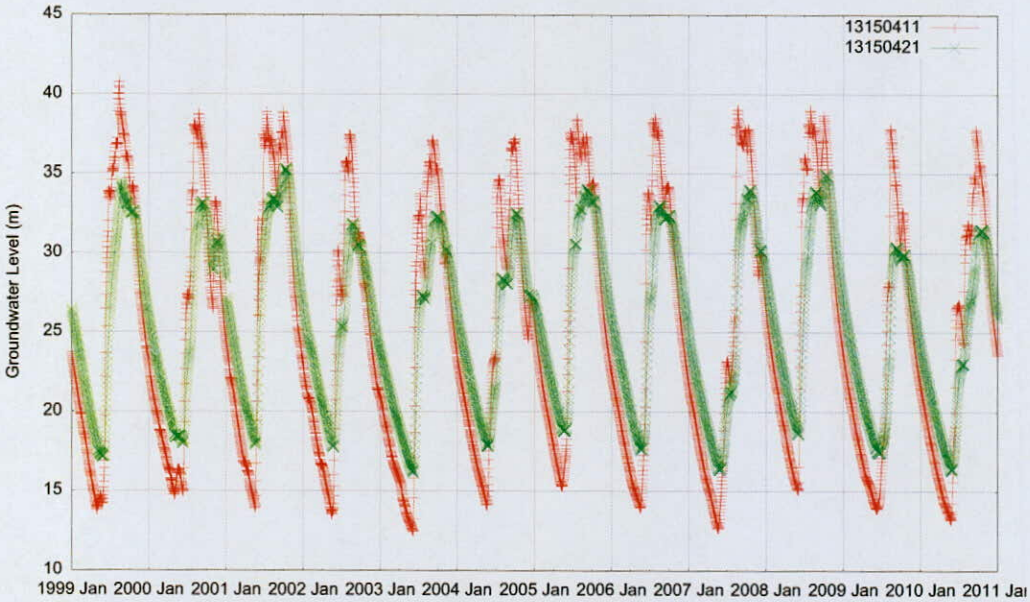


圖 A-39 餉潭站地下水位歷線圖

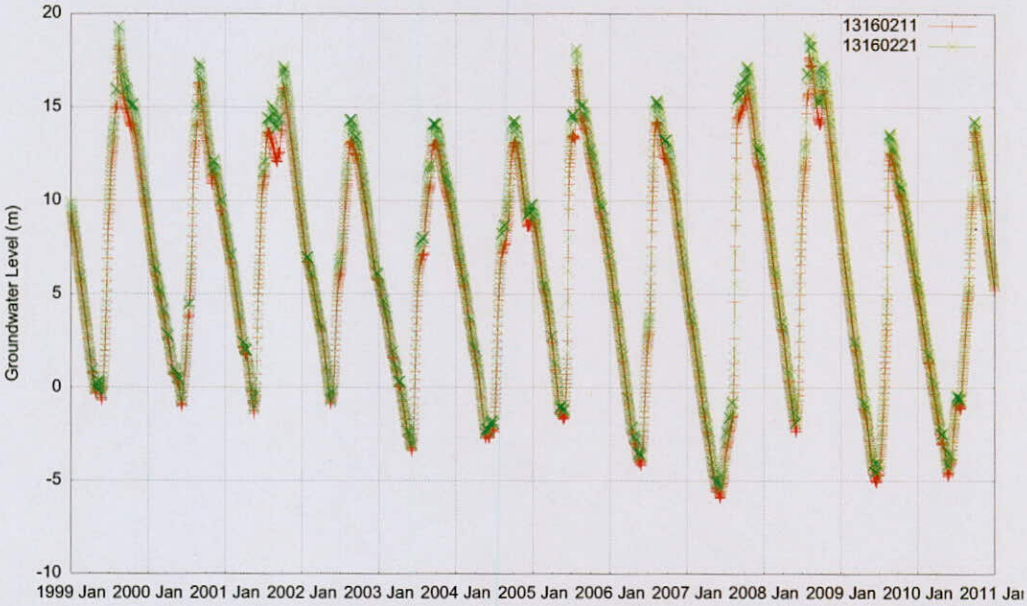


圖 A-40 枋寮站地下水位歷線圖

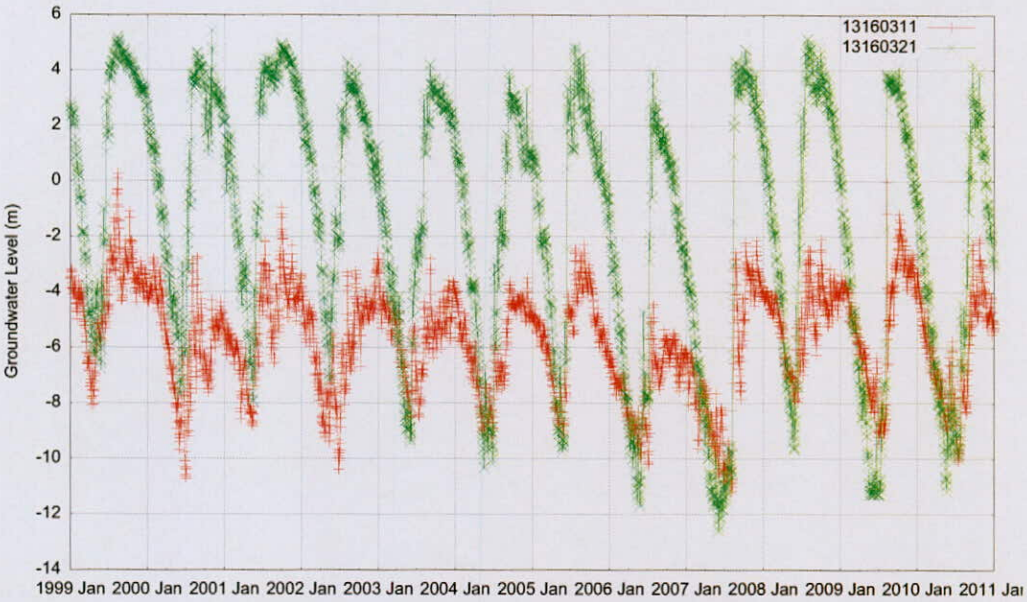


圖 A-41 大庄站地下水位歷線圖

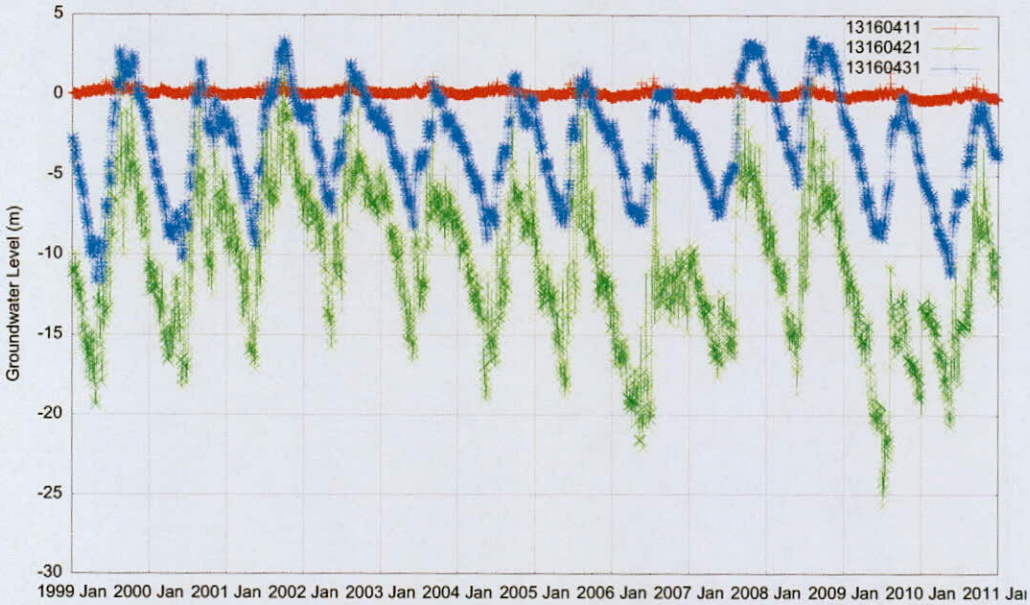


圖 A-42 德興站地下水位歷線圖

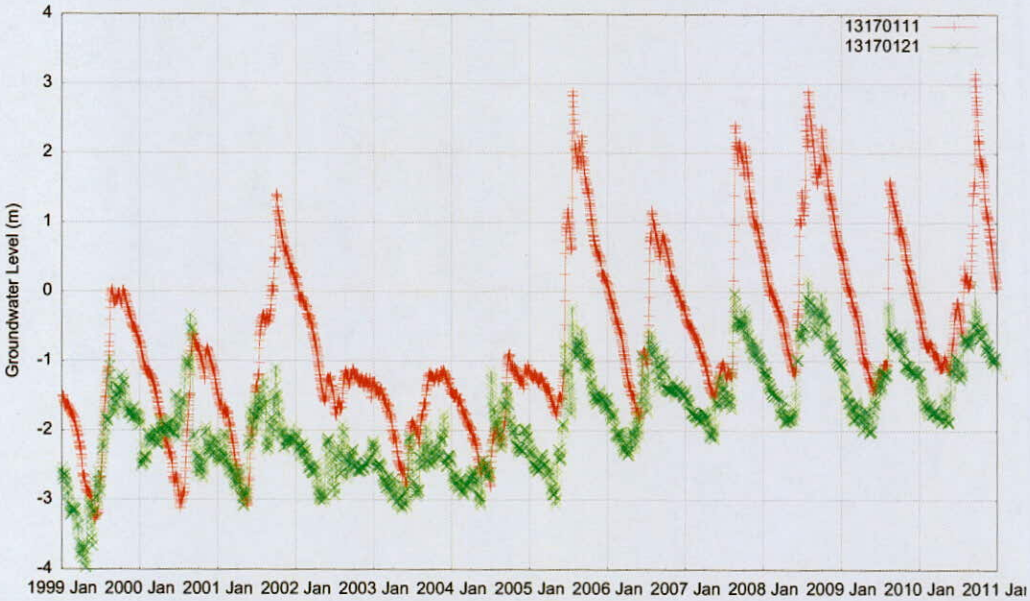


圖 A-43 新園站地下水位歷線圖

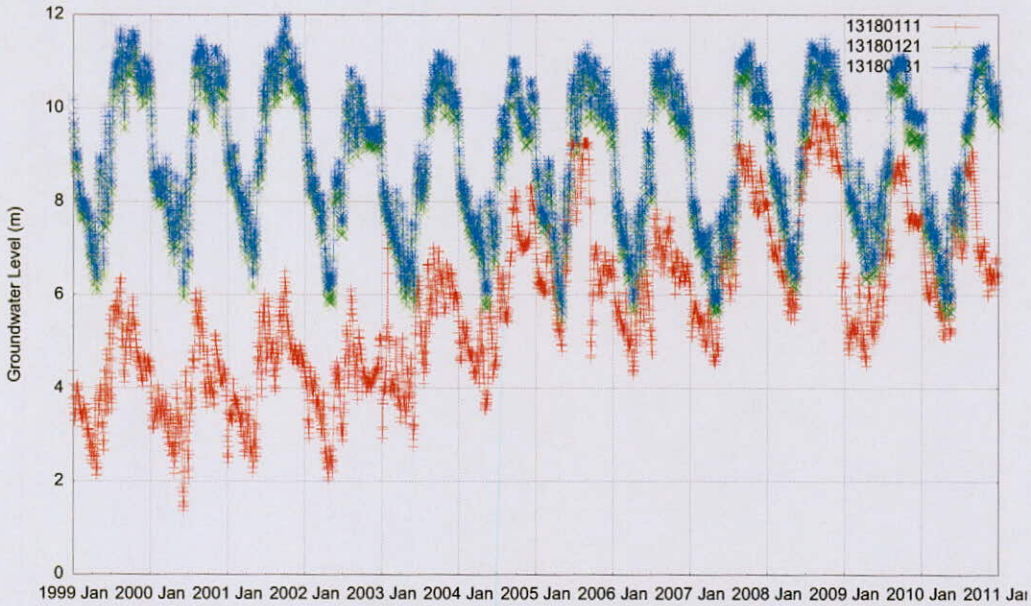


圖 A-44 崁頂站地下水位歷線圖

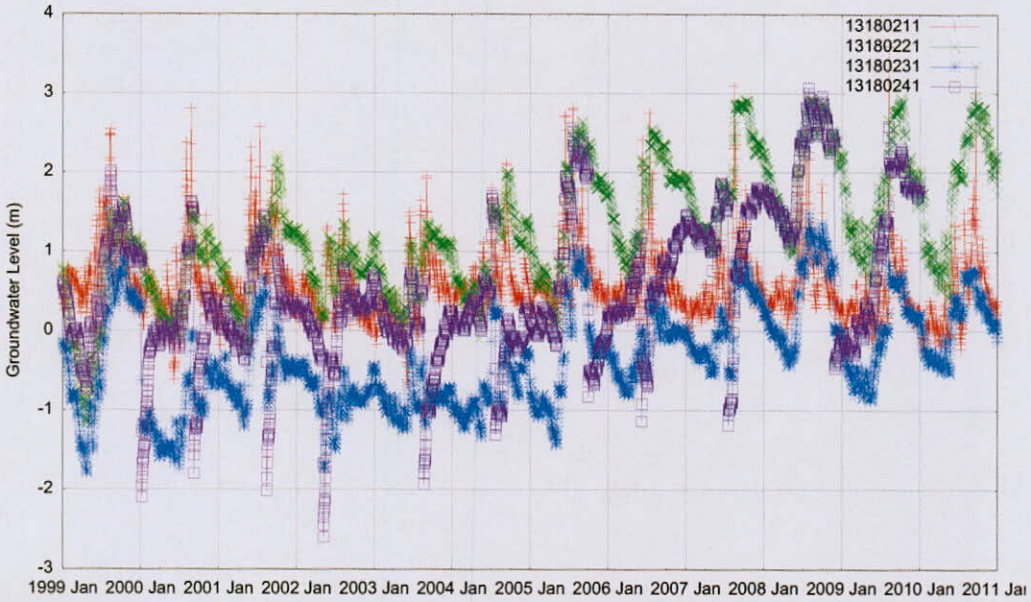


圖 A-45 港東站地下水位歷線圖

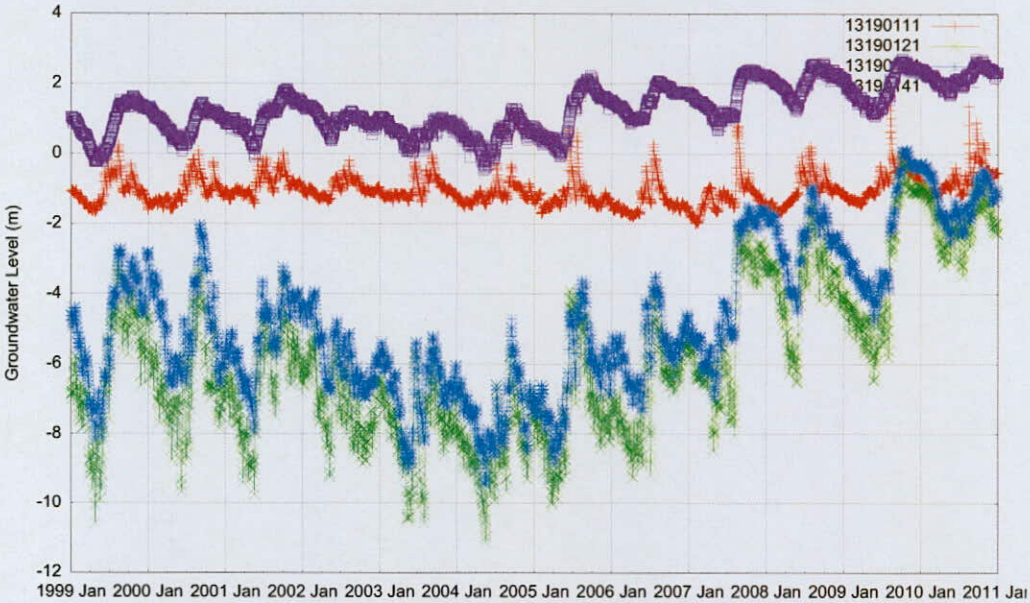


圖 A-46 崎峰站地下水位歷線圖

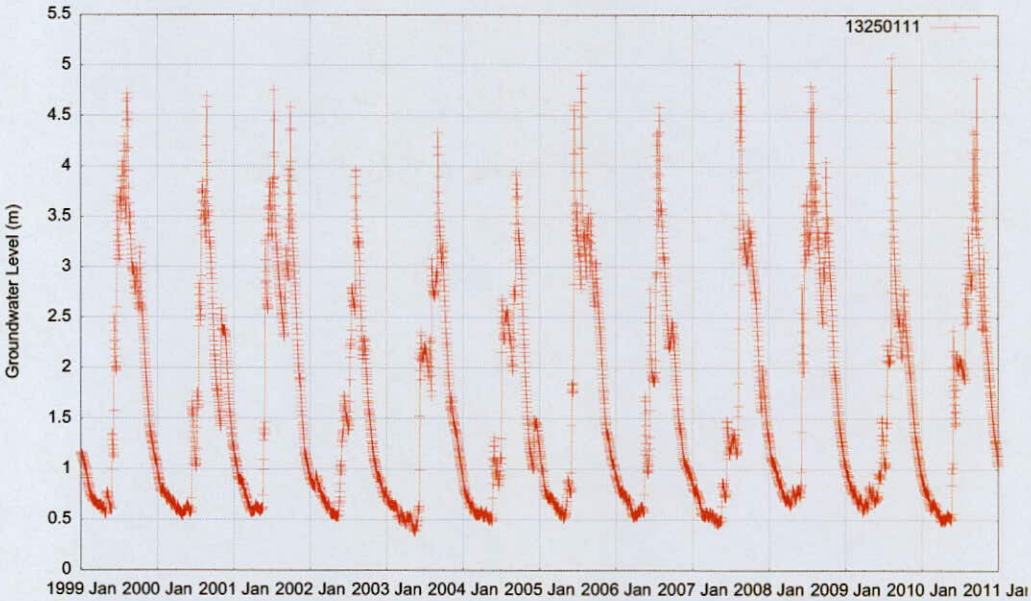


圖 A-47 枋山站地下水位歷線圖

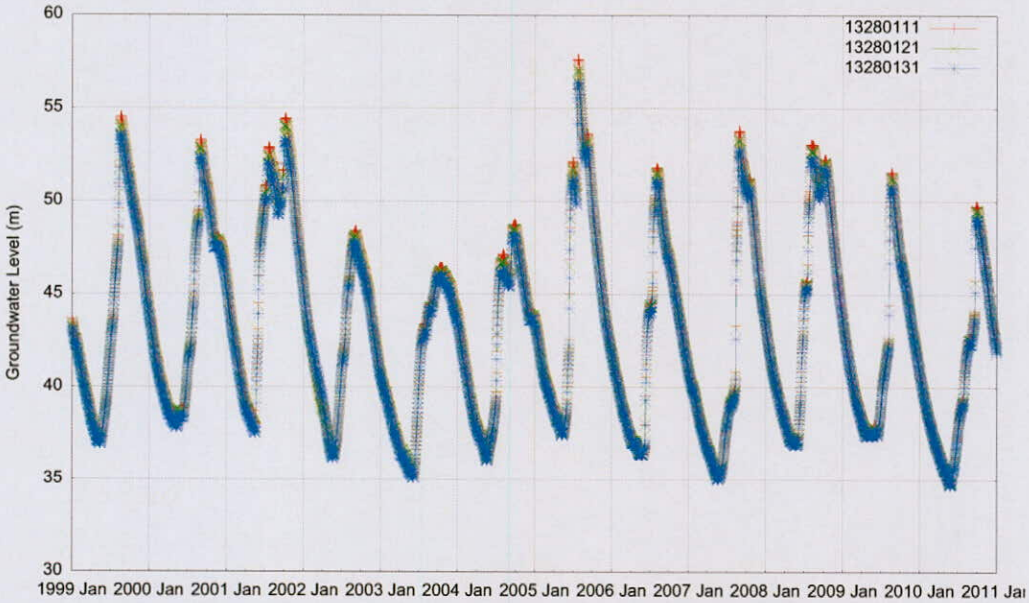


圖 A-48 瑪家站地下水位歷線圖

附錄 B 本年度工作會議

「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(4/4)」

第一次工作會議

一、開會時間： 3/30（五）下午兩點

二、開會地點： 交通大學土木系 329 會議室

三、主席：張良正 老師

四、議　程

14：10-14：15　主辦單位說明

14：15-15：00　工作項目進度報告

（一）分項工作簡報(各 10 分鐘)

1. 海洋大學：張竝瑜助理教授

2. 嘉南藥理科技大學：陳文福副教授

3. 交通大學：張良正教授

（二）Hydro-geo-analyst 展示(10 分鐘)

15：00-15：30　綜合討論

15：30-15：40　結論

16：00　散會

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(4/4)

第一次工作會議

一、 開會時間：101 年 3 月 30 日（星期五）下午 2:00
二、 二、開會地點：土木系 3 樓 329 會議室
三、 三、主席：張良正 老師
四、 出席單位及人員簽到

單位	簽名
經濟部中央地質調查所	黃智昭
	潘崇城
嘉南藥理科技大學	陳文福
台灣糖業公司	李旺明
	陳水松
	王德宜
海洋大學	孫寶琦
	吳佳樹
	張良誠

崧旭資訊股份有限公司	
劉秀竹	
陳志遠	
交通大學	彭建穎
王雲直	陳孝文
林文瑜	陳有誠
蔡瑞彬	楊深惠
	鄭蔚辰

「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(4/4)」

第二次工作會議

一、開會時間： 6/1（五）下午兩點

二、開會地點： 交通大學土木系 329 會議室

三、主席：張良正 老師

四、議　程

14：10-14：15　主辦單位說明

14：15-15：00　工作項目進度報告

分項工作簡報(各 10 分鐘)

1. 海洋大學：張竝瑜助理教授
2. 嘉南藥理科技大學：陳文福副教授
3. 交通大學：張良正教授

15：00-15：30　綜合討論

15：30-15：40　結論

16：00　散會

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(4/4)

第二次工作會議

一、 開會時間：101 年 6 月 1 日（星期五）下午 1:30
二、 開會地點：交通大學土木系 3 樓 329 會議室
三、 主席：江崇榮 副所長
四、 出席單位及人員簽到

單位	職稱	簽名
經濟部中央地質調查所	江崇榮副所長	
	黃智昭科長	黃智昭
		凍源成
		陸茂中
		林燕初
		張閔翔
嘉南藥理科技大學	陳文福教授	陳文福
海洋大學	張竝瑜助理教授	張竝瑜
	吳佳珊研究生	吳佳珊
	張良誌研究生	張良誌
	姚瑞騏學士生	
	張耿豪學士生	張耿豪
交通大學	張良正教授	張良正

	陳宇文博士後研究員	陳宇文
	蔡瑞彬博士後研究員	蔡瑞彬
	鄭蔚辰博士	鄭蔚辰
	王雲直研究助理	王雲直
	楊深惠研究助理	楊深惠
	陳逸儒行政助理	陳逸儒
	陳祐誠博士班	陳祐誠
	蕭仲良碩士生	蕭仲良
	許國陞碩士生	許國陞
	徐肇君碩士生	徐肇君
	王宏卿碩士生	王宏卿
	劉鎧榮碩士生	劉鎧榮
	姚又瑜碩士生	姚又瑜
	林海倫碩士生	林海倫
	張瀚文碩士生	張瀚文
	周奕漳碩士生	周奕漳

經濟部中央地質調查所 101 年度委辦計畫

「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(4/4)」期中簡報會議紀錄

一、開會時間：101 年 6 月 28 日（星期四）上午 10：00

二、開會地點：本所 2 樓第 2 會議室

三、主席：江副所長崇榮　　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：

（一） 3 個子計畫執行的初步結果仍欠缺整合，建議期末報告書能有一致性的結果，並加強區域水文地質特性的描述。

（二） 結案時須有全程四年之成果報告，而非只是分年分項計畫之彙整。

（三） 四年成果報告內容，須針對本所施政需求作滿足(如地質法對地下水補注區之繪圖)、須有具體數據，提出繪圖之建議。

（四） 結案之前，建議做全程計畫之作果發表會，以本所立場作出政策之研究，提出具體策略，供施政之依據。

（五） 蓄水量估算之描述文字請加強。

（六） 地下水位歷線，宜和降雨量同時比對，以為旱季無雨時段退水線之選定；此外，場次降雨相對應地下水位上升，才是真正的地下水補注，並非所有地下水位上升，都是有實質的補注。場次降雨量造成之地下水位上升量及相對應之補注水量是很有用的水文資料，可在歷線分析過程同時發生。

（七） 數值模式檢定出之分層抽水量，因為受到給定參數之控制，可能與實際

分層抽水量有很大差異。若能取得重要水井之分佈位置和深度及抽水量相關資料，作為參據和控制，結果會較接近實際狀況。

（八） P.57 地下水位資料異常之判定標準為何?採用人工判視或電腦自動辨釋。

（九） 第五章屏東平原地下水數值模式如何與水位歷線法結合，應有較詳細的說明。

（十） 地下水數值模式中，有無加入河川模組之差異，應該有所說明。

（十一） 數模中輸入之相關參數應該繪圖或列表說明，對本計畫增加之水文地質調查對屏東平原地下水系統概念模型之釐清或改進應該有所說明，才能突顯本計畫之成果與價值。

（十二） P.70 引述非本計畫之研究成果圖表應註明引用來源。

（十三） 建議 P.213、表 5.4-2 加入年降雨量一欄，以判定垂向補注佔年降雨量之比率是否過高。

（十四） P.194「定水頭」一詞是否改為「給定水頭」較為恰當。

（十五） 請於期末報告中，比較水位歷線法與數值模式，於補注量與抽水量數據之相異處。

（十六） 重要補注區劃設或釐「非拘限」、「受壓」或「拘限含水層」等名詞請加以統一。

（十七） 枯水期退水線之斜率，建議以真正判斷後末期斜率來進行抽水量推估。

（十八） P.98 中”測線東側有錯動之中高電阻，初研判為斷層”，請再詳加判釋。

十、結論：

（一）期中報告及簡報內容及進度符合契約書規定，請檢具工作進度表、經費收支表及收據，向本所辦理本案第 2 期款的申請與撥付事宜。

（二）請參照委員綜合意見配合辦理後續工作，並將處理結果之說明，詳列於期末成果報告書附錄，以利查核。

十一、散會（上午 12 時 10 分）。

經濟部中央地質調查所101年度委辦計畫

第三次工作會議議程

一、計畫名稱：「地下水補注潛勢評估與地下水模式建置（4/4）」

二、開會時間：101年9月28日(星期五)下午1:30

地點：嘉南藥理大學

三、議　程

時間	議　程
一、9：30~9：35	主席致詞（5分鐘）
二、9：35~9：45	主辦單位說明計畫背景（10分鐘）
三、9：45~10：05	張良正教授： 屏東平原地下水補注潛勢評估及平台更新（20分鐘）
四、10：05~10：20	張竝瑜助理教授： 屏東平原補注邊界地電阻測勘初步結果報告（15分鐘）
五、10：20~10：35	陳文福副教授： 屏東平原地下水水質調查（15分鐘）
六、10：35~10：45	王德宜工程師： 彭厝站抽水井鑿建與試驗工作結果報告（10分鐘）
七、10:45~12:00	綜合討論
七、12:00	散會

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(4/4)

第三次工作會議

一、 開會時間：101 年 9 月 21 日（星期五）下午 1:30

二、 二、開會地點：嘉南藥理大學 水療館 4F

三、 三、主席：張良正 老師

四、 出席單位及人員簽到

單位	簽名
經濟部中央地質調查所	
陳瑞娥	陳瑞娥
黃智昭	黃智昭
嘉南藥理科技大學	
陳文福副教授	陳文福
海洋大學	
張竝瑜副教授	張竝瑜

交通大學	
張良正教授	張良正
鄭蔚辰博士	鄭蔚辰
陳宇文博士	陳宇文
蔡瑞彬博士	蔡瑞彬
楊深惠	楊深惠
王雲直	王雲直
林海倫	林海倫
陳祐誠	陳祐誠

經濟部中央地質調查所101年度委辦計畫

第四次工作會議議程

一、計畫名稱：「地下水補注潛勢評估與地下水模式建置（4/4）」
二、開會時間：101年11月13日(星期二)下午1:00
　　地點：國立交通大學
三、議　程

時間	議　程
一、1:00~1:05	主席致詞（5分鐘）
二、1:05~1:25	張良正教授： 屏東平原地下水補注量抽水量推估 整合報告說明 （20分鐘）
三、1:25~1:40	陳文福副教授： 屏東平原地下水水質調查（15分鐘）
四、1:40~1:55	張竝瑜助理教授： 屏東平原補注邊界地電阻測勘結果報告（15分鐘）
五、2:00~3:00	綜合討論 主要補注區範圍討論

地下水補注潛勢評估與地下水模式建置(4/4)

第四次工作會議

一、 開會時間：101 年 11 月 13 日（星期二）下午 1:00

二、 開會地點：國立交通大學 工程二館 329 室

三、 主席：張良正 老師

四、 出席單位及人員簽到

單位	簽名
嘉南藥理科技大學	
陳文福副教授	
海洋大學	
張竝瑜副教授	張竝瑜
吳佳珊	吳佳珊
詹為堯	詹為堯
交通大學	
張良正 教授	張良正

附錄 C 期中報告審查意見及辦理情形

期中簡報暨期中報告書審查會議意見及處理情況

一、 日期：101 年 6 月 28 日(星期四)上午 10 時 00 分

二、 地點：地質調查所 2 樓第 2 會議室

三、 主席：江副所長崇榮　　記錄：陳瑞娥

審查意見	意見回覆
3 個子計畫執行的初步結果仍欠缺整合，建議期末報告書能有一致性的結果，並加強區域水文地質特性的描述。	謹遵照辦理。
結案時須有全程四年之成果報告，而非只是分年分項計畫之彙整。	謹遵照辦理。
四年成果報告內容，須針對本所施政需求作滿足(如地質法對地下水補注區之繪圖)、須有具體數據，提出繪圖之建議。	謹遵照辦理。
結案之前，建議做全程計畫之作果發表會，以本所立場作出政策之研究，提出具體策略，供施政之依據。	感謝委員意見。謹遵照辦理。
蓄水量估算之描述文字請加強。	感謝委員意見。期末報告已修正。
地下水位歷線，宜和降雨量同時比對，以為旱季無雨時段退水線之選定；此外，場次降雨相對應地下水位上升，才是真正的地下水補注，並非所有地下水位上升，都是有實質的補注。場次降雨量造成之地下水位上升量及相對應之補注水量是很有用的水文資料，可在歷線分析過程同時發生。	感謝委員意見。期末報告已修正。
數值模式檢定出之分層抽水量，因為受到給定參數之控制，可能與實際分層抽水量有很大差異。若能取得重要水井之分佈位置和深度及抽水量相關資料，作為參據和控制，結果會較接近實際狀況。	分層抽水量之分布實受到給定參數之控制，然因台灣地區地下水抽水量之普查與紀錄殘缺不全，因此不易有完善之實際抽水狀況，故本研究乃以觀測井之觀測紀錄作為參考和控制之依據。
P.57 地下水位資料異常之判定標準為何?採用人工判視或電腦自動辨釋。	期末報告已修正。
第五章屏東平原地下水數值模式如何與水位歷線法結合，應有較詳細的說明。	請參閱期末報告「地下水補注量與抽水量分析」，內有地下水數值模式如何與分散型水位歷線法結合之詳盡說明。

地下水數值模式中，有無加入河川模組之差異，應該有所說明。	數值模式中並未加入河川模組，然本模式檢定之淨補注量為河川、降雨等入滲量綜合之結果，因此亦有包含河川之入滲效應。
數模中輸入之相關參數應該繪圖或列表說明，對本計畫增加之水文地質調查對屏東平原地下水系統概念模型之釐清或改進應該有所說明，才能突顯本計畫之成果與價值。	數值模式中主要應用到之相關參數為透水係數與儲水係數，列表於區域概述與資料蒐集中。而本計畫增加之水文地質調查，則輔助釐清地下水層阻水層分布，對於主要補注區劃設及數值模擬均有極大貢獻，相關邊界說明請參閱主要補注區範圍綜合分析。
P.70 引述非本計畫之研究成果圖表應註明引用來源。	期末報告已修正。
建議 P.213、表 5.4-2 加入年降雨量一欄，以判定垂向補注佔年降雨量之比率是否過高。	由於降雨型態與分布對補注量影響甚大，因此未以年降雨對補注進行作圖，然因本研究應用數值模式與分散型地下水位歷線法結合，因此可參考分散型地下水位歷線法之成果，其計算出屏東平原 100mm 之降雨量約提供 62 百萬噸之補注至地下水中。
P.194「定水頭」一詞是否改為「給定水頭」較為恰當。	於期末報告中改為「給定水頭」。
請於期末報告中，比較水位歷線法與數值模式，於補注量與抽水量數據之相異處。	期末報告已修正。
重要補注區劃設或釐「非拘限」、「受壓」或「拘限含水層」等名詞請加以統一。	期末報告已統一修正為「受壓含水層」及「非受壓含水層」。
枯水期退水線之斜率，建議以真正判斷後末期斜率來進行抽水量推估。	期末報告已修正。

附錄 D 期末報告審查意見及辦理情形

期末簡報暨期末報告書審查會議意見及處理情況

一、日期：101 年 11 月 26 日(星期一)下午 2 時 00 分

二、地點：地質調查所第二會議室

三、主席：江副所長崇榮　　記錄：陳瑞娥

審查意見	意見回覆
地下水補注潛勢評估及平台建置	
本計畫延續本所地下水觀測網計畫研究成果，分析完整，符合預期目標，可提供地下水補注區範圍確認，並提高未來其他地下水區補注區劃設及地下水資源評估之精度。	
請說明屏東平原地下水補注區範圍界定的依據。	感謝委員意見，已修正。
水平衡(地下水位歷線法)分析之基準面(高程)宜說明。	為求與數值模式一致，因此地下水歷線法與數值模式之系統定義相同。以濁水溪沖積扇而言，目前水文地質架構共區分為 F1、F2-1、F2-2 與 F3 四層含水層，T1、T2 與 T3 共三層阻水層，由於 F3 觀測井數過少不足以進行模式檢定，因此數值模式僅檢定 F1、T1、F2-1、T2 與 F2-2，而地下水歷線法亦以 F2-2 之底部，作為濁水溪沖積扇之水量積分基準面。以屏東平原而言，目前水文地質架構共區分為 F1、F2、F3-1 與 F3-2 四層含水層，T1、T2 與 T3 共三層阻水層，由於 F3-2 觀測井數過少不足以進行模式檢定，因此數值模式僅檢定 F1、T1、F2、T2 與 F3-1，而地下水歷線法亦以 F3-1 之底部，作為屏東平原之水量積分基準面。
屏東平原 F1~F4 以下，還有地下水層尚未有水井抽水，水位高於海水位，可能全年均有地下水往海流失，請加以考慮。	現階段並無足夠的鑽井，並無足夠的證據來做這部分的支持，有賴未來更多鑽井來判斷。
MODPATH 汙染物傳輸汙染層次及範圍圖，建議套疊水位及流線圖。	已依委員意見套疊水位及流線圖。

期末報告書 P.28，表 2.1-19 屏東平原地下水補注量相關研究成果比較表，請將各推算資料(補注量)包含(或代表)哪些年份、面積或加以說明。	感謝委員意見，已遵照辦理。
期末報告書中表 5.3-2 至表 5.3-4 之量化，以時間圖示方式表示，如圖 5.3-4 與圖 5.3-5。另外，此兩圖時間座標繪於橫坐標內，以利閱讀。	已依委員意見增加時間圖示表示表 5.3-2 至表 5.3-4 之量化資訊，並已改善時間座標表示方式。
請加強描述，取 56 分作為門檻值之緣由，以利未來劃定地下水補注敏感區之依據。	由於補注潛勢之高低可呈現出補注能力之空間分布，但如欲以絕對數值訂定主要補注區之劃分門檻，則需要搭配其他調查方法與調查結果，或輔以其他準則，在此以主要補注區面積佔整體 40%為準則，以補注潛勢作排序所得門檻分數為 56 分，故以 56 分作為屏東平原之門檻值。
關於濁水沖積扇「深層含水層不易受到淺層層補注，造成地下水位偏低，及較大之垂向水力梯度，使污染物易流向深層」的說法有矛盾之處，請加以補強說明，以免造成誤解。	由於數值模式以現地觀測水位建置而成，目前深層含水層水位低於淺層含水層，造成扇頂通透區存在垂直向下之流向，如長時間維持過低水位與，污染物易藉由扇頂通透區深入深層含水層。而地下水位過低之原因應為濁水溪沖積扇扇央與扇尾阻水層結構較為明顯，導致中下游之深層含水層補注較少，易因超抽而造成地下水位降低。
有關土壤圖、地質剖面圖等之圖例及顏色，請修正與本所水文地質總報告之用法一致，以利閱讀。請於結論中展現結合各調查成果之圖層的主要補注區分佈圖。地下水區範圍及面積請統一。	感謝委員意見，已修正。
報告書中所引用之屏科大 1 號井及 2 號井鑽井資料係本所於調查潮州斷層所規劃鑽鑿，請於報告書中加註。	感謝委員意見，已修正。

期末報告書 P.176 東側與潮州斷層相鄰故設定山邊側流量，在附近觀測井之水頭高設定增加 10~20 公尺，請說明增加之依據。	東側邊界部分因與潮州斷層相鄰，且觀察水位變化，推估應有大量山邊側流量流入，故在右方邊界河流出山口處以給定水頭方式模擬山邊側流量，並假設水力梯度約與地表坡度相等，且給定水頭高度隨鄰近觀測井地下水位趨勢變化，例如口社溪出山口高程約比關福(1)高 10 公尺，因此定口社溪出山口總水頭高為關福(1)水位高加 10 公尺。
屏東平原與濁水溪沖積扇，在山區側流量的設定方法不同，其原因為何?請加以說明。	觀察屏東平原與濁水溪沖積扇鄰近山邊斷層之地下水位變化可發現，於屏東平原在鄰近山邊之地下水井其深層水位在豐水期時常比淺層水位高，形成地下水上湧的情形，而濁水溪沖積扇則無此現象，因此為模擬此兩種不同機制，乃將屏東平原設給定水頭模擬山邊側流量，而濁水溪沖積扇則無設給定水頭。
屏東平原成果報告 P.44 第一段文字請重新修正，因目前已有地質法在做地下水區的保育工作。P.97 第一段關於濁水溪沖積扇的試驗請刪除。P.118 圖 5.2-3 未於圖中標示 K 值，請修正。	感謝委員意見，已遵照辦理。
期末報告書 P.29 表 2.2-1 請整合；P.35 表 2.2-3 正確應為圖 2.2-5 所示；P212 圖 A-1 圖名有誤請修正；「補注」、「過渡」文字請修正；P.162 表 6.2-1 及其他表格請加網格線。有很多圖不是很清楚，請用彩色或重繪大字體，以利閱讀；請加強 3 本報告書之編排例如圖與圖名不宜分開，文字段落不宜被切開、「本計畫」修正為「本研究」、字體大小須加強整合、附錄水位歷線圖不清楚等。	感謝委員意見，已遵照辦理。

期末報告書 P.57 地下水位資料異常之判定標準為何?採用人工判視或電腦自動辨釋，請加以說明。	資料之缺漏部分，本計畫係以人工方式配合統計相關分析進行補遺，並逐站進行之。資料之誤差部分，疑似有一定程度之儀器校正誤差，此種誤差雖然可由資料明確顯示出，惟卻難以程式自動校正，故以人工方式逐站修正之。
地電阻測勘	
地電阻調查章節的附圖和圖例標示不清楚，請修正以利閱讀。	感謝委員意見，已修正。
地電阻測勘與 F1+T1+F2 之分層級 T1 之分佈邊界關係請加強說明。	屏東平原深約 220 公尺內之水文地質分層，由上而下可劃分含水層一、阻水層一、含水層二、阻水層二、含水層三之 1、阻水層三及含水層三之 2 等七層。含水層極為發達，厚度大且延展遍佈全區；阻水層則間夾於含水層中，厚度遠小於含水層並且僅分布於平原南段，因此含水層只於南側有顯著之分隔，而北及東側則合而為一。而地電阻在施測深度與長度有關，此研究測線大多為 300~400 公尺長，所得到的深度可達 50~70 公尺，故比對水文地質分層大約是位於含水層一與阻水層一的深度。而地電阻測勘所找出的高電阻區域邊界，是屬厚層礫石所形成的補注區域的範圍，與 T1 邊界相似，所以可相互比對。
請於報告書中明確指出於濁水溪沖積扇或屏東平原所調查之測線條數，以利參考。	感謝委員意見，已修正。
地下水水質調查	
期末報告書 P.101 水樣以貝勒管下至濾管深度採取，請問觀測井是否有參照環保署公告之地下水採樣方法，如井柱體積置換法(NIEA W103.54B)進行洗井，若有請附上洗井至水質參數達平衡之數據，若無請說明原因。	因為經費有限，無法進行洗井。

期末報告書P.117 文中提及，四口深層井於派博水質圖上，歸類為碳酸氫鈉或碳酸氫鈣鈉類型，其原因為深層井流徑較長，因此二價鈣離子易比一價鈉離子易發生陽離子交換作用，導致水質型態轉換，但其餘深層井如建興(2)及彭厝(2)井深深度分別為150及200公尺，並沒有水質型態轉換的現象，是否除了流徑較長之因素外，是否尚有其他解釋。	水流路徑有兩條，一為東西向、另一為南北向，若從南北向看，萬巒、萬隆及枋寮都位於最南端，因此比建興及彭厝路徑短。
期末報告書P.133 文中所述，觀測井的垂向導電度分布，是否可詳細敘述如何判斷水質來源之依據。	水質來源多為解釋性，並無必然之一對一關係。
濁水溪沖積扇分區四年總結報告書，井內導電度上下層差距過大，是否受到遲滯水的影響?	是
期末報告書P.150 圖3.3-3 是以高補注潛勢區、高地電阻及高DO值，判斷此區域的地下水主要補注分佈，然水質項目檢測除溶氧值外，尚有硝酸鹽氮或氧化還原電位或過去之水質檢測結果，皆可輔助判斷是否其氧化還原特性，建議在有爭議的點位(如里港觀測井)，多加入其他參考的水質參數進行探討。	溶氧值為氧化帶之最前端指標。
結論	
期末簡報內容本所同意備查，請執行單位依據委員意見及建議事項修正報告書內容。審查意見之回覆說明，請列於期末成果報告書的附錄，以利查核。	

本次會議共4位委員出席及1位委員提書面意見，經委員審查一致同意執行單位於期末報告書及總結報告書修正完後，行文提送成果報告書以辦理本年度驗收事宜，驗收完成後，始得依據契約書相關規定來函申請撥付尾款。	

附錄 E 本年度計畫出國研習訪查報告

出國報告(出國類別：開會)

赴美國參加 2012年 AGU Fall Meeting

服務機關：國立交通大學

姓名職稱：張良正教授

派赴國家：美國(舊金山)

會議日期：101年 12月02日至 12月07日

目錄

摘要

美國地球物理聯盟秋季會議 (AGU Fall Meeting)是地科領域全球最大的國際會議之一，每年皆有數萬人參加，且每年均在舊金山舉行，2012 年發表的口頭報告及海報張貼本共有 18,000 篇論文， 包括的議題很廣，共有 28 個主題。

本團隊本次發表的文章中有兩篇為本計畫之研究成果，其題目為:「應用一維地電阻調查推估水力傳導係數」(Estimation of Hydraulic Conductivity Using One Dimensional (1-D) Electrical Resistivity Survey)及「整合衛星影像與河道水理演算於濁水溪沖積扇地下水模擬」(Integrating Satellite Image Identification and River Routing Simulation into the Groundwater Simulation of Chou-shui)，其中第一篇為應用地表地電阻推估水力傳導係數，第二篇為整合衛星影像與河道水理演算於河水與地下水系統交換量之分析。

壹、前言:

美國地球物理聯盟秋季會議 (AGU Fall Meeting)是地科領域全球最重要且最大的國際會議之一，每年皆有數萬人參加，且每年均在舊金山舉行，2012 年發表的口頭報告及海報張貼本共有 18,000 篇論文， 包括的議題很廣，共有 Union、Atmospheric Sciences、Atmospheric and Space Electricity、Biogeosciences、Cryosphere、Earth and Planetary Surface Processes、Earth and Space Science Informatics、Education and Human Resources、Geodesy、Geomagnetism and Paleomagnetism、Global Environmental Change、Hydrology、Mineral and Rock Physics、Natural Hazards、Near-Surface Geophysics、Nonlinear Geophysics、Ocean Sciences、Paleoceanography and Paleoclimatology、Planetary Sciences、Public Affairs、Seismology、SPA-Aeronomy、SPA-Solar and Heliospheric Physics、SPA-Magnetospheric Physics、Study of Earth's Deep Interior、Tectonophysics、Volcanology、Geochemistry and Petrology 等 28 個主題。

AGU Fall Meeting 最大的特色之一，為除了口頭報告之外還有大量的海報展示，相對於其它研討會，海報展示相當受到重視。大量的海報，使得身處會場的人有如於海報的汪洋中，從而感受到人類無止盡的創意。

貳、會議行程:

2012 年 AGU Fall Meeting 的正式會議日期為 12 月 02 日至 12 月 07 日，除了論文的發表外，並有各種主題的小組會議與互動性質的活動，會場並有大量廠商及學校的展示攤位。

參、工作內容:

本團隊本次發表的文章中，與本計畫相關有兩篇論文，其內容如下:

Estimation of Hydraulic Conductivity Using One Dimensional (1-D) Electrical Resistivity Survey

Helen Lin[1], JP Tsai[2], LC Chang[3]

1. Helen Lin, Student of the Department of Civil Eng., National Chiao-Tung University, helenlin1989@gmail.com
2. Jui-Pin Tsai, Post Doctoral Researcher of the Department of Civil Eng., National Chiao-Tung University, skysky2cie@gmail.com
3. Liang-Cheng Chang, Professor of the Department of Civil Eng., National Chiao-Tung University, lcchang31938@gmail.com

Introduction

1. Hydraulic conductivity is usually obtained using conventional pumping test method. However, the pumping test method has some disadvantages:
a. High cost.
b. Time consuming.
c. Limited data can be collected.

2. Estimating hydraulic conductivity using surface electric resistivity survey along with pumping test data.
a. Relatively low cost.
b. Fewer pumping test data are required.
c. More efficient on estimating hydraulic conductivity.
d. Related studies: Sri Niwas and Singhal, 1985 ; Kelly, 1977; Niwas and Singhal,

1981; Frohlich and Kelly, 1985; Yadav, 1995; Khalil et al., 2005 and Soupios et al., 2007.

3. Most studies are in filed scale or lab scale. This study focuses on estimating hydraulic conductivity in basin scale.

Methodology

1. Data collection
a. 1-D electric resistivity data provided by C.G.S., Taiwan.
b. Hydraulic conductivity data from pumping test provided by C.G.S., Taiwan.
c. Pore water resistivity data provided by W.R.A., Taiwan.

2. Formation factor
Formation factor = Bulk electrical resistivity / pore water electrical resistivity.
{Chukwudi, 2010; Sikandar and Christen , 2012 }

3. Develop the estimation model using linear regression
a. Independent variable : formation factor
b. Dependent variable : hydraulic conductivity

Study Area - Chou-Shui River Basin

1. Location
a. Central of Taiwan
b. Area: 950km^2

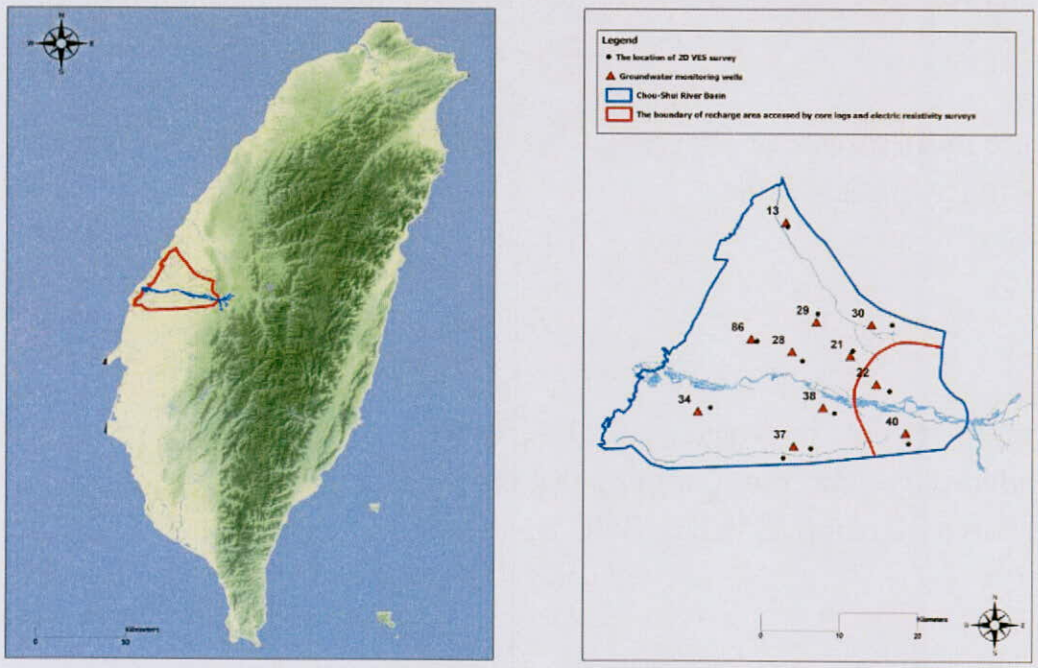


Fig1. The locations of 1-D VES and groundwater monitoring wells in study area

Result

1. Raw data analysis

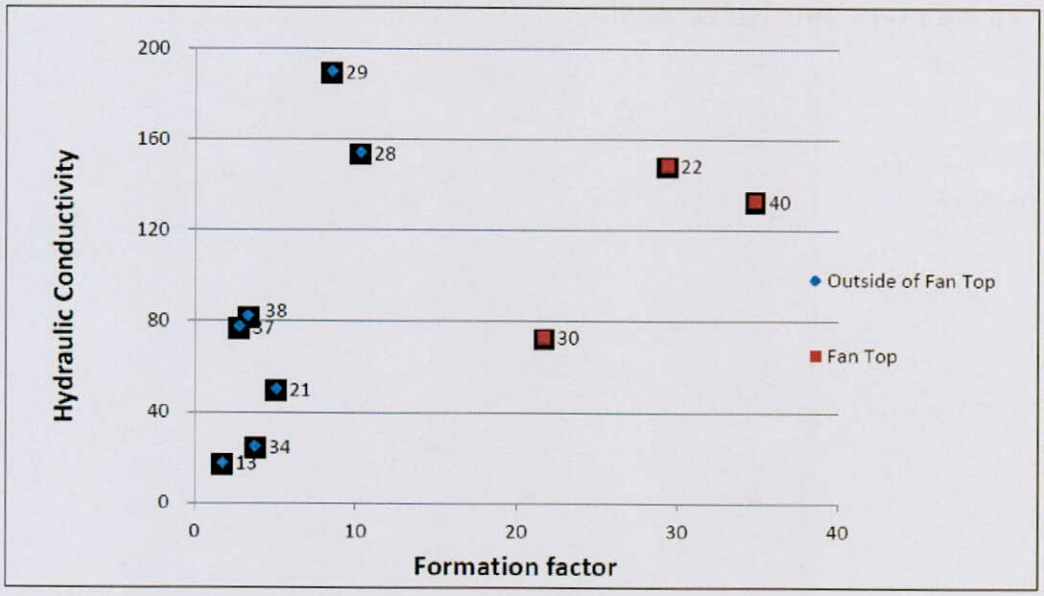


Fig2. Hydraulic Conductivity VS Formation factor

2. Regression result

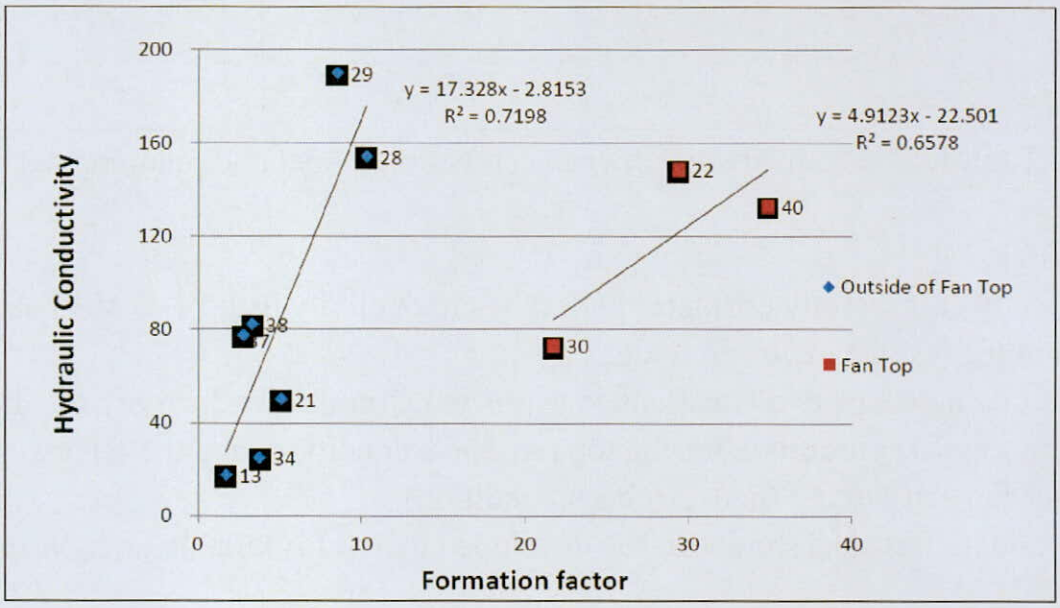


Fig3. Linear regression between formation factor and hydraulic conductivity

3. Validation Result

a. Two pumping test data set are used to verify the estimation result. The result is consistent to the regression line.

b. The validation result is shown in Table 1, showing little difference between estimation model and pumping test.

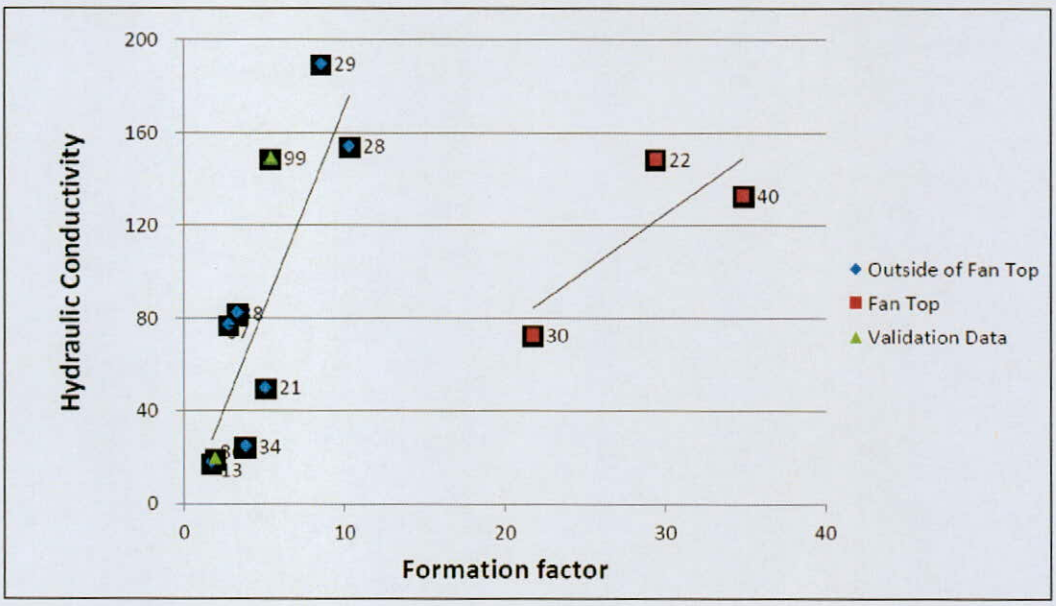


Fig4. The validation result

Station	Pumping Test	Estimation model	difference
86	20	31	11
99	149	91	58

Table1. The comparison between estimation model and pumping test

Conclusion

1. This study successfully estimates hydraulic conductivity using 1-D VES data along with pumping test data in basin scale.
2. This study develops two equations to estimate hydraulic conductivity of Chou-Shui River Fan, one is appropriate for fan top (Archie's condition) and the other is suitable for center fan and fan tail (non- Archie's condition).
3. The validation results show that the developed method is reliable and feasible.

Integrating Satellite Image Identification and River Routing Simulation into the Groundwater Simulation of Chou-shui

YY Yao[1], SH Yang[2], YW Chen[3], LC Chang[4]

1. Yu-Yu Yao, Master Student of the Department of the Civil Eng. , National Chiao-Tung University, voov1592@gmail.com

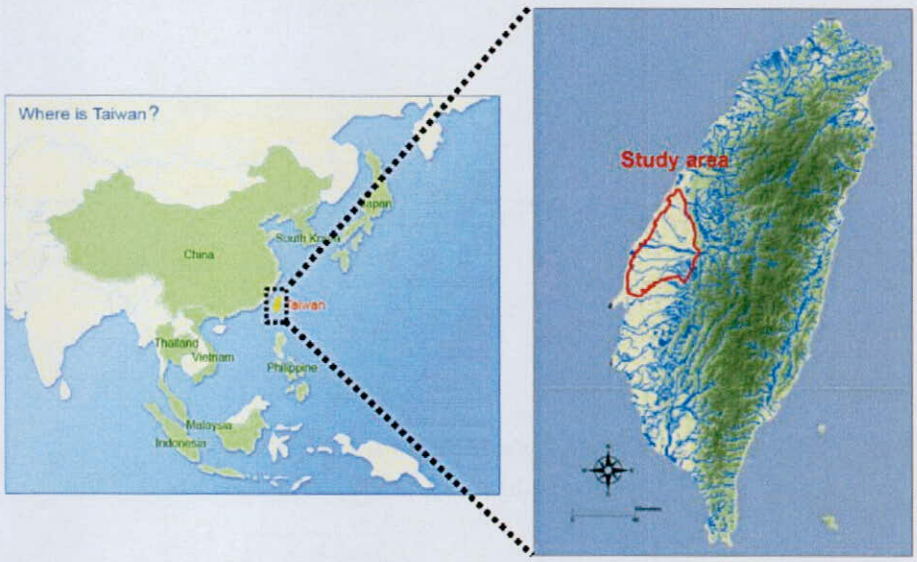
2. Shen-Hui Yang, Master Student of the Department of the Civil Eng. , National Chiao-Tung University, sophiayang110@gmail.com

3. YuWen Chen, Post Doctoral Researcher of the Department of the Civil Eng. , National Chiao-Tung University, bsjacky@gmail.com

4. LiangCheng Chang, Professor of the Department of the Civil Eng. , National Chiao-Tung University, lcchang31938@gmail.com

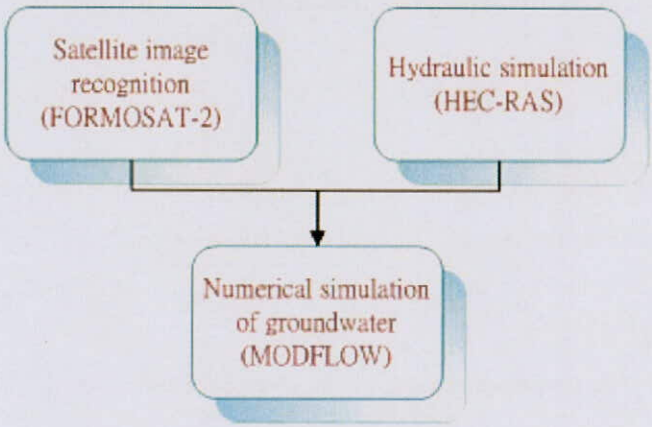
Introduction

1. Explore the interaction between Cho-shui River and regional groundwater in alluvial fan
   - Chuo-Shui River alluvial fan is one of the most important groundwater areas in Taiwan. This area intensively relay on groundwater resources.
   - Chuo-Shui River changes its flow path, in average, every fifty years and results in widely braided river swing area in the alluvial fan.
   - Once-a-year field measurement cannot represent the river changes between seasons.

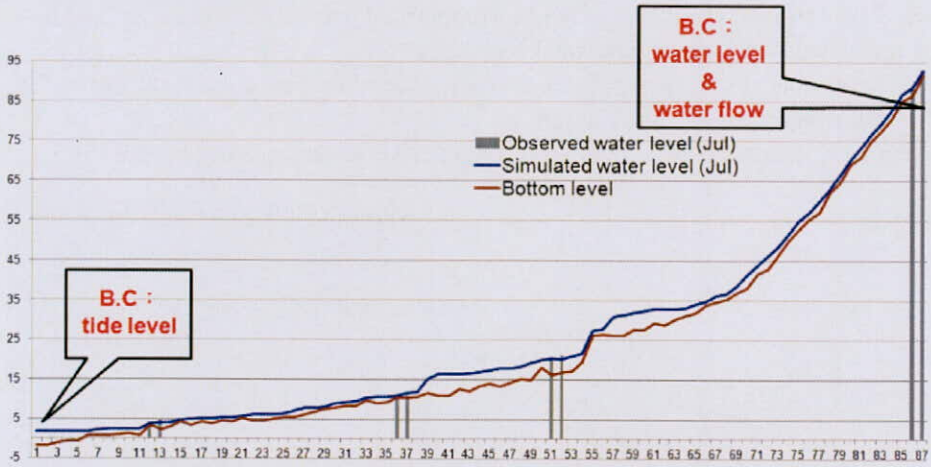


2. In this study
   - Satellite image recognition technology is used to analyze the seasonal variation of Chuo-shui River channel
   - The HEC-RAS is used for simulate Chuo-shui River channel water level
   - A numerical model is developed to simultaneously consider the Chou-Shui River, the groundwater system, and the interaction between them

Research process



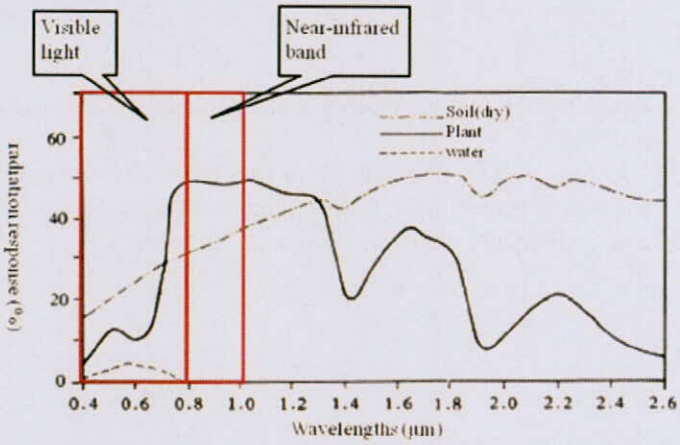
HEC-RAS Hydraulic Simulation



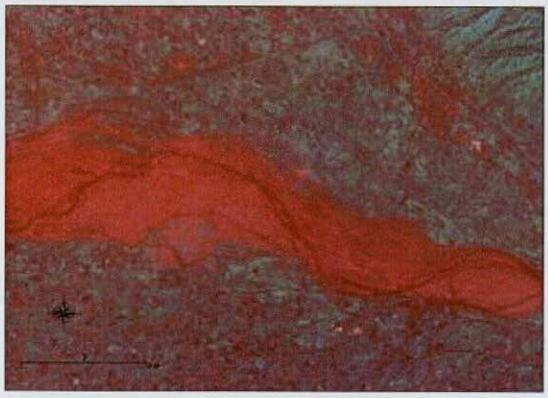
Satellite Imagery Identify

1. Near-infrared Band:

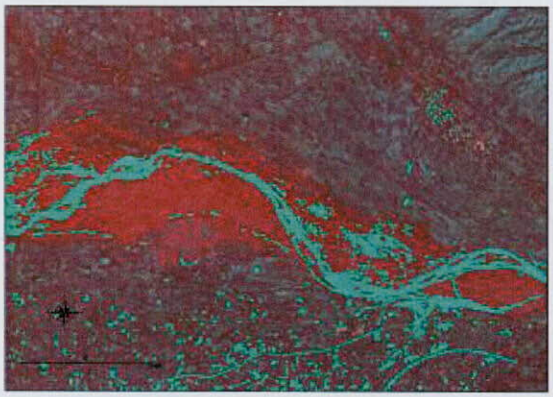
- Water higher 0.8 μm band，radiation effect
- Used Near-Infrared Band identity water or not



2. Satellite imagery identify procedures:

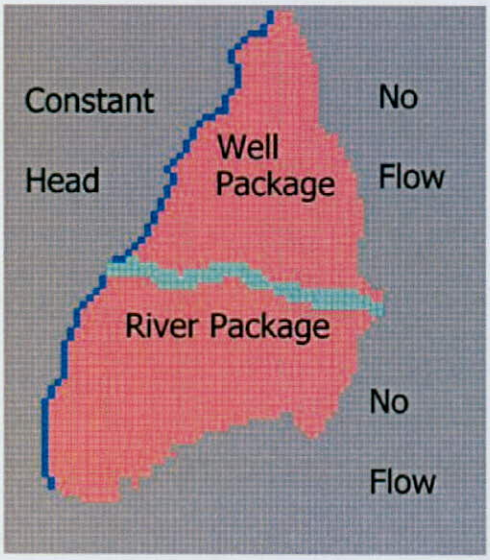


Near Changyun bridge, Chuo-shui River multi-spectral image maps (Red, near infrared and near infrared)



Near Changyun bridge, Chuo-shui River multi-spectral image maps (Threshold: 60)

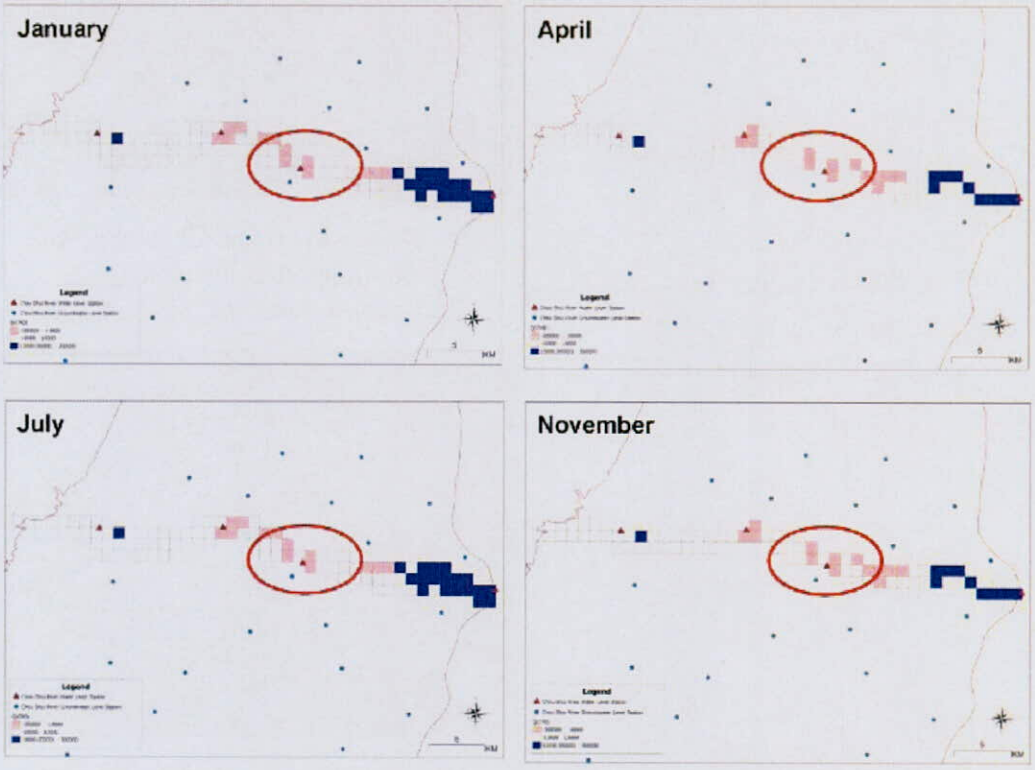
Groundwater Numerical Simulation



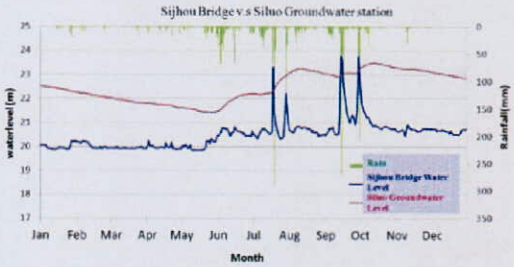
Groundwater Numerical Model in Chou-Shui River Basin

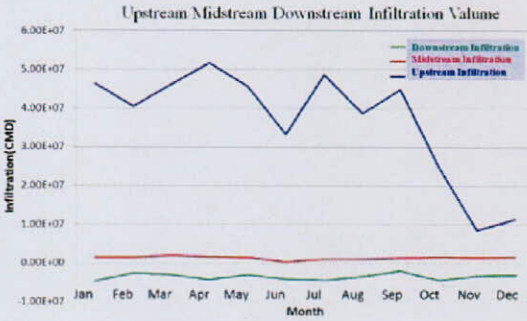
Result and conclusion

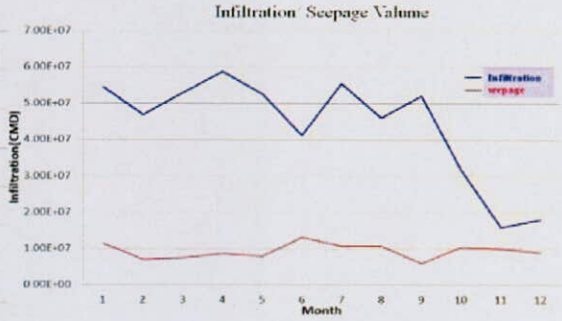
1. The satellite images used for this study are images from FORMOSAT-2 on *January, April, July, and November in 2008*. The identified wet area are 24, 24,40, and 12 km^2 respectively. The wet area changes dramatically in the studied area.
2. Surface water flows into the groundwater system at the top region of the alluvial fan and the groundwater flows out at the central area of the alluvial fan.



3. The total recharge for the Chou-Shui River alluvial fan was 20 billion ton in 2008. The river recharge volume was 1/5 of the total recharge volume.







肆、心得與建議:

AGU Fall Meeting 為歷史悠久之國際會議，歷年均有各國賢達、先進參與，而今年亦不例外，此已為國際上地球科學領域最重要會議之一，其中包含領域甚廣，而於水文、地下水及水資源之相關研究展示亦相當豐富。本次會議中，本團隊與其他地下水方面之專家研究成果相互交流收穫豐碩。

於此次發表之論文與交流中可以發現，氣候變遷對水文、地下水與水資源方面等議題影響重大，為這些研究探討的重點之一，而於氣候變遷之外，其他基礎而重要的研究成果亦多，內容琳瑯滿目，目不暇給，尤其同一議題衍生出之不同研究更是增加了視野的廣度，整個會場就像人類智慧的寶庫一般，事前若能先做規劃選定議題，必可滿載而歸，盡興而回。

出國報告(出國類別：開會)

赴美國舊金山參加2012 AGU秋季會議

服務機關：嘉南藥理科大

姓名職稱：陳文福副教授

派赴國家：美國(舊金山)

會議日期：101年 12月 2日至 12月 7日

目錄

壹、 前言:

AGU Fall Meeting 歷史悠久，為國際上地質、地球科學與水利等相關領域最重要的會議之一，本屆（第 45 屆）會議日期為 2012 年 12 月 3 日至 7 日共計 5 日，超過 20,000 相關研究人員參與盛會，會議型式包括口頭簡報與海報張貼兩種，由於篇數與人數眾多，因此本會議多採海報張貼形式，一個上午可同時有數千篇海報進行張貼，可於最短的時間內對於研究潮流有所掌握。

參加此會議主要目標為河床入滲（streambed infiltration）及地下水補注（groundwater recharge）研究的相關議題，屬於水文學（Hydrology）學門。

貳、 會議行程:

- 12/2：

由桃園機場出發，在舊金山時間星期日下午抵達，搭乘 Bart 至旅館。

- 12/3：

參加水文學 H11D 場次論文發表，Groundwater-surface water interactions: dynamics across spatial and temporal scales I（地下水及地面水之交互作用）。本人發表論文題目為 New computer programs using diurnal temperature time series to determine streambed percolation velocities（使用溫度日循環的電腦程式計算河床入滲率）。

- 12/4 與 12/5：

持續參加水文學門的研討。

- 12/6 與 12/7：

舊金山時間 6 日早上搭機，抵達桃園機場為 7 日上午。

參、 工作內容:

本團隊參與本次大會海報展示部份，摘要如下:

CONTROL ID: 1456164

TITLE: New Computer Programs Using Diurnal Temperature Time Series to Determine Streambed Percolation Velocities

AUTHORS (FIRST NAME, LAST NAME): Wenfu Chen[1], Juier Chen[2], Wanchung Lu[2], Chihchao Huang[2]

INSTITUTIONS (ALL): 1. Chianan University, Tainan, Taiwan.
2. Central Geological Survey, Taipei, Taiwan.

ABSTRACT BODY: Streambed percolation is one of the most important routes for groundwater recharge. Among many methods, using diurnal temperature in the streambed to determine percolation velocity is one the most frequently used methods. Several numerical codes, VS2DH, SUTRA, and TOUGH2, have been developed primarily for 2D or 3D heat transport simulation and also for use in streambed percolation velocity calculation, but, with great complexity. This research simplifies percolation velocity calculation by developing new computer codes that solve the 1D heat transfer equation. Using diurnal temperature data, percolation velocity can be determined easily to each day of the monitoring period. More percolation velocity data will enable more understanding for the river/groundwater interaction. This work also conducts a field test for studying streambed percolation in the Choshui stream, Central Taiwan. The data show the average percolation velocity at approximately 6.8×10^{-6} m/s.

KEYWORDS: [1830] HYDROLOGY / Groundwater/surface water interaction.

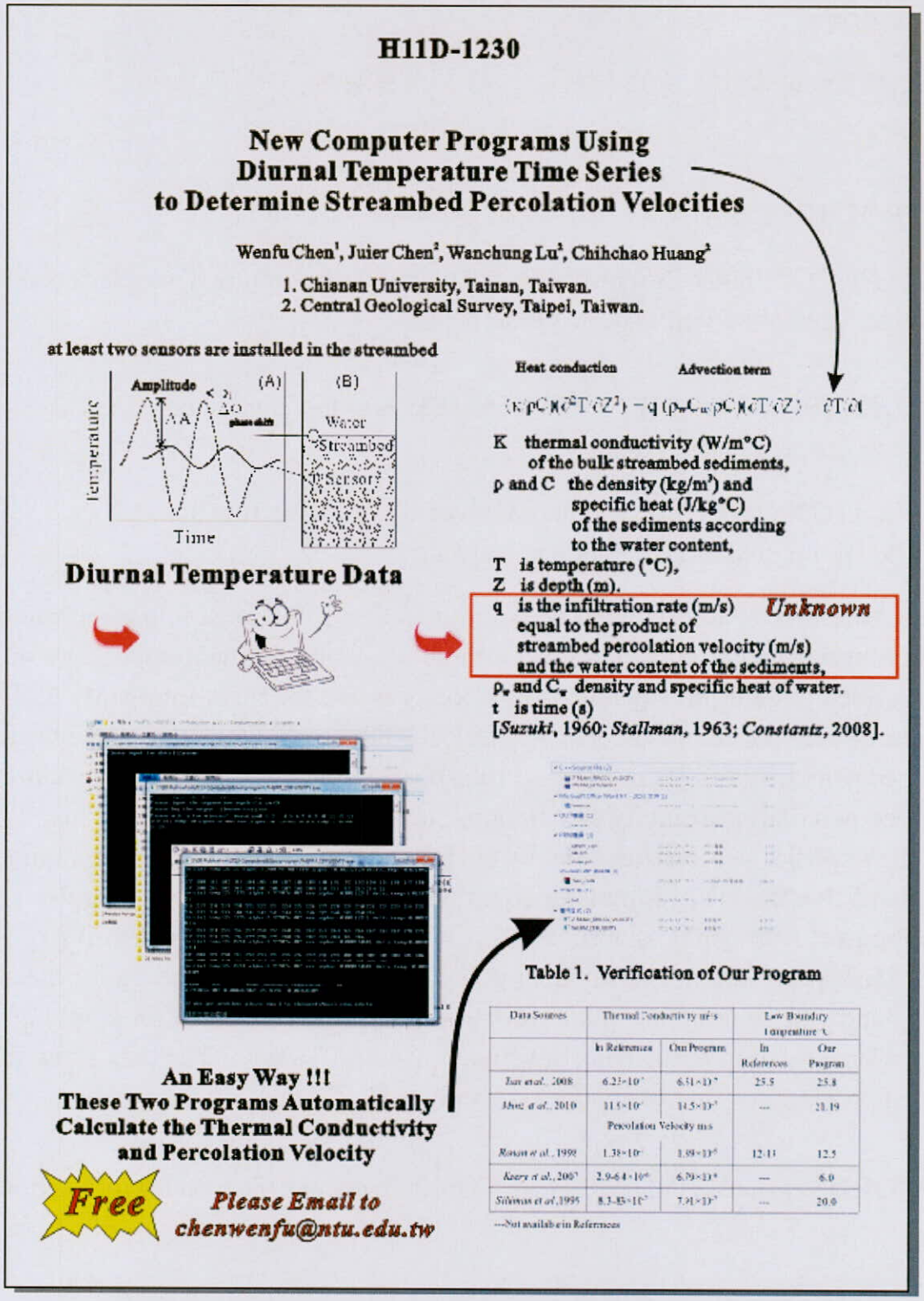

H11D-1230
New Computer Programs Using
Diurnal Temperature Time Series
to Determine Streambed Percolation Velocities
Wenfu Chen[1], Juier Chen[2], Wanchung Lu[2], Chihchao Huang[2]
1. Chianan University, Tainan, Taiwan.
2. Central Geological Survey, Taipei, Taiwan.
at least two sensors are installed in the streambed
Amplitude
(A)
(B)
phase shift
Water
Streambed
Sensor
Temperature
Time
Diurnal Temperature Data
Heat conduction
Advection term
K thermal conductivity (W/m°C) of the bulk streambed sediments,
ρ and C the density (kg/m³) and specific heat (J/kg°C) of the sediments according to the water content,
T is temperature (°C),
Z is depth (m).
q is the infiltration rate (m/s) equal to the product of streambed percolation velocity (m/s) and the water content of the sediments,
Unknown
ρw and Cw density and specific heat of water.
t is time (s)
[Suzuki, 1960; Stallman, 1963; Constantz, 2008].
Table 1. Verification of Our Program
Data Sources
Thermal Conductivity (W/m°C)
In References
Our Program
Low Boundary Temperature (°C)
In References
Our Program
Percolation Velocity (m/s)
---Not available in References
An Easy Way !!!
These Two Programs Automatically Calculate the Thermal Conductivity and Percolation Velocity
Free
Please Email to
chenwenfu@ntu.edu.tw

圖 1 發表之論文海報

作者：陳文福、陳瑞娥、陸挽中、黃智昭

題目：使用溫度日循環的電腦程式計算河床入滲率

相關研究:

使用溫度法研究河床入滲的論文約十餘篇，和我的研究較相關的有美國 Syracuse 大學 Lautz 教授的 Impacts of temporal resolution and timing of streambed temperature measurements on heat tracing of vertical flux. 她研究的是自動紀錄頻率的問題，在紀錄溫度數據時，紀錄頻率越密，後續計算的入滲率越準，但是感測器的記憶體會較快耗盡，若紀錄頻率過低，則計算的入滲率較不準，因此需要找出一最佳方式，她的研究結果顯示最好不要低於 1 小時一筆，因我的研究都設為半小時一筆，所以準確度較沒問題。

Search ePosters | Upload Your ePoster

H11D-1228: Impacts of temporal resolution and timing of streambed temperature measurements on heat tracing of vertical flux

« Return to search results · New Search

Authors:
Laura K Lautz

Author Institutions:
Earth Sciences, Syracuse University, Syracuse, NY, USA

圖 2 美國 Syracuse 大學 Lautz 教授的研究和我的較相關

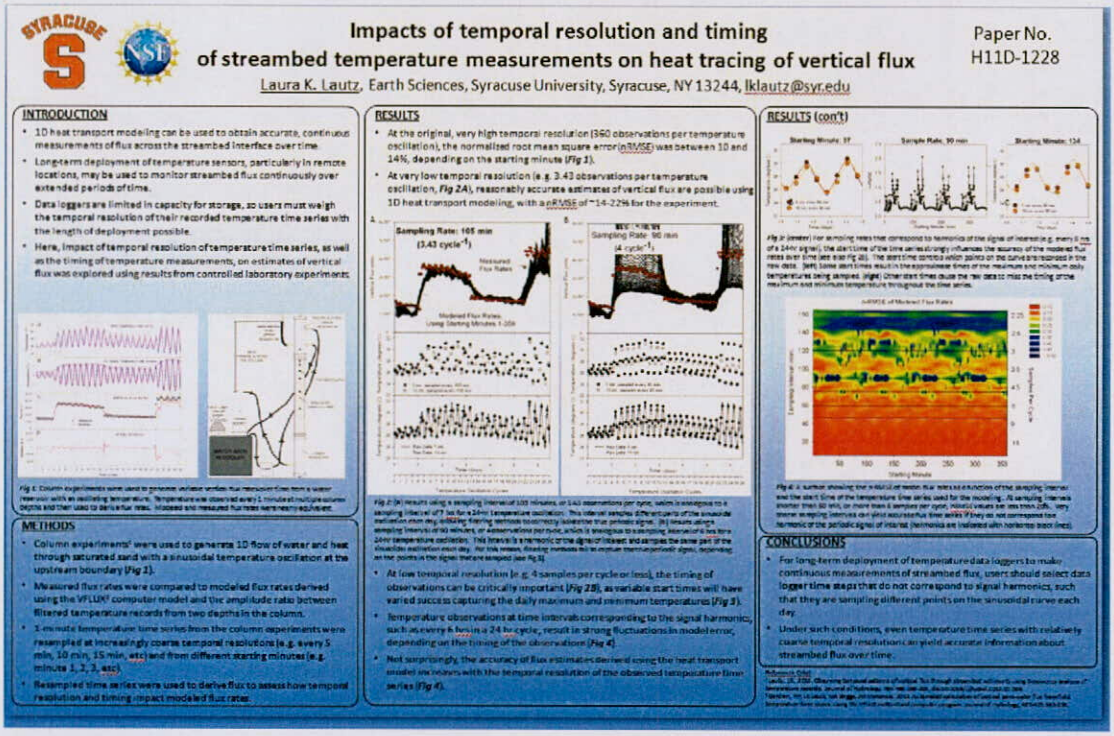


圖 3 美國 Syracuse 大學 Lautz 教授的論文海報

另外這一篇是加拿大學者，研究河床沉積構造，例如礫石灘等，對於河床型態及入滲的影響。

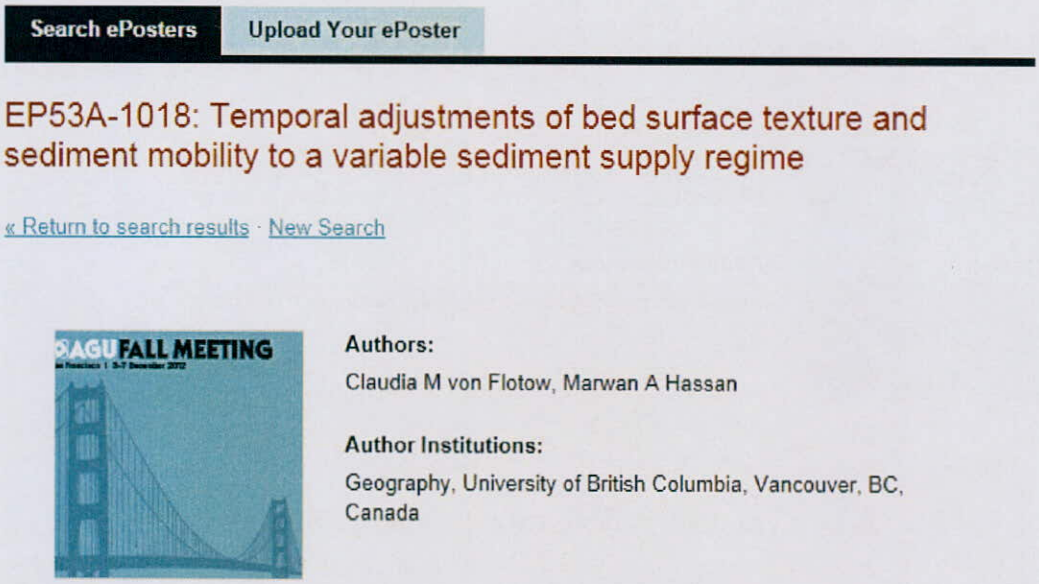


圖 4 加拿大學者 Flotow 及 Hassan 的相關研究

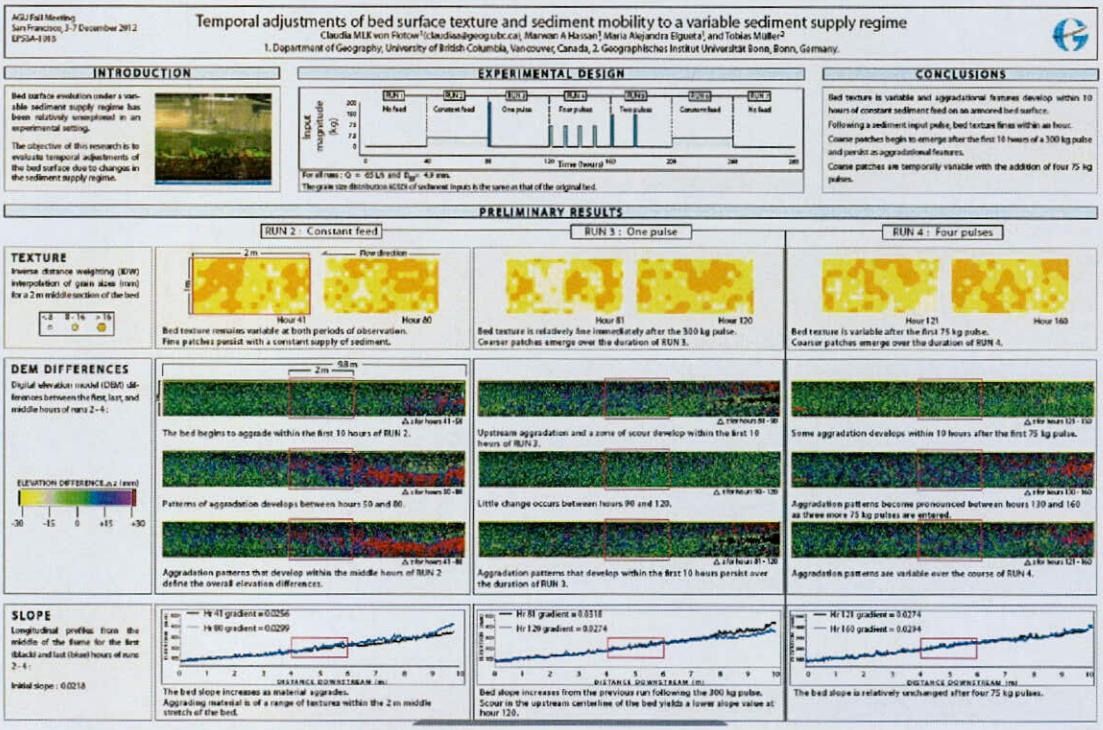


圖 5 加拿大學者 Flotow 及 Hassan 的論文海報

這一篇是美國學者，研究生物阻塞，對於河床型態及入滲的影響，研究區域位於礫石河道，和我的扇頂河道很類似。

Search ePosters | Upload Your ePoster

H13D-1367: The hyporheitron - a tool for measuring hyporheic processes along a discrete flow path in gravel bed streams

« Return to search results · New Search

Authors:

Jordan P Beamer[1], Steven M Wondzell[2], Roy Haggerty[1]

Author Institutions:

1. College of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis, OR, USA; 2. Corvallis Forestry Sciences Laboratory, USFS Pacific Northwest Research Station, Corvallis, OR, USA

圖 6 美國學者 Beamer 等的研究

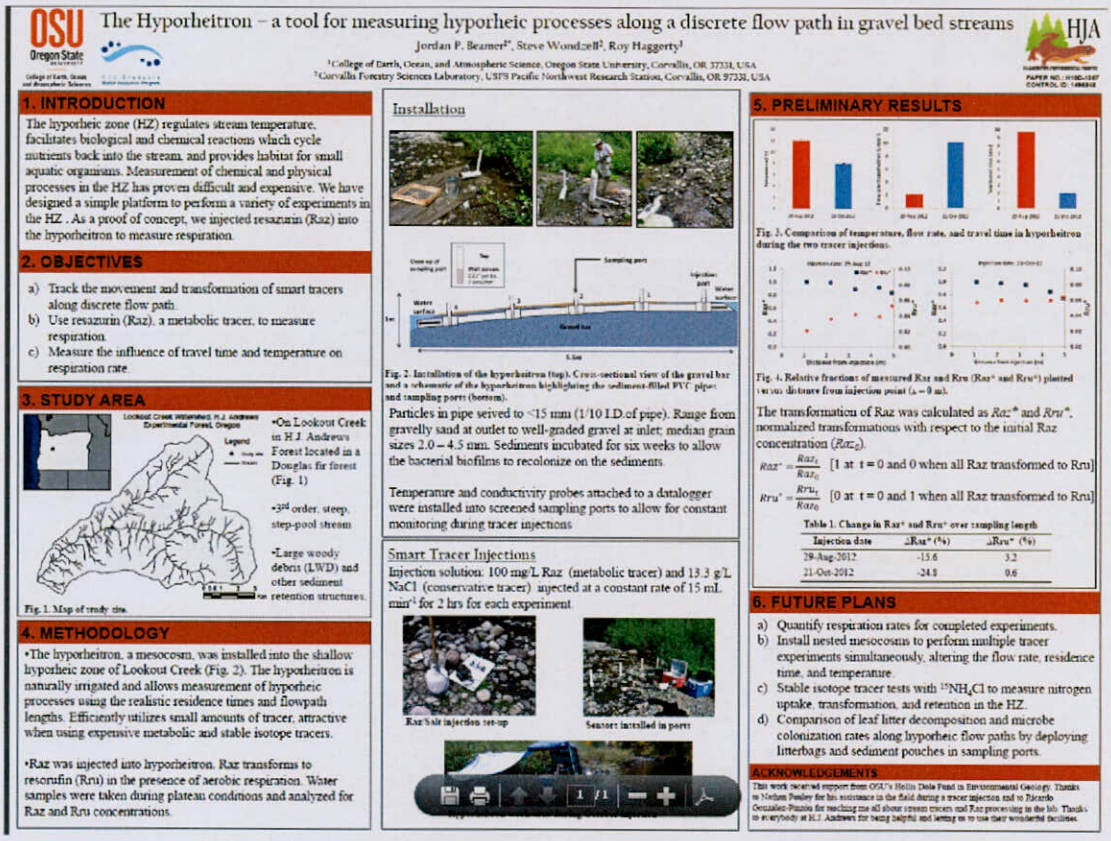


圖 7 美國學者 Beamer 等的論文海報

專門研究河流及河流入滲的約有十餘位，大家熱烈討論並交換研究成果，個人也覺得受益良多。

關於地下水補注的研究比較多，大約有一百多篇，以下是選擇與台灣研究較有關係，可為借鏡的：

加拿大學者 Assefa 和 Woodbury 的研究，關於發展新的補注計算程式，並配合 GIS 圖資，可獲得更精確的數據。

Search ePosters | Upload Your ePoster

H31A-1105: Transient, spatially-varied recharge for groundwater modeling

« Return to search results · New Search

Authors:

Kibreab Assefa, Allan D Woodbury

Author Institutions:

Civil Engineering, Universty of Manitoba, Winnipeg, MB, Canada

圖 8 加拿大學者 Assefa 和 Woodbury 的研究

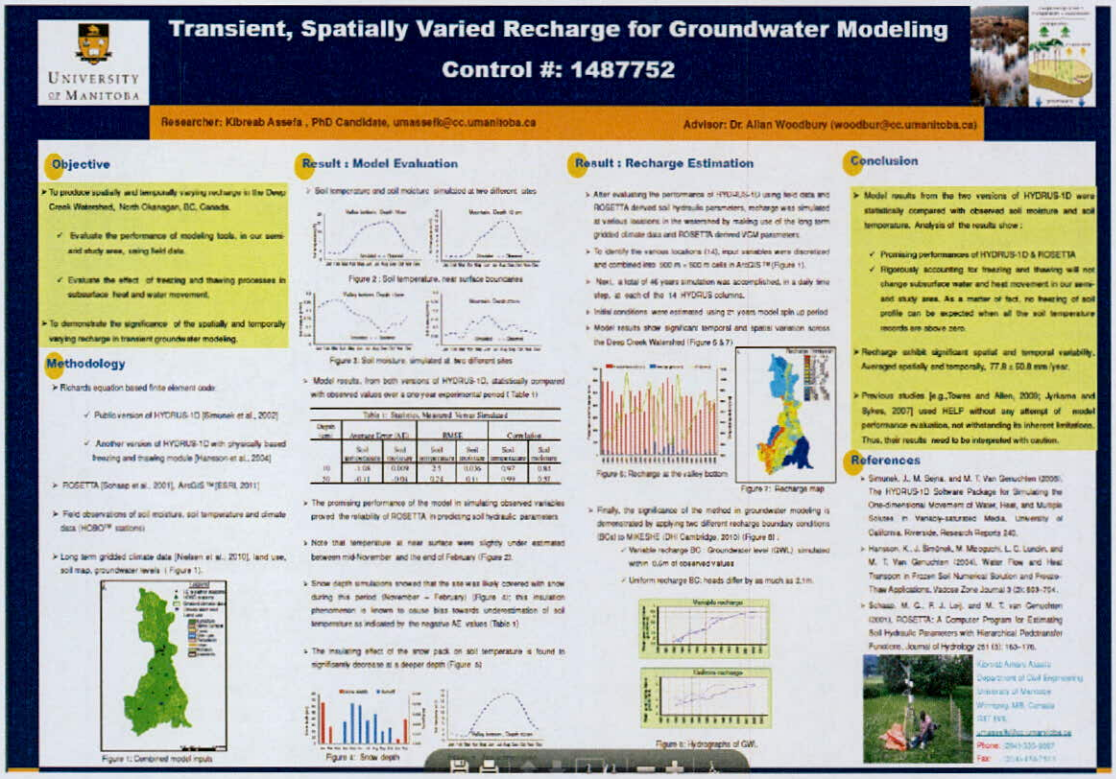
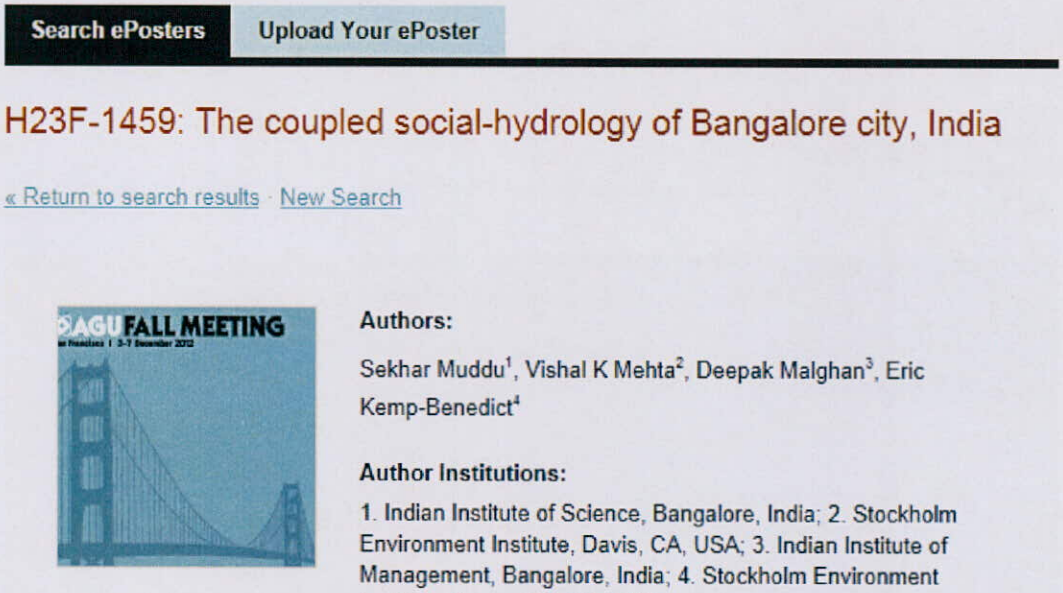


圖 9 加拿大學者 Assefa 和 Woodbury 的論文海報

印度學者 Muddu 等的研究，探討地下水補注和抽取之不平衡，及造成的社會問題，水資源管理的未來。



Search ePosters | Upload Your ePoster

H23F-1459: The coupled social-hydrology of Bangalore city, India

« Return to search results · New Search

AGU FALL MEETING

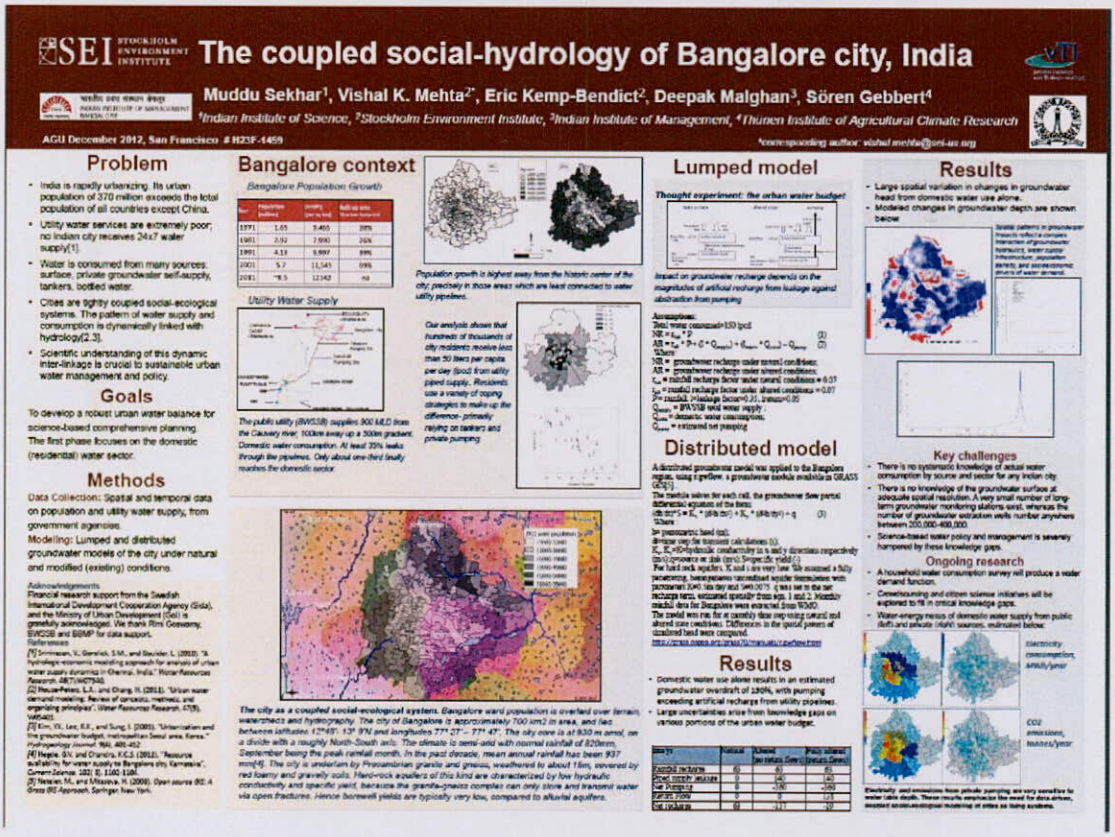
Authors:

Sekhar Muddu[1], Vishal K Mehta[2], Deepak Malghan[3], Eric Kemp-Benedict[4]

Author Institutions:

1. Indian Institute of Science, Bangalore, India; 2. Stockholm Environment Institute, Davis, CA, USA; 3. Indian Institute of Management, Bangalore, India; 4. Stockholm Environment Institute, Somerville, MA, USA

圖 10 印度學者 Muddu 等的研究



SEI STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE

The coupled social-hydrology of Bangalore city, India

Muddu Sekhar[1], Vishal K. Mehta[2*], Eric Kemp-Bendict[2], Deepak Malghan[3], Sören Gebbert[4]

[1]Indian Institute of Science, [2]Stockholm Environment Institute, [3]Indian Institute of Management, [4]Thünen Institute of Agricultural Climate Research

AGU December 2012, San Francisco # H23F-1459

*corresponding author: vishal.mehta@sei-us.org

Problem

- India is rapidly urbanizing. Its urban population of 370 million exceeds the total population of all countries except China.
- Utility water services are extremely poor; no Indian city receives 24x7 water supply[1].
- Water is consumed from many sources: surface, private groundwater self-supply, tankers, bottled water.
- Cities are tightly coupled social-ecological systems. The pattern of water supply and consumption is dynamically linked with hydrology[2,3].
- Scientific understanding of this dynamic inter-linkage is crucial to sustainable urban water management and policy.

Goals

To develop a robust urban water balance for science-based comprehensive planning. The first phase focuses on the domestic (residential) water sector.

Methods

Data Collection: Spatial and temporal data on population and utility water supply, from government agencies.

Modelling: Lumped and distributed groundwater models of the city under natural and modified (existing) conditions.

Bangalore context

Bangalore Population Growth

Utility Water Supply

Lumped model

Thought experiment: the urban water budget

Distributed model

Results

- Domestic water use alone results in an estimated groundwater overdraft of 180%, with pumping exceeding artificial recharge from utility pipelines.
- Large uncertainties arise from knowledge gaps on various portions of the urban water budget.

Results

- Large spatial variation in changes in groundwater head from domestic water use alone.
- Modeled changes in groundwater depth are shown below:

Key challenges

- There is no systematic knowledge of actual water consumption by source and sector for any Indian city.
- There is no knowledge of the groundwater surface at adequate spatial resolution. A very small number of long-term groundwater monitoring stations exist, whereas the number of groundwater extraction wells number anywhere between 200,000-400,000.
- Science-based water policy and management is severely hampered by these knowledge gaps.

Ongoing research

- A household water consumption survey will produce a water demand function.
- Crowdsourcing and citizen science initiatives will be explored to fill in critical knowledge gaps.
- Water-energy nexus of domestic water supply from public (left) and private (right) sources, estimated below:

圖 11 印度學者 Muddu 等的論文海報

心得與建議:

AGU 秋季會議歷史悠久，向為國際上地質、地球科學或水利相關學門最重要的會議之一，本次的會議中，來自世界各國超過 20,000 位專家學者，發表了數萬篇的研究成果，本團隊與其它研究相互交流亦有豐碩的收獲。

在地下水方面，氣候變遷仍為一重大議題，本次大會其亦為重點之一，其他在地下水與地面水交互作用，對於生態的影響，未來水資源的管理，皆有相當多的研究。台灣未來在全球暖化下，水資源該如何管理，及對於地下水與地面水交換有何影響，應多做研究。