



地下水水文地質與補注模式研究 -補注區劃設與資源量評估(1/4)

地下水補注區與水平衡評估



委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立交通大學
中華民國一〇二年十二月



地下水水文地質與補注模式研究 補注區劃設與資源量評估(1/4)

Hydro-geological investigation and groundwater recharge model
simulations: Recharge areas delineation and groundwater resources
assessment (1/4)

地下水補注區與水平衡評估 Groundwater Recharge Area Delineation and Water Balance Assessment

子計畫主持人：張良正 教授

子計畫執行單位：國立交通大學

研究人員：黃金維、陳宇文、蔡瑞彬、鄭蔚辰、陳祐誠

王雲直、林海倫、邱怡瑄、陳冠宏

中華民國一〇二年十二月

摘要

本計畫係依據「地下水水文地質與補注模式研究」計畫（102年至105年）實施進度規劃，其主要工作目標係為評估地下水補注區之範圍，並瞭解區域地下水補注範圍及資源量，使地下水資源的管理朝向永續利用的目標。執行策略採分年分區執行，本年度為第一年度，研究區域為蘭陽平原，本分項計畫報告之研究成果包含地下水主要補注區範圍建議、主要補注區對地下水系統之影響評估、地下水可用抽水量推估、重力量測以及水文地質模式建立。

蘭陽平原地下水主要補注區範圍建議部分，本計劃綜合岩心、湧泉、溶氧量、二維地電阻及水文地質模型資料，推估主要補注區，所推估之主要補注區範圍位於蘭陽溪上游，包括員山鄉、三星鄉與冬山鄉。補注區之面積約為 80.32km^2 ，約佔蘭陽平原之22.35%，

蘭陽平原地下水補注量與抽水量推估部分，數值模式推估蘭陽平原全區之年均垂向補注量為103.92百萬噸，山邊側向補注量為133.07百萬噸，海岸淨流出為16.20百萬噸，含水層一抽水量為190.20百萬噸，含水層二抽水量為29.61百萬噸，統計整體總補注量為236.99百萬噸，總抽水量為219.81百萬噸。水位歷線法之推估結果為年均總補注量約267.16百萬噸，總抽水量約為204.26百萬噸。兩方法在總補注量與總抽水量之推估結果相當接近。

蘭陽平原地下水主要補注區對地下水系統影響評估部分，補注區面積約佔蘭陽平原之22.35%，而數值模式推估補注區之垂向補注量為59.85百萬噸，佔整體垂向補注量之57.59%。而透過地下水流模式與污染質傳輸模式MODPATH模擬後，發現一旦補注區遭受污染，在10年內污染物質將傳輸至第一含水層(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)，顯現主要補注區對蘭陽平原之地下水補注極為重要。

在地下水可用抽水量推估部分，本計劃應用數值模式與希爾法進行推估，求得年可用抽水量為每年219.49百萬噸。

在現地補充調查方面，已完成枯水季(4月)與豐水季(9月)五個測站之重力觀測，其中三星與大隱測站豐枯水期水位與重力變化較大，可進行比出水量推估。此外，重力施測亦配合內城站抽水試驗進行聯合試驗，量測抽水時期之重力差與水位差，推估比出水量，並與抽水試驗推估之量值進行比較。

在水文地質模型建立部分，本計畫整合水文地質架構與水文地質參數，建立三維水文地質模型，其中在水文地質架構部分，本計畫將中央地質調查所繪製之地質剖面圖數化後，輔以內差方法(最近距離法)建立三維水文地質架構。而在水文地質參數推估部分，本計劃應用地電阻與重力量測資料，進行參數推

估。其中在應用地電阻推估透水係數部分，本計畫發展一透水係數推估方法，應用地表地電阻與抽水試驗資料建立透水係數推估式，並以此為基礎建立三維透水係數場。在應用重力資料推估比出水量部分，本計劃由量測之地下水位與重力資料，透過數值模擬，推估比出水量。本計劃選定豐枯水期水位與重力變化較大之三星與大隱測站，進行比出水量推估，其中三星站之推估比出水量為 0.07，大隱站之比出水量為 0.25。而內城站之重力觀測與抽水試驗聯合試驗資料所推估之比出水量為 0.37，若考量絕對重力儀的觀測不確定度，在 68% 的信心水準中，內城站的 S_y 值合理範圍應介於 0.19 至 0.55 間，而抽水試驗推估之 S_y 值為 0.17，相當接近重力推估合理範圍之下限。

關鍵字：現地補充調查、地電阻調查、重力調查、水質調查、水文地質模型、地下水歷線法與地下水數值模式

Abstract

This project was scheduled on the basis of “Groundwater hydro-geography and recharge model research” (2013 to 2016). The main objective was to estimate the area of groundwater recharge and to understand the local groundwater recharge area, as well as the amount of water resource, which directed the groundwater resource management to sustainable utilization. The executive strategy was made by year and area and this is the first-year project. The research area was focused on Lan-Yang plain. The research results included recommendations of the main groundwater recharge areas, main recharge influence assessment against groundwater system, analyses of available groundwater discharge of pumping, gravity measurement, and establishment of hydro-geology model.

For the perspective of recommendations of main groundwater recharge area on Lan-Yang plain, this project synthesized information of drill core, spring, dissolved oxygen, two-dimensional resistance to ground, and hydro-geology model. The main recharge area was estimated at the upstream of Lan-Yang river, including Yuan-Shan County, Sa-Hsing County, and Tung-Shan County. The supplement area is about 80.32 km², 22.35% of Lan-Yang plain.

For the perspective of estimation of groundwater recharge and discharge on Lan-Yang plain, numerical model revealed the annual vertical recharge was 103.92 million tons. The lateral recharge along the mountain was 133.07 million tons. Net effluent to the shore was 16.20 million tons. The discharge of the first confined aquifer was 190.20 million tons. The discharge of the second was 29.61 million tons. The total recharge was 236.99 million tons, and the total discharge was 219.81 million tons. By using hydrograph to analyze, total annual recharge was 267.16 million tons, while the total discharge was 204.26 million tons. The results of the above two methods were quite similar.

For the perspective of impact assessment against main recharge area of groundwater system on Lan-Yang plain, the recharge area was about 22.35%. The vertical recharge, by using numerical model assessment, was 59.85 million tons, 57.59% of the total. By using MODPATH simulation, the contaminated matters was transferred from recharge area to the first confined aquifer (F1) in ten years once the area was polluted. Some contaminated matters further infiltrated to deeper confined aquifers (F2). The result revealed that the main groundwater recharge area is very important.

For the perspective of the analyses of available groundwater discharge, the numerical model and Hill method were used in this project. The annual discharge was 219.49 million tons.

For the perspective of the terrain recharge investigation, gravity monitoring of five stations was performed in the drought season (April) and the flood season (September). Water level and gravity difference were larger between the two seasons for Sa-Hsing and Ta-Yin station, which can be used for specific effluent assessment. Moreover, gravity tests were performed along with pumping tests at Na-Cheng station. The difference of gravity and water level was measured to estimate specific effluent and to be compared with the value of pumping tests.

For the perspective of the establishment of hydro-geology model, this project integrated the construction and the constants of hydro-geology to establish the three-dimensional model. For the construction of hydro-geology, the three-dimensional construction was established by using interpolation method, after the geological sectional drawing was recorded by numbers from Central Geological Survey, MOEA. For the constants of hydro-geology, the constants were estimated by using the information of resistance to ground and gravity monitoring. For the resistance to ground applied to estimate the infiltration constants, the estimation method and the three-dimensional infiltration constants field were developed in this project, which was based on the formula and information of resistance to ground and pumping tests. For the gravity information applied to estimate specific effluent, information of the groundwater level and gravity was collected to obtain the specific effluent with numerical model. This project picked up Sa-Hsing and Ta-Yin station, which contained larger difference of water level and gravity, to estimate specific effluent. The specific effluent is 0.07 at Sa-Hsing station and 0.25 at Ta-Yin station. The specific effluent is 0.37 by using information of gravity monitoring at Na-Cheng station and pumping tests. If the uncertainty of the absolute gravity device was considered, the reasonable S_y value at Na-Cheng station should be from 0.19 to 0.55 with 68% confidence. Value was 0.17 from estimation of pumping tests, closed to the bottom limit of gravity estimation.

Key word: terrain recharge investigation, resistance to ground investigation, gravity investigation, water quality investigation, hydro-geology model, groundwater hydrograph, numerical model of groundwater value

目錄

摘要.....	I
Abstract	III
目錄.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XIII
第一章 前言	1
1.1 計畫緣起及目標.....	1
1.2 計畫區域概述.....	2
1.3 計畫工作項目及內容.....	19
第二章 國內外相關研究文獻回顧.....	22
2.1 地下水補注區或管制區劃定相關文獻.....	22
2.2 地下水資源評估.....	27
2.3 水文地質架構建置與相關調查方法.....	28
第三章 資料蒐集及檢核.....	32
3.1 研究資料蒐集.....	32
3.2 地下水位資料補遺與校正.....	40
3.2.1 地下水位資料缺漏及補遺.....	40
3.2.2 地下水位資料異常及處理.....	50
第四章 重力量測調查與分析.....	55
4.1 重力量測原理與設備.....	55
4.2 重力施測結果與分析.....	57
4.3 重力聯合抽水試驗觀測初步分析.....	63
第五章 三維水文地質模型建置.....	67
5.1 水文地質資料庫建置.....	67
5.1.1 資料分類.....	67
5.1.2 資料庫架構設計.....	68
5.1.3 資料儲存與視覺化展示.....	76
5.2 水文地質架構輔助分析.....	79
5.2.1 時頻分析之應用.....	79
5.2.2 經驗正交函數法之應用.....	89
5.3 水文地質架構分析.....	99
5.3.1 水文地質分析方法.....	99
5.3.2 綜整水文地質調查資料與分析.....	99
5.4 水文地質參數推估.....	120
5.4.1 應用地電阻於透水係數推估.....	120
5.4.2 應用重力量測於比出水量推估.....	137
5.5 水文地質數化模型建置.....	140

5.5.1 建置說明	140
5.5.2 水文地質架構數位化	140
5.5.3 水文地質架構資料及三維圖像展示	145
5.5.4 水文地質模型應用於主要補注區邊界分析	149
5.5.5 其他應用	151
第六章 地下水補注區劃設	153
6.1 資料彙整	153
6.2 補注區邊界綜合分析	155
第七章 地下水補注量與抽水量推估	164
7.1 地下水歷線法分析	164
7.1.1 地下水位歷線法理論介紹	164
7.1.2 水位歷線法分析於蘭陽平原之應用結果	171
7.2 地下水流數值模式建置	188
7.2.1 地下水數值模式建置流程	188
7.2.2 地下水數值模式	189
7.3 水平衡分析	204
7.4 地下水可用水量推估	207
7.5 地下水補注區對地下水量與水質之影響分析	208
第八章 結論與建議	211
參考目錄	215

圖目錄

圖 1.2-1 蘭陽平原地形單元及水系圖	3
圖 1.2-2 蘭陽平原泥層厚度分布圖	4
圖 1.2-3 蘭陽平原細砂厚度分布圖	5
圖 1.2-4 蘭陽平原粗砂厚度分布圖	5
圖 1.2-5 蘭陽平原礫石厚度分布圖	6
圖 1.2-6 蘭陽平原觀測井位置圖	9
圖 1.2-7 蘭陽平原地質鑽探井位置圖	11
圖 1.2-8 水文地質剖面圖(自強-頭城).....	13
圖 1.2-9 水文地質剖面圖(紅柴林-公館).....	14
圖 1.2-10 水文地質剖面圖(三星-大錦開).....	15
圖 1.2-11 水文地質剖面圖(三星-岳明).....	16
圖 1.2-12 水文地質剖面圖(吳沙-龍德).....	17
圖 1.2-13 水文地質剖面圖(頭城-岳明).....	18
圖 2.1-1 辨別標示出井頭保護帶	22
圖 2.1-2 美國 Georgia 州之污染敏感圖及華盛頓州.....	23
圖 2.1-3 Issaquah 市之重要地下水補注保護區劃設	23
圖 2.1-4 美國華盛頓州 King County 之重要地下水補注保護區劃設.....	24
圖 3.1-1 含水層一(F1)34 口地下水觀測井分布圖	35
圖 3.1-2 含水層二(F2)6 口地下水觀測井分布圖	36
圖 3.1-3 中央氣象局雨量站位置圖	38
圖 3.1-4 水利署雨量站位置圖	39
圖 3.2-1 地下水位補遺標準作業程序	44
圖 3.2-2 地下水位缺漏資料年代分佈圖：(a)扇頂區；(b)扇央區；(c)扇尾區	46
圖 3.2-3 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，以同樂為 例：(a)補遺前之水位歷線；(b)補遺後之水位歷線.....	46
圖 3.2-4 篩選可信度較低的資料點後再以線性迴歸進行補遺，以五結(3)為例：(a)原始水位； (b)線性迴歸補遺後水位	47
圖 3.2-5 依標準作業流程之水井補遺結果，以吳沙(1)為例分別用：(a)線性迴歸補遺；(b)以端 點與原始水位之平均差值做平移，使資料與原始資料平滑連接.....	47
圖 3.2-6 地下水位資料異常之處理標準作業程序	51
圖 3.2-7 古亭(2)因儀器校調偏差導致之異常水位校正：(a)水位校正前之水位歷線 (b)水位校正 後之水位歷線	52
圖 3.2-8 利澤(1)因儀器校調偏差導致之異常水位校正：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校 正後之水位歷線	52
圖 3.2-9 中興(3) 因儀器校調偏差導致之異常水位校正：(a) 水位校正前之水位歷線(b) 水位校 正後之水位歷線	52

圖 3.2-10 龍德(2)井疑似有問題的觀測值：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線.....	53
圖 3.2-11 礁溪(1)井疑似有問題的觀測值：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線.....	53
圖 3.2-12 冬山(1)井疑似有問題的觀測值：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線.....	54
圖 3.2-13 五結(4)疑似有問題的觀測值：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線.....	54
圖 3.2-14 中興(1)疑似有問題的觀測值：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線.....	54
圖 4.1-1 FG5 絕對重力儀與各部件明細[Micro-g Lacoste FG5 Manual]	56
圖 4.2-1 三星站施作現況.....	58
圖 4.2-2 三星站第一(左)、第二(右)期絕對重力量測成果	58
圖 4.2-3 大隱站第一(左)、第二(右)期施作情形.....	59
圖 4.2-4 大隱站第一(左)、第二(右)期絕對重力量測成果	59
圖 4.2-5 順安站絕對重力儀擺設狀況	60
圖 4.2-6 順安站第一(左)、第二(右)期絕對重力量測成果	60
圖 4.2-7 大洲站重力觀測點.....	61
圖 4.2-8 大洲水位觀測站與臨近大排水溝.....	61
圖 4.2-9 大洲站第一(左)、第二(右)期絕對重力量測成果	62
圖 4.2-10 中興絕對重力測點.....	63
圖 4.2-11 中興站第一(左)、第二(右)期絕對重力量測成果.....	63
圖 4.3-1 絕對重力儀 FG5 觀測重力背景值(臺灣時間 2013/5/17 03:10~05:00AM)與定量試水期間絕對重力值 (臺灣時間 2013/5/18 19:47~21:07PM).....	65
圖 4.3-2 以實際水位觀測資料為控制條件，利用 MODFLOW 模擬內成站抽水狀況之三維洩降圖。.....	66
圖 5.1-1 觀測井資料分類.....	68
圖 5.1-2 非觀測井資料分類.....	68
圖 5.1-3 觀測井資料庫架構.....	70
圖 5.1-4 非觀測井資料庫架構.....	71
圖 5.1-5 Rockworks 資料庫架構.....	72
圖 5.1-6 Utilities 資料庫架構.....	74
圖 5.1-7 三維岩性空間分布圖	77
圖 5.1-8 岩性井間剖面圖.....	77
圖 5.1-9 多條井間剖面圖.....	77
圖 5.1-10 蘭陽平原之黏土空間分布	78
圖 5.1-11 數值模式分層架構.....	78
圖 5.2-1 龍德(1) 水位頻率變化時頻圖 (一日一次).....	80
圖 5.2-2 龍德(1) 水位頻率變化時頻圖 (一年一次).....	80

圖 5.2-3 礁溪(1)水位歷線圖	82
圖 5.2-4 三星水位歷線圖	82
圖 5.2-5 日頻率強度之空間分布	84
圖 5.2-6 地質剖面與位置圖(頭城至岳明).....	85
圖 5.2-7 地質剖面與位置圖(三星至岳明).....	86
圖 5.2-8 年頻率強度之空間分布	87
圖 5.2-9 組合指標之空間分布	88
圖 5.2-10 蘭陽平原 EOF 分析流程圖	91
圖 5.2-11 EC1、觀測井地下水位及降雨量歷時分佈圖。(a)EC1 歷線圖。(b) 蘭陽平原降雨時 間分布圖。(c) 三星(1)水位歷線圖。(d) 自強(1)水位歷線圖。	94
圖 5.2-12 EOF1 之權重分佈	95
圖 5.2-13 岩心柱狀圖。(a)三星岩心柱狀圖。(b)自強岩心柱狀圖。	96
圖 5.2-14 EOF1 之權重與二維地電阻分布圖.....	97
圖 5.3-1 蘭陽平原附近之地體構造圖 (康竹君等, 2008)	101
圖 5.3-2 蘭陽平原附近之斷層分布圖 (康竹君等, 2008)	101
圖 5.3-3 蘭陽平原附近地層及基盤剖面圖 (江新春, 1976; 邱詠恬, 2008; 康竹君等, 2008)	102
圖 5.3-4 蘭陽平原基盤深度與觀測井之位置 (基盤深度引用自江新春, 1976)	103
圖 5.3-5 蘭陽平原之斷層分布 (邱詠恬, 2008)	103
圖 5.3-6 蘭陽平原水準量測之地面高度變化 (Liu, 1995)	104
圖 5.3-7 濁水斷層之位置與地形 (康竹君等, 2008)	104
圖 5.3-8 蘭陽平原沉積物定年推測之地面沉陷速度 mm/yr (謝孟龍, 2006)	105
圖 5.3-9 蘭陽平原之沉積速率 mm/yr, 左圖: 16000-10000 年前; 右圖: 10000-5000 年前 (謝 孟龍, 2006)	105
圖 5.3-10 蘭陽平原主要水系、高程及沖積扇分布圖 (鄭迄君, 2010)	106
圖 5.3-11 蘭陽平原沖積扇分布圖 (張瑞津等, 1995)	106
圖 5.3-12 蘭陽平原沿岸砂丘分佈圖。平行海岸線長條狀紅色部分, 由北而南包括: 頭城、壯 圍、公館、冬山河、利澤簡及無尾巷砂丘等(蘇品如等, 2009).....	107
圖 5.3-13 蘭陽地區東西向地質分層剖面圖。	109
圖 5.3-14 濁水溪地區東西向地質分層剖面圖。	109
圖 5.3-15 透水係數 K 與含水層粒徑之關係	110
圖 5.3-16 東西向剖面之透水係數 K.....	110
圖 5.3-17 蘭陽平原地下水分層之水位(2013 年 4 月).....	114
圖 5.4-1 研究流程圖	120
圖 5.4-2 一維地電阻測點空間分布圖	122
圖 5.4-3 地層因子計算流程圖	124
圖 5.4-4 分群分析流程圖.....	125
圖 5.4-5 推估 K 場流程圖.....	126
圖 5.4-6 土體電阻值直方圖.....	127

圖 5.4-7 孔隙水電阻值直方圖	127
圖 5.4-8 地層因子直方圖	128
圖 5.4-9 研究區域含泥與否分區說明	129
圖 5.4-10 含泥區與不含泥區之觀測井分佈	130
圖 5.4-11 各觀測井之透水係數對之散佈圖	130
圖 5.4-12 地層因子與透水係數之回歸關係圖	131
圖 5.4-13 土體電阻值空間分布	132
圖 5.4-14 水質電阻值空間分布	133
圖 5.4-15 地層因子空間分布	134
圖 5.4-16 透水係數空間分布	136
圖 5.4-17 比出水量推估流程圖	138
圖 5.5-1 水文地質數化模型建置流程	140
圖 5.5-2 水文地質架構數化之流程圖	141
圖 5.5-3 二維剖面圖數化成果比對圖。	143
圖 5.5-4 數位化後之岩性資料儲存於資料庫示意圖	144
圖 5.5-5 三維水文地質數化架構	144
圖 5.5-6 網格資料展示	146
圖 5.5-7 水文地質模型三維空間分佈(a)三維透水係數分布圖。(b)三維岩性架構分布圖。 ..	146
圖 5.5-8 剖面圖。(a)三星至龍德水文地質架構剖面。(b)三星至龍德水文地質參數剖面(K)。	148
.....	148
圖 5.5-9 空間資料查詢介面	149
圖 5.5-10 剖面線位置示意圖與水文地質柵狀圖	150
圖 5.5-11 一剖面線之剖面圖	150
圖 6.5-12 各剖面礫石層邊界連線圖	151
圖 6.5-13 水文地質模型推估之主要補注區邊界	151
圖 6.1-1 地下水補注區劃設流程圖	153
圖 6.1-2 各項資訊位置分佈圖	154
圖 6.2-1 分析區域說明	155
圖 6.2-2 內城以北(分區 1)現地調查結果彙整分析	156
圖 6.2-3 Line 05 二維地電阻影像剖面圖	156
圖 6.2-4 Line 06 二維地電阻影像剖面圖	156
圖 6.2-5 Line 34 二維地電阻影像剖面圖	157
圖 6.2-6 內城至大隱分區(分區 2)現地調查結果彙整分析	157
圖 6.2-7 Line 36 二維地電阻影像剖面圖	157
圖 6.2-8 Line 07 二維地電阻影像剖面圖	158
圖 6.2-9 Line 04 二維地電阻影像剖面圖	158
圖 6.2-10 大隱以南分區(分區 3)現地調查結果彙整分析	159
圖 6.2-11 柯林站之岩心柱狀圖	160
圖 6.2-12 Line 17 二維地電阻影像剖面圖	161

圖 6.2-13	Line 22 二維地電阻影像剖面圖.....	161
圖 6.2-14	Line 23 二維地電阻影像剖面圖.....	161
圖 6.2-15	Line 24 二維地電阻影像剖面圖.....	161
圖 6.2-16	Line 29 二維地電阻影像剖面圖.....	161
圖 6.2-17	Line 25 二維地電阻影像剖面圖.....	161
圖 6.2-18	廣興站之岩心柱狀圖.....	162
圖 6.2-19	本計畫建議之補注區邊界.....	163
圖 7.1-1	地下水水位歷線法計算流程圖.....	164
圖 7.1-2	區域降雨歷線與地下水位歷線起伏變化示意圖.....	165
圖 7.1-3	表層水層之概念模型示意圖.....	165
圖 7.1-4	徐昇氏多邊形.....	166
圖 7.1-5	三星觀測井 2004~2006 年平均日降雨量與日地下水水位圖.....	167
圖 7.1-6	三星觀測井 2004~2006 年日地下水位歷線和枯水期退水線圖.....	167
圖 7.1-7	降雨事件、補注量與流失量關係示意圖.....	169
圖 7.1-8	蘭陽平原淺層地下水觀測井分布與徐昇氏多邊形.....	172
圖 7.1-9	屏東平原 K 與 Sy 值迴歸關係式.....	173
圖 7.1-10	水位歷線及枯水期退水線圖(宜農(1)).....	175
圖 7.1-11	水位歷線、枯水期及一期稻作退水線圖(冬山(1)).....	175
圖 7.1-12	蘭陽平原淺層觀測井枯水期退水線斜率.....	185
圖 7.1-13	蘭陽平原淺層觀測井單位面積平均年補注量.....	186
圖 7.1-14	場次降雨量與補注量關係圖(2004~ 2012 年).....	187
圖 7.2-1	地下水數值模式建置流程示意圖.....	189
圖 7.2-2	蘭陽平原概念分層(紅柴林-公館剖面).....	191
圖 7.2-3	紅柴林-公館剖面及 AA' 剖面位置圖.....	191
圖 7.2-4	蘭陽平原模式分層(AA'剖面).....	191
圖 7.2-5	蘭陽平原地表高程對日均地下水位線性回歸.....	192
圖 7.2-6	蘭陽平原地下水模擬區域.....	194
圖 7.2-7	含水層一徐昇式分區.....	195
圖 7.2-8	含水層二徐昇式分區.....	195
圖 7.2-9	地下水模式流量計算概念圖.....	197
圖 7.2-10	地下水參數檢定系統架構圖.....	198
圖 7.2-11	參數檢定流程.....	200
圖 7.2-12	含水層一觀測與模擬 水位等值圖.....	201
圖 7.2-13	含水層二觀測與模擬 水位等值圖.....	201
圖 7.2-14	含水層一 LOG(RMSE).....	202
圖 7.2-15	含水層二 LOG(RMSE).....	202
圖 7.2-16	利澤(1)水位時序變化圖.....	203
圖 7.2-17	三星水位時序變化圖.....	203
圖 7.2-18	每日均方根誤差變化圖(2004-2012).....	203

圖 7.2-19 模擬水位誤差主體圖(2004-2012).....	203
圖 7.3-1 岳明(2)每日降雨量、觀測水位與淨補注量關係圖	205
圖 7.4-1 總抽水量對應平均洩降線性回歸.....	207
圖 7.5-1 水質影響範圍圖(F1).....	210
圖 7.5-2 水質影響範圍圖(F2).....	210

表目錄

表 1.2-1 蘭陽平原觀測站站址	6
表 1.2-2 蘭陽平原觀測井一覽表	7
表 1.2-3 蘭陽平原地質鑽探井一覽表	10
表 1.2-4 蘭陽平原水文地質參數列表	19
表 1.3-1 水質分析項目	20
表 3.1-1 含水層一(F1)地下水觀測井資料列表	32
表 3.1-1 含水層一(F1)地下水觀測井資料列表(續).....	33
表 3.1-2 含水層二(F2)地下水觀測井資料列表	33
表 3.1-3 地下水觀測井濾水管位置列表.....	33
表 3.1-3 地下水觀測井濾水管位置列表 (續).....	34
表 3.1-4 蘭陽平原複井抽水試驗實測儲水係數	36
表 3.1-5 蘭陽平原雨量站資訊 (中央氣象局部分).....	37
表 3.1-6 蘭陽平原雨量站資訊 (經濟部水利署部分).....	37
表 3.1-7 本計畫蒐集圖資資訊	39
表 3.2-1 2004-2012 年地下水位原始資料缺漏統計表	42
表 3.2-2 2004-2012 年地下水位原始資料缺漏時段分類列表.....	42
表 3.2-3 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	48
表 3.2-4 蘭陽平原淺層地下水觀測井水位異常時段列表.....	50
表 4.2-1 102 年度蘭陽平原絕對重力量測數值	57
表 5.1-1 資料庫對照表.....	75
表 5.2-1 為蘭陽平原淺層水井不同頻率下的水位振幅.....	81
表 5.2-2 前五名之時空特徵解釋比例	94
表 5.3-1 蘭陽平原沖積扇面積與海拔高度 (張瑞津等, 1995)	107
表 5.3-2 水文地質參數.....	111
表 5.3-3 蘭陽平原觀測井之水位	112
表 5.3-4 蘭陽平原地下水之同位素濃度.....	115
表 5.4-1 研究區域之地層因子計算結果.....	126
表 5.4-2 比出水量推估結果.....	139
表 7.1-1 蘭陽平原淺層觀測井列表(22 口井).....	173
表 7.1-2 蘭陽平原淺層水井枯水期退水線列表	176
表 7.1-3 蘭陽平原地下水井一期稻作退水線列表	178
表 7.1-4 系統水平衡分析表.....	181
表 7.1-5 各井平均年補注量排序列表	182
表 7.1-6 單位面積平均年補注量排序列表.....	183
表 7.1-7 各站枯水期與一期稻作退水線斜率列表	184
表 7.2-1 蘭陽平原給定水頭設定	193
表 7.3-1 模式檢定所得參數.....	204

表 7.3-2 地下水流量分項統計結果	206
表 7.3-3 地下水流出與流入量統計結果.....	206
表 7.5-1 補注區補注量與整體補注量關係表	208
表 7.5-2 補注區面積及垂向補注量統計表.....	208

第一章 前言

1.1 計畫緣起及目標

(一) 計畫緣起

臺灣地區之地下水資源頗為豐富，主要分布於平原、盆地和台地等地形平緩地區，其面積總和約 10,000 平方公里，深度 300 公尺內常有透水性好的地下水層分布。在河川汙染及水庫淤積問題日益嚴重，及氣溫上升降雨分布不均勻等諸多問題環繞下，使得地面水資源供應變得更不穩定，因此地下水在緩衝和補充水資源不足上勢必扮演起更重的角色。又因地下水開發成本較低，取用方便，故各目的用水競相開發。地下水開發利用之結果，雖促成各地區各項產業之發展，但往往因對地下水的認識不足、對地下水的資訊的掌握不夠，在大量的抽用地下水之後，衍生許多國土資源損害及其他的社會問題。

有鑑於地下水資源之高度重要性，而地下水補注區為地下水之水源地，一旦遭受汙染，將嚴重影響各地下水區之水質與水量。經濟部自民國 80 年起執行「臺灣地區地下水觀測網」整體計畫，進行長期且有系統的地下水區之水文地質調查、重要地區地下水調查與補注試驗、地層下陷監測調查以及地下水水質資料分析等相關工作，以充分掌握臺灣地區水文地質狀況，獲取正確可靠之地下水資訊。然而地下水系統埋藏於地下，須有充足之水文地質基本資料及長期地下水水位及水質觀測數據，才能提高地下水天然補注區範圍劃定之精確度，故中央地調所於 98-101 年執行「臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估」計畫，進行水文地質補充調查及補注潛勢評估，劃定濁水溪沖積扇和屏東平原地下水區之地下水補注區範圍，做為劃定地下水補注地質敏感區之依據。

此外由於全球氣候的極端化造成降雨分布不均，強化地下水補注地質敏感區的調查研究，並進行劃設保育，加強掌握地表水、地下水的互動調配，更應能因應較劇烈之環境變化。然國內環保意識高漲，地表水蓄水設施建設困難，保護具有提供國內用水約 30% 的天然的地下水庫，除可避免地面蓄水設施所造成之環保問題，更具有國土保育之功能。國土保育應包含土地環境資源保育以及水文環境資源保育，兩者兼顧才能達成「永續發展的資(能)源與環境」。希望能藉本計畫之成果，對於保護區土地利用及水土汙染提出適當的管制辦法，使地下水資源的管理開始朝向永續利用的目標跨出一大步。

(二) 計畫目標

本計畫係依據「地下水水文地質與補注模式研究」計畫（102 年至 105 年）

實施進度規劃，其主要工作目標係為評估地下水補注區之水文地質特性，並瞭解區域地下水補注範圍及資源量，使地下水資源的管理朝向永續利用的目標。執行策略採分年分區執行，4 年內針對臺灣重要地下水區蘭陽平原、台北盆地、台中盆地及花東縱谷地區進行調查，釐定主要地下水補注區範圍並評估地下水補注量。本「補注區劃設與資源量評估」調查分析研究工作擬達成下列目標：

1.完成蘭陽平原、台北盆地、台中盆地及花東縱谷地區等 4 個地下水區之水文地質補充調查，以充分掌握目標地下水補注區之水文地質特性。

2.綜整相關調查成果，建立蘭陽平原、台北盆地、台中盆地及花東縱谷地區地下水區之地下水補注模式，分析其補注機制、水平衡分析、地下水流模擬及地下水位水質監測，以確認地下水補注區範圍。

3.劃定蘭陽平原、台北盆地、台中盆地及花東縱谷地區等 4 個地下水區之主要地下水補注範圍，以提供做為後續地下水補注地質敏感區劃設的依據。

4.評估蘭陽平原、台北盆地、台中盆地及花東縱谷地區等 4 個地下水區之補注量、推估現況抽水之總抽水量及可抽用水量，並評估資源量做為水資源經營管理與保育之依據。

1.2 計畫區域概述

(一) 區域概述

蘭陽平原為台灣地區地下水觀測網第二期計畫，於八十八年下半年及八十九年度及九十一年度執行水文地質調查研究區域，行政區域屬宜蘭縣。蘭陽平原地下水區位於台灣之東北部，北起頭城鎮，南至蘇澳之隘丁，西沿山麓線至蘭陽溪沖積扇頂三星鄉之天送埤，東濱海岸。北西南三面依山地勢較高，東面向海地勢漸低。整個地形呈南北狹長，東西甚短之三角形，地下水區面積為 359.38 平方公里。蘭陽平原由西向東傾斜，故水系也隨之西而東流，到宜蘭市、羅東鎮以東，高度降至 5 公尺以下，地形平坦，東北角頭城南方的狹長地帶，海拔降至 2.5 公尺以下，在雨季常發生水災。

蘭陽平原位於北緯 24 度 36 分到 24 度 52 分之間。東邊面對太平洋，北、西與南三面被中央山脈和雪山山脈環繞。在夏天時，西南季風被中央山脈阻擋，高溫悶熱；在冬天時，東北季風則挾帶大量水氣，屬於典型的亞熱帶季風氣候。年平均溫度為 22°C，一月平均氣溫在 15-16°C 之間，七月平均氣溫在 27-28°C 之間。氣候主要受季風及地形影響，終年有雨，年降雨日超過 200 天，冬季受東北季風吹拂降雨豐沛，只有在梅雨來臨前和無颱風的七月有短暫的乾季出現，平原地區年雨量多在 3000-4000mm 之間。

(二) 地形與水系

蘭陽平原地下水分區內的主要河系為蘭陽溪，其河床寬濶，僅在上游區域成為峽谷，流路呈直線狀，曲流發育不明顯，總長約 66 公里，在平原區形成標準的沖積扇，並呈網狀河系（如圖 1.2-1 所示）。

蘭陽平原地下水分區之地形單元為宜蘭扇狀三角洲平原(林朝榮, 1957)，分布於蘭陽溪中、下游（舊稱宜蘭濁水溪）。外形呈等邊三角形輪廓，每邊長約 30 公里，底邊呈南北向（海岸線），向西稍為凹入，頂點於蘭陽溪口起算約 23 公里，高程約 150 公尺，扇端高度約 30 公尺(林朝榮, 1957)；(張瑞津 et al., 1995)。宜蘭扇狀三角洲平原之海岸線形狀受海蝕影響，呈弓形海岸，除蘭陽溪口因淤積而稍微向東突出，其他區域均向西凹入。海岸區域，除各大小河流之出海口外，均有長形砂丘發育，其延長方向與海岸線平行，高度均在 20 公尺以下。砂丘帶寬 800 公尺以內，其西側有小河灌流，流向與砂丘方向平行，形成三角洲前緣特有的濕地。這些砂丘亦常為各河出海之屏障，冬山河及宜蘭河等河川皆因受阻於砂丘而不得直接向東入海，僅能取道砂丘背側，匯流於蘭陽溪入海，三角洲北端河川亦匯流於得子口溪出海，而南端之新城溪則不受砂丘影響直接向東出海。

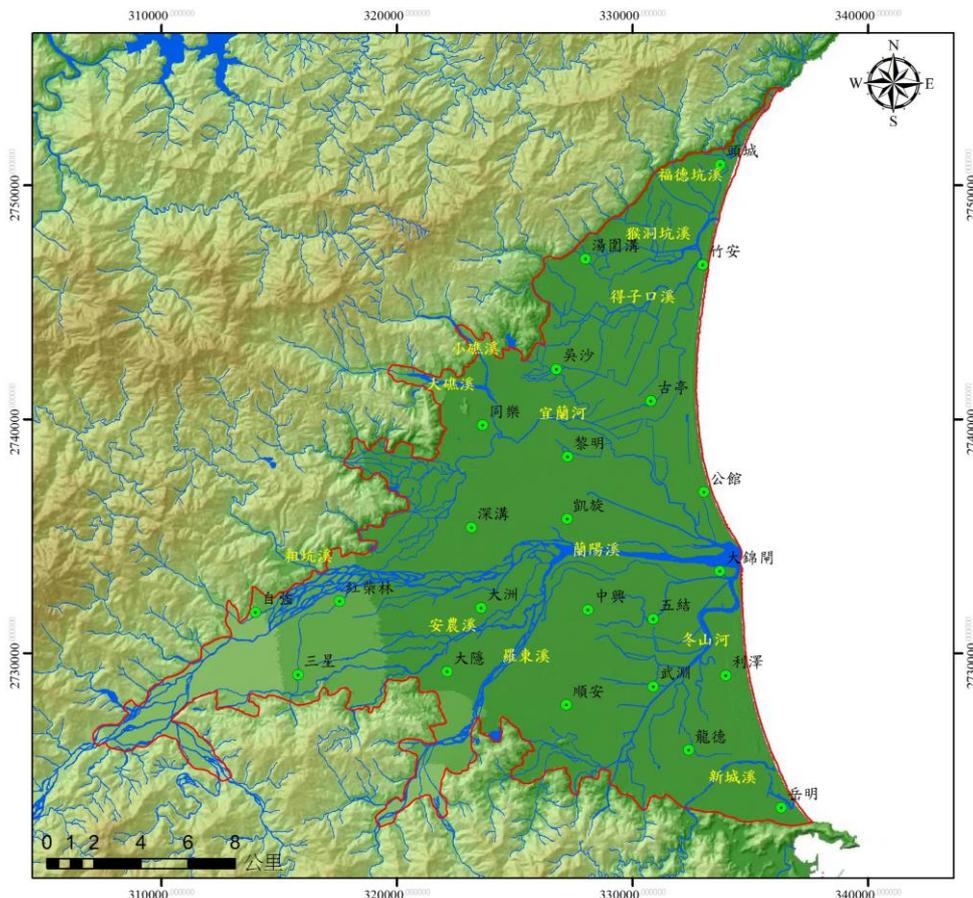


圖 1.2-1 蘭陽平原地形單元及水系圖

(三) 水文地質架構

蘭陽平原位於沖繩海槽的西南端，為蘭陽溪入海沖積而成，目前地形下陷中心軸略成東西向，谷地漸向南北方向開張（如圖 1.2-1 所示）。因為西邊山區帶來大量沉積物，因此蘭陽平原西側地下地質以礫石及粗砂層為主，往東入海，很快接海相的厚泥層（如圖 1.2-2 所示）。局部沉積速率非常快，達 1.5(cm/yr)，是濁水溪沖積扇(彰雲地區)的兩倍。

蘭陽平原是由全新世-更新世沖積地層及底部之始新-中新世基盤所組成，兩者間以不整合關係接觸；附近露頭為始新-中新世地層，岩性主要以板岩為主，另有變質砂岩及硬頁岩。由沉積物成分多含大量之板岩岩屑，可知蘭陽溪之部分流域、羅東溪及冬山河流域已有大量侵蝕中新世廬山層板岩區。另龍德、利澤與武淵等站淺層沉積物成分含有綠色片岩及砂質片岩，可能是新城溪上游流域岩層受侵蝕而來。

應用岩心鑽探結果搭配內插演算法，蘭陽平原泥層分布（如圖 1.2-2 所示）除蘭陽溪上游（自強站與大隱站）、福德坑溪（頭城站）與新城溪（岳明站）的泥層較少外，其餘區域皆有 40% 以上的泥層；細砂主要分布於海岸區域（圖 1.2-3），蘭陽溪上游區域之細砂皆在 10% 以下；粗砂與細砂有相似的分布（圖 1.2-4）；礫石則與泥有反向的分布（圖 1.2-5），其主要分布區域在蘭陽溪上游及羅東溪沿岸，成份比例可達 60% 以上。

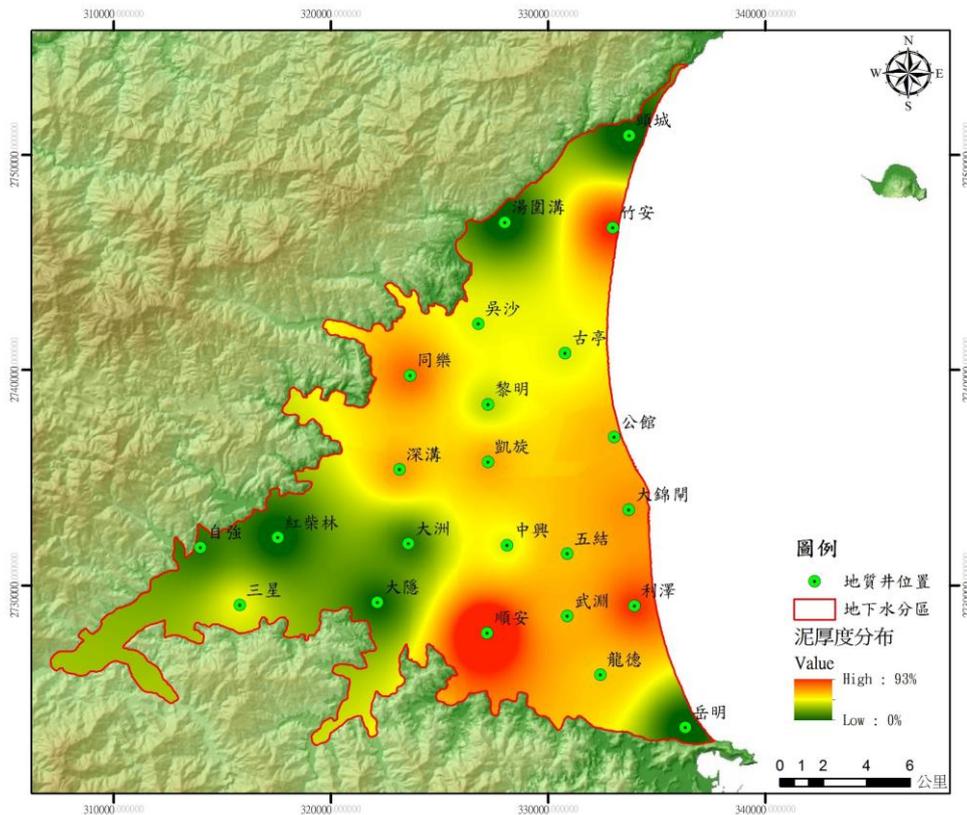


圖 1.2-2 蘭陽平原泥層厚度分布圖

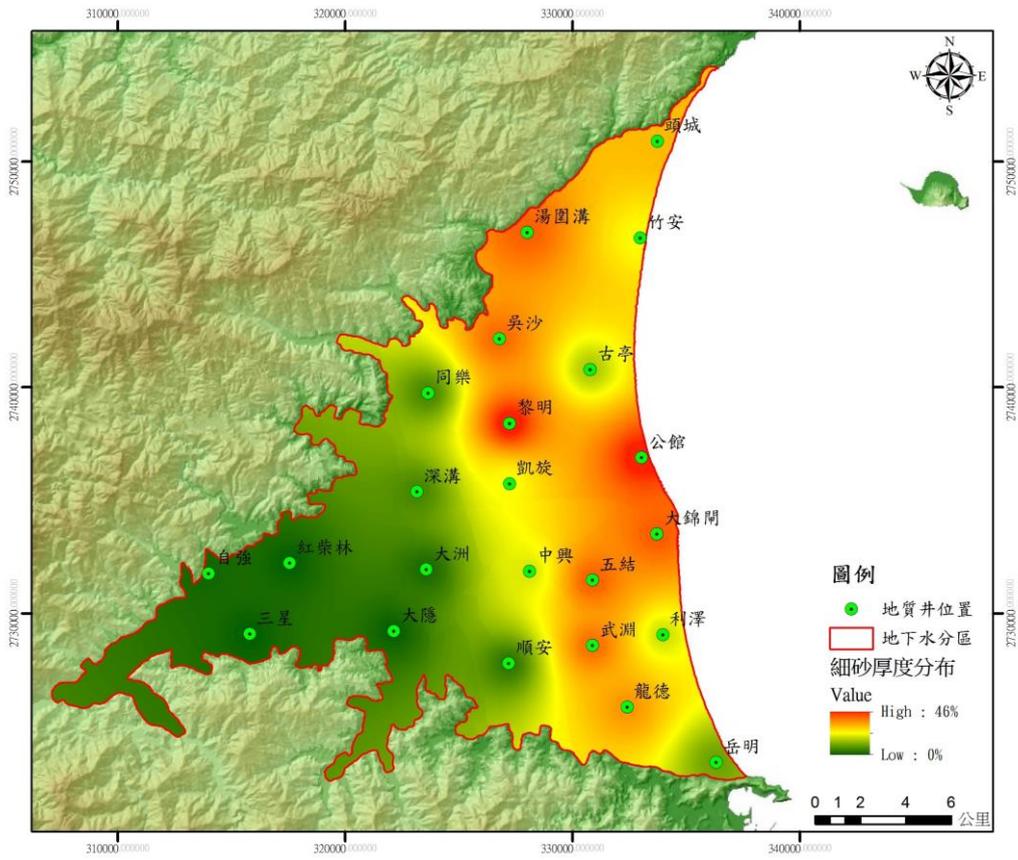


圖 1.2-3 蘭陽平原細砂厚度分布圖

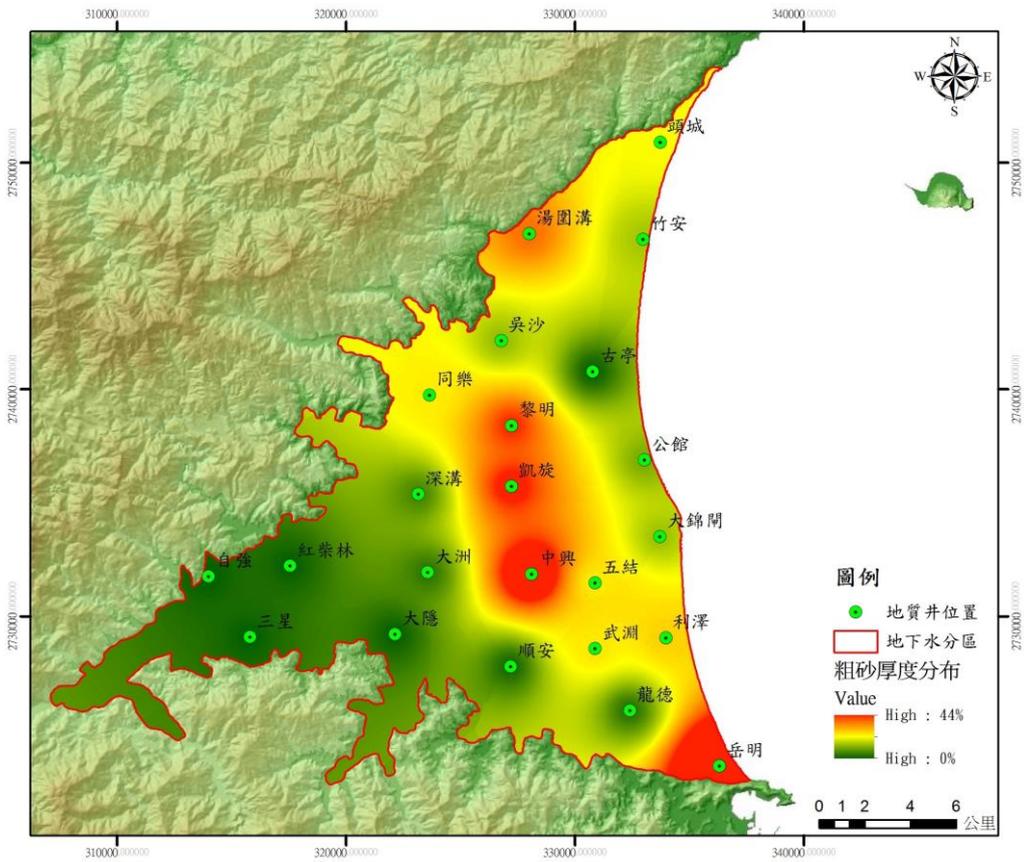


圖 1.2-4 蘭陽平原粗砂厚度分布圖

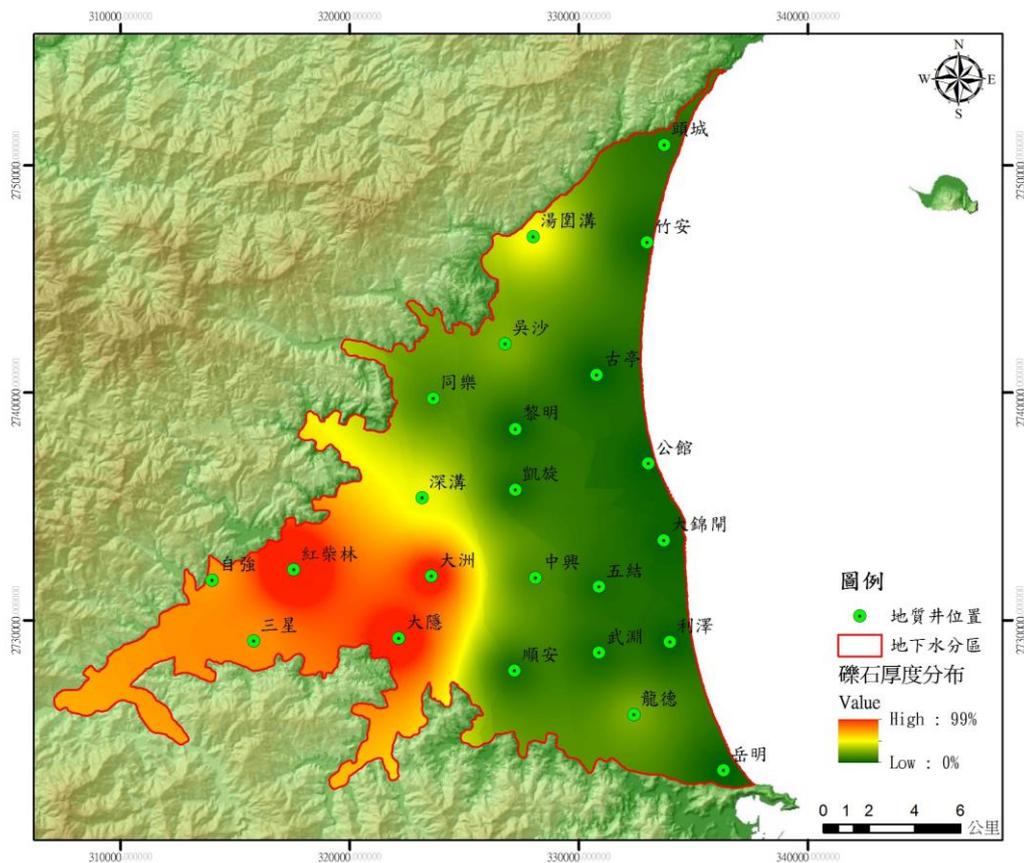


圖 1.2-5 蘭陽平原礫石厚度分布圖

表 1.2-1 蘭陽平原觀測站站址

編號	站名	地址	編號	站名	地址
1	自強國小	宜蘭縣員山鄉中華村冷水路 51 號(內城國小自強分校)	12	宜農	宜蘭縣神農路 1 號(宜蘭技術學院)
2	大隱國小	宜蘭縣三星鄉大隱村大隱路 129 號(大隱國小)	13	礁溪	宜蘭縣礁溪鄉協民段地號 259 號
3	岳明國小	宜蘭縣蘇澳鎮港邊里嶺腳路 140 號(岳明國小)	14	大福	宜蘭縣壯圍鄉大福路 34 號(大福國小)
4	頭城國小	宜蘭縣頭城鎮武營里開蘭路 282 號(頭城國小)	15	同樂	宜蘭縣員山鄉新城路八四之四號同樂國小
5	利澤	宜蘭縣蘇澳鎮自強路 12 號(利澤工業區)	16	吳沙	宜蘭縣礁溪鄉吳沙村育英路七九號 吳沙國中
6	五結國小	宜蘭縣五結鄉五結村國民路 1 號(五結國小)	17	古亭	宜蘭縣壯圍鄉古亭村八一號古亭國小
7	中興	宜蘭縣五結鄉四結村中興路 3 段 67 號(中興國小)	18	公館	宜蘭縣壯圍鄉壯圍運動公園預定地
8	龍德	宜蘭縣蘇澳鎮自強路 13 號(龍德工業區)	19	大洲	宜蘭縣三星鄉大洲路一六二號 大洲國小
9	冬山	宜蘭縣冬山鄉南興村富農路四號(冬山國小)	20	三星	宜蘭縣三星鄉義德街十二號 三星國小
10	內城	宜蘭縣員山鄉內城路 545 號(榮源國中)	21	順安	宜蘭縣冬山鄉永興路二段十七號 順安國小
11	壯圍	宜蘭縣壯圍鄉壯五路(壯圍國小)	22	二龍	宜蘭縣礁溪鄉二龍國小

(四) 觀測井概況

台灣地區地下水觀測網於民國 89 年於蘭陽平原建置觀測井，民國 89-91 年建立觀測站 22 站，分層觀測井 40 口(如表 1.2-2 與圖 1.2-6 所示)。除此之外，本區域尚有地質鑽探井 23 口(如表 1.2-3 與圖 1.2-7 所示)，地質鑽探分布間距約為五公里。觀測站大部份都位於國小校園內，因應當地水文地質情況設置第一到第四層的分層觀測井，詳細的井數、濾管深度位置、建置日期及當時靜水位，則參考水利署(2004)「台灣地區地下水觀測網水質常態監測與調查分析(1/2)」，如表 1.2-2 所示。觀測井的材質主要為不鏽鋼，口徑為直徑六吋，觀測層次最深達 230 公尺(中興)。因為經費及施工用地的限制，觀測井常採兩口共構，例如觀測井(一)與觀測井(三)共孔，或觀測井(二)與觀測井(四)共孔，以一孔置兩觀測井管，不同層中以皂土及黏土封隔，以阻絕不同含水層水位之干擾影響。

表 1.2-2 蘭陽平原觀測井一覽表

編號	井號	站名	濾水管		靜水位 (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	分層
			起點(m)	終點(m)					
1	02030111	岳明(1)	6	27	3.97	335491	2723599	5.09	1-1
2	02080111	冬山(1)	28	49	1.27	329505	2725780	6.47	1-1
3	02080121	冬山(2)	68	86	1.67	329505	2725780	6.47	1-2
4	02030311	龍德(1)	13	37	4.37	331568	2726058	6.80	1-1
5	02030321	龍德(2)	60	78	3.92	331568	2726058	6.80	1-2
6	02030331	龍德(3)	100	118	2.31	331568	2726058	6.80	2-1
7	02030341	龍德(4)	136	151	1.96	331568	2726058	6.80	2-2
8	02080311	順安	15	32	自噴	326363	2727985	8.98	1-1
9	02030211	利澤(1)	16	34	2.33	333141	2729240	4.03	1-1
10	02030221	利澤(2)	158	170	-2.42	333141	2729240	4.03	2
11	02100111	大隱(1)	38	62	9.76	321310	2729412	40.64	1-1
12	02100121	大隱(2)	136	160	4.98	321310	2729412	40.64	1-2
13	02090111	五結(1)	3	15	3.68	330057	2731668	3.89	1-1
14	02090121	五結(2)	29	41	2.78	330057	2731668	3.89	1-1
15	02090131	五結(3)	64	82	2.32	330057	2731668	3.89	1-2
16	02090141	五結(4)	152	176	-3.43	330057	2731668	3.89	2
17	02100211	三星	26	44	32.13	314969	2729321	92.86	1
18	02100311	大洲(1)	25	43	2.03	322731	2732157	17.79	1-1
19	02100321	大洲(2)	102	120	自噴	322731	2732157	17.79	1-2
20	02070211	自強(1)	10	28	29.94	313166	2731959	104.81	1-1
21	02090211	中興(1)	15	45	2.41	327278	2732049	6.23	1-1
22	02090221	中興(2)	100	130	1.13	327278	2732049	6.23	1-2

23	02090231	中興(3)	180	192	-1.75	327278	2732049	6.23	2
24	02090241	中興(4)	224	230	-10.55	327278	2732049	6.23	3
25	02070111	內城	7	49	4.26	318700	2734050	37.29	1-1
26	02060411	公館	24	36	3.38	332212	2737115	3.87	1-1
27	02060211	壯圍(1)	54	72	2.49	329122	2737853	2.00	1-1
28	02060221	壯圍(2)	112	124	1.88	329122	2737853	2.00	1-2
29	02060231	壯圍(3)	162	174	-1	329122	2737853	2.00	2-1
30	02010111	宜農(1)	19.5	34.4	1.64	324620	2738180	6.69	1-1
31	02010121	宜農(2)	109	133	-1.7	324620	2738180	6.69	1-2
32	02070411	同樂	41	50	7.7	322822	2739979	17.07	1-1
33	02050211	吳沙(1)	31	90	3.02	325944	2743274	6.71	1-1
34	02050221	吳沙(2)	138	156	1.54	325944	2743274	6.71	1-2
35	02060311	古亭(1)	31	43	2.86	329932	2741080	2.91	1-1
36	02060321	古亭(2)	100	118	3.77	329932	2741080	2.91	1-2
37	02050311	二龍	23	41	3.19	328104	2744848	2.00	1-1
38	02060111	大福	9	39.5	4.5	331460	2744155	2.62	1-1
39	02050111	礁溪(1)	25	39	3.64	329180	2745890	2.72	1-1
40	02040111	頭城(1)	7	19	4.15	332895	2751096	6.65	1-1

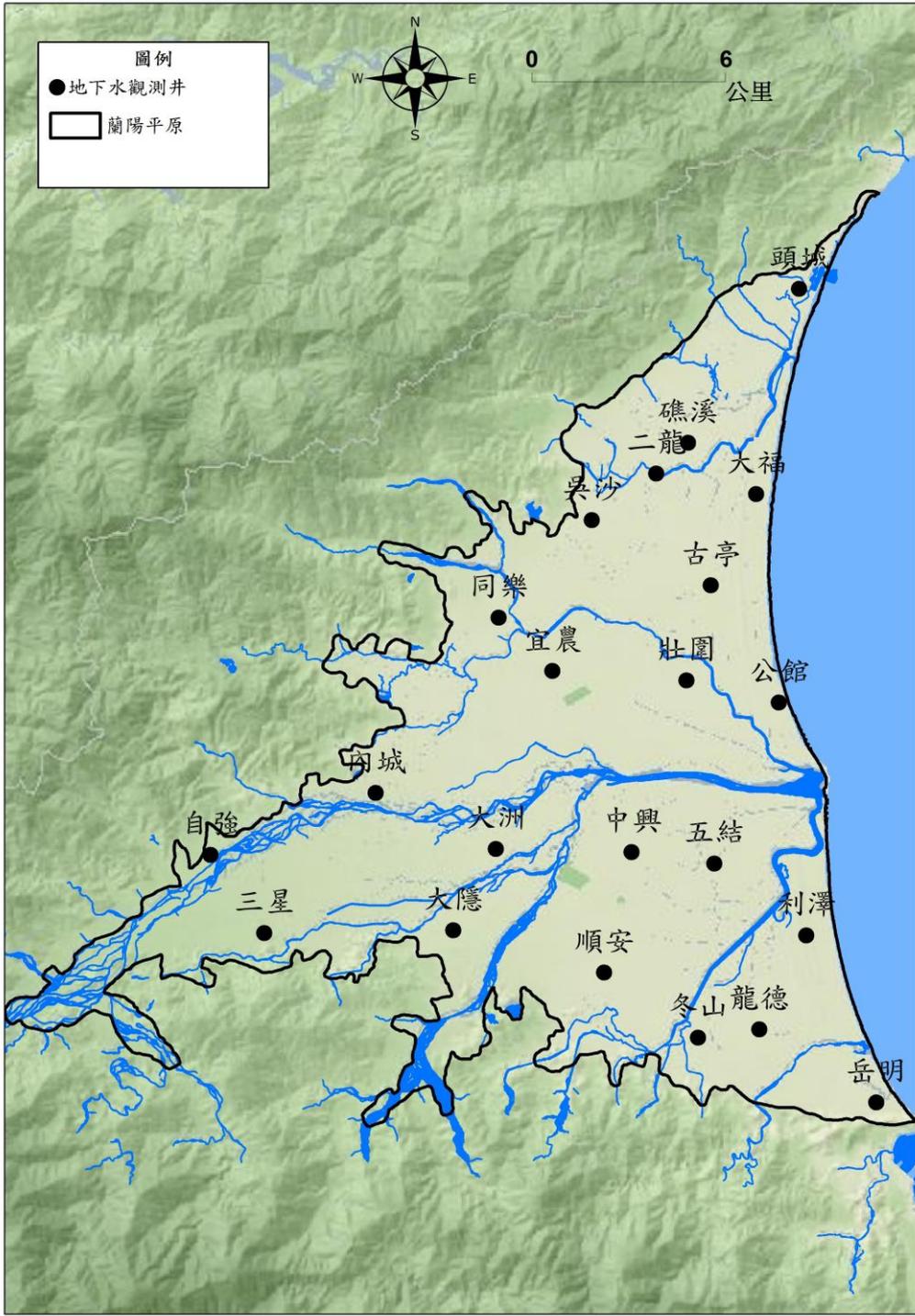


圖 1.2-6 蘭陽平原觀測井位置圖

表 1.2-3 蘭陽平原地質鑽探井一覽表

編號	站名	站址	X 座標	Y 座標
1	凱旋	宜蘭縣宜蘭市凱旋路 8 號(凱旋國小舊址)	326396.274	2735939.873
2	黎明	宜蘭縣宜蘭市校舍路 1 號(黎明國小)	326413.857	2738598.878
3	岳明	宜蘭縣蘇澳鎮港邊里嶺腳路 140 號(岳明國小)	335491.504	2723599.394
4	利澤	宜蘭縣五結鄉季水路 15-3 號	333141.394	2729240.220
5	龍德	宜蘭縣蘇澳鎮自強路 13 號(龍德工業區)	331568.963	2726058.532
6	頭城	宜蘭縣頭城鎮武營里開蘭路 282 號(頭城國小)	332895.690	2751096.650
7	竹安	宜蘭縣頭城鎮竹安里竹安路 278 號(竹安國小斜對面)	332155.416	2746813.077
8	吳沙	宜蘭縣礁溪鄉吳沙村育英路 79 號(吳沙國中)	325945.843	2742344.435
9	湯圍溝	宜蘭縣礁溪鄉德陽路 99 之 11 號(湯圍溝公園)	327171.665	2747062.465
10	古亭	宜蘭縣壯圍鄉古亭村古亭路 81 號(古亭國小)	329950.976	2740986.361
11	公館	宜蘭縣壯圍運動公園預定地(紅葉路與壯濱路交叉口附近)	332210.315	2737091.238
12	自強	宜蘭縣員山鄉中華村冷水路 51 號(勞委會職訓局)	313166.428	2731959.033
13	深溝	宜蘭縣員山鄉深溝村惠民路 266 號(深溝國小)	322338.600	2735579.297
14	同樂	宜蘭縣員山鄉新城路 84 之 4 號(同樂國小)	322814.713	2739950.104
15	順安	宜蘭縣冬山鄉順安村永興路二段 17 號(順安國小)	326363.043	2727985.288
16	武淵	宜蘭縣冬山鄉武淵村富農路二段 350 號(武淵國小)	330057.093	2728775.945
17	五結	宜蘭縣五結鄉五結村國民路 1 號(五結國小)	330057.330	2731668.543
18	中興	宜蘭縣五結鄉四結村中興路三段 67 號(中興國小)	327278.655	2732049.697
19	大錦開	宜蘭縣五結鄉蘭陽溪出海口堤防邊	332885.832	2733709.723
20	大隱	宜蘭縣三星鄉大隱村大埔路 129 號(大隱國小)	321310.426	2729412.187
21	三星	宜蘭縣三星鄉三星路五段 86 號(三星國小)	314969.382	2729280.662
22	紅柴林	宜蘭縣三星鄉紅柴林堤防邊	316733.283	2732419.735
23	大洲	宜蘭縣三星鄉大洲村上將路二段 500 號(大洲國小)	322738.358	2732132.750

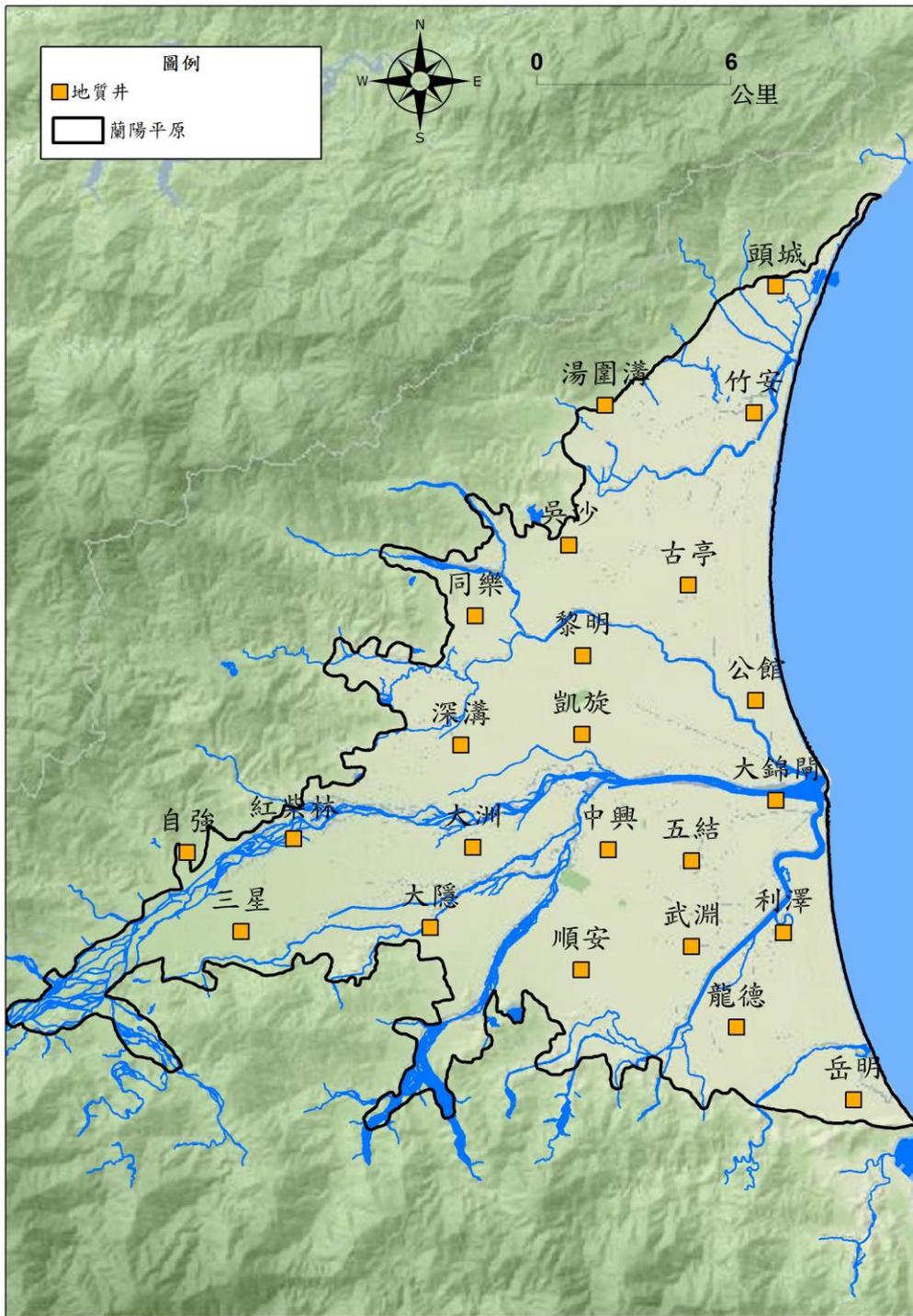


圖 1.2-7 蘭陽平原地質鑽探井位置圖

(五) 水文地質剖面

中央地質調查所之台灣地區地下水觀測網第二期計畫蘭陽平原水文地質架構(2012)，依據岩心鑽探資料、地球化學調查與其他調查結果，繪製六幅水文地質剖面，如圖 1.2-8 至 1.2-13 所示，依序描述蘭陽平原北側、蘭陽溪北岸、蘭

陽溪南岸與蘭陽平原南側共四幅，以及南北向剖面包含扇央平原與扇尾平原兩幅，分別敘述如下：

1. 蘭陽平原北側剖面：主要共同補注區紅柴林以東。共同補注區邊界在紅柴林與深溝之間，深溝以西為非共同補注區。湯圍溝為得子口溪扇。

2. 蘭陽溪北岸剖面：主要共同補注區紅柴林以東。共同補注區邊界在紅柴林與深溝之間。大洲為過共同補注區邊界。深溝以西為非共同補注區。

3. 蘭陽溪南岸剖面：主要共同補注區三星以東。共同補注區邊界在三星與中興之間。大洲為共同補注區邊界。中興以西為非共同補注區。

4. 蘭陽平原南側剖面：主要共同補注區大隱以東。共同補注區邊界在大隱與順安之間。順安以西為非共同補注區。

5. 蘭陽扇央平原剖面：蘭陽溪沖積扇中段，最深部為末次冰期礫石堆積。10000 年左右進入海相泥層，而後隨著沖積扇的向外堆積作用，先逐漸變淺為海岸砂丘環境，最後形成現生的扇尾氾濫平原沉積相。

6. 蘭陽扇尾海岸剖面：較深部以海相地層以及泛濫平原為主，隨著蘭陽溪沖積扇向外加積作用，成為現生交接海岸的海濱砂灘、砂壩或砂丘群。

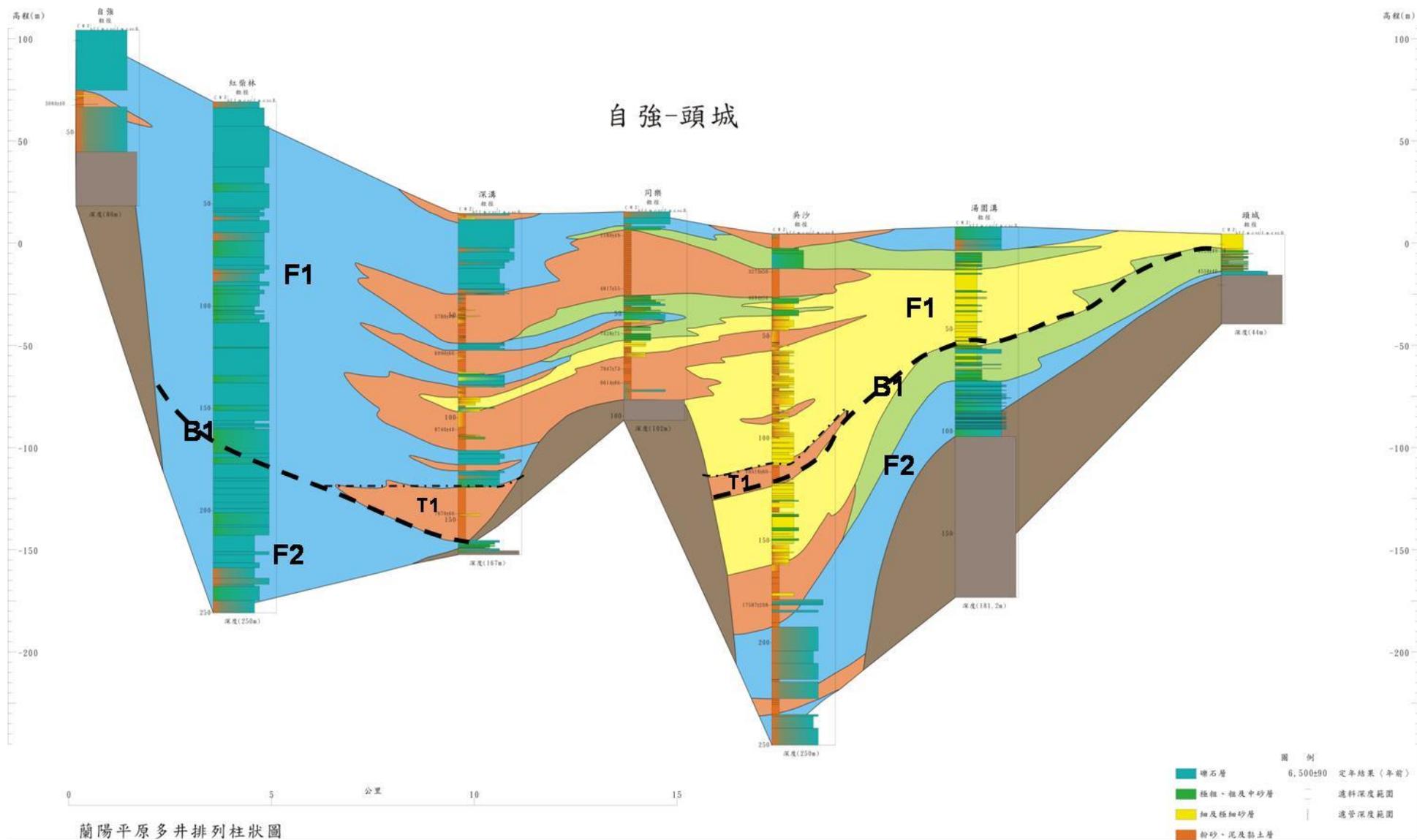


圖 1.2-8 水文地質剖面圖(自強-頭城)

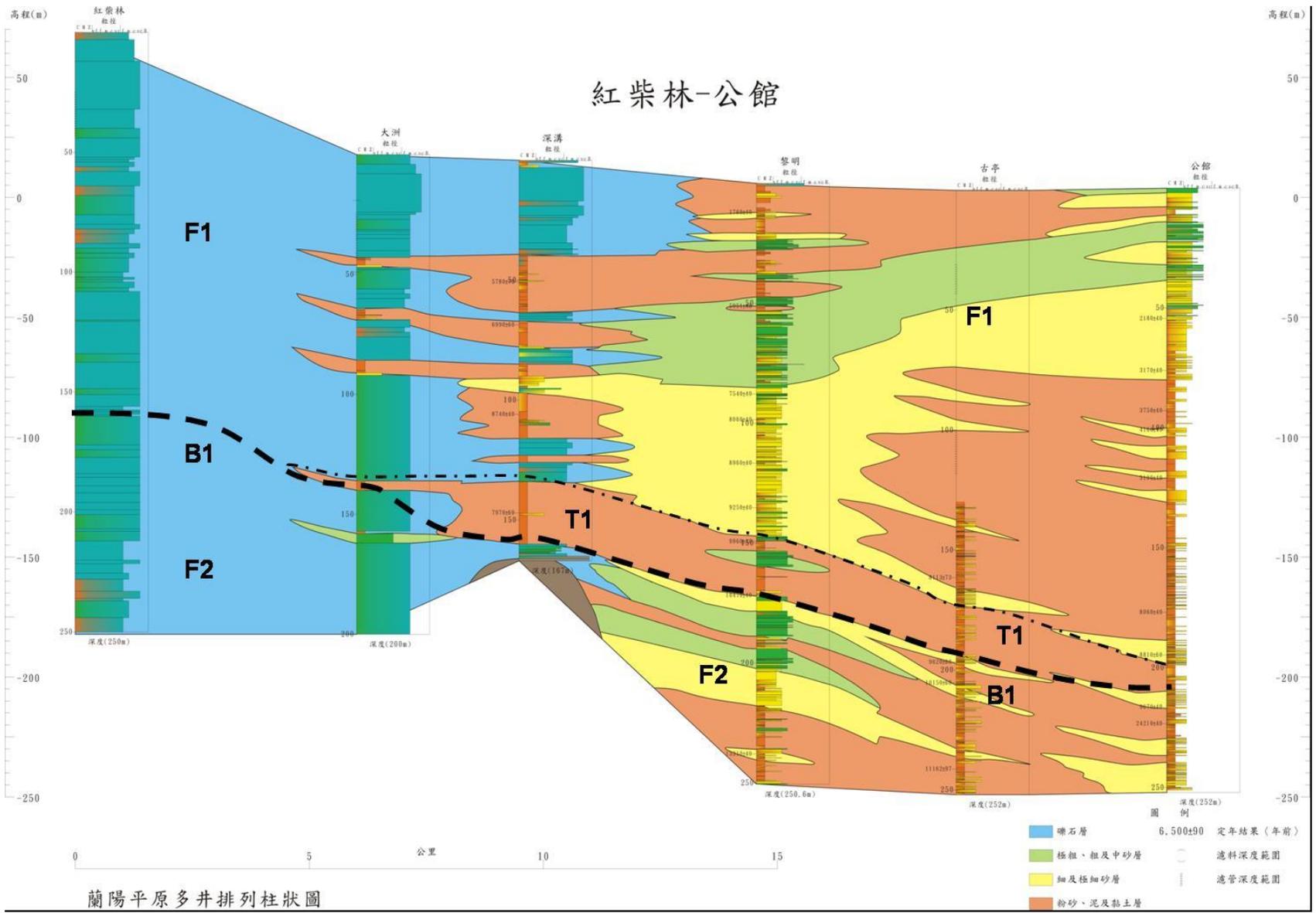


圖 1.2-9 水文地質剖面圖(紅柴林-公館)

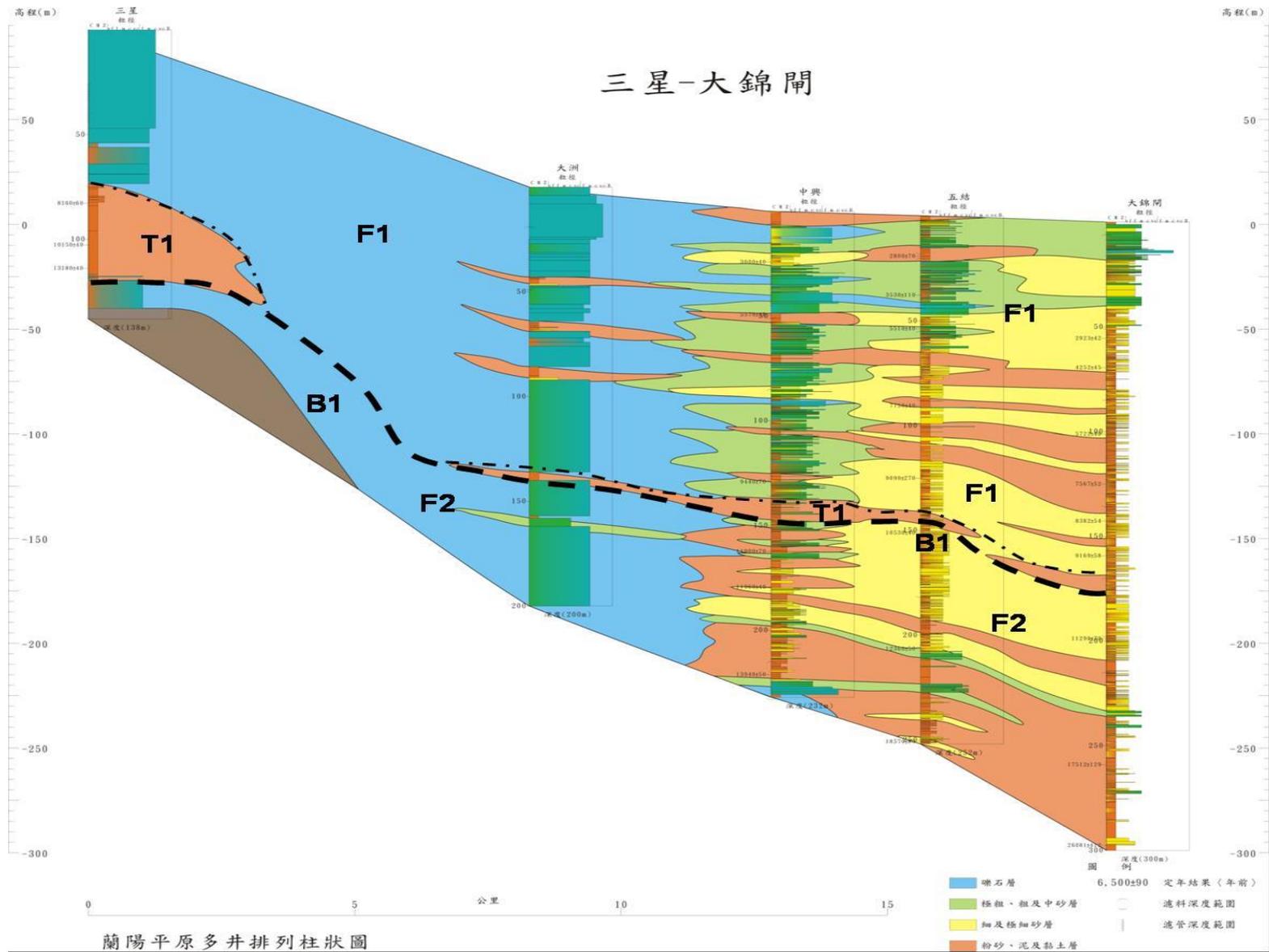


圖 1.2-10 水文地質剖面圖(三星-大錦閘)

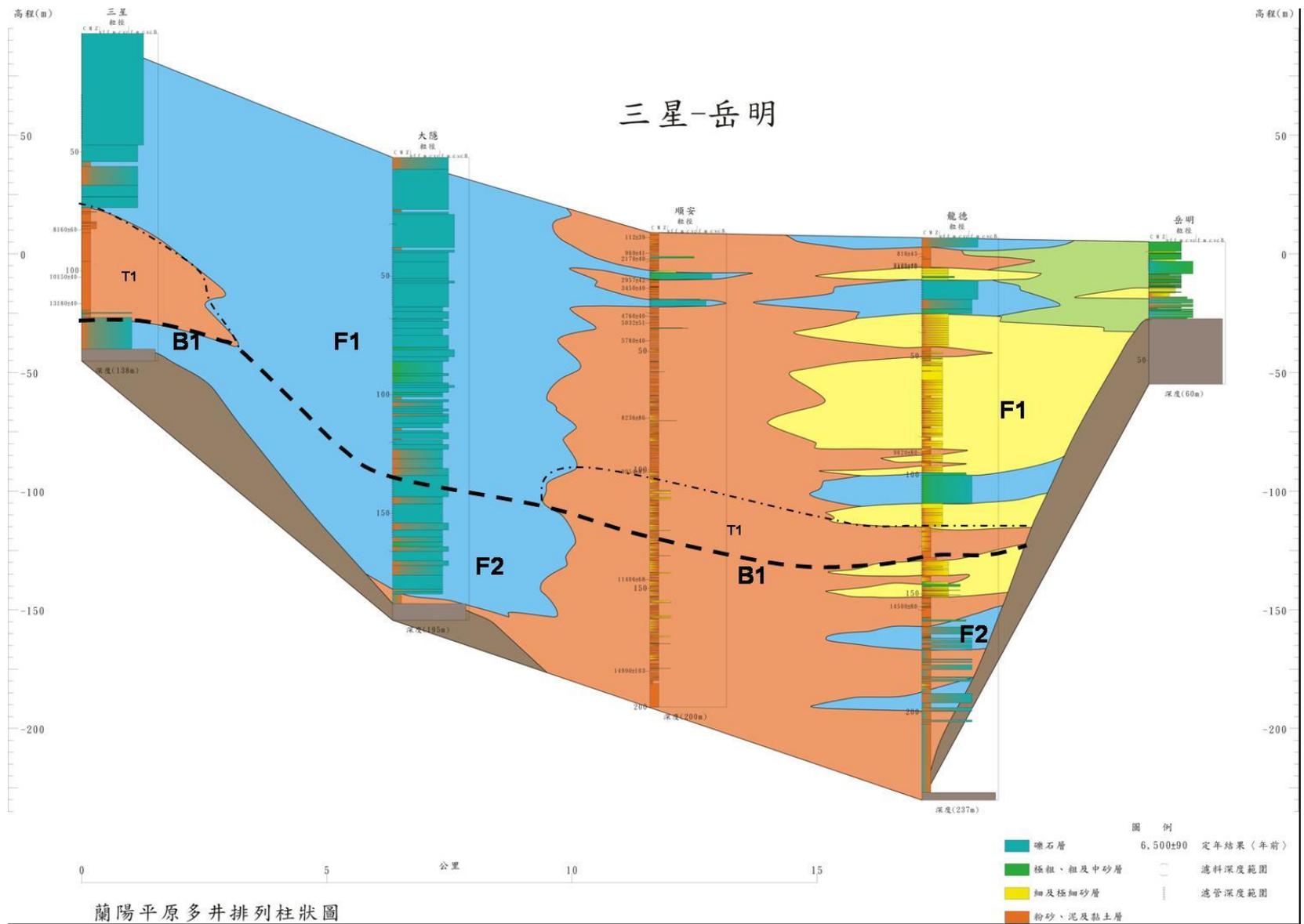


圖 1.2-11 水文地質剖面圖(三星-岳明)

頭城-岳明

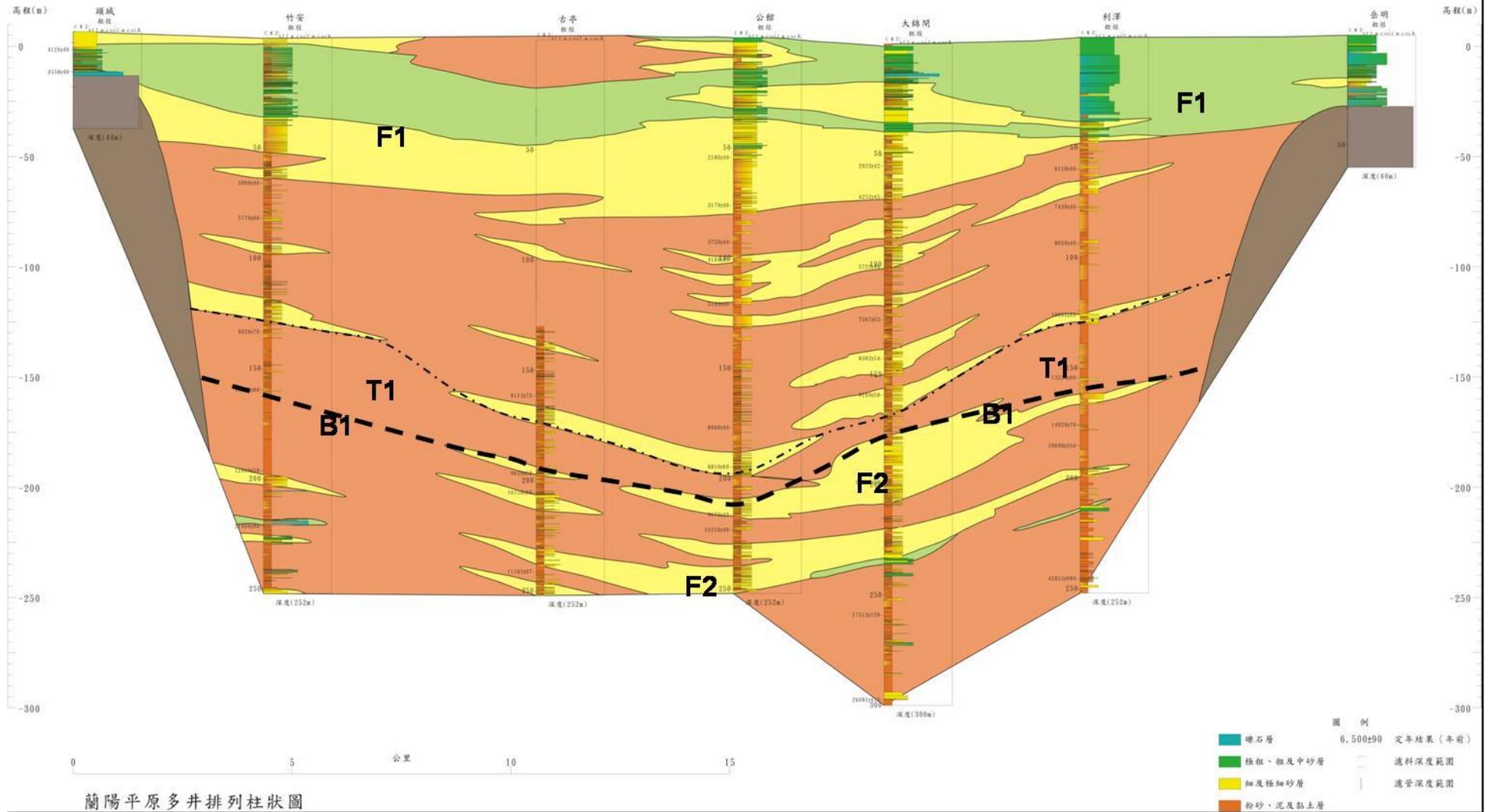


圖 1.2-13 水文地質剖面圖(頭城-岳明)

(六) 水文地質參數

表 1.2-4 為蘭陽平原觀測井之水文地質參數表，在透水係數的部分，以宜農(1)、頭城(1)、礁溪(1)、二龍、大福(1)、公館、同樂、冬山(1)與三星等站透水性較佳，透水係數大於 50(m/day)以上。

表 1.2-4 蘭陽平原水文地質參數列表

井號	井名	儲水係數 (-)	透水係數 (m/min)	井號	井名	儲水係數 (-)	透水係數 (m/min)
02010111	宜農(1)	-	0.0401	02060411	公館	-	0.043
02010121	宜農(2)	-	0.003	02070111	內城	-	2.16
02030111	岳明國小(1)	-	0.003	02070211	自強國小(1)	-	0.0015
02030211	利澤(1)	-	0.0126	02070411	同樂	-	0.0562
02030221	利澤(2)	-	0.0011	02080111	冬山(1)	-	0.1275
02030311	龍德(1)	0.00216	0.024	02080121	冬山(2)	-	0.072
02030321	龍德(2)	0.000521	0.00313	02080311	順安	-	0.031
02030331	龍德(3)	0.000196	0.0126	02090111	五結(1)	-	0.00815
02030341	龍德(4)	0.000428	0.002	02090121	五結(2)	-	0.108
02040111	頭城國小(1)	-	0.0597	02090131	五結(3)	-	0.00197
02050111	礁溪(1)	-	0.047	02090141	五結(4)	-	0.00287
02050211	吳沙(1)	-	0.029	02090211	中興(1)	-	0.00815
02050221	吳沙(2)	-	0.029	02090221	中興(2)	-	0.0299
02050311	二龍	-	0.047	02090231	中興(3)	-	0.0081
02060111	大福國小(1)	-	0.04775	02090241	中興(4)	-	0.01
02060211	壯圍(1)	-	0.592	02100111	大隱(1)	0.00146	0.0243
02060221	壯圍(2)	-	0.0002	02100121	大隱(2)	0.0002	0.0103
02060231	壯圍(3)	-	0.0001	02100211	三星	-	0.0777
02060311	古亭(1)	-	0.0138	02100311	大洲(1)	-	0.0243
02060321	古亭(2)	-	0.000389	02100321	大洲(2)	-	0.104

1.3 計畫工作項目及內容

102(本)年度，主要工作項目及內容概述如下：

(一)彙整歷來水文地質、地下水和水文資料及成果，並加以評估，做為補充調查工作規劃之基礎。

(二)地球物理補充調查：

1.蒐集地球物理探勘資料：整理蘭陽平原現有探勘深度在地下水區岩層基盤以上之近地表地球物理探勘資料，包括淺層震測、深層震測、控源大地電磁方法，對於地下水區沉積層與水文地質層序之結構，提供初步之分析對比資

料，由於資料分散各處，缺乏系統性整理，因此計畫收集所有相關之研究資料重新分析整理，即可對區域水文地質有初步了解。

2.一維地電阻補充調查：進行一維地電阻區域探測工作，蘭陽平原地下水區預計進行約 20 站之大展距(500 公尺)一維地電阻探測工作，預計可達測深約 100-150 公尺左右，期能了解地下水區 100-150 公尺深之水文地質架構情形，並與其它地球物理資料進行比對，檢討地下水補注區可能範圍，作為二維地電阻施測規劃依據。

3.二維地電阻調查與淺層水文地質架構檢討：應用二維地電阻沿蘭陽平原地下水補注區可能範圍附近進行詳查，完成二維地電阻探測，測線總長度至少在 4000 公尺以上，預計可達測深約 50-60 公尺左右，並據以檢討主要補注區範圍與水文地質架構，提供劃定地質敏感區邊界之重要控制點。

4.現地重力量測調查與分析：藉由絕對重力量測儀器，於蘭陽平原主要補注區可能範圍內，選定合適場址，分別在豐枯兩季時量測地球重力場變化，藉由豐枯水季間重力變化，推估研究區域含水層之比出水量 S_y 值(Specific yield)。

(三) 地球化學補充調查

1.地面及地下水水質採樣與分析：針對蘭陽平原進行河流及灌排渠道之水質採樣與分析以了解補注水之水質；地下水之水質採樣與分析以了解地下水之水質及整理歷年地下水之水質數據，分析其區域地下水之地化特性。地下水是否含有溶氧及硝酸鹽，也可作為補注流徑的參考及作為判釋地下水補注區分布範圍之依據。蘭陽平原地下水區預計完成雨水 2 個、地面水 10 個及地下水 40 個調查點的水質分析（項目：溫度、導電度、溶氧、硝酸鹽等 17 項）(如表 1.3-1)。

2.地下水溫度剖面調查：調查蘭陽平原地下水觀測井的溫度剖面，推算地溫梯度，以提供地下水流向變化的瞭解。

3.綜整蘭陽平原水文地質調查資料及蒐集氬濃度分析資料，描述區域性水文地質及水質特性。

表 1.3-1 水質分析項目

	項目		項目		項目		項目
1	導電度	6	鹼度	11	鈣	16	錳
2	溫度	7	氯	12	鎂	17	硫化物
3	pH	8	硫酸根	13	氨氮		
4	氧化還原電位	9	鈉	14	硝氮		
5	溶氧	10	鉀	15	鐵		

(四) 地下水補注區及水平衡評估

1.現有資料蒐集：蒐集蘭陽平原地下水區既有之水文地質調查、地質鑽

探、地下水位、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主要地下水補注區，及建置地下水流數值模式之參考。並將對地下水區之已有地下水位觀測資料進行全面性的校正與補遺。

2. 水文地質資料庫建置與三維水文地質模型建立：建置蘭陽平原地下水區之水文地質資料庫；整合既有之鑽探資料、歷年觀測水位資料、水質資料與水溫剖面等，及新補充調查之二維地電阻與水質結果，概念劃分蘭陽平原之水文地質架構；以前述概念化之水文地質架構，建立出蘭陽平原各種土層之三維數值模型，展現蘭陽平原在不同視角下之二維屏狀水文地質架構；建立水文地質參數之三維空間分布模型。

3. 蘭陽平原地下水補注區劃設：觀察前述建置之三維水文地質模型，劃設蘭陽平原地下水補注區。

4. 蘭陽平原區域地下水資源量評估：以地下水水位歷線法，分析地下水觀測網水位資料，搭配前述水文地質參數之三維空間分布，推估研究區域之水資源蘊藏量變化，以及地下水補注量及抽水量。

5. 蘭陽平原地下水流數值模式建置：以前述之水文地質架構之數值實體模型與參數之三維空間分布為基礎，建立MODFLOW地下水數值模式。並以長期地下水位觀測資料為目標，微調地下水系統完成地下水流數值模式之建置，呈現研究區域之地下水流概況。

6. 主要補注區對區域地下水量與水質之影響分析：以地下水量與水質數值模式為基礎，除了探討主要補注區補注量之變化對區域地下水量之影響外，同時將進一步模擬若主要補區受汙染，則受汙染之地下水長期可能散佈的範圍，綜合此水量與水質分析，可凸顯主要補注區之保育對地下水資源永續經營之重要性。

第二章 國內外相關研究文獻回顧

本計畫乃利用地球物理及地球化學調查，增加對各區域水文地質架構之探討，進而針對地下水補注區進行劃定，並應用如地電阻或重力量測方法推估地質參數，以配合後續之地下水歷線法等數值方法評估地下水補注量及抽水量。

2.1 地下水補注區或管制區劃定相關文獻

(一) 國外相關文獻

國外對於地下水補注區或管制區劃定之相關文獻主要有美國華盛頓州「重要含水層補注區」(Critical Aquifer Recharge Area, CARA)及喬治亞州的「地下水補注區」(Groundwater Recharge Area District, GRAD)，其內容詳述如下。

1. 美國華盛頓州「重要含水層補注區」

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

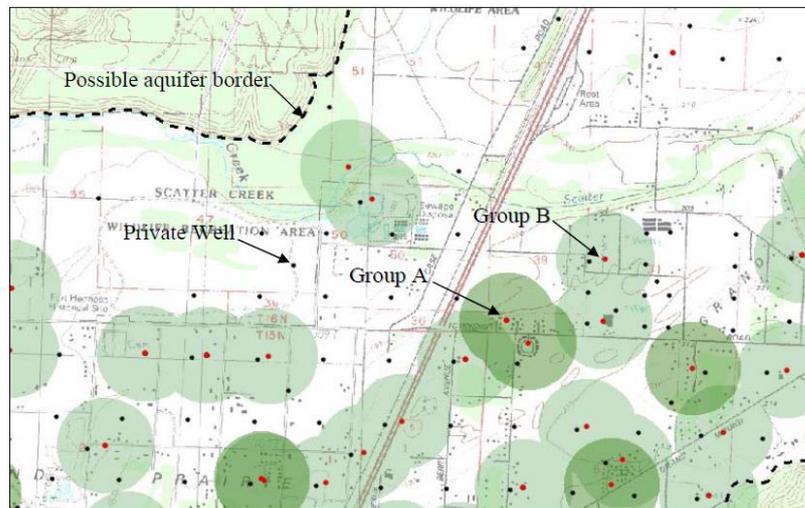


圖 2.1-1 辨別標示出井頭保護帶

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

該含水層及補注區劃設可經由水文地質調查為之。保護標的不只是水質，尚包括補注水量，其措施如禁止混凝土鋪面，以避免減少降雨入滲量。保護優

先次序主要考量使用現況及未來需求，主事者需親自調查該區現有水井，並衡量未來開發需求，以訂出保護優先次序。以下為美國重要地下水資源保護步驟 (Morgan, 2005)：

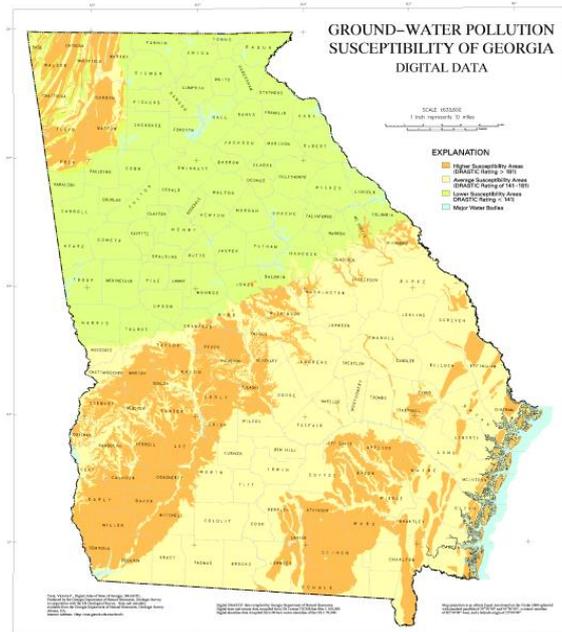


圖 2.1-2 美國 Georgia 州之污染敏感圖及華盛頓州

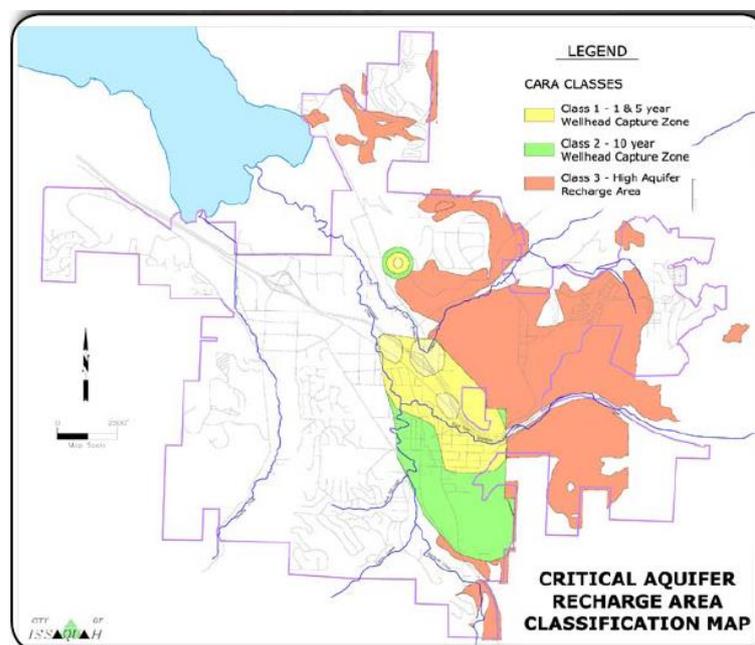


圖 2.1-3 Issaquah 市之重要地下水補注保護區劃設

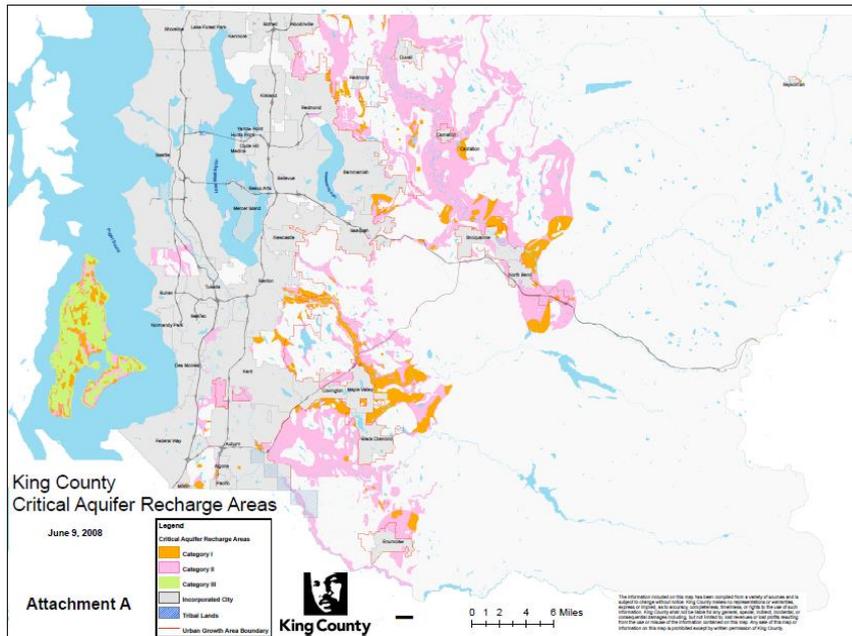


圖 2.1-4 美國華盛頓州 King County 之重要地下水補注保護區劃設

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

(1)辨別 (Identify)：調查何處擁有可用之地下水資源，現今地下水井分布及其使用情形，以及水資源現況與含水層分布。調查後針對飲用水水井，標出井頭保護帶，而井頭保護帶 (Wellhead Protection Zones) 即為一緩衝帶，在該水井為中心之某半徑範圍內設立保護帶。依水井之重要性，以半年、一年、五年、十年的緩衝時間設立保護範圍。其緩衝時間即為保護帶外之污染進入含水層後，移動至水井所需之時間(USEPA, 1989)。如圖 4.1-1 所示，圖中紅點為飲用水水井、綠圈為井頭保護帶。依據美國「安全飲用水法」(SDWA, Safe Drinking Water Act) 規定，需調查飲用水源附近之潛在污染源 (Potential contamination sources)。並將公有井列為第一順位保護，而私有井 (家戶使用) 也加以保護。

(2)污染敏感度 (Susceptibility)：指自然條件是否容易受到污染，例如地下水面、土壤層、含水層、不透水層的分布及水文參數等。區域性的地下水污染敏感圖通常可用 DRASTIC 方法產生，如圖 4.1-2 所示。

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

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

(5)劃設 (Designate) 重要含水層補注保護區：在地圖上明確標示範圍，如：潛在的污染區、含水層範圍及性質、飲用水源水井，並綜合說明劃設此區對飲用水源之重要性。如圖 4.1-3 所示，圖為美國華盛頓州 Issaquah 市之重要地下水補注保護區，將保護區分成三類：第一區為 1-5 年的井頭保護區、第二區為

10 年的井頭保護區、第三區為高補注區。

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

(7)確實執行 (Ensure) 保育管理計畫。

(8)水量管理：除飲用水之抽用，應維持河川基流量，以保護河川生態。

於地方政府的執行層面，其保護區劃設以華盛頓州 King County 為例，如圖 2.1-4 所示，為「重要地下水補注保護區」的分布圖 (King County, 2010)。所有位於第一區及第二區的工商業，持有一定數量以上的危害化學物質，需擬定 BMP (Best Management Practice) 計畫，載明化學物質的清單、處理方法、儲存方法、廢棄方法等 (City of Issaquah, 2009)，以利地下水保護及計畫執行。

2. 喬治亞州的地下水補注區

美國喬治亞州的地下水補注區屬於水資源保護區 (Water Resource Districts) 的一部份。該州的水資源保護區分為四類：地下水補注區、濕地、水源集水區、河流 (Georgia Department of Natural Resources, 2010)。其中地下水補注區的劃設，主要依據喬治亞自然資源部的第 18 號水文圖 (Hydrological Atlas 18, 1989 Edition)，根據圖上的補注範圍，如圖 4.1-5 所示，再依據第 20 號水文圖—地下水污染敏感圖 (Groundwater pollution susceptibility map)，將地下水補注區分成三類：高危險、中危險及低危險。惟此兩幅圖因比例尺太小，實際上地方政府在執行時，有時邊界並不清楚，州政府建議有疑問時 (引起爭議時)，地方政府應尋求專業水文地質師進行補查。

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

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

(2)農業廢棄物掩埋場需有不透水材料襯墊。

(3)社區需設污水道及污水處理設施。

(4)社區若沒有自設污水處理設施，需將污水送至公有污水廠處理。

(5)污水處理若不合規定，不得核發建照。

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

(7)新設污水廠需鋪設不透水材料襯墊。

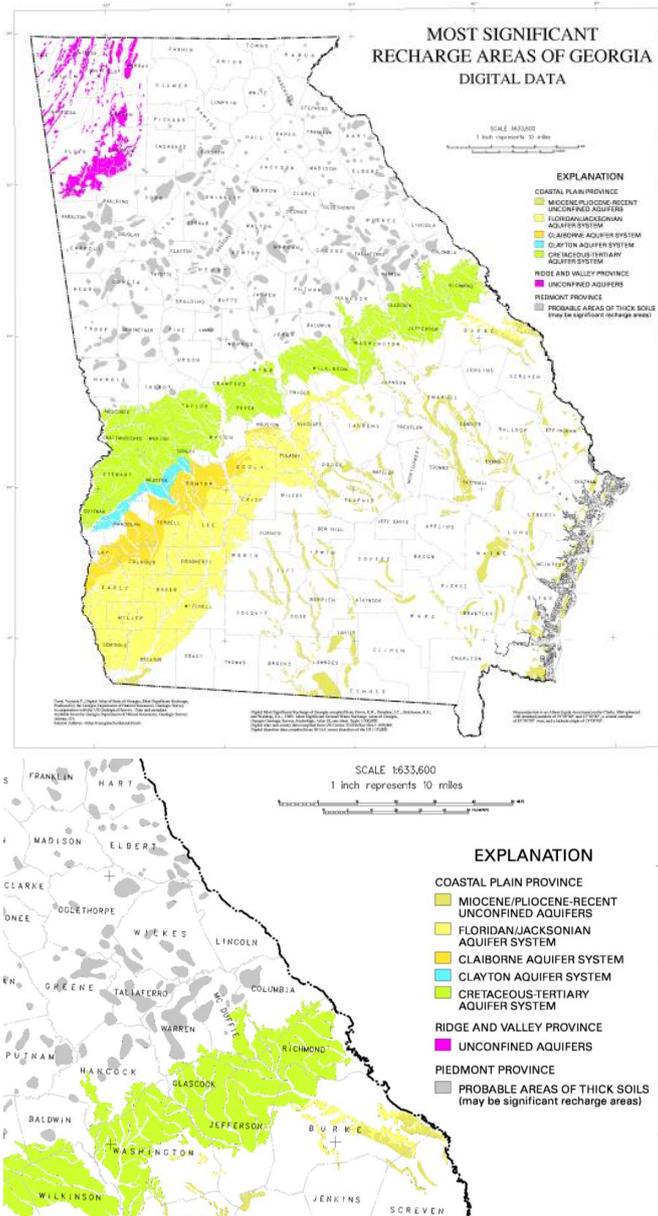


圖 2.1-5 美國喬治亞州的地下水補注區及局部放大圖
 數值圖來源：<http://csat.er.usgs.gov/statewide/layers/recharge.html>

(二) 國內相關文獻

國內在地下水相關補注區或管制區劃定之研究，則有經濟部主辦之「台灣地區地下水觀測網整體計畫」，而在其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，意即該補注區之劃分僅依水文地質構造劃分，並未考量行政區域等因素。江崇榮(江崇榮, 黃智昭, 陳瑞娥, & 費立沅, 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。另外地下水管制區劃分方面，經濟部水利署於民國 94 年 12 月 12 日公佈「地下水管制區劃設作

業規範」，該規範加入行政區域之考量，其劃分地下水管制區邊界之規則如下：

1. 以水利署最新版臺灣地下水資源圖之地下水區為基準，輔以中央地質調查所最新地質圖之主要含水層分布區域及最新版臺灣活動斷層分布圖之斷層位置相關資料，綜合評量得到地下水管制區之檢討線。

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

中央地質調查所於民國 98 年至 101 年主辦之「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計畫」，則透過二維地電阻施測、水質地化調查及鑿井試驗等方法，補充調查基礎資料，搭配補注潛勢分析成果，分別對濁水溪沖積扇及屏東平原評估出重要補注區範圍，並以地下水水位歷線法與地下水流數值模式等分析工具，量化評估進出濁水溪沖積扇及屏東平原地下水系統各種量值，最後應用地下水流與水質模式，分析補注區對整體地下水水量及水質影響。

2.2 地下水資源評估

本計畫整理各地區水文地質參數並配合數值模式，推估蘭陽平原、台北及台中盆地、花東縱谷地區之地下水補注量，其相關的研究如下：

(一) 蘭陽平原

地下水補注量：水資會（民國 72 年）曾推估蘭陽平原地下水補注量為每年 1.20 億噸，能邦公司（民國 89 年）以一維垂向水平衡法估算其值約為每年 3.04 億噸，中興公司（民國 91 年）則以數值模擬估算之補注量約為每年 2.6 億噸。

地下水抽取量：水資會曾於民國 81 年依當時的用水量數據，估算蘭陽平原的地下水抽取量為 1.83 億立方公尺。中興工程顧問公司（民國 91 年）以數值模擬推估之抽水量約為每年 2.1 億噸，大部分用水皆集中於第一含水層抽取，其抽取量佔整個沖積扇九成以上。

(二) 台北盆地

補注量：前水資會（民國 72 年）曾推估為每年 1.5 億立方公尺，能邦公司（民國 89 年）以一維垂向水平衡法估算其值平水年約為 0.51 億立方公尺，而李振誥等（民國 91 年）分析基隆河、新店溪與大漢溪三上游支流對臺北盆地地下水補注貢獻量，推估其年補注量約 1.20 億立方公尺。之後李振誥等（民國 92 年）指出應用數值模式率定出臺北盆地的地下水年補注量約 1.46 億立方公尺。

地下水抽取量：水利署（前水資會）曾於民國 81 年依當時的用水量數據估

算臺北盆地的地下水抽取量為 0.86 億立方公尺，惟自實施地下水管制後，除近盆地周圍地勢較高地區（如溫泉區），近年來已禁止抽取地下水。

（三）台中盆地

補注量：水利署(前水資會)於 72 年曾推估臺中地區地下水補注量為每年 3.79 億噸，能邦公司（民國 89 年）則以一維垂向水平衡法估算其值約為每年 5.55 億噸。

地下水抽取量：水利署(前水資會)於民國 81 年依當時的用水量數據估算臺中地區的地下水抽取量為 3.69 億立方公尺。

（四）花東縱谷地區

補注量：水利署(前水資會)於 72 年曾推估花東縱谷平原地下水補注量為每年 2.50 億噸，能邦公司（民國 89 年）則以一維垂向水平衡法估算其值約為每年 3.52 億噸。

地下水抽取量：地下水抽取量水資會曾於民國 81 年依當時的用水量數據估算花東地區的地下水抽取量為 2.13 億立方公尺。

2.3 水文地質架構建置與相關調查方法

本計畫將藉由綜整各區域之水文地質調查資料及蒐集氡濃度分析資料，用以描述區域性水文地質及水質特性。在蘭陽平原水文地質架構的相關研究中，陳文山(陳文山 et al., 2000)探討沉積物與沉積環境分析及地層對比研究-蘭陽平原；陳文山等人(陳文山 et al., 2004)利用沉降環境的山麓河谷地形特性，探討台北盆地、蘭陽平原與屏東平原鄰近山麓地形與構造的關係；陳文山(2011)探討全新世臺灣古沉積環境變遷-蘭陽平原為例；邱詠恬 (邱詠恬, 2008)利用 GPS 觀測資料探討宜蘭平原之現今地殼變形；康竹君等人(康竹君、張翠玉、李建成, 2008)討論蘭陽平原的構造活動特性；張瑞津等人(張瑞津 et al., 1995)則針對蘭陽地區沖積扇的地形學進行研究；鄭屹君(鄭屹君, 2009)分析蘭陽平原古沉積環境；蘇品如等人(蘇品如、紀宗吉、曾俊傑、黃國榕, 2009)分析宜蘭蘭陽溪下游井下岩心沉積環境；謝孟龍(謝孟龍, 2006)以曾文溪及蘭陽溪平原岩心紀錄的檢視，比較台灣山脈晚冰期及後冰期之侵蝕速率；Liu(Liu, 1995)與 Sibuet (Sibuet, Deffontaines, Hsu, & Thareau, 1998)則探討蘭陽平原與沖繩海槽的關係。

地下水數值模式常被用於地下水資源量之推估，其中透水係數與導水係數為模式之主要輸入參數(Singh, Singh, & Singh, 2005) (Sikandar & Christen, 2012a)，因此參數資料的密度與精度將影響後續之分析結果。然而，傳統上水力參數大都需以抽水試驗等方法求得，而求得之參數值代表範圍僅為有限的局部區域。此外，抽水試驗需搭配鑿井等侵入式作法，成本較高且耗時，因此不

易大量進行，故通常僅能取得有限之水文地質參數資料，水文地質參數在空間密度的不足，將增加地下水系統模擬之不確定性(Soupios, Kouli, Vallianatos, Vafidis, & Stavroulakis, 2007)。為增加水文地質參數之空間密度，本計畫將以地電阻現地量測或重力量測等非侵入式調查，增加水文地質參數之空間密度，分別說明如下：

(一)應用地電阻現地量測方法於地下水管理

由於含水層之水力特性與電學特性，皆與土壤岩性與孔隙構造相關(Kelly, 1977; Mazac et al., 1985; Huntley, 1986; Mazac et al., 1988; Boerner et al., 1996; Christensen and Sorensen, 1998; Rubin and Hubbard, 2005; De Lima et al., 2005; Niwaset al., 2006)，因此地電阻量測結果的變化，亦可呈現水力參數的變化，故本研究以地電阻量測結果為依據，進行水力參數推估，以提高水文地質參數之空間密度。

地表地電阻法原先為石油探勘的技術之一，其原理為藉由電流流經地層，探測地層電阻率之變化，掃描並掌握地下狀態。不少研究將其應用於含水層分佈(external geometry)及其內部構造(internal structure)之調查(Hickin, Kerr, Barchyn, & Paulen, 2009; Hubbard & Rubin, 2000; Mele, Bersezio, & Giudici, 2012; Purvance & Andricevic, 2000; Zarroca, Bach, Linares, & Pellicer, 2011)，例如礫石與砂之電阻率高於泥質地層，因此藉由地電阻量測結果，可釐清地層中礫石與砂之空間分佈(Beresnev, Hruby, & Davis, 2002; Danielsen, Dahlin, Owen, Mangeya, & Auken, 2007; Ortega, Benito-Calvo, Porres, Pérez-González, & Martín Merino, 2010; Taheri Tizro, Voudouris, & Basami, 2012)。近幾十年來，地表地電阻法更進一步地被應用於水文地質參數之推估(Mele et al., 2012; Park & Dickey, 1989; Sikandar & Christen, 2012a; Soupios et al., 2007)。

Archie (Archie, 1942)最早提出方程式來描述土體導電度、地下水導電度與土壤結構關係，其可適用於不含泥之飽和含水層，該方程式描述土體導電度、地下水導電度與地層結構因子(Formation factor)呈線性關係。此方程式常被應用於地下水位之探測及鑿井位置選取(Stephen K. P. and Stephen K. D., 1989)。然而，在實際含水層中，因土壤分佈為高度異質性，可能包含礫、砂、泥及混合之泥質砂岩或黏土砂等，因此該公式無法廣泛地應用於大多數之區域(De Lima & Niwas, 2000; Soupios et al., 2007)。由於泥質土壤本身亦導電，因此流經含泥地層時，地下水系統中的孔隙水與泥質材質，將為兩條並聯之導電路徑(Mele et al., 2012; Vinegar & Waxman, 1984)，後續研究將泥質導電路徑納入考量，擴充 Archie 方程式(Clavier, Coates, & Dumanoir, 1984; Sen, Goode, & Sibbit, 1988; Vinegar & Waxman, 1984; Waxman & Smits, 1968; Worthington, 1993)。前述 Archie 方程式與擴充型方程式，首先皆需推求地層結構因子(Formation factor)，

此因子為孔隙率、膠結係數及撓曲係數之指數函數，因此須先求得孔隙率才能得到地層結構因子。然而，並非所有研究區域皆有孔隙率資料，因此部分研究先忽略泥之影響，並以簡單的統計方法推求地層結構因子，如 Stephen and Stephen (1989)以地下水導電度為自變數，以土體導電度為應變數進行線性迴歸，而該迴歸式之斜率即為地層結構因子之倒數；Niwas (Niwas, Tezkan, & Israil, 2011)與 Tizro(Taheri Tizro et al., 2012)亦忽略泥的影響，以地下水電阻值與土體地電阻值之比值作為地層結構因子，再由文獻資料歸納出該研究區域特性之膠結係數，推估孔隙率。Chukwudi(2010)與 Sikandar and Christen (Sikandar & Christen, 2012a)亦以相同作法推估地層因子，再將各點之地層結構因子與透水係數迴歸求得關係式，因此之後僅需求得地層結構因子即可求得透水係數。Soupios (Soupios et al., 2007)以相同作法推估地層因子，再以地層因子倒數對地下水電阻值進行線性迴歸，並將其截距定義為內部地層因子 (intrinsic formation factor)，再以此推估孔隙率，之後將孔隙率代入 Kozeny-Carman-Bear equation (Domenico & Schwartz, 1990)推求透水係數。然而前述文獻資料除了 Stephen and Stephen (1989)外，其餘之相關文獻皆忽略泥之影響，因此其地層結構因子將屬高估情況，而導致後續孔隙率與透水係數推估存在不確定性。前述文獻資料大都為實驗尺度或現地尺度之研究，甚少研究探討流域尺度之水力參數，有鑑於此，本計畫將考量泥之影響，發展流域尺度之水力參數推估方法並將其應用於四年之研究區域中。

(二)應用重力量測推估參數

重力場的時空變化受到許多機制的影響，包含潮汐、大氣壓力、地層變形與地下水的水文變化，當地下水體水量增減的多寡，將影響鄰近區域的重力場。Hasan(Hasan, Troch, Boll, & Kroner, 2006)於防空洞內應用超導重力儀，量測重力場之時序變化，該研究指出重力殘差變化，與飽和水位、未飽和含水量及降雨量具有高度相關，其中又未飽和含水量相關性最高。

除此之外，國外亦以重力量測應用於比出水量(S_y)之推估，Pool and Eychaner (1995)於美國亞利桑納州，於1991年2月至1993年3月共5個時間點量測重力值，比較重力變化與地下水位變化，推估區域之比出水量，其值介於0.168~0.213之間。USGS (1997)亦在美國亞利桑納州進行重力量測，於1992年12月至1994年1月共5個時間點量測重力值，該研究指出若岩性為河道沉積物，比出水量介於0.15~0.34之間；若岩性較為膠結，比出水量介於0.07~0.18之間。USGS (2003)於美國加州進行現地注水試驗，以重力變化與水位變化，分析注水造成之水位影響，該區域比出水量約為0.13，單場注水可使得重力增加66(micro-gals)。Christiansen 等人(2011)在研究區域同時量測地下水位與重力場的時空變化，同時藉由兩種觀測資料，建立系統之參數檢定。該研究指出，

相對於傳統僅以地下水位進行參數檢定，同時考量重力資訊可使參數檢定結果更敏感與準確。由前述文獻可知，應用重力量測資料推估比出水量為一可行之方法，本計畫將參考前述文獻，應用重力量測資料配合地下水數流值模式進行比出水量之推估。

第三章 資料蒐集及檢核

3.1 研究資料蒐集

為了對蘭陽平原進行補注區劃設及補注量推估，本計畫蒐集蘭陽平原各項資料，如地下水位、雨量、儲水係數、透水係數及 GIS 圖層等相關資料，詳述如下。

(一) 地下水位、導水係數及透水係數資料

本計畫自蘭陽平原地下水觀測井建置及相關試驗報告中，蒐集位於含水層一(F1)、含水層二(F2)深度內地下水觀測井共 40 站之導水係數、透水係數、濾水管位置等資料，並由經濟部水利署水文水資源資料管理供應系統取得各井每日地下水位資料，整理如表 3.1-1、3.1-2 與 3.1-3 所示。其各井空間分佈圖如圖 3.1-1 與 3.1-2 所示。

表 3.1-1 含水層一(F1)地下水觀測井資料列表

井名	TMX	TMY	T(m ² /min)	K(m/min)	蒐集資料區段
宜農(1)	324620	2738165	0.6155	4.13E-02	2000~2012
宜農(2)	324620	2738165	0.0721	3.00E-03	2000~2012
岳明國小(1)	335500	2723634	0.036	3.00E-03	2000~2012
利澤(1)	333200	2729300	0.2274	1.26E-02	2000~2012
龍德(1)	332000	2725800	0.577	2.40E-02	2000~2012
龍德(2)	332000	2725800	0.0563	3.13E-03	2000~2012
頭城國小(1)	332900	2751100	0.7261	5.97E-02	2000~2012
礁溪(1)	329180	2745890	0.4	3.01E-02	2000~2012
吳沙(1)	325944	2742374	0.493	8.36E-03	2004~2012
吳沙(2)	325944	2742374	0.028	1.56E-03	2004~2012
二龍	328104	2744848	0.421	2.34E-02	2004~2012
大福國小(1)	331460	2744155	1.1461	3.76E-02	2000~2012
壯圍(1)	329122	2737853	0.3454	5.92E-01	2000~2012
壯圍(2)	329122	2737853	0.0043	1.36E-02	2000~2012
古亭(1)	329932	2741080	0.799	6.66E-02	2004~2012
古亭(2)	329932	2741080	0.007	3.89E-04	2004~2012
公館	332212	2737115	0.396	3.30E-02	2004~2012
內城	318685	2734452	2.9208	6.32E-02	2000~2012
自強國小(1)	313700	2732700	0.0264	1.47E-03	2000~2012
同樂	322822	2739979	0.175	1.94E-02	2004~2012
冬山(1)	329500	2725778	1.53	1.28E-01	2000~2012
冬山(2)	329500	2725778	1.4358	6.70E-02	2000~2012
順安	326363	2727985	0.0145	8.53E-04	2004~2012

表 3.1-1 含水層一(F1)地下水觀測井資料列表(續)

井名	TMX	TMY	T(m ² /min)	K(m/min)	蒐集資料區段
五結(1)	330000	2731600	1.6561	1.38E-01	2000~2012
五結(2)	330000	2731600	1.2975	1.08E-01	2000~2012
五結(3)	330000	2731600	0.0355	1.97E-03	2000~2012
中興(1)	327300	2732000	1.2903	4.30E-02	2000~2012
中興(2)	327300	2732000	0.8998	2.99E-02	2000~2012
中興(4)	327300	2732000	0.0603	1.01E-02	2000~2012
大隱(1)	321300	2729300	0.608	2.43E-02	2000~2012
大隱(2)	321300	2729300	0.2479	1.03E-02	2000~2012
三星	314970	2729321	0.658	3.66E-02	2004~2012
大洲(1)	322731	2732157	2.8	1.56E-01	2004~2012
大洲(2)	322731	2732157	1.88	1.04E-01	2004~2012

表 3.1-2 含水層二(F2)地下水觀測井資料列表

井名	TMX	TMY	T(m ² /min)	K(m/min)	蒐集資料區段
龍德(3)	332000	2725800	0.227	1.26E-02	2000~2013
龍德(4)	332000	2725800	0.0243	2.03E-03	2000~2013
利澤(2)	333200	2729300	0.0128	1.07E-03	2000~2013
五結(4)	330000	2731600	0.0688	2.87E-03	2000~2013
中興(3)	327300	2732000	0.0978	8.15E-03	2000~2013
壯圍(3)	329122	2737853	0.0001	8.68E-06	2000~2013

表 3.1-3 地下水觀測井濾水管位置列表

井名	井頂高程	濾水管位置
宜農(1)	6.6 公尺	井頂下 20.4 公尺至 35.5 公尺
宜農(2)	8.4 公尺	井頂下 110 公尺至 134 公尺
岳明國小(1)	5.1 公尺	井頂下 6.8 至 12.8 公尺、22 至 28 公尺
利澤(1)	4.0 公尺	井頂下 16.8 公尺至 34.8 公尺
利澤(2)	4.0 公尺	井頂下 159.5 公尺至 171.5 公尺
龍德(1)	6.6 公尺	井頂下 14.2 公尺至 38.2 公尺
龍德(2)	6.6 公尺	井頂下 60.8 公尺至 78.8 公尺
龍德(3)	6.6 公尺	井頂下 101.2 公尺至 119.4 公尺
龍德(4)	6.6 公尺	井頂下 137.4 至 143.4 公尺、146.5 至 152 公尺
頭城國小(1)	6.3 公尺	井頂下 8 公尺至 20 公尺
礁溪(1)	1.7 公尺	井頂下 28.2 公尺至 40.2 公尺
吳沙(1)	6.3 公尺	井頂下 31.1 至 49.1 公尺、78.2 至 90.2 公尺
吳沙(2)	6.3 公尺	井頂下 139.0 公尺至 157.1 公尺
二龍	3.5 公尺	井頂下 23.7 公尺至 41.7 公尺
大福國小(1)	2.6 公尺	井頂下 12 公尺至 36 公尺
壯圍(1)	3.7 公尺	井頂下 55 公尺至 73 公尺
壯圍(2)	3.7 公尺	井頂下 113.2 公尺至 125.2 公尺

表 3.1-3 地下水觀測井濾水管位置列表 (續)

井名	井頂高程	濾水管位置
壯圍(3)	3.7 公尺	井頂下 163.4 公尺至 175.4 公尺
古亭(1)	2.7 公尺	井頂下 31.8 公尺至 43.8 公尺
古亭(2)	2.7 公尺	井頂下 100 公尺至 118 公尺
自強國小(1)	104.6 公尺	井頂下 11.1 公尺至 28.1 公尺
同樂	16.5 公尺	井頂下 41.5 公尺至 50.5 公尺
冬山(1)	6.4 公尺	井頂下 31.2 公尺至 49.2 公尺
冬山(2)	6.4 公尺	井頂下 71.4 公尺至 88.7 公尺
順安	11.1 公尺	井頂下 16.3 至 22.4 公尺、27.4 公尺至 33.4 公尺
五結(1)	3.9 公尺	井頂下 3.3 公尺至 15.4 公尺
五結(2)	3.9 公尺	井頂下 29.7 公尺至 41.7 公尺
五結(3)	3.9 公尺	井頂下 65.3 公尺至 83.4 公尺
五結(4)	3.9 公尺	井頂下 153.3 公尺至 177.4 公尺
中興(1)	6.3 公尺	井頂下 16.3 公尺至 46.3 公尺
中興(2)	6.3 公尺	井頂下 101.5 公尺至 132.5 公尺
中興(3)	6.4 公尺	井頂下 181.3 公尺至 193.4 公尺
中興(4)	6.4 公尺	井頂下 225.6 公尺至 231.6 公尺
大隱(1)	40.3 公尺	井頂下 38 公尺至 62 公尺
大隱(2)	40.3 公尺	井頂下 136.3 公尺至 160.3 公尺
三星	92.3 公尺	井頂下 25.3 公尺至 43.3 公尺
大洲(1)	18.2 公尺	井頂下 26 公尺至 44 公尺
大洲(2)	18.3 公尺	井頂下 102 公尺至 120 公尺

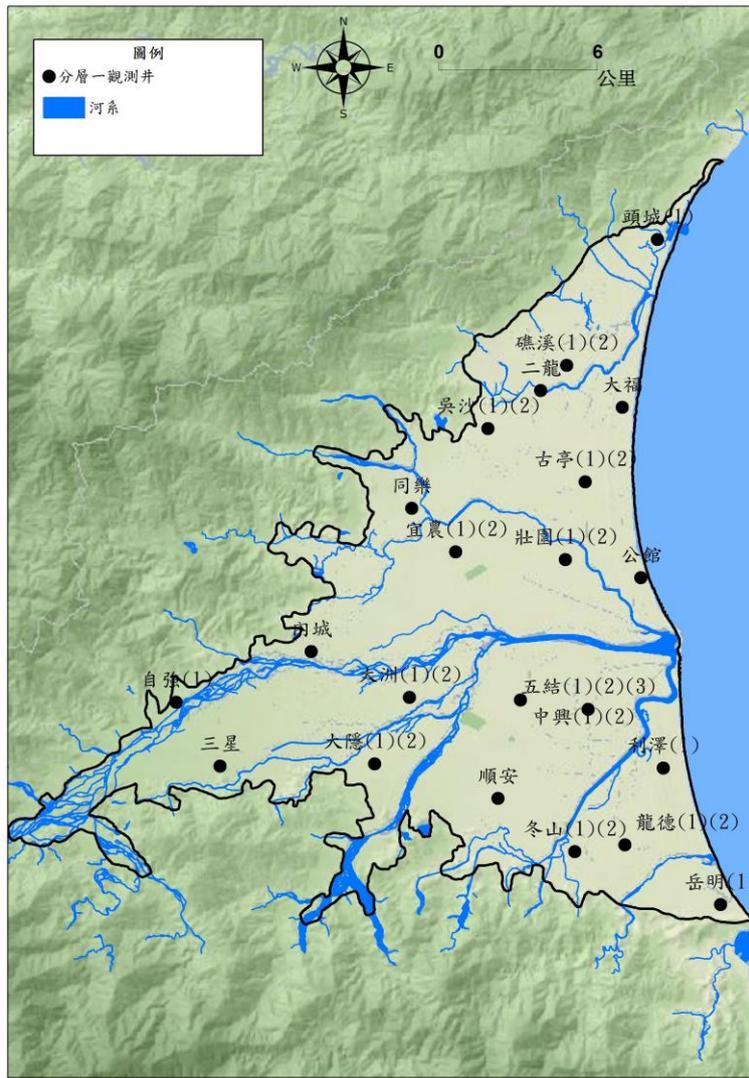


圖 3.1-1 含水層一(F1)34 口地下水觀測井分布圖



圖 3.1-2 含水層二(F2)6 口地下水觀測井分布圖

(二) 儲水係數資料

經濟部水利署於蘭陽平原分別於龍德與大隱進行複井抽水試驗，以取得儲水係數之實測值，不同分層合計共 6 站，如表 3.1-4 所示。

表 3.1-4 蘭陽平原複井抽水試驗實測儲水係數

井名	TMX	TMY	儲水係數
龍德(1)	324620	2738180	0.00216
龍德(2)	333200	2729300	0.000521
龍德(3)	332000	2725800	0.000196
龍德(4)	332000	2725800	0.000428
大隱(1)	321300	2729300	0.00146
大隱(2)	332900	2751100	0.0002

(三) 雨量資料

中央氣象局及經濟部水利署分別於蘭陽平原及上游山區設有大量雨量站，可提供研究區域詳細之降雨資料。可區分為蘭陽平原與鄰近山區，以及偏遠山區兩種，由於偏遠山區已偏離蘭陽平原較遠，故僅採蘭陽平原中與鄰近山區之資料。

中央氣象局所屬雨量站合計共 24 站，採用資料共 11 站，如表 3.1-5 所示；此外，經濟部水利署共計 16 站，採用資料共 8 站，如表 3.1-6 所示，其相關位置如圖 3.1-3、3.1-4 所示。

表 3.1-5 蘭陽平原雨量站資訊 (中央氣象局部分)

站名	TMX	TMY	蒐集資料區段
宜蘭	324822	2740221	2004~2012
頭城	330664	2750039	2004~2012
礁溪	325912	2746289	2004~2012
壯圍	328206	2738024	2004~2012
再連	317067	2734797	2004~2012
羅東	324112	2731295	2004~2012
三星	314561	2729862	2004~2012
寒溪	320879	2725862	2004~2012
冬山	328669	2725690	2004~2012
新寮	324399	2724927	2004~2012
五結	329136	2731735	2010~2012

表 3.1-6 蘭陽平原雨量站資訊 (經濟部水利署部分)

站名	縣市	TMX	TMY	蒐集資料區間
梵梵(2)	宜蘭縣	302481	2723084	2004~2012
新寮(1)	宜蘭縣	325314	2724656	2004~2012
冬山	宜蘭縣	328554	2725850	2004~2012
新北城	宜蘭縣	324962	2730838	2004~2012
五峰	宜蘭縣	324721	2747542	2004~2012
太平山(1)	宜蘭縣	303537	2710100	2004~2012
清水	宜蘭縣	314439	2722915	2007~2012
吉林國小	新北市	338782.4	2764691	2004~2012

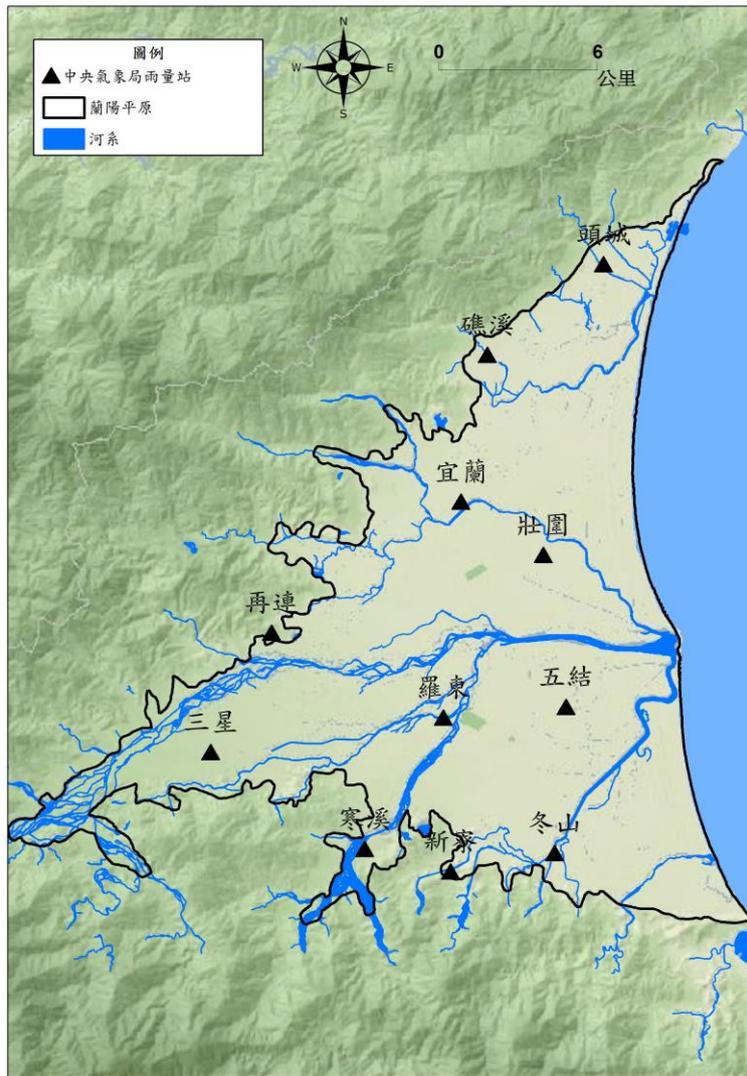


圖 3.1-3 中央氣象局雨量站位置圖



圖 3.1-4 水利署雨量站位置圖

(四) GIS 圖層資料

蘭陽平原之地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)圖資有助於理解現地地下水特徵，蒐集圖資來源如表 3.1-7 所示。

表 3.1-7 本計畫蒐集圖資資訊

圖層	圖資來源	數據來源
土地利用	內政部國土測繪中心(2007 年)	內政部國土測繪中心(2007 年)
表層土壤種類	行政院農業委員會農業試驗所(1997 年)	行政院農業委員會農業試驗所(1997 年)
平均年降雨量	本計畫製作	中央氣象局、經濟部水利署

圖層	圖資來源	數據來源
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-蘭陽平原地下水觀測井建置及相關試驗報告
河系密度	經濟部水利署	經濟部水利署
硝酸鹽濃度	本計畫製作	經濟部水利署

3.2 地下水位資料補遺與校正

3.2.1 地下水位資料缺漏及補遺

由於蘭陽平原之地下水觀測網建置期程較晚，故約有 11 口觀測站於 2003 年底才建置完成，為確保資料分析之一致性，故分析年份規劃為 2004 至 2012 年。

本計畫提出一地下水位補遺之標準作業程序，如圖 3.2-1 所示，以下將針對各步驟進行詳細說明。

首先在進行資料補遺前，需先了解資料缺漏狀況，表 3.2-1 依據扇頂、扇央和扇尾位置分別區分地下水資料之各年缺漏百分比。表 3.2-2 則詳細列出各站之缺漏時段。

本計畫進一步將各井缺漏資料時間以年代分佈圖呈現，如圖 3.2-2 所示，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時段。

下一個步驟為篩選可補遺時段。本計畫對水位缺漏之觀測井進行補遺時，主要參考依據為鄰近井(可為同站不同層或鄰近觀測井)之地下水位，因此若水位缺漏井與其鄰近井皆於同一時段缺漏水位時，便無法進行補遺，故需篩選可進行補遺的時段。本計畫分析各觀測井之缺漏時間，在交叉比對後發現並無集體統一缺漏時段，故本計畫將針對 2004 至 2012 年所有觀測井水位進行補遺。

第三個步驟為判斷水位缺漏天數是否超過十天。本計畫以水位缺漏天數 10 天作為選取水位補遺方法之門檻，若缺漏天數小於 10 天以內屬於較短的資料缺漏，故本計畫假設缺漏期間水位變化不大，直接以線性內插進行補遺。以同樂站為例，圖 3.2-3(a)中，紅色圓圈註記部分代表水位缺漏時段，因其缺漏天數小於 10 天，因此直接以缺漏時段之兩端點進行線性內差補遺，補遺後之水位如圖 3.2-3(b)所示。如果水位缺漏天數超過 10 天，則需參考鄰近井之觀測水位進行補遺，補遺方法詳見步驟四至步驟六。

步驟四為建立待補遺站井與鄰近井之地下水位相關性。進行此步驟前需先

檢視鄰近井之水位資料是否有異常值，若有，則需先剔除異常資料點，如圖 3.2-4 五結(3)所示。接著計算所有鄰近井與待補遺站井之地下水位相關係數，藉由相關係數找出水位變化最相近之觀測井，各觀測井與其鄰近井之相關係數如表 3.2-3 所示。

步驟五則為建立待補遺站井與水位最相關的鄰近井之水位回歸式。透過步驟四找出水位相關性最高之鄰近井後，本計畫建立此兩站井之水位迴歸方程式，再將鄰近井之水位代入回歸方程式，求得待補遺站井缺漏時段之水位；水位回歸式如式 3.2-1 所示。

$$x_j^t = a_i^j x_i^t + b_i^j \dots\dots\dots(式 3.2-1)$$

式中 x_j^t 代表第 j 口觀測井於 t 時刻之觀測水位， x_i^t 代表第 i 口觀測井於相同時刻之觀測水位， 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。

步驟六為確認補遺後之水位與原始水位連結是否平滑。若發現線性迴歸補遺後之水位歷線不平滑，則取缺漏區間兩端點之推估水位與原始水位之差值平均，再依此差值將推估水位平移，使得水位歷線不會有驟升或驟降的情況產生。本計畫以吳沙(1)為例，圖 3.2-5(a)顯示吳沙(1)為線性迴歸補遺後之水位歷線，紅色圓圈部分為補遺段，可發現補遺段左端點的水位與原始水位有一差值約 0.33 公尺，而補遺段右端點的水位與原始水位亦有一差值約 0.43 公尺，使得該區段兩端點與原始水位連結處產生不平滑的情況，計算此兩端點之水位差值平均，約為 0.38 公尺，再依此差值將推估水位平移 0.38 公尺，使得推估水位與原始水位可以平滑的連接，如圖 3.2-5 (b)所示。

表 3.2-1 2004-2012 年地下水位原始資料缺漏統計表

年份	扇頂	扇央	扇尾
2004	3.73%	0.34%	0.00%
2005	0.89%	1.92%	4.20%
2006	3.81%	2.79%	0.00%
2007	4.89%	18.40%	1.05%
2008	12.27%	25.46%	9.59%
2009	20.48%	31.53%	3.11%
2010	13.49%	38.15%	7.58%
2011	5.66%	51.60%	16.05%
2012	9.56%	14.28%	2.94%

表 3.2-2 2004-2012 年地下水位原始資料缺漏時段分類列表

分區	井名	≤10 天	>10 天	缺漏日期及時段
扇頂	內城	0	4	2007/10/17-2008/1/13、2008/4/15-2008/4/30、2008/7/16-2009/2/28、2010/10/26-2010/11/7
	自強國小(1)	0	10	2004/10/24-2004/10/31、2005/4/1-2005/4/12、2009/9/9-2009/9/30、2010/4/1-2010/6/30、2010/8/1-2010/8/31、2010/11/9-2010/11/30、2011/1/5-2011/1/13、2011/6/15-2011/10/18、2012/1/6-2012/3/31、2012/6/13-2012/10/16
	中興(1)	0	3	2006/9/17-2006/9/30、2006/11/14-2006/11/30、2011/10/19-2011/11/30
	中興(2)	0	4	2008/4/15-2008/4/30、2008/12/25-2009/2/28、2009/12/23-2009/12/31、2010/2/9-2010/3/31
	中興(3)	1	6	2005/10/5-2005/10/31、2006/6/20-2006/6/30、2006/9/18-2007/1/31、2007/6/15-2007/6/21、2009/5/13-2009/8/31、2009/10/19-2010/3/31、2011/12/16-2012/6/14
	中興(4)	0	2	2004/4/7-2004/4/30、2011/10/19-2011/10/31
	大隱(1)	0	3	2004/5/4-2004/7/8、2004/11/3-2004/11/30、2008/11/6-2009/9/20
	大隱(2)	0	2	2004/5/11-2004/6/17、2008/11/6-2009/9/20
	三星	3	5	2006/5/25-2006/5/31、2006/9/18-2006/9/30、2007/12/28-2008/1/31、2008/3/12-2008/3/31、2008/11/18-2008/11/30、2009/11/25-2010/10/5、2010/12/17-2011/1/31、2011/2/10-2011/2/19
	大洲(1)	1	3	2007/11/17-2008/2/11、2008/3/1-2008/3/4、2008/11/6-2008/11/30、2012/2/1-2012/2/29
	大洲(2)	1	3	2007/11/17-2008/2/11、2008/3/1-2008/3/4、2008/11/6-2008/11/30、2012/10/3-2012/10/15
扇央	宜農(1)	3	7	2008/8/1~2008/8/7、2009/1/24~2009/3/9、2009/4/3~2009/4/13、2009/4/30~2009/6/16、2009/7/5、2009/7/23~2009/7/31、2009/8/9~2010/3/31、2010/8/17~2011/1/31、2011/3/8~2011/5/22、2011/6/15~2011/10/19
	宜農(2)	0	3	2005/12/20~2005/12/31、2011/1/15~2011/5/31、2011/10/1~2011/10/31
	龍德(1)	0	2	2008/4/9~2008/4/30、2011/10/19~2011/10/31
	龍德(2)	1	6	2006/12/19~2006/12/31、2007/6/15~2007/6/21、2008/5/17~2008/5/31、

分區	井名	≤10 天	>10 天	缺漏日期及時段
				2009/2/13~2009/4/5、2010/5/5~2010/5/16、2010/10/2~2011/10/31、 2012/5/8~2012/5/31
	龍德(3)	3	5	2004/3/18~2004/3/24、2004/5/17~2004/5/24、2008/5/17~2008/5/31、 2009/1/8~2009/3/31、2010/10/2~2011/1/27、2011/10/19~2011/10/31、 2011/12/10~2011/12/14、2012/7/12~2012/9/10
	龍德(4)	0	3	2008/5/17~2008/5/31、2009/5/15~2010/6/16、2010/7/7~2010/12/7
	礁溪(1)	4	4	2005/7/9~2005/8/31、2008/6/26~2008/6/30、2008/8/6~2008/8/11、 2008/10/1~2009/3/4、2009/5/15~2009/6/30、2009/8/9~2009/8/13、 2010/5/8~2010/5/17、2011/5/1~2012/8/30
	吳沙(1)	2	8	2006/12/19-12/31、2007/1/1-1/31、2008/10/14-11/30、2009/1/15-3/4、 2009/6/1-6/11、2009/8/24-8/31、2009/12/10-12/31、2010/3/1-4/30、 2010/5/19-5/31、2010/11/30-12/7
	吳沙(2)	1	10	2007/1/16-2/28、2007/3/29-4/30、2007/5/12-6/4、2007/12/7-12/31、 2008/1/1-2/29、2008/3/14-3/31、2008/11/18-12/31、2009/4/16-4/30、 2010/12/25-12/31、2011/1/1-1/31、2012/5/1-5/31
	二龍	0	6	2007/6/20-9/14、2007/12/11-12/31、2008/1/1-1/31、2008/10/14-10/31、 2009/1/15-1/31、2011/5/10-10/31
	壯圍(1)	1	4	2007/12/28-12/31、2008/6/20-6/30、2008/2/19-12/31、2010/1/1-3/5、 2011/3/11-5/22、
	壯圍(2)	1	2	2007/5/12-6/4、2007/12/28-12/31、2011/11/17-11/30
	壯圍(3)	1	6	2007/2/20-3/18、2008/2/20-3/18、2009/12/25-12/31、2010/1/1-1/27、 2010/10/19-12/31、2011/1/1-5/8、2012/1/1-5/9
	古亭(1)	0	7	2006/11/15-12/31、2007/1/1-4/30、2007/12/13-12/31、2010/5/19-5/31、 2010/7/14-11/30、2011/3/11-10/31、2012/5/1-5/31
	古亭(2)	2	7	2006/11/15-12/31、2007/1/1-4/30、2007/12/11-12/31、2008/6/20-6/30、 2010/2/12-11/30、2011/2/17-10/31、2011/12/11-12/15、2011/12/23-12/31、 2012/5/1-5/31
	同樂	1	12	2007/11/17-2008/1/31、2008/3/15-2008/5/8、2008/6/21-2009/2/28、 2009/5/15-2009/9/21、2009/12/23-2009/12/31、2010/2/12-2010/3/14、 2010/10/24-2010/11/13、2011/3/9-2011/3/31、2011/5/24-2011/8/11、 2011/9/1-2011/9/30、2011/11/21-2011/12/27、2012/5/16-2012/5/31、 2012/11/19-2012/12/31、
	順安	0	6	2007/12/28-2008/1/31、2008/6/15-2008/6/30、2008/10/1-2008/10/31、 2008/11/6-2008/11/30、2009/4/1-2009/4/30、2009/11/1-2010/3/31
	五結(1)	2	4	2008/4/1-2008/4/23、2008/5/1-2008/8/31、2008/10/1-2008/12/31、 2009/1/8-2009/3/4、2010/11/27-2010/11/30、2011/9/20-2011/9/30
	五結(2)	3	2	2006/1/28-2006/1/29、2007/9/11-2007/9/29、2008/4/15-2008/4/17、 2009/1/8-2009/2/28、2011/12/16-2011/12/26
	五結(3)	3	9	2004/1/1-2004/1/30、2004/2/1-2004/2/26、2005/6/3-2005/6/27、 2006/1/17-2006/1/31、2007/9/16-2007/9/30、2008/11/1-2009/1/6、 2009/3/4-2009/3/12、2009/7/7-2010/3/31、2010/5/18-2010/5/31、 2010/10/27-2010/10/31、2011/8/19-2012/5/8、2012/6/9-2012/9/19
	五結(4)	1	10	2005/12/6-2005/12/23、2007/5/11-2007/5/31、2007/6/11-2007/6/20、 2007/9/1-2007/9/30、2007/11/16-2007/12/31、2008/12/14-2008/12/31、 2009/1/8-2009/2/28、2010/1/1-2010/3/31、2011/6/15-2011/9/1、 2011/11/17-2011/12/26、2012/4/26-2012/5/13
扇尾	岳明國小(1)	0	0	
	利澤(1)	1	4	2008/1/8~2008/1/31、2010/10/20~2010/10/31、2010/11/27~2010/11/30、 2011/1/1~2011/1/27、2012/9/1~2012/9/30
	利澤(2)	0	2	2009/2/13~2009/2/28、2010/12/23~2011/1/14

分區	井名	≤10 天	>10 天	缺漏日期及時段
	頭城國小(1)	1	2	2008/1/10~2008/1/13、2010/5/19~2010/5/31、2010/6/5~2010/12/7
	大福國小(1)	0	4	2005/4/7~2005/5/4、2008/2/20~2008/3/18、2010/12/25~2011/1/27、2011/10/19~2012/5/8
	公館	0	4	2007/11/16~2008/1/31、2009/10/23~2010/3/31、2011/4/16~2011/5/22、2011/6/22~2011/10/19、
	冬山(1)	0	3	2005/11/19~2005/12/18、2008/4/9~2008/7/24、2011/7/20~2011/10/31、
	冬山(2)	0	4	2008/4/9~2008/6/25、2009/6/22~2009/7/5、2010/10/14~2010/10/24、2011/1/5~2011/10/31、

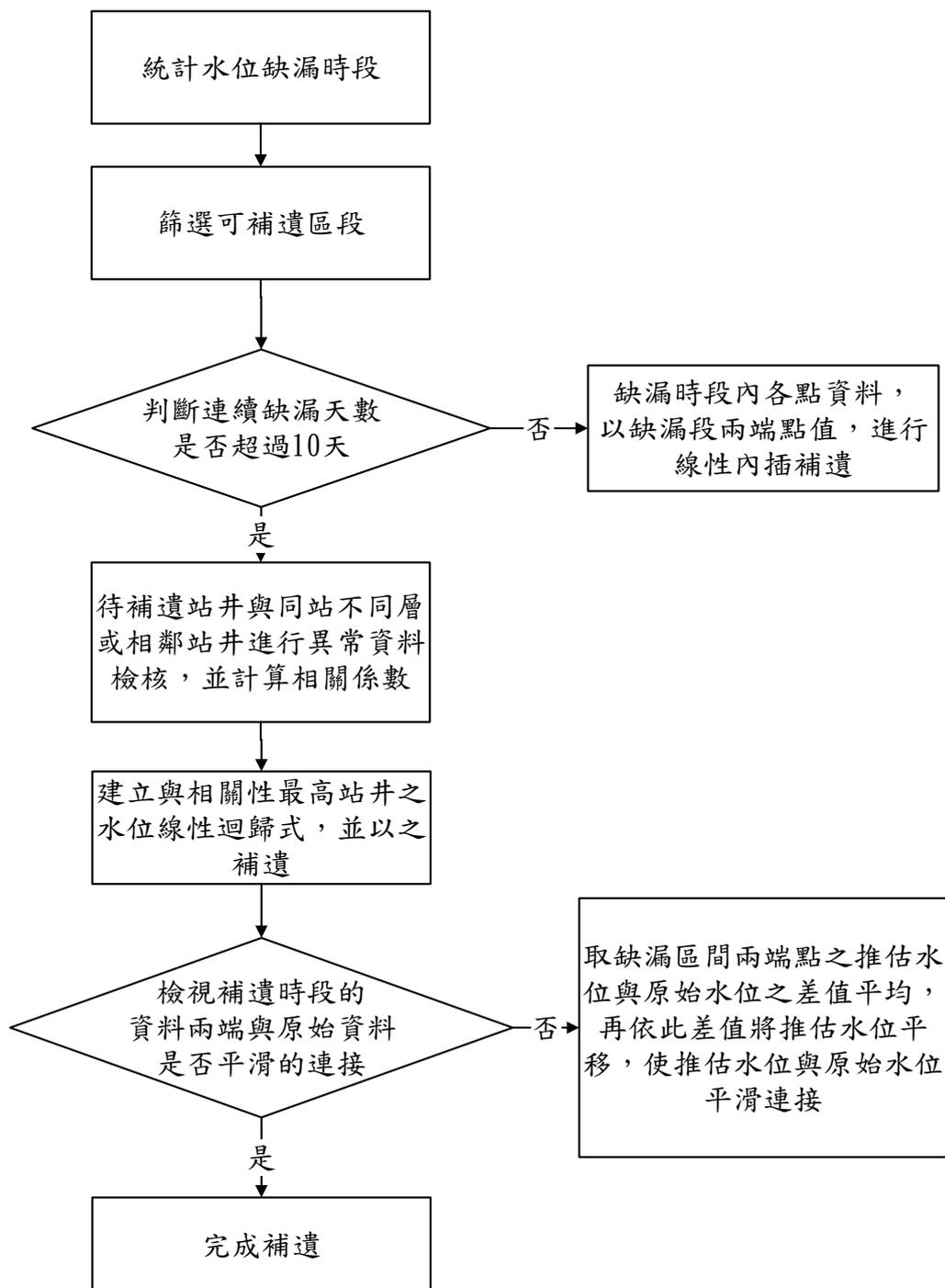
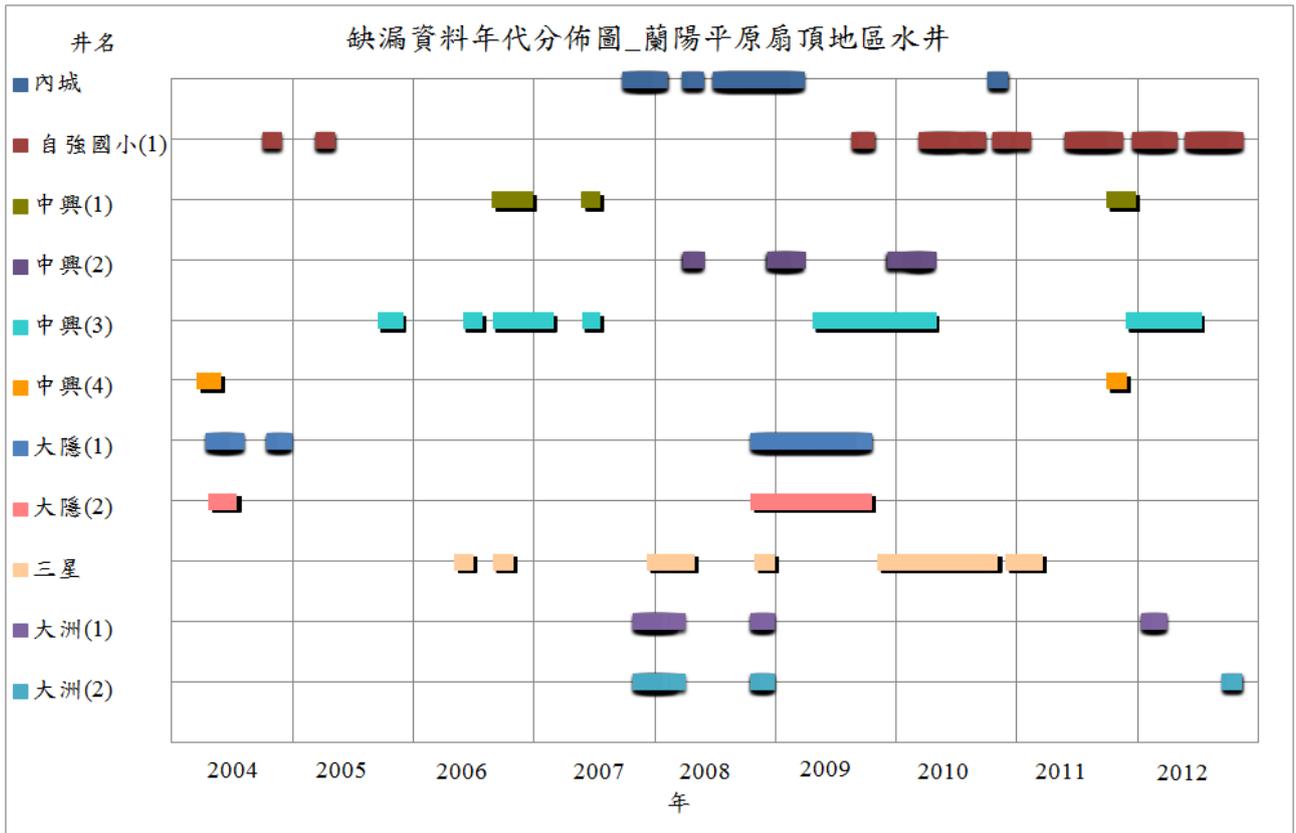
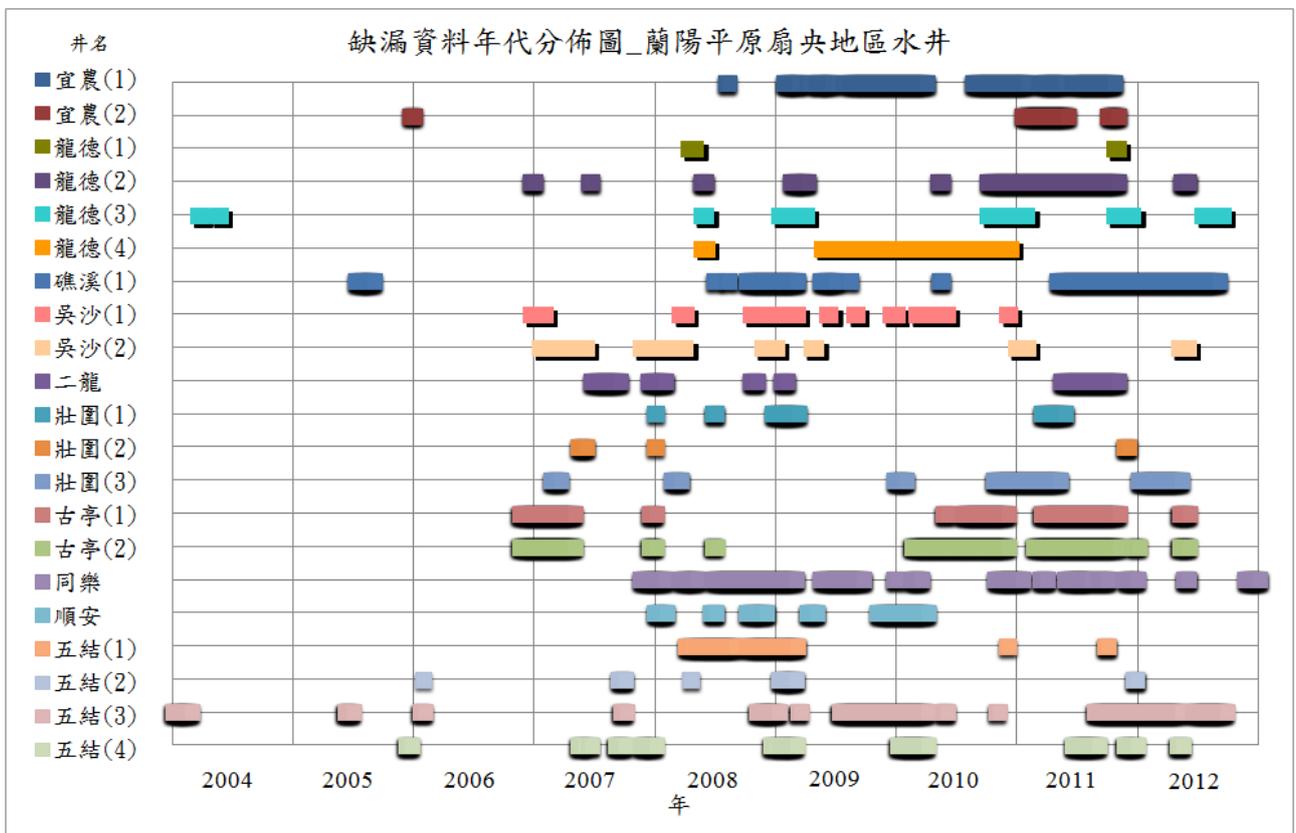


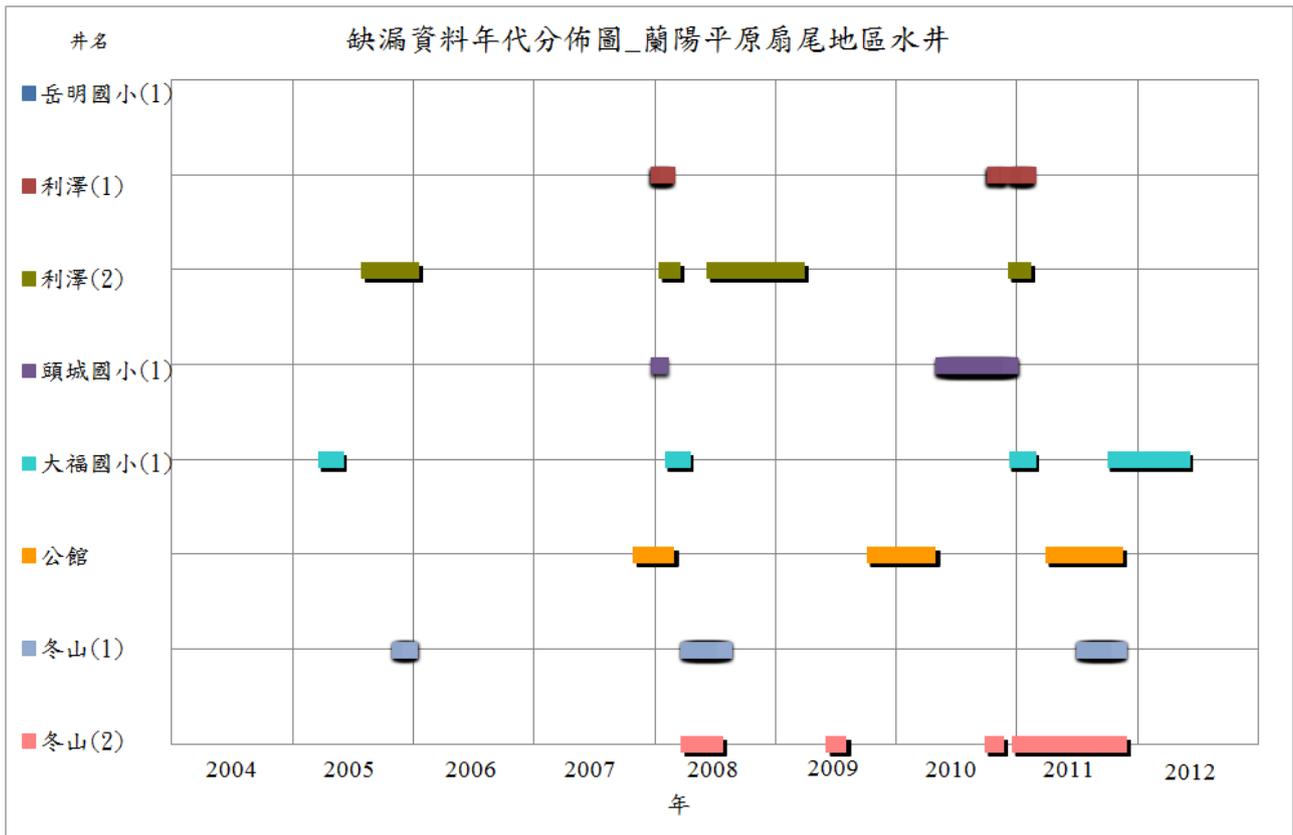
圖 3.2-1 地下水位補遺標準作業程序



(a)



(b)



(c)

圖 3.2-2 地下水位缺漏資料年代分佈圖：(a)扇頂區；(b)扇央區；(c)扇尾區

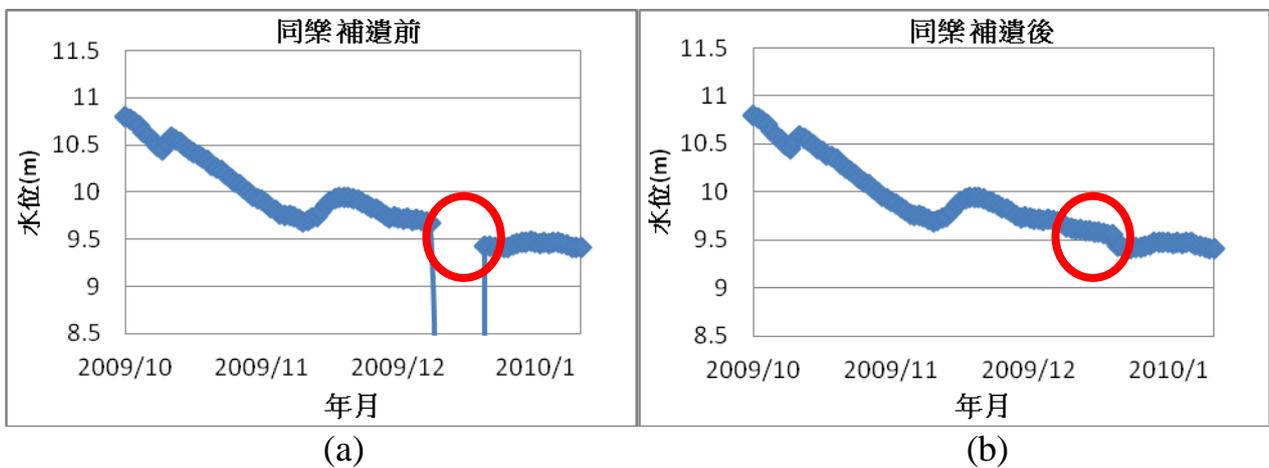


圖 3.2-3 地下水位資料缺漏未達 10 天以缺漏段兩端點為準以線性內插進行補遺，以同樂為例：(a)補遺前之水位歷線；(b)補遺後之水位歷線

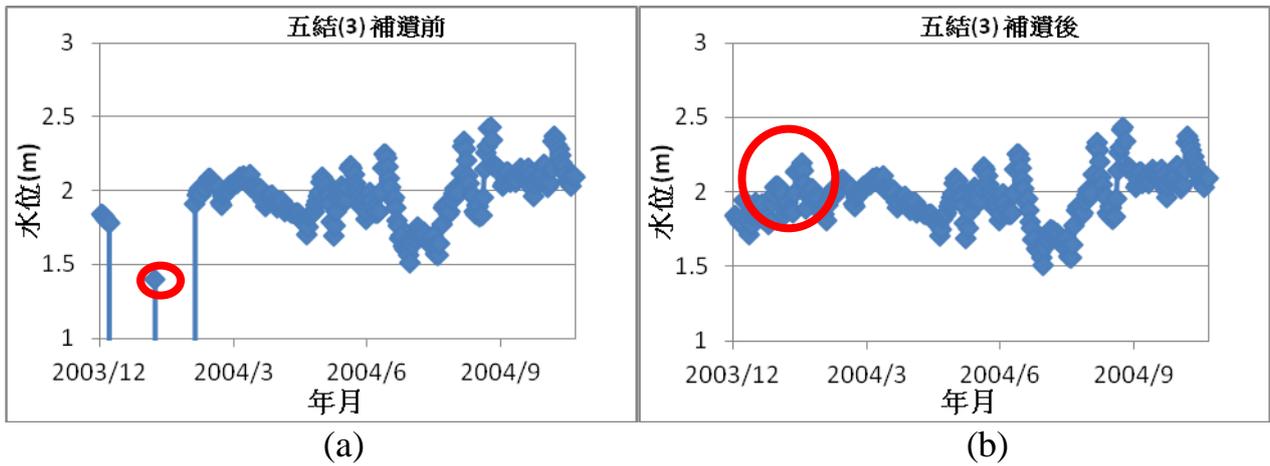


圖 3.2-4 篩選可信度較低的資料點後再以線性迴歸進行補遺，以五結(3)為例：
 (a)原始水位；(b)線性迴歸補遺後水位

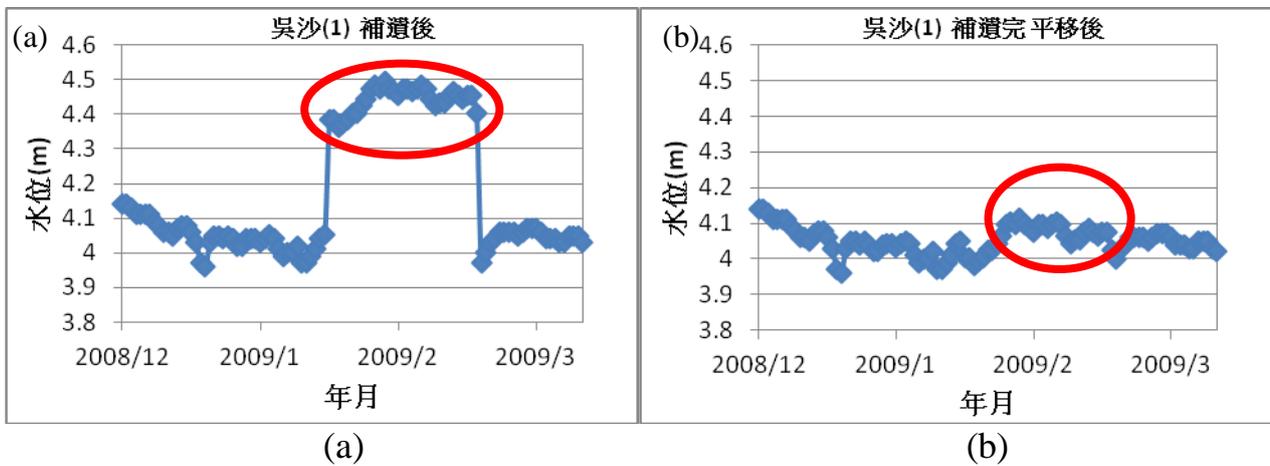


圖 3.2-5 依標準作業流程之水井補遺結果，以吳沙(1)為例分別用：(a)線性迴歸補遺；(b)以端點與原始水位之平均差值做平移，使資料與原始資料平滑連接

表 3.2-3 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
02010111	宜農(1)	壯圍(1)	0.81	宜農(2)	0.78			壯圍(1)	0.81	吳沙(1)	0.54	同樂	0.52				
02010121	宜農(2)	壯圍(2)	0.86	宜農(1)	0.78			同樂	0.72	壯圍(2)	0.86	吳沙(2)	0.75				
02030211	利澤(1)	岳明國小(1)	0.49	利澤(2)	-0.05			五結(1)	0.10	龍德(1)	0.35	公館	0.16	岳明國小(1)	0.49		
02030221	利澤(2)	壯圍(3)	0.48	利澤(1)	-0.05			壯圍(3)	0.48	五結(4)	0.26	龍德(4)	0.09				
02030311	龍德(1)	龍德(2)	0.89	龍德(2)	0.89			利澤(1)	0.69	五結(1)	0.44	順安	0.01	冬山(1)	0.75		
02030321	龍德(2)	冬山(2)	0.90	龍德(1)	0.89	龍德(3)	0.81	順安	-0.05	五結(2)	0.48	利澤(2)	0.50	冬山(2)	0.90		
02030331	龍德(3)	龍德(2)	0.81	龍德(2)	0.81	龍德(4)	0.76	五結(3)	0.30	順安	-0.15	龍德(1)	0.54				
02030341	龍德(4)	龍德(3)	0.76	龍德(2)	0.70	龍德(3)	0.76	順安	-0.18								
02040111	頭城國小(1)	礁溪(1)	0.42					大福國小(1)	0.40	礁溪(1)	0.42						
02050111	礁溪(1)	二龍	0.80					二龍	0.80	大福國小(1)	0.54	頭城國小(1)	0.22	吳沙(1)	0.63	吳沙(2)	0.65
02050211	吳沙(1)	二龍	0.78	吳沙(2)	0.72			同樂	0.73	古亭(1)	0.61	壯圍(1)	0.39	大福國小	0.23		
02050221	吳沙(2)	吳沙(1)	0.72					同樂	0.68	古亭(1)	0.59	壯圍(1)	0.32	大福國小	0.22		
02050311	二龍	吳沙(1)	0.78					吳沙(2)	0.72	大福國小	0.33	礁溪	0.34				
02060111	大福國小(1)	礁溪(1)	0.56					頭城國小(1)	0.40	公館	0.19	礁溪(1)	0.56	二龍	0.33	古亭(1)	0.34
02060211	壯圍(1)	宜農(1)	0.26					古亭(1)	0.21	公館	0.20	中興(1)	-0.07				
02060221	壯圍(2)	壯圍(1)	0.59					古亭(1)	0.38	公館	0.30	中興(1)	0.02	宜農(1)	0.20		
02060231	壯圍(3)	壯圍(1)	0.50	壯圍(2)	0.50			古亭(1)	0.46	公館	0.30	中興(1)	0.11	宜農(1)	0.20		
02060311	古亭(1)	公館	0.82	古亭(2)	0.45			同樂	0.52	吳沙(2)	0.36	二龍	0.47	壯圍(1)	0.32		

02060321	古亭(2)	古亭(1)	0.77					同樂	0.25	吳沙(2)	-0.09	二龍	0.40	壯圍(1)	0.04		
02060411	公館	古亭(1)	0.82					利澤(1)	0.16	大福國小(1)	0.19	五結(1)	0.14	古亭(1)	0.82	壯圍(1)	0.35
02070111	內城	三星	0.91	自強國小(1)	0.74	三星	0.91	大隱(1)	0.55	中興(1)	-0.17	宜農(1)	0.11	同樂	0.35	大洲(1)	0.05
02070211	自強國小(1)	三星	0.86	內城	0.74	大洲(1)	0.05	大隱(1)	0.51	三星	0.86						
02070411	同樂	吳沙(1)	0.87					宜農(1)	0.63	吳沙(1)	0.87	內城	0.70				
02080111	冬山(1)	冬山(2)	0.98	冬山(2)	0.98			岳明國小(1)	0.79	冬山(2)	0.98	五結(1)	0.20	龍德(1)	0.74	順安	0.14
02080121	冬山(2)	冬山(1)	0.98	冬山(1)	0.98			龍德(4)	0.71	五結(4)	0.40	中興(3)	0.28				
02080311	順安	冬山(1)	0.87					五結(1)	0.65	大隱(1)	0.84	利澤(1)	0.06	冬山(1)	0.87		
02090111	五結(1)	五結(3)	0.92	五結(2)	0.60	五結(3)	0.92	中興(1)	-0.06	順安	0.63	利澤(1)	-0.42				
02090121	五結(2)	五結(3)	0.90	五結(1)	0.32	五結(3)	0.90	利澤(2)	-0.13	順安	0.11	中興(2)	0.63				
02090131	五結(3)	五結(2)	0.89	五結(2)	0.88	五結(4)	0.34	中興(3)	0.62								
02090141	五結(4)	中興(4)	0.81	五結(3)	0.66			中興(4)	0.81								
02090211	中興(1)	中興(2)	0.95	大洲(1)	-0.02	大隱(1)	0.24	順安	0.50	公館	0.74	中興(2)	0.95	中興(3)	0.34	中興(4)	0.70
02090221	中興(2)	中興(1)	0.74	中興(3)	0.30	中興(4)	-0.25	中興(1)	0.74	公館	0.01	順安	0.25	大洲(2)	0.22	五結(2)	0.56
02090231	中興(3)	中興(4)	0.96	中興(2)	0.78	中興(4)	0.96	中興(1)	0.69	公館	0.47	順安	0.18	五結(3)	0.67	壯圍(3)	-0.37
02090241	中興(4)	五結(4)	0.85	中興(2)	0.17	中興(3)	0.07	中興(1)	-0.34	公館	0.36	順安	0.52	五結(4)	0.85		
02100111	大隱(1)	內城	0.95	三星	0.96	大洲(1)	0.01	中興(1)	-0.16	順安	0.16	內城	0.95	大隱(2)	-0.26		
02100121	大隱(2)	大隱(1)	0.97	三星	0.94	大洲(2)	0.96	中興(2)	0.17	順安	0.36	內城	0.95	大隱(1)	0.97		
02100211	三星	大隱(1)	0.97	三星	0.94	大洲(2)	0.96	中興(2)	0.17	順安	0.36	內城	0.95	大隱(1)	0.97		
02100311	大洲(1)	內城	0.90	自強國小(1)	0.85	大洲(1)	0.13	中興(1)	-0.06	內城	0.90	大隱(1)	0.30				
02100321	大洲(2)	大洲(2)	0.82	自強國小(1)	0.69	三星	0.75	中興(1)	0.18	內城	0.80	大隱(1)	0.81	大洲(2)	0.82		

3.2.2 地下水位資料異常及處理

在完成水位資料補遺後，本計畫再次檢視各井之水位歷線圖，檢視是否發生某些時段水位異常且不符合整體水位變化之趨勢，而產生此問題之原因可能為(1)儀器校調偏差；(2)疑似有問題的觀測值。本計畫整理之異常水位時段如表 3.2-4 所示。

本計畫為地下水位資料異常訂定一標準校正程序，如圖 3.2-6 所示。首先為檢視已補遺完成的水位資料，由水位歷線圖分析是否存在不符合整體趨勢之水位，若否，則無需校正；若是，則檢視異常時段之水位，分析此時段內之水位是否仍符合整體趨勢，若否，則刪除此時段水位，重新進行水位補遺；若是，則保留此時段之水位並將其適當平移使其符合整體趨勢。

表 3.2-4 蘭陽平原淺層地下水觀測井水位異常時段列表

推測之異常原因	井名	異常水位之時段
儀器校調偏差	利澤(1)	2011/1/28~2011/10/9、2012/10/1~2012/12/13
	古亭(2)	2008/7/1~2008/7/18
	中興(3)	2004/3/1~2004/3/31
	中興(4)	2005/12/20~2011/10/18
疑似有問題的觀測值	宜農(1)	2008/9/11~2011/11/9
	利澤(1)	2010/9/30~2011/1/28
	利澤(2)	2007/11/30~2008/2/18、2008/3/19~2008/12/31、 2009/1/8~2009/2/28
	龍德(2)	2006/11/11~2006/12/18
	礁溪(1)	2008/6/10~2008/9/30
	同樂	2011/8/12~2011/8/28
	冬山(1)	2004/3/1~2004/3/9
	順安	2008/7/1~2008/9/30、2008/11/1~2008/11/5、 2008/12/1~2009/3/31、2009/5/1~2009/10/31
	五結(1)	2007/8/27~2008/3/31、2008/4/24~2008/4/30、 2008/9/1~2008/9/30、2009/1/1~2009/1/7
	五結(4)	2008/11/21~2008/12/13、2009/1/1~2009/1/17
	中興(1)	2005/8/4~2006/2/6
	中興(3)	2009/1/22~2009/5/12、2009/9/1~2009/10/18
	大隱(1)	2004/7/9~2004/11/2、2004/12/1~2008/11/5
	大隱(2)	2004/6/18~2008/11/5
	三星	2008/2/1~2008/3/11

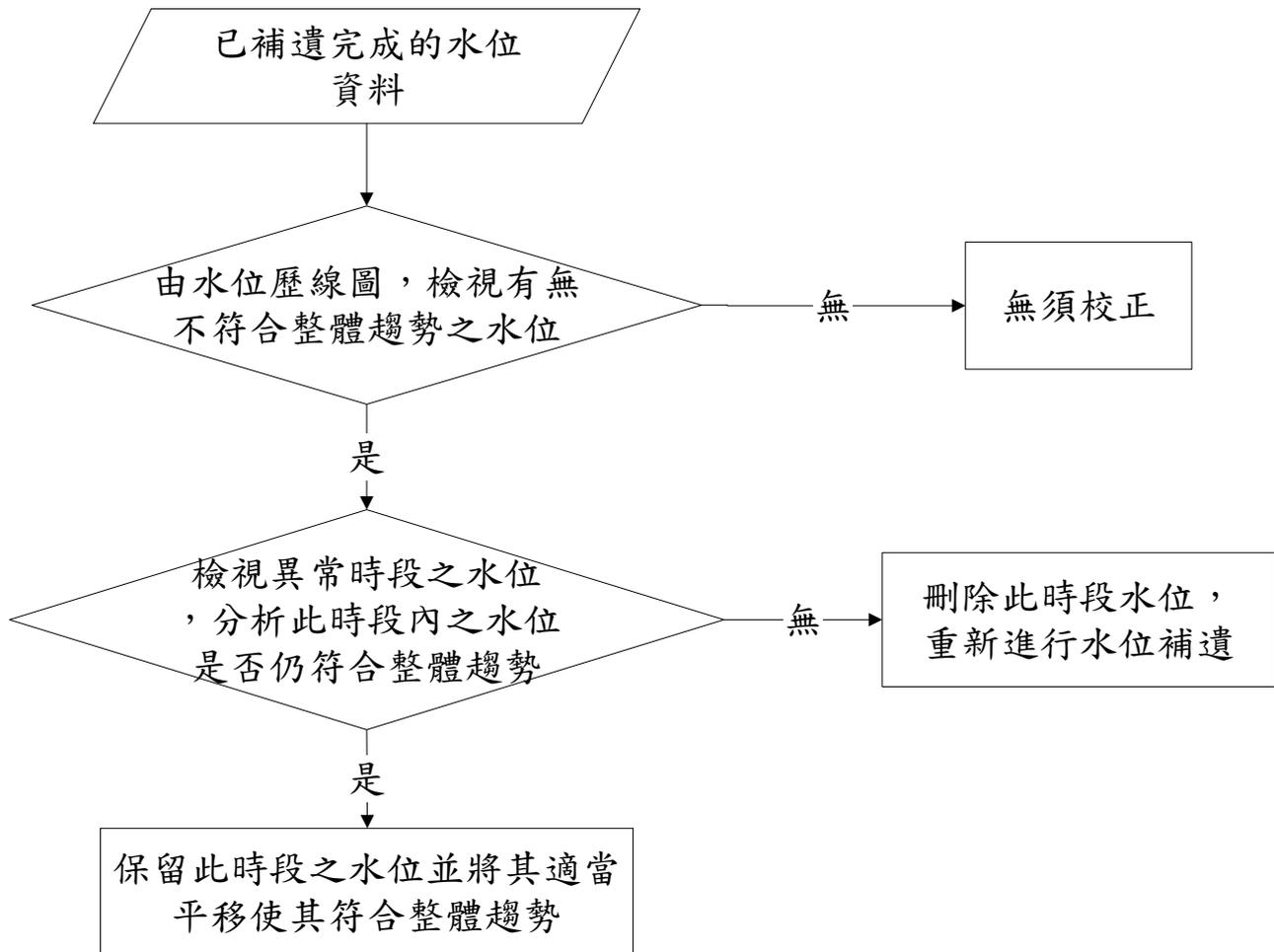
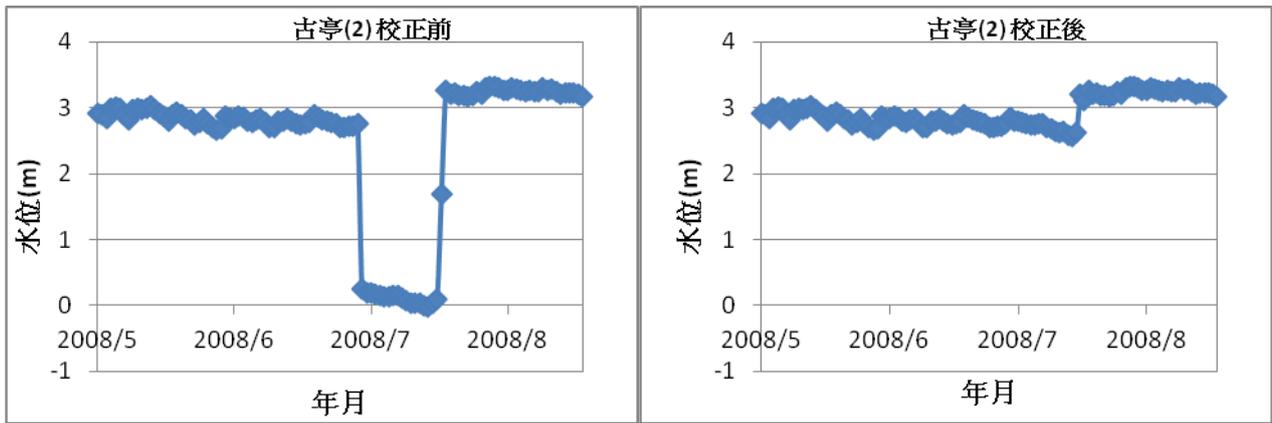


圖 3.2-6 地下水位資料異常之處理標準作業程序

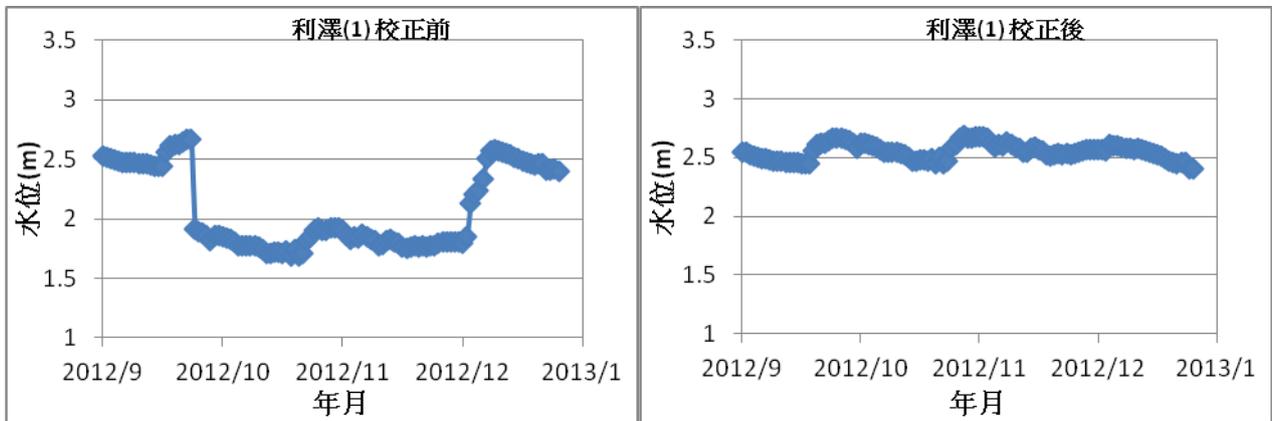
第一類為由儀器校調偏差所引發之異常水位問題，其水位可能出現異常時段兩端的水位驟升或驟降，但異常時段內的水位變化趨勢卻屬於合理變化的情況，推測其發生原因乃人為儀器校調所造成的量測偏差。由於此類水位異常變化明顯非物理機制所造成，依據前述水位標準校正程序，此異常段內之水位將保留，再將異常時段兩端點驟升\驟降之水位差扣除\加回，當異常段資料經過處理後，其水位歷線應較為合理。以古亭(2)為例，歷年水位大多為 3 公尺左右，但於 2008 年 7 月 1 號至 2008 年 7 月 15 號內，水位平均遽降 3 公尺，但異常缺段內之水位趨勢仍符合整體之趨勢變化，故本計畫將此時段水位平移使其符合整體趨勢。本計畫以古亭(2)、利澤(1)及中興(3)之異常水位為例，說明第一類問題之水位校正結果，如圖 3.2-7 至圖 3.2-9 所示。



(a)

(b)

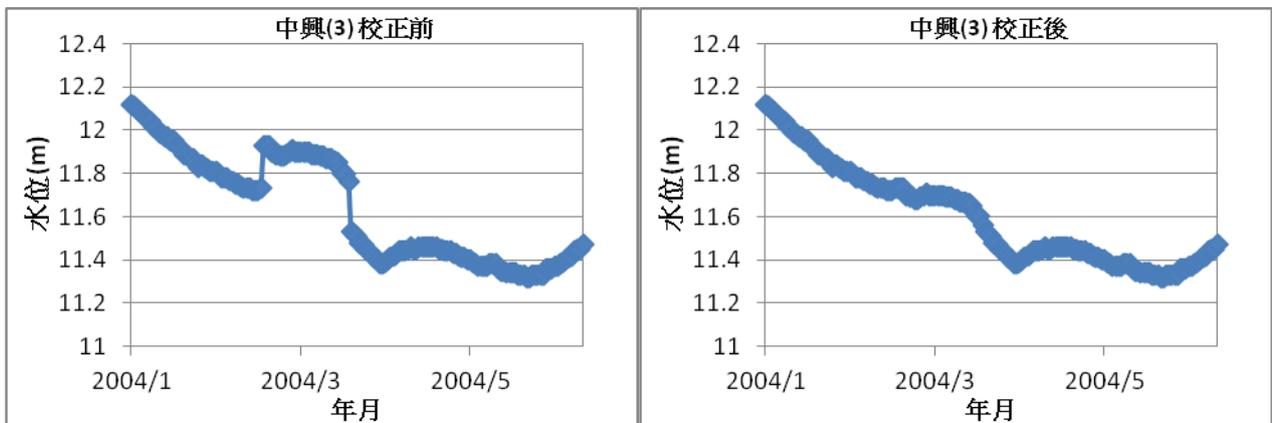
圖 3.2-7 古亭(2)因儀器校調偏差導致之異常水位校正：(a)水位校正前之水位歷線 (b)水位校正後之水位歷線



(a)

(b)

圖 3.2-8 利澤(1)因儀器校調偏差導致之異常水位校正：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線



(a)

(b)

圖 3.2-9 中興(3) 因儀器校調偏差導致之異常水位校正：(a) 水位校正前之水位歷線(b) 水位校正後之水位歷線

第二類水位異常的現象為疑似有問題的觀測值，整個異常時段之水位皆與整體水位趨勢偏離，由於此類水位異常變化應非物理機制所造成，故依照標準校正程序，刪除此時段之水位，再參照前一小節之補遺方法，重新進行補遺。在異常段資料經過處理後，其水位歷線應較為合理。以龍德(2)為例，歷年水位約為3至4公尺以內，但於2006年11月23號開始水位開始緩慢下降，至2006年12月19號已降至-3公尺，然而於2006年12月20號驟升至3.5公尺，單日水位變化高達5.5公尺，實屬異常，故本計畫依據水位校正標準程序，判斷此異常時段內之水位趨勢不符合整體水位歷線之趨勢變化，故刪除此時段之水位，重新進行水位補遺。本計畫以龍德(2)、礁溪(1)、冬山(1)、五結(4)與中興(1)觀測井之異常水位為例，說明第二類問題之水位校正結果，如圖3.2-10至圖3.2-14所示。

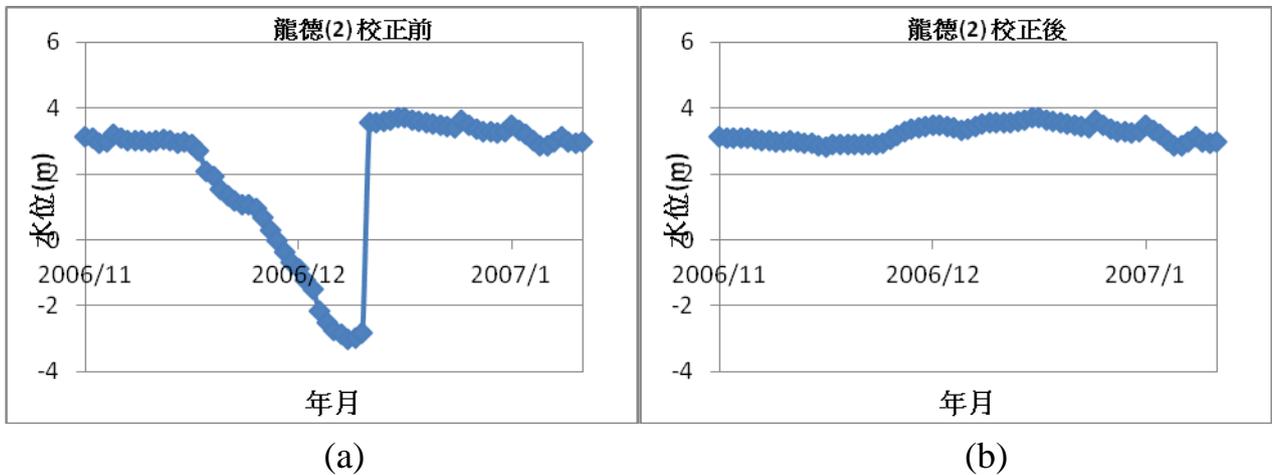


圖 3.2-10 龍德(2)井疑似有問題的觀測值：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線

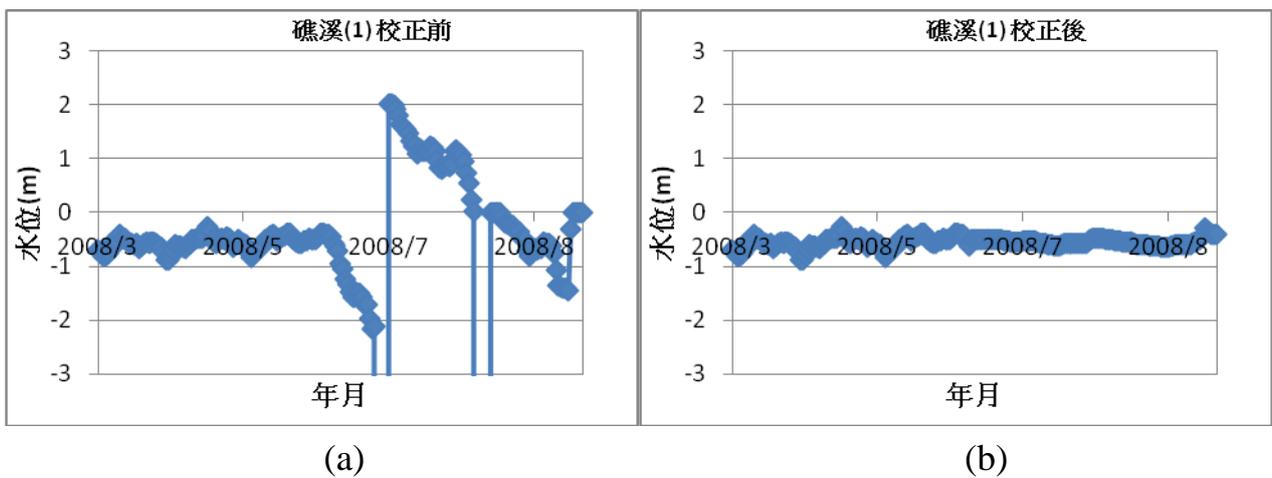


圖 3.2-11 礁溪(1)井疑似有問題的觀測值：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線

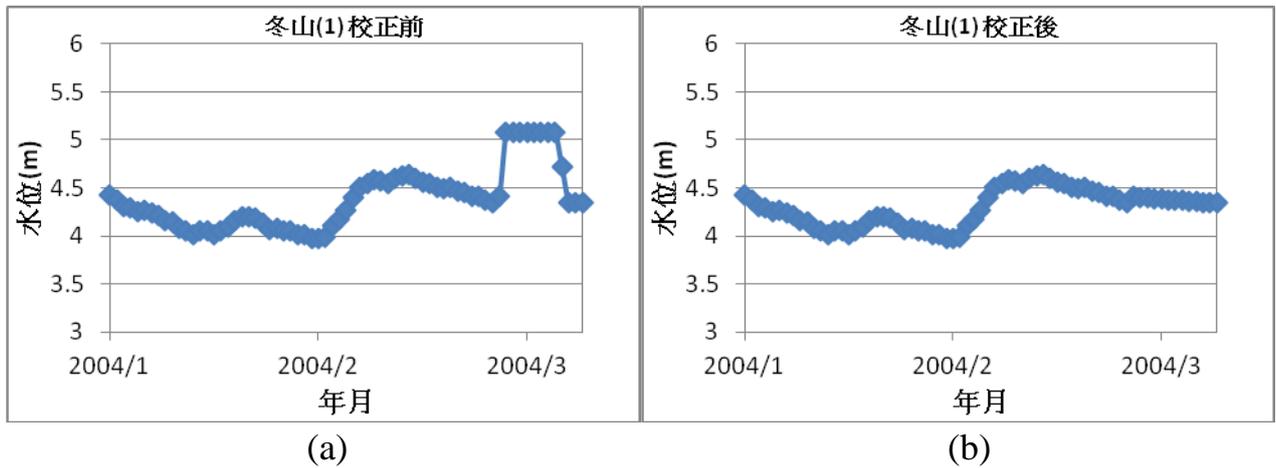


圖 3.2-12 冬山(1)井疑似有問題的觀測值：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線

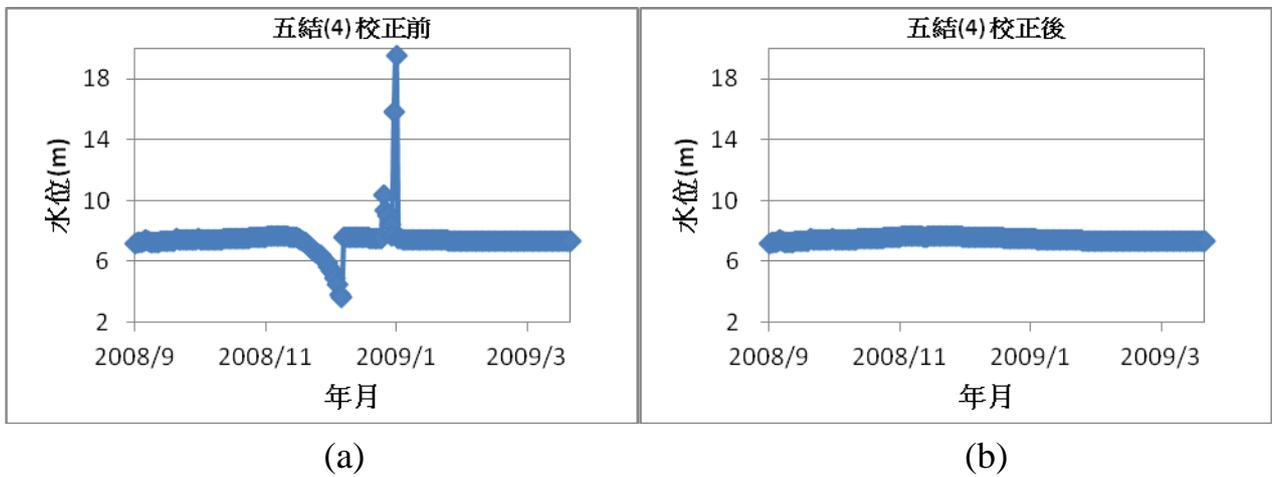


圖 3.2-13 五結(4)疑似有問題的觀測值：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線

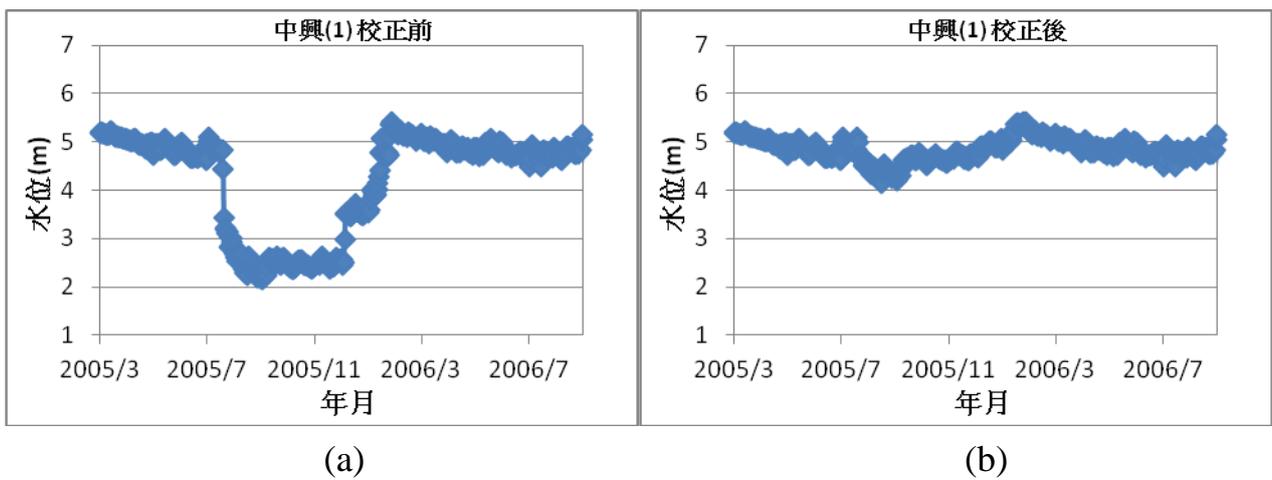


圖 3.2-14 中興(1)疑似有問題的觀測值：(a) 水位校正前之水位歷線 (b) 水位校正後之水位歷線

第四章 重力量測調查與分析

4.1 重力量測原理與設備

重力測量即於某一點位置量取其重力加速度的大小。本文所討論的絕對重力測量原理，主要是以自由落體法則來測定。假設有某一物體由一高度 h 自由落下至 h_0 ，則落下距離 $h-h_0$ 與落下時間 t 的關係式為：

$$h-h_0=v_0t+(1/2)gt^2$$

即為

$$h=h_0+v_0t+(1/2)gt^2 \dots\dots\dots(式 4.1-1)$$

上式(4.1-1)中 g 為重力加速度值， h_0 表示於時間 $t=0$ 物體所在位置， h 則是時間為 t 時刻物體所在位置， v_0 表示 $t=0$ 時物體的速度。根據上式，只要量測不同落下時間 t_i 及與其對應的落下距離 h_i-h_0 ，則可求解出重力加速度值 g 。由於式(4.1-1)中有三個未知數(h_0 、 v_0 與 g)，因此必須測定至少三組的 h_i 及 t_i 值以組成聯立方程式求解出 g 值。本實驗所使用的 FG5 絕對重力儀，即是採用如上觀測原理。

舉例而言，自由落體在三個位置上的落下時間及距離分別為 (t_1, h_1) 、 (t_2, h_2) 及 (t_3, h_3) ，再假設

$$d_1=h_1-h_0$$

$$d_2=h_2-h_0$$

$$d_3=h_3-h_0$$

依據(4.1-1)式，可得：

$$d_1=v_0t_1+(1/2)gt_1^2$$

$$d_2=v_0t_2+(1/2)gt_2^2$$

$$d_3=v_0t_3+(1/2)gt_3^2$$

以上三式中，將第二式及第三式均減去第一式，可得：

$$(d_2-d_1)=(t_2-t_1)[v_0+(1/2)g(t_2+t_1)]$$

$$(d_3-d_1)=(t_3-t_1)[v_0+(1/2)g(t_3+t_1)]$$

令 $D_1=d_2-d_1$, $D_2=d_3-d_1$, $T_1=t_2-t_1$, $T_2=t_3-t_1$, 代入上式後, 消去 v_0 , 簡化後則可得

$$g=2 \times [(D_2/T_2)-(D_1/T_1)] / (T_2-T_1) \dots\dots\dots(式 4.1-2)$$

上式中的 g 為重力加速度值, 亦即為本計畫欲測定之絕對重力值。以 FG5 絕對重力儀為例, 該儀器即是以碘穩頻雷射來測定式(4.1-2)中的落下距離 D , 並以鈷原子鐘測定落下時間 T , 觀測精確度可達 10^{-8}ms^{-2} , 亦即 μgal 等級。

本實驗使用儀器為內政部採購之絕對重力儀 FG5。絕對重力儀的源起為 Hammond 和 Faller 於 1997 年在美國國家標準局合作下, 並得到空軍劍橋研究室(Air Force Cambridge Research Laboratories, AFCEL)的資助, 於 Wesleyan 大學成功研製了可移動式的絕對重力儀 FG-5, 此乃自十九世紀可移動、可倒擺重力儀之後的第一台可移動式絕對重力儀, 如圖 3-1 所示。FG5 主要部份是一台極精準的碘穩頻雷射干涉儀, 用來監測物體自由落下的直角稜角運動, 干涉計所收集到的光學資料就提供了一套非常精確的距離觀測量系統, 可以追蹤出絕對重力波長的標準。簡單來說, 其原理就式以及精密的測距系統搭配精密計時的原子鐘, 精準地測定物體落下的重力加速度值, 經由大量地收集落下的數據, 最後以電腦軟體程式作業計算得出一平均加速度值, 即為絕對重力值。

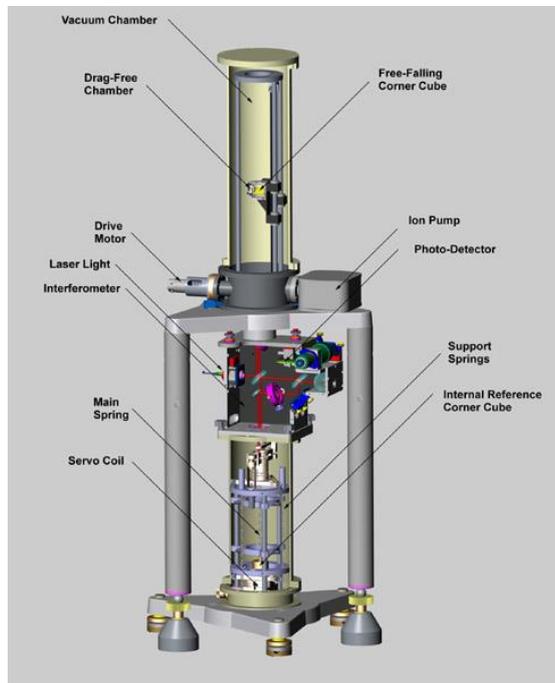
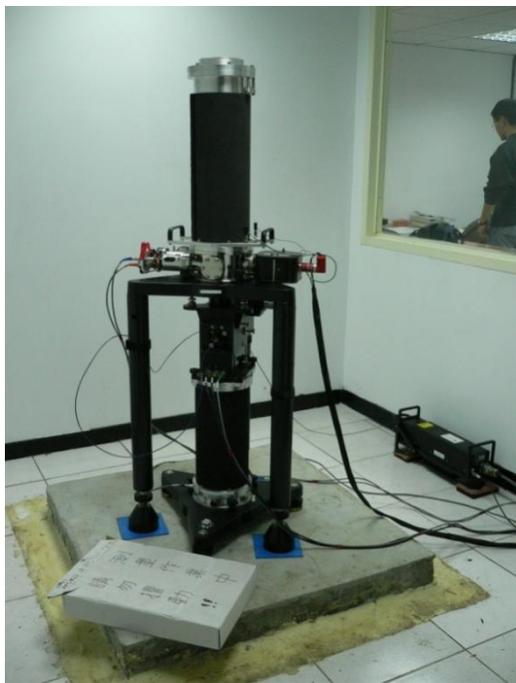


圖 4.1-1 FG5 絕對重力儀與各部件明細[Micro-g Lacoste FG5 Manual]

4.2 重力施測結果與分析

為了建立重力變化與地下水變化之間的關係，本計劃依據絕對重力數值處理方法，將量測到的原始重力值進行標準改正，處理過程包括潮汐改正、大氣壓力改正、極移改正等項目。如果量測地點曾經歷較大地殼變形，則地表高程變形也需給予修正。一般計算過程如下：

$$\text{改正重力值} = \text{觀測量} - \text{潮汐改正} + \text{大氣壓力改正} - \text{極移改正}$$

其中潮汐改正使用理論模式，包含固體潮 ETGTAB (Wenzel, 1996) 及海潮 NAO.99Jb (Matsumoto et al., 2000)；大氣壓力改正使用 IAG (1983) 建議公式：改正量(nm/s^2) = $3.0 \times (\text{觀測大氣壓力值}(\text{hPa}) - \text{理論大氣壓力值}(\text{hPa}))$ ；極移改正使用 IAGBN (1983) 建議公式，輸入 IERS 提供之極坐標即為改正量 (Micro-g LaCoste, 2012)。

本年度重力施測，佈設五個測點於蘭陽平原扇頂與扇央，分別於今年四月中與九月底進行兩次觀測。為了能儘量配合水位觀測資訊，測點皆選在現有水位觀測井所在之學校，並儘量挑選穩定之室內空間為量測點，進行重複觀測。測點分別為三星、大隱、順安、大洲與中興。兩期施測之絕對重力成果如表 4.2-1。

表 4.2-1 102 年度蘭陽平原絕對重力量測數值

$\mu \text{ gal}$	三星	大隱	大洲	順安	中興
第一期	978886046	978900274	978902214	978905787	978904636
第二期	978886066	978900298	978902218	978905797	978904636
重力差	20	24	4	10	0
水位差	7.7m	2.26m	0.13m	0.02m	0.34m

(一) 三星

施作地點位於三星鄉立圖書館內(圖 4.2-1)，距離三星水位觀測井約 5 米，施測時間分別於今年 4/19 與 9/27，相距約 160 天。此測站作業環境非常狹小，但因協調管制人員進出，觀測背景尚屬良好、數值穩定度高。第一期絕對重力觀測採連續 20 小時觀測，率定後絕對重力數值為 $978886046 \mu \text{ gal}$ 、第二期為 $978886066 \mu \text{ gal}$ (圖 4.2-2)，重力差異值為 $20 \mu \text{ gal}$ 。此站第二期的水位高度較第一期上升約 7.7 米，平均水位面距地表約 30 米，其水位上升趨勢與重力觀測數據大致吻合。



圖 4.2-1 三星站施作現況

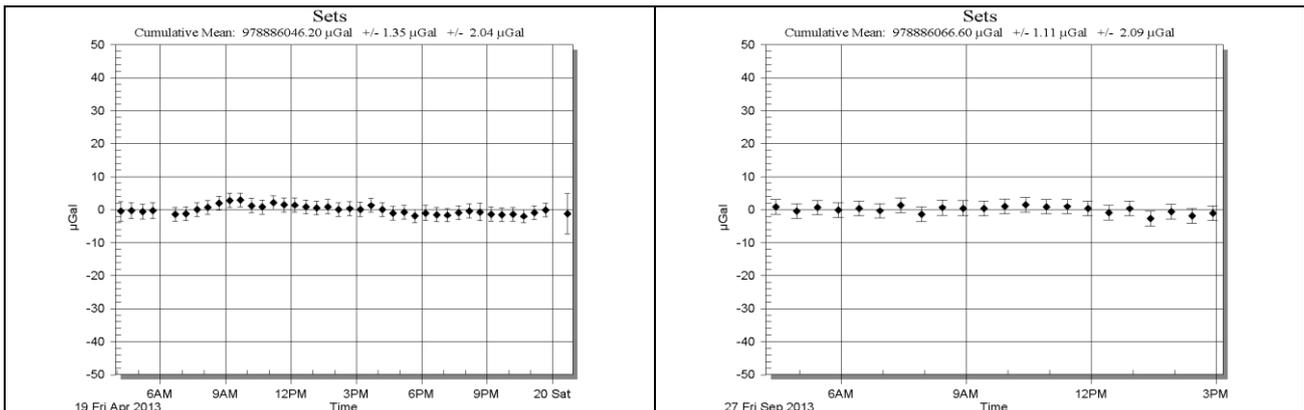


圖 4.2-2 三星站第一(左)、第二(右)期絕對重力量測成果

(二) 大隱

施作地點位於大隱國小內，距離大隱水位觀測井約 25 米，此站由於校方空間使用考量，第一期的施作位置與第二期有所不同(圖 4.2 -4)，相距約 10 米，為考量更換測點所引起的重力變化，於第二期施作期間，以相對重力儀 EG 進行新舊測點引點，將前後期重力值歸化至相同基準(第二期)，歸化後第一期的絕對重力值為 978900274 μ gal，第二期為 978900298 μ gal(圖 4.2 -5)，重力差值約為 24 μ gal，水位變化顯示第二期較第一期上升約 2.3 米，平均地下水面距離井頂約 11 米。重力與地下水位的變化趨勢吻合。此站水位觀測井旁，留有複井試驗之鑿井且保存良好，另外地質調查所也於大隱國小設立連續 GPS 追蹤站，相關數據可以再進行分析，屬於條件完備之良好施測地點。



圖 4.2-3 大隱站第一(左)、第二(右)期施作情形

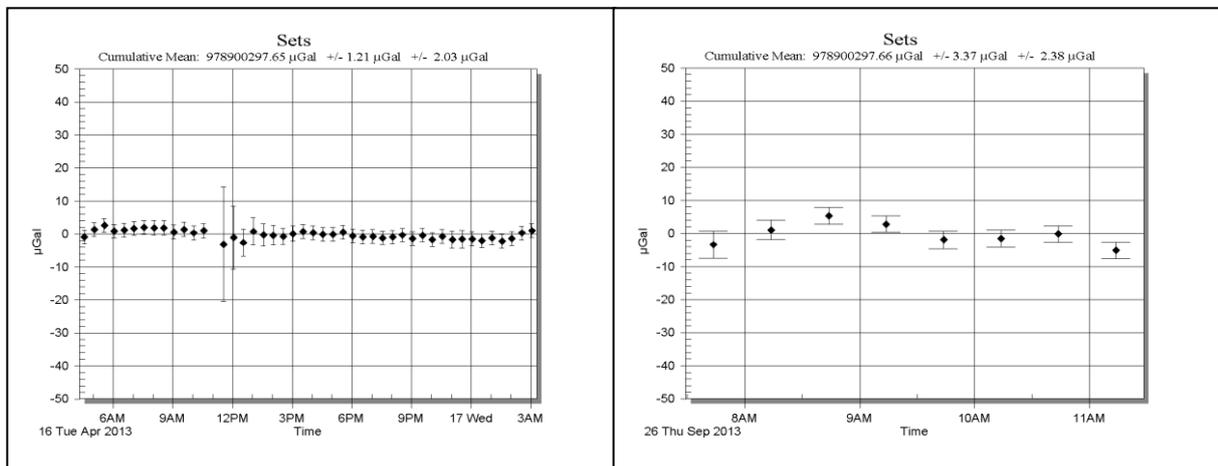


圖 4.2-4 大隱站第一(左)、第二(右)期絕對重力量測成果

(三) 順安

順安施測地點位於順安國小內，使用順安小學圖書館未開放時間進行觀測(圖 4.2-5)，絕對重力施測點位距離順安水位觀測井約 100 米。第二期施測時教室外有一些平面工程，但不影響重力觀測。第一期絕對重力觀測數據為

978905787 μ gal，第二期為 978905797 μ gal(圖 4.2-6)，重力差值為 10 μ gal。依水位觀測記錄，兩期間水位變化為 2 公分，符合順安水位站地下水位上部以泥層為主的受壓含水層。由於絕對重力變化達 10 μ gal，其重力變化效應明確，水位卻無實際變化，表示此站應受其它因素影響。絕對重力量測每期五站採連續觀測，若儀器出現問題，其他站點間亦將產生相同反應，考量其他測站重力觀測數據無明顯問題，應非重力量測儀器錯誤。此站重力與水位反映之不一致情形，需要更多現地調查，修正可能原因，方能將重力量測成果加以應用。



圖 4.2-5 順安站絕對重力儀擺設狀況

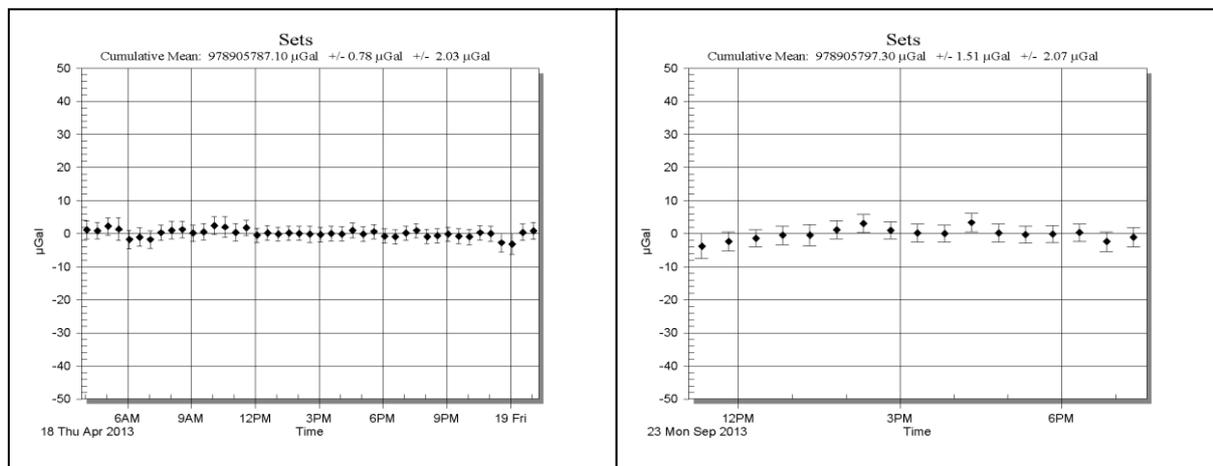


圖 4.2-6 順安站第一(左)、第二(右)期絕對重力量測成果

(四)大洲

大洲重力施測點位於大洲水位觀測站旁約 8 米處，位於大洲國小的育樂教室(圖 4.2-7)，大洲觀測井旁有氣象局強震地震站且緊鄰大型排水溝(圖 4.2-8)。大洲站第一期絕對重力觀測數值為 978902214，第二期為 978902218(圖 4.2-9)，兩期重力差值為 4 μ gal。水位觀測記錄第二期較第一期上升 0.13 米，由於平均

水位距離井頂約 1.7 米，所以重力反應趨勢與水位相當。大洲水位觀測井旁的大排水溝的深度與地下水平均水位相當，大排水溝水位可能對地下水造成一定程度影響，水文評估上可能需要較細微的解析。另外於觀測期間，排水溝的流動水，也代表不易模擬的質量變化，對於絕對重力觀測而言有兩個層面的影響，第一為流動水源衝擊地表，造成微幅震動，重力觀測時會略為受到影響。第二為大排水溝水位變化形成的的質量變化不易估計，其對絕對重力數值的些微影響，可能需以模式估計其影響量，方能有效排除。



圖 4.2-7 大洲站重力觀測點



圖 4.2-8 大洲水位觀測站與臨近大排水溝

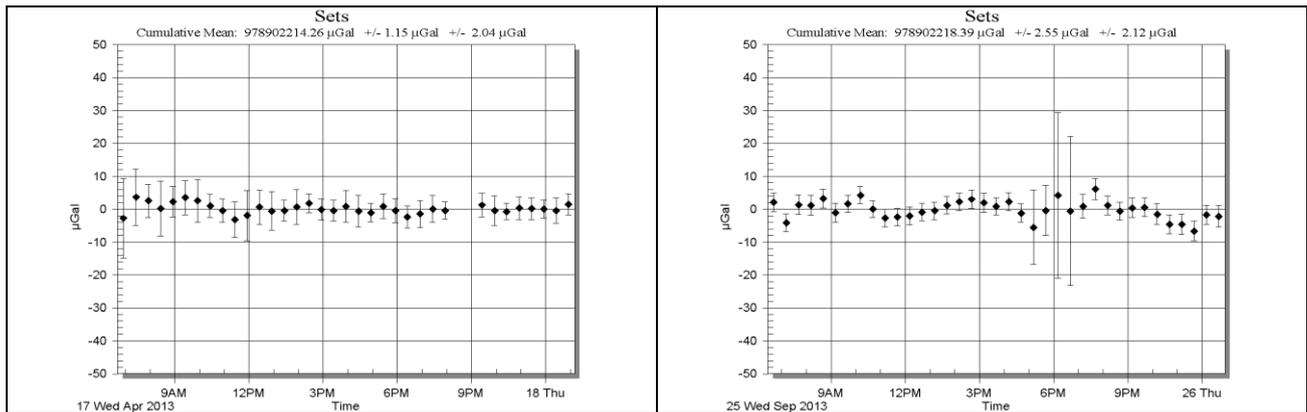


圖 4.2-9 大洲站第一(左)、第二(右)期絕對重力量測成果

(五) 中興

中興重力觀測站位於中興國小體育場講台旁(圖 4.2-10)，利用非上課時間進行觀測。量測點位距離水位觀測井約 80 米，中興水位觀測井岩心柱狀圖已大致顯示此區處於受壓含水層，水位變動幅度可能較扇頂區為小。此站由於臨近宜蘭縣中興路，大型車輛多，且車流量大，地面震動持續影響觀測，量測結果之不確定性本質上就較他站皆為大，如果重力變化小，其訊號就會被震動影響而掩蓋。絕對重力觀測兩期數值皆為 978904636(圖 4.2-11)，此意味著觀測區間中，無明確重力變化。但水位觀測資料顯示兩次重力觀測區間，水位變化為上升 0.34 米。雖然水位有小幅變化，但評估此區水位位於受壓含水層，且水位變化幅度小，而重力觀測條件稍差，放大量測不確定性，所以此站量測成果符合預期，無明顯出入。



圖 4.2-10 中興絕對重力測點

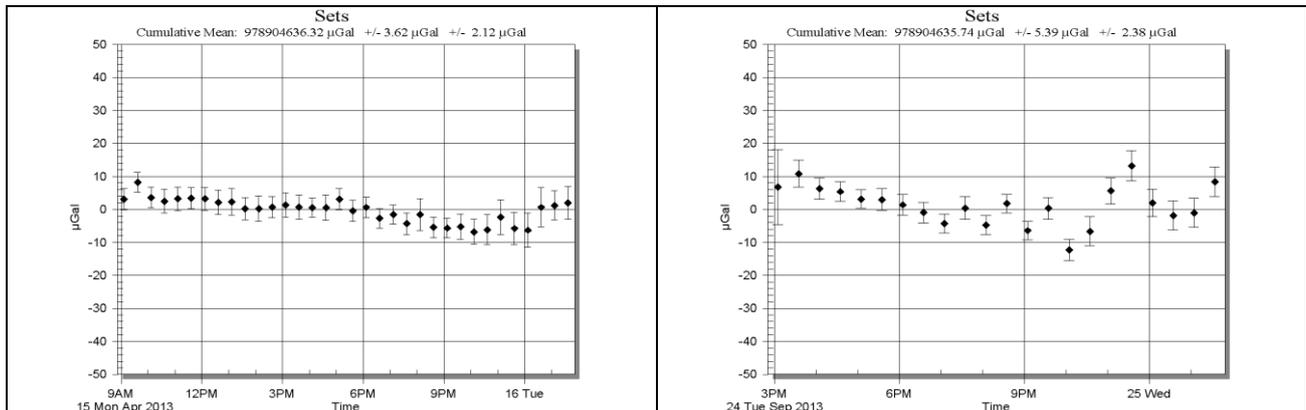


圖 4.2-11 中興站第一(左)、第二(右)期絕對重力量測成果

4.3 重力聯合抽水試驗觀測初步分析

區域地下水資源評估，最為重要的就是該區的水文地質特性描述與水文參數推求。一般評估方式，多以大量建置地質鑽井、水位井等方式，配合水質調查、自然地質外露現況，做為評估依據。但執行上多因耗費龐大，以致取樣點有限，且當進行大範圍推估時，時常遇到時效性較差與取樣不足等情況。本計畫將嘗試以重力觀測提供另一種可能的方法，推估水文地質參數。

以重力方法觀測地下水變化，在國內外皆屬試驗階段，其受限於三大主要

因素，第一為精密重力觀測技術的發展，第二為地質架構的建置，第三為合理數值模式的模擬。陸地重力觀測儀器發展迄今已三十多年，儀器觀測精度不斷提升，現今市售陸地絕對重力觀測儀器，其準確度已可達 $1 \mu\text{gal}$ ，可用於偵測區域地下水位整體變化(Hwang et al., 2009)。經濟部所屬水利署與中央地質調查所，長期投資於台灣地下水觀測與地質架構建置，已對平原區的水文地質架構有著詳盡的描述。數值模式的發展基於詳盡的地質調查與水文模式分析，配合理論計算與高速電腦發展，已趨於可實際反行現地水文變化。如現地重力觀測能與調查現況、數值模擬達到一定程度的對比驗證，其優勢在於花費少、非破壞性監測、涵蓋面積大、環境限制少、高時效與高準確度(Howle, Phillips, Denlinger, & Metzger, 2003)。

以抽水試驗事件而論，抽水試驗藉由連續抽取特定深度之地下水，形成動態的地下水面洩降，藉由水位洩降資料，計算相關水文地質參數。小範圍連續抽水所形成的地下水體質量變化，經重力儀觀測抽水時段的重力變化，即可進行對比驗證。由於抽水試驗的水位洩降呈現三維漏斗狀，傳統上描述重力變化的布格平板已無法滿足抽水試驗的模擬需求。所以本團隊基於物理模式計算相應重力效應的方法，以有限元素解析法的概念描述重力影響效應，概念為將計算單元改為長寬高已知的均質立方體，評估計算單元對測點所造成之吸引力。由於抽水區域質量變化造成測點的重力變化，而抽水過程中僅地下水被抽離，所以應考量 S_y 的貢獻，也就是因抽水而造成重力變化為

$$\Delta g = A_z \times S_y \dots\dots\dots(\text{式 4.3-1})$$

本文利用絕對重力儀在抽水試驗前的背景觀測值與抽水試驗期間觀測的重力值相減，得到重力變化量 Δg 。抽水洩降模型採用 USGS 所發展的 MODFLOW 地下水系統建置軟體(Leiriao, He, Christiansen, Andersen, & Bauer-Gottwein, 2009)，以 groundwater vista 介面進行操作，配合實際觀測水位資料作為邊界條件，並納入已知水文地質參數，建置抽水歷程的三維洩降情形。利用洩降範圍所形成的質量空缺，積分空缺範圍對重力量測儀器的影響 A_z ，藉以模擬重力變化，並推估實驗區可能的 S_y 值。

內城站抽水試驗，實驗位置在宜蘭縣榮源國中($24^{\circ}43'08''$, $121^{\circ}41'15''$)內，於原有地下水位觀測井旁另鑿新井，形成雙井。抽水試驗以新鑿井為連續抽水井與第一觀測井，於抽水期間放置抽水馬達與水位計，同時觀測抽水量與洩降深度，而原水位觀測井為第二觀測井，量測離抽水井一定距離之水位洩降情形。內城站抽水試驗大致分成兩階段，第一階段為分級試水，第二階段為定量試水。於 2013 年 5 月 17 日上午 8 時 37 分起進行五級連續分級試水，每級 100

分鐘，共計 500 分鐘。自第一級抽水量 86.20 cmh，逐級增加抽水量為 117.40 cmh、145.60 cmh、178.40 cmh 至第五級最大抽水量為 205.90 cmh，五級試水後抽水馬達關閉，觀測水位回覆。靜置 24 小時後，5/18 傍晚進行第二階段的定量試水，以固定最大抽水量 205.90 cmh，連續抽水 48 小時，進行相關數據收集與分析。

如圖 4.3-1 所示，在定量抽水開始後的第 86~166 分鐘間，絕對重力數值自基準值 978900157.4 μ gal 降低至 978900155.0 μ gal，重力差值達 2.4 μ gal，重力差值的標準偏差為 0.9 μ gal。數值模擬方面如圖 4.3-2 所示，我們假定一個以抽水井為中心，長與寬皆 100 公尺的實驗區域，地層狀況為均質，並令抽水造成的水位洩降，只發生在距離抽水井 50 公尺以內的範圍，50 公尺以上的洩降其影響量小到可以忽略不計。利用台糖水位觀測計於計算區間中(自定量抽水開始第 86 至 166 分鐘)，抽水井與第二觀測井的平均水位洩降(抽水井 0.87m，第二觀測井 0.33m)資料，作為 MODFLOW 數值模型的水位洩降邊界條件，地質條件則利用抽水試驗報告中的給定參數值作為輸入，模擬一組可能的抽水洩降三維模型。所有計算格點因水位變化而產生的重力變化效應，利用公式(4.3-1)可以求得總影響量 A_z ，而考量實際觀測量重力變化量 Δg 為 2.4 μ gal，利用公式(3)即可推得 S_y 為 0.37。納入絕對重力儀的觀測不確定度，在 68% 的信心水準中，內城站的 S_y 值合理範圍應介於 0.19 至 0.55 間。

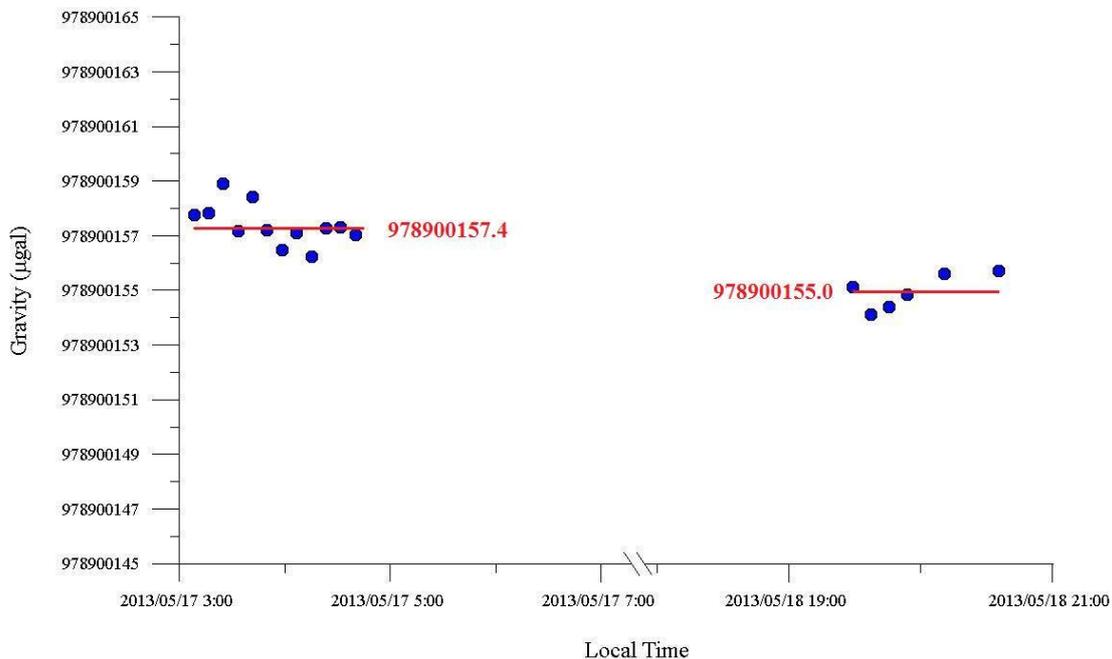


圖 4.3-1 絕對重力儀 FG5 觀測重力背景值(臺灣時間 2013/5/17 03:10~05:00AM)與定量試水期間絕對重力值 (臺灣時間 2013/5/18 19:47~21:07PM)

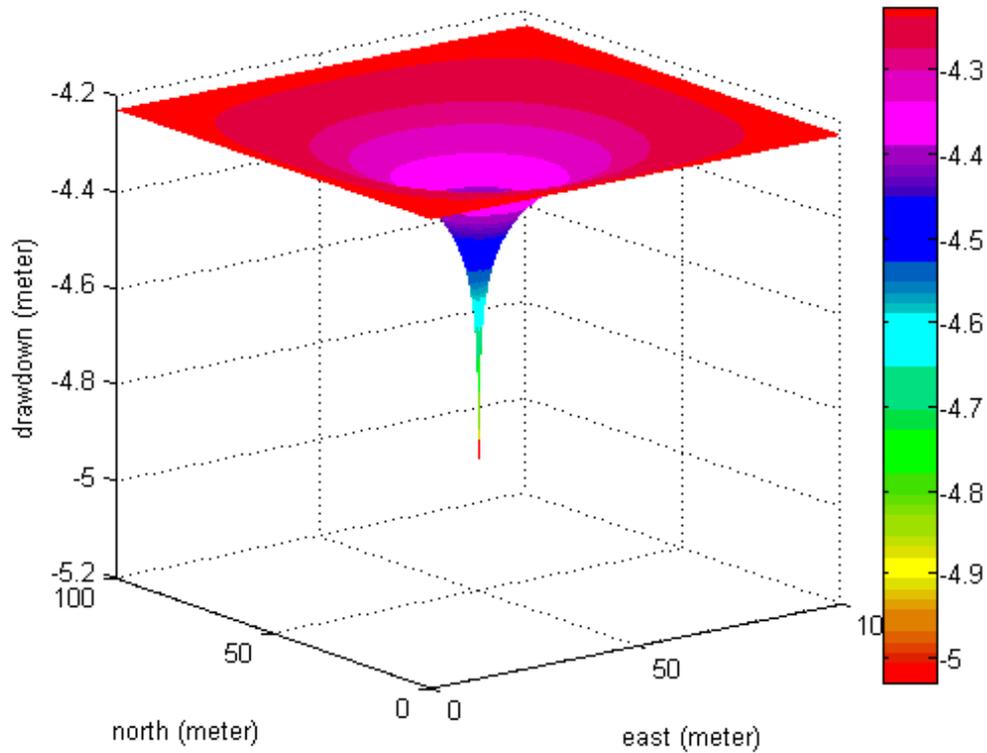


圖 4.3-2 以實際水位觀測資料為控制條件，利用 MODFLOW 模擬內成站抽水狀況之三維洩降圖。

內城站抽水試驗，重力實驗成功於定量試水期間，量得地下水質量損失產生 $2.4 \mu\text{gal}$ 的重力值影響，而數值模擬顯示考量重力觀測不確定度，內城站 S_y 值應介於 0.19 至 0.55。分級試水期間，絕對重力儀觀測到質量之減損，精密水準測量則觀測到地表的微幅變形。分級試水後的靜置期，地下水位回升，絕對重力值也回復至背景重力基準值。雖然評估的準確度尚待改進，但也證明以重力方法進行水文地質參數評估的研究方向，值得持續發展與精進。

第五章 三維水文地質模型建置

在三維水文地質模型建置部分，本計畫將之分為六個階段進行，第一階段為水文地質資料庫建置，藉以達到團隊成員儲存資料、共享資料與協助後續分析之目的。第二階段則以各種輔助分析方法(如頻率分析)，協助分析水文地質架構；第三階段則為綜整前述資料以及專家知識之分析，建立水文地質架構。第四階段則為應用地球物理資料推估水文地質參數，第五階段則為整合水文地質架構與水文地質參數，建立水文地質模型。最後，於第六階段利用水文地質模型，以三維岩性及水文地質參數、搭配地球物理與地球化學分析結果劃設地下水主要補注區。

5.1 水文地質資料庫建置

本計畫為了建立水文地質架構及地下水主要補注區劃設，需先充分收集大量的水文地質資料，並輔以地球物理及地球化學調查資料，方能瞭解研究區域內之水文地質條件並完成本工作項目之執行。然而，大量資料的儲存、管理與維護相當不易，因此本計畫擬藉由資料庫技術，儲存大量現地調查資料與研究成果，透過資料庫易於管理與分享的特點，以便後續研究者分析、檢閱、查詢與分享之用。

5.1.1 資料分類

本計畫所蒐集之資料包含既有之水文地質調查資料，以及新增之地球物理與地球化學現地補充調查成果等，資料種類眾多且資料量十分龐大，因此本節針對本計畫所蒐集之資料進行分類，以作為後續資料庫建置之基礎。首先將資料分為觀測井資訊與非觀測井資訊兩類，此分類方式乃基於資料是否由觀測井所取得。若資料需由觀測井取得，則歸類為觀測井資訊，若不需透過觀測井取得，則歸類為非觀測井資訊。分類結果說明參見圖 5.1-1 與圖 5.1-2。

觀測井資訊可在進一步細分，包括(1)記錄觀測井的基本資訊 (2)地質鑽探所得的岩心資料(3)水文地質分層資訊以及(4)觀測井開篩的位置資訊(5)抽水試驗所推得的水文地質參數(6)歷年水位資訊(7)地下水水質監測資料(8)地下水溫度剖面資料(9)建井時所施作的地物井測資訊(10)岩心定年資料。

而非觀測井資料的部分，則可再細分為(1)一維地電阻資料(2)二維地電阻資料(3)重力量測資料(4)地面水水質監測資料以及(5)歷年雨量資料。

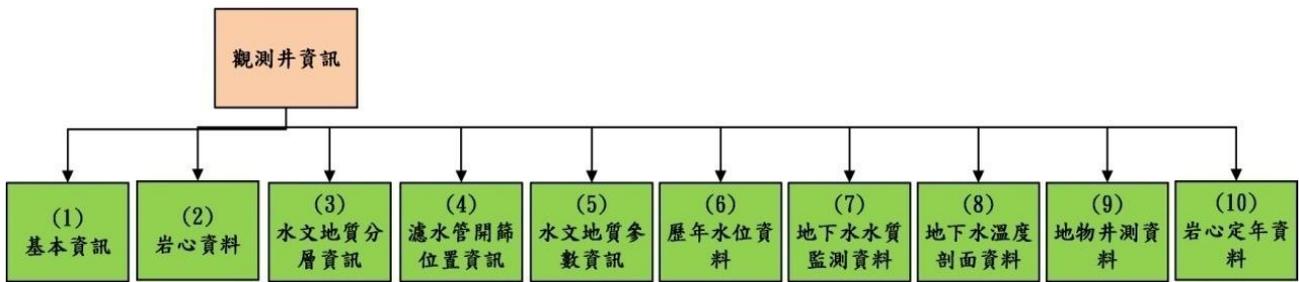


圖 5.1-1 觀測井資料分類

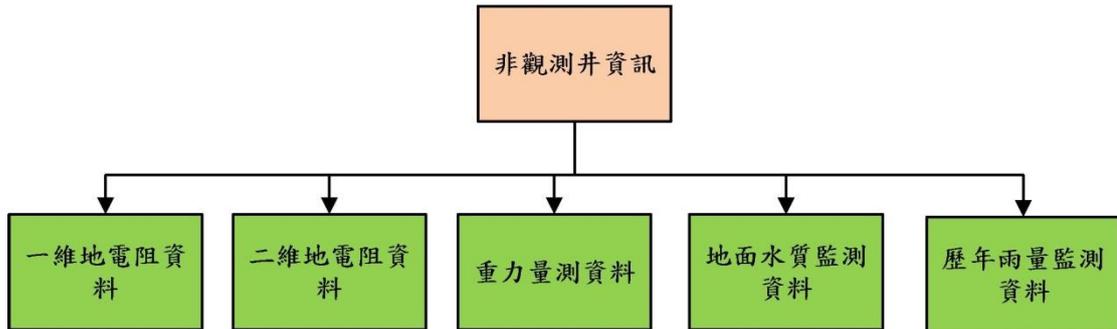


圖 5.1-2 非觀測井資料分類

5.1.2 資料庫架構設計

本計畫需彙整上述圖表內觀測井資訊的 10 類資料，以及非觀測井資訊的 5 類資料，資料量實屬龐大且各資料分散於各檔案。若由一資料庫統一集中管理，對於資料之分析、檢閱、查詢與分享等，皆能產生相當大的助益。

若欲以資料庫彙整各項資料，必先研究各資料其儲存形式與記錄方式，方可設計合適之資料庫架構，將資料做適合的分類，以便使用者對於儲存邏輯一目了然，快速尋找到所需資料。故本計畫將所蒐集之資料種類與資料記錄內容彙整成圖 5.1-3 與圖 5.1-4 所示。

本計畫依據上述資料種類與資料記錄內容，分別設計合適之資料庫表格與欄位，如圖 5.1-3 與 5.1-4 所示，表格與欄位設計內容說明如下所示：

(一) 觀測井資料

表格(1)為基本資訊表，用以記錄觀測井名稱、座標資訊、鑿井方式等建井相關資訊。表格(2)為岩心資料表，用以記錄觀測井之岩心資料，原始之岩心記錄多為由地表往下記錄各段代表性岩性及其對應之深度範圍，為符合原始資料記錄格式，本計畫設計之欄位包括「岩性描述」，以文字描述此段岩心之岩性組成；「上限深度」與「下限深度」則代表性岩性所對應之深度範圍；此外，因為岩心可能由多種岩性或沈積物所組成，因此本計畫再將岩性欄位分為「主要岩性」(即代表性岩性)與「次要岩性」兩個欄位。表格(3)為水文地質分層資訊，

主要為記錄水文地質分層以及各分層之深度範圍。本表之設計欄位包含「水文地質分層代號」、各分層所對應之「上限深度」與「下限深度」。表格(4)為濾水管開篩位置資料表，用以記錄觀測井建置時，所放置濾水管之深度範圍。本表之欄位設計包含「開篩編號」、「上限深度」與「下限深度」。表格(5)為水文地質參數資訊表，用以儲存抽水試驗所得之相關水力參數。本表之設計欄位包括「試驗說明」、「透水係數」、「導水係數」與「儲水係數」。表格(6)為歷年水位資料表，除了記錄水位站每日所量測到的原始水位資料外，亦記錄由本計畫補遺與校正後之水位修正資料。本表格之欄位包括「觀測日期」、「原始水位」與「修正水位」。表格(7)為地下水水質監測資料表，主要記錄本計畫地球化學之補充調查成果，欄位包括「取樣日期」及 17 項水質分析結果。表格(8)為地下水溫度剖面資料表，資料原始格式為自地下水水位面以後，每間隔 5m 測量一點水溫數據。本表之設計欄位包含「深度」與「溫度」項目。表格(9)為地物井測資料表，資料原始格式為從地表往下每增加十公分深度，即記錄一筆地物井測之量測資料，如 16 吋電阻、64 吋電阻、自然加碼與自然電位。本表之設計欄位包含「深度」與四項地物井測項目。表格(10)為岩心定年資料表，資料原始格式為由地表往下記錄標本所在深度與其所測定的年代。本表之設計欄位包含「深度」與「岩心定年」項目。

(二) 非觀測井資訊

非井資料包含一維、二維地電阻資料、重力量測資料、地面水資料以及雨量資料，此五類資料之表格說明如下。

表(1)(2)均記錄地電阻施測相關資料，其中表(1)為記錄一維地電阻之量測與反演結果，表(2)為二維地電阻之量測與反演結果。表(1)與表(2)之欄位設計皆包含「施測日期」、「測線名稱」、「經度」、「緯度」、「電極陣列名稱」、「施測長度」、「視電阻率」、「反演電阻率」，其中視電阻率為儀器於現地所量測之原始資料，而反演電阻率則為將視電阻率進行反演算後所得到之地層真實電阻率。表(3)為重力量測資料表，因本計畫重力團隊所產出之一個重力量測值源自儀器量測一段時間內之多筆資料平均而得，因此一個重力量測值代表一時間區間內之平均值，此概念近似移動平均，同時，此時段內資料之標準差亦用來呈現此筆資料之不確定性。本表格之欄位包括「施測日期」、「測點名稱」、「經度」、「緯度」、「重力值」與「標準差」。表(4)為地面水水質監測資料表，本計畫地球化學補充調查將採集 2 個雨水與 10 個地面水採樣，進行 17 項水質分析。本表之欄位包括「監測日期」、「測點名稱」、「經度」、「緯度」與 17 項水質檢測項目。表(5)為歷年雨量監測資料表，本表記錄氣象局及水利署之雨量資料。本表欄位包括「監測日期」、「測點名稱」、「經度」、「緯度」與「降雨量」。

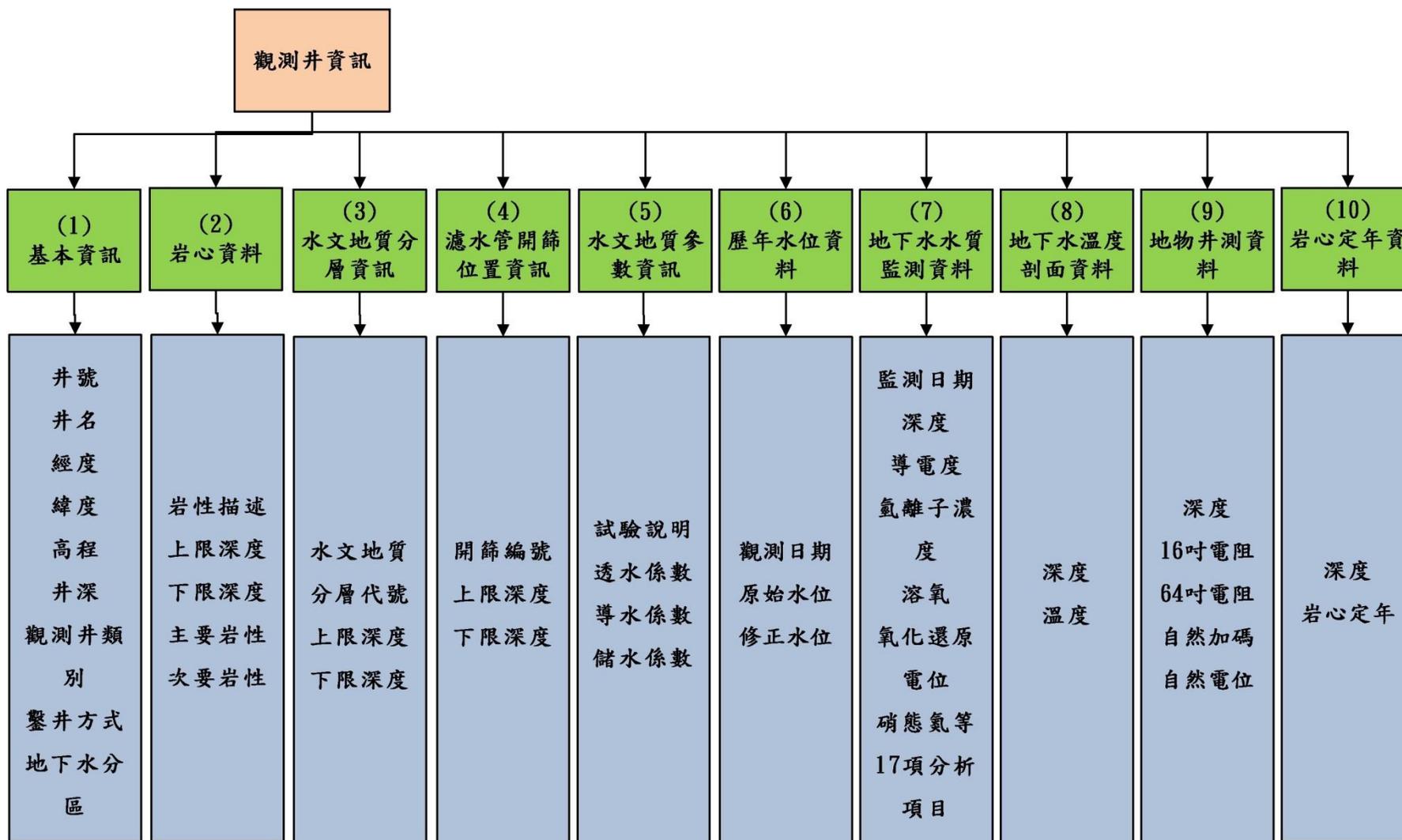


圖 5.1-3 觀測井資料庫架構

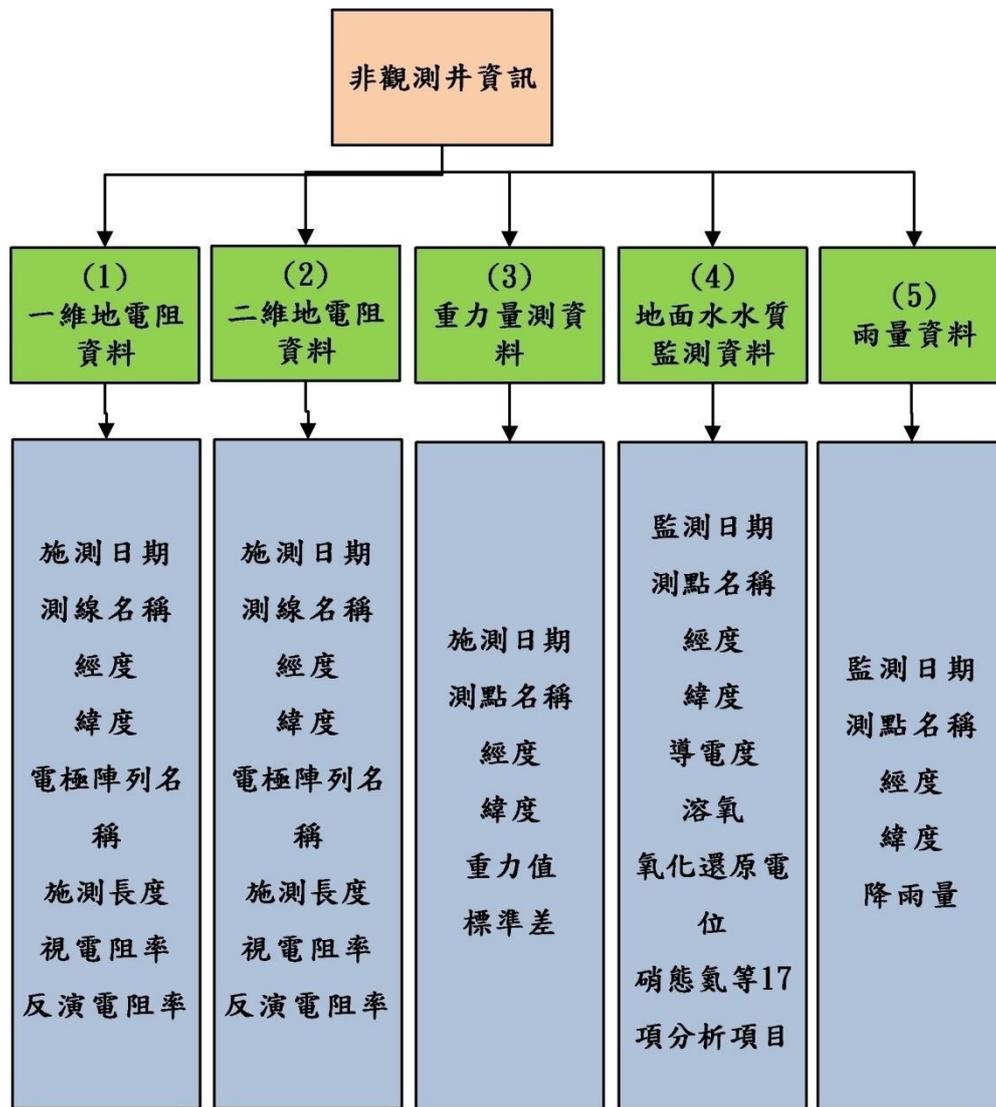


圖 5.1-4 非觀測井資料庫架構

(三) RockWorks 資料庫架構

本計畫採用 RockWare 公司開發之 RockWorks 軟體，其為環境工程、地質或採礦領域廣為應用之資料庫與視覺化繪圖軟體，藉由此軟體，建立符合計畫需求之資料庫，並儲存蒐集之資料與研究成果。

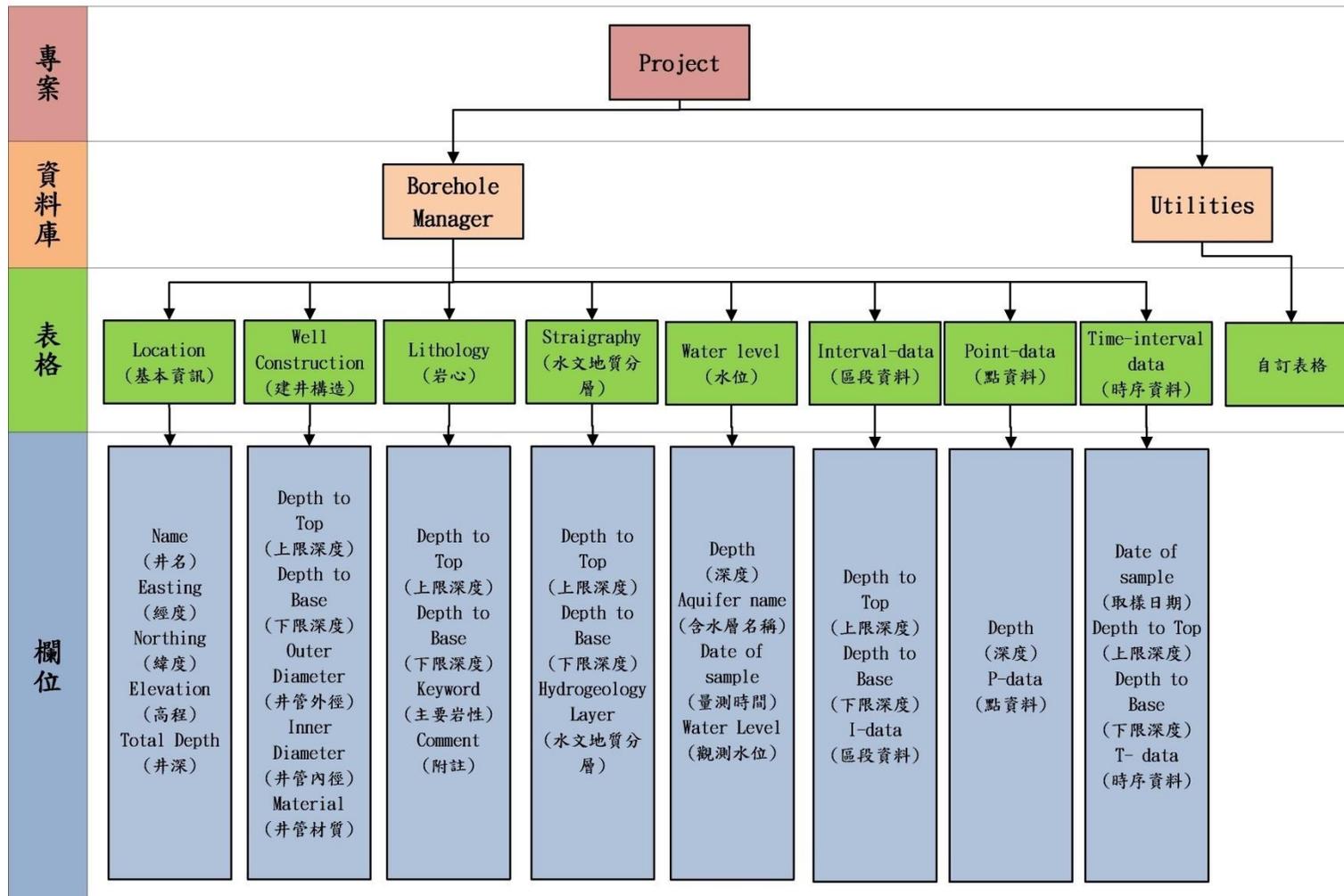


圖 5.1-5 Rockworks 資料庫架構

圖 5.1-5 為 RockWorks 軟體之資料庫架構，此資料庫為專案(project)導向之資料庫，其下可分為 Borehole Manager 與 Utilities 兩類資料庫，分別管理由觀測井產出之資料以及非觀測井產出之資料。

Borehole Manager 為針對觀測井資料所設計之資料庫，其架構如圖 5.1-5 所示，其內建多張表格(table)儲存觀測井相關資訊，如基本資訊表(Location)、井構造表(Well Construction)、岩心資料表(Lithology)、水文地質分層資訊表(Stratigraphy)、水位資料表(Water level)、區段資料表(Interval-data)、點資訊表(Point-data)與時序資訊表(Time-interval data)等八個表格。各表格之欄位設計如圖 5.1-5 之第四階層所示，如以基本資訊表(Location)為例，此表格之欄位包含井名、座標資訊、井深等資訊；而井構造表(Well Construction)可記錄每段深度所對應的內外管徑大小與井管材質；岩心資料表(Lithology)可記錄每段深度所對應的岩心種類與附註；水文地質分層資訊(Stratigraphy)可記錄含水層與阻水層之深度範圍；水位資料表(Water level)可記錄觀測井所在含水層名稱，觀測水位資料與量測時間；區段資料表(Interval-data)則記錄觀測井之垂向深度上，任意一個區間內僅有一個代表值之資料格式；點資訊表(Point-data)可記錄觀測井之垂向深度上，任意一點所代表之數值；時序資訊表(Time-interval data)則可記錄隨時間變化之資料。

而在 Utilities 的部分，為一通用表格的介面，使用者可自由新增表格並設計表格之欄位名稱與儲存資料格式，為一彈性之儲存工具，其亦提供多種資料表樣板(template)，供使用者使用，使用者亦可調整現有樣版之欄位與格式等，以滿足資料儲存需求。本計畫以 Utilities 提供之樣板為主，進行部分調整後，即可儲存本計畫產出之非觀測井資料，使用之樣板包括地球物理資料表(Geophysics)、水文化學資料表(Hydrochemistry)以及水文量測資料表(Hydrography)等多種表格樣板，如圖 5.1-6 所示。各表格之欄位設計如圖 5.1-6 之第四階層所示，其中地球物理資料表(Geophysics)之欄位包含座標資訊與量測數值；水文化學資料表(Hydrochemistry)則記錄測點的名稱與所在的座標資訊以及量測到的水質資訊；水文量測資料表(Hydrography)則記錄量測的座標資訊以及量測時間所對應的降雨量。

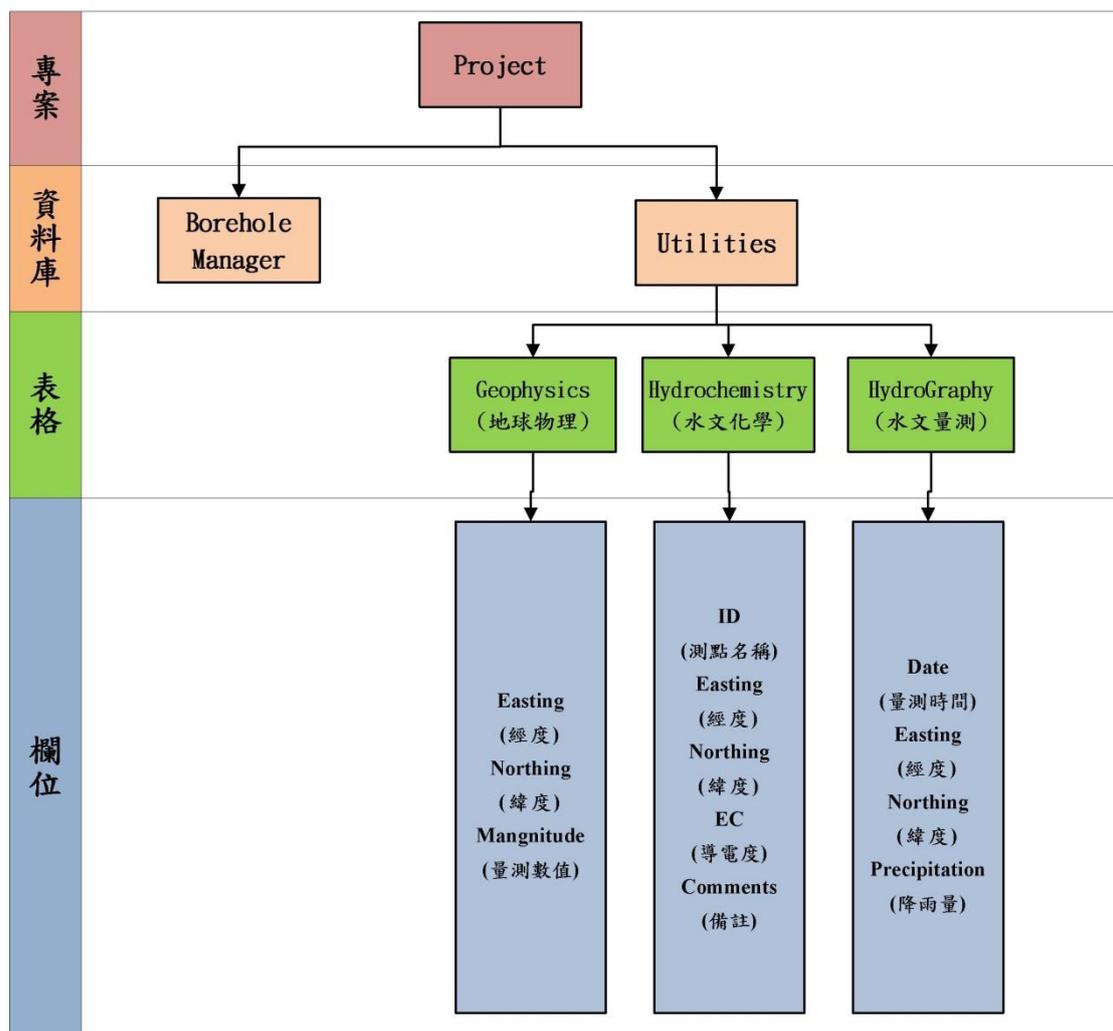


圖 5.1-6 Utilities 資料庫架構

(四) 應用 Rockworks 建立資料庫

由前述小節可知，Rockworks 的資料庫架構以及儲存方式，亦分為觀測井資料與非觀測井資料兩類資料庫，與本計畫所設計之資料庫一致，其中因 Borehole Manager 表格設計之彈性與完備，本計畫所規劃之表格與欄位皆可直接應用 Borehole Manager 進行建置。在非觀測井資料庫建置部分，本計畫則應用 Utilities 建立 5.1.2 節所規劃之表格與欄位。資料庫之建置說明如下：

在應用 Borehole manager 建置觀測井資料庫部分，直接採用 Borehole manager 所設計之資料表樣板(template)，建置 5.1.2 節所規劃之表格與欄位，表 5.1-1 為本計畫所設計之觀測井相關資料表及開發時所採用之 Borehole Manager 之資料表樣版。在基本資訊表部分，本計畫直接以 Borehole Manager 之基本資訊(Location)建立表格，而首要步驟為建立各觀測井基本資訊表，之後資料庫便產生各觀測井所對應之索引值，透過此索引值便可關聯至各觀測井的所有資料表。岩心資料表則可直接套用 Borehole Manager 之 Lithology table 記錄岩心資

料。水文地質分層資訊表則使用 Borehole Manager 之 Stratigraphy table 記錄含水層與阻水層的深度範圍。濾水管開篩位置資訊表則以 Borehole Manager 之 Well Construction table 記錄開篩位置與材質。水文地質參數資訊表則以 Borehole Manager 之 I-data table 記錄某段開篩深度內的水力參數值。歷年水位資料表則應用 Borehole Manager 之 Water level table 記錄時序之地下水位資料。地下水質監測資料表則應用 Borehole Manager 之 Time-interval table 記錄各時間點之取樣結果。地下水溫度剖面資料、地物井測資料表以及岩心定年資料表則應用 Borehole Manager 之 P-data table 記錄每個深度所對應的量測數值。

而本計畫所蒐集的五項非觀測井資訊，乃利用 Rockworks 之 Utilities 資料庫所提供之資料表樣板(template)為基礎，建置 5.1.2 節所規劃之表格與欄位，如圖 5.1-6 所示。因為既有樣板之欄位無法滿足本計畫所需記錄之資料，因此本計畫對現有樣板進行部分調整，以滿足需求。以一維地電阻資料表為例，使用 Utilities 之地球物理資料表(Geophysics)記錄測點的座標位置，並在表格內新增多個欄位記錄施測日期、測線名稱、電極陣列名稱、施測長度、視電阻率以及反演電阻率；而重力量測資料亦使用 Utilities 之地球物理資料表(Geophysics)，記錄測點的座標位置與重力量測數值，並在表格內新增欄位，記錄施測日期、測點名稱與重力標準差；地面水水質資料則使用 Utilities 之水文化學資料表(Hydrochemistry) 記錄測點名稱、測點的座標位置，並在表格內新增欄位記錄「監測日期」與 17 項水質檢測項目。而歷年雨量監測資料表，本計畫使用 Utilities 之 HdroGraphy table 記錄測點的座標位置、量測日期與所對應之降雨量，本計畫再新增一欄位記錄測點名稱。

表 5.1-1 資料庫對照表

分類	本計畫資料表	Rockworks' Table
觀測井資訊	基本資訊	Location
	岩心資料	Lithology
	水文地質分層資訊	Stratigraphy
	濾水管開篩位置資訊	Well Construction
	水文地質參數資訊	I-data
	歷年水位資料表	Water level
	地下水水質監測資料	T-data
	地下水溫度剖面 地物井測資料 岩心定年資料	P-data

5.1.3 資料儲存與視覺化展示

以蒐集之觀測井岩心資料，透過 RockWorks 內建之岩性模式，展示蘭陽平原之三維岩性分布，及本計畫建置之水文地質架構。

本計畫參考地調所之岩心表示方式，以橘色代表黏土，黃色代表細砂，綠色代表粗砂及藍色代表礫石，再以岩性模式展示蘭陽平原之三維岩性分布，如圖 5.1-7 所示。透過此展示工具，研究人員可檢視其內部任意剖面及角度之岩性外。此外，研究人員可自行定義井間之連線，繪製此連線之二維井間剖面圖，如圖 5.1-8 所示；此軟體亦可展示多條任意井間連線之剖面圖以及井群之空間分佈，有助於釐清井間之岩性分布與延續情況，如圖 5.1-9 所示。此軟體亦提供過濾器功能，可依使用者需求設定過濾項目與門檻，求得目標項目之空間分布，例如本計畫欲找尋黏土(clay)之空間分布，以分析阻水層之分布範圍，因此透過過濾器於三維岩性模式中篩選黏土，即可求得黏土之空間分布，如圖 5.1-10 所示。

除了前述岩性資料可視覺化展示外，其他儲存於本資料庫之資料亦可進行三維展示，以含水層架構為例，Stratigraphy table 記錄含水層與阻水層之深度與分布範圍，透過三維展示功能可展示含水層與阻水層之空間分布。此外，本資料表亦可直接讀入 MODFLOW 之分層架構，進行視覺化展示，如圖 5.1-11 所示。本計畫所建置之數值模式共分為四層，由上而下分別為位於含水層一表層部分區域之虛擬阻水層(T0)、含水層一(F1)、阻水層(T1)以及含水層二(F2)，藉由視覺化展示各分層之三維空間分布，使研究者便於檢視模式內部各分層之厚度分布與變化，協助確認數值模式分層架構之合理性。

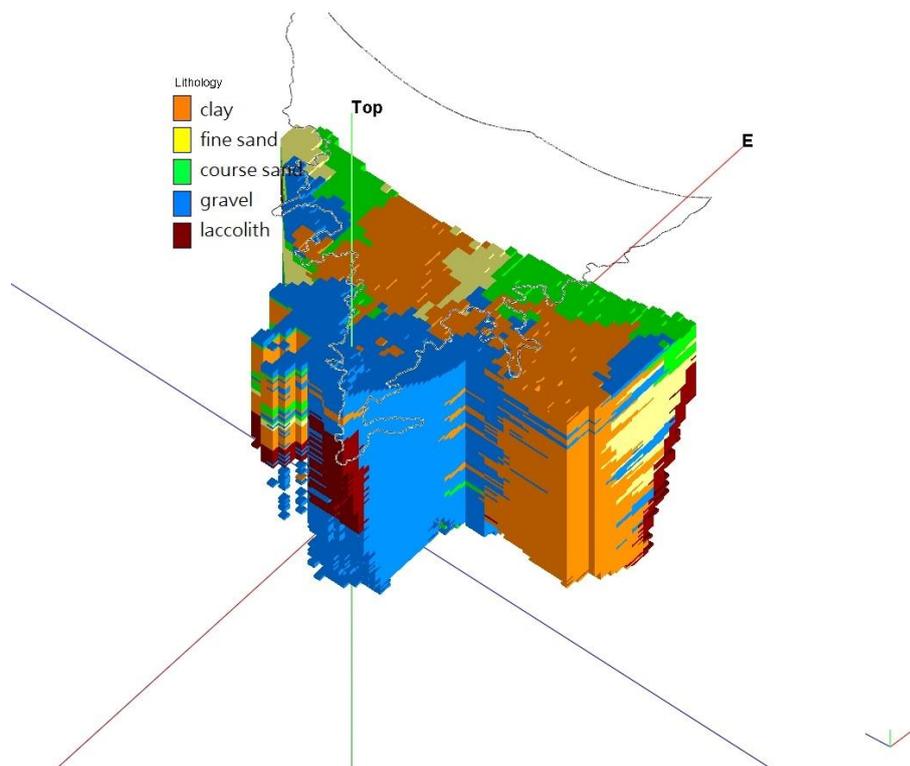


圖 5.1-7 三維岩性空間分布圖

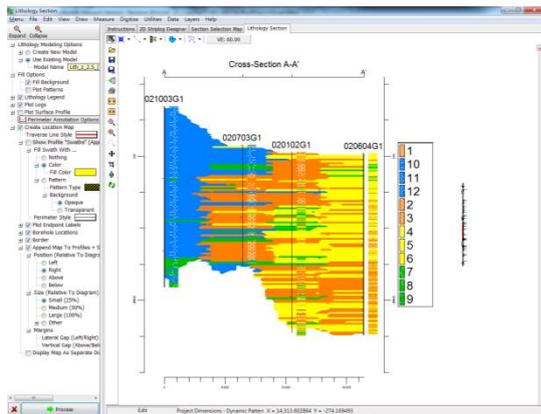


圖 5.1-8 岩性井間剖面圖

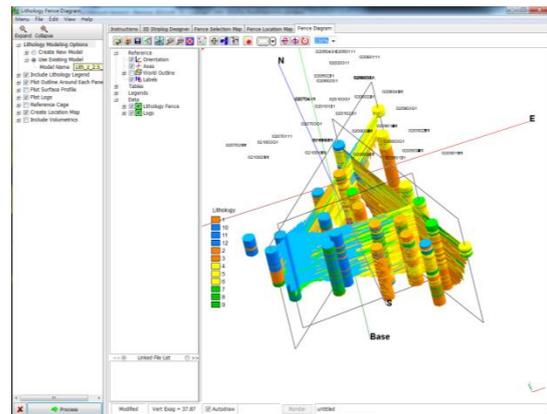


圖 5.1-9 多條井間剖面圖

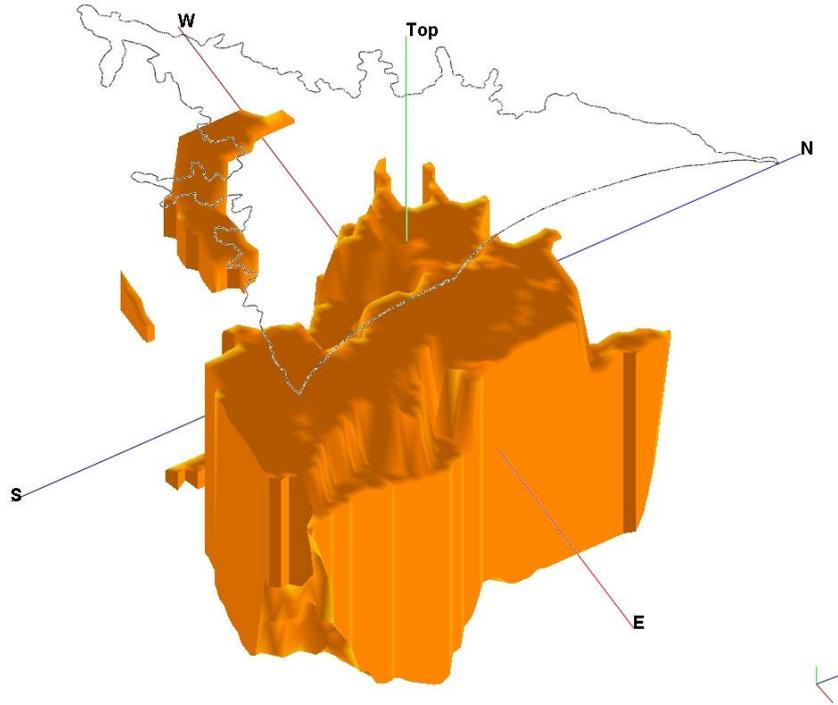


圖 5.1-10 蘭陽平原之黏土空間分布

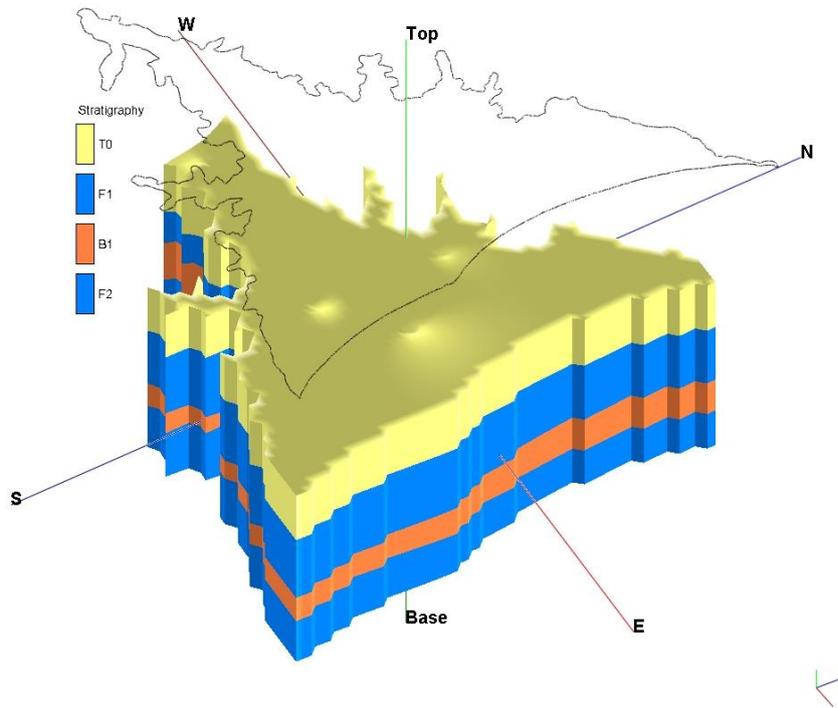


圖 5.1-11 數值模式分層架構

5.2 水文地質架構輔助分析

水文地質架構之建立，傳統是以鑽探取得岩心記錄，或以其他調查方法從研究區域取得更多更新的資訊，例如二維地電阻調查等。除此之外，觀測井觀測水位亦可作為水文地質架構輔助分析之用，本計畫從兩個方面進行水位的分析，一是利用小時水位，搭配時頻分析方法；另一是利用經驗正交函數 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分析系統水位特徵。經驗正交函數部分將於期末報告呈現。

5.2.1 時頻分析之應用

地下水水位受到各種機制之影響，如抽水、補注、地潮等，水位為上述各種機制之綜合反應，由於不同機制本身有其不同之呈現頻率，例如補注受到水文系統之豐枯變化，因此其週期為一年；而抽水屬於人為造成，許多用水方式，因受到日出而作日落而息的工作型態，因此其週期為一日；地潮是月球與太陽對固體地球造成的引力變化，地殼變形間接影響地下水變化，其週期為 12.421 小時，對應的頻率約為一天發生 1.93 次。因此藉由時頻分析，可從水位訊號中，分離出各式各樣不同機制所造成之水位變化。

本計畫應用逸奇科技開發之 Visual Signal 軟體分析蘭陽平原淺層水井的歷年水位資料，分析步驟如下：

1. 應用高通過濾器(High Pass Filter)或低通過濾器(Low Pass Filter)預先處理觀測水位：為避免其他頻率之變化強度過大，掩蓋所欲觀察的頻率，例如待觀察每日變化之強度，由於季節變化之強度遠大於每日變化之強度，則需先濾除季節變化之強度。

2. 以快速短期傅立葉轉換與傅立葉轉換分析觀察與分析

圖 5.2-1 為利用快速短期傅立葉轉換，龍德(1)之一日一次水位頻率時頻圖，恆軸為時間，縱軸為頻率，並以顏色代表強度大小。圖 5.2-2 為龍德(1)之一年一次水位頻率時頻圖。

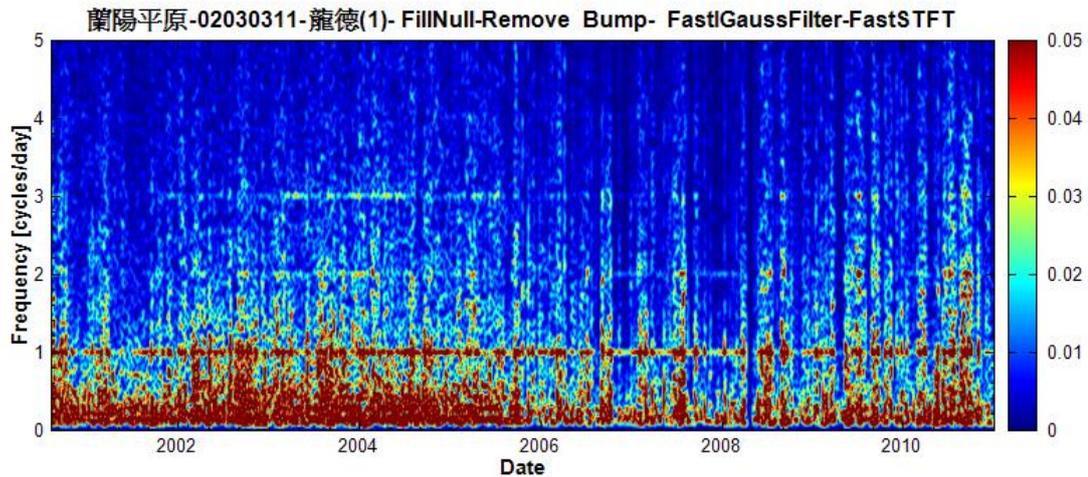


圖 5.2-1 龍德(1) 水位頻率變化時頻圖 (一日一次)

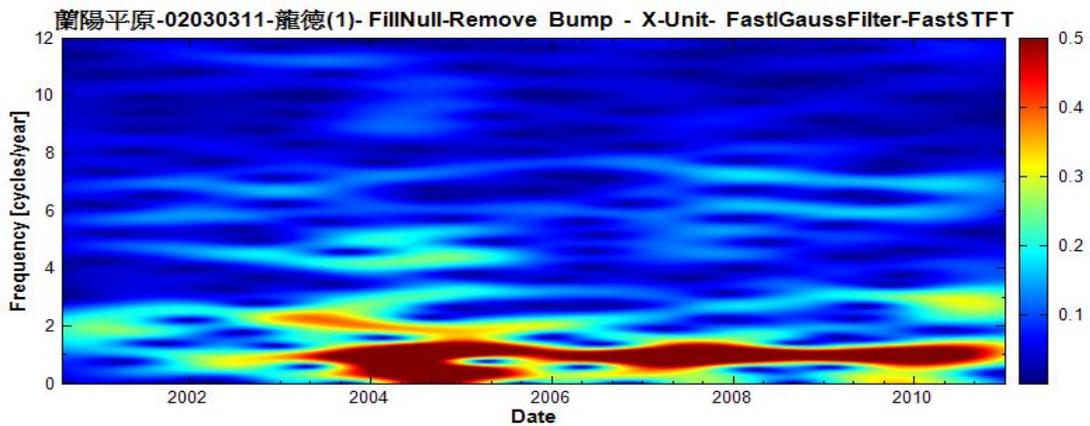


圖 5.2-2 龍德(1) 水位頻率變化時頻圖 (一年一次)

圖 5.2-1 可發現此站每日振幅出現的頻率集中在縱軸的 0 至 1 數值之間，又以縱軸數值為 1 時，能量強度最集中，形成一明顯之高能量直線，這代表此口水位平均每一天都有一個最大震幅的水位跳動，而振幅的大小，可對應到圖中右方的圖例，以本案例為列，此口井每日的水位振幅約為 0.05 公尺。

圖 5.2-2 可發現此站每年振幅出現的頻率集中在縱軸的 0 至 2 數值之間，數字 2 代表一年兩次的頻率。以一年一次頻率下，能量強度最集中，形成一明顯之高能量直線，這代表此口水位平均每一年都有一個最大震幅的水位跳動，而振幅的大小，可對應到圖中右方的圖例，以本案例為列，此口井每年的水位振幅約為 0.5 公尺。

利用快速短期傅立葉轉換所得的強度，會隨著不同時期而有不同的差異。為取得一代表性數值描述該站特徵，傅立葉轉換為較佳之選擇，傅立葉轉換可求得單一強度代表整個歷程。以下分別以一日一次與一年一次為代表，記錄於表 5.2-1。

表 5.2-1 為蘭陽平原淺層水井不同頻率下的水位振福

井名	一天一次水位振幅(公分)	一年一次水位振幅(公分)
宜農(1)	1.73	18.46
岳明國小(1)	0.04	15.71
利澤(1)	0.18	38.25
龍德(1)	7.12	34.09
頭城國小(1)	0.04	10.79
礁溪(1)	6.63	21.85
吳沙(1)	1.41	13.26
二龍	7.77	20.02
礁溪(s)	0.33	18.44
大福國小(1)	12.74	64.89
壯圍(1)	1.58	9.45
古亭(1)	2.56	26.66
公館	0.15	21.62
內城	0.32	64.6
自強國小(1)	1.45	496.94
同樂	4.61	25.5
冬山(1)	3.56	51.37
順安	0.52	36.02
五結(1)	1.52	30.22
中興(1)	0.46	26.2
大隱(1)	0.04	156.14
三星	0.04	637.03
大洲(1)	0.62	74.78

不同淺層站井之強度均不同，以一日一次為例，三星站之強度為 0.0004(m)，亦即每日變化僅 0.04(cm)，極為微小；礁溪(1)站之強度為 0.0663(m)，亦即每日變化達到 6.63(cm)。如何解釋不同站井於不同頻率下之變化呢？

基於井洩降公式，洩降量應為儲水係數或比出水量，與抽水量之函數，如抽水量為定值，儲水係數或比出水量越大，洩降量則越小。如假設蘭陽平原抽水量空間分布差異不大，對於非拘限含水層比出水量較大之站井，其洩降量應較小，亦即一天一次頻率下之強度亦較小；反之，對於拘限含水層儲水係數較小之站井，其洩降量應較大，亦即一天一次頻率下之強度亦較大。

以圖 5.2-3 與 5.2-4 為例，其分別為礁溪(1)與三星之水位變化圖，亦分別為拘限含水層與非拘限含水層，對於非拘限含水層而言，水位歷線顯得極為平順，亦即其一日一次之強度較小，可與前述井洩降公式之推論相互輝映。

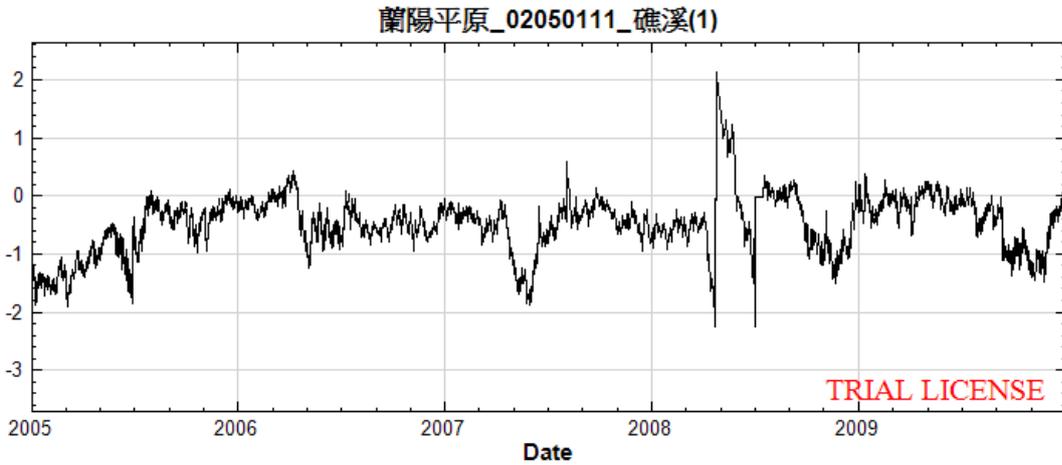


圖 5.2-3 礁溪(1)水位歷線圖

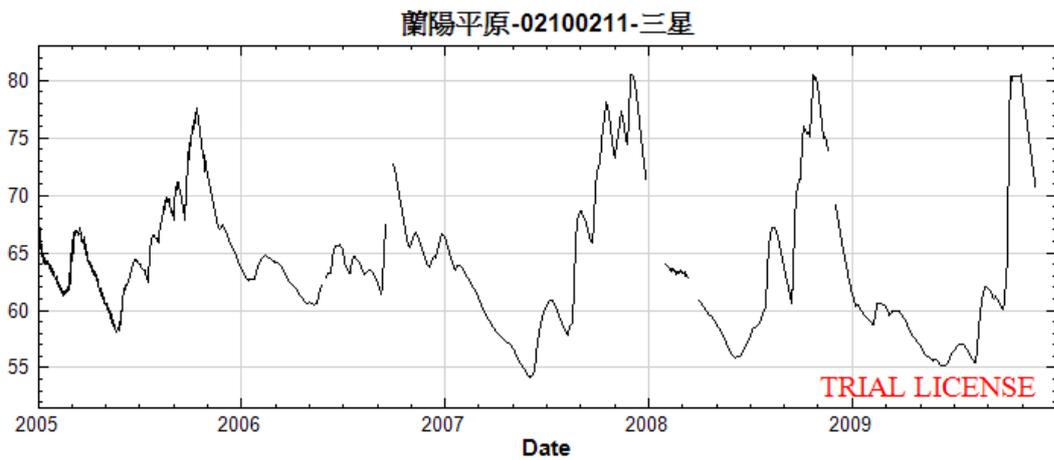


圖 5.2-4 三星水位歷線圖

在一年一次的振幅方面，其呈現該區域的豐枯水文特性，豐水期間降雨量透過補注機制進入地下水系統，大幅提升地下水系統。在高補注區多由非拘限含水層所構成，因上方並無泥層阻隔使得較大比例之降雨量可形成補注量，因此豐水期水位與枯水期水位有大幅差異，以圖 5.2-4 為例，三星站之豐枯水位變化超過 30 公尺以上。反之，在非補注區等拘限含水層，因上方往往有泥層阻隔，而形成拘限含水層，不易受降雨等補注，因此水位振幅變化較小，以圖 5.2-3 為例，除了 2008 年間之變化較不尋常外，龍德(1)站之豐枯水位變化均在 2 公尺以內。因此觀察水位訊號一年一次頻率下的變化強度，可用以呈現當地是否容易受到補注。

觀察含水層水位特性，可發現拘限與非拘限含水層之水位反應不同，非拘

限含水層豐枯水期水位變化顯著，但每日水位變化震幅較不顯著；而拘限含水層特性相反，水位較不易受豐枯水期變化，但每日水位變化震幅顯著。因此本小節以觀測井歷年水位，分析水位變化的震幅與頻率，以日頻率強度與年頻率強度，可分別區分拘限與非拘限之指標，以及補注能力之指標。

(一) 水位日頻率強度

圖 5.2-4 是以表 5.2-1 之資訊為基礎，應用徐昇氏多邊形(或稱 Voronoi Diagram)繪製而成，其中分成高、中與低強度三種等級，分別以紅、綠與藍三種顏色繪製。如前述日頻率強度之大小可做為儲水係數(或比出水量)大小差異之指標，日頻率強度應與儲水係數呈反比，後續將輔以岩心剖面進行驗證。

圖 5.2-4 所示，藍色低強度區域除了上游扇頂外，還包含扇尾區域之頭城(1)、公館、利澤(1)與岳明(1)等站，以及扇央之中興(1)站，應屬於儲水係數(或比出水量)較大者。紅色高強度區域則以同樂、冬山(1)、龍德(1)、礁溪(1)與大福國小(1)等，應屬於儲水係數(或比出水量)較小者。

圖 5.2-5 與 5.2-6 為兩幅地質剖面與位置圖，圖 5.2-5 為頭城至岳明剖面，其位於沿海扇尾區域，地質鑽探井之分布，由北至南分別為頭城國小、竹安、古亭、公館、大錦閘、利澤、岳明國小，顯現淺層含水層為非拘限含水層，其比出水量應大於拘限層。圖中僅有古亭站之地表區域存在阻水層，從日頻率的空間分布圖來看，在相對應之位置亦存在中強度或高強度之站井。

圖 5.2-7 剖面為三星至岳明剖面，其位於蘭陽溪南側，由西往東之地質剖面，以上游三星與大隱等地為非拘限含水層，中游順安一帶均為泥質構造，下游岳明國小一帶又轉為非拘限含水層。從日頻率強度之分布圖而言，亦有相同之趨勢。僅有順安站較為例外，日頻率強度屬於中強度偏低，約為 0.0052(m)，其為全泥質構造，其儲水係數應極低，而應該有較高之日頻率強度。但因為該地區為全泥質構造，基於其並非含水層之緣故，應少有人為用水之行為，因此其觀測水位並無受到人工抽水之擾動，故其日頻率強度偏低。

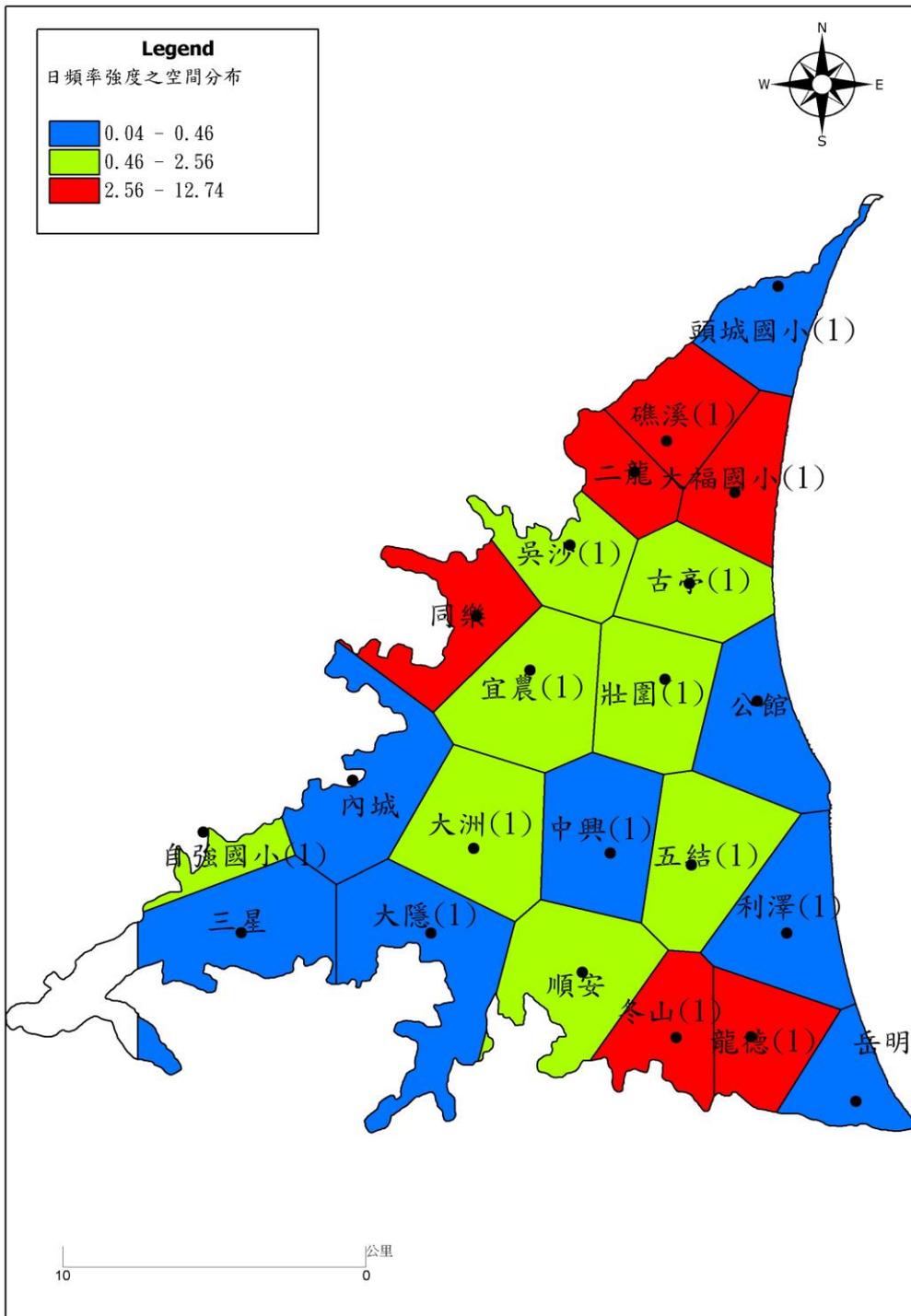


圖 5.2-5 日頻率強度之空間分布

頭城 竹安 古亭 公館 大錦開 利澤 岳明

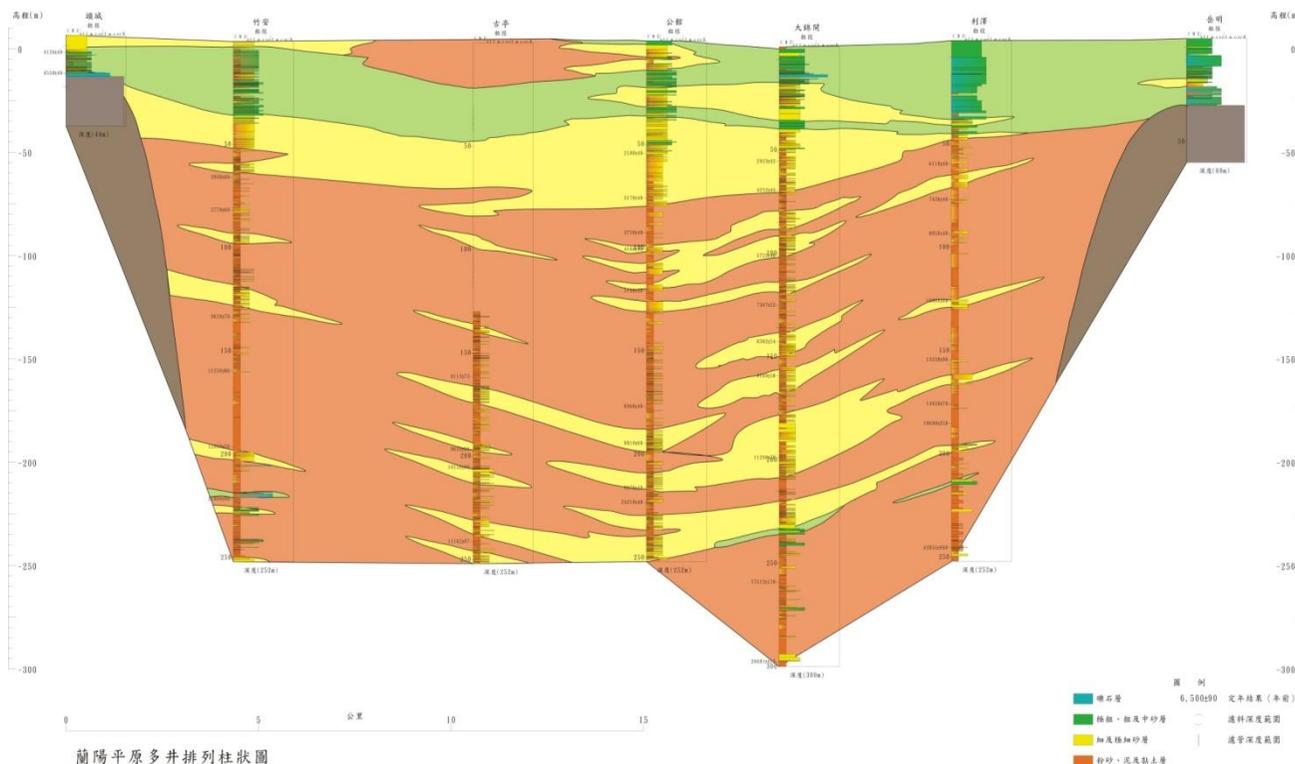
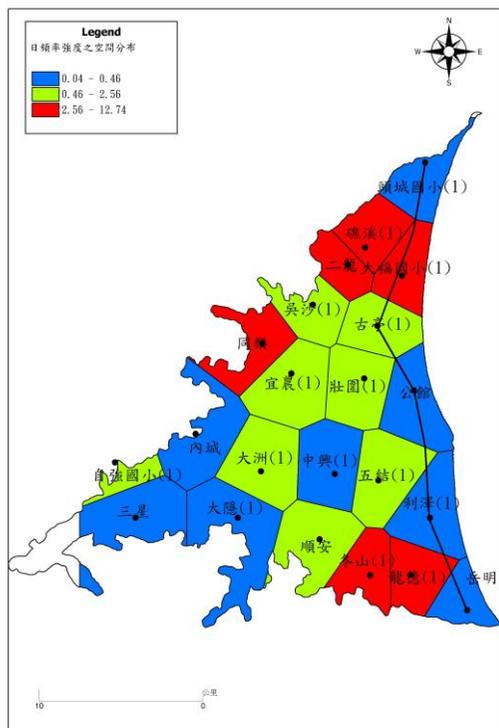


圖 5.2-6 地質剖面與位置圖(頭城至岳明)

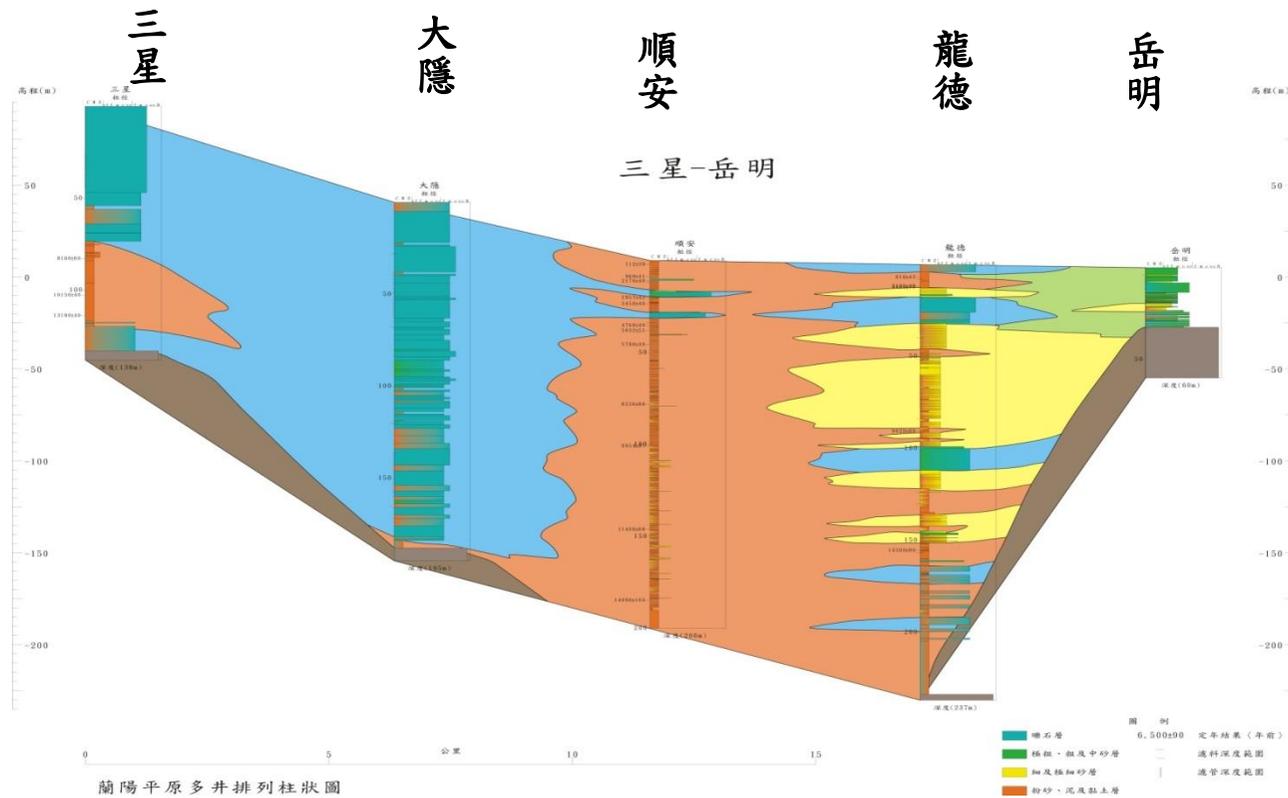
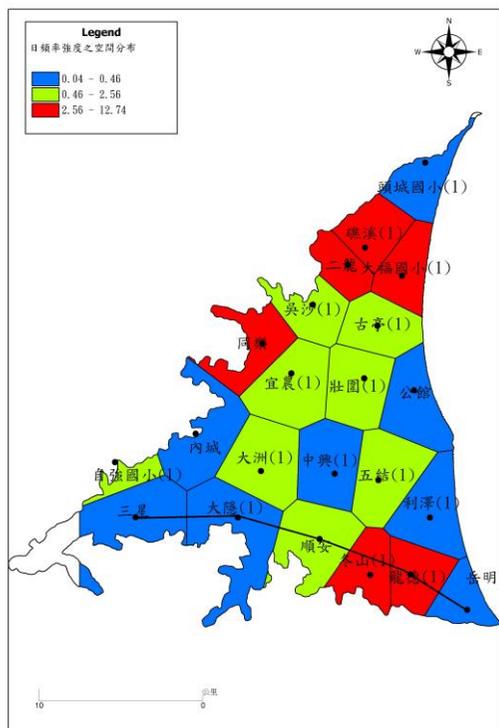


圖 5.2-7 地質剖面與位置圖(三星至岳明)

(二) 水位年頻率強度

圖 5.2-8 為年頻率強度之分布圖，其趨勢主要由上游逐步往下游遞減，僅有下游大福國小(1)仍維持高強度，而古亭站則維持中強度。

如前述年頻率可呈現該站受外部豐枯水文條件之影響，對於上游非拘限含水層而言，因上方並無泥層阻隔補注，水位可於豐水期間迅速補充而抬升，因此年頻率強度高者代表水文系統補注特徵較強者。然而對拘限含水層而言，水位季節豐枯變化相對不明顯。如以圖 5.2-6 與 5.2-7 來看，年頻率高強度區域可充分呈現高補注能力區。

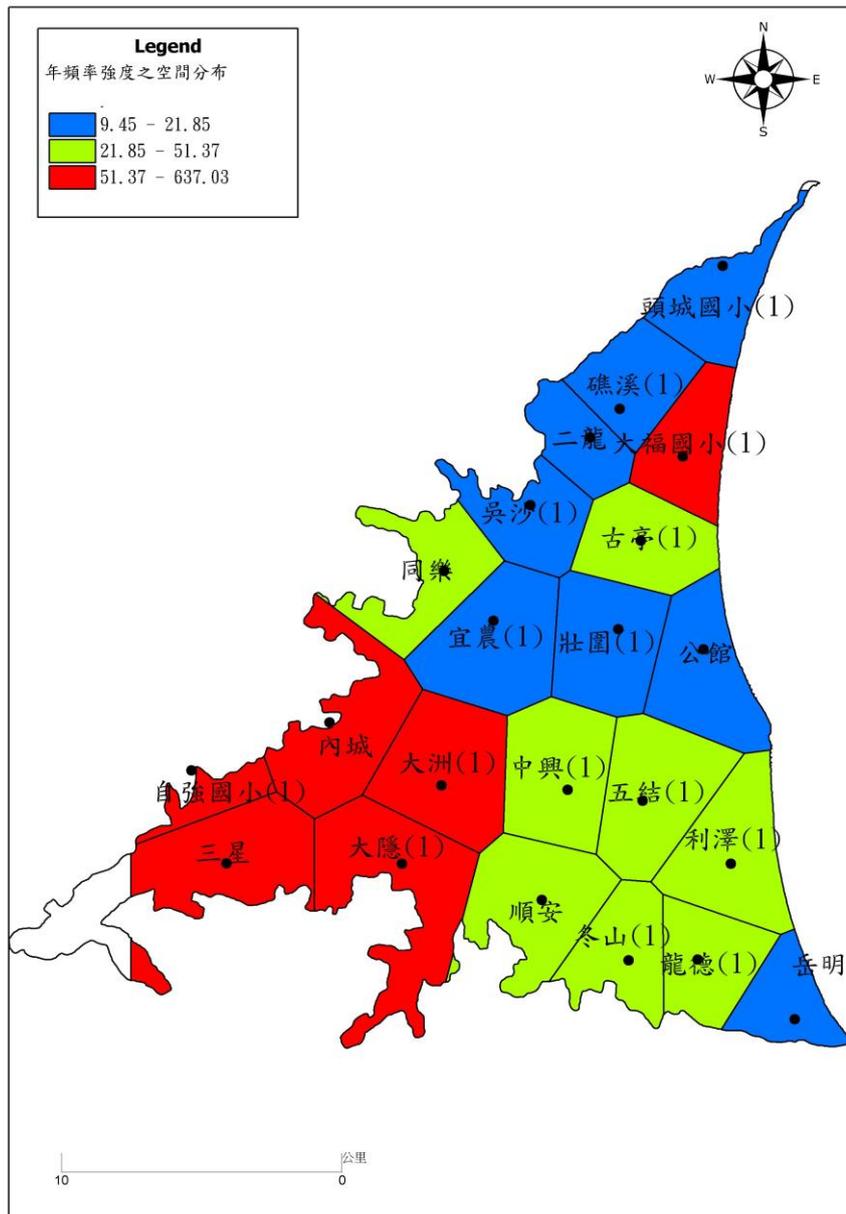


圖 5.2-8 年頻率強度之空間分布

(三) 組合指標分析

在水位日頻率部分，可以呈現含水層儲水係數(或比出水量)之相對高地；在水位年頻率部分，則可以呈現含水層受補注能力之差異，可凸顯其與水文條件的關聯程度。由於本計畫所欲找尋者，需同時具有高補注量與龐大水資源量兩者，在此結合日頻率強度與年頻率強度。

對於非拘限含水層而言，其補注能力強，且比出水量大，因此日頻率強度低，而年頻率強度高；反之，拘限含水層而言，其補注能力低，且儲水係數小，因此日頻率強度高，年頻率強度低，顯現兩種不同頻率的指標反應相反，在此以日頻率強度除以年頻率強度作為綜合指標，因此綜合指標數值小者，代表補注能力強造成水位豐枯變化明顯，且比出水量大造成水位變化平穩。

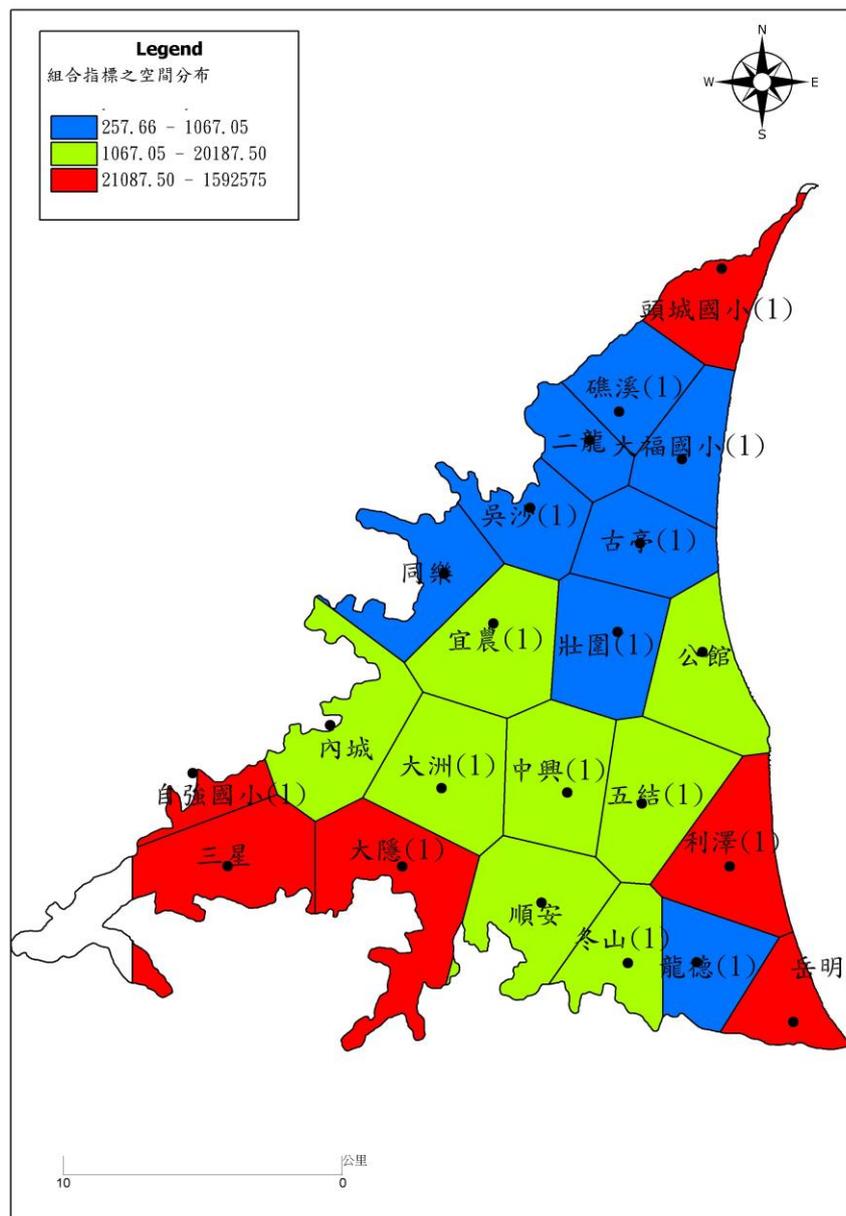


圖 5.2-9 組合指標之空間分布

5.2.2 經驗正交函數法之應用

(一) 經驗正交函數法

經驗正交函數(EOF)可將一個時空間變數拆解成多個時間與空間的變數，這些拆解出來的時空間變數經過乘積與線性疊加之後，可以還原成原本的時空間變數(Hannachi, Jolliffe, & Stephenson, 2007; Hotelling, 1933; Pearson, 1901)，如式 5.2.1

$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) u_k(s) \dots\dots\dots (式 5.2.1)$$

$X(t, s)$ 代表時空間變數矩陣，矩陣維度包含空間座標以及時間序列， $u_k(s)$ 代表此時空間變數的第 k 個空間特徵，亦即第 k 個空間變數； $c_k(t)$ 代表此時空間變數的第 k 個時間特徵，可看作第 k 個空間變數所佔之權重(expansion coefficient)； k 由 1 至 M 按照此 EOF 在原始資料中所佔的解釋變異量大小排列，EOF1 為原始資料中變異量最大的空間特徵，在本計畫中最多僅使用前五個 EOF 即足以解釋原始資料中 70~80% 的變異量。

在原始的 EOF 方法中，首先將資料移除時間趨勢(trend)之後，排列成時間序列×空間座標的數值矩陣 X ，橫列為 p 個空間位置(由 1 到 p)，直欄為該空間位置的 n 個時間序列(由 1 到 n)

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & & & & \vdots \\ x_{31} & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (式 5.2.2)$$

便可計算出共變異矩陣 $S = \frac{1}{n} X^T X$ ，EOF 方法的目標即是找到一些互不相關的(uncorrelated)變數組合以解釋最多的原始變量，亦即找到共變異矩陣特徵向量(eigenvector) $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3 \cdots u_p)^T$ ，使得 X 在經過此單位向量投影轉換後得到的 $X\vec{u}$ 可以有最大的解釋變異量。

$$\max(\vec{u}^T S \vec{u}), \quad s.t., \quad \vec{u}^T \vec{u} = 1 \dots\dots\dots (式 5.2.3)$$

$$\vec{u}^T S \vec{u} = \lambda^2 \dots\dots\dots (式 5.2.4)$$

$$S \vec{u} = \lambda^2 \vec{u} \dots\dots\dots (式 5.2.5)$$

而第 k 個 EOF 即為此共變異矩陣的第 k 個特徵向量 \vec{u}_k ，其對應的特徵值(eigenvalue)為 $\lambda_k^2, k = 1, 2, \dots, p$

$$\lambda_k^2 = \bar{u}_k^T S \bar{u}_k = \frac{1}{n} \bar{u}_k^T X^T X \bar{u}_k = \frac{1}{n} \|X \bar{u}_k\|^2 \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.6})$$

此時的第 k 個特徵值 λ_k^2 即可代表在 \bar{u}_k 方向的投影所解釋的變異量，通常特徵值由大到小排列 $\lambda_1^2 \geq \lambda_2^2 \geq \dots \geq \lambda_p^2$ ，而經由 \bar{u}_k 投影的解釋變異量百分比可以表示為：

$$\frac{100\lambda_k^2}{\sum_{k=1}^p \lambda_k^2} \% \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.7})$$

將原始資料經由第 k 個 EOF： $\bar{u}_k = (u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kp})^T$ 投影後所得的 $\bar{a}_k = (a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{nk})^T = X \bar{u}_k$ 即為第 k 個 PC (principal component)，可將 \bar{a}_k 改寫為：

$$a_{ik} = \sum_{j=1}^p x_{ij} u_{kj} \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.8})$$

至此可將式(5.2.8)與式(5.2.1)進行對照，在式(5.2.1)中的 $c_k^{(t)}$ 與 $u_k^{(s)}$ 即為式(5.2.8)中的 x_{ij} 與 u_{kj} 。

然而在目前的實務應用上，當時空間變數的維度增加時，共變異矩陣的大小也就相應增加，一個過於龐大的共變異矩陣在計算特徵值的過程會變得過於複雜，因此我們利用奇異值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 這個線性代數的工具來替我們解決特徵值的問題。SVD 可以將一個 $n \times p$ 的資料矩陣 X 分解：

$$X = A \Lambda U^T \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.9})$$

其中 A 與 U 分別為 $n \times r$ 與 $n \times p$ 的 unitary atrices $A^T A = U^T U = I_r$ $r \leq \min(n, p)$
 Λ 則為奇異值組成的對角矩陣 $\Lambda = \text{Diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$

此時把資料矩陣用 $\sqrt{n}X$ 代入：

$$\sqrt{n}X = A \Lambda U^T \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.10})$$

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{n} X^T X \\ &= (A \Lambda U^T)^T (A \Lambda U^T) \\ &= U \Lambda^T A^T A \Lambda U^T \\ &= U \Lambda^2 U^T \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.11}) \end{aligned}$$

$\Lambda^2 = \text{Diag}(\lambda_1^2, \lambda_2^2, \dots, \lambda_r^2)$ ，便可得到與式(5.2.5)類似的式子。

回到式(5.2.9)，利用 SVD 所解析出的 A 矩陣中之直欄 $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_r$ 即為 EOF， U 矩陣中之欄 $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_r$ 則為 PC，且 EOF 之間彼此垂直、PC 之間彼此不相關。我們可以將式(5.2.9)改寫成如下形式：

$$X = \sum_{k=1}^r \lambda_k \bar{a}_k \bar{u}_k^T \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.12})$$

$$\bar{x}_t = \sum_{k=1}^r \lambda_k a_{tk} \bar{u}_k \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.13})$$

此時可將式(5.2.15)看作式(5.2.8)的向量形式，再與式(5.2.1)進行對照：

$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) u_k(s) \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.1})$$

$$a_{tk} = \sum_{j=1}^p x_{tj} u_{kj} \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.14})$$

$$\bar{x}_t = \sum_{k=1}^r \lambda_k a_{tk} \bar{u}_k \quad \dots\dots\dots(\text{式 5.2.15})$$

$c_k(t) = x_{tj} = \lambda_k a_{tk}$ $u_k(s) = u_{kj} = \bar{u}_k$ ， $c_k(t)$ 即為此時空間變數的時間變量

(expansion coefficient, EC)，通常亦被稱為 EOF 振幅(EOF amplitude)、PC 時間序列(PC time series)、PC 得分(PC score)；而 $u_k(s)$ 則為空間變量 EOF，或是被稱為 PC 權重(PC loading)。本計畫預期利用 EOF 分析將一個時空間變化之地下水位拆解成時間與空間的變數，使得原本極為龐大的地下水時空變動資料維度縮減到最重要的數個時空特徵，並從中找出可作為拘限與非拘限含水層辨識之特徵。

(二) 應用 EOF 於拘限與非拘限含水層推估之分析流程

本 EOF 分析方法首先蒐集研究地區各測站長期之地下水位變動資料，透過資料矩陣化處理，將資料整理為一個大型矩陣，並假設將原始變數 x_1, x_2, \dots, x_p 做線性組合，轉換為一組新的變數 z_1, z_2, \dots, z_p 。透過矩陣特徵值(eigenvalue)與特徵向量(eigenvector)的計算，找到新變數之應有的主要時間變動(EC)與其對應之空間權重(EOF)完成 EOF 分析，之後再將 EOF 分析結果繪圖，並與現地觀測資料，如水位與岩心資料等，進行比對分析，探討拘限與非拘限含水層之可能範圍。完成拘限與非拘限含水層範圍分析後，本計畫進一步應用岩心資料與地電阻試驗成果，檢驗 EOF 推估拘限與非拘限含水層範圍之合理性與適用性。

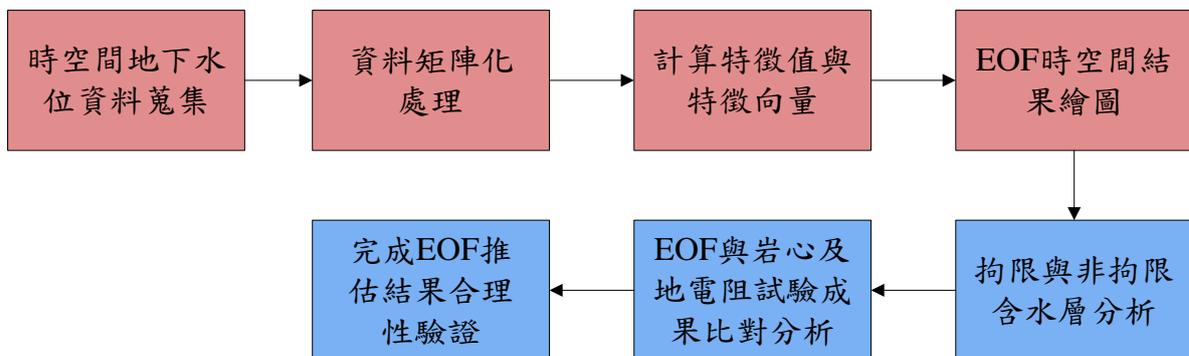


圖 5.2-10 蘭陽平原 EOF 分析流程圖

(三) 拘限與非拘限含水層分析結果與驗證

在完成 EOF 分析後，可求得各時空特徵(EOF)之解釋比例，如表 5.2-2 所示。由表 5.2-2 可知，EOF1(第一主要特徵)之解釋比例將近 7 成，EOF2(第二主要特徵)將近 1 成，其餘時空特徵之解釋比例則較低。

本計劃由分析結果中，得知 EOF1 應與拘限及非拘限含水層相關性較大，因此本計劃將針對 EOF1 之分析進行說明。圖 5.2-11 為第一個時空特徵(EOF1)之分析資料，包含 EOF1 在時間上變化之特徵-EC1、蘭陽平原降雨之時間分佈以及地下水觀測井之水位歷線。由 EC1(圖 5.2-11(a))與降雨(圖 5.2-11(b))比對可知，EC1 與蘭陽平原之豐枯水期變化一致。EC1 之尖峰大約在每年之 9 月至 11 月，低點約在 6 月份前後；而蘭陽平原之豐水期亦約在每年之 9 至 11 月，枯水期約在 5 至 7 月。由此可知，第一個水位變化的主要特徵之時間序列 EC1 代表了豐枯水期引起之水位變化特徵，而此水位變化特徵在蘭陽平原佔了將近 70% 的比重。圖 5.2-12 則代表 EC1 所對應的主要空間特徵分布情形，圖上之顏色代表權重大小，權重越大的區域，代表越具有如 EC1 時間變動的趨勢，亦即受豐枯水期之影響越顯著。而非拘限含水層因為表層無阻水層覆蓋，因此較易受降雨影響，故可推論豐枯水期特徵越明顯之區域，其越可能為非拘限含水層。由圖 5.2-12 可知，扇頂區域之權重較大，其值約在 0.1 以上，包含三星、自強、內城與大隱等站。宜農、中興與五結一帶則是權重最低的區域，代表此一區域較不受豐枯水期之降雨影響，因此該區域較有可能為拘限含水層。由圖 5.2-12 可知，權重由高轉低的交界約在權重值為 0.1 的等值線上，因此初步以此權重作為拘限與非拘限含水層之交界。

為了驗證以 EOF 推估拘限與非拘限含水層之正確性，本研究挑選位於權重大於 0.1 範圍內之觀測井，如三星與自強，以其水位歷線與 EC1 進行比較，如圖 5.2-11(c)與圖 5.2-11(d)所示。由此兩圖可知，自強與三星觀測井之水位變化與 EC1 相當一致，亦與降雨之豐枯變化一致，由此可知此兩口井明顯受到降雨的影響。此外，由此兩口井之岩心可知(圖 5.2-13(a)與圖 5.2-13(b))，在其含水層一之開孔(Screen)上方並無泥層覆蓋，故其地下水位易受降雨影響，而此兩口井開孔所處含水層則屬於非拘限含水層。此結果與 EOF 之分析推論結果一致。

本計畫進一步以二維地電阻之試驗成果檢驗 EOF 推估結果之合理性。二維地電阻之試驗成果，可以二維剖面圖呈現地表至地層中之電阻分布情況，其中高電阻代表土層由礫石或粗砂組成，而低電阻則代表土層中含有較多泥質。因此，本計畫所欲找尋之非拘限含水層應為通透不含泥之區域，意即二維地電阻剖面應呈現高電阻而甚少低電阻之分布；若表層呈現較低電阻值，則代表該區域之地層表層存在泥質等較不透水物質，不利於降雨入滲而影響地下水補注。透過二維地電阻剖面圖與 EOF1 之空間權重分布比較，可較岩心鑽井資料提供更多資訊，更加嚴謹的檢驗 EOF 分析結果之合理性。

二維地電阻測線之空間分布如圖 5.2-14 所示，本計畫挑選位在權重值 0.1 等值線附近之測線進行分析，包括 line 04, line 07, line 17, line 22, line 23, line 24, line 25, line 29 與 line 36，其二維地電阻剖面圖如圖 5.2-15 所示，圖中紅色代表極高電阻(300 Ohm-m)，橙黃色代表高電阻(約 100 Ohm-m)，藍色代表極低電阻(<10 Ohm-m)，綠色代表低電阻(約 30 Ohm-m)。

首先分析 line 04, line 07 與 line 36 所在區域。由圖 5.2-15 可知，line 36 與 line 07 之二維地電阻剖面圖大都呈現高電阻值(紅色)，顯示該區域表層無泥質覆蓋，而相距不遠處之 line 04，其表層則呈現大量藍色分布，代表該區域表層覆蓋大量低阻物質，應屬較不透水之區域，因此以權重 0.1 作為拘限與非拘限含水層之分界，在此區域應屬合理。

接著分析 line 17, line 22 與 line 23 所在區域，由圖 5.2-15 可知，line 17 二維地電阻剖面圖表層呈現連續之藍色分布，代表該區域表層應有低阻物質覆蓋，其通透性應較差；而 line 22 與 line 23 之剖面圖，則呈現紅色，屬高阻反應，因此應屬較為通透之地層。由圖 5.2-14 可知，line 17 位於權重 0.1 之等值線上，其屬較不透水之區域，而 line 22 與 line 23 則屬於較透水區域，因此本區域之非拘限與拘限含水層交界之門檻應略大於權重 0.1。

在 line 24, line 25 與 line 29 所在區域中，line 24 在埋深 17 公尺處，電阻值偏低，透水性應屬不佳，而 line 25 與 line 29 則呈現極高阻反應，應為通透性極佳之區域，因此本區域之非拘限與拘限含水層交界之門檻應略大於權重 0.1。

綜合前述分析可知，在 EOF 分析所推估之非拘限與拘限含水層交界附近，各區域之地電阻測線剖面大都呈現高電阻轉低電阻之分布，可推測 EOF 所推估之交界應相當接近實際之非拘限與拘限含水層交界；此外，位於此推估交界內之岩心資料皆顯示通透之特性，無泥層覆蓋於表層，屬非拘限含水層之特徵。由此可知，EOF 分析可以有限之觀測水位資料，推估研究區域之非拘限含水層範圍，且推估結果與實際之非拘限含水層範圍接近，因此未來在執行其他地下水區之主要補注區劃設時，應可以 EOF 之推估結果，作為後續現地試驗調查之參考。

表 5.2-2 前五名之時空特徵解釋比例

時空特徵	EOF1	EOF2	EOF3	EOF4	EOF5
解釋比例	68.67%	10.59%	6.43%	3.25%	2.85%

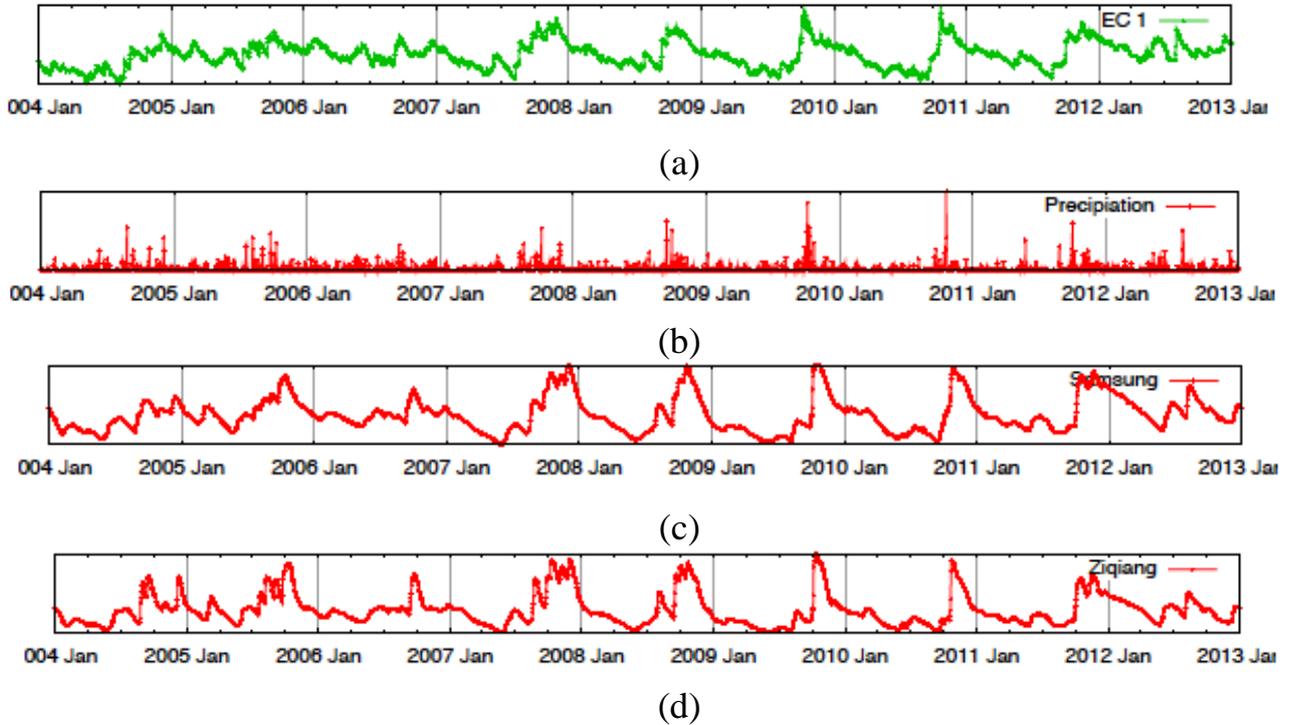


圖 5.2-11 EC1、觀測井地下水位及降雨量歷時分佈圖。(a)EC1 歷線圖。(b) 蘭陽平原降雨時間分布圖。(c) 三星(1)水位歷線圖。(d) 自強(1)水位歷線圖。

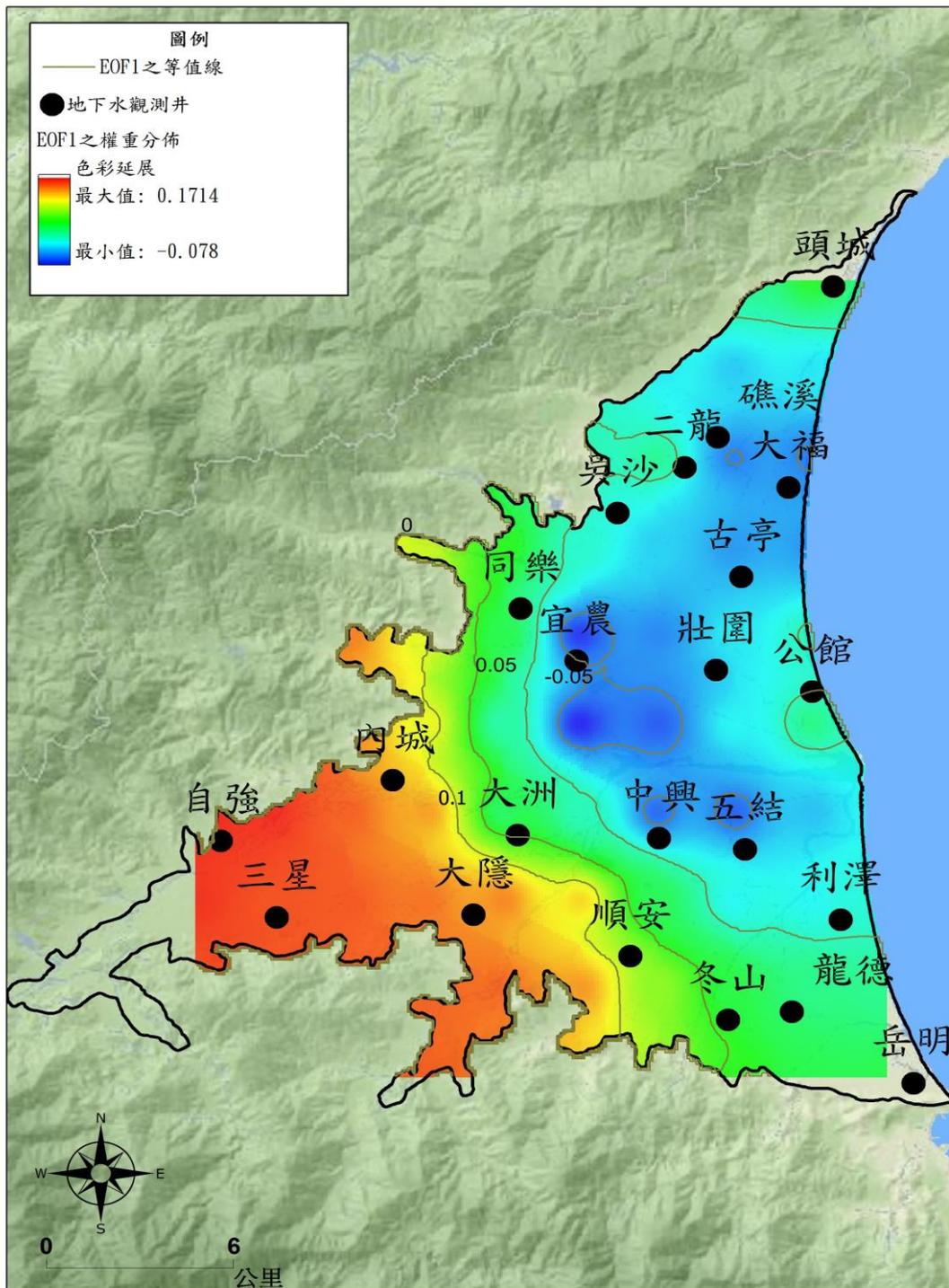
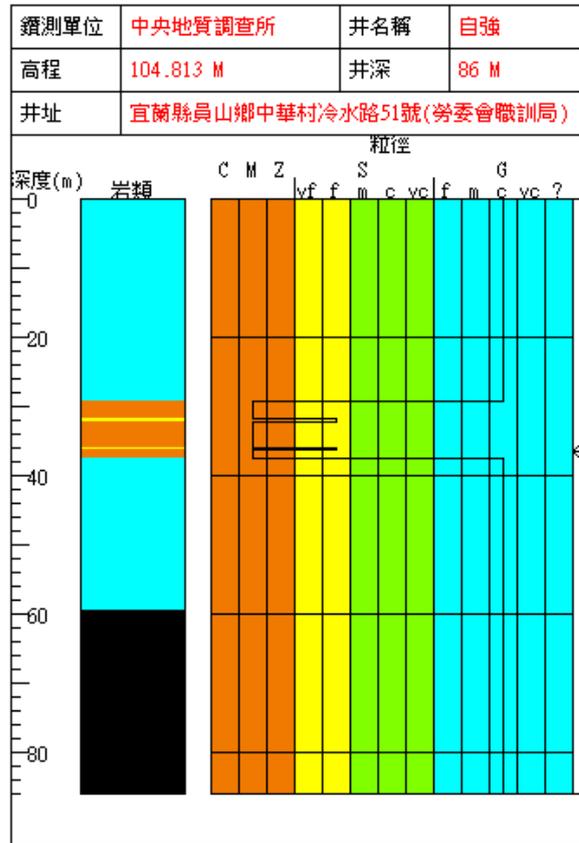
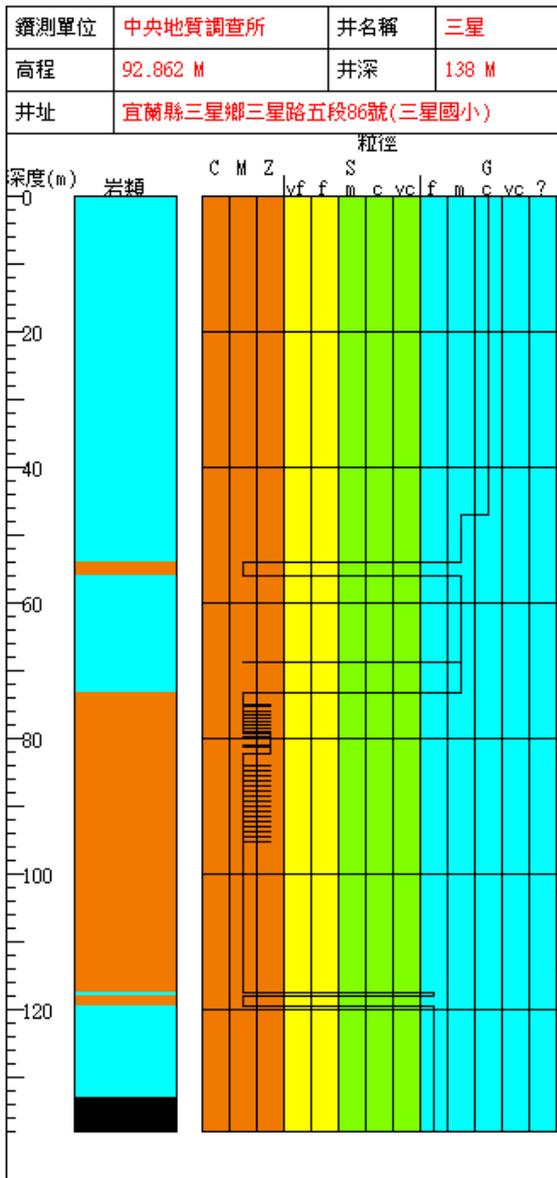


圖 5.2-12 EOF1 之權重分佈



(a)

(b)

圖 5.2-13 岩心柱狀圖。(a)三星岩心柱狀圖。(b)自強岩心柱狀圖。

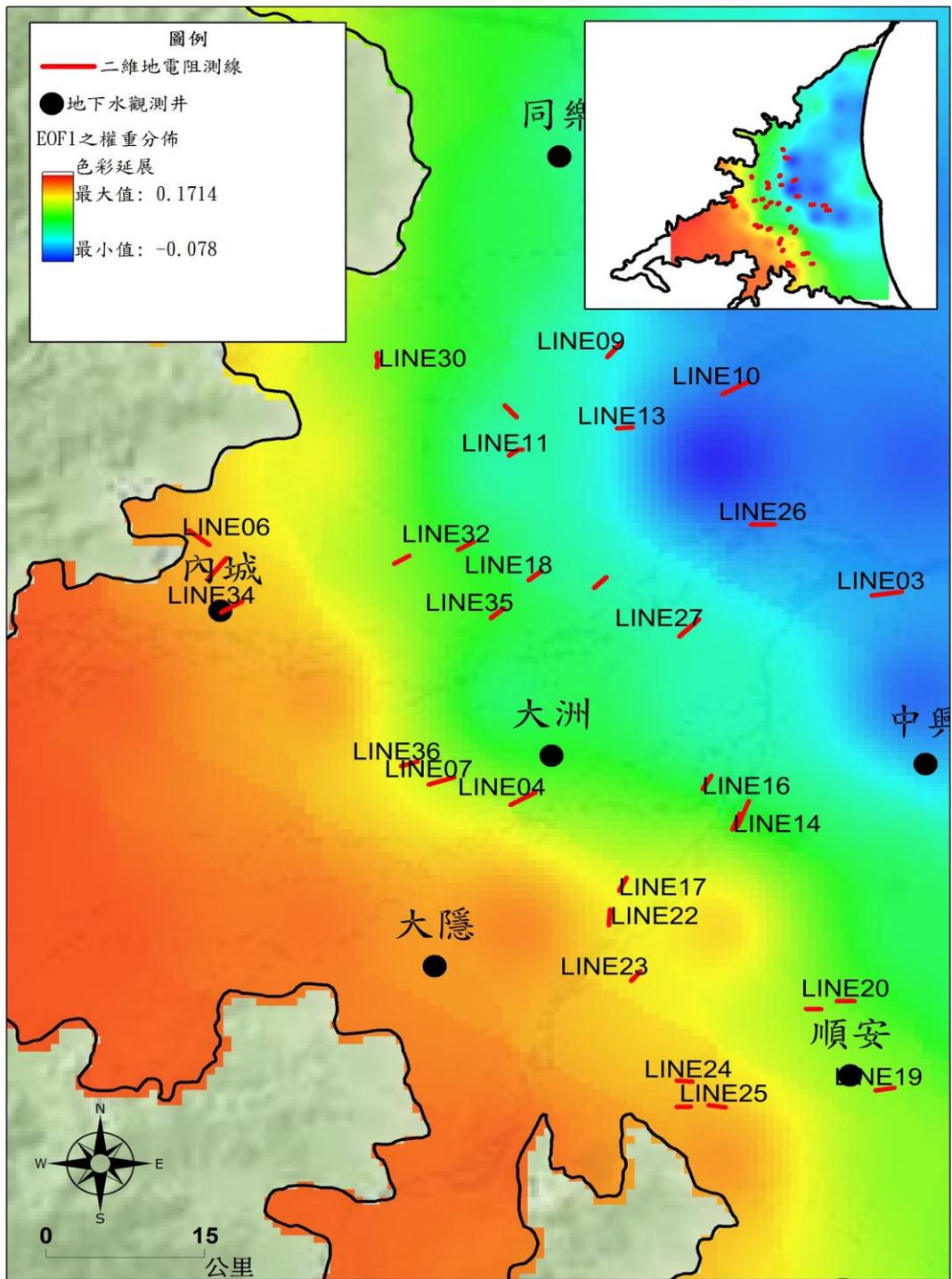


圖 5.2-14 EOF1 之權重與二維地電阻分布圖

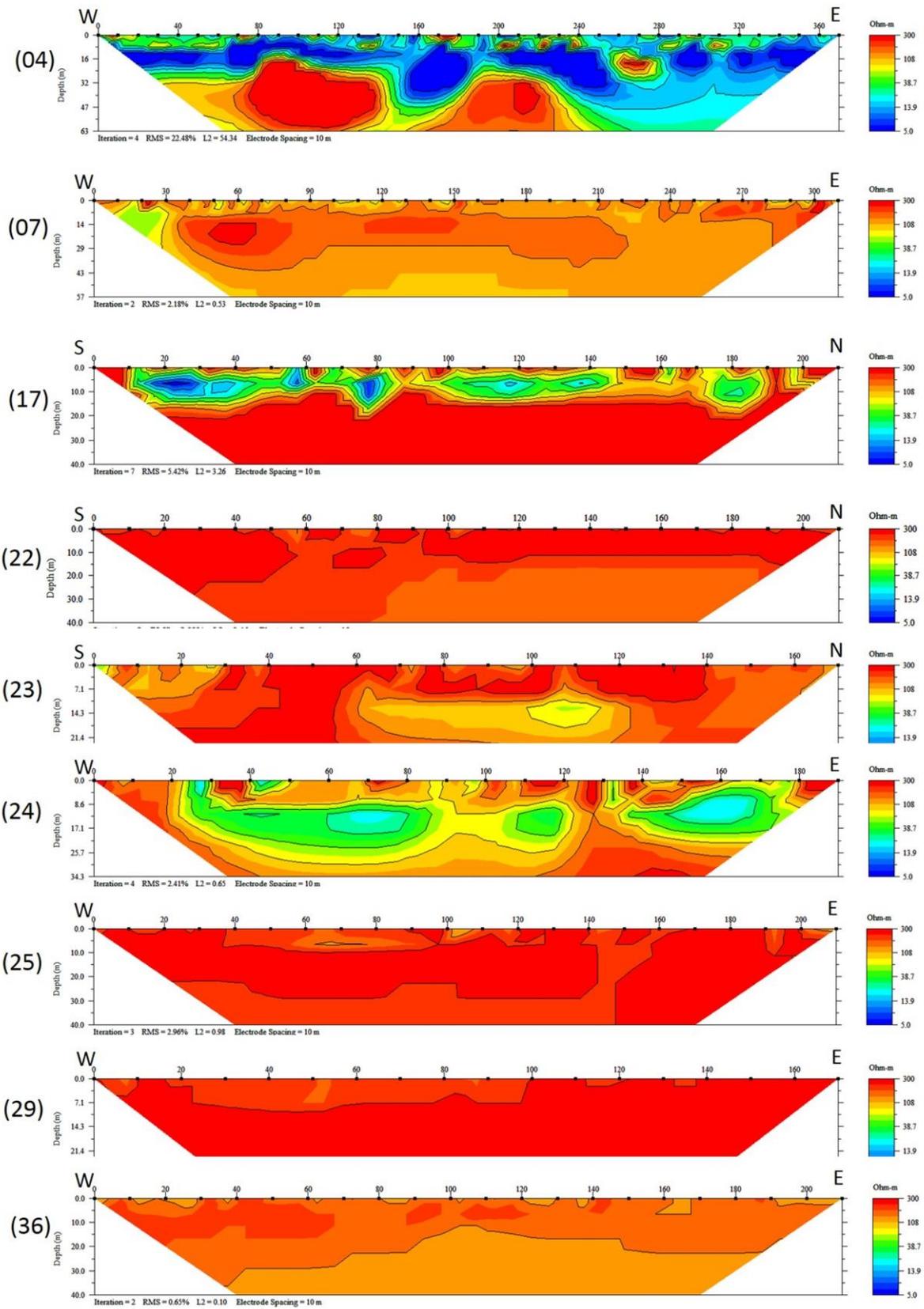


圖 5.2-15 位於拘限與非拘限含水層交界處之二維地電阻剖面圖

5.3 水文地質架構分析

水文地質架構分析為本計畫主要工作項目之一，本工作項目之執行需仰賴大量之水文地質資料，除了蒐集 5.1 節資料庫已儲存之數化資料外，更考量了前人之水文地質調查成果，以及本計畫之水文地質分析成果，最後再應用專家知識綜整及分析水文地質資料，建立研究區域之水文地質架構。

5.3.1 水文地質分析方法

水文地質分析大致分三大部分：（一）地下水盆地、（二）主要含水層分層及（三）水位水質分析。

（一）地下水盆地：

建立地質架構，探討大尺度的地下水蘊藏與流動，例如：地下水最深可達哪些地層，有何構造及地層的控制等。收集相關研究文獻，包含地球物理調查（震測、重力、電測、電磁測、GPS 測量、衛星遙測等）、地質調查（地面調查、地形分析、海洋調查、鑽探、岩心分析、化石、花粉、定年、地層層序分析等）等前人研究資料，研判該地區之地下水盆地之分布。

（二）水文地質分層：

研判該地區之地下水主要使用層次。收集相關研究文獻及調查報告，包含水井調查（水井分布、抽水量、水質等），水文地質調查（鑽探、岩心分析、化石、花粉、定年、地層層序分析、抽水試驗、水質等），輔以小尺度的地球物理調查（震測、重力、電測、電磁測、GPS 測量、衛星遙測等）、地質調查（地面調查、地形分析、海洋調查、鑽探）等前人研究資料。以蘭陽平原為例：地下水盆地最深可達 1400m，但目前地下水應用部分多在上部 300m 內，因更新世以來有多次的冰河期及環境變遷，水文地質上有多層次的形成。

（三）水位水質分析：

根據水文地質分層，整理水位及水質數據（包含氘及氫同位素），探討區域地下水的補注、流動及化學反應。

5.3.2 綜整水文地質調查資料與分析

（一）地下水盆地

蘭陽平原東側由北往南之地體構造單元為南沖繩海槽的弧後盆地、琉球島弧、和平海盆、南澳海盆、增積岩體、琉球海溝隱沒系統，及台灣東部之菲律賓海板塊/歐亞大陸板塊碰撞系統(Sibuet, Deffontaines, Hsu, & Thareau, 1998)。蘭陽平原可視為沖繩海槽的向西延伸，沖繩海槽目前仍持續有南北開張的活動

(圖 5.3-1)。

受整體地體構造的影響，蘭陽平原之地層分布及主要構造，走向大都為東北-西南向，後期轉東西向(圖 5.3-2)。濁水-梨山斷層是主要的構造分隔斷層，此斷層北邊為雪山山脈的始新世-漸新世西村層及四稜層、南邊為脊樑山脈的中新世蘇澳層(相當於廬山層)(圖 5.3-3)。

基盤岩以上接未固結的更新世及全新世地層，基盤等深線顯示，未固結沉積層最深處位於北半部，最厚達 1400m(江新春, 1976)，大約位於觀測井古亭站及大福站附近(圖 5.3-4)。觀測井龍德站在深度 242m 鑿遇岩盤，龍德西北方的中油武淵井也在 267m 鑿遇岩盤(曾弘志和黃道強, 1974)(江協堂, 2010)。蘭陽平原北側的構造在早期可能較為活躍，平原下有 8 條以上的斷層，以盆地開張的特性判斷，應大都為正斷層(圖 5.3-5)。近年的水準量測則顯示(Liu, 1995)，南北向的地面下陷位於宜蘭市至羅東市中間，每年約有 2cm(圖 5.3-6)，濁水斷層為其中最重要的一條斷層(圖 5.3-7)。東西向的地面下陷則以東側靠海處較大(圖 5.3-8)。

蘭陽平原的沉積速率約 10-20mm/yr(圖 5.3-9)，沉積速率除了受到構造控制外，也受到沉積體系的影響。蘭陽平原的地形分布與沉積環境息息相關，沉積物的來源為山區河流於平原交界處形成的沖積扇(圖 5.3-10)，前人研究顯示至少有 17 個大小沖積扇(圖 5.3-11；(張瑞津, 石再添, & 陳翰霖, 1996))，最大的為蘭陽溪沖積扇(66 km²)，其次為羅東溪沖積扇(21 km²)(表 5.3-1)。

另外一個重要的沉積為沿岸砂丘，本地因強烈的東北季風及夏季颱風，強烈的海浪沿海邊形成砂丘(圖 5.3-12)，砂丘的西側因而形成瀉湖或濕地，主要以泥質沉積為主。平行海岸線長條狀砂丘，由北而南包括：頭城、壯圍、公館、冬山河、利澤簡及無尾巷砂丘等(蘇品如, 2009)。

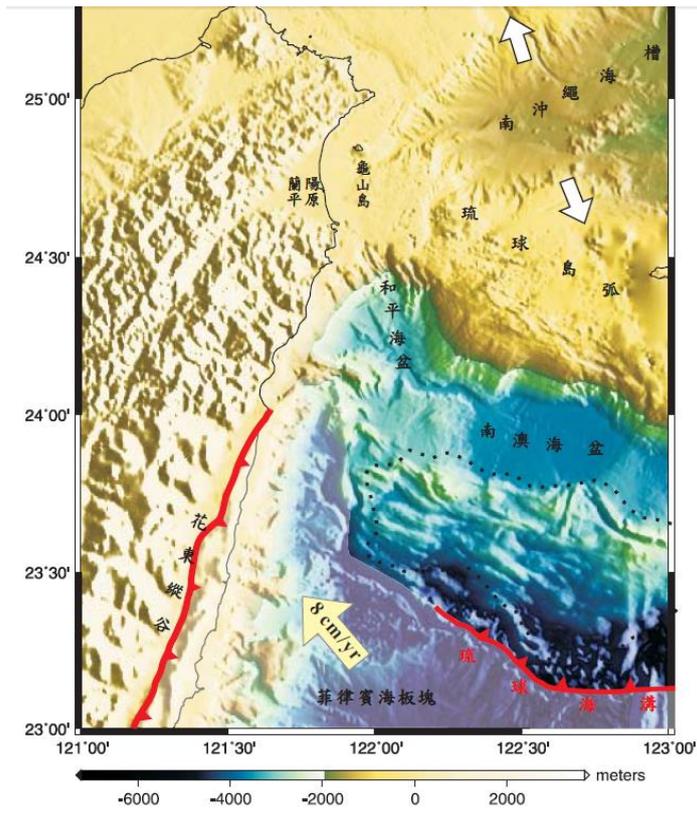


圖 5.3-1 蘭陽平原附近之地體構造圖 (康竹君等, 2008)

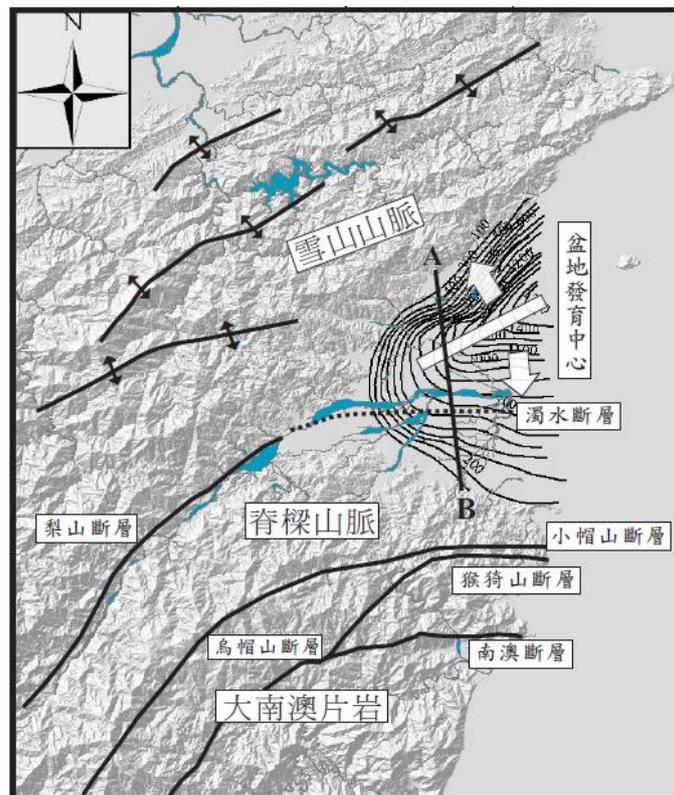


圖 5.3-2 蘭陽平原附近之斷層分布圖 (康竹君等, 2008)

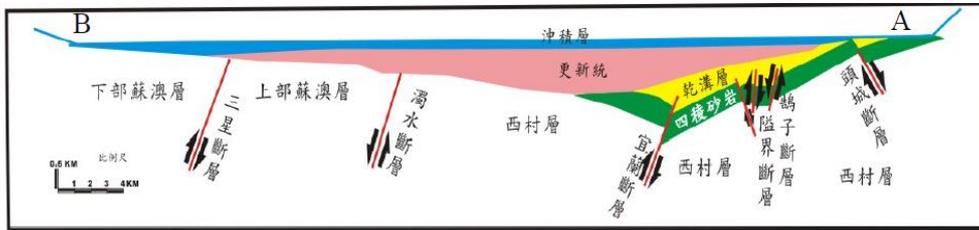
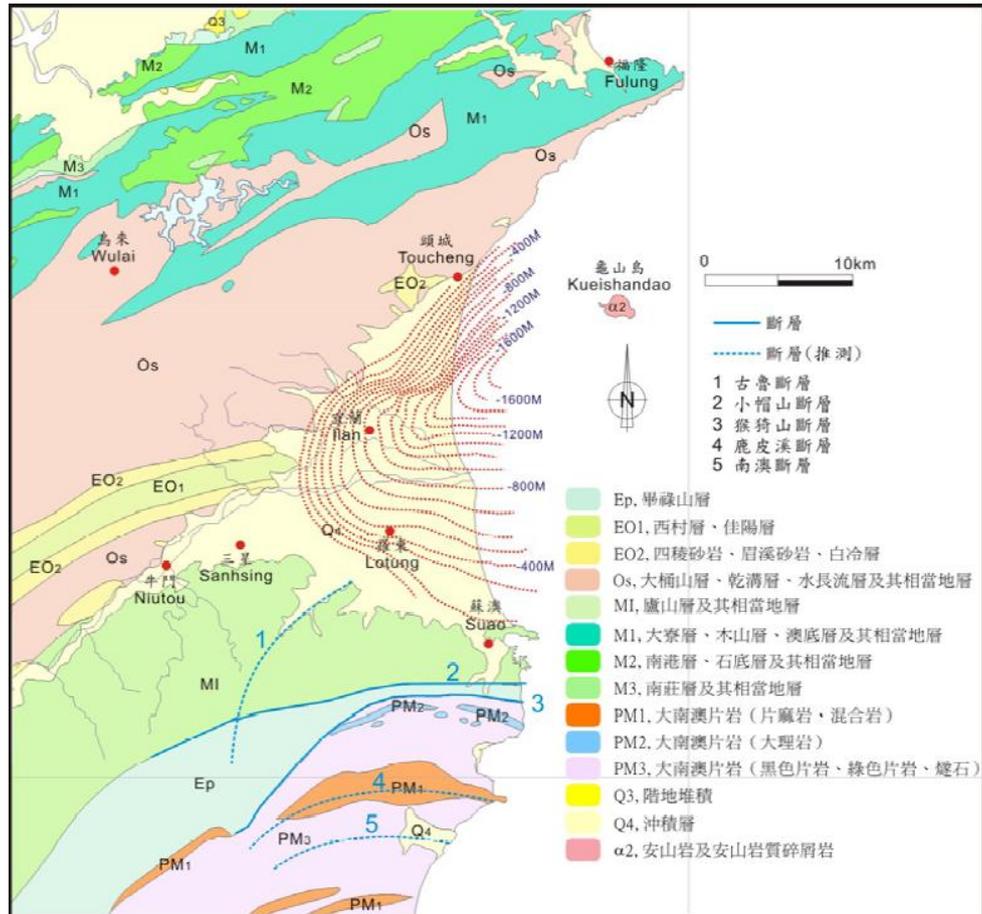


圖 5.3-3 蘭陽平原附近地層及基盤剖面圖(江新春，1976；邱詠恬，2008；康竹君等，2008)

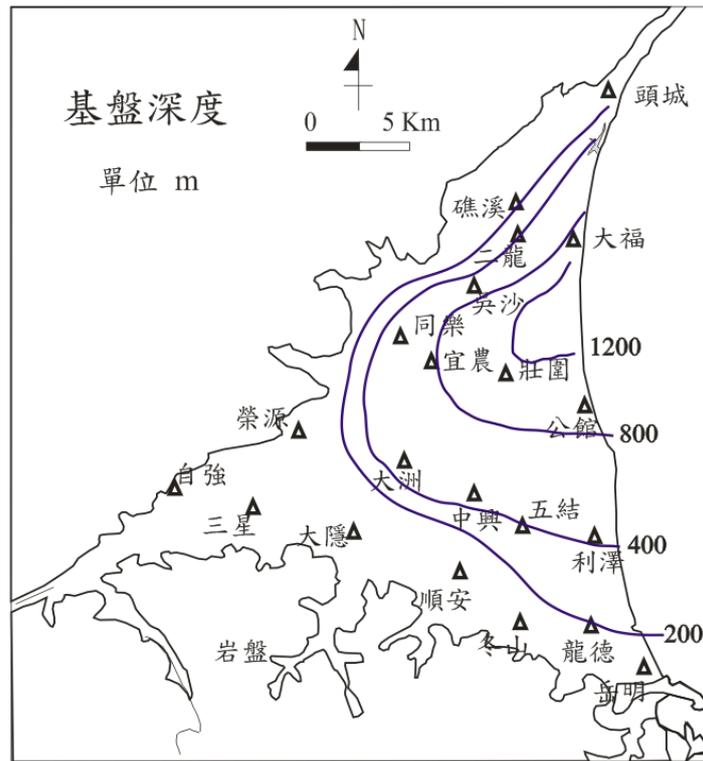


圖 5.3-4 蘭陽平原基盤深度與觀測井之位置（基盤深度引用自江新春，1976）

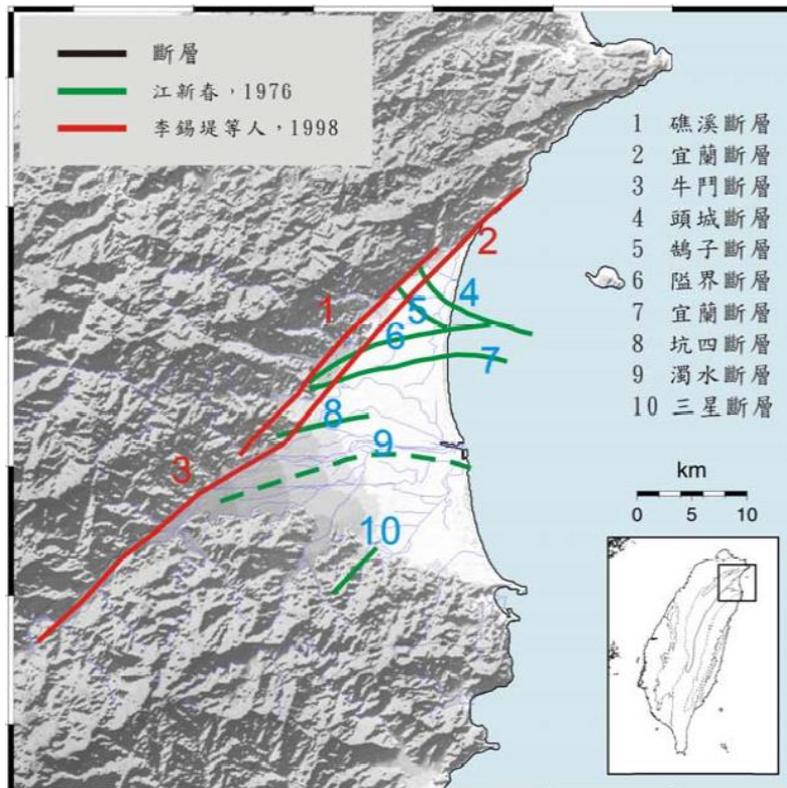
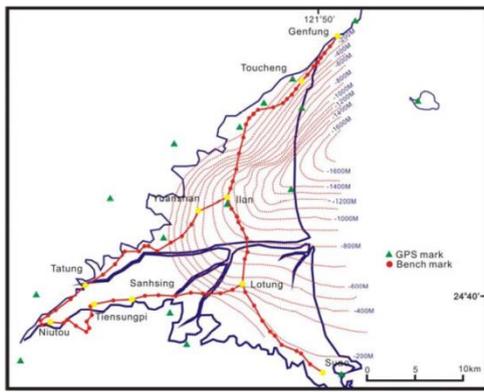
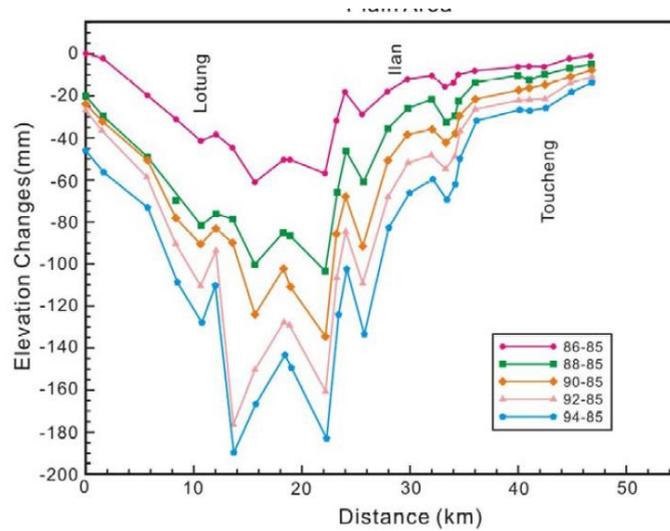


圖 5.3-5 蘭陽平原之斷層分布（邱詠恬，2008）



(A) 測線位置



(B) 1985-1994年水準量測結果

圖 5.3-6 蘭陽平原水準量測之地面高度變化 (Liu, 1995)

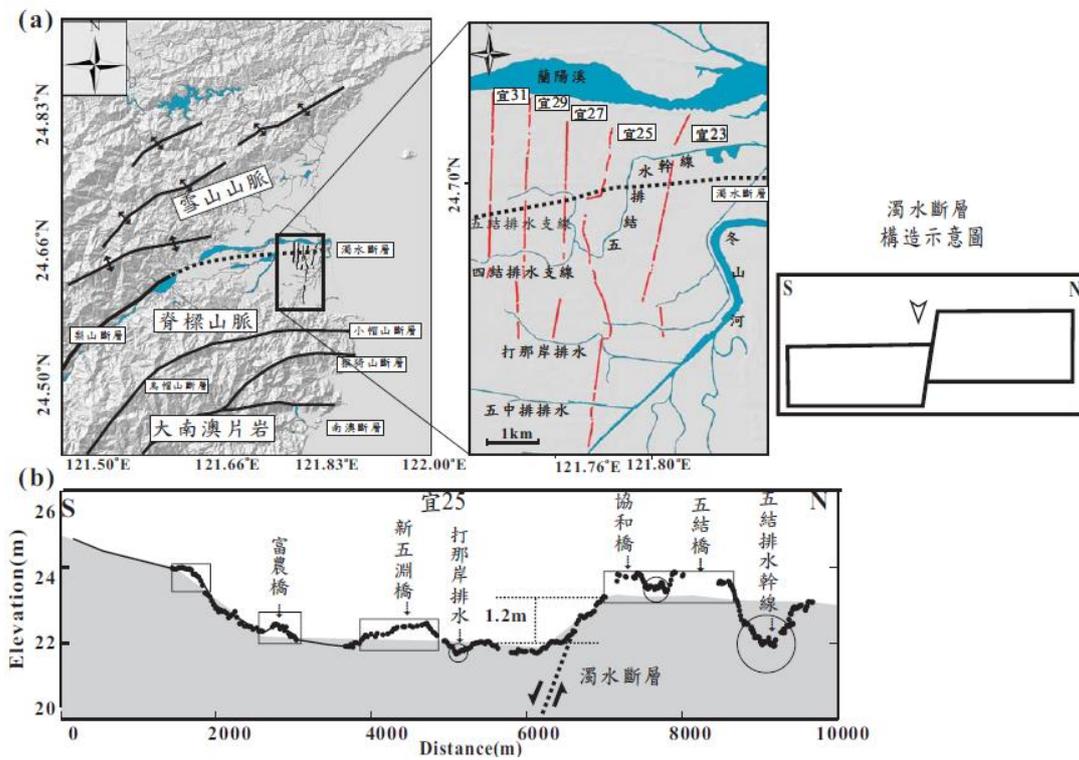


圖 5.3-7 濁水斷層之位置與地形 (康竹君等, 2008)

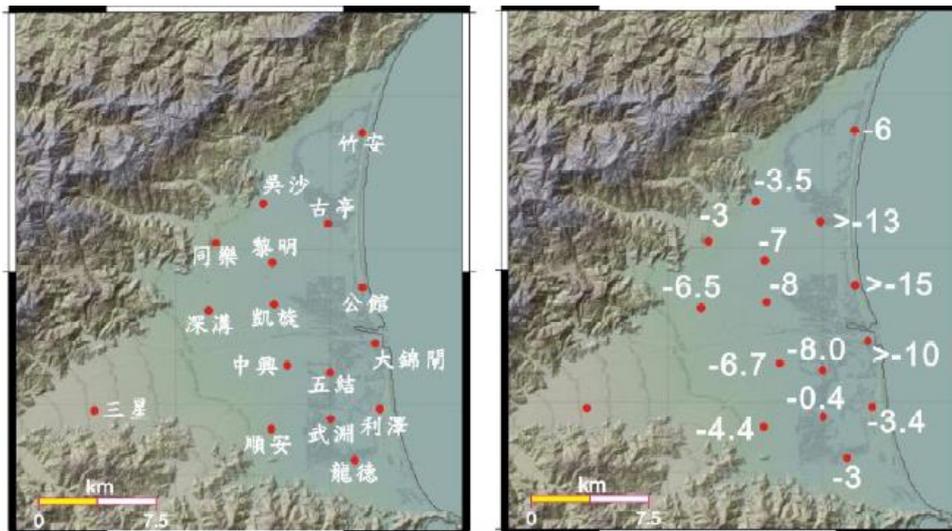


圖 5.3-8 蘭陽平原沉積物定年推測之地面沉陷速度 mm/yr (謝孟龍, 2006)

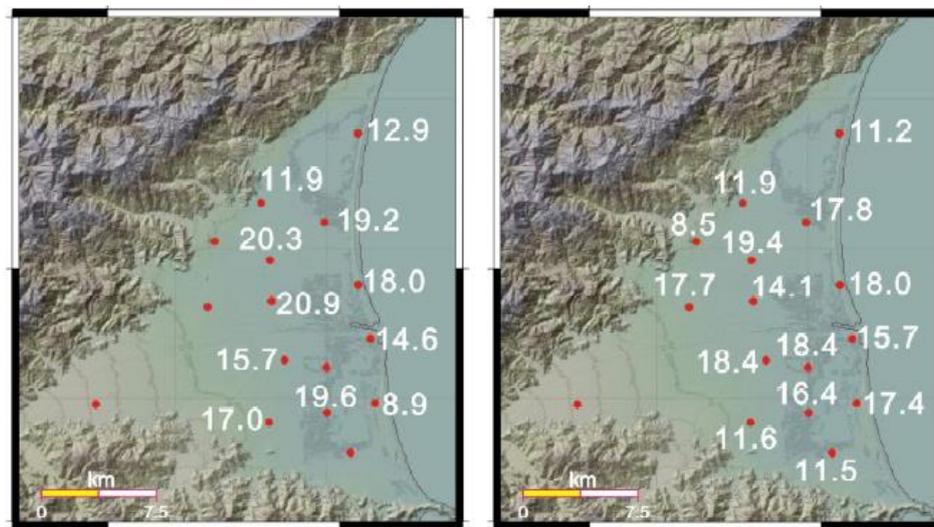


圖 5.3-9 蘭陽平原之沉積速率 mm/yr，左圖：16000-10000 年前；右圖：10000-5000 年前 (謝孟龍, 2006)

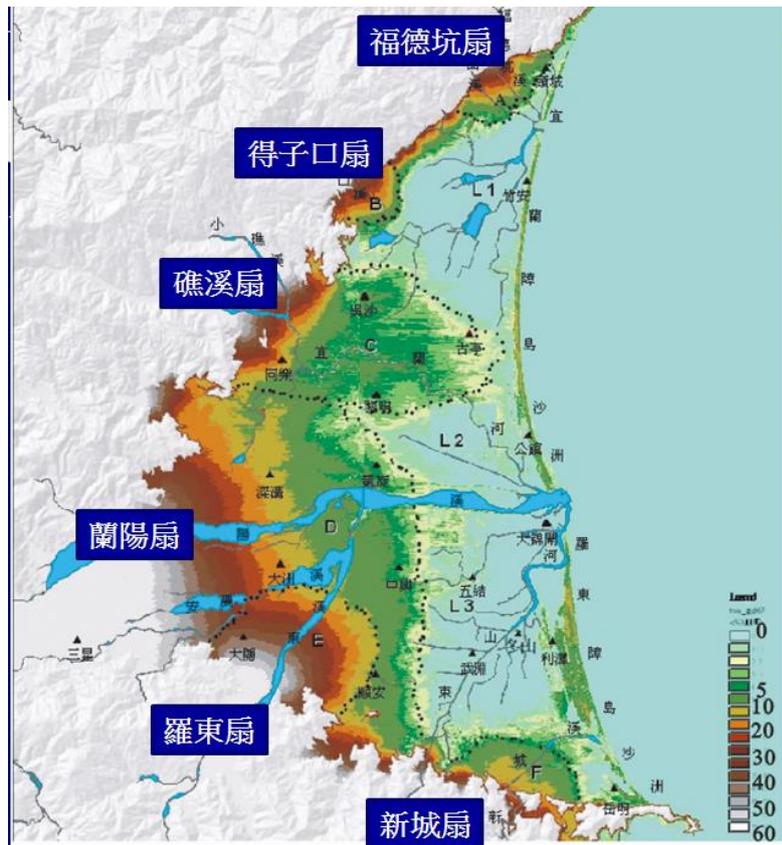


圖 5.3-10 蘭陽平原主要水系、高程及沖積扇分布圖（鄭迺君，2010）

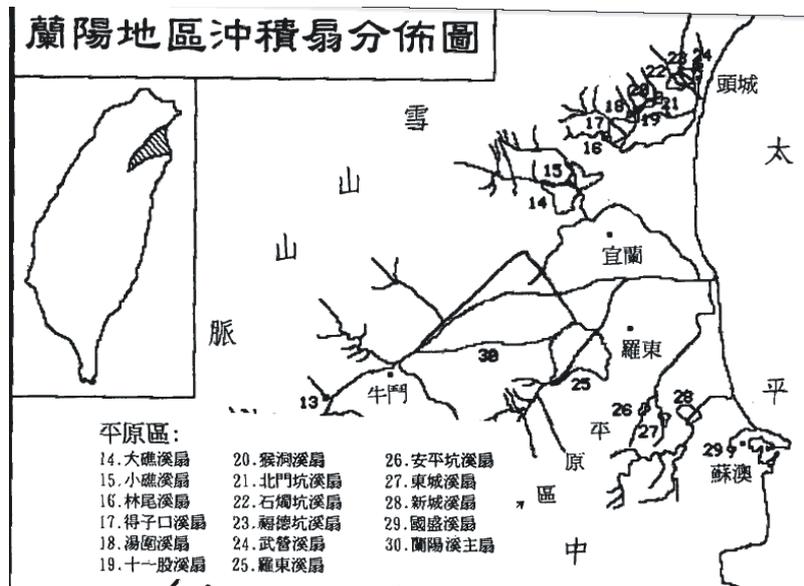


圖 5.3-11 蘭陽平原沖積扇分布圖（張瑞津等，1995）

表 5.3-1 蘭陽平原沖積扇面積與海拔高度（張瑞津等，1995）

扇名		沖積扇面積 (km ²)	扇頂高度 (m)	扇端高度 (m)	集水域面積 (km ²)	扇名	沖積扇面積 (km ²)	扇頂高度 (m)	扇端高度 (m)	集水域面積 (km ²)	
雪山山脈側	大礁溪	6.06	80	10	26.21	中央山脈側	羅東溪	21.72	70	10	63.99
	小礁溪	13.78	70	10	13.82		安平坑溪	0.34	30	10	3.34
	林尾溪	0.94	40	20	5.61		東城溪	0.57	50	10	2.09
	得子口溪	2.68	50	10	13.49		新城溪	1.36	15	10	47.17
	湯圍溪	0.43	85	5	1.03		國盛溪	0.12	35	5	0.25
	十一股溪	0.50	85	5	1.04		蘭陽溪	66.32	150	30	583.29
	猴洞坑溪	0.74	35	5	4.45						
	北門坑溪	0.64	40	5	2.54						
	石燭坑溪	5.16	40	10	5.53						
	福德坑溪	2.47	50	10	8.78						
武營溪	0.23	25	10	1.76							

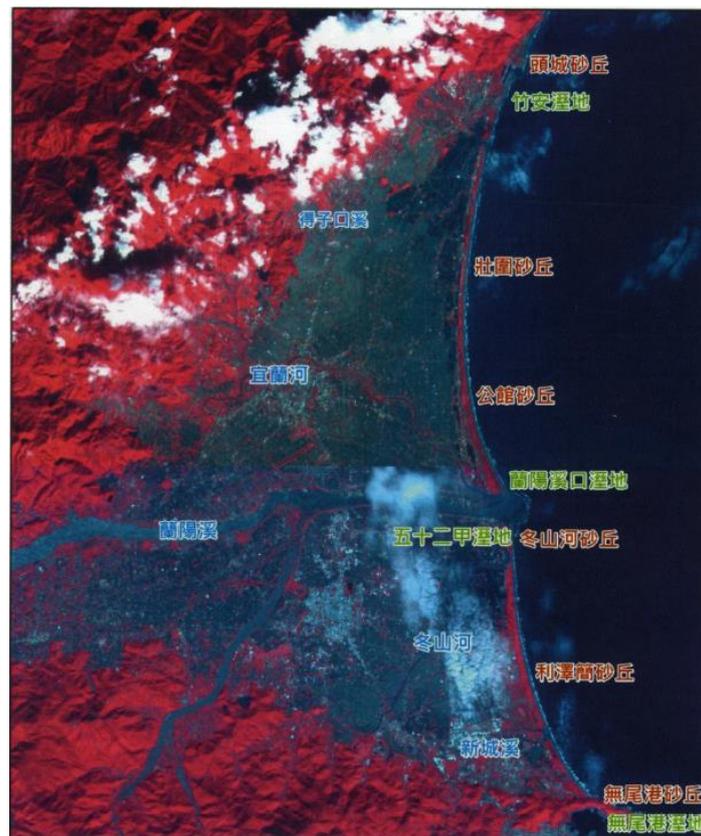


圖 5.3-12 蘭陽平原沿岸砂丘分佈圖。平行海岸線長條狀紅色部分，由北而南包括：頭城、壯圍、公館、冬山河、利澤簡及無尾巷砂丘等(蘇品如等，2009)

(二) 水文地質分層

蘭陽平原地下水觀測站共有 22 站、分層觀測井 40 口，最深的井為中興(4)觀測井，濾水管底部之深度達 230m。根據沉積物碳十四的定年資料，深度 0-250m 的地層，大都為二萬年來的堆積，其中末次冰期的堆積並不多，深度約 150-250m，當時可能以侵蝕環境為主（圖 5.3-13）。西側較厚的沖積扇礫石/砂層堆積，約形成於一萬年來之海進期，厚度約不超過 150m；此礫石/砂層向東漸變為厚層泥，在利澤及公館等地，厚度超過 200m。因為從礫石的含水層至泥層的不透水層，相變相當快，顯示西部高區為地下水的補注區，往東因泥層的隔絕，含水層漸漸尖滅。

區域性含水層建議分為三層：第一含水層（AF1）深度為 150m 內，此層形成於一萬年之全新世，局部地區可再分為 AF1-1(共 23 口)及 AF1-2(共 10 口)；第二含水層的深度約為 150-200m（共 6 口）；第三含水層深度約為 200-250m，只有 1 口（中興(4)）（表 5.1-4）。以上分層概念乃考慮與西部地下水層分類相同，將全新世形成之含水層命名為第一含水層（AF1），在濁水溪地區此層較薄，約只有 50m，但第二含水層較厚（形成於末次冰期），約 50-150m 厚（圖 5.3-14）。

由抽水試驗推算本區含水層之透水係數(hydraulic conductivity)，總數 40 口觀測井中，透水係數以 10^{-4} m/s 為最多，其含水層的粒徑為礫、砂、或砂/泥互層，有些礫及砂的含水層，可能淘選較好，較不含泥，其透水係數可達 10^{-3} m/s（圖 5.3-15 及表 5.3-2）。當含水層中的泥層越多時，透水係數降至 10^{-5} m/s，有兩口井（古亭(2)及壯圍(3)）泥層多而砂層少，透水係數只有 10^{-6} 至 10^{-7} m/s（相當於阻水層）。值得注意的是五結(1)與五結(2)觀測井的透水係數高達 2×10^{-3} m/s，該含水層是由淘選良好的砂層所組成（海灘砂），比扇頂礫石層的透水係數（ $2-7 \times 10^{-4}$ m/s）高（圖 5.3-16）。本區含水層儲水係數的數據並不多，龍德站及大隱站的複井抽水試驗顯示，含水層的儲水係數約為 10^{-3} 至 10^{-4} 之間。

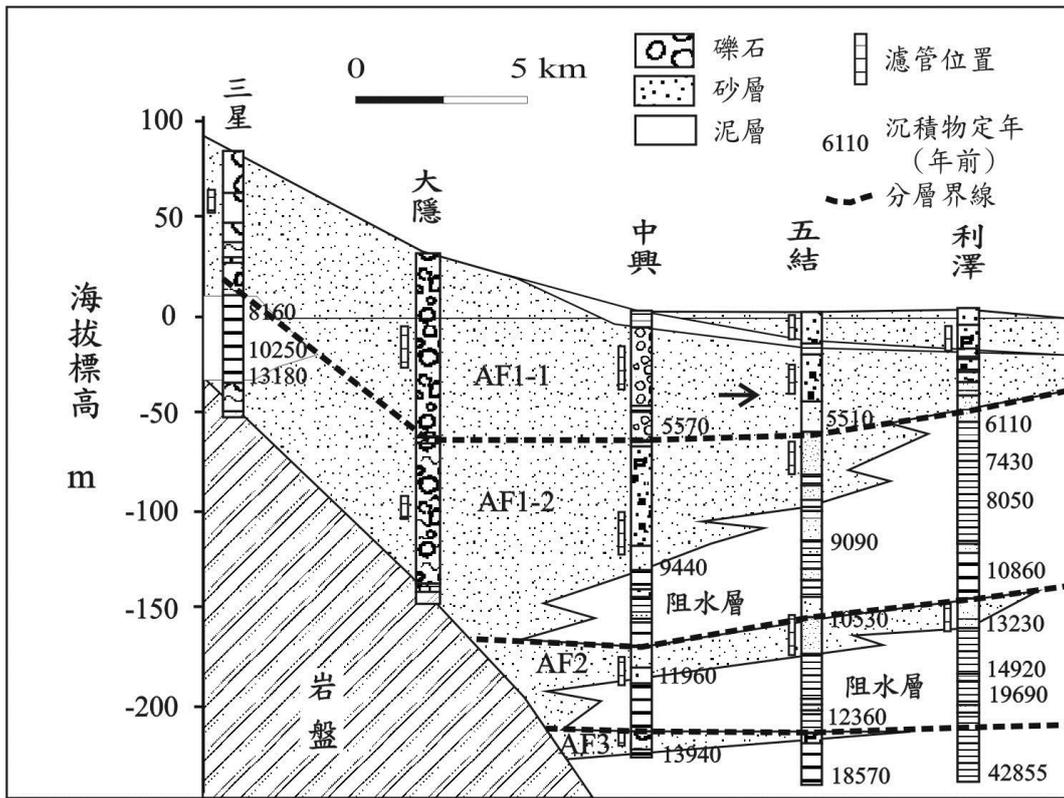


圖 5.3-13 蘭陽地區東西向地質分層剖面圖。

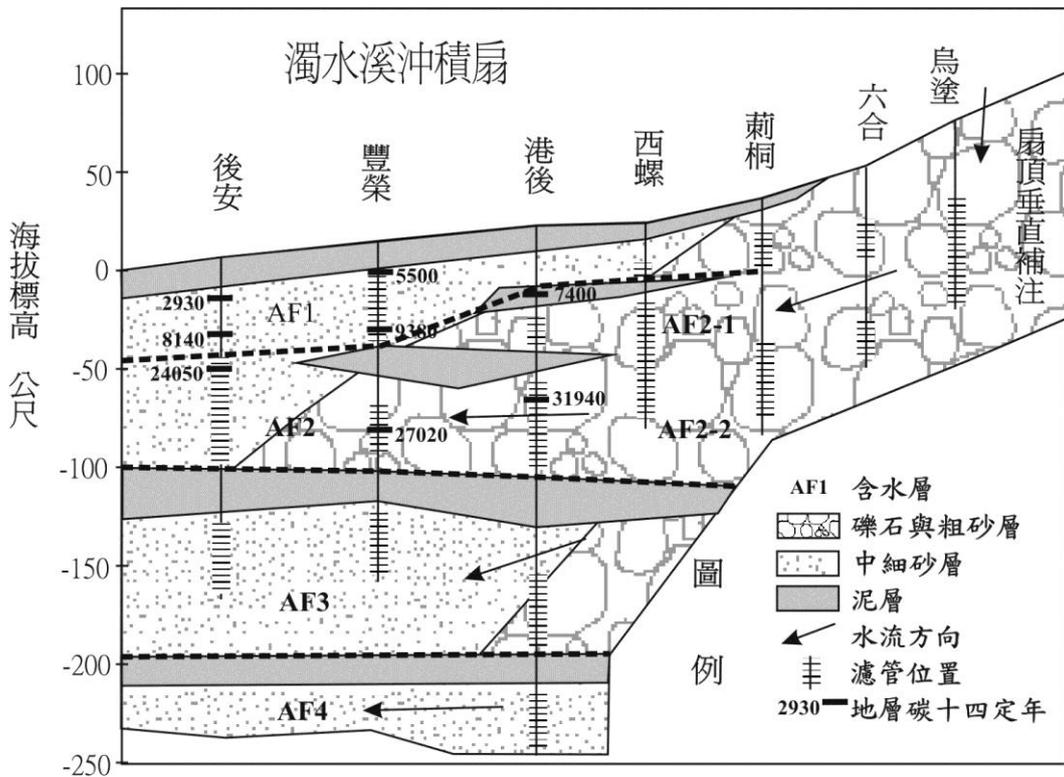


圖 5.3-14 濁水溪地區東西向地質分層剖面圖。

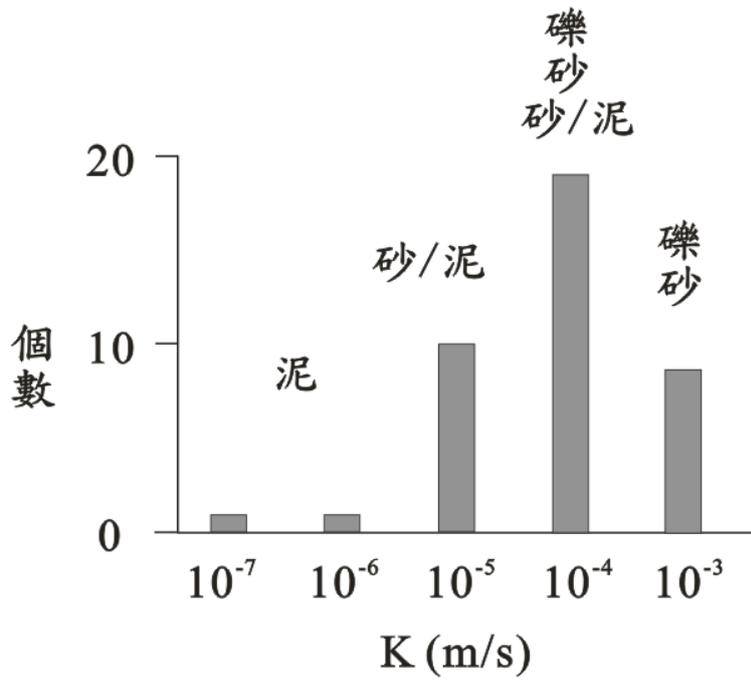


圖 5.3-15 透水係數 K 與含水層粒徑之關係

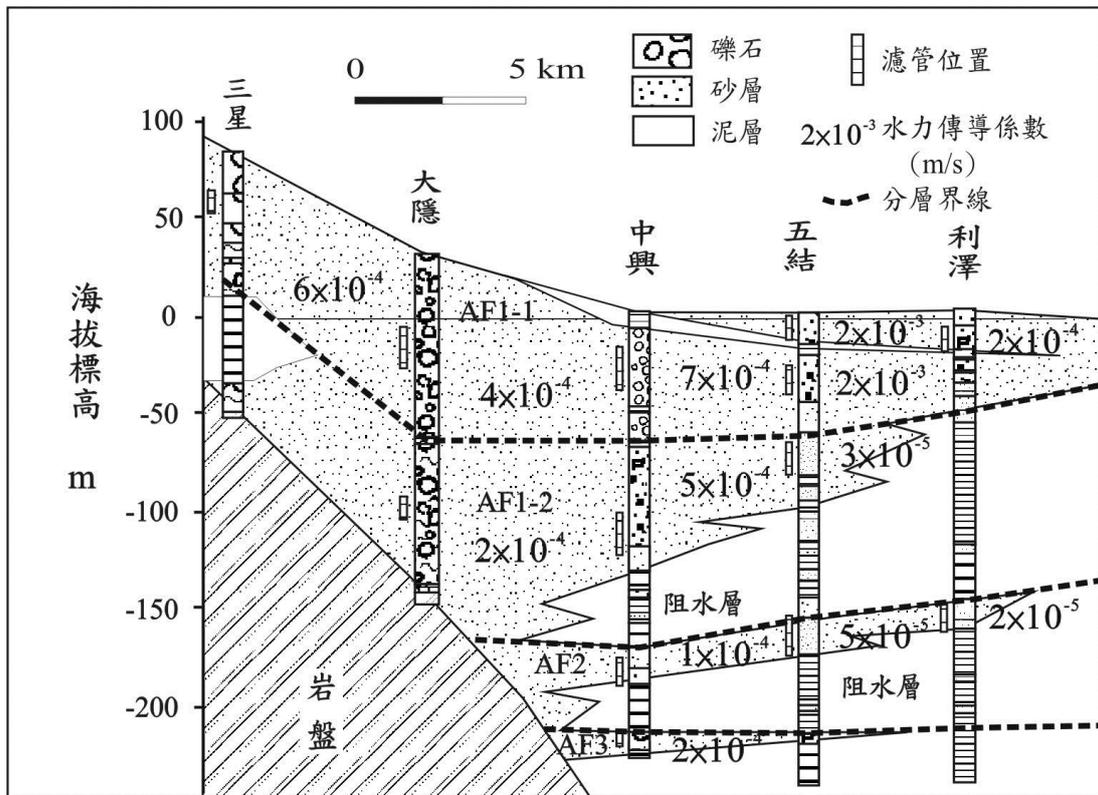


圖 5.3-16 東西向剖面之透水係數 K

表 5.3-2 水文地質參數

編號	井名	T (m ² /min)	K (m/s)	含水層粒徑	複井 T (m ² /min)	複井 S
1	岳明(1)	0.0360	5.00E-05	砂		
2	冬山(1)	1.5300	2.13E-03	礫		
3	冬山(2)	1.4358	1.12E-03	礫		
4	龍德(1)	0.5770	4.01E-04	礫/砂	0.816	0.00216
5	龍德(2)	0.0563	5.21E-05	砂/泥	0.0686	0.000521
6	龍德(3)	0.2270	2.10E-04	礫/砂	0.249	0.000196
7	龍德(4)	0.0243	3.38E-05	砂/泥	0.0664	0.000428
8	順安	0.0145	1.42E-05	礫/砂/泥		
9	利澤(1)	0.2274	2.11E-04	砂		
10	利澤(2)	0.0128	1.78E-05	砂/泥		
11	大隱(1)	0.6080	4.05E-04	礫	0.43	0.00146
12	大隱(2)	0.2479	1.72E-04	礫	0.396	0.0002
13	五結(1)	1.6561	2.30E-03	砂		
14	五結(2)	1.2975	1.80E-03	砂		
15	五結(3)	0.0355	3.29E-05	砂/泥		
16	五結(4)	0.0688	4.78E-05	砂/泥		
17	三星	0.6580	6.09E-04	礫		
18	大洲(1)	2.8000	2.59E-03	礫		
19	大洲(2)	1.8800	1.74E-03	礫		
20	自強(1)	0.0264	2.45E-05	礫		
21	中興(1)	1.2903	7.17E-04	礫/砂/泥		
22	中興(2)	0.8998	4.98E-04	砂/泥		
23	中興(3)	0.0978	1.36E-04	砂/泥		
24	中興(4)	0.0603	1.68E-04	砂/泥		
25	內城(1)	2.9208	1.05E-03	礫		
26	公館	0.3960	5.50E-04	砂		
27	壯圍(1)	0.3454	9.87E-03	砂		
28	壯圍(2)	0.0043	2.26E-04	砂/泥		
29	壯圍(3)	0.0001	1.45E-07	泥		
30	宜農(1)	0.6155	6.88E-04	砂/泥		
31	宜農(2)	0.0721	5.00E-05	砂/泥		
32	同樂	0.1750	3.24E-04	礫/砂/泥		
33	吳沙(1)	0.4930	1.39E-04	砂/泥		
34	吳沙(2)	0.0280	2.59E-05	砂/泥		
35	古亭(1)	0.7990	1.11E-03	砂		
36	古亭(2)	0.0070	6.48E-06	泥		
37	二龍	0.4210	3.90E-04	砂		
38	大福	1.1461	6.26E-04	砂/泥		
39	礁溪(1)	0.4000	5.01E-04	礫石		
40	礁溪(2)	0.0250	2.51E-05	砂/泥		
41	頭城(1)	0.7261	9.95E-04	砂		

(三) 水位水質分析

蘭陽平原地下水分層水位如表 5.3-3 及圖 5.3-17。水位最高為三星井（海拔 58.5m），最低為二龍井（海拔-0.65m）。自湧井第 1-1 含水層有 1 口：順安，第 1-2 含水層有 3 口：大洲、宜農及中興，第 2 含水層有 4 口：壯圍、中興、五結及利澤，第 3 含水層有 1 口：中興。推測受壓與非受壓的界線大約在大洲站與大隱站之間。

水位分布明顯顯示，地下水的流向為由西向東流，進入大隱站後已開始有分層，大隱(2)觀測井的水位高於大隱(1)觀測井的水位，顯示可能深層的水往上層流。西邊扇頂區的水力梯度較高（ 4.4×10^{-3} ），東邊平原區的沙泥層水力梯度較低（ 1.0×10^{-3} ）。局部地區已有低於海平面之地下水位，大福站及二龍站的地下水位為海平面下 0.23-0.65m，可能導因人為之抽水。

表 5.3-3 蘭陽平原觀測井之水位

編號	井名	標高(m)	2013 年 4 月水位		2013 年 9 月水位	
			距井口	海拔標高(m)	距井口	海拔標高(m)
1	岳明(1)	5.09	3.87	1.22	4.08	1.01
2	冬山(1)	6.47	2.09	4.38	2.40	4.07
3	冬山(2)	6.47	2.25	4.22	2.47	4.0
4	龍德(1)	6.80	4.81	1.99	4.93	1.87
5	龍德(2)	6.80	6.70	0.1	4.75	2.05
6	龍德(3)	6.80	3.44	3.36	4.22	2.58
7	龍德(4)	6.80	2.4	4.4	2.88	3.92
8	順安	8.98	自湧	>8.98	自湧	>8.98
9	利澤(1)	4.03	2.38	1.65	2.80	1.23
10	利澤(2)	4.03	自湧	>4.03	自湧	>4.03
11	大隱(1)	40.64	11.36	29.28	11.36	29.28
12	大隱(2)	40.64	6.41	34.23	6.10	34.54
13	五結(1)	3.89	2.74	1.15	3.0	0.89
14	五結(2)	3.89	1.77	2.12	2.20	1.69
15	五結(3)	3.89	1.76	2.13	1.81	2.08
16	五結(4)	3.89	自湧	>3.89	自湧	>3.89
17	三星	92.86	34.36	58.5	31.22	61.64
18	大洲(1)	17.79	1.89	15.9	1.89	15.9
19	大洲(2)	17.79	自湧	>17.79	自湧	>17.79
20	自強(1)	104.81	無水	<104.81	無水	<104.81
21	中興(1)	6.23	1.57	4.66	1.36	4.87
22	中興(2)	6.23	0.66	5.57	0.64	5.59

編號	井名	標高(m)	2013年4月水位		2013年9月水位	
			距井口	海拔標高(m)	距井口	海拔標高(m)
23	中興(3)	6.23	自湧	>6.23	自湧	>6.23
24	中興(4)	6.23	自湧	>6.23	自湧	>6.23
25	內城(1)	37.29	4.46	32.83	3.87	33.42
26	公館	3.87	2.66	1.21	3.02	0.85
27	壯圍(1)	2.00	1.93	0.07	1.18	0.82
28	壯圍(2)	2.00	0.6	1.4	0.88	1.12
29	壯圍(3)	2.00	自湧	>2.0	自湧	>2.0
30	宜農(1)	6.69	0.9	5.79	1.02	5.67
31	宜農(2)	6.69	自湧	>6.69	自湧	>6.69
32	同樂	17.07	7.87	9.2	7.12	9.95
33	吳沙(1)	6.71	2.4	4.31	2.24	4.47
34	吳沙(2)	6.71	1.32	5.39	0.92	5.79
35	古亭(1)	2.91	2.06	0.85	1.17	1.74
36	古亭(2)	2.91	0.6	2.31	0.88	2.03
37	二龍	2.00	2.65	-0.65	3.17	-1.17
38	大福	2.62	2.85	-0.23	3.20	-0.58
39	礁溪(1)	12.53	6.10	6.43	5.14	7.39
40	礁溪(2)	12.53	6.34	6.19	5.07	7.46
41	頭城(1)	6.65	3.46	3.19	3.72	2.93

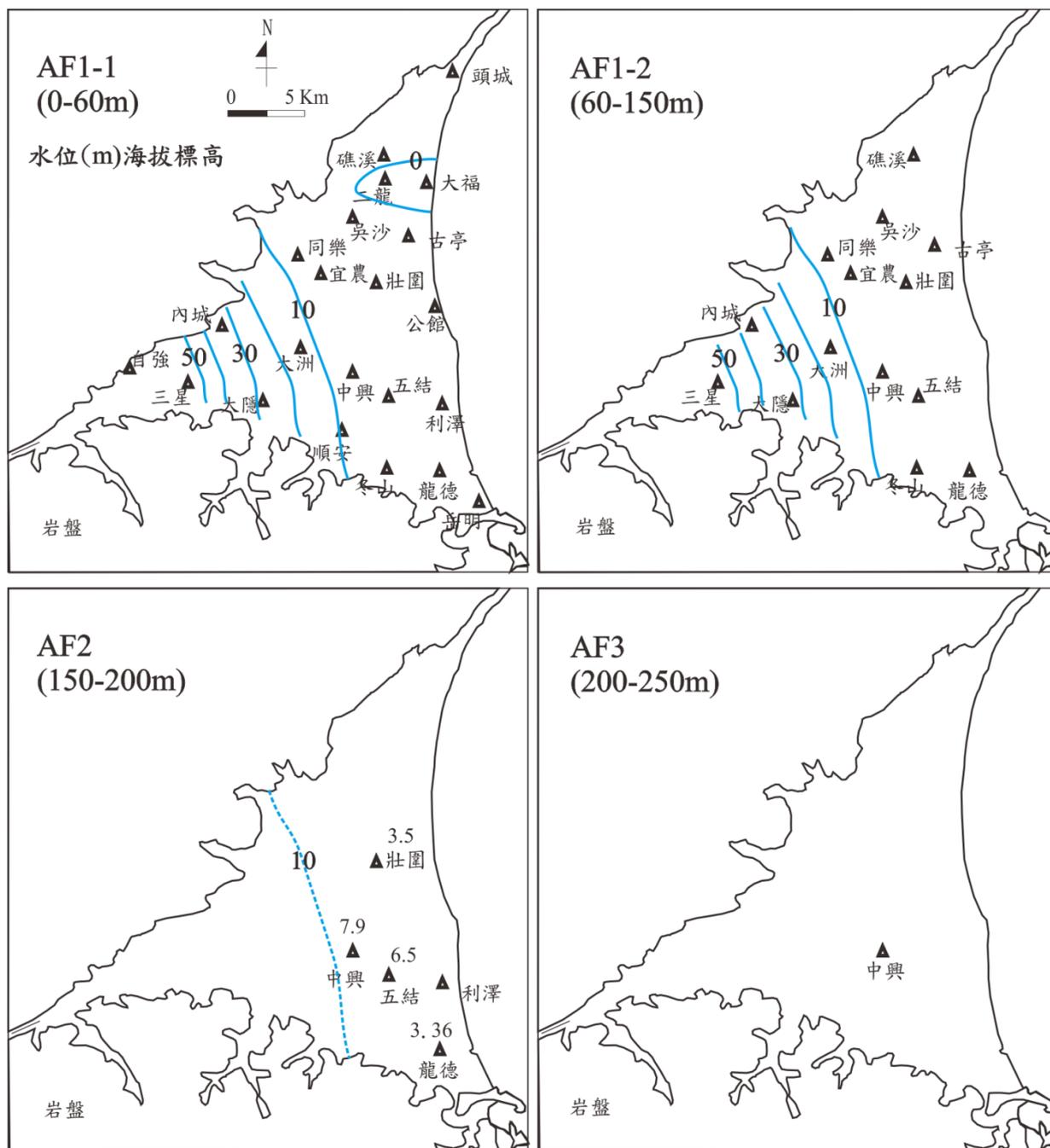


圖 5.3-17 蘭陽平原地下水分層之水位(2013 年 4 月)

地下水的氘濃度為民國 91 年的數據(表 5.3-4)，其判斷準則為氘濃度 $< 1\text{TU}$ 的地下水為 1953 年之前的老水，若 $> 1\text{TU}$ 則為 1953 年後補注的新水(劉聰桂，2002)。由圖 5.3-18 可知，含水層 1-1 除了大福及吳沙外，皆為 1953 年後補充的新水；含水層 1-2 則只有大洲為新水、其餘都是老水；含水層 2 及含水層 3 則都是老水。

蘭陽平原 2013 年 4 月地下水氫氧同位素比值，除了大福站外，皆沿著天水線分布，顯示地下水的來源皆為降雨（圖 5.3-19）。氧同位素的分層分布如圖 5.3-20。最低值為三星站-7.3、最高值為大福站-2.6。第一含水層北側的值偏小，約-6.5 至-6.0；南側的值稍大，約-4.7 至-6.5。深層的第二及三含水層，約-6.5。

表 5.3-4 蘭陽平原地下水之同位素濃度

	井位	氫	δD	$\delta^{18}O$
1	岳明		-20.7	-4.71
2	冬山(1)		-24.9	-5.5
3	冬山(2)		-25.6	-5.1
4	龍德(1)		-24.7	-5.2
5	龍德(2)		-24.0	-5.3
6	龍德(3)		-25.8	-5.5
7	龍德(4)		-36.8	-6.60
9	利澤(1)	2.3	-25.9	-5.3
10	利澤(2)	0	-34.2	-6.5
11	大隱(1)	1.9	-35.2	-6.3
12	大隱(2)	0.3	-36.3	-6.6
13	五結(1)	1.9	-34.9	-6.5
14	五結(2)	0.3	-35.8	-6.6
15	五結(3)	0.2	-34.5	-6.5
16	五結(4)	0	-34.2	-6.4
17	三星	2	-43.0	-7.3
18	大洲(1)	2.6	-42.7	-7.1
19	大洲(2)	4.9	-42.3	-7.2
20	中華(自強)	1.2		
21	中興(1)	2.5	-29.9	-5.7
22	中興(2)	0	-37.0	-6.8
23	中興(3)	0.1	-36.0	-6.5
24	中興(4)	0	-35.3	-6.5
25	內城(榮源)		-36.5	-6.5
26	公館	3.5	-23.4	-4.5
27	壯圍(1)		-34.3	-6.5
28	壯圍(2)		-35.2	-6.5
29	壯圍(3)		-35.7	-6.5
30	宜農(1)		-33.4	-6.2
31	宜農(2)		-33.0	-6.4

	井位	氙	δD	$\delta^{18}O$
32	同樂	1.6	-32.6	-6.2
33	吳沙(1)	0.4	-30.5	-5.8
34	吳沙(2)	0.3	-32.4	-6.0
35	古亭(1)	0.3	-32.7	-6.3
36	古亭(2)	0.2	-33.5	-5.8
37	二龍	1	-32.4	-6.0
38	大福		-14.3	-2.6
39	礁溪新小(淺)		-37.1	-6.4
40	礁溪國小		-36.0	-6.5
40	礁溪新小(深)		-35.6	-6.2
41	頭城	1.4	-33.2	-5.9

氙數據來源：劉聰桂（2002）；氫氧同位素：彭宗仁（2013）採樣日期 2013 年 4 月

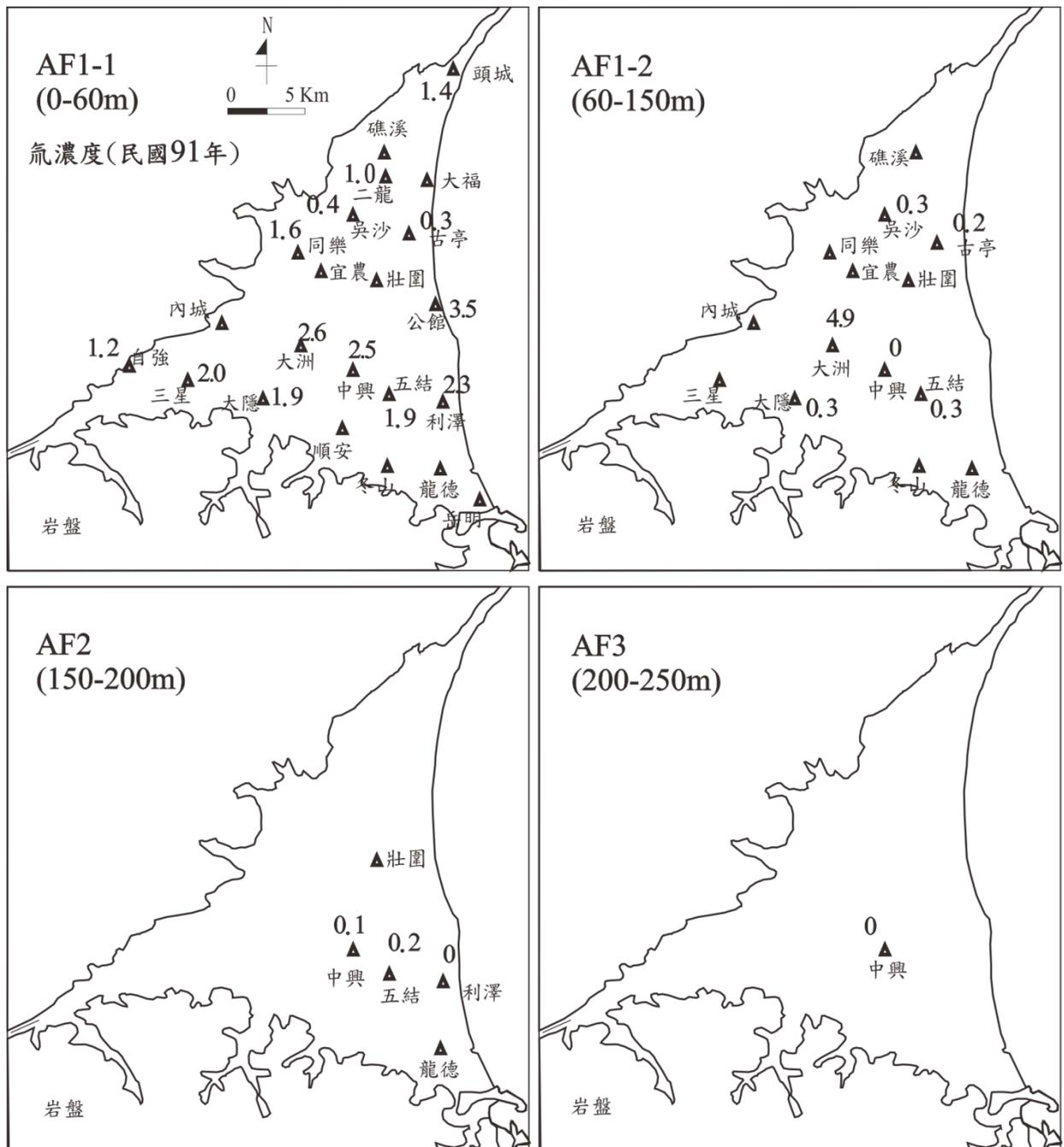


圖 5.3-18 蘭陽平原氙濃度分布圖

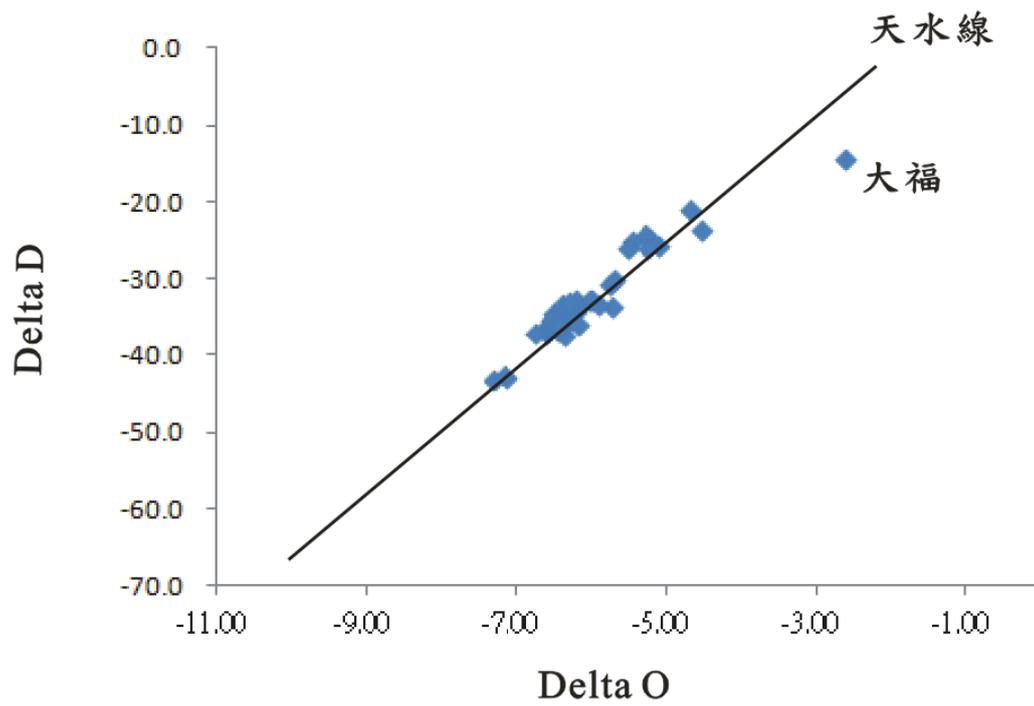


圖 5.3-19 蘭陽平原 102 年 4 月地下水氫氧同位素與天水線 (彭宗仁, 2002)

5.4 水文地質參數推估

水文地質參數之取得，傳統上均需藉由水井之鑽鑿，搭配抽水試驗方可取得。受限於水井之鑽鑿成本高昂，用地取得不易等限制，使得各項水力參數資料密度受到限制。

本計畫欲在不新鑿站井之前提下，以地球物理調查成果，推估水文地質參數，以增加水文地質參數之空間密度，並作為後續數值模式建模之用。

本計畫所推估之含水層參數包含透水係數(Hydraulic conductivity, K)與比出水量(Specific yield, S_y)，透水係數是以地電阻測量結果進行推估，此部份於5.4.1 小節說明；而比出水量的部份則採用重力量測成果進行推估，此部份於5.4.2 小節說明。

5.4.1 應用地電阻於透水係數推估

(一) 研究流程

以地電阻結果推估透水係數之推估流程如圖 5.4-1 所示，共包含五個步驟。首先，蒐集一維地電阻施測結果、水質導電度資料與地質井岩心資料；其次，以地電阻率與地下水水質導電度推估地層因子(Formation factor)；接著，依據研究局部區域之沉積特性進行資料分群；完成資料分群後，各分群可以迴歸方法(regression)分別建立地層因子對透水係數之推估式；最後，應用各分群之推估式，建置研究區域透水係數之三維空間分布。

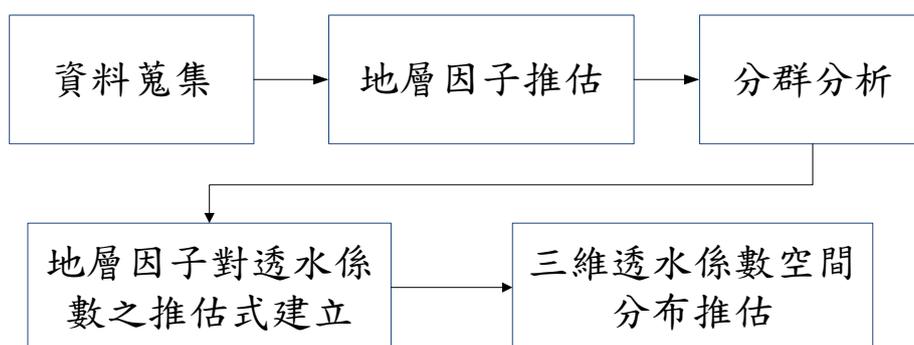


圖 5.4-1 研究流程圖

(二) 研究方法

1. 資料蒐集

需蒐集之資料可區分為兩類，一為觀測井網相關資料，二為非觀測井網資訊。觀測井網相關資料包括水質導電度、透水係數及岩心，此資訊可分別藉由觀測井之水質化驗、抽水試驗及地質鑽探取得；而非觀測井網資訊，則為一維

地電阻資料，以下將簡略說明：

(1). 水質導電度資料

由觀測井之水質化驗取得，可用來求得孔隙水電阻值(Pore water resistivity)，以作為後續地層因子(Formation factor)推估之用。

(2). 透水係數

由觀測井之抽水試驗資料取得，可用來了解該局部區域之地下水流通特性。因本計畫主要分析對象為飽和含水層，因此抽水前所量測得靜水位資訊可作為區隔飽和與未飽和含水層界線之依據。

(3). 岩心資料：

由觀測井之地質鑽探取得，可用來判斷觀測井與鄰近一維地電阻測點其所屬地質狀況是否相似，因為一般而言，礫石與粗砂等粗粒料之岩心具較高之電阻值，而泥與粉土等細粒料之電阻值較低。因此藉由比對岩心資料與一維地電阻之測深曲線，可作為判斷兩地之地質構造的相似與否。

(4). 一維地電阻資料：

由地表地電阻量測取得，可用來推得土體電阻值(Bulk resistivity)，以作為後續地層因子(Formation factor)推估之用。

2. 地層因子推估

(1). 一維地電阻反演算

一般影響地下地層電阻的因素有岩性、礦物組成、含水量、孔隙率、孔隙水組成及溫度等，當地層層序變化造成有明顯的層間電阻率對比，或是欲探測地下不同電阻率目標之存在，例如隧道、埋藏金屬物、未爆彈(UXO)等，就適合以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，而據此計算地層的視地電阻率(Apparent resistivity)，進而再運用反推計算方法推求地層真實地電阻率(True resistivity)。本計畫使用之一維地電阻資料源自中央大學 1992 年於蘭陽平原一維地電阻資料，共 61 個測站，其空間分佈如圖 5.4-2 所示。本計畫將此資料進行數位化，再應用 IPI2WIN 一維地電阻反演算程式(Bobachev, 2003)進行反演算，再以此反演算之資料為基礎，進行後續分析。

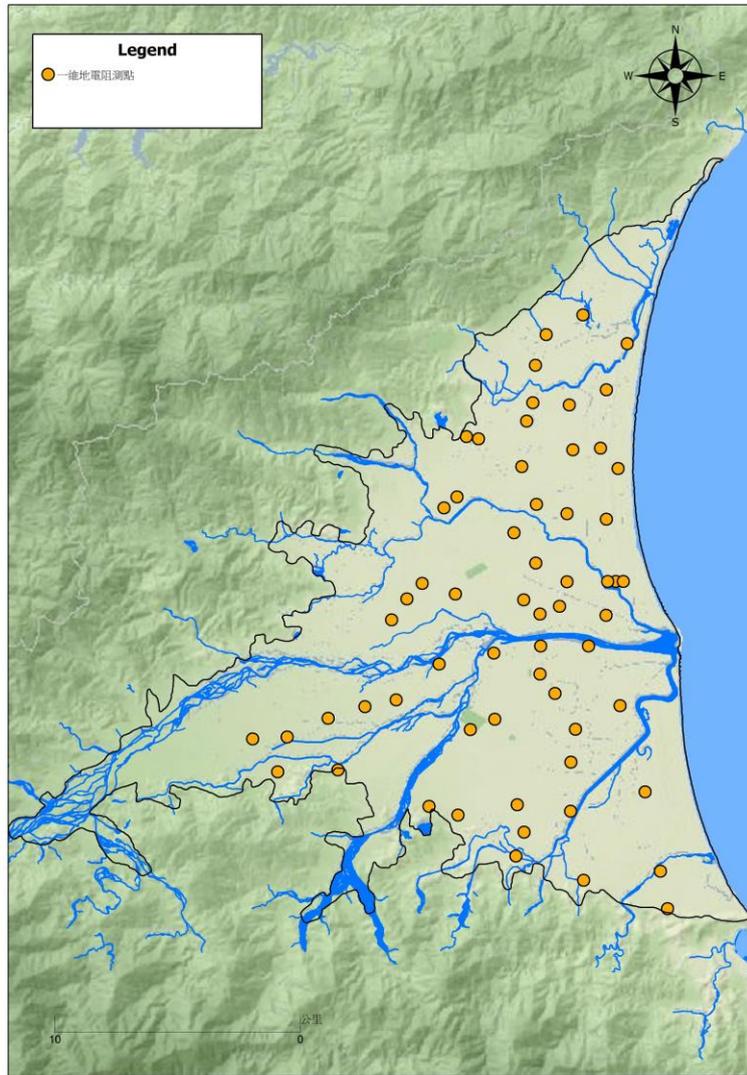


圖 5.4-2 一維地電阻測點空間分布圖

(2). 地層因子(Formation factor, F)計算

Archie(Archie, 1942)提出地層因子(Formation factor, F)，用以描述 α 、 ϕ 及 m 之關係，其計算方式為土體電阻值(以下簡稱 R_o)及孔隙水電阻值(以下簡稱 R_w)之比值，如式(5.4-1)所示。

$$F = \alpha \phi^{-m} = \frac{R_o}{R_w} \dots\dots\dots(式 5.4-1)$$

因此本計畫進行 F 值之推估，需先推得 R_o 及 R_w 兩項參數。

R_w 此參數，由於本計畫所蒐集的資料，其記錄的單位為導電度(Electrical Conductivity, 以下簡稱 E_w)，其中因為導電度與電阻率互為倒數，因此本資料需透過倒數計算，轉換成電阻值。另外，為了使 R_o 及 R_w 兩項參數單位一致，因此需再進行單位換算。因此水質導電度與孔隙水電阻率的換算公式如式(5.4-2)所示

$$R_w = 10^{-4}/E_w \dots\dots\dots(式 5.4-2)$$

而 R_0 此參數，則是採用本計畫所蒐集之一維地電阻資料，再運用反推計算方法推求地層真實地電阻率，但因其一維地電阻施測位置不一定位於觀測井附近，兩者之空間分布並未重疊，故需針對空間分布進行處理，地層因子計算流程如圖 5.4-3 所示，各步驟詳細文字說明如下：

(1)：因地電阻資料之解析度隨著深度增加而下降，故本計畫篩選深度在含水層一範圍內具較佳解析度之資料。

(2)：因觀測井所記錄的岩類資料隨著距離增加不確定性亦增加，故本計畫選取觀測井周圍兩公里內之地電阻資料，做為後續分析。

(3)：因本計畫挑選觀測井兩公里範圍內之地電阻資料，於此範圍內可能具有多個地電阻點位，故本計畫將優先分析距離觀測井最近之地電阻點位。

(4)：因一般而言，礫石與粗砂等粗粒料之岩性具較高之電阻值，而泥與粉土等細粒料之電阻值較低，因此本計畫比對電阻測深曲線與觀測井之岩心是否一致，若一致，則採用此點位。

(5)：於步驟(4)中，若地電阻測深曲線與觀測井之岩心不一致，則排除此點位並挑選下一個最近觀測井之點位，重複步驟(3)至(5)，直至挑選出合適之地電阻點位為止。

(6)：待完成地電阻點位挑選後，本計畫計算濾管(Screen)長度範圍內之平均電阻值。

(7)：以式(5.4-1)計算濾管長度範圍之 F 值。

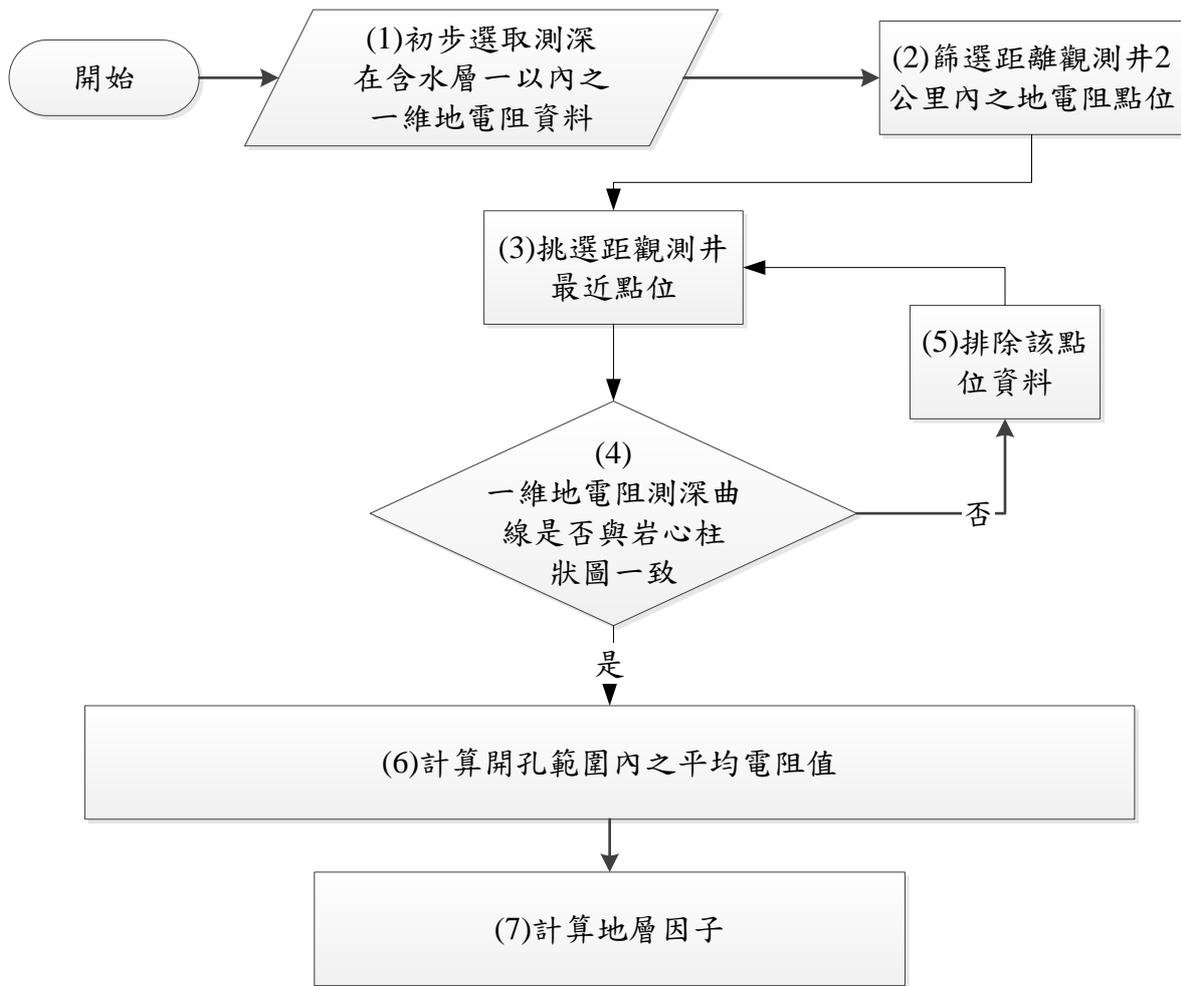


圖 5.4-3 地層因子計算流程圖

3. 分群分析

由(Archie, 1942)所提出地層因子，如式(5.4-1)可知，F與 ϕ 的m次方成反比，而(Bear, 1972)亦指出 ϕ 為K之函數，如式(5.4-3)所示，

$$K = \left(\frac{\rho_w \xi}{\mu} \right) \left(\frac{d^2}{180} \right) \left(\frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \right) \dots \dots \dots (式 5.4-3)$$

因此F與K之間因 ϕ 而存在相關性，故本計畫將利用F推求K值。然而式(5.4-1)中之膠結係數m主要與土壤來源與土壤壓密程度相關，其隨著土壤特性不同而改變，因此若能使m近似一定值，將可降低此推估式之變數維度。本計畫利用土壤特性進行分群分析，找出土壤特性近似之空間區域，以使m的影響降低，再將土壤特性相同區域內之資料歸類為同一分群，之後由此一分群資料計算所得之F與此一區域內之試驗K值進行回歸分析，建立此一區域之K值推估模式。分群分析流程如圖 5.4-4 所示，各步驟說明如下：

(1) 依流域進行分區：因不同流域之沉積物組成不同，故其膠結係數亦略有差異。本計畫依沉積物來源，決定各流域之分區範圍。

(2) 依含水層分層進行分區：因不同之含水層其沉積年代不同，且壓密程度也不同，其膠結程度亦有所差異，故需依照含水層分層進行分區。本計畫將

參考中央地質調查所公佈之含水層分層，作為分區依據。

(3) 依地表至含水層間是否含泥進行分區：因當量測之地層屬於泥層或砂泥互夾之地層時，地電阻往往呈現低電阻之反應，亦即呈現泥導電性佳之特徵；若為礫石或粗砂則通常為高電阻之反應。前人研究亦以此特性尋找礫砂與泥之分佈範圍(Beresnev, Hruby, & Davis, 2002; Danielsen, Dahlin, Owen, Mangeya, & Auken, 2007; Griffiths & Barker, 1993; Loke, 2000; Ortega, Benito-Calvo, Porres, Pérez-González, & Martín Merino, 2010; Taheri Tizro, Voudouris, & Basami, 2012)。Khalil, Abbas, Santos, Masoud, and Salah (2012)亦指出土體含泥與否將呈現兩種截然不同之電阻特性。由此可知，若地表至含水層之間無泥層出現，所量測含水層之礫石或砂之電阻值，將呈現高阻反應；若地表至含水層之間夾雜泥層，則含水層中之礫砂電阻值將較不含泥之情況為低。

故本計畫依地表至含水層間是否含泥進行分區，分為含泥受壓區與不含泥非受壓區，前者簡稱為受壓區，後者簡稱為非受壓區

(4)依前述分區將資料進行分群：由步驟(1)至步驟(3)，可將研究區域依據表層含泥與否，劃分為兩區。接著再將研究區域內之資料，如地電阻與 K 值等資料，依其空間分佈，判斷所屬分區，待將所有資料歸類至其所屬分區後，即完成資料分群。

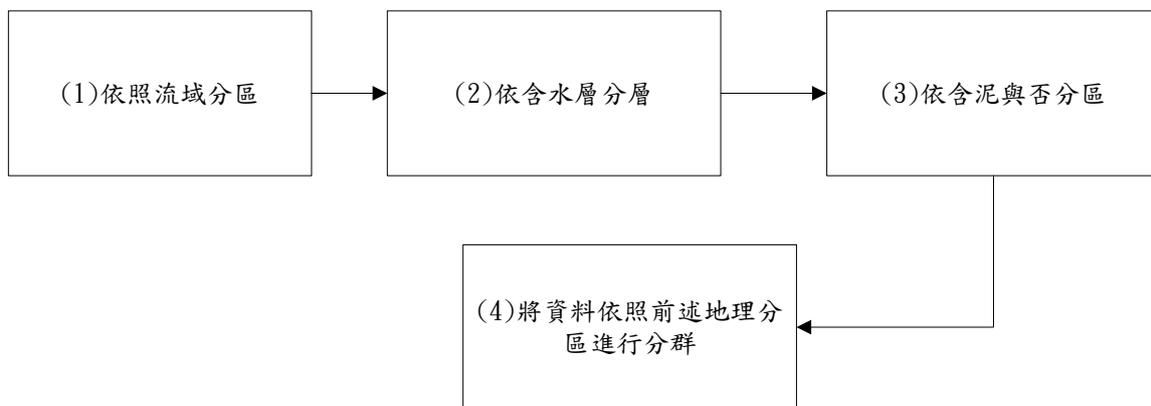


圖 5.4-4 分群分析流程圖

4. 透水係數與地層因子關係式建立

以上述分群結果為基礎，分析各分群之 K 與 F 之關係。本計畫參考前人現地研究成果(Chukwudi, 2011; Sikandar & Christen, 2012)，以線性回歸建立 K 與 F 之關係式。

5. 三維透水係數空間分布推估

在 K 值之推估上，需先推求 F 值，再帶入各區 K 與 F 之關係式，推估三維透水係數空間分布。流程圖如圖 5.4-5 所示，各步驟說明如下：

(1) 推估 R_o 與 R_w 值之空間分佈：將 R_o 與 R_w 值透過空間內插方法(Inverse

distance 內插)推估至研究區域，其空間解析度為 1000(m)*1000(m)* 3(m)。

(2) 計算各網格之 F 值：在得到 R_o 與 R_w 值之空間分佈後，本計畫以式 (5.4-1)，計算各網格之 F 值。

(3) 推估三維透水係數空間分布：依照本計畫所劃定的分區，將各網格之 F 值代入各自對應之 K 值推估公式，進行 K 值推估。

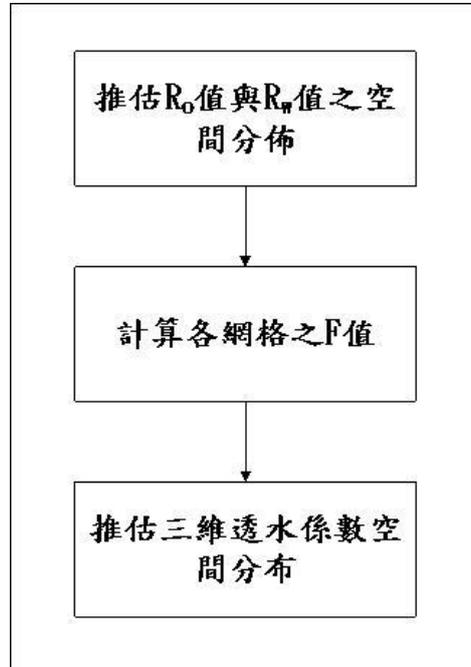


圖 5.4-5 推估 K 場流程圖

(三) 研究成果

1. 研究區域之地層因子推估

將一維地電阻資料及孔隙水電阻值資料代入式(5.4-1)，求得地層因子，如表 5.4-1 所示。表格內三項參數數值分別以圖 5.4-6 至圖 5.4-8 展示，各別呈現其空間分布狀態，其中直方圖越高代表數值越大。

表 5.4-1 研究區域之地層因子計算結果

站號	站名	土體電阻值	孔隙水電阻值	地層因子
02010111	宜農(1)	54.2	31.4	1.7
02050211	吳沙(1)	35.6	23.3	1.5
02060311	古亭(1)	48.9	19.2	2.6
02070411	同樂	51.4	31.3	1.6
02080311	順安	61.7	43.5	1.4
02090111	五結(1)	38.3	12.8	3.0
02090121	五結(2)	50.1	17.4	2.9
02090211	中興(1)	59.8	24.4	2.4

站號	站名	土體電阻值	孔隙水電阻值	地層因子
02100111	大隱(1)	368.2	39.1	9.4
02100211	三星	511.2	20.4	25.0
02100311	大洲(1)	205.0	17.7	11.6
02030211	利澤(1)	167.2	45.9	3.6
02060411	公館	43.9	4.3	10.3
02060111	大福	5.0	0.4	11.7

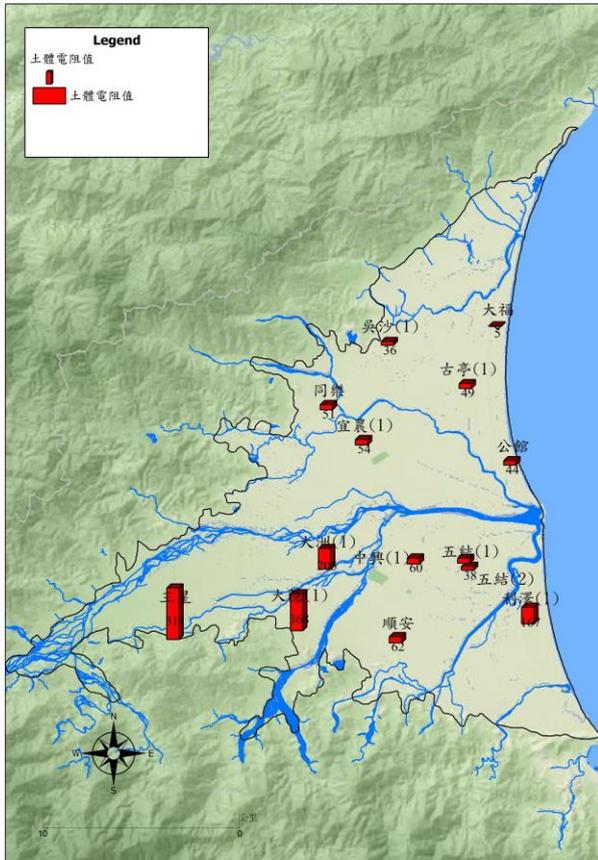


圖 5.4-6 土體電阻值直方圖

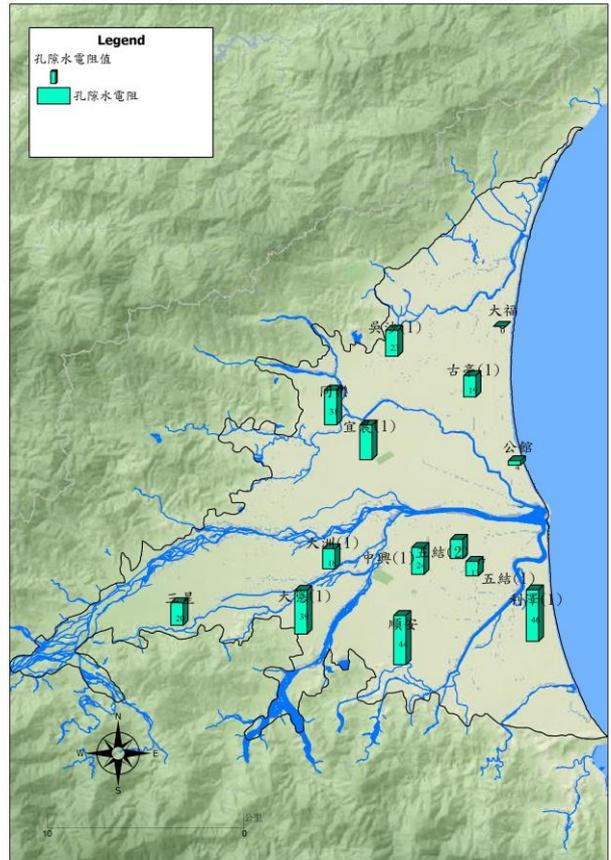


圖 5.4-7 孔隙水電阻值直方圖

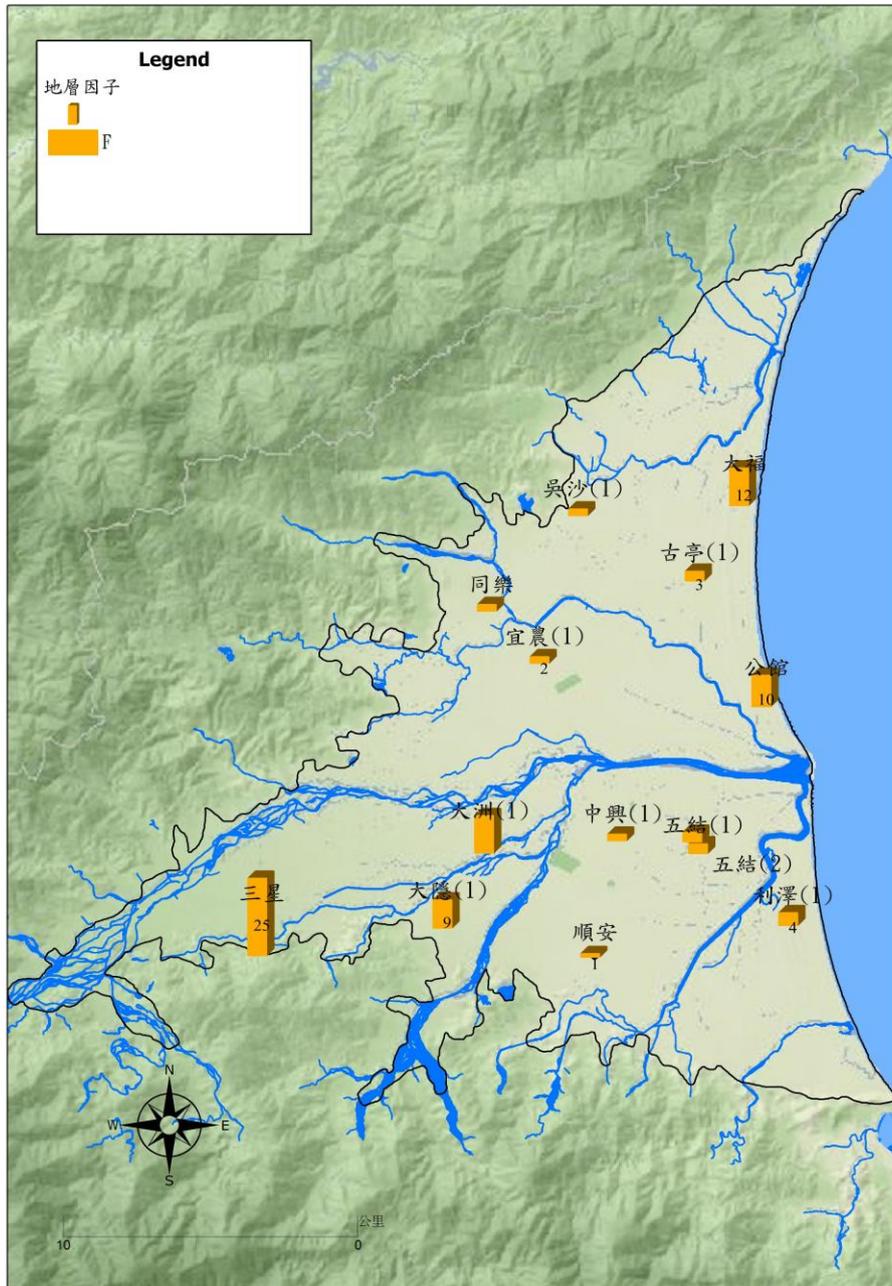


圖 5.4-8 地層因子直方圖

2. 分群分析結果說明

考量地表至含水層間含泥否對於地電阻量測效果之影響，將研究區域分為含泥受壓區與非含泥受壓區。本計畫以 6.5 小節內所建置之三維水文地質(數化)模型，透過 RockWorks 之圖像展示功能分析空間中之岩性分佈，圖 5.4-9 展示地表下 5 至 7 公尺的岩性分佈，其中黃色區域即為泥層分布範圍。

綜合前述分析可得本計畫之分區可分為受壓區與非受壓區。

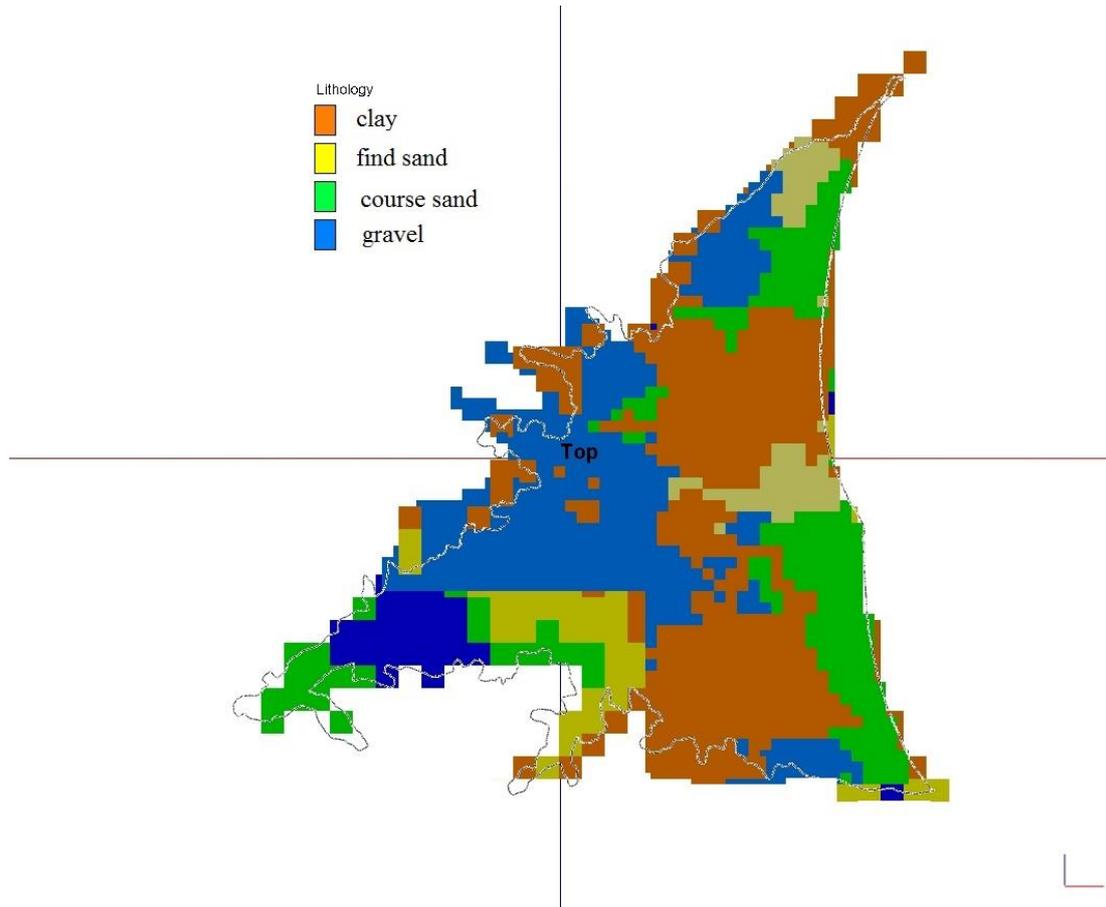


圖 5.4-9 研究區域含泥與否分區說明

3. 透水係數與地層因子關係式建立

圖 5.4-10 展示研究區域內，位於受壓區與非受壓區之觀測井分佈；圖 5.4-11 則為研究區域內，各觀測井之 K 對 F 之散佈圖。由圖 5.4-11 可知，含泥區與不含泥區之點位大致上可分為兩個集合，非受壓區點位，其 F 大約 4 以上；受壓區之點位皆在 4 以下。

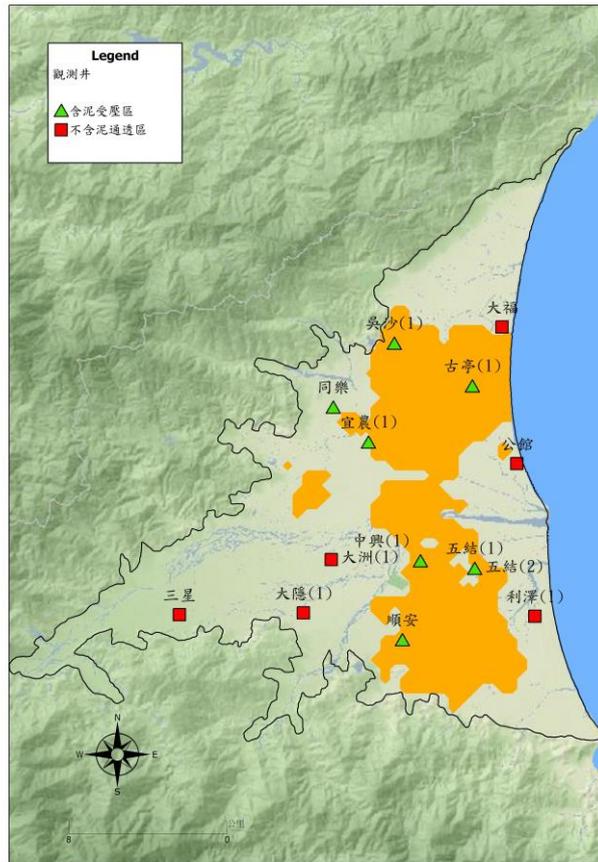


圖 5.4-10 含泥區與不含泥區之觀測井分佈

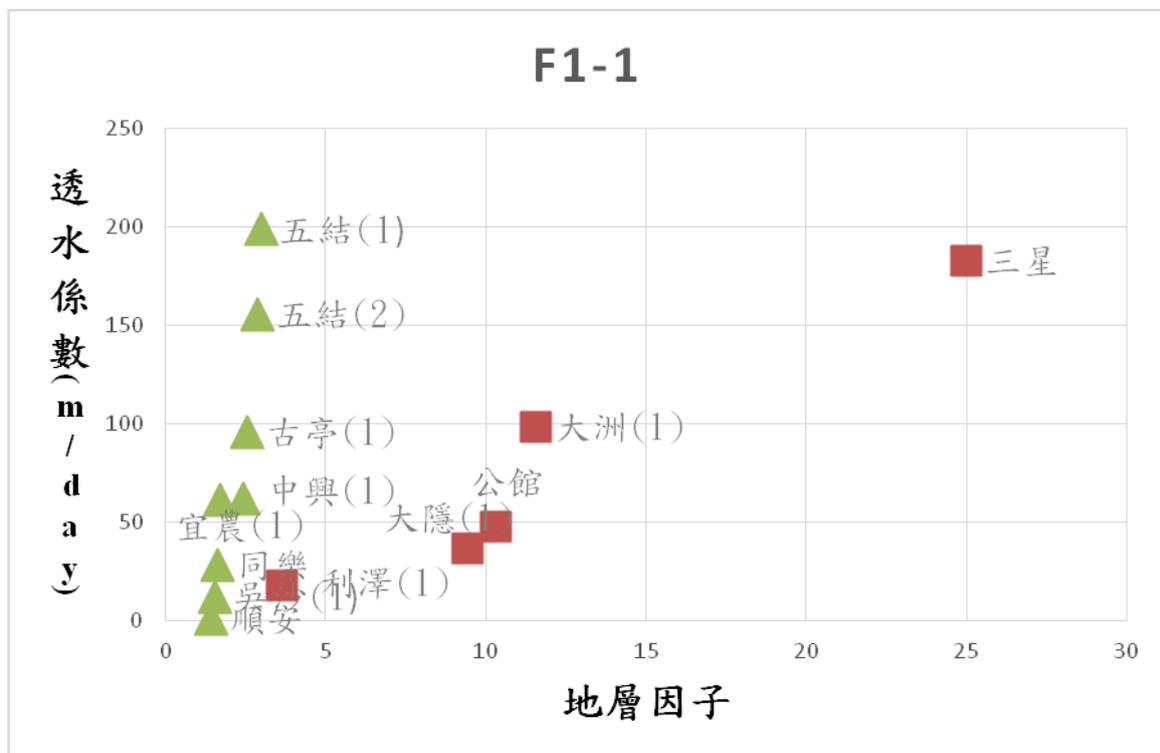


圖 5.4-11 各觀測井之透水係數對之散佈圖

接著將此兩資料集合之 F 值，與觀測井之 K 值進行迴歸分析，結果如圖 5.4-12 所示，受壓區之迴歸式如式(5.4-4)所示，其 R^2 為 0.87，非受壓區之迴歸式如式(5.4-5)所示，其 R^2 為 0.92。

$$K = 101.7F - 141.84 \dots\dots\dots(式 5.4-4)$$

$$K = 8.1264F - 24.021 \dots\dots\dots(式 5.4-5)$$

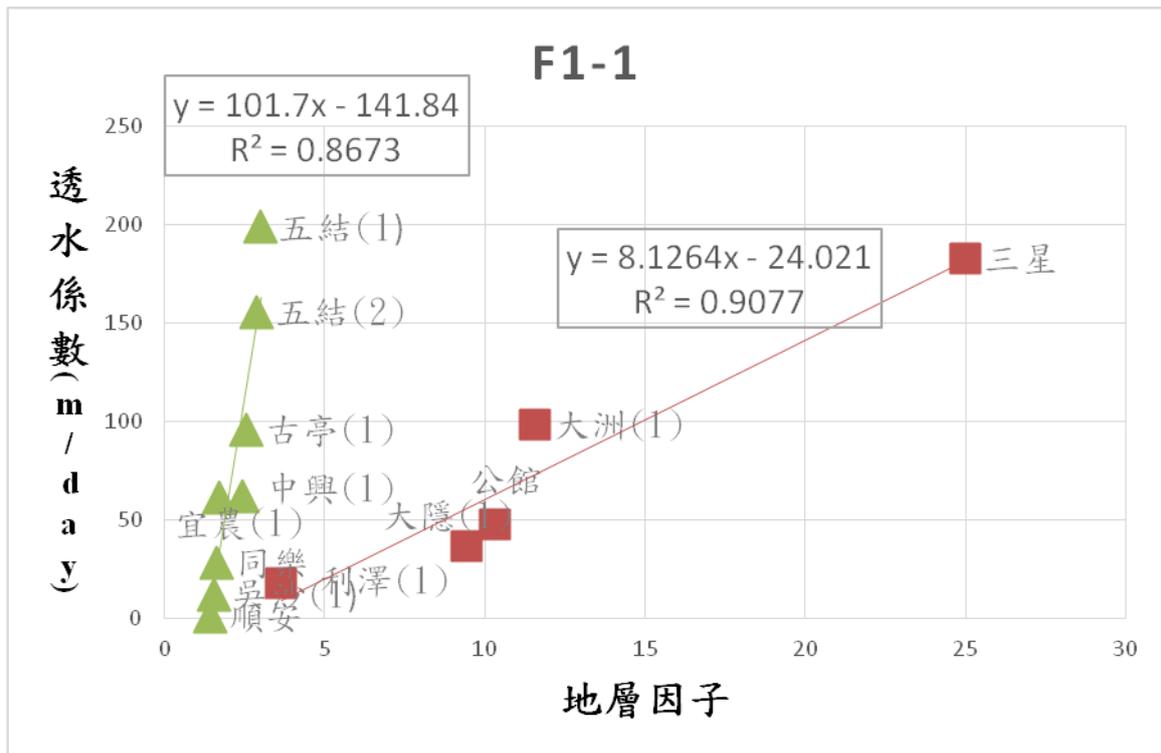


圖 5.4-12 地層因子與透水係數之迴歸關係圖

4. 三維透水係數空間分布推估

在 K 值之推估上，需先推求 F 值，再帶入各區 K 與 F 之關係式，推估三維透水係數空間分布，流程圖如圖 5.4-5 所示，各步驟研究成果展示如下：

- (1) 推估 R_o 與 R_w 值之空間分佈：將原始量測資料，如圖 5.4-13(a)(b)與圖 5.4-14(a)(b)所示，透過空間內插方法(Inverse distance)推估至研究區域，結果如圖 5.4-13(c)(d)與圖 5.4-14(c)(d)所示。

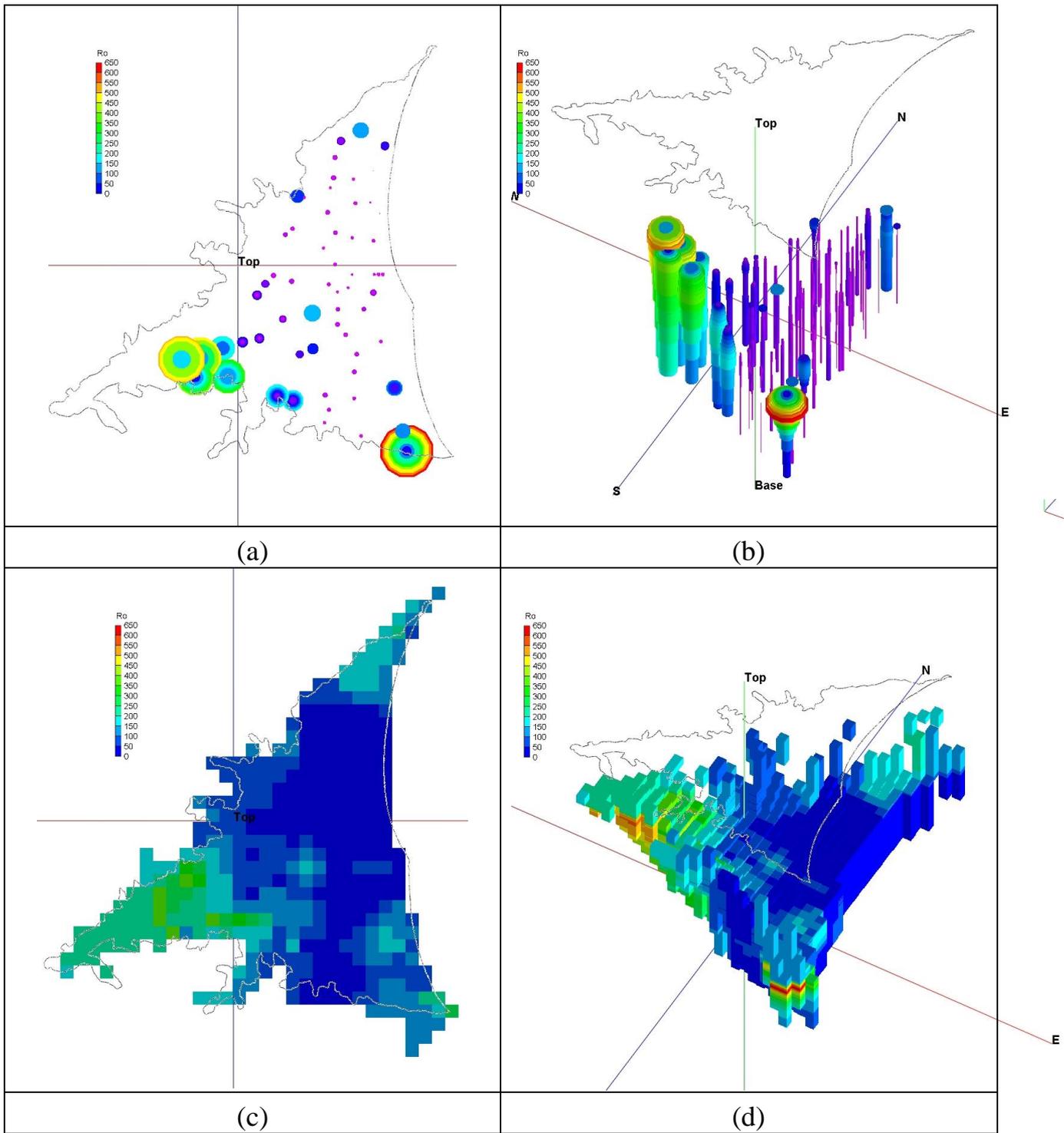


圖 5.4-13 土體電阻值空間分布

(a)原始資料空間位置俯視圖；(b) 原始資料空間位置側視圖

(c) 內插後土體電阻值空間分布俯視圖；(d) 內插後土體電阻值空間分布側視圖

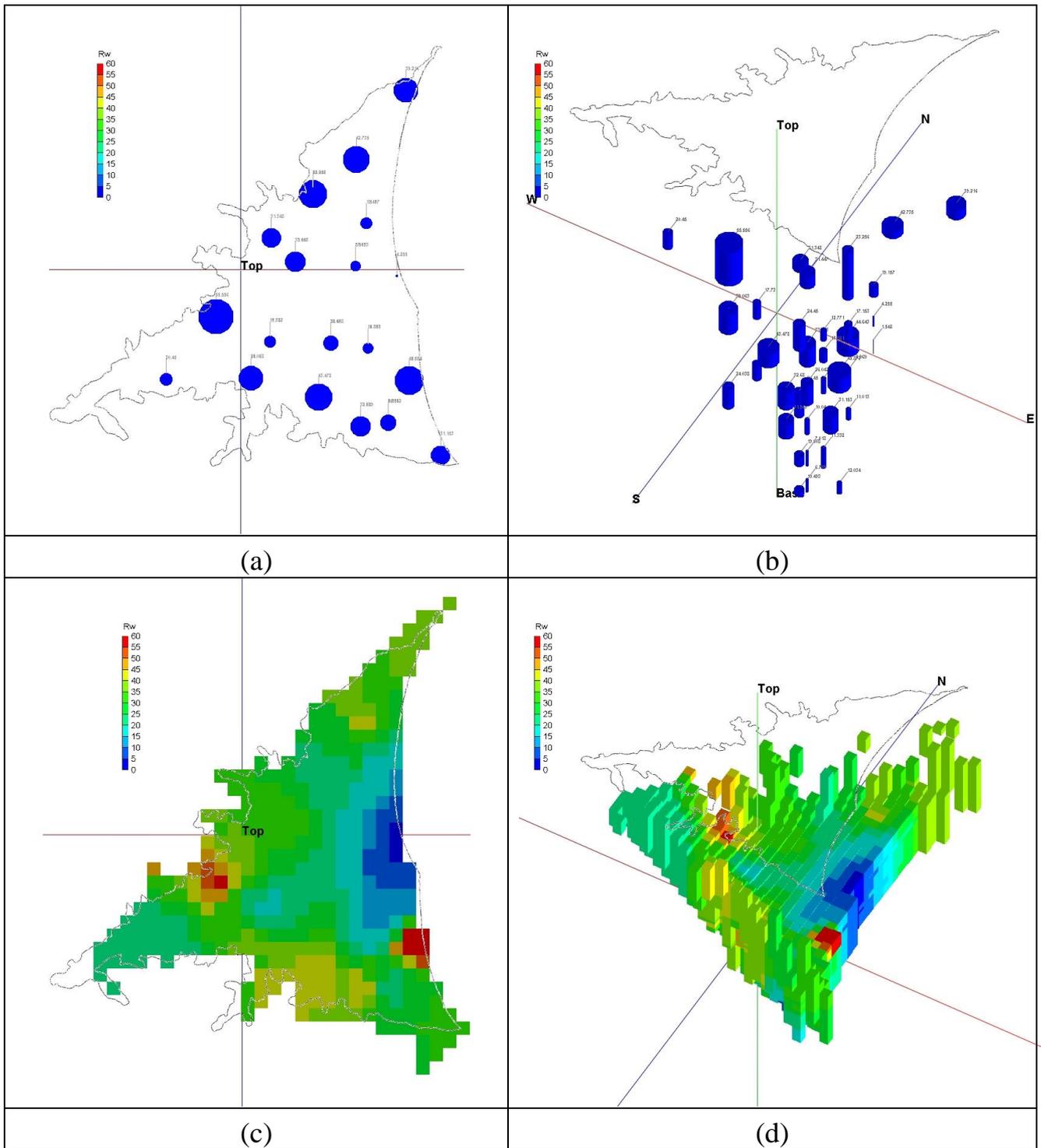


圖 5.4-14 水質電阻值空間分布
 (a)原始資料空間位置俯視圖；(b) 原始資料空間位置側視圖
 (c) 內插後水質電阻值空間分布俯視圖；(d) 內插後水質電阻值空間分布側視圖

(2) 計算各網格之 F 值：推得到 R_o 與 R_w 值之空間分佈後，便可將前述兩項參數以式(5.4-1)進行計算，推估 F 值之空間分布，結果如圖 5.4-15 所示。

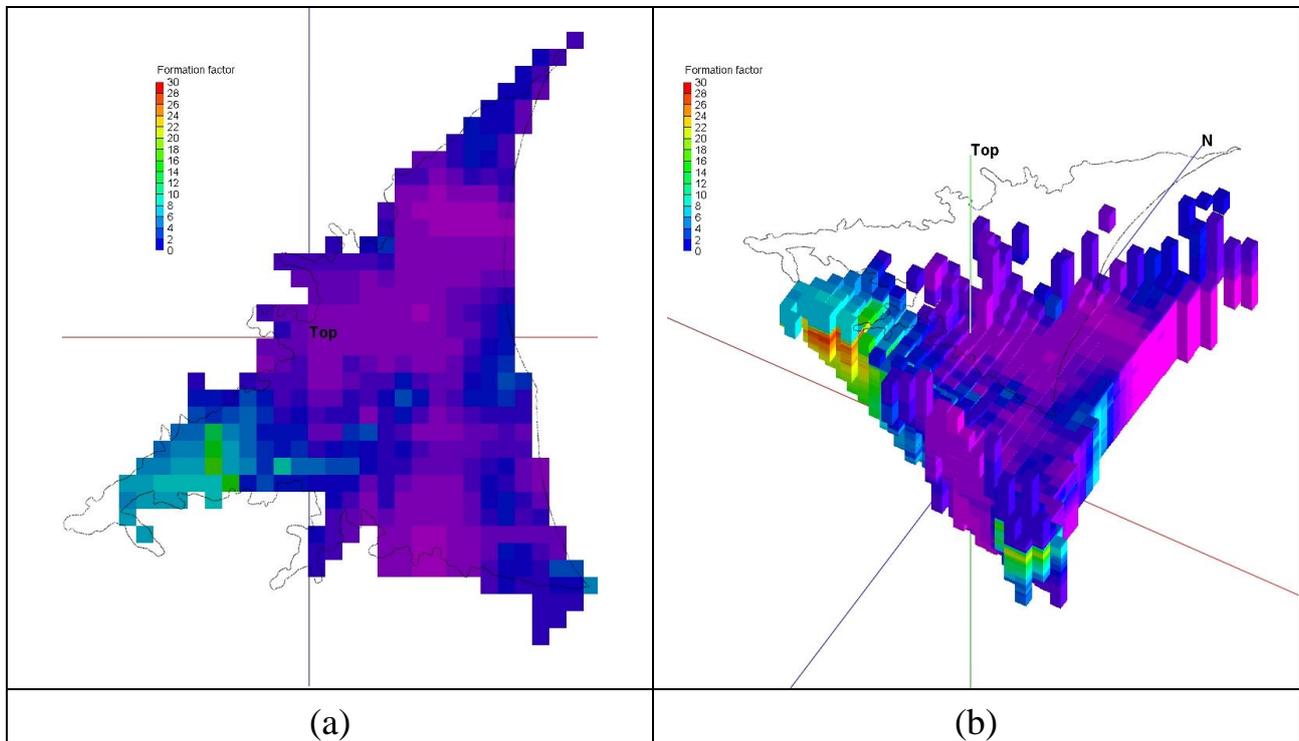
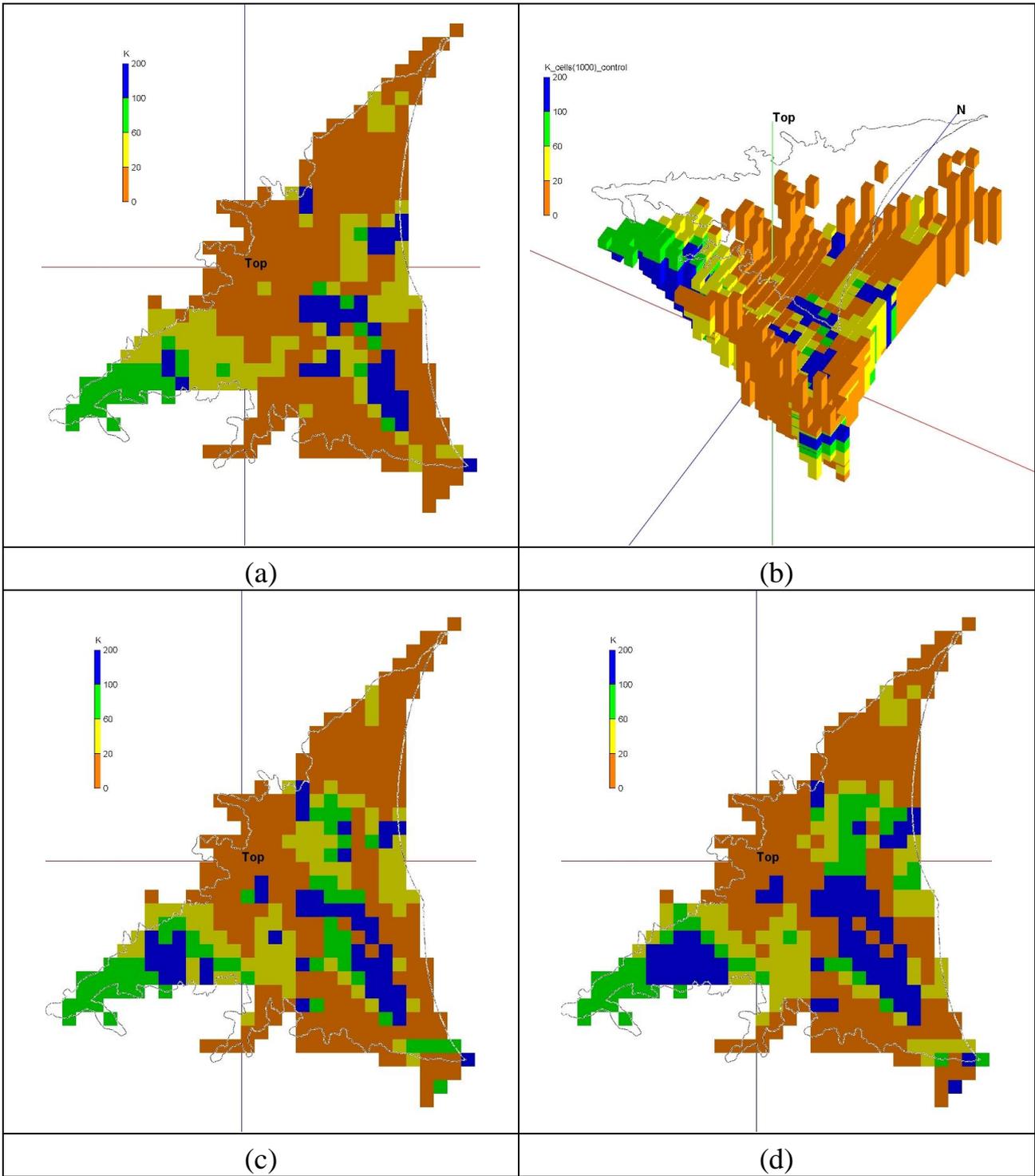


圖 5.4-15 地層因子空間分布

(a) 地層因子空間分布俯視圖；(b) 地層因子空間分布側視圖

(3) 推估三維透水係數空間分布：依照受壓與非受壓區，將各網格之 F 值，依據表層含泥區與不含泥區(如圖 6.4-10)，分別代入式(6.4-4)與式(6.4-5)，進行 K 值推估，結果如圖 6.4-16 所示。



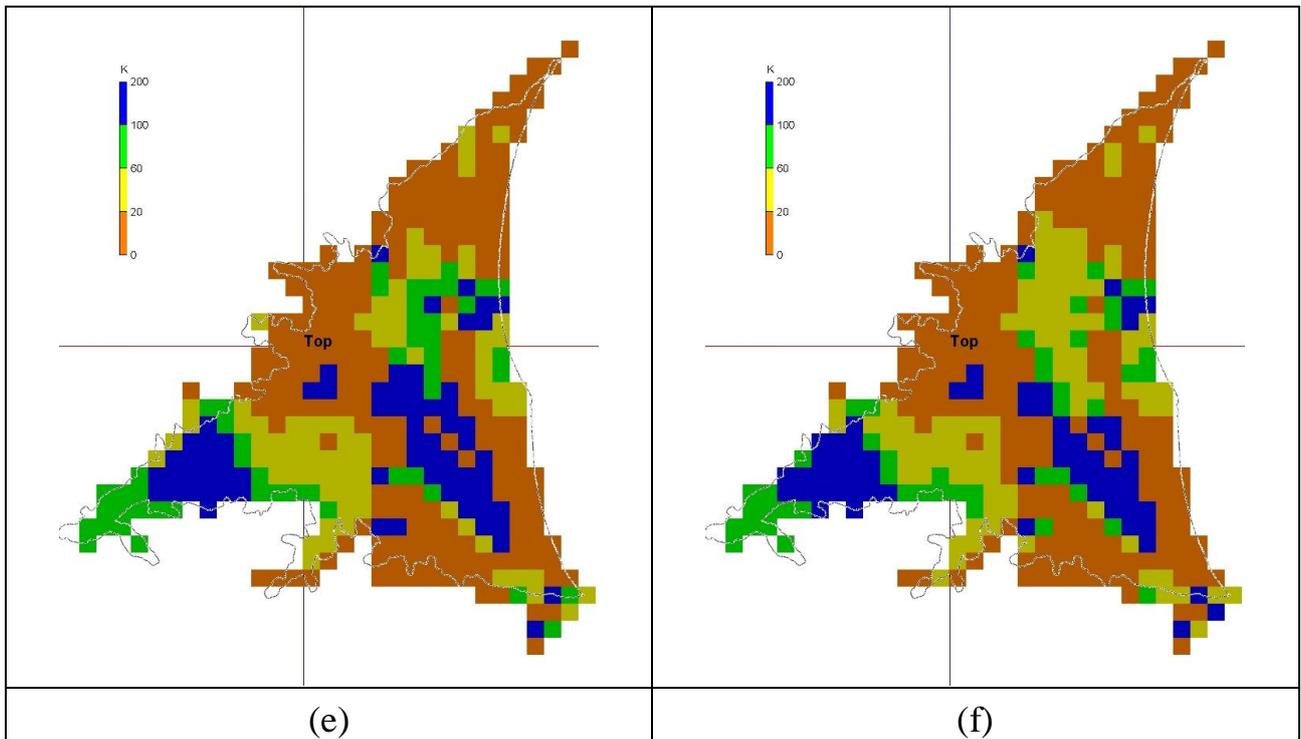


圖 5.4-16 透水係數空間分布

- (a) 透水係數空間分布俯視圖；(b) 透水係數空間分布側視圖
 (c) 地表下 15(m) 水係數空間分布；(d) 地表下 30(m) 水係數空間分布
 (e) 地表下 45(m) 水係數空間分布；(f) 地表下 60(m) 水係數空間分布

(四) 後續應用

本節所建立之三維透水係數場，其水平空間解析度與地下水流模式一致，垂向解析度上亦較模式為高，本計畫將以此三維透水係數場為基礎，配合模式之含水層分層架構與參數分區，計算各分區之整合 K 值，作為地下水流模式之透水係數起始值，協助參數檢定之進行。本計畫後續多項工作，如地下水系統之水平衡分析、地下水可用水量評估與地下水補注區對地下水量與水質之影響分析，皆以地下水模式進行分析，因此若能提供模式合理之參數初始值，將可改善模式檢定之效率及合理性，提升後續各項工作成果之正確性。

5.4.2 應用重力量測於比出水量推估

比出水量(S_y)推估主要基礎為牛頓萬有引力定律，當地下水儲蓄量產生變化時，將影響鄰近區域之重力場分布。B. D. Tapley (2004) 與 John Wahr (2004) 指出短期之重力變化，主要受到土壤中蓄水量變化的影響。M. Rodell and J. S. Famiglietti (2002) 與 Matthew Rodell (2007) 亦指出藉由地下水位之觀測值，可用以推估地下水蓄水量的變化，進而移除飽和含水層與土壤含水量對重力之影響。Shaakeel Hasan and Peter A. Troch (2006)則應用超導重力儀量測重力場之時序變化，該研究指出重力殘差變化，與未飽和層地下水位及降雨量均具有高度相關性。由前述研究顯示，應用重力量測資料推估比出水量為一可行之方法，因此本計畫於地下水位觀測站附近設置重力儀進行重力量測，並蒐集該地下水位站之地下水位資料，藉由重力加速度變化量與地下水位變化推估該區域之比出水量(S_y)。

一、比出水量推估流程

比出水量推估流程如圖 5.4-17 所示，首先建置地下水數值模式並進行水位模擬，可得重力量測當日之水位分布情形，由兩次重力量測間之水位變化及初始設定之比出水量，可計算得地下水儲蓄改變量，再應用牛頓萬有引力定律及牛頓第二運動定律可模擬得重力加速度改變量。比較模擬之重力加速度改變量及觀測之重力加速度改變量，當兩者誤差值大於 $1 \mu \text{gal}$ ($1 \text{gal} = 1 \text{cm/s}^2$) 時，則調整比出水量，重新計算地下水儲蓄改變量及重力加速度改變量，直至小於容許誤差，乃完成比出水量參數推估。

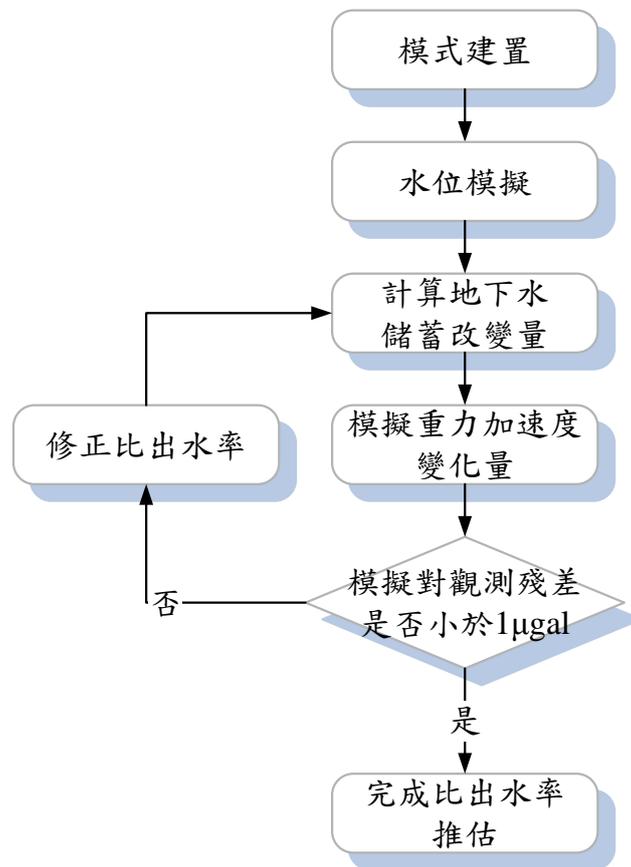


圖 5.4-17 比出水量推估流程圖

二、重力積分方法

使用重力加速度變化量進行模擬值與觀測值之比較，重力加速度之計算可由牛頓萬有引力定律及牛頓第二運動定律而得，牛頓萬有引力定律公式如式 5.4-6 所示，牛頓第二運動定律公式如式 5.4-7 所示，將式 5.4-6 代入式 5.4-7 得式 5.4-8。

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \dots\dots\dots(\text{式 5.4-6})$$

$$F = ma_g \dots\dots\dots(\text{式 5.4-7})$$

$$a_g = G \frac{M}{r^2} \dots\dots\dots(\text{式 5.4-8})$$

於計算重力影響時，其中 G 為重力常數， r 為水體變化量質心至重力站之距離， M 為地下水體變化量， a_g 為重力加速度變化量。

然在模擬重力前，需先使用 MODFLOW 建置數值模式，進行地下水位模擬，而後取出每日之地下水位分布。將兩次重力量測時之地下水位相減，即可得知此兩次量測期間內之水位變化，從而推估水體質量變化及其對重力站之影響。其中在建置數值模式時，需檢定相關參數，始能讓模式更符合現地狀況，然若模式網格數過多，計算量大，花費時間太長，則不利於參數檢定，因此初始設定地下水數值模式之網格設為 1 平方公里。但當進入重力積分時，由於地下水位面距離地表從 1 公尺到 30 公尺不等，1 平方公里之網格進行重力積分後之精度相對於觀測精度而言過粗，其中水體質心對重力站之距離影響最大，因

此需再將網格加密。經本計畫研究測試，乃將重力站 3 公里範圍內之網格依地下水深度，切細為邊長 1 公尺或 10 公尺之小網格，即網格加密為原本一萬倍到百萬倍，再對平原水體變化量進行積分，此可有效提升積分精度，讓積分誤差小於觀測誤差，而不致對推估結果產生影響。

三、比出水量檢定結果

以下將說明以重力方法檢定比出水量之檢定成果，分別包含三星、大洲、大隱、順安與中興等五站，其中順安與中興兩站受侷限含水層影響，其主要重力變化應非地下水位變化所致，故排除不計算，其餘三站推估結果如表 5.4-2 所示。

表 5.4-2 比出水量推估結果

	三星	大隱	大洲	順安	中興
井頂高	92.3	40.3	18.2	11.1	6.3
水面深度	30.20	10.70	1.76	0.09	1.34
重力差	20	24	4	10	0
水位差	7.70	2.26	0.13	0.02	0.34
推估 Sy	0.07	0.25	0.77	-	-

(重力單位： μgal 、長度單位：m)

如上表所示，分別於 4 月份與 9 月份進行重力量測，4 月為枯水季其水位較低，量測之重力值較小，而 9 月為豐水季其水位較高，量測之重力值較大，因此兩次量測間地下水位上升且重力量測值增加，僅中興站受其他環境噪音影響而重力變化不同。在推估結果方面，三星比出水量約為 0.07，大隱比出水量約為 0.25，兩者推估結果均位於合理區間內，尚可用以作為後續研究使用，而大洲站部分則重新檢視其附近之地理環境，此地下水位站位於大排水溝附近，該排水溝約 2 米深，由於排水溝使用時間已久，水溝壁已產生許多裂縫，水溝水應可對地下水產生出入滲效應，此外該水溝與河水相連，且地下水位面深約 1.76 公尺，歷年豐估水季變化約 0.6 公尺，因此可判斷此地下水位站可能主要受大排水溝影響，而使水位量測值為局部性之水位變化，與之相較重力量測值則為方圓 3 公里內之總量變化，兩量測量所受影響不同，造成推估結果與實際情形不同。

5.5 水文地質數化模型建置

水文地質數化模型為水文地質架構與水文地質參數成果之整合，因此在完成水文地質數化模型建置後，即可到三維之參數與地質數位模型，可藉此具體呈現不同視角以及不同面相之水文地質特徵，並作為後續地下水數值模式建置以及補注區劃設之依據。

5.5.1 建置說明

水文地質數化模型建置流程如圖 5.5-1 所示，為了綜整地質架構與參數推估結果，本計畫需先針對 5.3 節所建立之水文地質架構進行數位化，接著將水文地質架構數化成果與 5.4 節的水文地質參數推估成果，共同存儲於 RockWorks 水文地質模型資料庫內，之後，透過 RockWorks 之三維水展示功能，可呈現各種視角之水文地質特徵，可有效協助後續相關分析之進行。

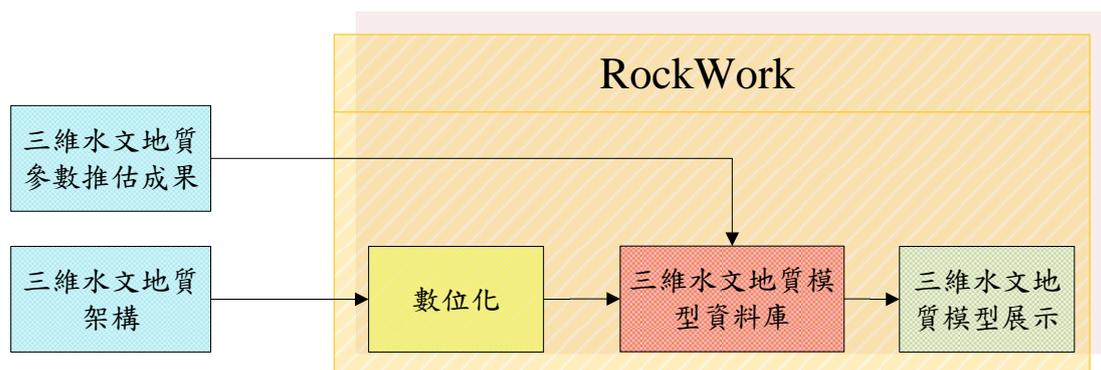


圖 5.5-1 水文地質數化模型建置流程

5.5.2 水文地質架構數位化

水文地質架構數位化方法如圖 5.5-2 所示。首先將地調所提供之六張水文地質剖面圖匯入本計畫所開發之數位化程式，以水平向 500 公尺，垂向 2.5 公尺解析度下之網格，記錄每一網格內之主要岩性資料，如圖 5.5-3 所示。原始剖面圖中包含各觀測井之分佈及岩性構造，然其顏色與周遭相同岩性之配色略有不同，因此本計畫在數位化之過程中將其濾除，補以周遭相同岩性之配色。圖 5.5-3(a)、(c)、(e)、(g)、(i)與(k)為原始的地質剖面圖，圖 5.5-3(b)、(d)、(f)、(h)、(j)與(l)為地質剖面圖之數化成果，經兩兩比對後可確認兩者之一致性。

在完成地質剖面圖數位後，接著將數化後的岩性資料，儲存於 RockWorks 資料庫內，資料庫儲存格式如圖 5.5-4 所示。完成數化後的岩性資

料，本計畫採用建置虛擬觀測井的方式，將岩性資料儲存於 RockWorks 觀測井資料庫內(Borehole Manager)，如圖 5.5-4 所示。圖 5.5-4 為 RockWorks 觀測井資料庫的操作介面，可藉由左邊綠框內的觀測井井名作索引，查詢岩性資料表，而表格內記錄岩性種類、岩性代號與岩性深度範圍。

接著以此數位化後之資料為基礎，透過 RockWorks 內建之三維空間內插演算法(最近距離法)，推估三維空間之岩性分布，完成三維水文地質架構之建置，如圖 5.5-5 所示。最後將此三維水文地質架構儲存於 RockWorks 資料庫內，以供後續分析使用。

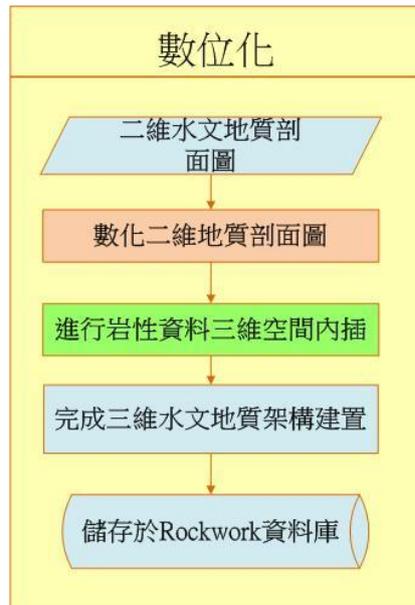
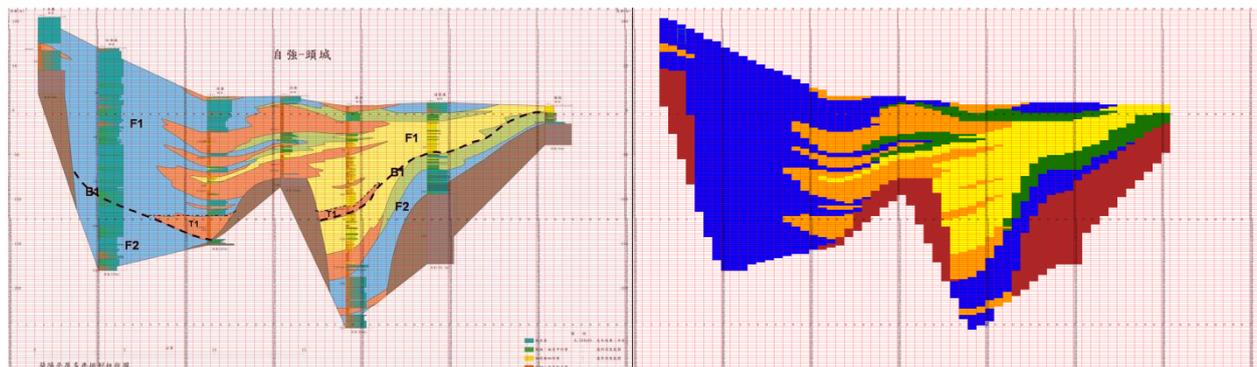
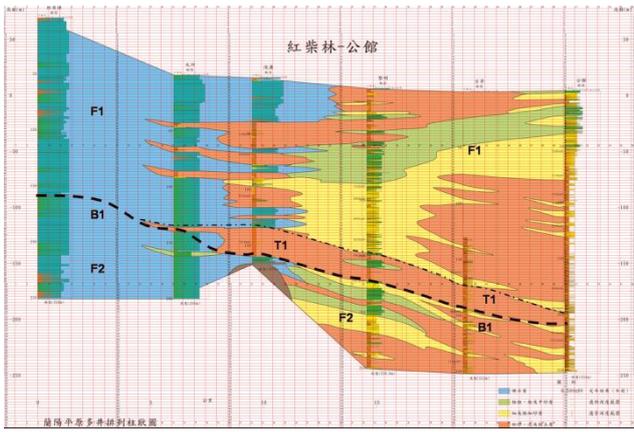


圖 5.5-2 水文地質架構數化之流程圖

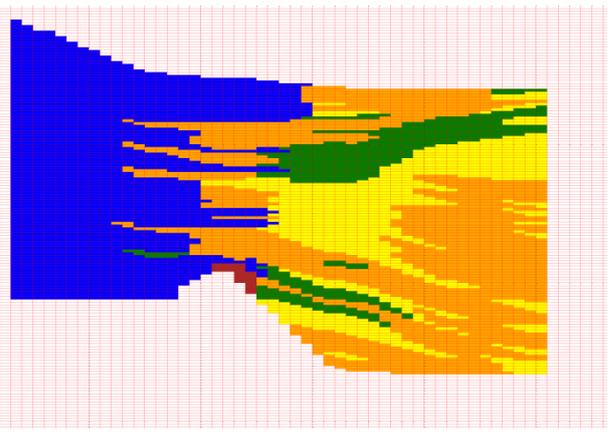


(a)

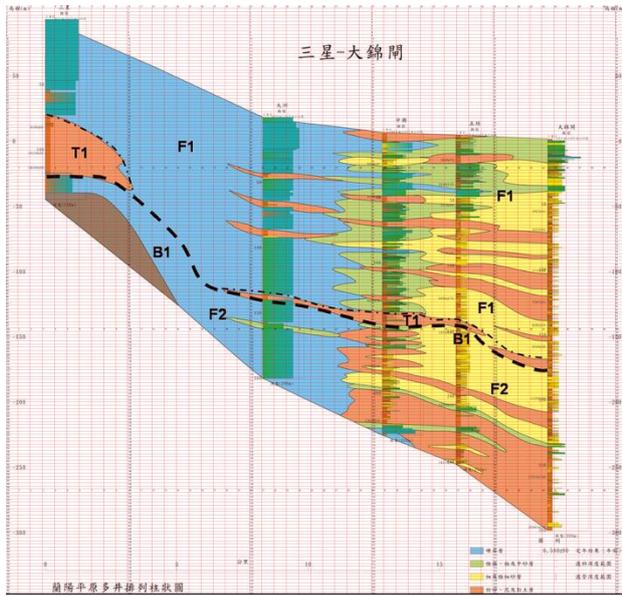
(b)



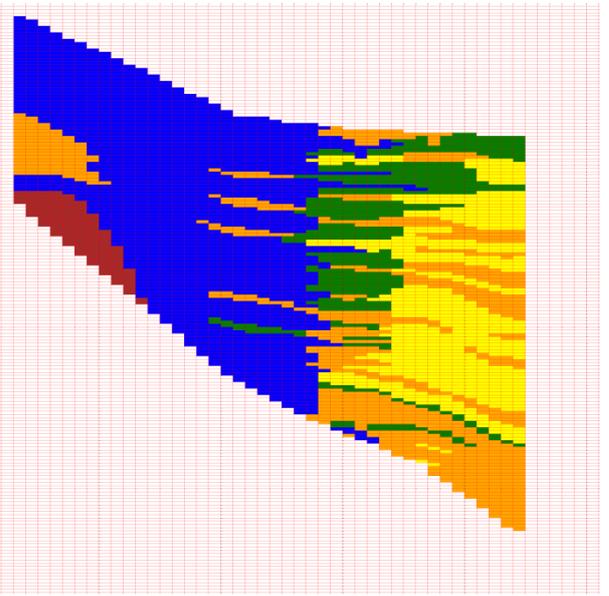
(c)



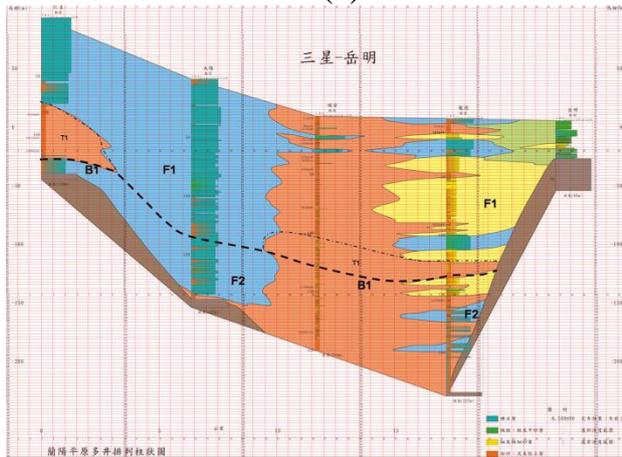
(d)



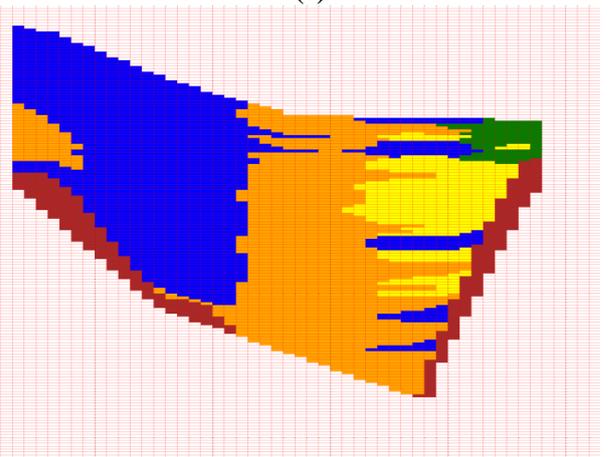
(e)



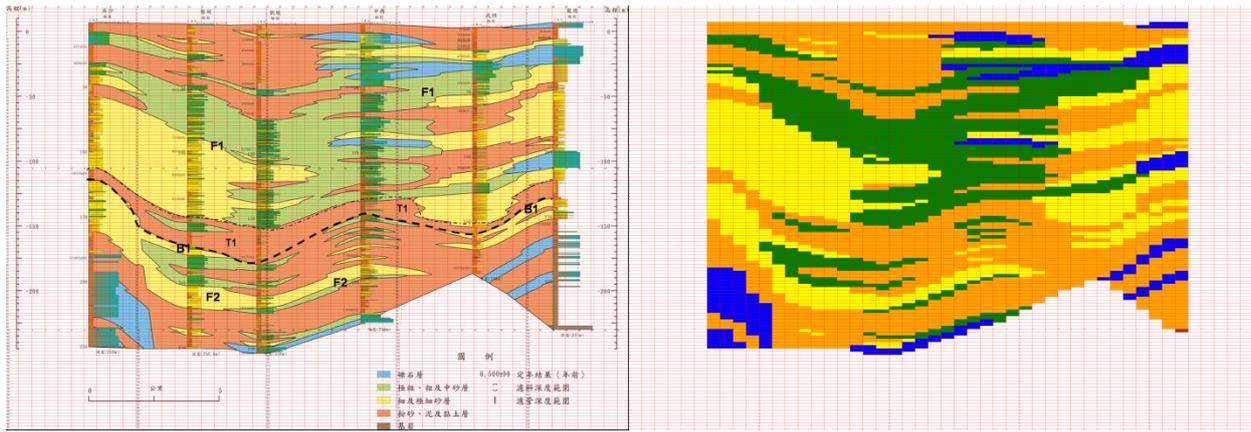
(f)



(g)

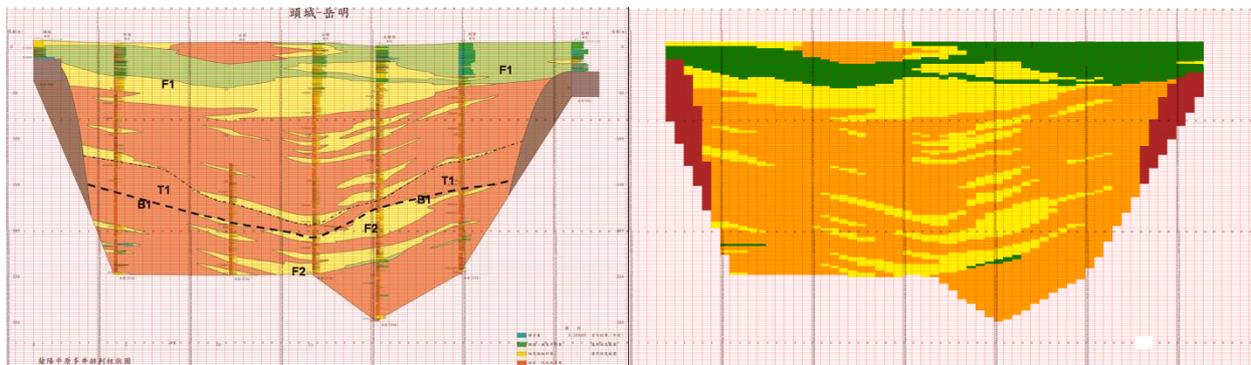


(h)



(i)

(j)



(k)

(l)

圖 5.5-3 二維剖面圖數化成果比對圖。

- (a)自強至頭城原始剖面圖。(b) 自強至頭城網格數化成果圖。
- (c)紅柴林至公館原始剖面圖。(d) 紅柴林至公館網格數化成果圖。
- (e)三星至大閘錦原始剖面圖。(f) 三星至大閘錦網格數化成果圖。
- (g)三星至岳明原始剖面圖。(h) 三星至岳明網格數化成果圖。
- (i)吳沙至龍德原始剖面圖。(j) 吳沙至龍德網格數化成果圖。
- (k)頭城至岳明原始剖面圖。(l) 頭城至岳明網格數化成果圖。

Borehole Data Manager (361 boreholes)

Location: Well Construction

Lithology

Depth to T	Depth to B	Keyword	Comment
40.0	42.5	4	gravel
42.5	45.0	4	gravel
45.0	47.5	4	gravel
47.5	50.0	4	gravel
50.0	52.5	4	gravel
52.5	55.0	4	gravel
55.0	57.5	4	gravel
57.5	60.0	4	gravel
60.0	62.5	4	gravel
62.5	65.0	4	gravel
65.0	67.5	4	gravel
67.5	70.0	4	gravel
70.0	72.5	4	gravel
72.5	75.0	4	gravel
75.0	77.5	4	gravel
77.5	80.0	4	gravel
80.0	82.5	4	gravel
82.5	85.0	4	gravel
85.0	87.5	4	gravel
87.5	90.0	4	gravel
90.0	92.5	4	gravel
92.5	95.0	4	gravel
95.0	97.5	4	gravel
97.5	100.0	4	gravel
100.0	102.5	4	gravel
102.5	105.0	1	clay
105.0	107.5	1	clay
107.5	110.0	1	clay
110.0	112.5	1	clay
112.5	115.0	1	clay

岩性代號 (Red box around Keyword column)

岩性種類 (Blue box around Comment column)

圖 5.5-4 數位化後之岩性資料儲存於資料庫示意圖

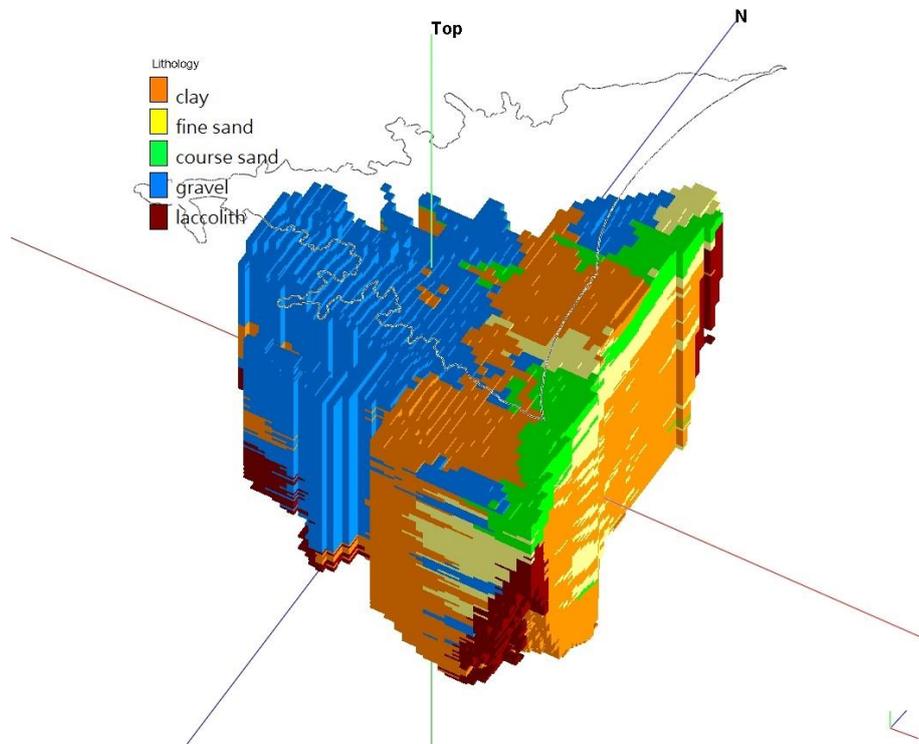


圖 5.5-5 三維水文地質數位化架構

5.5.3 水文地質架構資料及三維圖像展示

由於本計畫所產出的水文地質數化架構與水文地質參數推估成果，皆以三維網格進行數位化，兩者之空間分佈完全一致，因此若將兩者同時以三維空間圖像展示，將會造成讀者不易辨識，因此本小節首先將直接展示水文地質模型資料庫之資料儲存格式，再分別進行水文地質架構與參數之三維空間展示。

在水文地質架構資料部分，水文地質模型資料庫之資料儲存格式如圖 5.5-6 所示，由圖可知，本計畫所建立之三維水文地質模型之資料格式分別為各網格之 X 軸、Y 軸與 Z 軸座標，以及相對應之岩性與透水係數值。此資料儲存型態相對簡單且易於作為後續相關分析之應用，例如將資料輸出為 ASCII 格式之檔案後，可進一步將原始資料轉換為 Modflow 層化(layer)之透水係數輸入檔，亦可將此檔案輸入 Voxler 等高階三維繪圖軟體，呈現三維岩性之展示與分析，輔助辨識含水層分層架構，作為地下水流數值模式建置之參考。

在三維圖像展示的部份，本計畫以不同視角以及不同面相展示水文地質架構與水文地質參數。

(1) 三維空間分佈

圖 5.5-7(a) 透水係數之三維空間分佈圖，圖 5.5-7(b) 為三維岩性分布圖。兩圖在厚度上略有差異，主要原因為透水係數需透過地電阻資料與抽水試驗資料進行推估，因此受限於資料解析度，僅能推估至距地表約 100 公尺深。圖 5.5-7(a) 中，橘色代表 K 值介於 0 至 20 m/day 之間，黃色代表 K 值介於 20 至 60 m/day 之間，綠色代表 K 值介於 60 至 100 m/day 之間，藍色代表 K 值大於 100 m/day 以上。圖 5.5-7(b) 中，橘色代表泥質，黃色代表細砂，綠色代表粗砂，藍色代表礫石。由此三維俯視圖可知，扇頂區域之表層大都為礫石，其 K 值在扇頂最大，往下游方向逐漸縮小，至扇央往海岸方向，表層多為泥砂交錯之分佈，而其 K 值大多在 20 m/day 以下，而在沿海粗砂分布較廣之區域，其 K 值則在 60 m/day 以上。

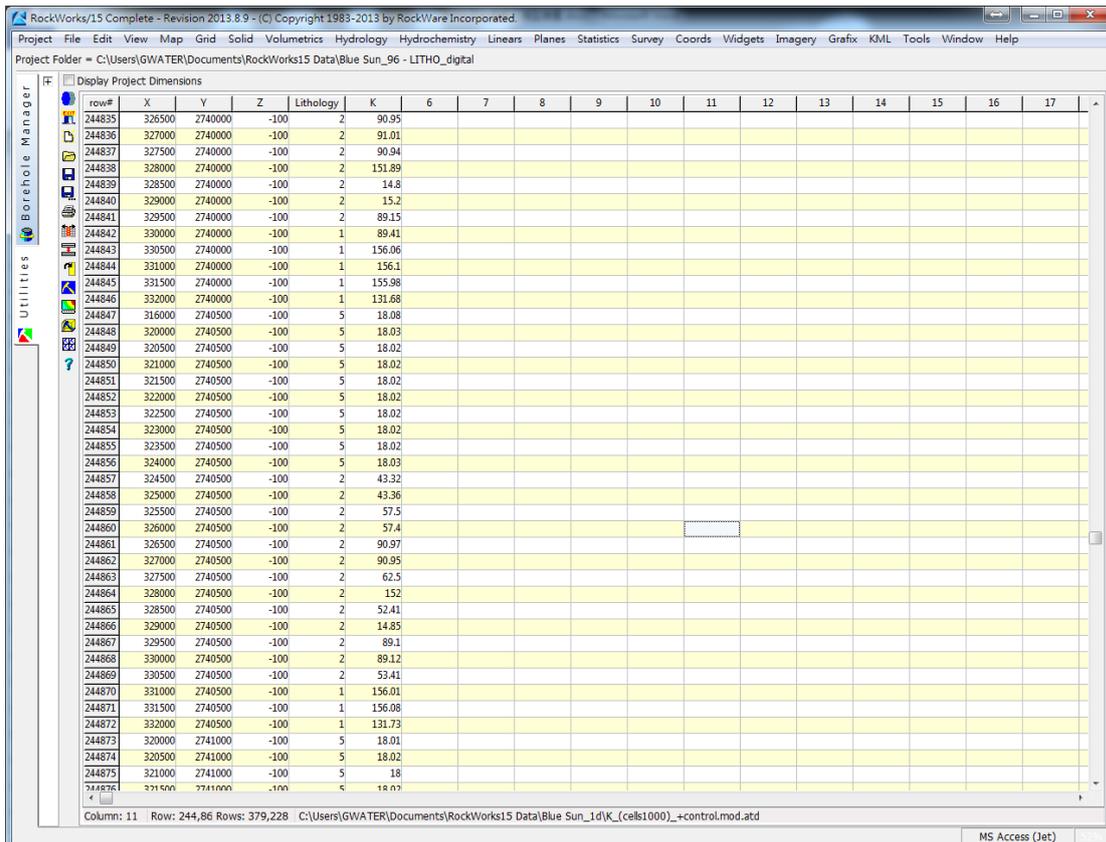
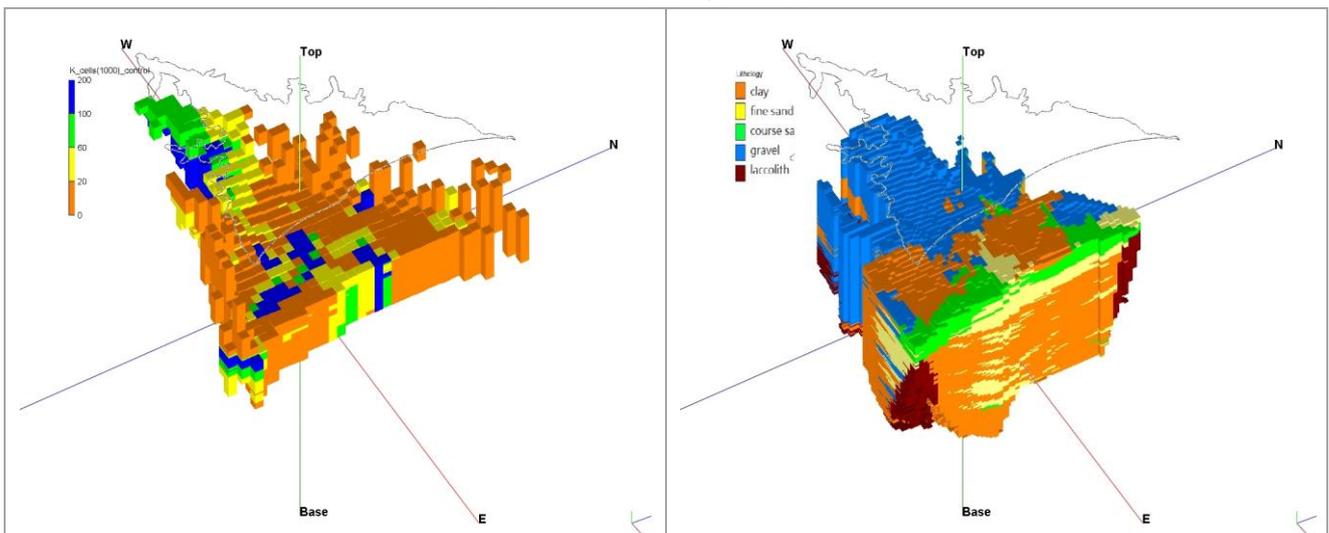


圖 5.5-6 網格資料展示



(a)

(b)

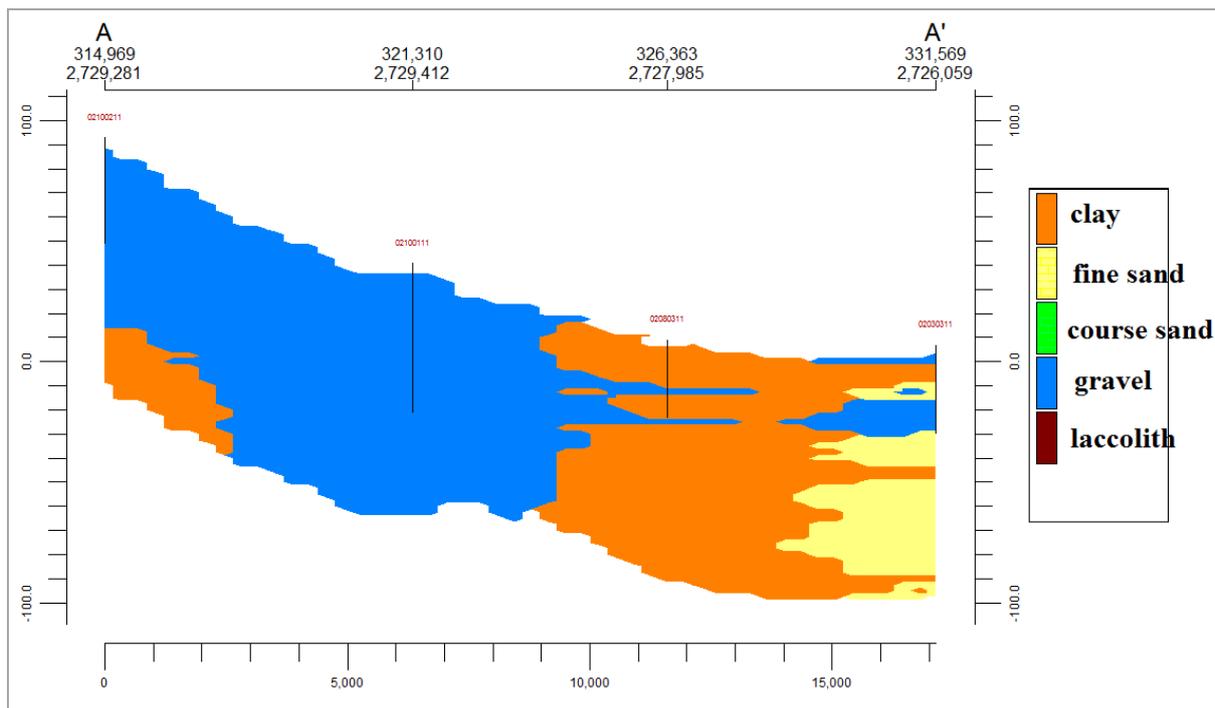
圖 5.5-7 水文地質模型三維空間分佈(a)三維透水係數分佈圖。(b)三維岩性架構分佈圖。

(2) 二維剖面比對

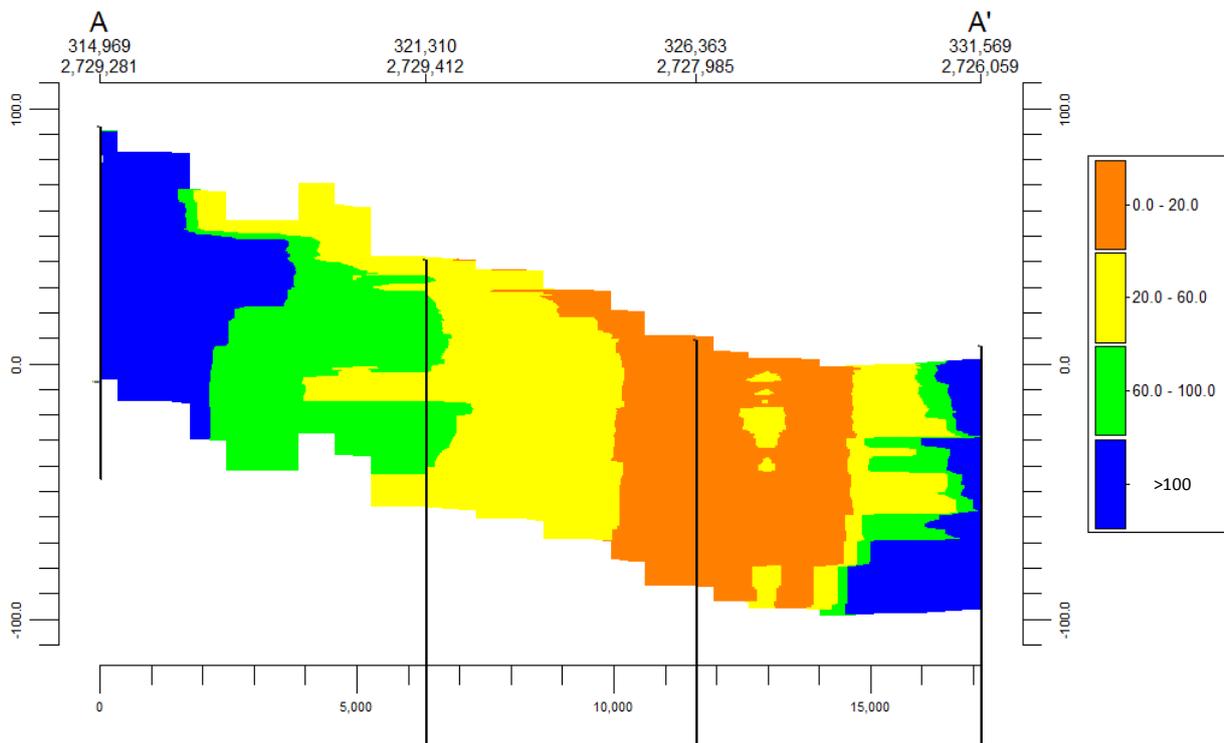
本計畫建立之三維水文地質模型，可透過剖面展示之方式，了解區域內部任一剖面之岩性及參數分佈，為研究者提供更詳盡之地層內部資訊。

圖 5.5-8(a)與(b)分別為以三星、大隱、順安至龍德間之井間連線，所繪製之水文地質架構與水文地質參數剖面圖。藉由此兩剖面圖可知，岩性與透水

係數間存在一定之關聯性。圖(a)中，左半邊主要為礫石分佈，之後與泥相接，而在圖(b)中，對應至礫石之範圍內，K 值則呈現由 100 m/day 之高通透性，逐漸下降至 60~20 m/day 之間，最後與泥相接時，則降至 20 m/day 以下。另外，由圖(b)可知，在礫石分佈範圍內，K 值呈逐漸下降趨勢，而非維持在原先之 100 m/day 以上，分析其主要原因應為 K 值推估時，除了考量觀測井資訊外，亦考量大量之地電阻資訊，因此得以呈現出較為細部之 K 值分佈特徵，而岩性分佈則主要參考觀測井或地質井岩心，資料密度相對地電阻為少，因此僅能反應大範圍之趨勢。



(a)



(b)

圖 5.5-8 剖面圖。(a)三星至龍德水文地質架構剖面。(b)三星至龍德水文地質參數剖面(K)。

(3) 空間資料查詢

本計畫所使用的展示工具，除了可提供研究人員檢視其內部任意剖面及角度之水文地質模式變化外，亦能自行定義井群間之連線，繪製此連線之二維井間剖面圖，以及多條井間連線之柵狀圖。此外，除了提供展示的功能介面外，亦提供查詢介面，如圖 5.5-9 所示，此介面可藉由調整三個維度的視角，改變使用者的視覺角度，如圖內藍框所示；另外，亦能藉由調整三個維度的深度，改變模式深度，最後可藉由滑鼠點選欲查詢的網格，便能於圖內下方綠色方格內，查詢到網格的位置與數值。

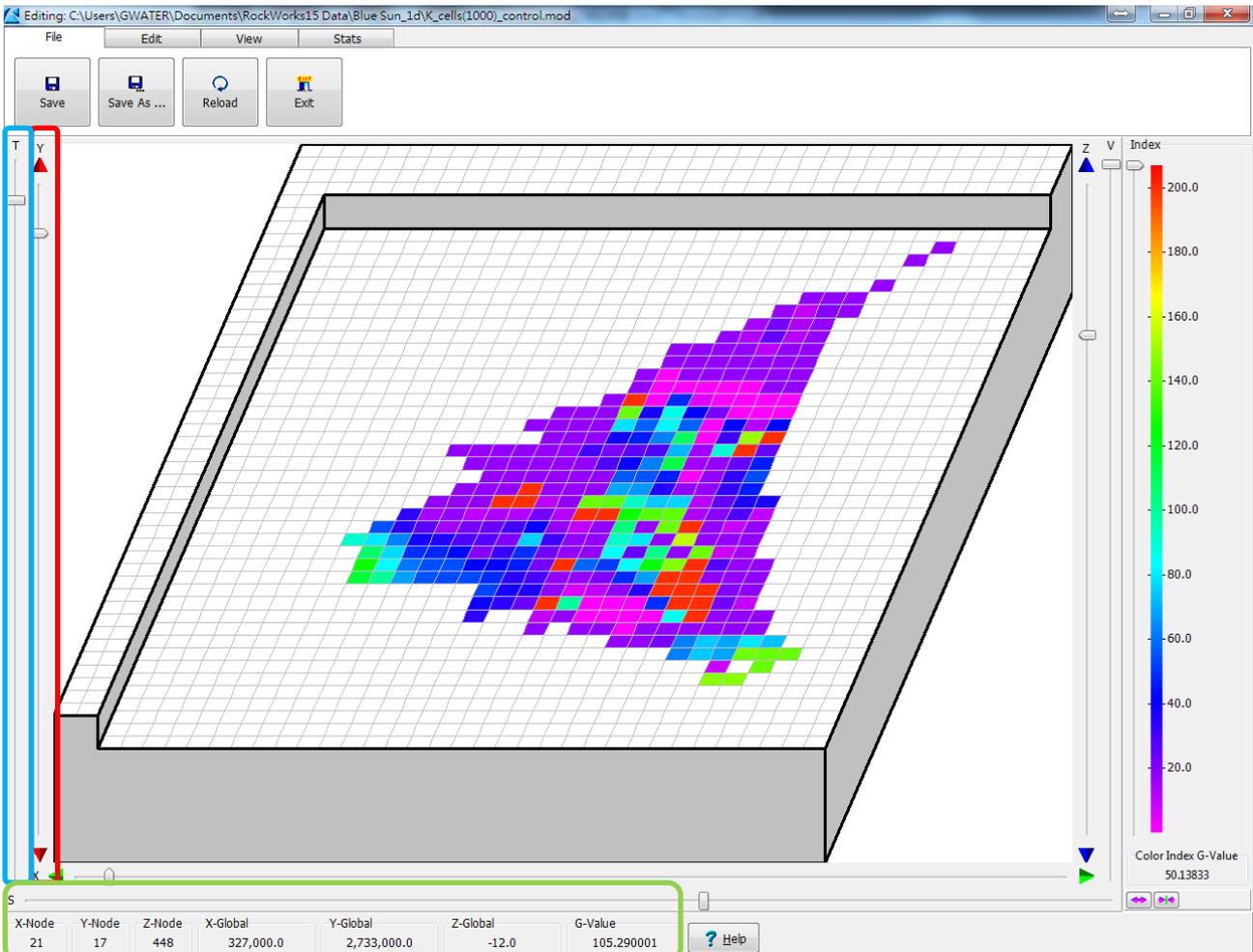


圖 5.5-9 空間資料查詢介面

5.5.4 水文地質模型應用於主要補注區邊界分析

在完成三維水文地質數化模型建置後，應用其成果於地下水主要補注區之邊界分析，步驟如下所示。

(1) 於扇頂區域選擇多條剖面，繪製成柵狀圖，如圖 5.5-10 所示。

(2) 藉由觀察空間上每一剖面，紀錄礫石層與泥層交界面，本計畫選取之交界面盡量以礫石為主，避免參雜泥質，如圖 5.5-11 所示。

(3)將各剖面之交界面連線，找出礫石層之邊界，而此邊界即為主要補注區邊界，如圖 5.5-12 紅線所示。為使此邊界空間位置易於辨識，將此邊界、觀測井、地質井與河川作圖，如圖 5.5-13 所示。

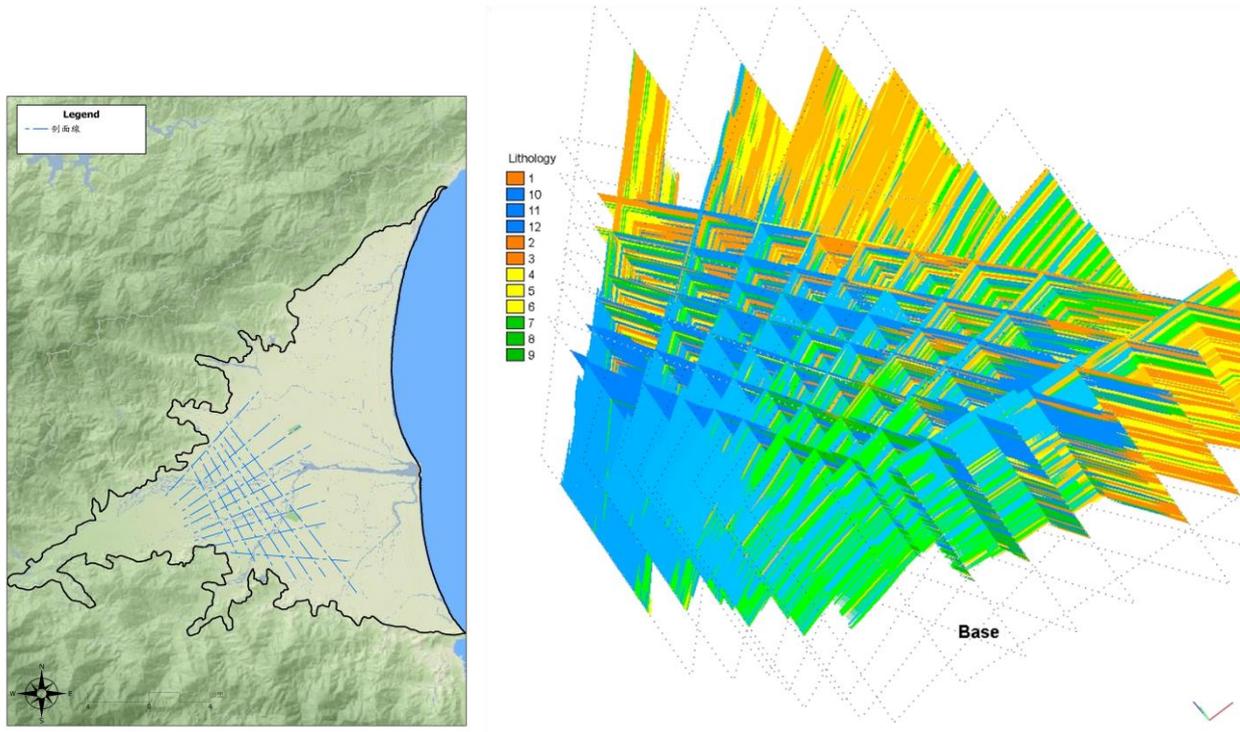


圖 5.5-10 剖面線位置示意圖與水文地質柵狀圖

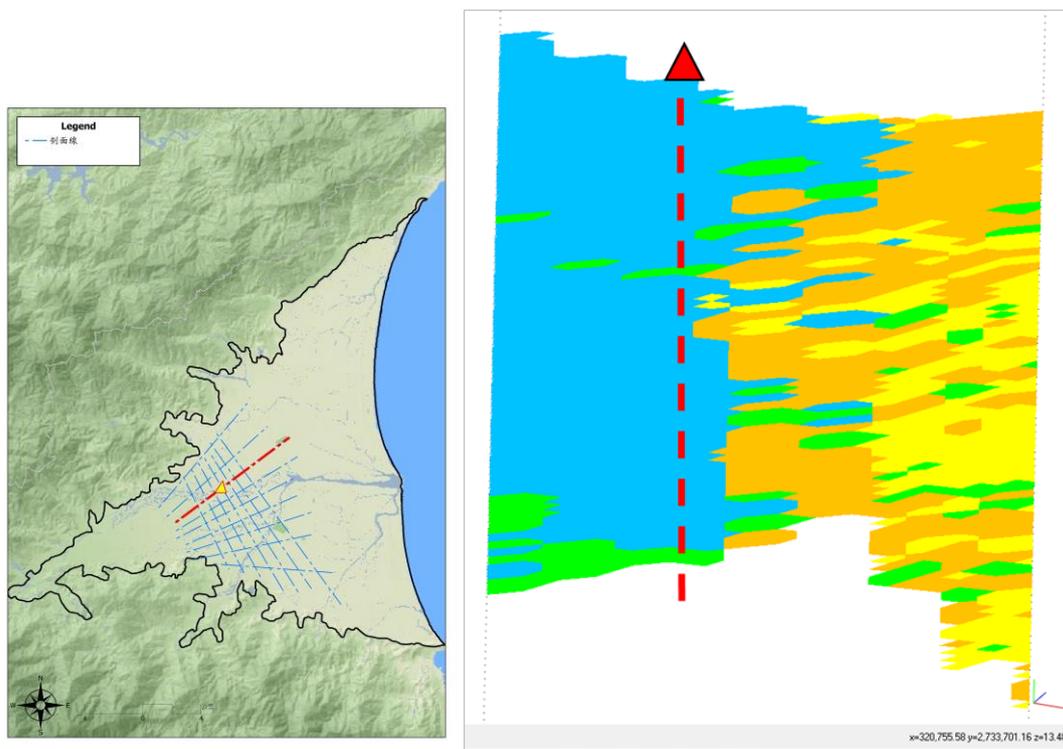


圖 5.5-11 一剖面線之剖面圖

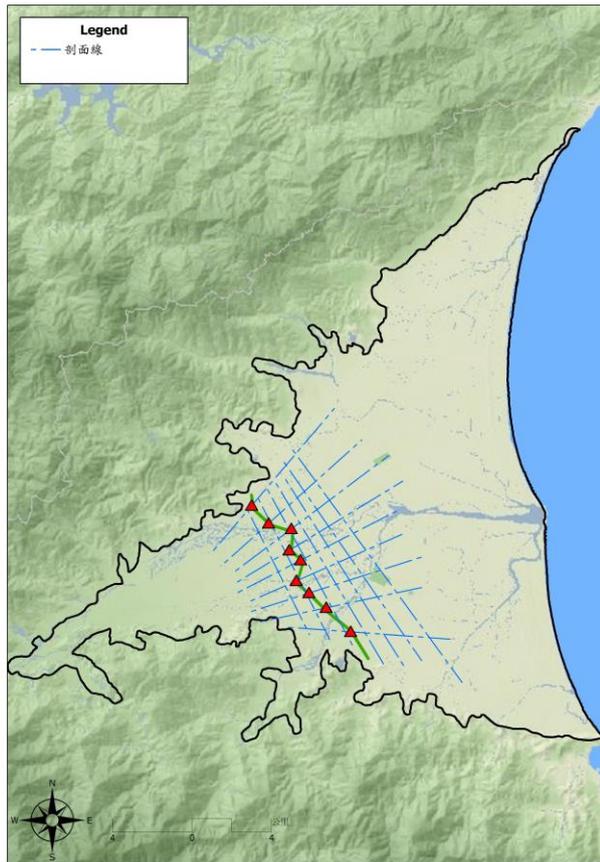


圖 6.5-12 各剖面礫石層邊界連線圖

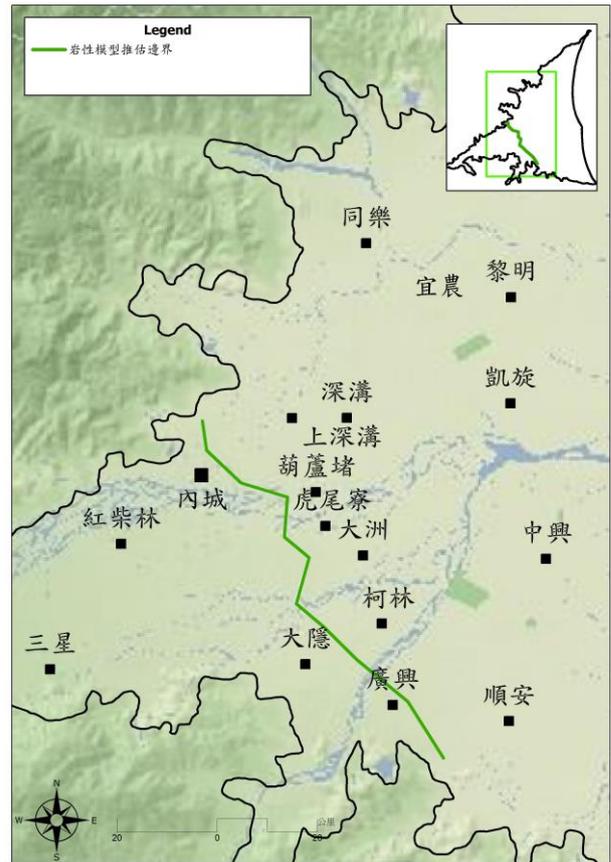


圖 6.5-13 水文地質模型推估之主要補注區邊界

5.5.5 其他應用

本計畫所建置之三維水文地質數化模型，除了可協助地下水主要補注區之分析，亦可應用於地下水數值模式建置與傳統型水位歷線法之分析上，以下將針對各工作項目之應用進行說明。

(一) 地下水流數值模式

採用 USGS 所開發之 MODFLOW 程式建置地下水流數值模式，MODFLOW 在地質參數輸入上，乃以層為概念，故在垂向上不需高解析度之參數值，本計畫可透過幾何平均、算數平均或其他整合方法，將單一分層內之垂向高解析度參數值轉換為單一參數值。而在阻水層或含水層之設定上，亦可透過三維水文地質數化模型分析其厚度、分佈及參數值，之後再輸出並轉換為模式之輸入檔，協助模式之建置。此外，當地下水模式進行參數檢定時，檢定過程中若發現局部區域之水平流場或含水層間之垂向流場出現不合理之流況時，亦可透過三維水文地質數化模型檢視局部區域之水文地質架構及參數之合理性，並進行適當之調整。

(二) 傳統型水位歷線法

傳統型水位歷線法本身之架構即為三維模式，因此其水力參數值、阻水

層與含水層之分佈皆可由水文地質模型建立輸入檔，而在模擬結果分析上，若局部區域出現不合理之抽/補量值，亦可透過水文地質模型協助分析，藉由其將水文地質架構與參數具像化之功能，檢視局部區域之水文地質架構與參數之合理性，有效協助問題之排解。

第六章 地下水補注區劃設

圖 6.1-1 為地下水補注區之劃設流程圖，本研究首先蒐集研究區域之既有資料，並同時以地球物理或地球化學等不同方式針對研究區域進行補充調查，接著搭配前述調查結果，建置研究區域之三維水文地質模型，最後綜整各項資訊，分析地下水補注區之邊界範圍。

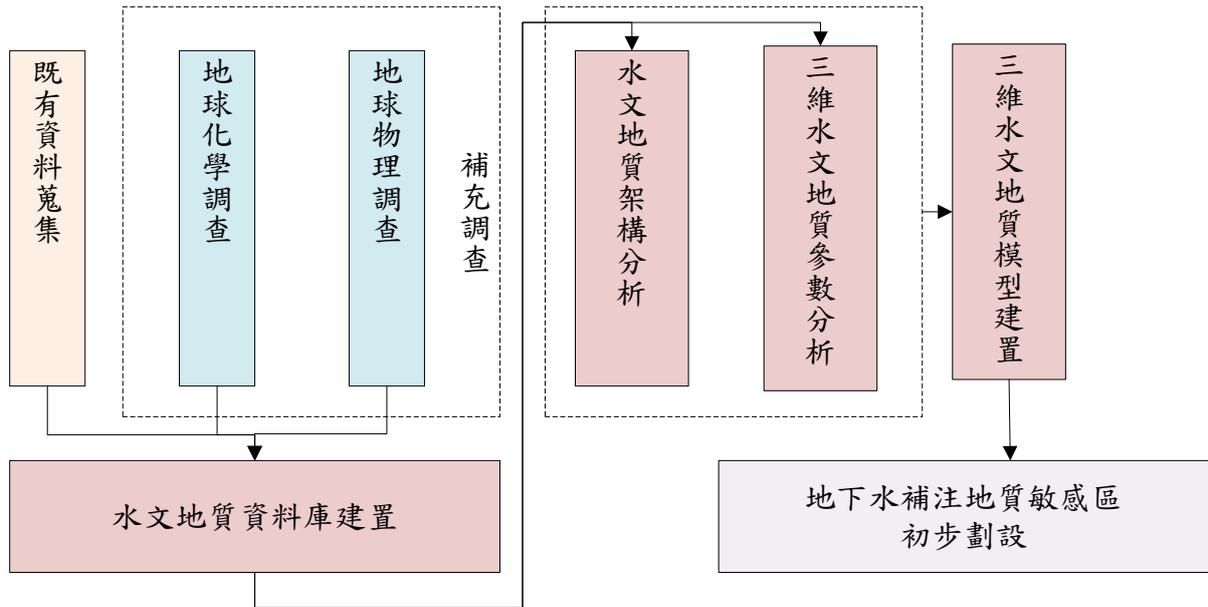


圖 6.1-1 地下水補注區劃設流程圖

6.1 資料彙整

圖 6.1-2 綜整本計畫各項既有資料與調查結果，其中包括(1)既有地質調查鑽探資料與今年度新鑽五口地質井資料、(2)地球物理補充調查的二維地電阻測線、(3)地球化學補充調查的水質溶氧資料與湧泉調查資料以及(4)三維水文地質模型分析結果。

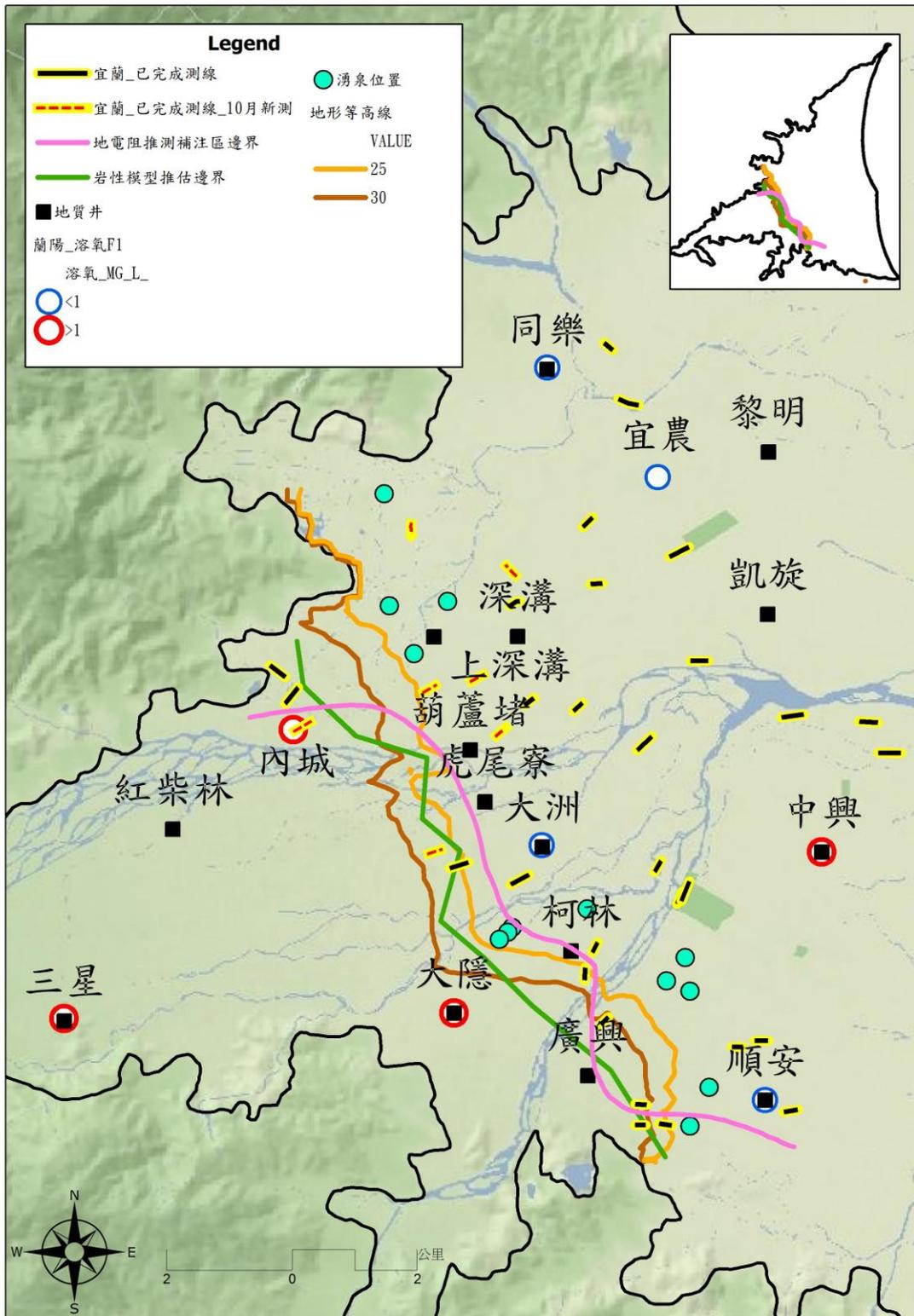


圖 6.1-2 各項資訊位置分佈圖

6.2 補注區邊界綜合分析

本研究在扇頂補注區邊界之推估，可細分為三個區域進行探討，分別為(1)內城以北、(2)內城至大隱之間，以及(3)大隱以南三個區段。

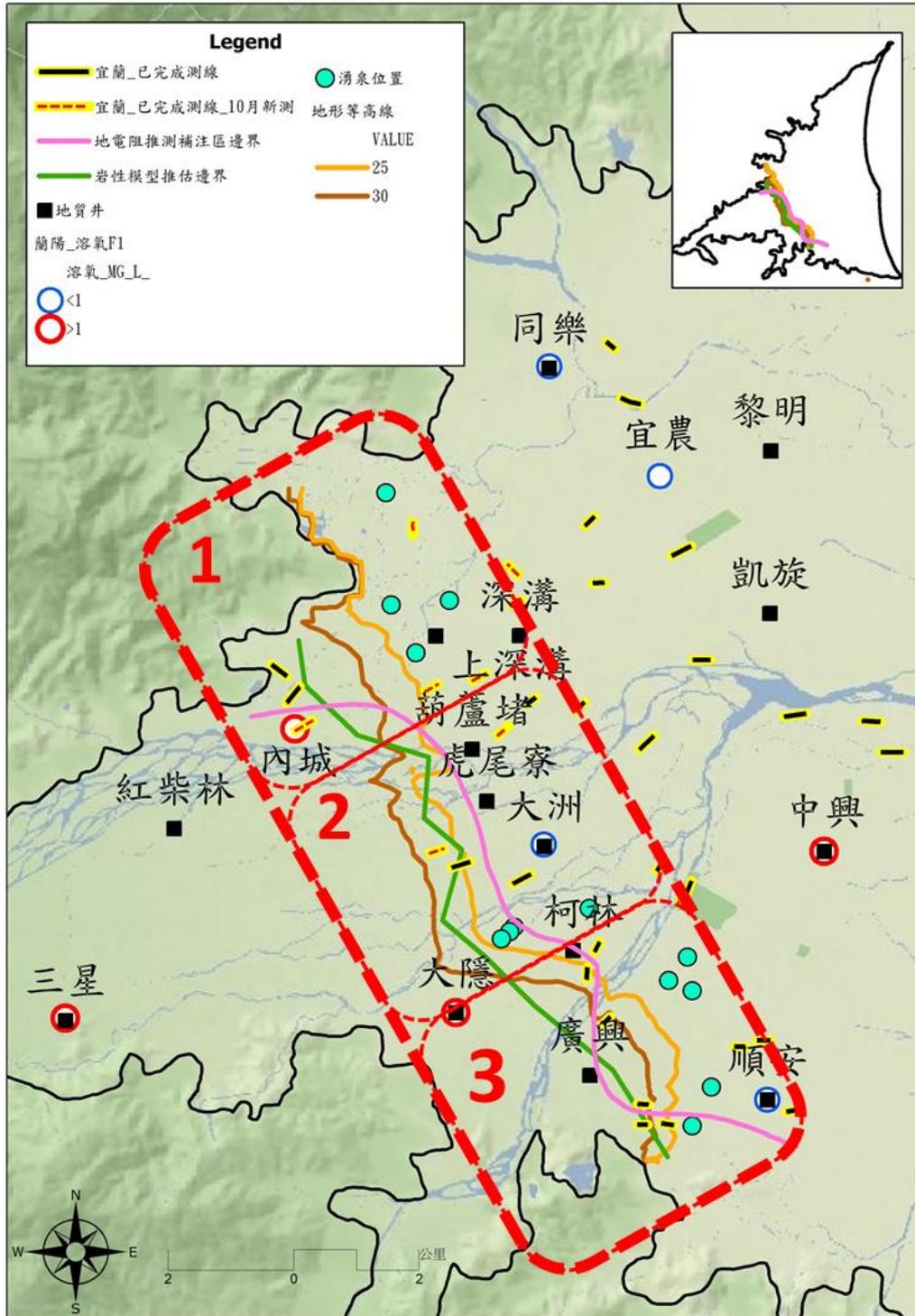


圖 6.2-1 分析區域說明

(1) 內城以北：

由湧泉調查結果可知，邊界不超過湧泉位置，亦即在湧泉帶往上游方向(湧泉帶以西)，而由地電阻之調查結果可知，內城周遭之測線，Line 05 與 Line 06，埋深約 17 公尺附近均出現低阻反應，顯示應存在較不透水物質，而 Line34 則呈現高阻之反應(深度達 51 公尺)，加上湧泉位置至內城之間較少調查資料，因此建議以地電阻繪製之邊界為界。



圖 6.2-2 內城以北(分區 1)現地調查結果彙整分析

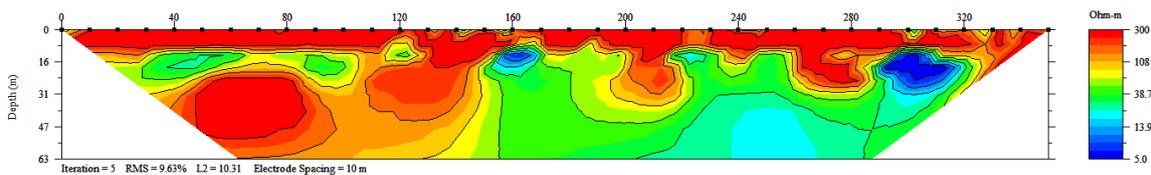


圖 6.2-3 Line 05 二維地電阻影像剖面圖

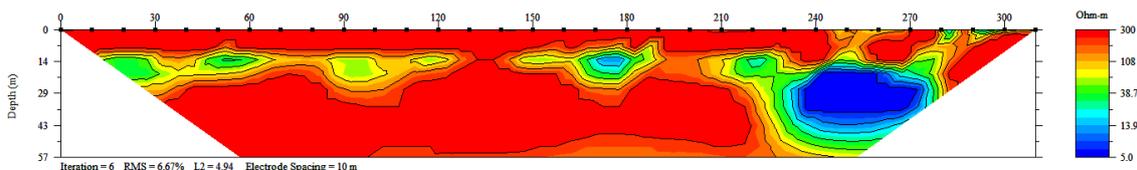


圖 6.2-4 Line 06 二維地電阻影像剖面圖

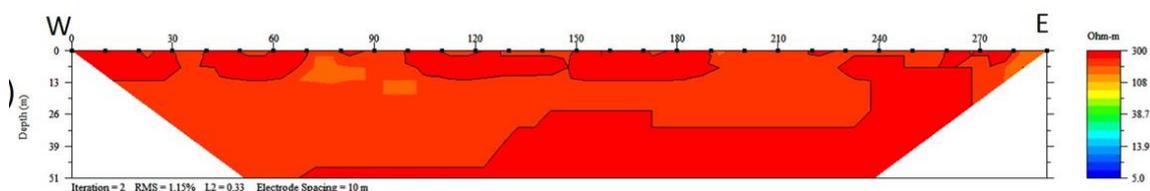


圖 6.2-5 Line 34 二維地電阻影像剖面圖

(2) 內城至大隱之間：

由新鑿四口地質井之岩心(葫蘆堵、虎尾寮、大洲與柯林)以及湧泉調查結果可推測，此區段之補注區邊界約在新鑿井與湧泉帶以西，而地電阻、地化與三維水文地質模型建議之邊界則相當接近，約在等高線 25-30 公尺之間，由二維地電阻測線 Line36 與 Line07(深度分別達 40 與 57 公尺)可知，該測線位置由上而下呈高阻反應，因此邊界應可達到 Line07 範圍，但在大隱附近則不超過湧泉帶之範圍，此區段建議之邊界如圖 7 紅線所示。此外，此邊界以西之內城與大隱觀測井的溶氧量相對於邊界以東之大洲站溶氧量為高，可輔助說明本邊界之合理性。



圖 6.2-6 內城至大隱分區(分區 2)現地調查結果彙整分析

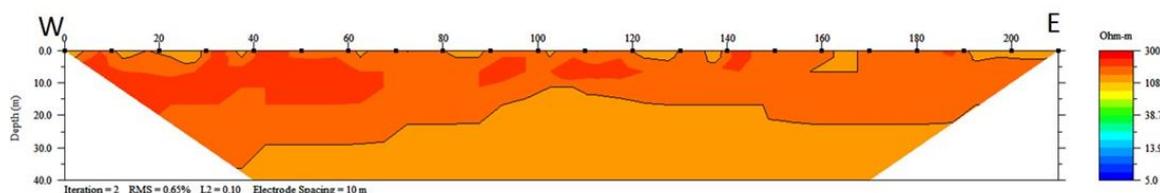


圖 6.2-7 Line 36 二維地電阻影像剖面圖

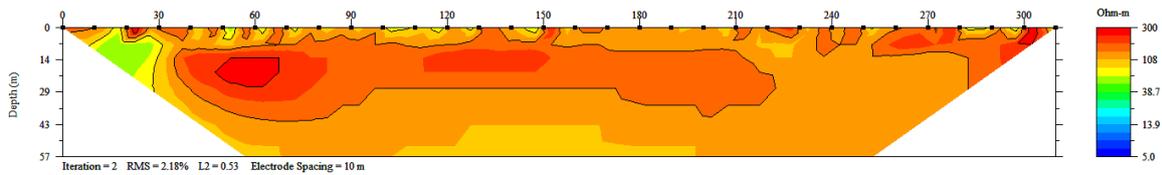


圖 6.2-8 Line 07 二維地電阻影像剖面圖

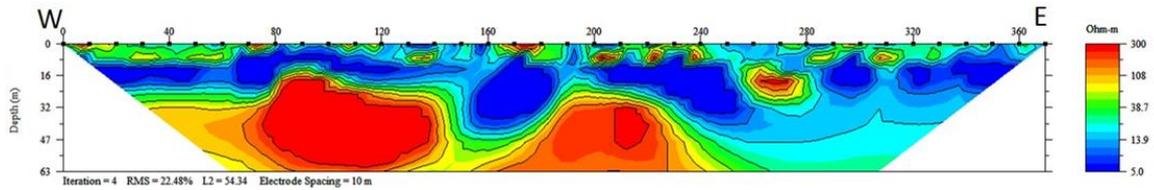


圖 6.2-9 Line 04 二維地電阻影像剖面圖

(3) 大隱以南：

在大隱以南之區段可再細分為兩區段：(a)大隱至羅東溪 (b)羅東溪以東。

- (a) 大隱至羅東溪：首先由湧泉與柯林站(新鑿地質井)之岩心可推測邊界必不超過湧泉帶與柯林站之連線。此連線往上游方向之地化調查邊界(25-30 公尺等高線)、地電阻推估邊界與三維水文地質模型建議之邊界皆非常相近，由柯林站周遭二維地電阻測線 Line22 呈現高阻(深度 40 公尺以內皆高阻)反應，而另一鄰近測線 Line 17 表層約 17 公尺處呈現低阻反應，可推估大隱至羅東溪之間，補注區邊界應在 Line 22 附近，接近 25 公尺等高線，故此部份之邊界建議以 25 公尺等高線為主。
- (b) 羅東溪以東：越過羅東溪後，Line 23 顯示為高阻，東方為湧泉帶，邊界應介於此兩者之間，若同時考量南方之 Line 24 表層顯示為低阻，邊界應由 25 公尺等高線往 Line 23 內縮。往南之廣興主要岩心為泥質礫，故邊界應往廣興靠近，同時避開 Line 24。Line 29(深度 28 公尺以內皆高阻)與 Line 25(深度 40 公尺以內皆高阻)皆呈現高阻，故邊界應通過此兩條測線，但不超過湧泉帶。

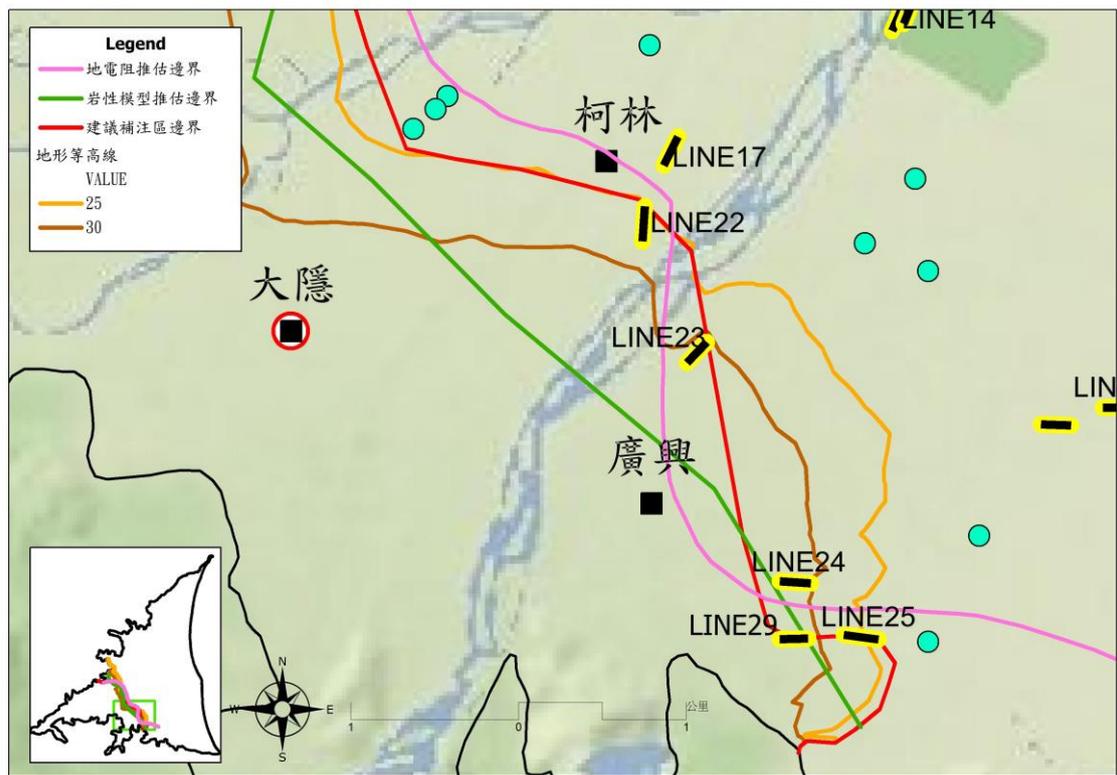


圖 6.2-10 大隱以南分區(分區 3)現地調查結果彙整分析

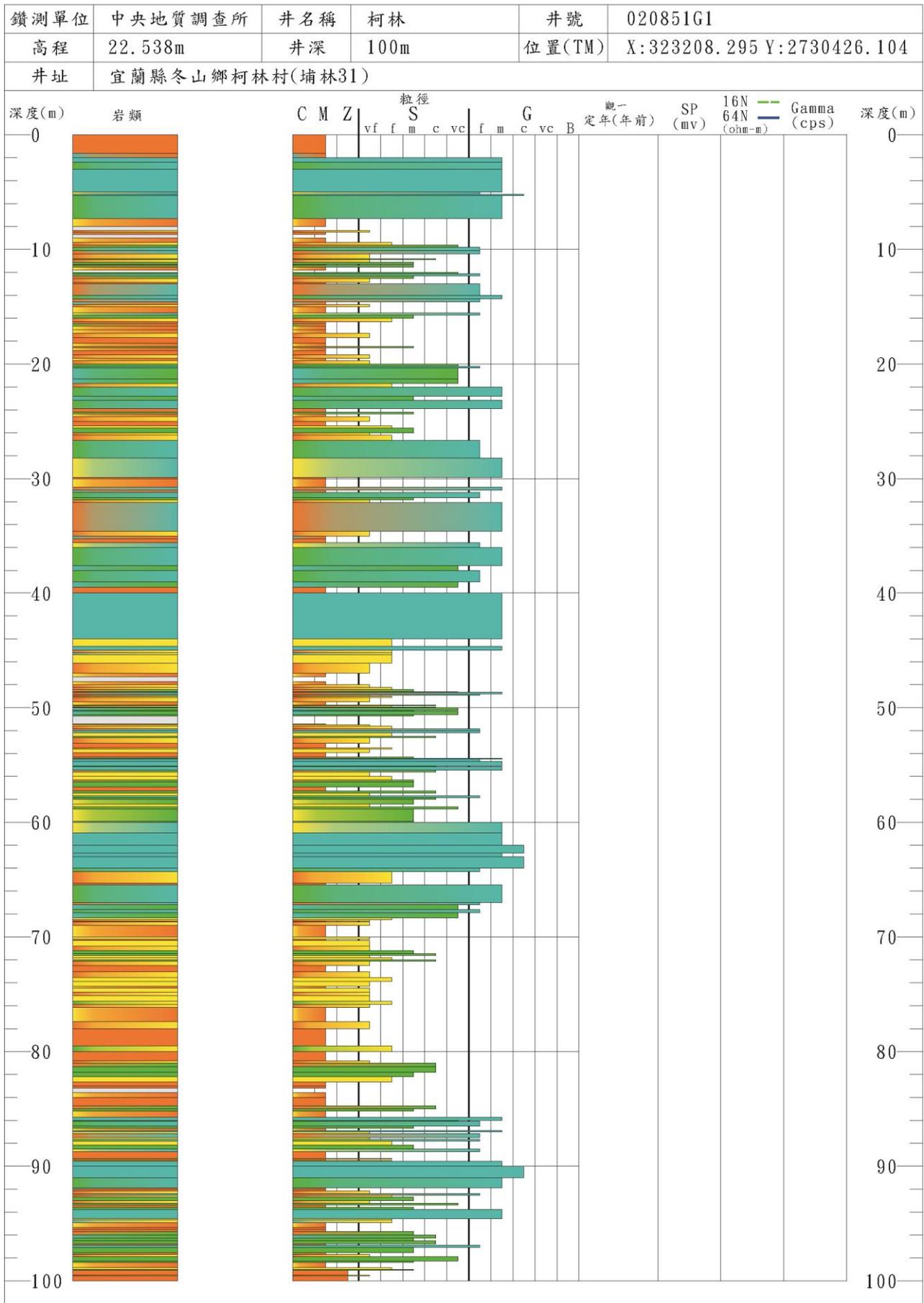


圖 6.2-11 柯林站之岩心柱狀圖

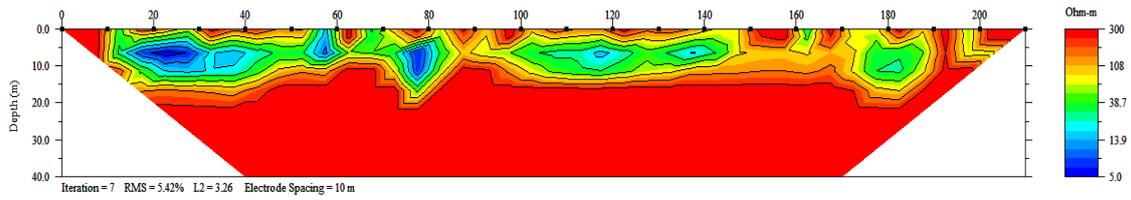


圖 6.2-12 Line 17 二維地電阻影像剖面圖

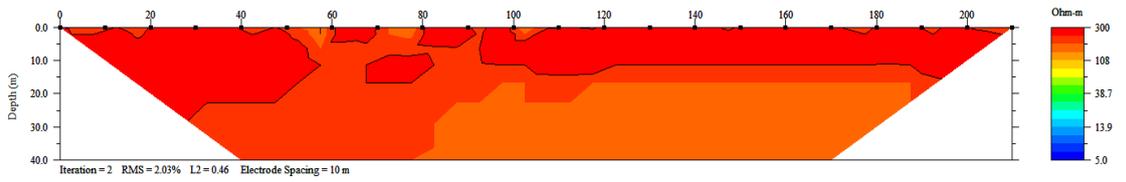


圖 6.2-13 Line 22 二維地電阻影像剖面圖

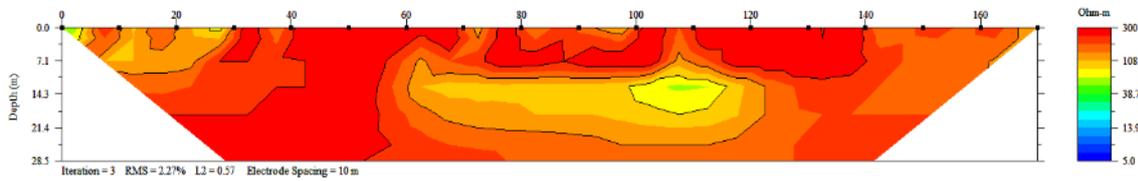


圖 6.2-14 Line 23 二維地電阻影像剖面圖

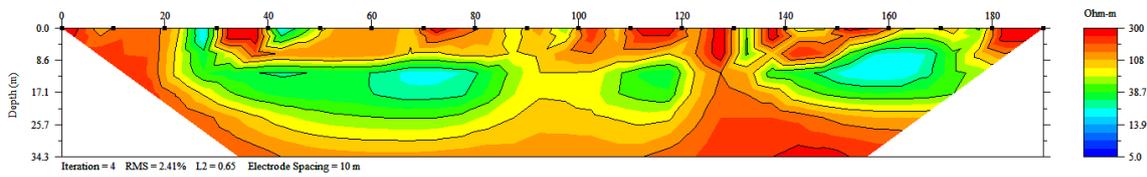


圖 6.2-15 Line 24 二維地電阻影像剖面圖

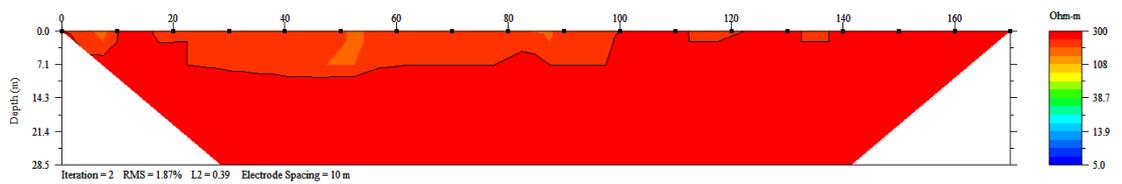


圖 6.2-16 Line 29 二維地電阻影像剖面圖

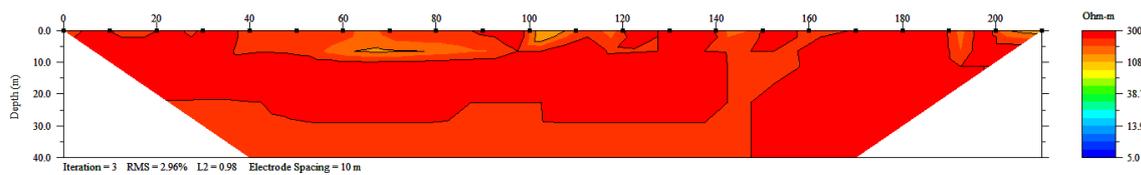


圖 6.2-17 Line 25 二維地電阻影像剖面圖

鑽測單位	中央地質調查所	井名稱	廣興	井號	020852G1
高程	42.578m	井深	100m	位置(TM)	X:323481.296 Y:2728386.097
井址	宜蘭縣冬山鄉鹿埔村				

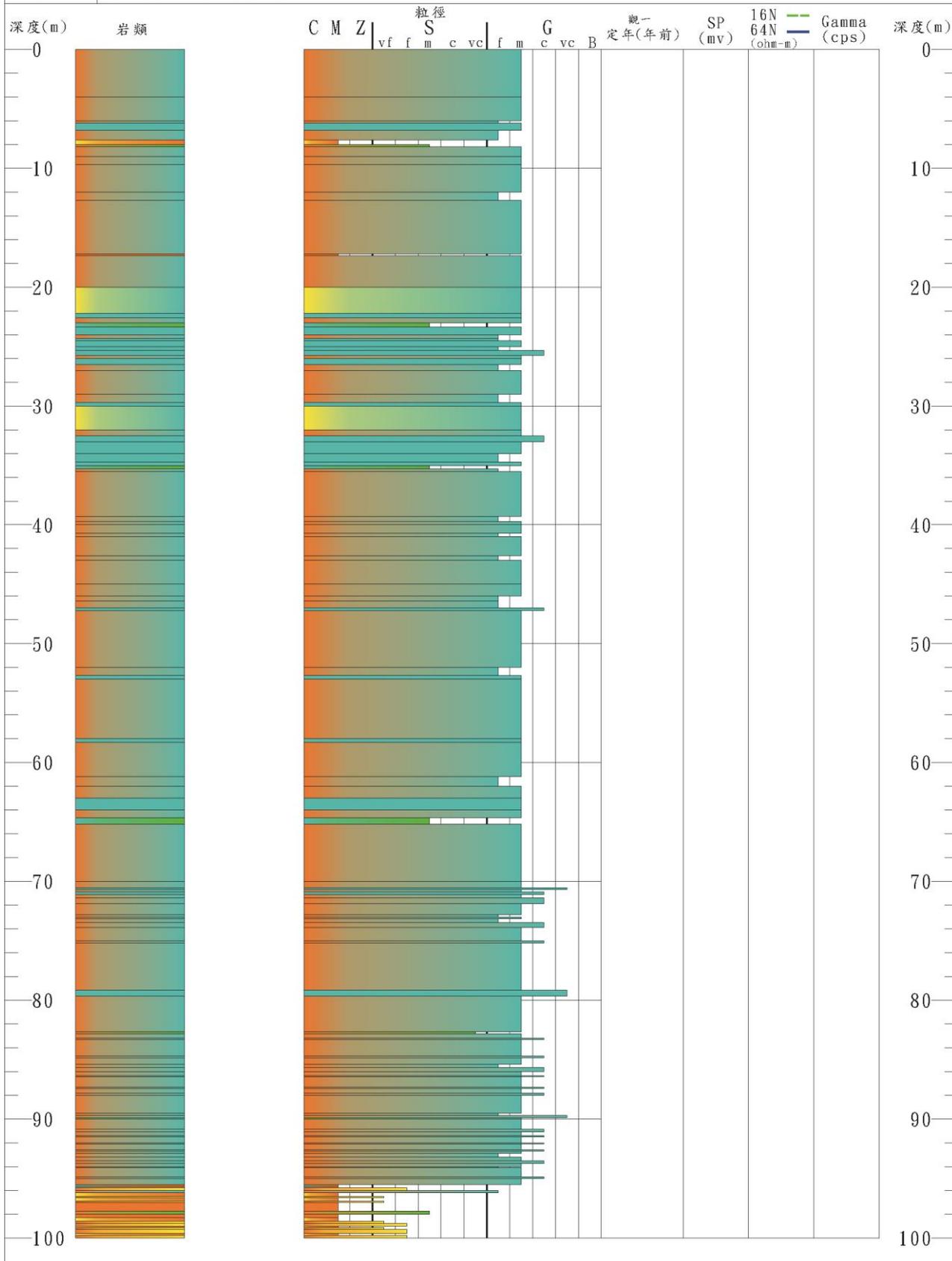


圖 6.2-18 廣興站之岩心柱狀圖

(4) 補注區邊界

本計畫綜合前述 3 個分區之分析結果，建議之補注區邊界如圖 6.2-19 所示，範圍跨及三星鄉、員山鄉與冬山鄉部分區域，補注區之面積約為 120km²，約佔蘭陽平原面積之 26%。

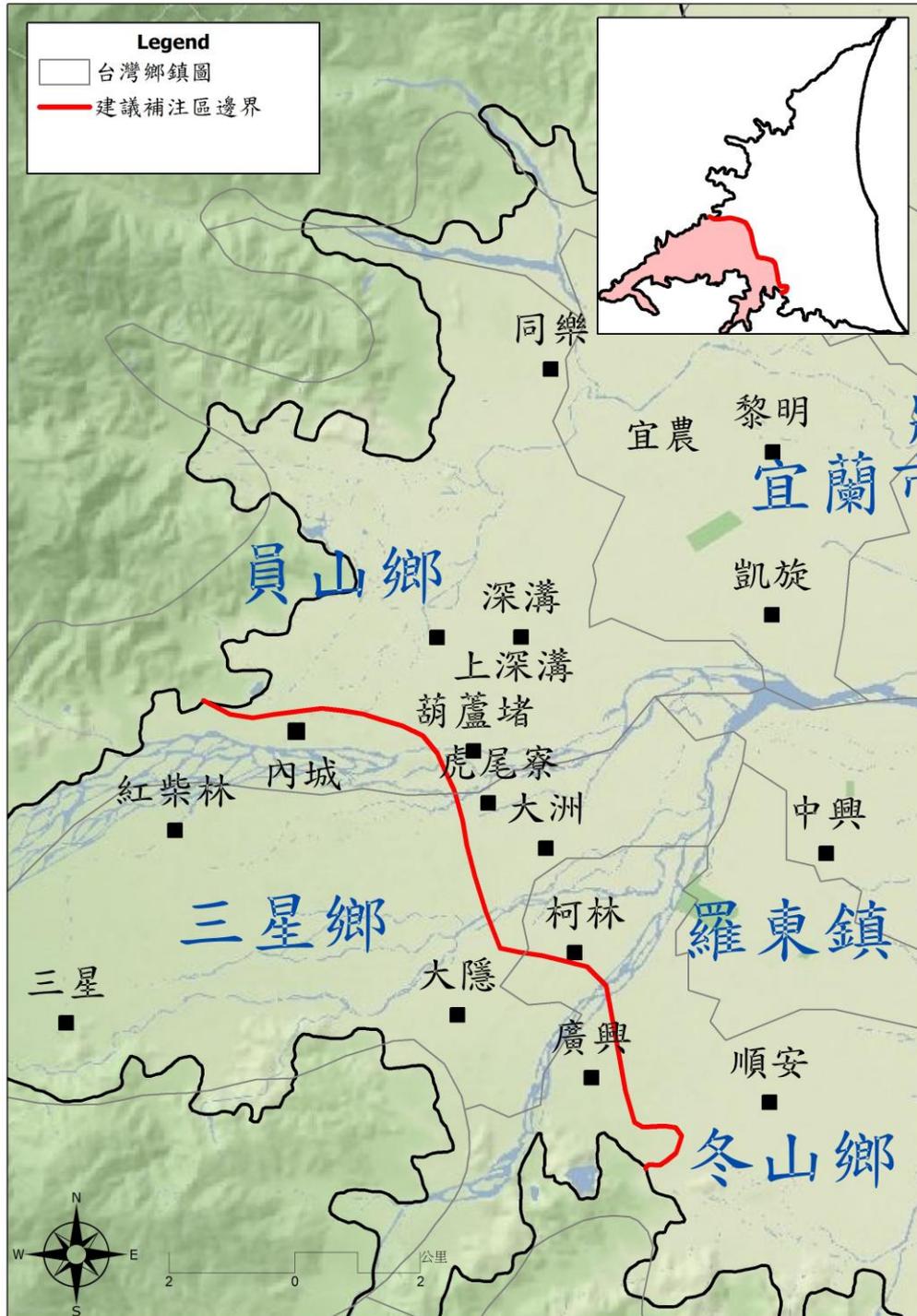


圖 6.2-19 本計畫建議之補注區邊界

第七章 地下水補注量與抽水量推估

7.1 地下水歷線法分析

本年度計畫將以蘭陽平原長期觀測之大量地下水位為基礎，應用地下水位歷線法(江崇榮, 2006)推估區域之補注量與抽水量。

7.1.1 地下水位歷線法理論介紹

江崇榮(2006)等人提出以地下水位歷線變動與地下水層儲水係數，直接進行抽水量、補注量、蓄水變化量和流失量之評估，該方法曾應用於屏東平原之地下水補注量推估，應用水位歷線法可以有效應用地下水觀測網累積多年之成果。圖 7.1-1 為地下水位歷線法之計算流程圖，其流程主要可以分為五個步驟，首先利用水位歷線配合土壤儲水係數或比出水量計算系統之儲蓄水量歷線，其次利用枯水期之儲蓄水量變化推估平均抽水量，接著應用降雨後之水位變化方式決定系統流出量，再來是以年初年末儲蓄水量決定年度變化量，最後則是以連續方程式推估年補注量。以下將進一步詳細說明：

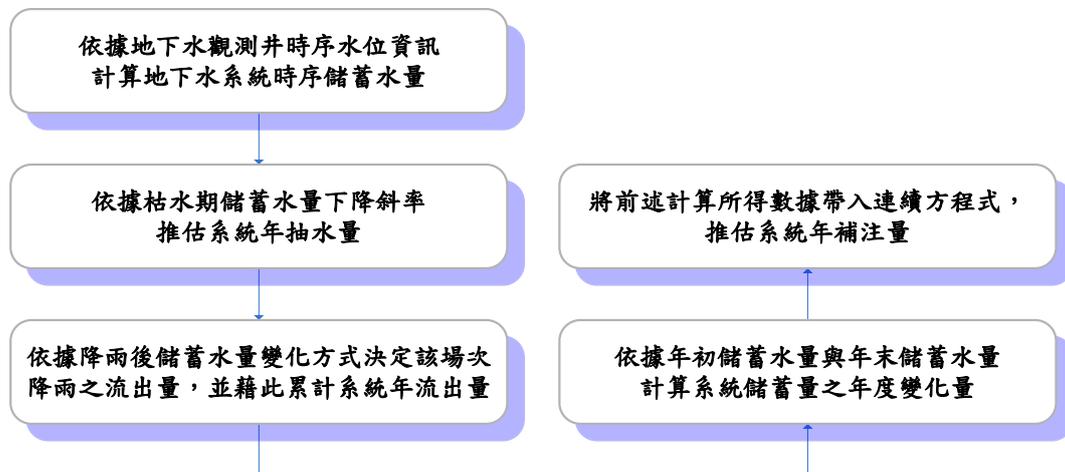


圖 7.1-1 地下水水位歷線法計算流程圖

地下水層平時受到抽水與補注之影響，地下水位歷線隨時間高低起伏，然而分析地下水位歷線與降雨歷線之關係，可以發現地下水位歷線上升或是減緩下降是隨著降雨行為而產生(如圖 7.1-2 所示)，因此可藉由水位歷線與降雨歷線之關係，估算系統平均抽水量與入滲補注量。圖 7.1-3 為表層水層之概念模型示意圖，其中影響水位變化的項目包含抽水量、補注量、側向交換量與其他垂向交換量。地下水位歷線與降雨歷線由觀測水井與雨量站長期觀測儲存，然其在

研究區域上為點位型式分佈，若欲將點位型式之資料涵蓋至整個研究區域，常見處理方法是透過徐昇氏多邊形或擬徐昇氏多邊形之矩形網格來劃分各觀測水井與雨量站之代表範圍(如圖 7.1-4 所示)。徐昇氏多邊形最重要的特性為徐昇氏多邊形中任意點必與其對應之代表觀測水井或雨量站最接近。

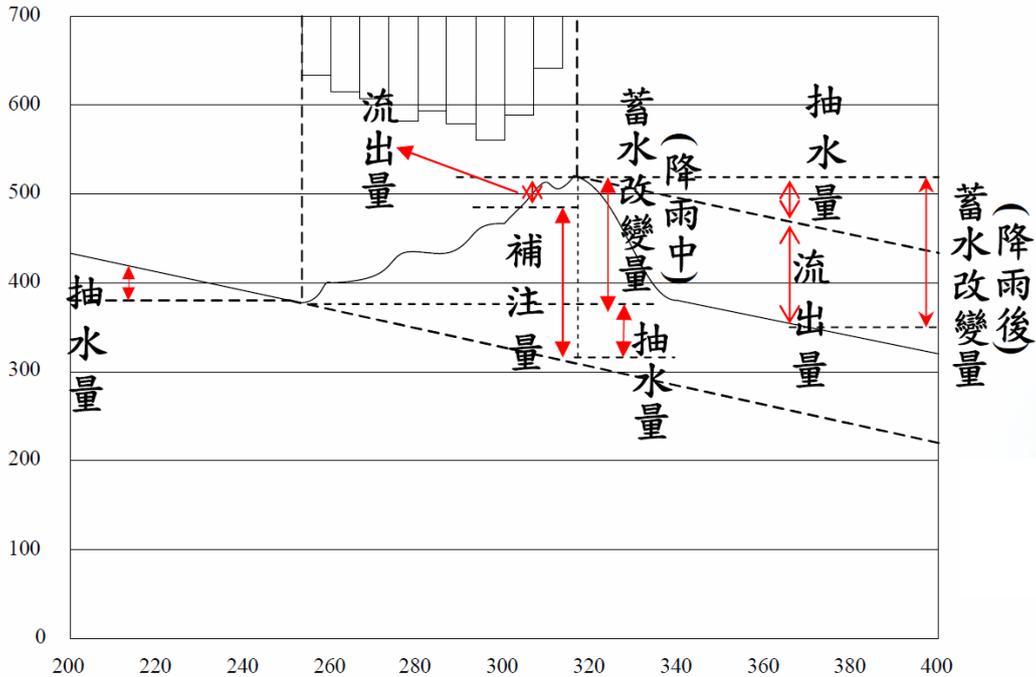


圖 7.1-2 區域降雨歷線與地下水位歷線起伏變化示意圖

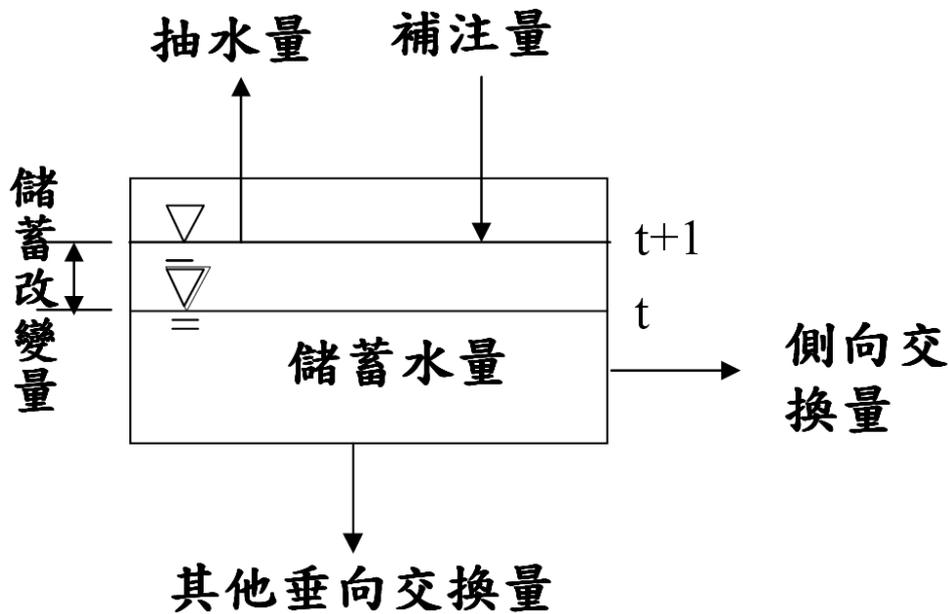


圖 7.1-3 表層水層之概念模型示意圖

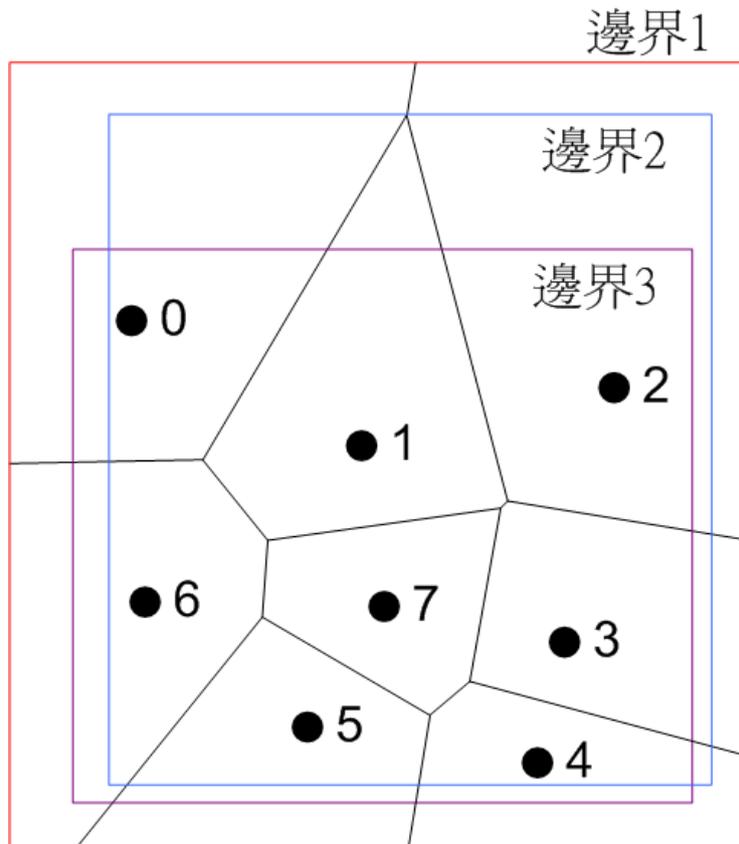


圖 7.1-4 徐昇氏多邊形

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

觀察台灣地區降雨資料，可以發現從十一月起至次年四月間多為少雨之枯水期；從各地下水區地下水觀測資料顯示，在枯水期期間，地下水位歷線以趨近直線的方式下降，以蘭陽平原之三星觀測井為例(如圖 7.1-5 所示)，平均日降雨量與地下水位變化有顯著的關聯性，若綜觀 2004~2006 年之枯水期水位變化(如圖 7.1-6 所示)，從十一月至隔年之五月期間，其地下水位之退水斜率極為相近，直至雨季期間地下水位方止跌回升。

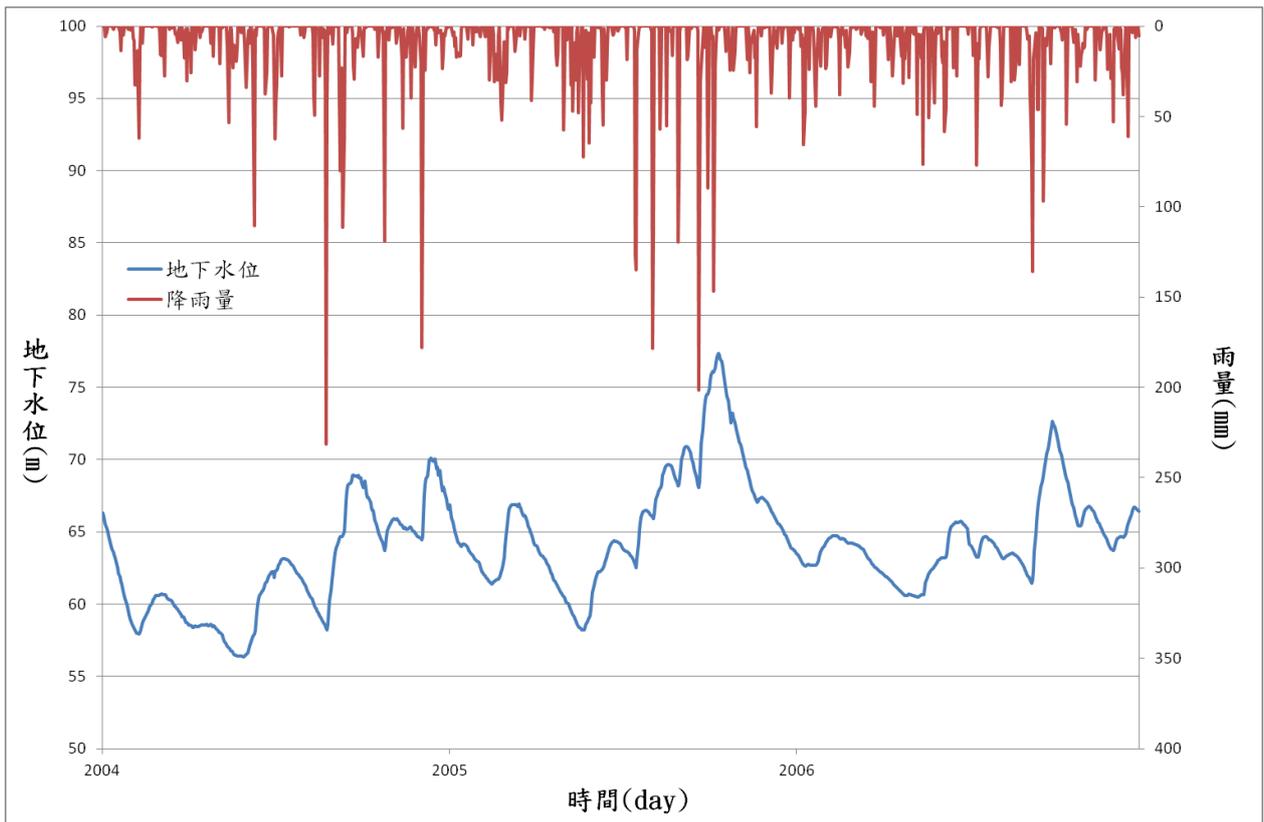


圖 7.1-5 三星觀測井 2004~2006 年平均日降雨量與日地下水水位圖

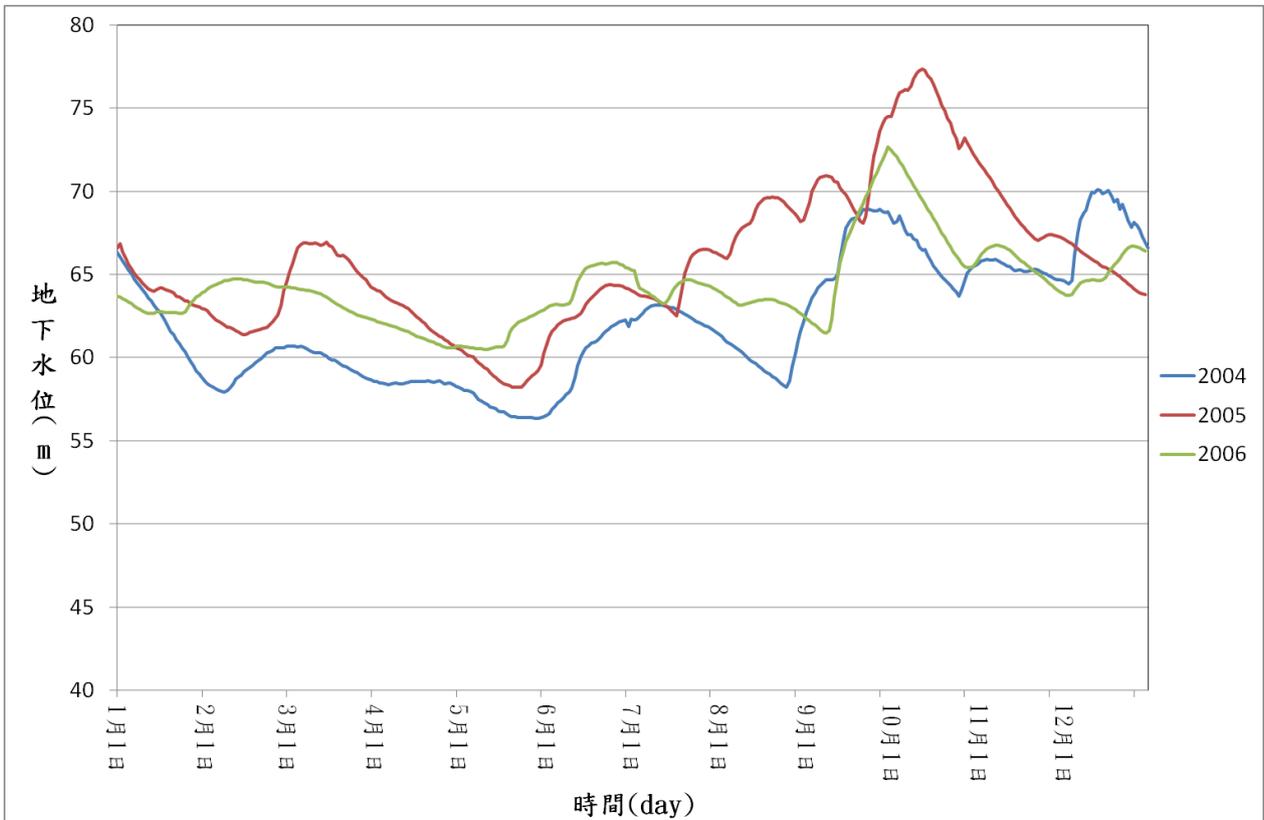


圖 7.1-6 三星觀測井 2004~2006 年日地下水水位歷線和枯水期退水線圖

水位歷線法的水平衡方程式可寫為：

$$S_i^t - S_i^{t-1} = I_i^{t,t-1} - O_i^{t,t-1} - W_i^{t,t-1} \dots\dots\dots(\text{式 7.1-1})$$

其中

S_i^t ：代表於時刻 t 於第 i 口水井的地下水儲蓄水量(L^3)

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

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

$O_i^{t,t-1}$ ：代表於時刻 t 與 t-1 間的地下水流出力量(L^3)，以圖 7.1-3 所示，即為側向交換量與其他垂向交換量之和。

$$S_i^t = s_y A_i (h_i^t - b_i) \dots\dots\dots(\text{式 7.1-2a})$$

$$S_i^t = n_i A_i (t_i - b_i) + s_s A_i h_i^t = s_s A_i h_i^t + Const. \dots\dots\dots(\text{式 7.1-2b})$$

式 7.1-2a 及式 7.1-2b 中

s_y ：第 i 口觀測井之比出水量。

s_s ：第 i 口觀測井之儲水係數。

n_i ：第 i 口觀測井之孔隙率。

h_i^t ：第 i 口觀測井於 t 時刻之水位。

t_i 與 b_i ：第 i 口觀測井含水層頂部與底部高程。

A_i ：第 i 口觀測井位代表範圍之面積，可利用徐昇氏多邊形劃分代表範圍。

式 7.1-1 為地下水系統之水平衡方程式，地下水蘊藏之改變量應等於地下水補注量、抽水量與流出量之綜合效應。式 7.1-2a 與 8.1-2b 分別為非拘限含水層與拘限含水層之地下水儲蓄水量估算公式，非拘限含水層之公式為為非拘限含水層之厚度、代表面積與比出水量之乘積，其中非拘限含水層厚度等於水位減含水層底部；拘限含水層之儲蓄水量，概念上可分為兩種，第一種為水層孔隙空間之蓄水量，其數值應為含水層體積乘上孔隙率，其本身不隨水位之變化而變，亦即不隨時間改變，可視為一常數值，第二項則為因水位變化所引起之土層及水體變形而增減之儲蓄水量，其為水位變化量與土層面積及儲水係數之乘積。由於水位歷線之估算上，是以前後兩時刻之儲蓄水量差值進行計算，在差值估算方程式中，第一種儲蓄水量因為定值而互相抵消可忽略不計。如搭配圖 7.1-3 之水平衡關係，式中之流出量($O_i^{t,t-1}$)即代表側向交換量與其他垂向交換量之和。

本方法以枯水期之儲蓄水量退水曲線推估系統長期之平均單日抽水量，由於枯水期長期沒有下雨，因此式中的地下水補注量($I_i^{t,t-1}$)可假設為零。此外，若

假設式 7.1-1 中之地下水流出量($O_i^{t,t-1}$)可忽略不計。因此原始地下水收支平衡式(式 7.1-1)可進一步簡化為式 7.1-3。因此，藉由枯水期之水位歷線變化可全然視為抽水造成之影響，前後兩時刻之地下水儲蓄水量差值，即可代表該時段之地下水抽水量。

$$S_i^t - S_i^{t-1} = -W_i^{t,t-1} \quad (\text{枯水期之水平衡方程式}) \dots\dots\dots(\text{式 7.1-3})$$

如果以單日作為時刻長度，因此計算前後兩日的蓄水儲蓄量差值，即代表當日之抽水量，式 7.1-4 乃以 7.1-3 式為基礎所估算之退水期間平均抽水量，該數值之含意亦為枯水期間的蓄水儲蓄量退水斜率，本計畫並將此值作為系統全年之平均抽水量，而不局限於枯水期。

$$\bar{W}_i = \frac{\sum_{t=1}^N W_i^{t,t-1}}{N-1} \quad (\text{枯水期之平均抽水量}) \dots\dots\dots(\text{式 7.1-4})$$

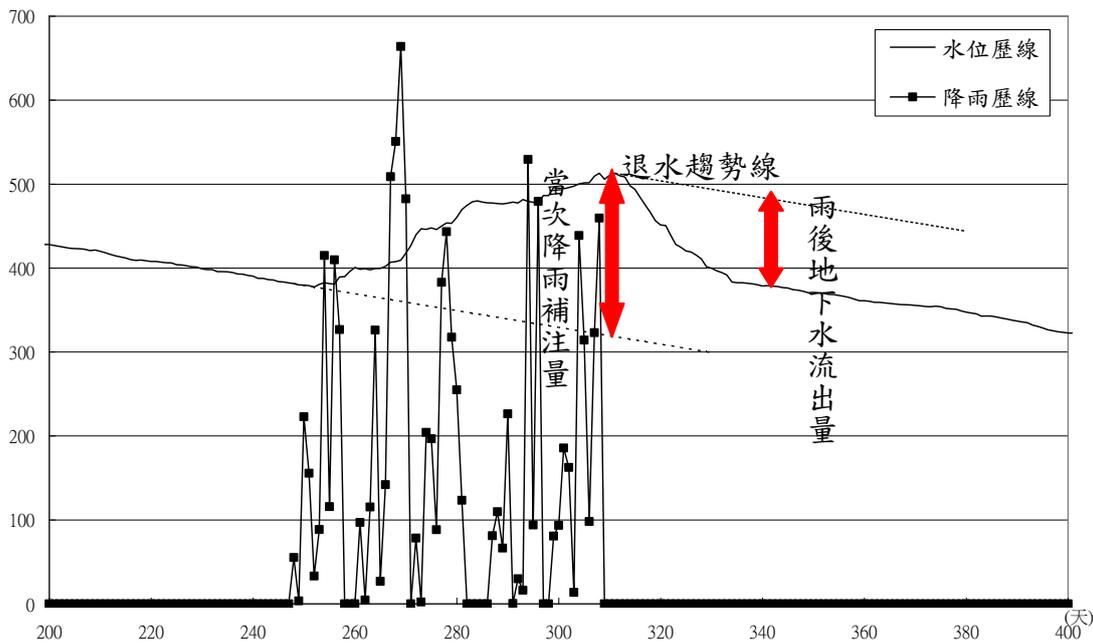


圖 7.1-7 降雨事件、補注量與流失量關係示意圖

如欲利用長期的日水位資料與日降雨資料，結合水位歷線法估算各日補注量，可依據下列方式估算。首先，利用日降雨資料擷取出各降雨事件之發生時段，將所有時刻分成降雨期間、降雨後數天內與非降雨期間三種情況。其次，不同降雨時段，以不同方式分別估算補注量、流出量與抽水量三者。以抽水量而言，在降雨後數天內與非降雨期間之單日抽水量可直接以前述之平均抽水量

(\bar{W}_i) 給定，但在降雨期間部分需水量可能直接以降雨量直接滿足，因此降低抽水比例，因此在降雨期間的抽水比例(C_r)應在 0% 至 100% 之間，在程式中設定為降雨時 C_r 為 0% 而非降雨時期 C_r 為 100%。

$$W_i^{t,t-1} = \begin{cases} C_r \bar{W}_i & \text{raining} \\ \bar{W}_i & \text{dry} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{式 7.1-5})$$

在補注量與流出量方面，由於單日抽水量與該日儲蓄改變量均已決定，故可將方程式改寫如式 7.1-6，已知數置放於等號右方，而等號左方則為未知的單日補注量與單日流出量。在降雨期間(如圖 7.1-7 所示)，地下水儲蓄量會隨降雨事件之發生而持續上漲，在此假設該段期間之反應皆是因為補注量之影響，故降雨期間的單日補注量與單日流出量可分別由式 7.1-7 與 8.1-8 估算。

$$I_i^{t,t-1} - O_i^{t,t-1} = S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} \dots\dots\dots(\text{式 7.1-6})$$

$$I_i^{t,t-1} = S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} \dots\dots\dots(\text{式 7.1-7})$$

$$O_i^{t,t-1} = 0 \dots\dots\dots(\text{式 7.1-8})$$

在降雨後數天內，觀察水位反應行為，部分場次之水位並未在雨停後即時下降，仍有少許上升情形，顯示雨後數天內仍有補注產生。因此，本研究則依據式 7.1-7 估算，如等號右方項次大於零，則將數值歸於補注部分，反之則歸於流出部分(如式 7.1-9 與 7.1-10 所示)。

$$I_i^{t,t-1} = \begin{cases} S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} & \text{if } S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} > 0 \\ 0 & \text{if } S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(\text{式 7.1-9})$$

$$O_i^{t,t-1} = \begin{cases} 0 & \text{if } S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} > 0 \\ -(S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1}) & \text{if } S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1} < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(\text{式 7.1-10})$$

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

$$O_i^{t,t-1} = -(S_i^t - S_i^{t-1} + W_i^{t,t-1}) \dots\dots\dots(\text{式 7.1-11})$$

由於如欲以年度為單位，估算特定年度之補注量等相關分析，則可依據前述所得之單日補注量、流出量與抽水量，進行累加即可求得年抽水量、年補注量與年流出量。同理，如欲計算以場次為單位之水平衡分析，亦可以相同之方式進行累加計算。前述估算方式均是以各地下水觀測站為主體，所得之補注

量、抽水量與流出量僅代表該站之資訊。如欲評估整體系統之各項數據，則可將各站資訊累加，即代表全區之補注量、抽水量與流出量。

另外，對於如僅欲求得全區之補注量，亦可預先將各站之水位歷線資訊，轉換並累加成全區之儲蓄水量(如式 7.1-12 所示)，其次再直接以全區之儲蓄水量計算各時刻之補注量、抽水量與流出量等資訊。比較前述之逐站計算方式與全區統一計算方式，逐站計算方式除了可以求得全區之資訊外，仍可明確得到各站之空間分佈。逐站計算方式因為直接以各站之儲蓄水量進行計算，因此對於各站水位或儲蓄水量歷線要求較高，各站水位歷線必須能明確找出枯水期之退水曲線。

$$S^t = \sum_{i=1}^N S_i^t \dots\dots\dots(式 7.1-12)$$

影響補注量推估之精確程度，多在於地下水位歷線與雨量歷線資料之收集，目前台灣地區之雨量站分佈涵蓋全台，其分佈稠密度已足夠提供補注量之估算；然而地下水觀測資料，則有賴地下水觀測井網方足以提供，台灣地區僅濁水溪沖積扇、屏東平原與蘭陽平原等地區能提供足夠之觀測密度，因此若欲應用水位歷線法於其他地區補注量之推估則仍有待評估。

7.1.2 水位歷線法分析於蘭陽平原之應用結果

前述第三章已蒐集了蘭陽平原 F1 含水層 22 口表層地下水觀測井，水位資料已於 3.2 節進行資料檢視、補遺與校正，其中屬於淺層觀測井為 22 口，以下將以補遺校正後之 2004~2012 年水位資料，應用水位歷線法進行補注量與抽水量等之分析。圖 7.1-8 為地下水井與對應的徐昇氏多邊形圖。

表 7.1-1 為 22 口井之列表，其中包含各井之儲水係數與透水係數，在透水係數部分由於試驗較為簡單，因此各井在營運前均透過單井抽水(試水)試驗取得現地透水係數。而儲水係數部分，則由於雙井試驗較為複雜，因此並非所有觀測井均有現地試驗值，如加上本計畫本年度於內城、三星及大洲完成之雙井試驗，亦僅有五口水井有現地試驗值，其數值列於表 7.1-1(以※符號標註)。

其餘水井之儲水係數必須藉由現有的試驗值，搭配經驗判斷加以補齊。首先，針對其餘水井以拘限與非拘限進行分類。其次，分別以透水係數對儲水係數進行線性迴歸，各得出一條迴歸公式，在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，蘭陽地區由於試驗值資料較少，故採用屏東平原之 K 與 Sy 值所得之迴歸關係式(如圖 7.1-9)，其相關係數約 0.73，而將蘭陽平原之大洲、三星及內城三站試驗值放入圖中，可看出除三星站外，其餘兩點皆靠近迴歸線，故蘭陽平原其餘水井之儲水係數值，即利用此屏東平原迴

歸公式進行推估，全區淺層觀測井之儲水係數列表於表 7.1-1。

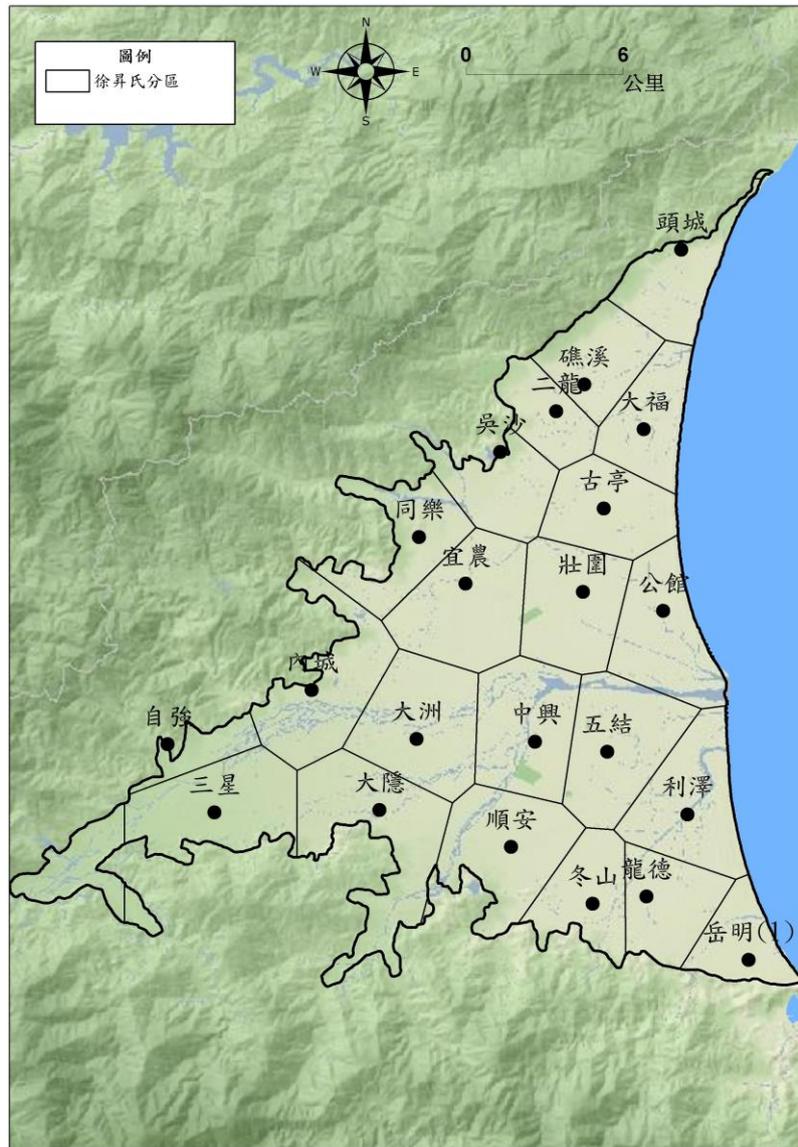


圖 7.1-8 蘭陽平原淺層地下水觀測井分布與徐昇氏多邊形

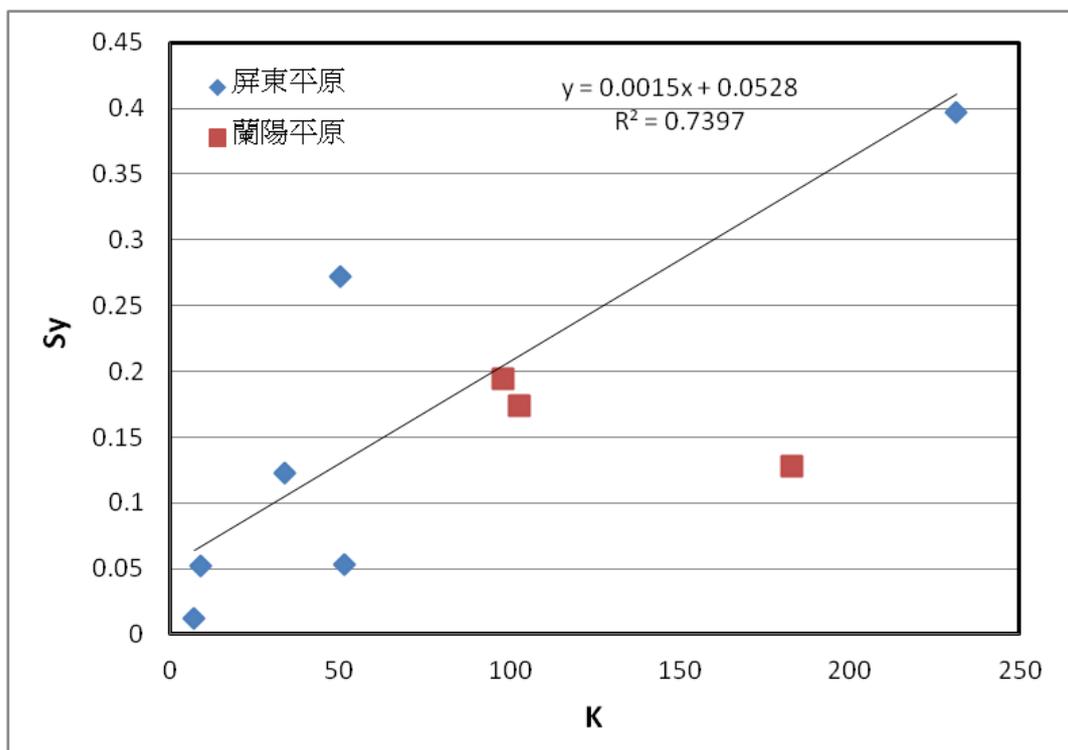


圖 7.1-9 屏東平原 K 與 Sy 值迴歸關係式

表 7.1-1 蘭陽平原淺層觀測井列表(22 口井)

井號	井名	儲水係數(-)	控制面積(m ²)	透水係數 (m/day)	含水層種類 (0:非受壓;1:受壓)
02010111	宜農(1)	0.00018	20623282.1	59.48	1
02030111	岳明國小	0.01382	17861995.9	4.32	0
02030211	利澤(1)	0.021	13716330.3	18.19152	0
02030311	龍德(1)	※0.00216	15641402.5	34.62	1
02040111	頭城國小(1)	0.056	19389573.3	85.932	0
02050111	礁溪(1)	0.00014	16383475.9	43.3	1
02050211	吳沙(1)	0.00006	8522362.85	12.03254	1
02050311	二龍	0.00011	17549203.9	33.68	1
02060111	大福國小(1)	0.03971	31410793.1	54.11	0
02060211	壯圍(1)	0.00065	20534544.8	852.68	1
02060311	古亭(1)	0.00026	19759753.3	95.88	1
02060411	公館	0.03628	19703919.4	47.52	0
02070111	內城	※0.174	18653012.9	91	0
02070211	自強國小(1)	0.01267	25885286.9	2.11	0
02070411	同樂	0.0001	15049406.5	28	1
02080111	冬山(1)	0.107	11971961.7	183.6	0
02080311	順安	0.00003	13683912.8	1.23	1
02090111	五結(1)	0.00052	12359780.7	198.72	1

02090211	中興(1)	0.0437	28491559.9	61.93	0
02100111	大隱(1)	※0.00146	23821106.8	35.02	0
02100211	三星	※0.1278	43443066.6	52.64	0
02100311	大洲(1)	※0.1945	20465791.3	224	0
※：代表為現地複井試驗成果					

一、退水線判斷

本計畫以 Fortran 電腦程式語言建立水位歷線法之電腦程式，在執行上本程式可以逐站計算各站的抽水量、補注量與流出量等資訊，再進一步加總累計成全區之抽水量、補注量與流出量等；除此之外，本程式亦可直接以全區之儲蓄水量歷線進行計算。計算上，首先必須依據各水井之退水線，求得各水井控制範圍之平均抽水率。本研究在此以人工方式預先判斷，並可一併針對現地資料進行檢視與分析。觀察區域內各水井之水位歷線，可將水位歷線變化分類為以下二大類，如下所示：

- 1、枯水期退水線：於枯水期間，約隔年一月至四月間，其水位歷線筆直地向下遞減，如圖 7.1-10 所示，宜農(1)於 2010 年底至隔年年初，即為此類退水線，在此稱之為枯水期退水線，蘭陽平原之枯水期退水線資料列於表 7.1-2。
- 2、一期稻作退水線：除了枯水期退水線外，部分水井在三月至四月期間，亦有另一條退水線存在，且其退水線斜率比枯水期退水線更陡，如圖 7.1-11 所示，冬山(1)於 2011 年初即具備所述之退水線。該段時間為一期稻作期間，由於水稻需要大量水源供灌溉使用，亦即透過該退水線，亦可決定稻作所需之水量，蘭陽平原之枯水期退水線資料列於表 7.1-3。

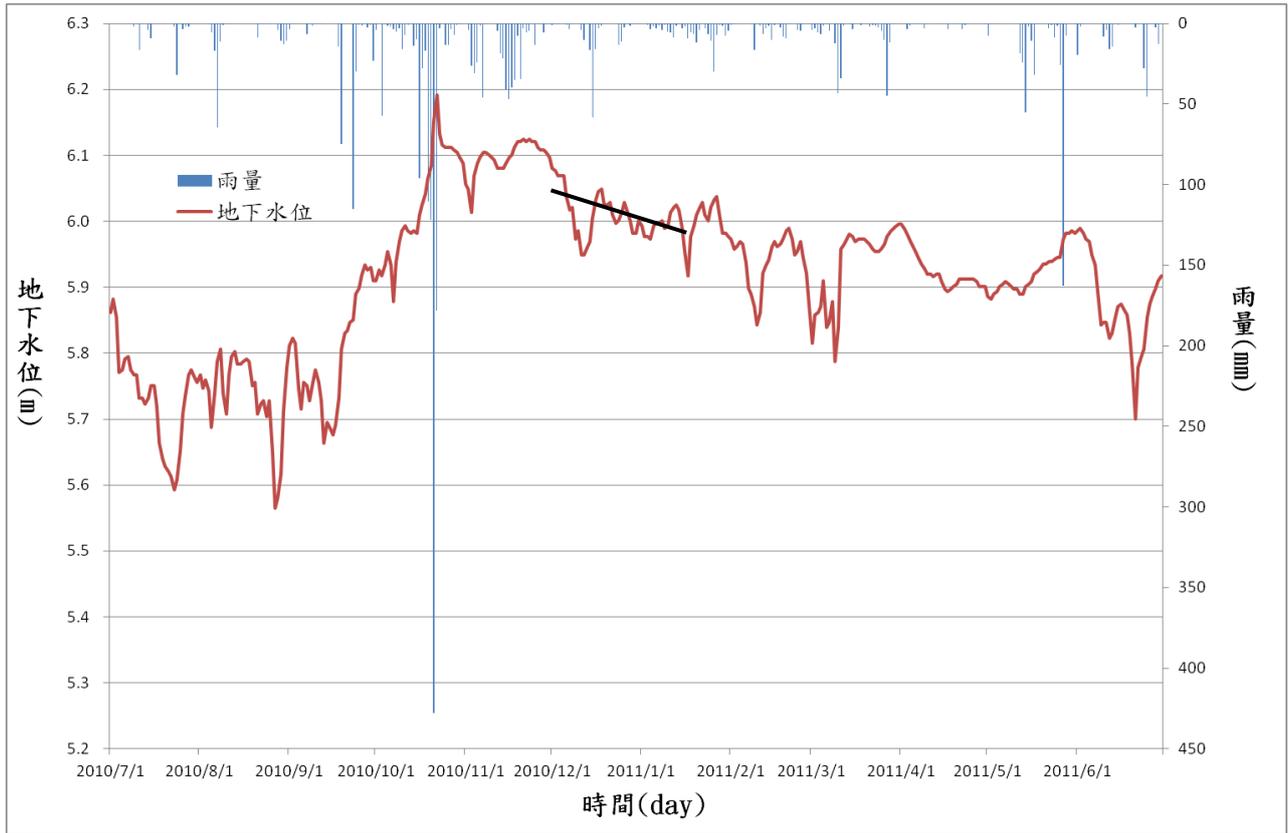


圖 7.1-10 水位歷線及枯水期退水線圖(宜農(1))

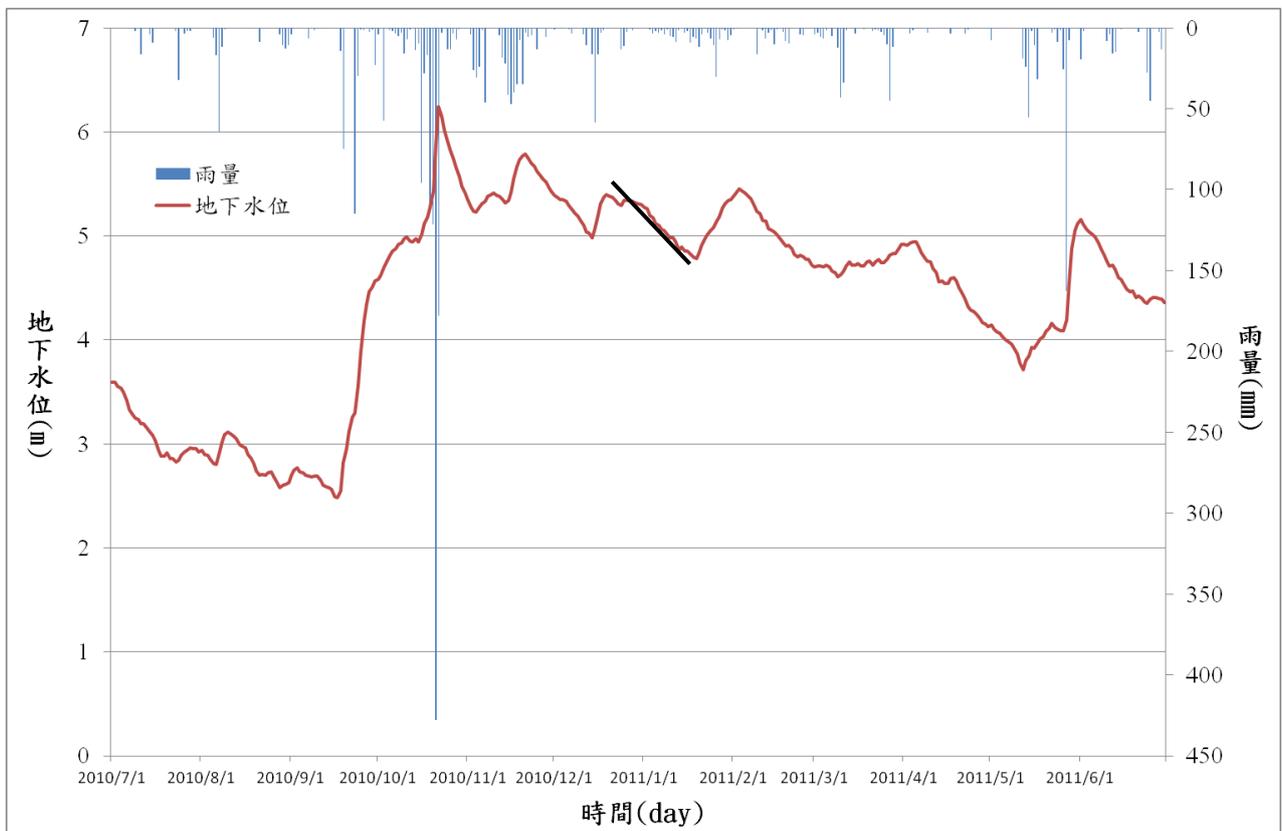


圖 7.1-11 水位歷線、枯水期及一期稻作退水線圖(冬山(1))

表 7.1-2 蘭陽平原淺層水井枯水期退水線列表

井號	井名	2004	2005	2006	2007	2008
		2009	2010	2011	2012	
0210111	宜農(1)	2004/7/3~2004/7/8	2005/6/17~2005/6/26		2007/6/19~2007/6/26	2008/7/28~2008/8/8
		2009/8/22~2009/8/30	2010/7/16~2010	2011/7/28~2011/8/2	2012/6/24~2012/7/3	
02030111	岳明國小	2004/7/18~2004/7/27	2005/6/18~2005/6/29		2007/6/18~2007/7/1	2008/7/30~2008/8/9
		2009/8/10~2009/8/21	2010/8/12~2010/8/21	2011/8/8~2011/8/22	2012/6/19~2012/7/1	
02030211	利澤(1)	2004/7/11~2004/7/19	2005/6/18~2005/6/28		2007/6/24~2007/7/4	2008/8/4~2008/8/14
		2009/8/9~2009/	2010/7/30~2010/8/8		2012/6/28~2012/7/9	
02030311	(1)	2004/7/4~2004/7/9	2005/7/3~2005/7/7	2006/6/26~2006/7/5	2007/7/5~2007/7/12	2008/8/18~2008/8/24
		2009/8/17~2009/8/27	2010/8/9~2010/8/15	2011/6/28~2011/7/9	2012/6/28~2012/7/7	
02040111	頭城國小(1)	2004/7/16~2004/7/26	2005/6/18~2005/6/29		2007/6/17~2007/6/28	2008/8/6~2008/8/14
		2009/8/15~2009/8/19	2010/8/8~2010/8/21	2011/7/23~2011/8/3	2012/6/15~2012/6/24	
02050111	礁溪(1)	2004/6/10~ 2004/6/21	2005/6/23~ 2005/6/30		2007/6/19~2007/7/1	2008// 31~2008/8/14
		2009/8/8~2009/8/14	2010/8/8~2010/8/20	2011/7/15~2011/7/29	2012/6/15~2012/6/23	
02050211	吳沙(1)		2005/6/29~2005/7/6		2007/6/25~2007/7/9	2008/8/15~2008/8/27
		2009/8/18~2009/8/31	201/ 8/23~2010/8/29	2011/7/20~2011/7/27	2012/6/27~2012/7/10	
02050311	二龍	2004/7/9~2004/7/19	2005/6/24~2005/7/5		2007/6/28~2007/7/10	2008/7/31~2008/8/13
		2009/8/9~ 2009/8/20	2010/8/10~2010/8/22	2011/8/6~2011/8/12	2012/6/28~2012/7/12	
02060111	大福國小(1)	2004/7/4~2004/7/14	2005/6/23~2005/7/5		2007/6/18~2007/6/26	2008/7/30~2008/8/3
		2009/8/9~2009/8/19	2010/8/8~2010/8/17	2011/8/10~2011/8/23	2012/6/21~2012/7/2	
02060211	壯圍(1)	2004/7/9~2004/7/22	2005/6/24~2005/7/6		2007/6/28~2007/7/4	
		2009/8/15~2009/8/20	2010/8/13~2010/8/22	2011/7/19~2011/7/26	2012/6/22~2012/7/3	

井號	井名	2004	2005	2006	2007	2008
		2009	2010	2011	2012	
02060311	古亭(1)	2004/7/5~2004/7/16	2005/6/24~2005/7/7		2007/6/26~2007/7/2	
		2009/8/14~2009/8/22	2010/6/29~2010/7/11	2011/7/28~2011/8/2	2012/6/24~2012/7/7	
02060411	公館	2004/7/5~2004/7/17	2005/6/26~2005/7/7	2006/6/23~2006/7/4	2007/6/22~2007/7/3	2008/7/30~2008/8/10
		2009/8/11~2009/8/21	2010/8/12~2010/8/20	2011/8/8~2011/8/19	2012/6/21~2012/7/2	
02070111	內城	2004/7/10~2004/7/20	2005/6/18~2005/6/24	2006/6/23~2006/7/4	2007/7/13~2007/7/22	2008/8/12~2008/8/26
			2010/8/8~2010/8/21	2011/7/31~2011/8/11	2012/6/21~2012/7/5	
02070211	自強國小(1)	2004/7/14~2004/7/26			2007/7/1~2007/7/13	2008/8/4~2008/8/14
		2009/8/22~2009/9/2	2010/7/28~2010/8/11	2011/6/25~2011/7/13	2012/6/24~2012/7/5	
02070411	同樂	2004/7/19 2004/7/26	2005/6/28 2005/7/6		2007/6/26 2007/7/3	2008/8/12 2008/8/23
			2010/7/8 2010/7/15	2011/7/20 2011/7/27	2012/7/1 2012/7/15	
02080111	冬山(1)	2004/7/7 2004/7/18	2005/6/29 2005/7/8		2007/6/24 2007/6/30	2008/8/16 2008/8/27
		2009/8/23 2009/8/31	2010/8/10 2010/8/20	2011/6/27 2011/7/9	2012/7/2 2012/7/13	
02080311	順安	2004/7/11 2004/7/16	2005/6/25 2005/7/2	2006/6/29 2006/7/5	2007/6/20 2007/6/25	2008/6/19 2008/6/29
		2009/8/8 2009/8/15	2010/8/21 2010/8/28	2011/7/26 2011/7/30	2012/6/29 2012/7/7	
02090111	五結(1)	2004/7/3 2004/7/13	2005/6/4 2005/6/11	2007/7/31 2007/8/4		2008/7/29 2008/8/6
		2009/8/8 2009/8/15		2011/7/19 2011/7/25		
02090211	中興(1)	2004/7/10~2004/7/16	2005/6/20~2005/6/29		2007/6/12~2007/6/20	2008/8/5~2008/8/10
		2009/7/18~2009/7/23		2011/6/30~2011/7/7	2012/6/18~2012/7/3	
02100111	大隱(1)	2004/7/18~2004/7/31	2005/6/18~2005/7/1	2006/6/14~2006/6/22	2007/7/9~2007/7/21	2008/8/11~2008/8/23
				2011/6/30~2011/7/13	2012/7/2~2012/7/13	

井號	井名	2004	2005	2006	2007	2008
		2009	2010	2011	2012	
02100211	三星	2004/7/12~2004/7/25	2005/6/24~2005/7/4		2007/7/11~2007/7/24	2008/8/12~2008/8/24
			2010/8/8~2010/8/19	2011/6/29~2011/7/11	2012/6/24~2012/7/4	
02100311	大洲(1)	2004/7/9~2004/7/16	2005/6/17~2005/6/23			2008/7/28~2008/8/7
		2009/8/10~2009/8/18	2010/7/28~2010/8/4	2011/7/11~2011/7/15	2012/7/7~2012/7/11	

表 7.1-3 蘭陽平原地下水井一期稻作退水線列表

井號	井名	2004	2005	2006	2007	2008
		2009	2010	2011	2012	
0210111	宜農(1)	2004/2/12~2004/2/20	2005/3/5~2005/3/22			2008/3/11~2008/3/20
		2009/3/14~2009/3/19	2010/2/20~2010/2/28	2011/2/22~2011/3/1	2012/3/13~2012/3/17	
02030111	岳明國小	2004/2/9~2004/2/28	2005/3/3~2005/3/25	2006/2/28~2006/3/19		2008/3/11~2008/3/29
		2009/2/9~2009/3/2		2011/3/12~2011/3/22	2012/3/13~2012/3/29	
02030211	利澤(1)	2004/3/2~2004/3/16	2005/3/12~2005/3/27	2006/2/28~2006/3/18	2007/3/6~2007/3/16	2008/2/27~2008/3/7
		2009/3/7~2009/3/17	2010/3/6~2010/3/16	2011/2/14~2011/2/18		
02030311	(1)	2004/2/15~2004/2/19	2005/2/28~2005/3/2	2006/2/8~2006/2/15	2007/2/28~2007/3/3	2008/4/8~2008/4/13
		2009/4/3~2009/4/11	2010/3/20~2010/3/26	2011/4/4~2011/4/11	2012/3/24~2012/3/27	
02040111	頭城國小(1)		2005/3/2~2005/3/16		2007/2/19~2007/3/3	
		2009/2/15~2009/3/1	2010/2/20~2010/3/7		2012/2/28~2012/3/9	
02050111	礁溪(1)	2004/3/9~2004/3/14	2005/3/9~2005/3/14	2006/3/11~2006/3/15	2007/3/4~2007/3/7	2008/2/24~2008/2/28
		2009/3/5~2009/3/10	2010/3/1~2010/3/6		2012/2/14~2012/2/19	
02050211	吳沙(1)		2005/3/4~2005/3/9	2006/3/11~2006/3/16		

井號	井名	2004	2005	2006	2007	2008
		2009	2010	2011	2012	
02050311	二龍	2004/2/15~2004/2/21	2005/3/4~ 2005/3/10	2006/3/5~ 2006/3/12	2007/3/3~ 2007/3/8	2008/2/24~2008/3/7
			2010/2/23~2010/3/7	2011/2/23~2011/2/28	2012/2/4~ 2012/2/9	
02060111	大福國小(1)	2004/2/16~2004/2/22	2005/3/2~ 2005/3/13	2006/2/28~2006/3/4	2007/2/11~2007/2/17	2008/2/23~2008/2/28
		2009/3/13~2009/3/19	2010/3/2~ 2010/3/7	2011/3/12~2011/3/17	2012/2/28~2012/3/9	
02060211	壯圍(1)	2004/2/18~2004/2/24	2005/3/3~ 2005/3/10	2006/3/7~ 2006/3/12	2007/2/26~2007/3/4	2008/2/10~2008/2/17
		2009/3/14~2009/3/19	2010/2/22~2010/2/27	2011/2/22~2011/3/1	2012/3/20~2012/3/26	
02060311	古亭(1)	2004/3/7~2004/3/10	2005/3/6~2005/3/10	2006/3/3~2006/3/12	2007/2/21~2007/3/3	2008/2/27~2008/3/2
		2009/3/14~2009/3/21	2010/3/10~2010/3/15	2011/3/11~2011/3/17	2012/2/12~2012/2/19	
02060411	公館	2004/3/6~2004/3/15	2005/3/5~2005/3/20	2006/2/10~2006/2/17		2008/2/20~2008/3/7
		2009/2/16~2009/2/27	2010/2/19~2010/2/26	2011/3/12~2011/3/20	2012/3/13~2012/3/28	
02070111	內城	2004/3/7~2004/3/13	2005/3/16~2005/3/25	2006/2/28~2006/3/17	2007/2/19~2007/3/4	2008/3/10~2008/3/22
			2010/3/10~2010/3/25		2012/3/13~2012/3/27	
02070211	自強國小(1)		2005/3/8~2005/3/23		2007/2/17~2007/3/5	2008/2/24~2008/3/19
			2010/3/5~2010/3/20		2012/3/5~2012/3/20	
02070411	同樂	2004/ 3 /11 2004 /3 /16	2005 3 4 2005 3 9			
					2012/ 3 /19 2012 /3 /31	
02080111	冬山(1)	2004/ 2 /14 2004 /2 /25	2005 /3 /2 2005 /3 /10	2006 /2 /11 2006 /2 /22	2007/ 2 /18 2007/ 3 /2	
		2009 /3 /7 2009 /3 /22	2010 /2 /26 2010 /3 /12	2011 /2 /9 2011 /2 /24	2012 /3 /15 2012 /3 /23	
02080311	順安		2005 /3 /12 2005 /3 /17	2006/ 2/ 27 2006 /3 /5	2007 /2 /4 2007/ 2/ 9	
		2009 /3 /2 2009 /3 /7	2010 /3 /12 2010 /3 /17	2011 /3 /11 2011 /3 /20	2012 /3 /19 2012 /3 /27	
02090111	五結(1)		2005 /3 /2 2005/ 3/ 7	2006/ 2 /27 2006/ 3/ 5		
		2009 /3 /7 2009 /3 /11	2010 /2 /19 2010 /2 /22	2011 /3 /11 2011 /3/ 16	2012 /3/ 13 2012 /3 /17	

井號	井名	2004	2005	2006	2007	2008
		2009	2010	2011	2012	
02090211	中興(1)	2004/2/27 2004/3/2				
02100111	大隱(1)		2005/3/6 2005/3/21	2006/2/18 2006/2/26		
					2012/3/12 2012/3/22	
02100211	三星		2005/3/20 2005/3/28		2007/2/23 2007/3/3	2008/3/18 2008/3/26
			2010/3/8 2010/3/20		2012/2/27 2012/3/10	
02100311	大洲(1)	2004/2/20 2004/2/28	2005/2/19 2005/2/24	2006/2/27 2006/3/9	2007/2/20 2007/2/27	2008/3/10 2008/3/17
		2009/2/7 2009/2/14	2010/2/22 2010/3/4	2011/2/13 2011/2/22	2012/3/12 2012/3/18	

二、水位歷線法分析結果

本計畫應用之水位歷線法推估蘭陽平原之總補注量與總抽水量，表 7.1-4 為系統水平衡分析表。分析結果顯示，蘭陽平原年平均補注量為 267.16 百萬噸，年平均抽水量為 204.26 百萬噸。表 7.1-5 為各站平均年補注量之排序可發現補注量大者均為上游區，另外表 7.1-6 為單位面積年補注量之排序配合圖 7.1-13 看出高補注區域的範圍，從兩類排序表中前 12 順位之水井皆為非受壓水井，其中大福國小(1)及自強國小(1)站之儲水係數雖然分別僅有 0.039 及 0.012，但因為控制面積大，仍有相當可觀的補注量。

表 7.1-7 為各井枯水期與一期稻作退水線斜率列表，顯示退水線斜率較陡者為自強國小(1)、三星(1)、龍德(1)、大福國小(1)與五結(1)，其斜率分別為 -0.166、-0.107、-0.092、-0.069 與 -0.049(m/day)如圖 7.1-12 顯示退水斜率大小的分佈情況，退水線的大小代表該區域水位枯水期下降的快慢。

表 7.1-4 系統水平衡分析表

年份	年儲蓄改變量	年抽水量	年補注量	年流出量	降雨量
2004	4.84	213.11	252.31	34.35	3057
2005	-11.82	213.41	280.71	79.78	3683
2006	12.37	201.04	247.18	34.54	3274
2007	12.29	194.82	306.73	100.22	3899
2008	-35.05	193.62	255.65	98.95	3364
2009	19.74	212.68	259.71	28.28	3858
2010	5.94	210.91	282.85	66.51	3026
2011	30.92	202.75	274.75	40.34	3203
2012	-29.08	195.98	244.58	78.29	3282
平均	1.13	204.26	267.16	62.36	3405

水量單位： 10^6 (m³); 降雨量單位：(mm)

表 7.1-5 各井平均年補注量排序列表

順位	井名	儲水係數	平均年抽水量 ($106m^3/\text{year}$)	平均年補注量 ($106m^3/\text{year}$)
1	三星	0.1278	106.61	147.84
2	內城	0.174	31.63	44.95
3	大洲(1)	0.1945	21.54	27.45
4	冬山(1)	0.107	17.20	16.67
5	中興(1)	0.0437	9.19	8.07
6	自強國小(1)	0.01267	5.06	7.24
7	大福國小(1)	0.03971	5.65	5.68
8	頭城國小(1)	0.056	2.29	3.14
9	公館	0.03628	2.08	2.52
10	利澤(1)	0.021	0.93	1.25
11	龍德(1)	0.00216	0.82	0.80
12	岳明國小	0.01382	0.43	0.61
13	大隱(1)	0.00146	0.35	0.52
14	五結(1)	0.00052	0.17	0.17
15	壯圍(1)	0.00065	0.15	0.15
16	古亭(1)	0.00026	0.04	0.04
17	宜農(1)	0.00018	0.03	0.03
18	礁溪(1)	0.00014	0.03	0.03
19	同樂	0.0001	0.01	0.02
20	二龍	0.00011	0.01	0.01
21	吳沙(1)	0.00006	0.01	0.01
22	順安	0.00003	2.14E-03	2.02E-03
				年份：2004~2012 年

表 7.1-6 單位面積平均年補注量排序列表

順位	井名	控制面積 (m ²)	單位面積抽水量 (m/year)	單位面積補注量 (m/year)
1	三星	30494136	3.50	4.85
2	內城	24248347	1.30	1.85
3	大洲(1)	20488088	1.05	1.34
4	冬山(1)	13053079	1.32	1.28
5	自強國小(1)	9623774	0.53	0.75
6	大福國小(1)	8155610	0.69	0.70
7	中興(1)	18663885	0.49	0.43
8	頭城國小(1)	11730905	0.20	0.27
9	公館	12451699	0.17	0.20
10	岳明國小	6559619	0.07	0.09
11	利澤(1)	13407596	0.07	0.09
12	龍德(1)	13432917	0.06	0.06
13	大隱(1)	24973074	0.01	0.02
14	五結(1)	19703919	0.01	0.01
15	壯圍(1)	17558056	0.01	0.01
16	古亭(1)	13367850	3.01E-03	2.81E-03
17	礁溪(1)	15314572	1.86E-03	1.84E-03
18	宜農(1)	20598676	1.53E-03	1.55E-03
19	二龍	12041811	9.19E-04	9.13E-04
20	同樂	19072476	7.59E-04	8.57E-04
21	吳沙(1)	14021461	5.22E-04	4.81E-04
22	順安	20406824	1.05E-04	9.88E-05
年份：2004~2012 年				

表 7.1-7 各站枯水期與一期稻作退水線斜率列表

站號	井名	X	Y	枯水期退水斜率(m/day)	一期稻作退水斜率(m/day)
02010111	宜農(1)	324620	2738180	-0.03414	
02030111	岳明國小	335491	2723599	-0.01778	-0.00445
02030211	利澤(1)	333200	2729300	-0.01088	-0.00976
02030311	龍德(1)	332000	2725800	-0.09236	-0.08603
02040111	頭城國小(1)	332900	2751100	-0.01399	
02050111	礁溪(1)	329180	2745890	-0.04703	-0.02512
02050211	吳沙(1)	325944.4	2742374	-0.03224	-0.01076
02050311	二龍	328104.5	2744848	-0.03346	
02060111	大福國小(1)	331460	2744155	-0.06996	
02060211	壯圍(1)	329122	2737853	-0.04641	-0.02112
02060311	古亭(1)	329932.2	2741080	-0.04457	-0.00728
02060411	公館	332212	2737115	-0.01846	-1.6E-05
02070111	內城	318685	2734452	-0.03004	
02070211	自強國小(1)	313700	2732700	-0.16644	
02070411	同樂	322822.3	2739979	-0.02997	-0.00182
02080111	冬山(1)	329500	2725778	-0.04935	
02080311	順安	326363	2727985	-0.014	
02090111	五結(1)	330000	2731600	-0.04999	-0.06265
02090211	中興(1)	327300	2732000	-0.041	-0.017
02100111	大隱(1)	321300	2729300	-0.03812	-0.00178
02100211	三星	314970	2729321	-0.10712	-0.01018
02100311	大洲(1)	322731.5	2732157	-0.02166	
年份：2004~2012 年					

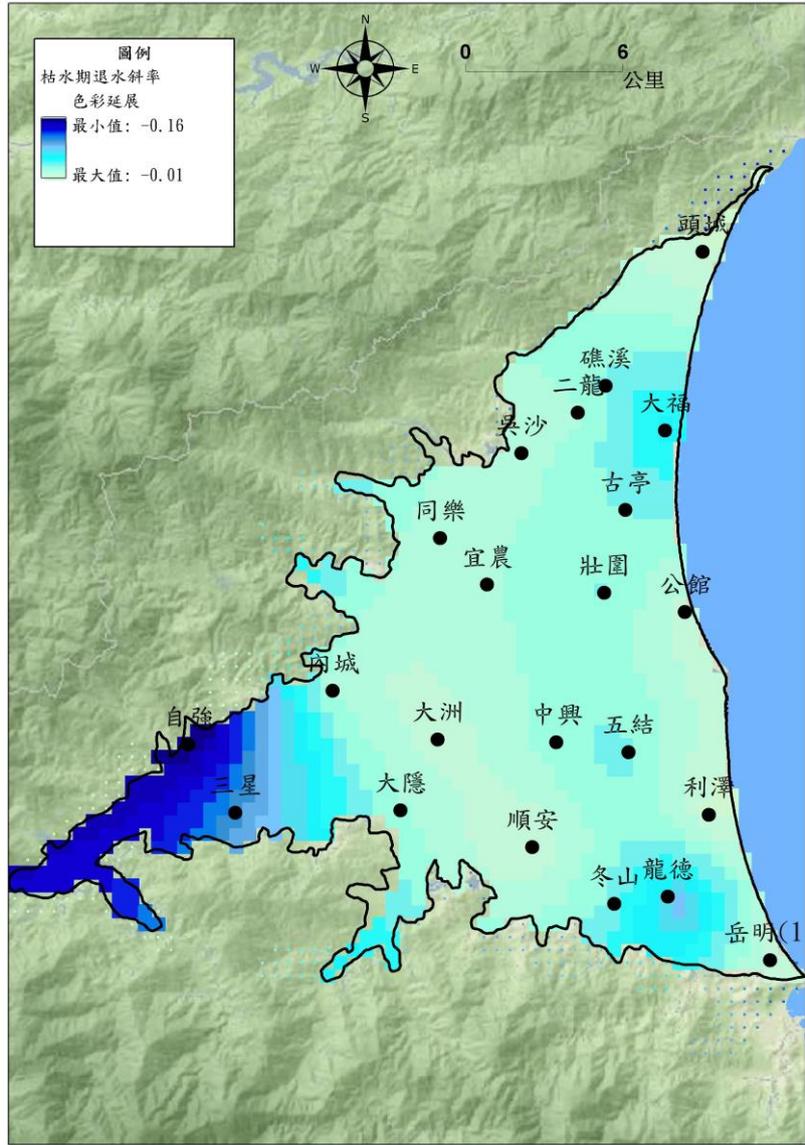


圖 7.1-12 蘭陽平原淺層觀測井枯水期退水線斜率

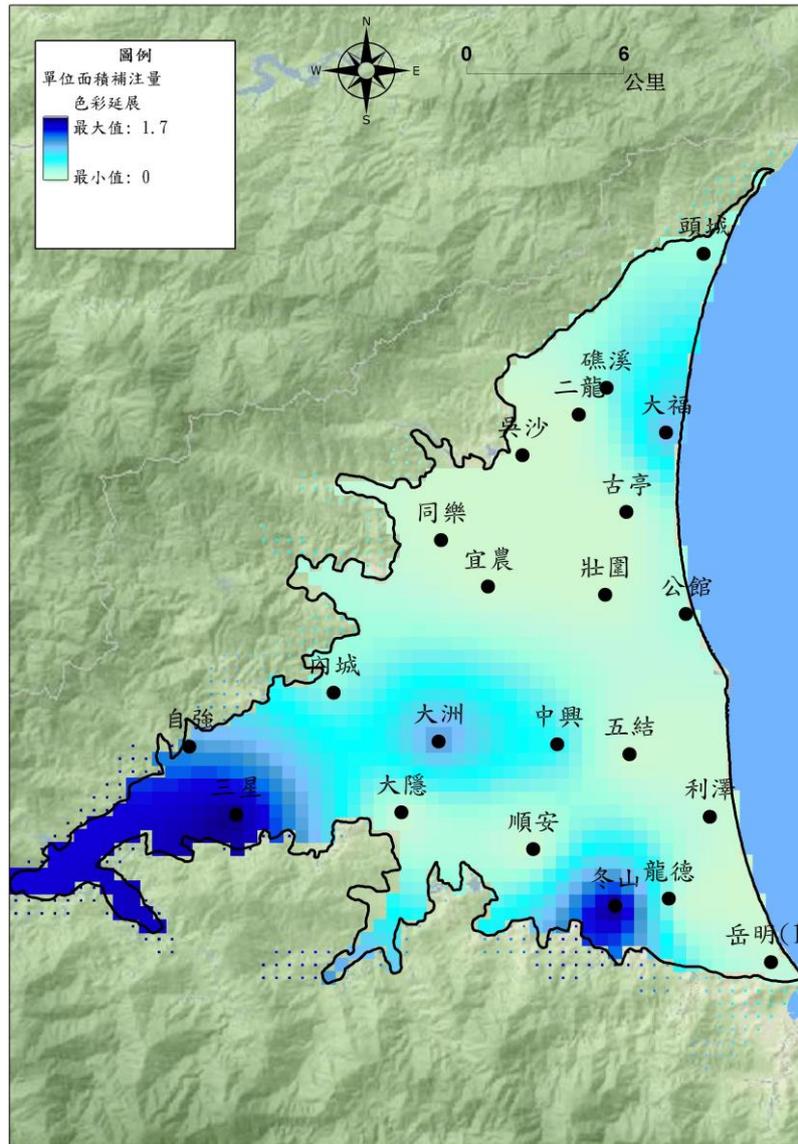


圖 7.1-13 蘭陽平原淺層觀測井單位面積平均年補注量

如依據降雨事件統計各降雨場次對應的補注量、降雨量，圖 7.1-14 則呈現水位歷線法推估結果之降雨量及降雨天數對補注量關係圖，從圖面顯示降雨量與補注量呈現二次之關係。

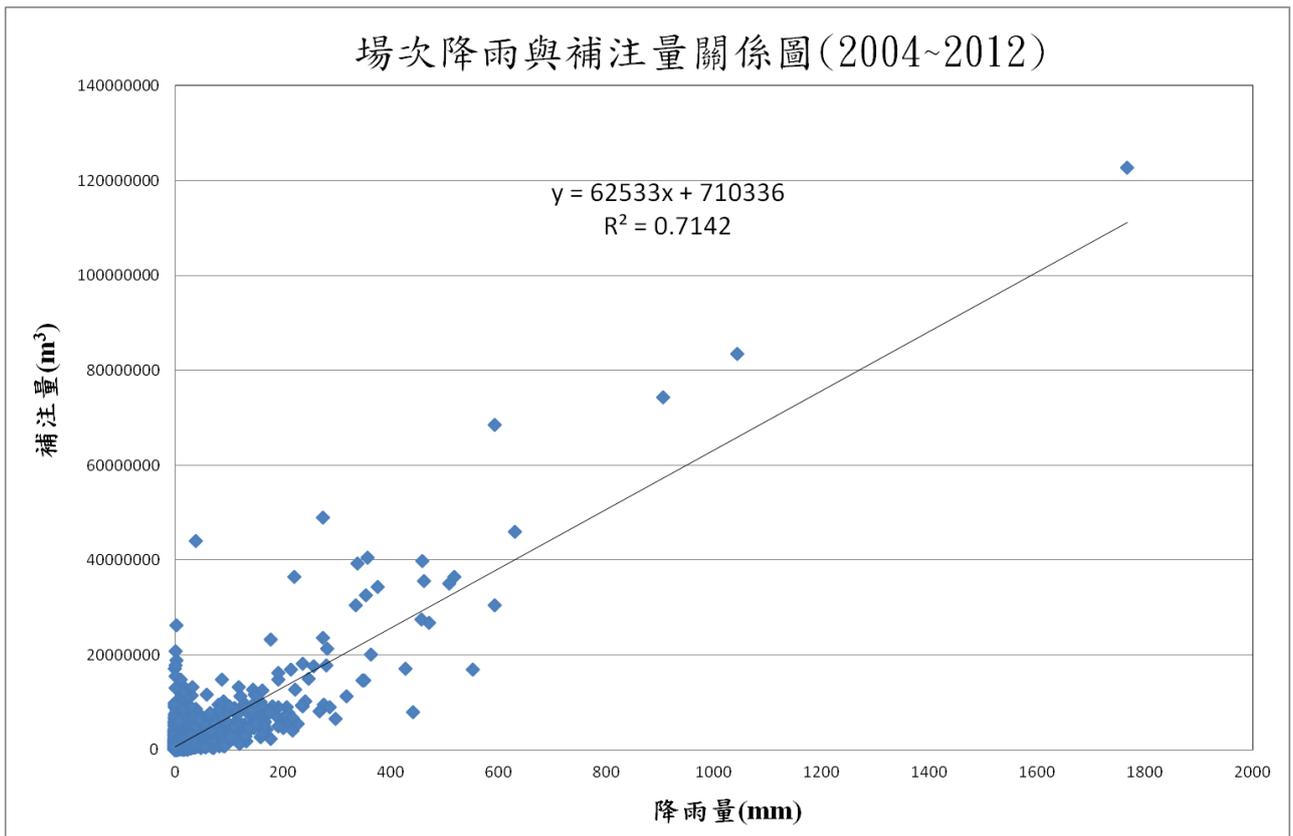


圖 7.1-14 場次降雨量與補注量關係圖(2004~ 2012 年)

7.2 地下水流數值模式建置

本章將說明蘭陽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 7.2.1 節說明地下水數值模式之建置流程及步驟，7.2.2 節簡介本計畫所採用之地下水數值模式 MODFLOW 之發展歷程，並展示蘭陽平原之地下水模式建置及參數檢定成果。

7.2.1 地下水數值模式建置流程

本計畫地下水數質模式之建置流程如圖 7.2-1 所示，可分為四大部分，依序為邊界條件與網格劃分、模式資料輸入、模式參數檢定及水平衡分析（如圖 7.2-1 所示）。本計畫採用美國地質調查局開發之 MODFLOW 地下水流模擬模式模擬研究區域之地下水流系統（見 7.2.2 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、比出水量、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及美國地質調查局開發之 UCODE 優選模式（見 7.2.2 參數檢定方法）進行淨補注量檢定，檢定模擬期距（2004 年~2012 年）中，每日表層淨補注量與深層抽水量，再進行水平衡分析。

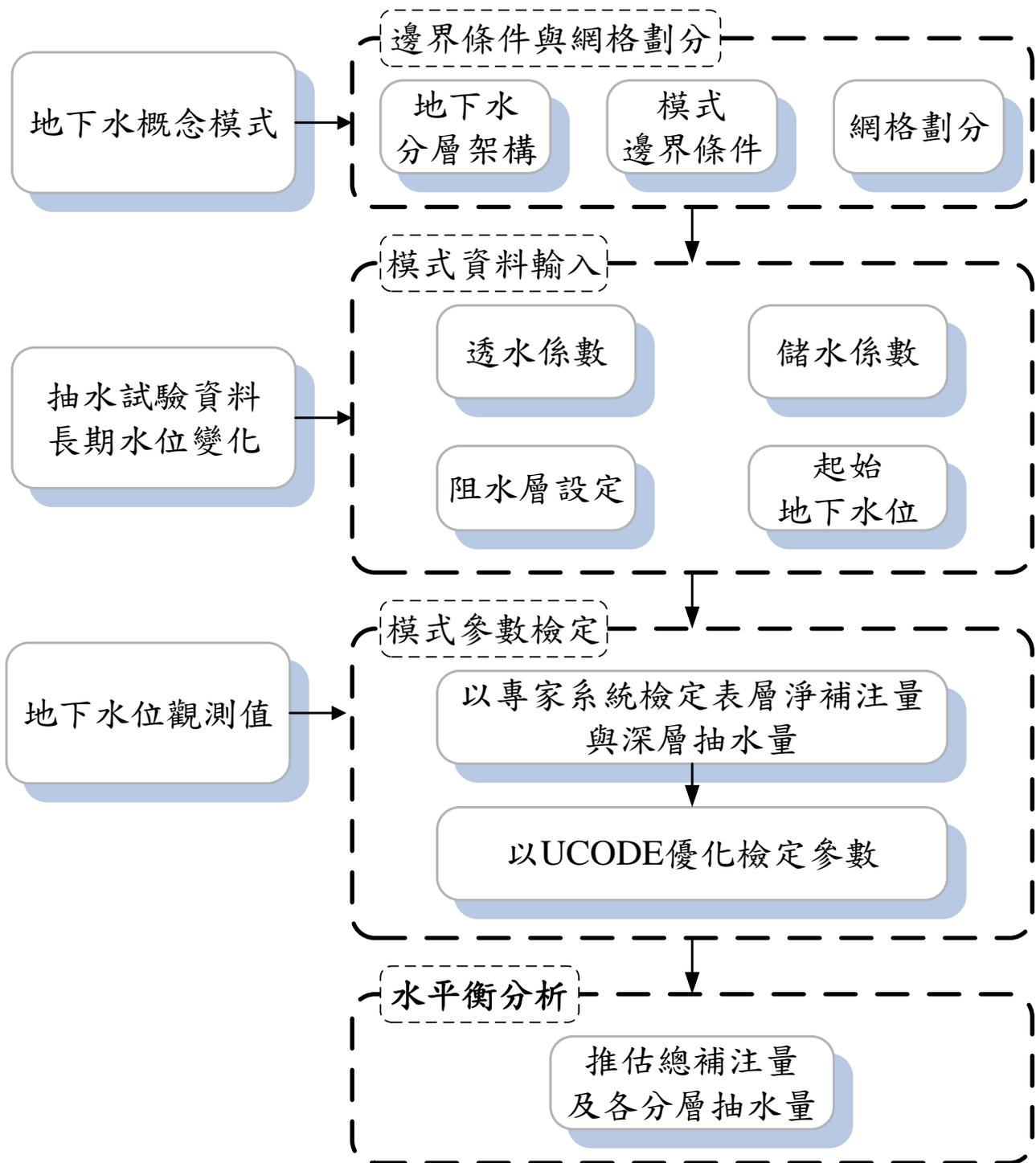


圖 7.2-1 地下水數值模式建置流程示意圖

7.2.2 地下水數值模式

一、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，因此本計畫乃以 MODFLOW2005 開發蘭陽平原之地下水流模式。

二、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。本計畫以中央地質調查所繪製之水文地質剖面圖（深度最深至 250 公尺左右）為基礎，參考圖內所描述之蘭陽平原概念分層建立數值模式之分層架構，其概念分層如圖 7.2-2(紅柴林-公館剖面，剖面位置如圖 7.2-3 所示，數值模式剖面位置見 AA' 剖面)所示，由上而下分別為含水層一(F1)、阻水層一(T1)與含水層二(F2)。數值模式以概念分層為基礎，共分為四層，如圖 7.2-4 所示。本計畫設置兩層含水層模擬概念模式中之含水層一(F1)，以模擬上層含水層中部分黏土層所造成之拘限含水層效應，而概念模式中之阻水層一(T1)與含水層二(F2)則各別以一個分層進行模擬。

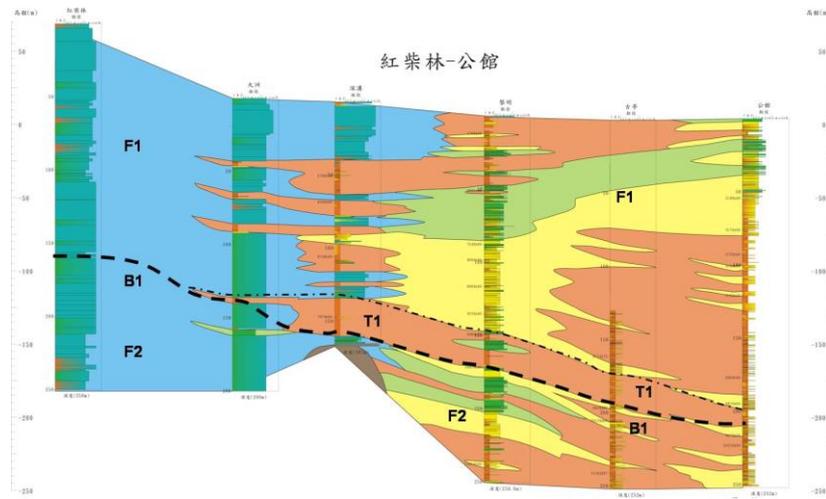


圖 7.2-2 蘭陽平原概念分層(紅柴林-公館剖面)

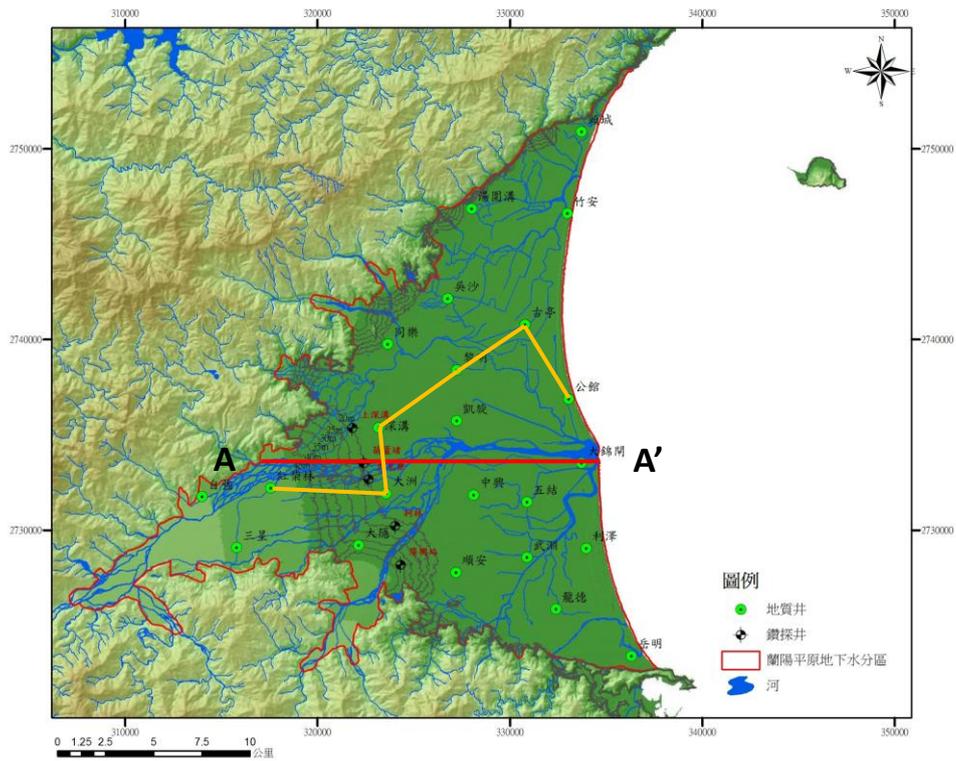


圖 7.2-3 紅柴林-公館剖面及 AA' 剖面位置圖

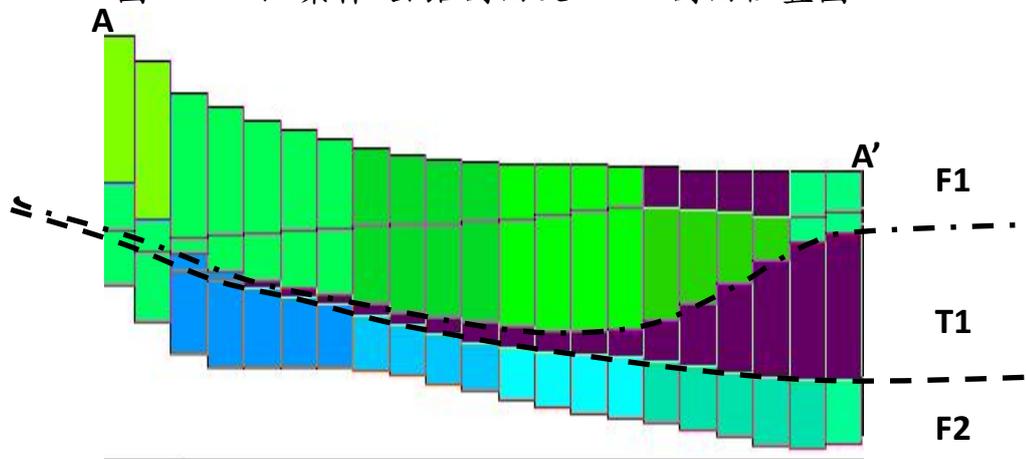


圖 7.2-4 蘭陽平原模式分層(AA'剖面)

2. 模式邊界條件與格網劃分

蘭陽平原位於台灣之東北端，包括宜蘭縣大部分鄉鎮，本研究參考中央地質調查所之蘭陽平原水文地質圖與水利署所定義之蘭陽平原地下水分區範圍，並考量現有之地質鑽探資料決定數值模式的模擬範圍。模式研究區域大抵以地調所之蘭陽平原水文地質圖上之底岩分布區域為界，以描述平原地下水區特性。

模式邊界北以雪山山脈為界，南以中央山脈之低山為界，考量其地質特性，將模式南北邊界定為零流量(No flow)邊界條件(Neumann boundary condition)，然於地形圖上可得知，有許多河川從與蘭陽平原緊鄰之山脈流入，並於地面與地下水質調查中可得知，蘭陽平原應有大量補注來自於山脈側向流入，故在邊界河流出口處以給定水頭方式模擬山邊側流量。給定水頭設定如下：

a. 選取含水層一(F1)所有觀測井之地表高程並計算各觀測井之日平均地下水位，再由地表高程對日平均地下水位進行線性回歸，如圖 7.2-5 所示，得回歸公式為 $y = 0.727x - 0.4739$ ， $R^2 = 0.9866$ 。

b. 於河川出山口處之網格，設為給定水頭(圖 7.2-6 中之紫色網格)，並取出該網格之高程，由回歸後所得公式計算所有給定水頭處之日均地下水位。

c. 假定給定水頭(h_b)與其下游最近觀測井(h_{obs})之水位差為定值(Δh)，而 Δh 為給定水頭日均水位(\bar{h}_b)與下游最近觀測井日均水位(\bar{h}_{obs})之差值，如公式 7.2-1 所示：

$$\Delta h = \bar{h}_b - \bar{h}_{obs} \quad (\text{式 7.2-1})$$

因此將各時刻下游最近觀測井水位加上 Δh ，即可得給定水頭各時刻之水位，如公式 7.2-2 所示：

$${}^n h_b = {}^n h_{obs} + \Delta h \quad (\text{式 7.2-2})$$

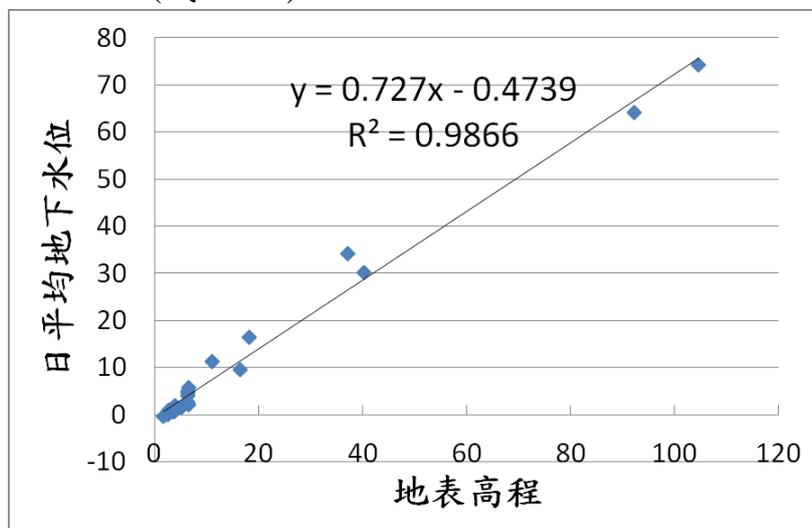


圖 7.2-5 蘭陽平原地表高程對日均地下水位線性回歸

由回歸公式及公式 7.2-1 計算 Δh ，計算結果如表 7.2-1 所示，福德坑溪出山口總水頭高為頭城國小(1)水位高加 15.85 公尺；得子口溪出山口總水頭高為二龍水位高加 27.37 公尺；小礁溪出山口總水頭高為同樂水位高加 41.63 公尺；大礁溪出山口總水頭高為同樂水位高加 49.70 公尺；五十溪出山口總水頭高為同樂水位高加 34.29 公尺；蘭陽溪出山口總水頭高為自強國小(1)水位高加 41.63 公尺；羅東溪出山口總水頭高為大隱(1)水位高加 57.87 公尺；冬山河出山口總水頭高為冬山(1)水位高加 30.83 公尺；新城溪出山口總水頭高為龍德(1)水位高加 30.69 公尺。

表 7.2-1 蘭陽平原給定水頭設定

溪名	網格高程	\bar{h}_b	下游最近觀測井	\bar{h}_{obs}	水位差(Δh)
福德坑溪	26.19	18.57	頭城國小(1)	2.72	15.85
得子口溪	39.18	28.02	二龍	0.65	27.37
小礁溪	70.69	51.14	同樂	9.51	41.63
大礁溪	82.15	59.21	同樂	9.51	49.70
五十溪	60.86	43.80	同樂	9.51	34.29
蘭陽溪	160.02	115.85	自強國小(1)	74.22	41.63
羅東溪	121.77	88.07	大隱(1)	30.20	57.87
冬山河	49.47	35.49	冬山(1)	4.66	30.83
新城溪	45.84	32.82	龍德(1)	2.13	30.69

(單位：公尺)

另外蘭陽平原東側緊臨太平洋，因此將模式東邊邊界設定為定水頭邊界條件(Dirichlet boundary condition)，水位高為 0 公尺。格網的劃分上，南北方向分為 44 列，東西方向分為 34 行。考量資料密度及計算精度的情況下，採用 1km*1km 等間距的格網，如圖 7.2-6 所示。

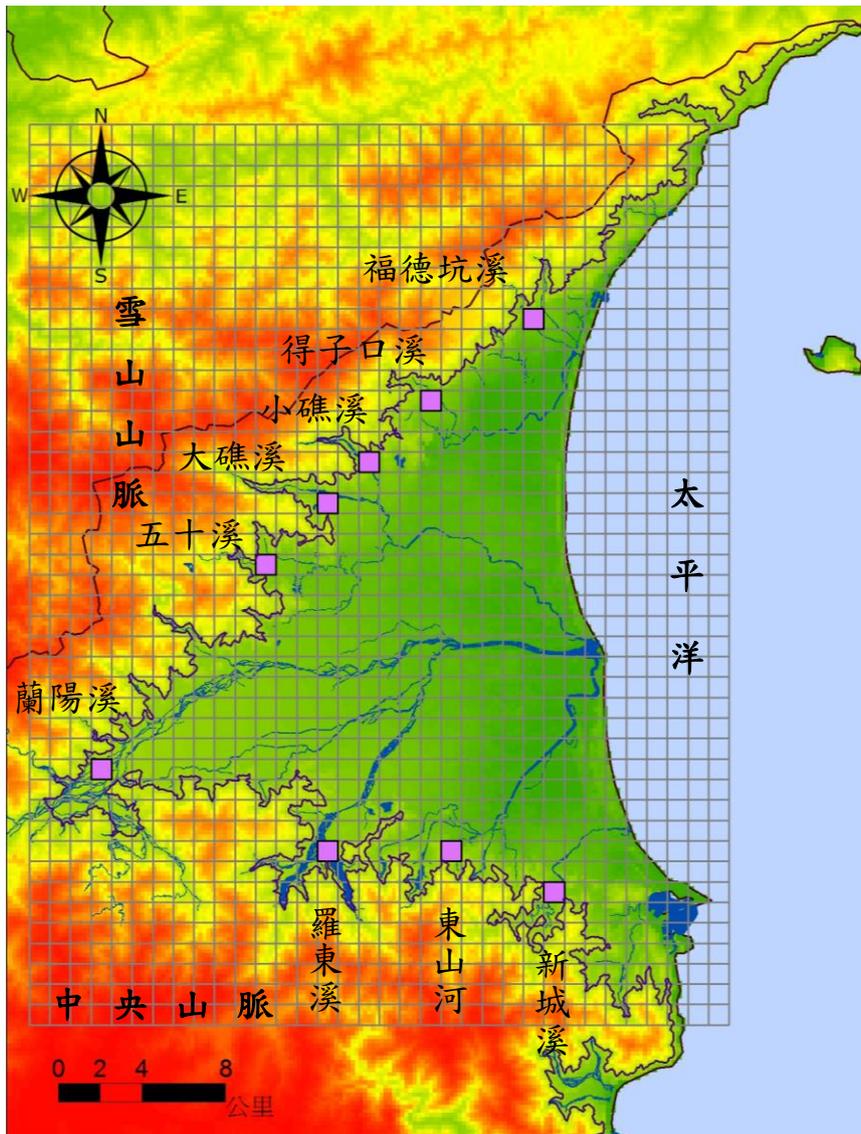


圖 7.2-6 蘭陽平原地下水模擬區域

三、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、比出水量、起始地下水水位、補注量及抽水量等。以下將說明建置蘭陽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)，因此將現地試驗所得之導水係數，再除以含水層厚度(b)即可轉換求得透水係數。此外除使用抽水試驗結果外，亦搭配使用地電阻參數推估結果，後續再以觀測井建立徐昇氏法網格，決定各參數資料之代表範圍。圖 7.2-7 與圖 7.2-8 分別為含水層一及含水層三之徐昇氏分區圖。參考中央地質調查所之調查結果，模式阻水

層一之分布範圍位於平原中、下游區域，其透水係數乃參考教科書 Fundamentals of Ground Water (Schwartz and 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。因為中央地質調查所劃定之阻水層，至少需為一定厚度以上(如 3~4 公尺以上)之泥層，因此阻水層分佈範圍內多為具有一定厚度與延續性之泥層，但部分區域即使無厚泥層存在，但仍可能存在薄而頻繁出現之泥層，因此仍存在阻隔含水層間水流垂向流動之能力，因此這些區域之阻水層仍須給定阻水層等級之參數值。故本計畫在設定阻水層一之參數值時，除了地調所給定之阻水層區域(厚泥層區域)外，本研究另外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，之後再決定阻水層之參數值，分析方式說明如下所示：

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，故應設定阻水層等級之量值，若分層間之水位相近，幾乎一致，則此處設定為含水層之量值。

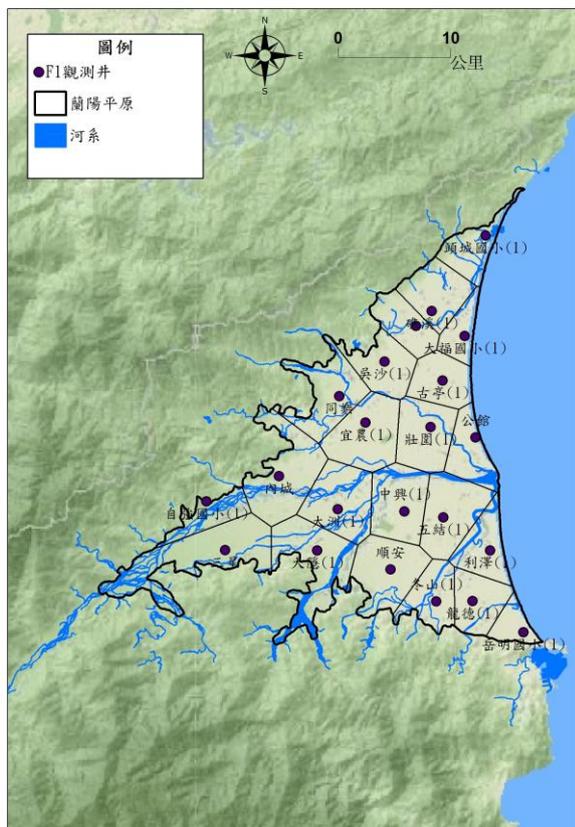


圖 7.2-7 含水層一徐昇式分區

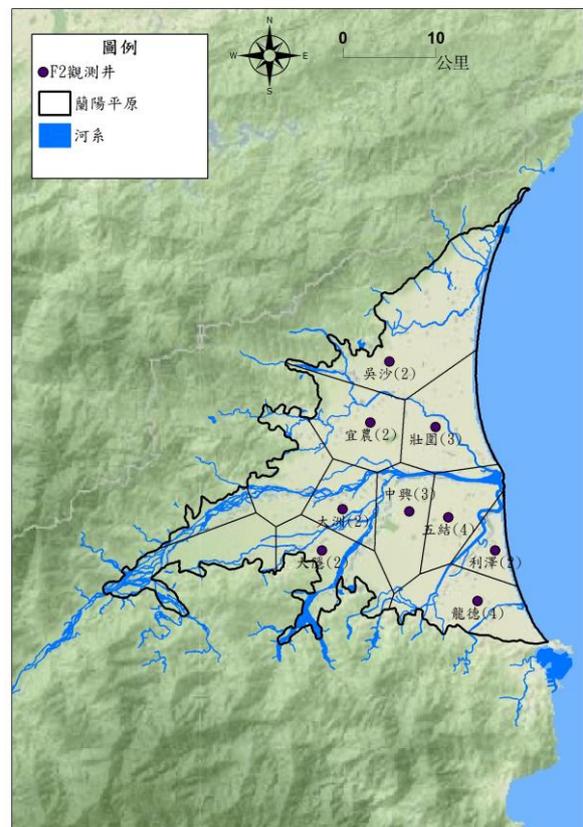


圖 7.2-8 含水層二徐昇式分區

2. 儲水係數與比出水量

由於儲水係數與比出水量必須進行複井抽水試驗才能求得，因此儲水係數或比出水量之數量遠低於透水係數之數量，目前已有龍德與大隱觀測井進行複井抽水試驗，而今年度地調所新增三星、大洲與內城三站之複井抽水試驗，加以本計畫藉重力量測推估比出水量，因此已有相當多之參數，而缺少相關資料之部分，將另行推估，說明如下：

本計畫首先蒐集同時有透水係數及儲水係數或比出水量資料之觀測井，再以透水係數對儲水係數及比出水量個別進行線性迴歸，可求得含水層儲水係數及比出水量之回歸式，之後各觀測井依其位於拘限或非拘限含水層，選定公式代入透水係數，即可推得儲水係數與比出水量。

儲水係數與比出水量之代表範圍與透水係數相同，皆以觀測井建立徐昇氏網格，決定其代表範圍。

3. 起始地下水水位

對於暫態模式而言，初始地下水水位代表模式之初始條件，不同初始條件影響模擬結果極巨，因此應選取適當之初始水位以得到較佳之模擬結果。本計畫建置之地下水系統模擬期距為 2004 年~2012 年，為日模擬，模擬起始時刻為西元 2004 年 1 月 1 日，因此以西元 2003 年 12 月 31 日之水位作為起始水位。

4. 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，故本計畫將以參數檢定方法推估淺層淨補注量與深層抽水量，檢定工具為本計畫所開發之專家系統(詳見下一小節之參數檢定方法)。

本研究設定之模擬時刻長度為日，參數檢定之依據為各觀測井之日水位，此外，本計畫採用徐昇氏法進行參數分區，以降低參數維度。

四、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 7.2-9 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(即深層)，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。

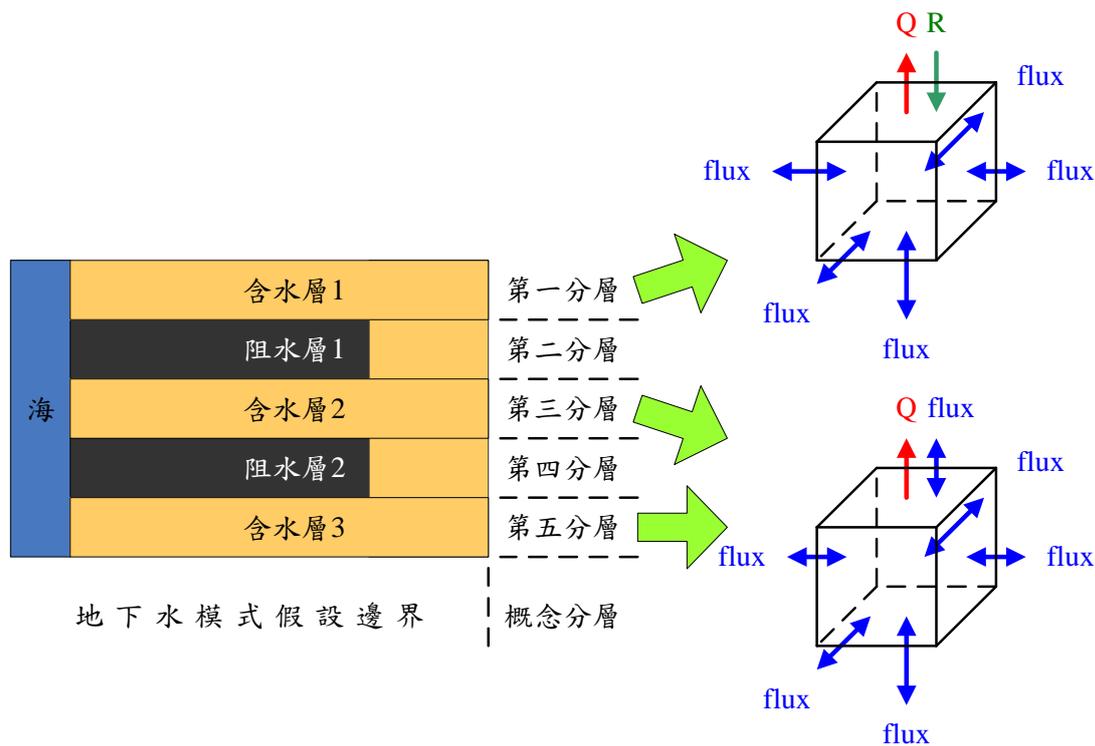


圖 7.2-9 地下水模式流量計算概念圖

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悖離現地物理特性的情形。

自動化參數檢定通常是將地下水模式結合優選法來進行檢定，雖然可免去人工參數檢定的煩瑣，但使用者難以參與參數變動過程，往往只能被動的接受最後的檢定結果，而因為地下水模式甚至優選模式本身，因受限於參數之維度數目，往往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。然由於本團隊開發之檢定系統，為達上述快

速、方便與彈性之優點，而給予系統較大之容許誤差，欲改善此問題，使檢定結果更精確，本計畫採用 UCODE 優選模式，將檢定後參數進行優化，減小目標函數誤差範圍，使系統更趨完善。圖 7.2-10 為參數檢定之系統架構，可瞭解本計畫使用 MODFLOW2005 建置數值模式，並進行初始設定，之後由專家系統進行參數檢定，再用 UCODE 優選模式進行參數優化。

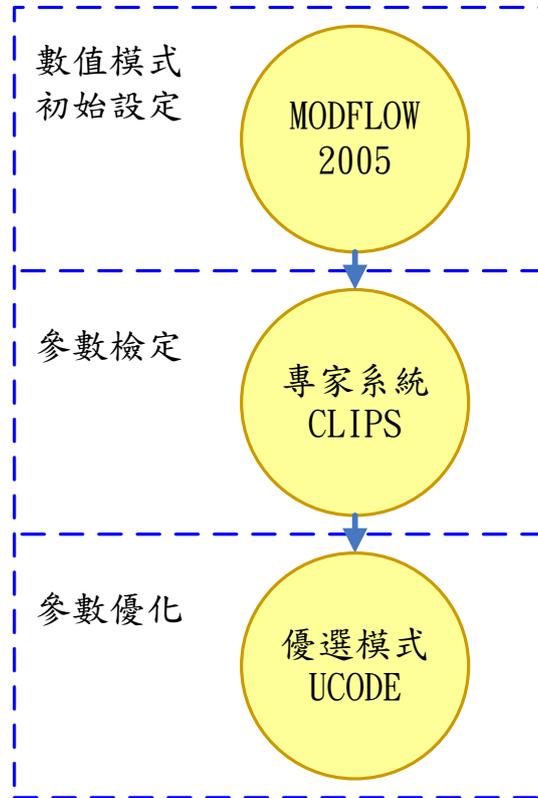


圖 7.2-10 地下水參數檢定系統架構圖

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，如透水係數值、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. 一般在人工檢定地下水模式時，首先需依據地區特性，給予適當的初始值，再依模擬後之水位誤差，給予適當幅度之調整。

b. 在多層地下水模式檢定中，由於補注通常為降雨或河川補注所造成，因此進行人工檢定時，通常給予表層含水層補注，深層含水層僅有人工抽水。

c. 在人工檢定地下水模式時，通常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，經由數值試驗反覆測試，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 7.2-11 所示，在參數檢定開始後，系統首先初始化參數值，即淨補注量及抽水量，並讀入相關參數的設定資訊，如分區設定、觀測井位置、觀測水位等。在完成初始參數設定後，接著執行地下水模式 MODFLOW，獲得各個時刻之模擬地下水位，下一步則判斷第一個時刻各分區之觀測水位與模擬水位之誤差(以下稱為檢定誤差)是否均小於容許誤差，本計畫以 2 公尺為容許誤差。

當有一分區之檢定誤差超過容許誤差，則會取出各分區的相關資訊，傳入專家系統進行推論分析。專家系統依據知識庫中之規則集合(Rules)，並搭配推理機(Inference engine)之運作，而推論出各區的參數修正量。當各區待檢定之參數，由專家系統分析出修正量後，再將各修正量依據 MODFLOW 輸入檔格式，對 MODFLOW 輸入檔進行更新。接著再次執行 MODFLOW，計算出更新參數後的模擬地下水位，再次判斷第一個時刻各分區檢定誤差是否均小於容許誤差，若是則進入下一個時刻的參數檢定，若否則反覆執行上述步驟，直至該時刻所有分區檢定誤差均小於容許誤差。當所有時刻的各分區檢定誤差均小於容

許誤差，則完成參數檢定的流程。

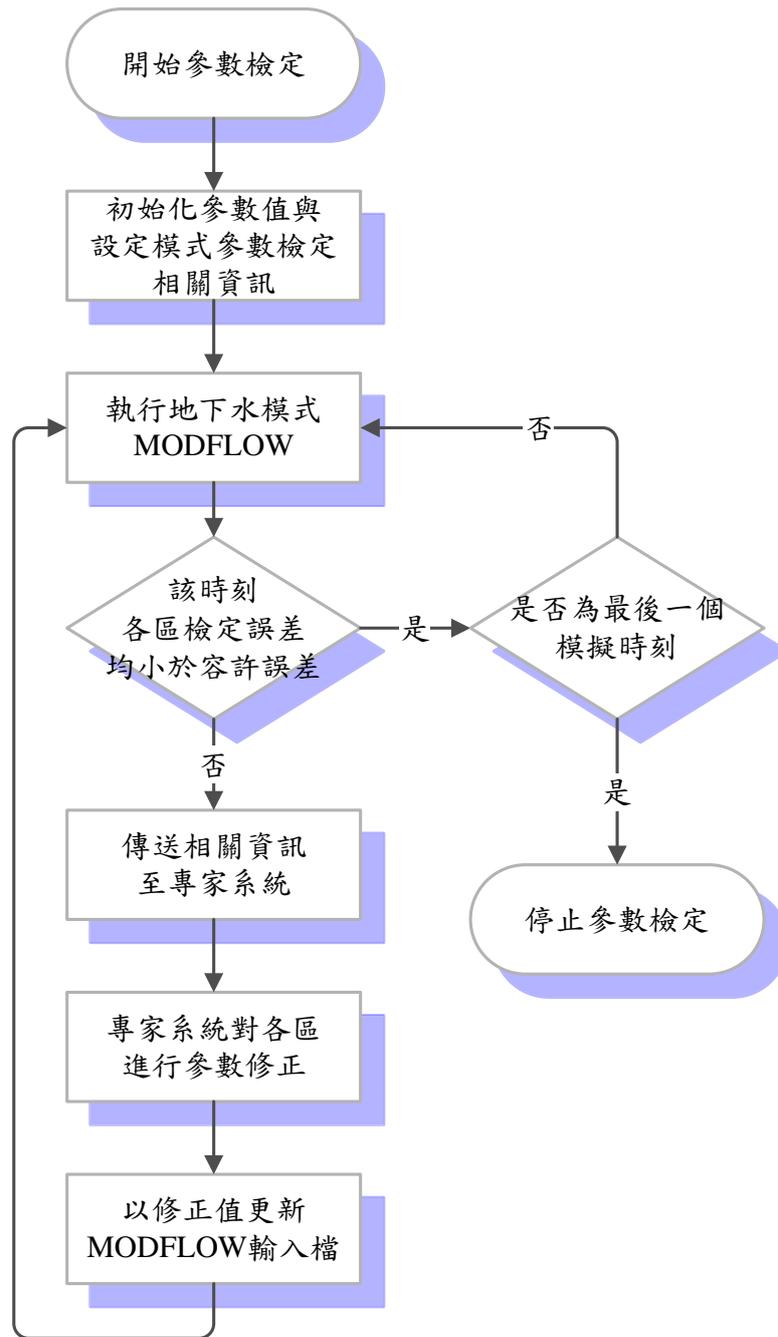


圖 7.2-11 參數檢定流程

6. 應用 UCODE 精鍊專家系統檢定結果

UCODE 為美國地質調查局所開發之優選模式，該程式是以修正型高斯—牛頓法(Modified Gauss-Newton Method) 推求最佳解。因為 UCODE 為梯度類型之優選法，因此求解時易出現初始解影響其收斂性的問題。此外，UCODE 在求解過程中，計算敏感度矩陣時需反覆呼叫地下水流模式，因此相當耗費計算時間。本計畫利用專家系統檢定之效率，可迅速找到一組不錯的解(淨補注量與抽水量)，以之作為 UCODE 之初始解，再進行優選，精鍊專家系統之檢定結果，使得檢定誤差進一步縮小，使模擬水位與觀測水位更趨一致。由檢定結果可發現，

當以專家系統檢定後之淨補注量與抽水量作為 UCODE 之初始解後，UCODE 僅需 2 至 3 次迭代後即可完成收斂，且可進一步縮小檢定誤差，提昇地下水資源量推估結果之正確性。

五、檢定誤差統計分析

本暫態模式設定模擬時刻長度為日，以西元 2004 年至西元 2012 年蘭陽平原各觀測井之日水位，作為暫態模式各時刻之參照水位，參數檢定之收斂標準為各分區之檢定誤差皆需小於 2 公尺，檢定後全區全時刻最大誤差為 1.92 公尺，均方根誤差為 0.19 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

此部分首先以年平均模擬水位與觀測水位之空間分布呈現檢定結果。圖 7.2-12 與 7.2-13 分別呈現蘭陽平原各含水層之平均觀測水位與模擬水位等值圖，其中實線為觀測水位，虛線為檢定後之模擬水位，等值線間距為 5 公尺，圖中顯示觀測水位與模擬水位值相近，且空間上之分佈趨勢一致。另外再進一步分析誤差之空間分布，乃將各站之均方根誤差取對數，以等值圖方式呈現。如圖 7.2-14 與 7.2-15 分別為蘭陽平原含水層一與含水層二各時刻所有模擬值之均方根誤差取對數等值圖，等值線的間距為 0.2。圖中顯示均方根誤差取對數皆小於 0，檢定成果良好。

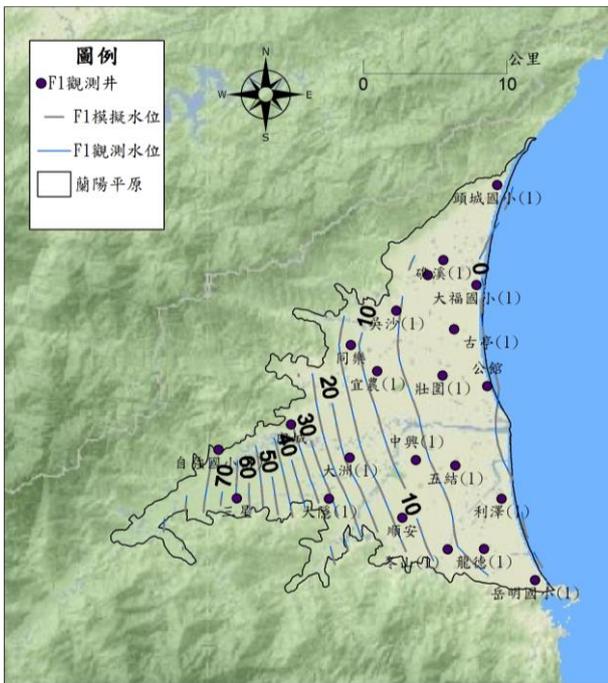


圖 7.2-12 含水層一觀測與模擬水位等值圖

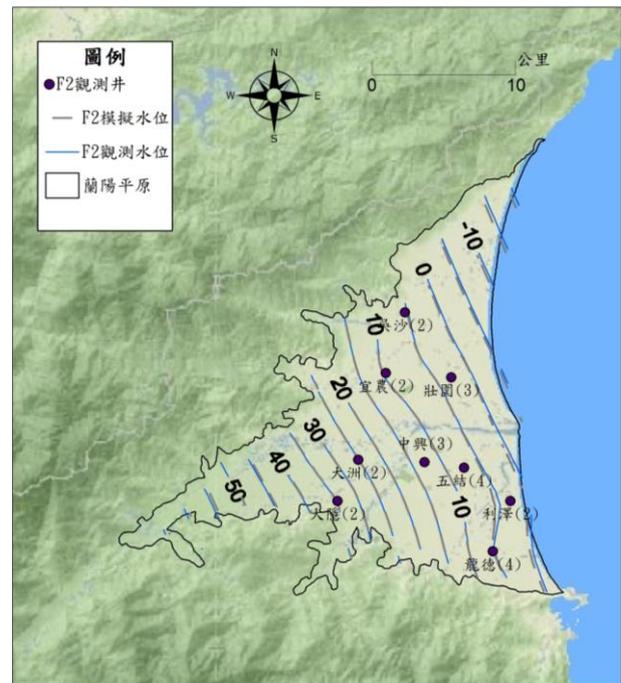


圖 7.2-13 含水層二觀測與模擬水位等值圖

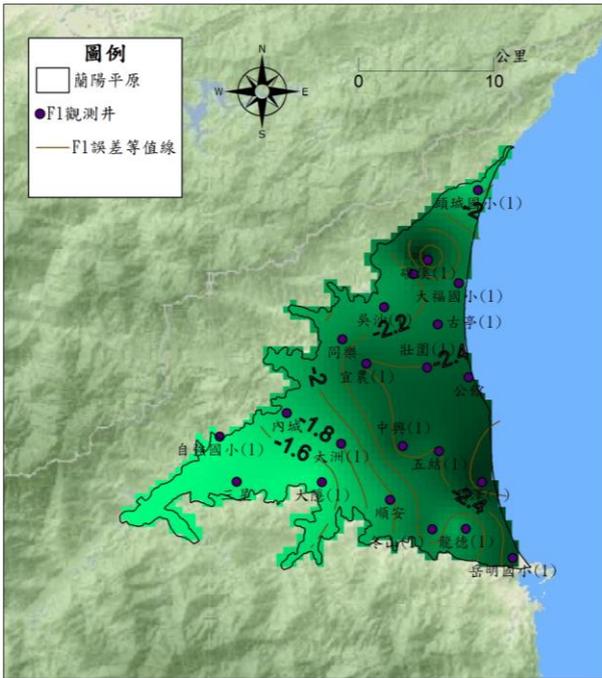


圖 7.2-14 含水層一 LOG(RMSE)

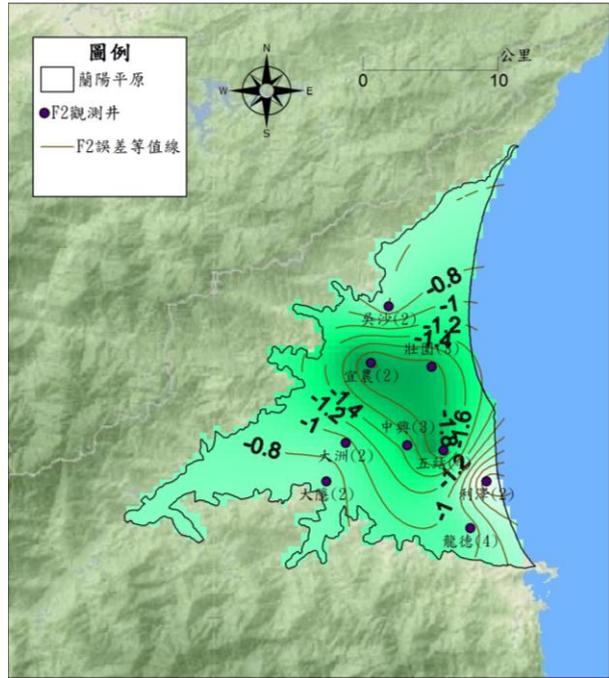


圖 7.2-15 含水層二 LOG(RMSE)

2. 檢定成果之水位時序分布及誤差時序分布

此部份進一步分析單一觀測井之模擬水位與觀測水位於各模擬時刻之差異及趨勢。本計畫取 2005 年每日之模擬水位與觀測水位，比較含水層一觀測井之模擬水位與觀測水位之誤差均方根後，挑選最佳與最差之觀測井進行說明。

最佳觀測井為利澤(1)，其觀測水位與模擬水位之時序變化如圖 7.2-16 所示，兩者之誤差均方根僅 1.20×10^{-5} 公尺，趨勢一致，兩者幾乎重疊；最差之觀測井為三星，其模擬水位與觀測水位之時序變化如圖 7.2-17 所示，兩者之誤差均方根(rmse)為 1.65 公尺，誤差雖然稍大，但其模擬水位與觀測水位之趨勢仍相當吻合。

再將每日均方根誤差依時間排序，呈現檢定誤差在時間上的分佈，以了解所有時刻之檢定成效。如圖 7.2-18 所示。圖中均方根誤差最大值為 0.47 公尺，最小值為 0.08 公尺，其中僅於降大雨時，水位劇烈變化，而使誤差上升至約 0.40 公尺左右，95%之均方根誤差仍界於 0.09-0.27 公尺之間，顯示檢定成效良好，檢定誤差皆能維持在一定區間內。

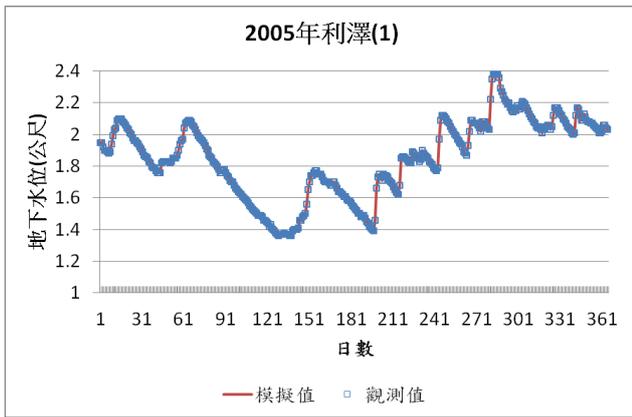


圖 7.2-16 利澤(1)水位時序變化圖



圖 7.2-17 三星水位時序變化圖

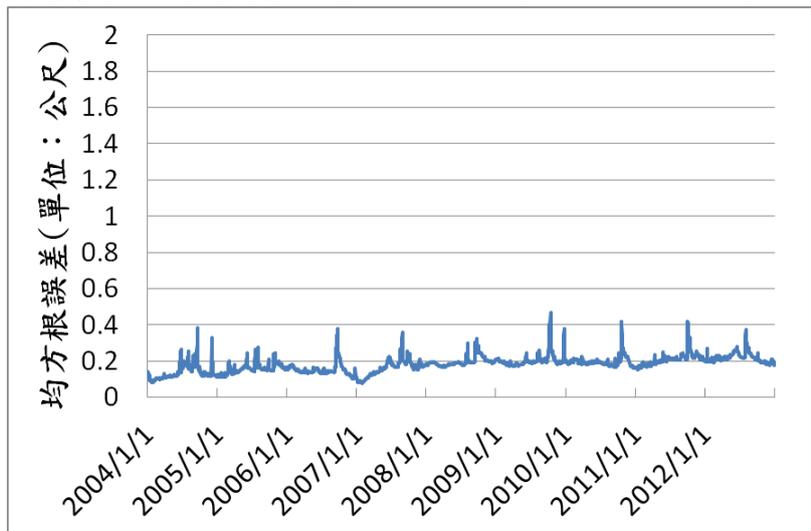


圖 7.2-18 每日均方根誤差變化圖(2004-2012)

3. 檢定成果之誤差統計

將 2004 年至 2012 年所有模擬誤差以等比為 10 的級數作為誤差區間進行統計，並將此結果繪製成誤差主體圖，如圖 7.2-19 所示，由圖可知 95% 的誤差在 0.10 公尺以下，檢定成果良好。

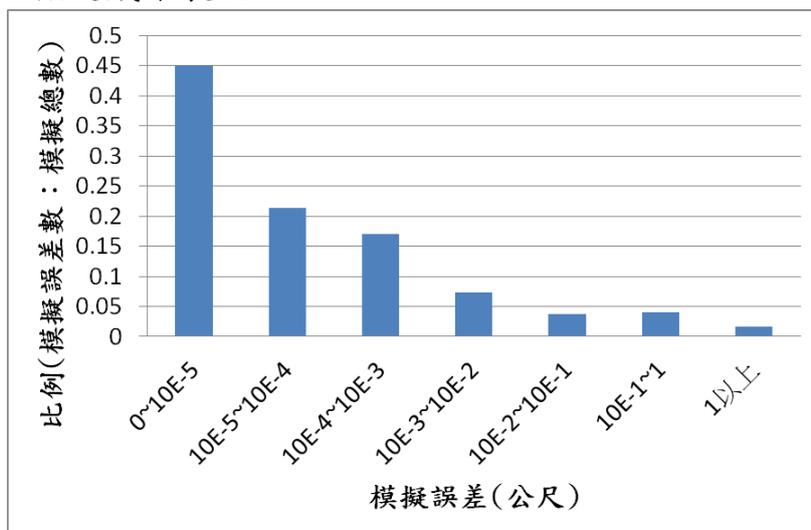


圖 7.2-19 模擬水位誤差主體圖(2004-2012)

7.3 水平衡分析

本節節說明由模式檢定所得之含水層一之淨補注量與含水層二之抽水量及海岸淨流出量，如表 7.3-1 所示，其中含水層一淨補注量為垂向補注量(包含降雨入滲或河川入滲)與含水層一抽水量之總和，後續將說明垂向補注量與含水層一抽水量之兩分量計算方法。

表 7.3-1 模式檢定所得參數

年分	含水層一(F1) 淨補注量	含水層二(F2) 抽水量	山邊 側流入量	海岸 淨流出量
2004	86.16	27.14	135.09	9.49
2005	92.66	31.26	134.60	17.35
2006	81.76	29.41	132.63	16.61
2007	82.17	29.59	135.16	17.37
2008	106.11	30.85	134.37	15.84
2009	79.49	26.72	132.09	16.64
2010	83.64	29.65	131.30	16.55
2011	70.06	29.99	130.86	17.32
2012	94.30	31.84	131.52	18.60
平均	86.26	29.61	133.07	16.20

(單位：百萬噸/年)

由表可知，第一含水層之淨補注量值約介於 106.11~70.06 百萬噸之間，年平均約為 86.26 百萬噸；第二含水層之抽水量值約介於 31.84~26.72 百萬噸之間，年平均約為 29.61 百萬噸；山邊側流入量值約介於 135.16~130.86 百萬噸之間，年平均約為 133.07 百萬噸；海岸淨流出量值約介於 18.60~9.49 百萬噸之間，年平均約為 16.20 百萬噸。以上歸納可得含水層二抽水量、山邊側流入量與海岸淨流出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。由於淨補注量為垂向補注量及第一層抽水量之總和，若僅以一淨補注量分量表示，將會隱藏許多重要資訊，因此本計畫將用以下方法分出垂向補注量及第一層抽水量。

一般淺層地下水之垂向補注通常受降雨影響最為劇烈，而於未降雨時期，則可觀察地下水隨時間推移逐漸下降，因此假設於長時間未降雨時期之平均抽水量為年均日抽水量，則可算得總抽水量。而本計畫日均抽水量判斷方式如下，如圖 7.3-1 所示，將地下水位與檢定後之淨補注量進行正規劃並與降雨量一起置於圖上，選取長時間未降雨，地下水位隨時間穩定下降，且淨補注量變動較為平穩之時段，如圖中黑線標示部分，假設此時段之淨補注量未受垂向補注影響，

因此可視為人工抽水量，並將此時抽水平均值視為年日均抽水，即可算得年總抽水量。最後再由此總抽水量代入檢定後之淨補注量，則可得垂向補注量。

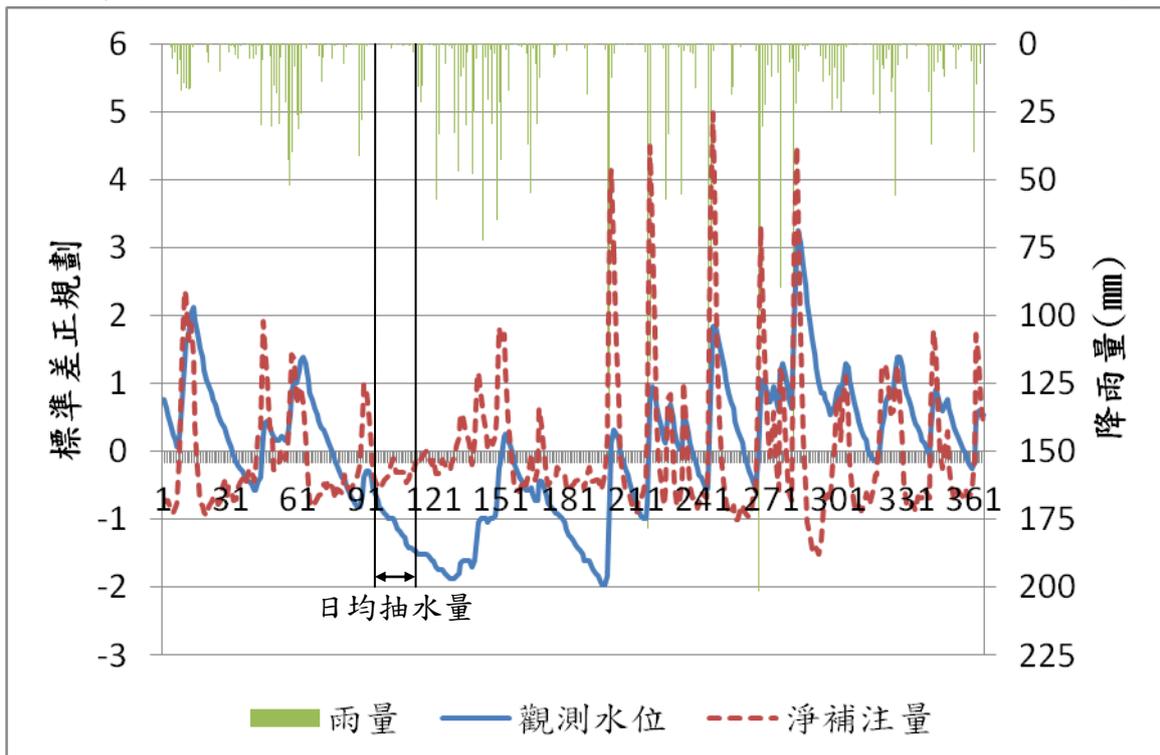


圖 7.3-1 岳明(2)每日降雨量、觀測水位與淨補注量關係圖

表 7.3-2 分別為各分層抽水量及各項入流量之統計結果，表 7.3-3 為將抽水量加總及垂向與側向補注量加總後之統計結果，其中總補注量為山邊側向流入與垂向補注之加總量，而總抽水量為淺層(F1)與深層(F2)之抽水加總量。綜合此兩表可得在抽水量值部分，於 2010 年之抽水量最大，含水層一與含水層二抽水量加總為 243.76 百萬噸；於 2011 年之抽水量最小，含水層一與含水層二抽水量加總為 201.67 百萬噸，而 2004~2012 年之平均總抽水量為 219.81 百萬噸。在補注量值部分，於 2010 年之補注量最大，垂向補注量與山邊側流入量加總為 261.75 百萬噸；於 2008 年之補注量最小，垂向補注量與山邊側流入量加總為 226.53 百萬噸，而 2004~2012 年之平均總補注量為 236.99 百萬噸。而年儲蓄改變量以 2011 年增加最多，該年度增加 13.49 百萬噸，2008 年減少最多，該年度減少 18.42 百萬噸。

表 7.3-2 地下水流量分項統計結果

年分	垂向 補注量	山邊 側流入量	含水層一 (F1) 抽水量	含水層二 (F2) 抽水量	海岸 淨流出量	儲蓄 改變量
2004	104.26	135.09	190.44	27.14	9.49	12.30
2005	102.74	134.60	195.42	31.26	17.35	-6.66
2006	106.34	132.63	188.12	29.41	16.61	4.85
2007	97.20	135.16	179.39	29.59	17.37	6.03
2008	92.16	134.37	198.28	30.85	15.84	-18.42
2009	97.22	132.09	176.73	26.72	16.64	9.24
2010	130.45	131.30	214.11	29.65	16.55	1.45
2011	101.60	130.86	171.68	29.99	17.32	13.49
2012	103.27	131.52	197.61	31.84	18.60	-13.23
平均	103.92	133.07	190.20	29.61	16.20	1.01

(單位：百萬噸)

表 7.3-3 地下水流出與流入量統計結果

年分	總補注量 (山邊側向+ 垂向補注)	總抽水量 (F1 抽水+ F2 抽水)	海岸 淨流出量	儲蓄 改變量	降雨量(mm)
2004	239.35	217.58	9.49	12.30	3059
2005	237.34	226.68	17.35	-6.66	3684
2006	238.97	217.53	16.61	4.85	3274
2007	232.36	208.98	17.37	6.03	3899
2008	226.53	229.13	15.84	-18.42	3365
2009	229.31	203.45	16.64	9.24	3858
2010	261.75	243.76	16.55	1.45	3026
2011	232.46	201.67	17.32	13.49	3203
2012	234.79	229.45	18.60	-13.23	3283
平均	236.99	219.81	16.20	1.01	3406

(單位：百萬噸)

7.4 地下水可用水量推估

本節將進一步應用 7.2 節建置之地下水數值模式，以希爾法(Hill Method)評估蘭陽平原地下水系統之可用(合理)抽水量。希爾法為可用(或合理)抽水量推估之常見方法，該方法之概念為當一系統抽用地下水時，若年初與年末之地下水位無變化，則該抽水量即為安全出水量。而在採用希爾法推估可用(或合理)抽水量前，應先判斷該區域地下水位狀態，是否在健康狀態，因為一區域之地下水位若已處於超抽狀態，希爾法所推估之安全出水量則為超抽狀態下之安全出水量，並無法使地下水系統恢復健康狀態。觀察近年蘭陽平原水位變化趨勢，並無明顯下降情形，且部分地區實施地下水抽取管制措施，使局部沿海地區地下水位回升且高於海平面，綜觀整個平原地下水狀態，判斷應屬穩定、合理情形，可讓地下水水位持續保持在現行狀況之下。

本計畫應用建置完成之地下水數值模式所推估之各年度總抽水量，分別以增加 10%、保持不變以及減少 10% 等三種方式代入模式進行模擬中，計算平原所有觀測井 1 月 1 日與 12 月 31 日之水位差，可得整個平原之平均水位洩降，因此每年度可得 3 筆抽水量及其對應之水位洩降，從 2004 年~2012 年共可得 27 筆抽水量對應水位洩降資料。如圖 7.4-1 所示，將此 27 筆資料繪製於座標圖上，並以抽水量對平均水位洩降進行線性回歸，可得回歸公式為 $y = -0.0443x + 9.7233$ ， $R^2 = 0.9035$ ，由回歸公式計算可知，當年初年末平均水位洩降為 0 公尺時，可用(或合理)抽水量為 219.49 百萬噸。

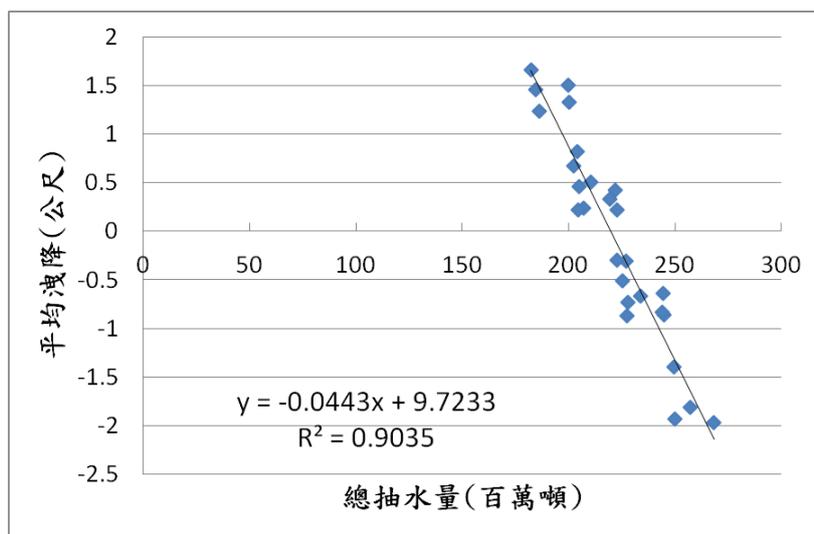


圖 7.4-1 總抽水量對應平均洩降線性回歸

7.5 地下水補注區對地下水量與水質之影響分析

1. 補注區對地下水系統補注之影響分析

為進一步了解補注區對整體地下水系統之補注影響程度，本計畫分別統計補注區之補注量與其所占整體補注量之百分比，表 7.5-1 為歷年蘭陽平原垂向補注量與補注區垂向補注量所占百分比，由表可知，2007 年補注區之垂向補注量所占比例最高，約為 66.71%，而 2010 年補注區之垂向補注量所占比例最低，約為 49.44%。接著由表 7.5-2 分析，可再進一步探討補注區對整體地下水系統補注之重要性：蘭陽平原地下水區總面積約 359.38 平方公里，補注區面積約 80.32 平方公里，補注區面積占蘭陽平原總面積 22.35%，而蘭陽平原年平均垂向補注量為 103.92 百萬噸，補注區年平均垂向補注量為 59.85 百萬噸，因此可求得補注區之垂向補注量占整體垂向補注量之 57.59%。由此可知，若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 7.5-1 補注區補注量與整體補注量關係表

年分	蘭陽平原 垂向補注量	補注區 垂向補注量	補注區 補注量百分比
2004	104.26	64.96	62.31%
2005	102.74	57.07	55.55%
2006	106.34	55.16	51.87%
2007	97.20	64.85	66.71%
2008	92.16	60.02	65.13%
2009	97.22	54.24	55.79%
2010	130.45	64.49	49.44%
2011	101.59	57.19	56.29%
2012	103.27	60.66	58.74%
平均	103.92	59.85	57.59%

(單位：百萬噸/年)

表 7.5-2 補注區面積及垂向補注量統計表

	面積(km ²)	補注量(百萬噸/年)
蘭陽平原地下水區	359.38	103.92
蘭陽平原補注區	80.32	59.85
百分比	22.35%	57.59%

2.補注區對地下水系統污染之影響分析

完成地下水數值模式之建置與檢定後，以檢定完成之水流模式搭配 MODPATH 污染傳輸模式，假設無妥善管理補注區內的污染行為，模擬補注區受污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，再以水流流場模擬污染質點之移動路徑，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，質點流經範圍即為污染範圍。水流模式係採穩態模式，模擬期距分別為 10 年及 100 年，藉此推估污染物質可能之傳輸範圍，傳輸範圍如圖 7.5-1 至圖 7.5-2 所示，依序為 F1 與 F2 之水質影響範圍圖，紅線畫分區域即為補注區，黃色區域為 10 年後之污染傳輸範圍，綠色區域為 100 年後之污染傳輸範圍。

圖中顯示持續污染 10 年後，少部分散布於補注區表層之污染物質逐漸由淺層含水層 (F1)垂直滲入深層含水層 (F2)，大部分則約略延著蘭陽溪方向污染淺層含水層 (F1)，且流至下游沿海區域，至 100 年後，幾乎所有污染物質均已流入海中。

觀察蘭陽平原之地下水流流場，由於受雪山山脈及中央山脈之側向補注影響，使得補注區之補注會快速流向東側海洋，而不會向南北方向擴散，故於淺層含水層 (F1)污染質流經區域呈現帶狀。另於深層含水層 (F2)方面，由於深層含水層地下水抽取量較少，使得水流較不會向深層流動，造成僅少量污染物質進入深層並向下游移動，因此污染質流經區較小。

綜合前述分析可知，大部分污染質將在淺層含水層中流動，少部分污染質流入深層含水層，因此均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，建議補注區應盡速完成妥善之保育規劃。

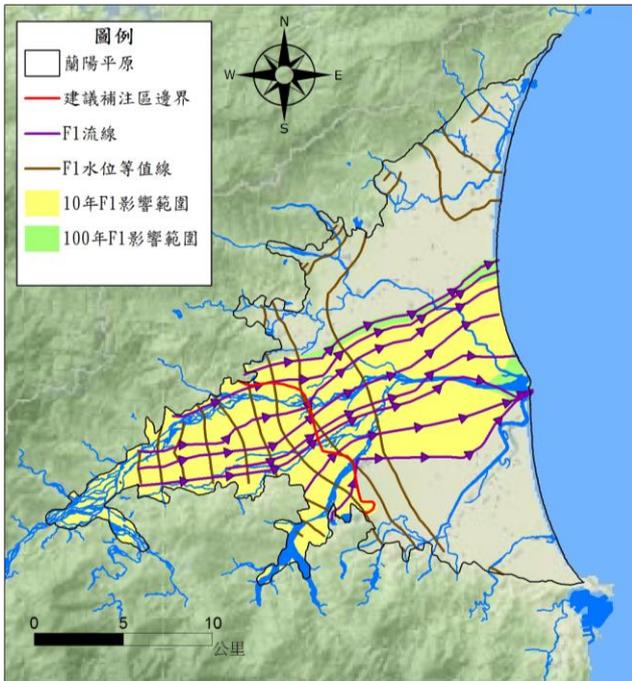


圖 7.5-1 水質影響範圍圖(F1)

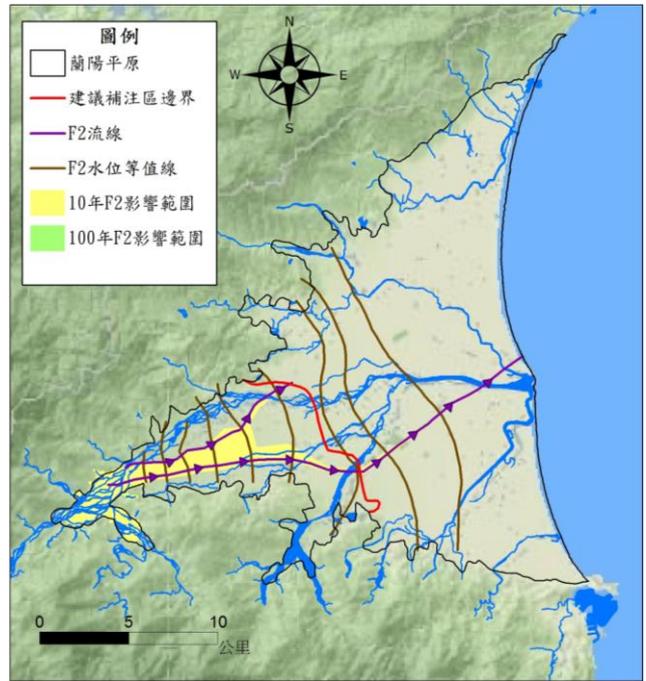


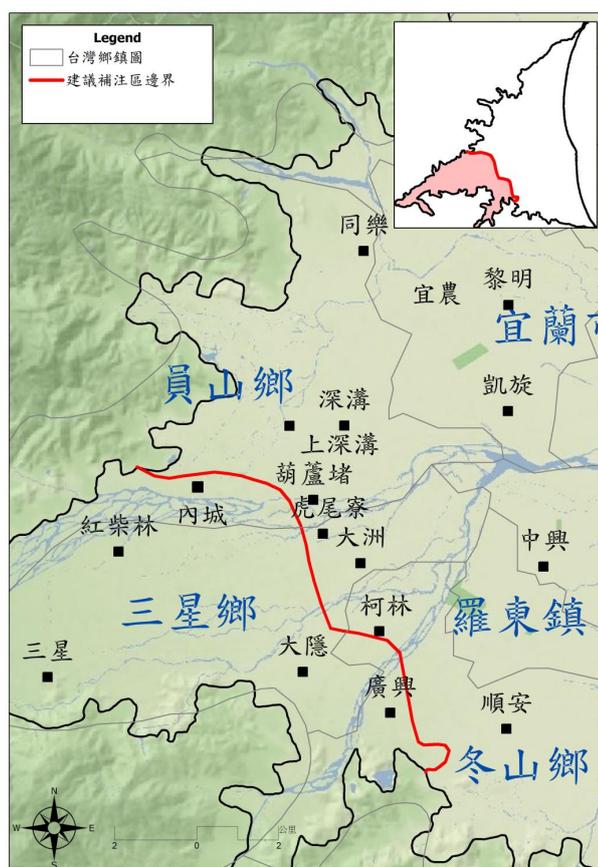
圖 7.5-2 水質影響範圍圖(F2)

第八章 結論與建議

一、結論

(一) 地下水主要補注區劃設

本計畫綜合岩心、水文地質模型、二維地電阻、湧泉及溶氧量資料，推估主要補注區，所推估之主要補注區範圍位於蘭陽溪上游，包括員山鄉、三星鄉與冬山鄉。補注區之面積為 80.32 平方公里，佔蘭陽平原地下水區面積 22.35%，主要補注區範圍分布，如下圖所示。



(二) 地下水補注量與抽水量推估

本計畫將以蘭陽平原 2004~2012 年之觀測地下水位為基礎，應用數值模式推估蘭陽平原全區之年均垂向補注量為 103.92 百萬噸，山邊側向補注量為 133.07 百萬噸，海岸淨流出為 16.20 百萬噸，含水層一抽水量為 190.20 百萬噸，含水層二抽水量為 29.61 百萬噸，統計總補注量為 236.99 百萬噸，總抽水量為 219.81 百萬噸。水位歷線法之推估結果為年均總補注量約 267.16 百萬噸，總抽水量約為 204.26 百萬噸。兩方法在總補注量與總抽水量之推估結果相當接近。

(三) 地下水補注區對地下水系統水量、水質之影響

本計畫以數值模式分別從水量與水質方面，評估主要補注區對地下水系統之影響。在水量方面，統計蘭陽平原地下水區面積及其補注區之面積與垂向補注量，蘭陽平原地下水區面積為 359.38 平方公里，垂向補注量為 103.92 百萬噸，補注區面積為 80.32 平方公里(約佔蘭陽平原地下水區面積之 22.35%)，補注區內之垂向補注量為 59.85 百萬噸(約佔整體垂向補注量之 57.59%)。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 10 年內污染物質將傳輸至第一含水層(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)，顯現主要補注區對蘭陽平原之地下水補注極為重要。

(四) 地下水可用抽水量推估

地下水可用抽水量應用希爾法進行推估，將 2004~2012 年各年度之抽水量分別以增加 10%、保持不變以及減少 10% 等三種方式代入模式進行模擬並求出個別對應之平均水位洩降，再以抽水量對水位洩降將進行回歸，推估得水位洩降為 0 公尺時，所得之年可用抽水量為 219.49 百萬噸。

(五) 重力量測與比出水量推估

在重力量測與比出水量推估部分，已完成枯水季(4 月)與豐水季(9 月)五個測站之重力觀測，並於內城站與抽水試驗進行聯合試驗，藉豐枯水季與抽水試驗前後之重力觀測資料，可用以推估比出水量。推估結果如下：三星站之比出水量為 0.07，大隱站之比出水量為 0.25。而內城站由聯合試驗方式所推估之比出水量為 0.37，若考量絕對重力儀的觀測不確定度，在 68% 的信心水準中，內城站的 S_y 值合理範圍應介於 0.19 至 0.55 間，而抽水試驗推估之 S_y 值為 0.17，相當接近重力推估合理範圍之下限。

(六) 三維水文地質模型建置

本計畫整合水文地質架構與水文地質參數，建立三維水文地質模型。在水文地質架構部分，以中央地質調查所繪製之地質剖面圖數化後，輔以內差方法(最近距離法)建立三維水文地質架構。而在水文地質參數推估部分，則應用地電阻與重力量測資料，進行參數推估。其中地電阻應用於推估透水係數，主要以地表地電阻與抽水試驗資料建立透水係數推估式，並此為基礎建立研究區域之三維透水係數場，作為地下水流模式之透水係數起始值。而重力量測則應用於推估比出水量，由量測之地下水位變化與重力變化資料，透過數值方法，推估

比出水量。

(七) 資料檢核與補遺

為了進行蘭陽平原之主要補注區劃設及補注量推估，本計畫已完成蘭陽平原各項資料蒐集，如地下水位、雨量、儲水係數、透水係數及 GIS 圖層等相關資料。此外，本計畫並應用一標準補遺程序與校正程序，全面檢視宜蘭平原 2004 年至 2012 年間之地下水位資料，完成蘭陽平原 40 口觀測井之地下水位補遺與校正。

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) 本計畫利用重力變化較大之測站，可推估出合理之比出水量，因此可將此方法應用至其他區域，進行參數推估。
- (三) 由於重力差值反映的是區域性的質量變化，因此受水文地質架構與水位變化影響劇烈。建議後續試驗盡量選擇水位變化較大與非受壓通透區之地區進行重力量測。
- (四) 蘭陽平原之地下水補注受中央山脈及雪山山脈河川注入影響，對平原之地下水供給相當充沛，約一半之地下水補注由山邊側向流入，未來可以地球化學方法，如氫氧同位素，推估山邊側流量，並與模式推估結果交互驗證。
- (五) 本計畫以數化後之三維水文地質架構輔助補注區劃設及數值模式建置，其為各項研究分析之重要依據。建議未來可建立水文地質架構推估模式，自動化推估三維水文地質架構，作為後續相關工作項目與研究之基礎。
- (六) 本計畫結果已初步證明一維地電阻可用於透水係數推估，因此建議未來可增加一維地電阻施測密度，增加井間透水係數之解析度。

參考目錄

1. Abbott, M. B. (1991). Hydroinformatics: information technology and the aquatic environment: Avebury Technical.
2. Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIME*, 146(99), 54-62.
3. Awwa, A. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20.
4. Başığaoğlu, H., & Mariño, M. A. (1999). Joint management of surface and ground water supplies. *Ground Water*, 37(2), 214-222.
5. Bear, J. (1972). Dynamics of fluid flow in porous media. Amer. Elsevier Publ. Co., NY.
6. Bentley, L. R., & Gharibi, M. (2004). Two-and three-dimensional electrical resistivity imaging at a heterogeneous remediation site. *GEOPHYSICS*, 69(3), 674-680.
7. Beresnev, I. A., Hruby, C. E., & Davis, C. A. (2002). The use of multi-electrode resistivity imaging in gravel prospecting. *Journal of applied geophysics*, 49(4), 245-254.
8. Berthold, S., Bentley, L. R., & Hayashi, M. (2004). Integrated hydrogeological and geophysical study of depression- focused groundwater recharge in the Canadian prairies. *Water Resources Research*, 40(6).
9. Black, G., & Black, A. (2012). PEST controlled: responsible application of inverse techniques on UK groundwater models. Geological Society, London, Special Publications, 364(1), 353-373.
10. Bobachev, A. (2003). Resistivity sounding interpretation IPI2WIN version 3.0.1 (Version version 3.0.1). Moscow State University, Moscow.
11. Bobatchev, A., Modin, I., & Shevnin, V. (2001). IPI2WIN v.2.0, User's manual.
12. Boyle, D. P., Gupta, H. V., Sorooshian, S., Koren, V., Zhang, Z., & Smith, M. (2001). Toward improved streamflow forecasts: Value of semidistributed modeling. *Water Resources Research*, 37(11), 2749-2759.
13. Carrollton, G. (2002). Water resource districts. from <http://www.carrollton-ga.gov/>
14. Chang P.Y., C. L. C., Chen W.F., Chiang C.J. (2012). Constructing the Hydrogeological Model of the Choushuichi Fan-delta in Central Taiwan with the

Electrical Resistivity Measurements. Paper presented at the AGU Fall Meeting 2012, San Francisco, CA, USA.

15. Chapelle, F. (2001). Ground-water microbiology and geochemistry: Wiley. com.
16. Chau, K. (2003). Manipulation of numerical coastal flow and water quality models. *Environmental Modelling & Software*, 18(2), 99-108.
17. Chau, K. (2004). Intelligent manipulation of calibration parameters in numerical modeling. *Advances in Environmental Research*, 8(3), 467-476.
18. Chau, K. (2005). Selection and calibration of numerical modeling in flow and water quality. *Environmental Modeling and Assessment*, 9(3), 169-178.
19. Chau, K. (2006). A review on integration of artificial intelligence into water quality modelling. *Marine pollution bulletin*, 52(7), 726-733.
20. Chau, K., & Albermani, F. (2002). Expert system application on preliminary design of water retaining structures. *Expert Systems with Applications*, 22(2), 169-178.
21. Chau, K., & Albermani, F. (2003). Knowledge-based system on optimum design of liquid retaining structures with genetic algorithms. *Journal of Structural Engineering*, 129(10), 1312-1321.
22. Chau, K., & Chen, W. (2001). An example of expert system on numerical modelling system in coastal processes. *Advances in Engineering Software*, 32(9), 695-703.
23. Choukér. (1971). *Methodische and theorestische Untersuchungen for geophysikalischen Grundwasser Erkundung.*
24. Chukwudi, C. (2011). Geoelectrical studies for estimating aquifer hydraulic properties in Enugu State, Nigeria. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(14), 11.
25. Clavier, C., Coates, G., & Dumanoir, J. (1984). Theoretical and experimental bases for the dual-water model for interpretation of shaly sands. *Old SPE Journal*, 24(2), 153-168.
26. Commerce, W. S. D. o. (2003). *Critical Areas Assistance Handbook: Protecting Critical Areas Within the Framework of the Washington Growth Management Act.* from <http://www.commerce.wa.gov/Services/localgovernment/GrowthManagement/Pages/GMSPublications.aspx>
27. Commerce, W. S. D. o. (2003). *GMA Update: Issues to Consider When Reviewing and Evaluating Critical Areas Regulations and Natural Resource Lands Designations.* from

<http://www.commerce.wa.gov/Services/localgovernment/GrowthManagement/Pages/GMSPublications.aspx>

28. County, K. (2011). Groundwater-related maps. from <http://www.kingcounty.gov/environment/waterandland/groundwater/maps-reports/maps.aspx>
29. Crosbie, R. S., Binning, P., & Kalma, J. D. (2005). A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resources Research*, 41(1).
30. Danielsen, J. E., Auken, E., Jørgensen, F., Søndergaard, V., & Sørensen, K. I. (2003). The application of the transient electromagnetic method in hydrogeophysical surveys. *Journal of Applied Geophysics*, 53(4), 181-198.
31. Danielsen, J. E., Dahlin, T., Owen, R., Mangeya, P., & Auken, E. (2007). Geophysical and hydrogeologic investigation of groundwater in the Karoo stratigraphic sequence at Sawmills in northern Matabeleland, Zimbabwe: a case history. *Hydrogeology Journal*, 15(5), 945-960.
32. De Lima, O., & Niwas, S. (2000). Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements. *Journal of Hydrology*, 235(1), 12-26.
33. De Vries, J. J., & Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 5-17.
34. Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1990). *Physical and chemical hydrogeology* (Vol. 824): Wiley New York.
35. Giarratano, J. C. (1993). *CLIPS User's Guide*. NASA, Lyndon B. Johnson Space Center. Information Systems Directorate, Software Technology Branch, Houston, TX.
36. Gorelick, S. M. (1983). A review of distributed parameter groundwater management modeling methods. *Water Resources Research*, 19(2), 305-319.
37. Griffiths, D., & Barker, R. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29(3), 211-226.
38. Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). *MODFLOW-2000, the US Geological Survey modular ground-water model: User guide to modularization concepts and the ground-water flow process*: US Department of the Interior, US Geological Survey.
39. Harvey, R., & Linquiti, P. (1989). *Wellhead protection programs: tools for local governments*.

40. Hasan, S., & Troch, P. A. (2006). Modeling the Hydrological Effect on Local Gravity at Moxa, Germany. *Journal of Hydrometeorology*, 7(3), 346-354.
41. Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91-109.
42. Heppner, C. S., & Nimmo, J. R. (2005). A computer program for predicting recharge with a master recession curve: US Geological Survey.
43. Hickin, A. S., Kerr, B., Barchyn, T. E., & Paulen, R. C. (2009). Using ground-penetrating radar and capacitively coupled resistivity to investigate 3-D fluvial architecture and grain-size distribution of a gravel floodplain in northeast British Columbia, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 79(6), 457-477.
44. Hill, M. C. (1992). A Computer Program(MODFLOWP) for Estimating Parameters of a Transient, Three-dimensional, Ground-water Flow Model Using Nonlinear Regression. Available from Books and Open Files Reports Section, USGS Box 25425, Denver, CO 80225. USGS Open File Report 91-484, 1992. 358 p, 17 fig, 3 tab, 80 ref, 3 append.
45. Howle, J. F., Phillips, S. P., Denlinger, R. P., & Metzger, L. F. (2003). Determination of specific yield and water-table changes using temporal microgravity surveys collected during the second injection, storage, and recovery test at Lancaster, Antelope Valley, California, November 1996 through April 1997: US Department of the Interior, US Geological Survey.
46. Hubbard, S. S., & Rubin, Y. (2000). Hydrogeological parameter estimation using geophysical data: a review of selected techniques. *Journal of Contaminant Hydrology*, 45(1), 3-34.
47. Hwang, C., Kao, R., Cheng, C.-C., Huang, J.-F., Lee, C.-W., & Sato, T. (2009). Results from parallel observations of superconducting and absolute gravimeters and GPS at the Hsinchu station of Global Geodynamics Project, Taiwan. *Journal of geophysical research*, 114(B7), B07406.
48. Issaquah, C. o. (2009). Doing business in a wellhead protection area. from <http://www.ci.issaquah.wa.us>
49. Jie, Z., van Heyden, J., Bendel, D., & Barthel, R. (2011). Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge calculations. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1487-1502.
50. Job, C. A. (1996). Benefits and costs of wellhead protection. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 16(2), 65-68.
51. Kendall, M. (1975). *Rank Correlation Methods*: Charles Griffin. London, UK.

52. Ketchum, N. J., Donovan, J. J., & Avery, W. H. (2000). Recharge characteristics of a phreatic aquifer as determined by storage accumulation. *Hydrogeology Journal*, 8(6), 579-593.
53. Khalil, M. A., Abbas, A. M., Santos, F. M., Masoud, U., & Salah, H. (2012). Application of VES and TDEM techniques to investigate sea water intrusion in Sidi Abdel Rahman area, northwestern coast of Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 1-9.
54. Kim, S. M., Benham, B. L., Brannan, K. M., Zeckoski, R. W., & Doherty, J. (2007). Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods. *Water resources research*, 43(1), W01402.
55. Kumar, B. P., & Sharma, R. S. (2004). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(7), 764-767.
56. Lee, M. W., & Collett, T. S. (2006). A Method of Shaly Sand Correction for Estimating Gas Hydrate Saturations Using Downhole Electrical Resistivity Log Data.
57. Leiriao, S., He, X., Christiansen, L., Andersen, O. B., & Bauer-Gottwein, P. (2009). Calculation of the temporal gravity variation from spatially variable water storage change in soils and aquifers. *Journal of Hydrology*, 365(3), 302-309.
58. Liu, C. (1995). The Ilan plain and the southwestward extending Okinawa Trough. *J. Geol. Soc. China*, 38(3), 183-193.
59. Loke, M. (2000). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.
60. Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 235(3), 276-288.
61. Madsen, H. (2003). Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in water resources*, 26(2), 205-216.
62. Madsen, H., Wilson, G., & Ammentorp, H. C. (2002). Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 261(1), 48-59.
63. Matsumoto, K., Takanezawa, T., and Ooe, M. (2000) Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*, 56: 567-581.

64. Mazi, K., Koussis, A., Restrepo, P., & Koutsoyiannis, D. (2004). A groundwater-based, objective-heuristic parameter optimisation method for a precipitation-runoff model and its application to a semi-arid basin. *Journal of Hydrology*, 290(3), 243-258.
65. Meads, L. N., Bentley, L. R., & Mendoza, C. A. (2003). Application of electrical resistivity imaging to the development of a geologic model for a proposed Edmonton landfill site. *Canadian Geotechnical Journal* 40(3), 551-558.
66. Mele, M., Bersezio, R., & Giudici, M. (2012). Hydrogeophysical imaging of alluvial aquifers: electrostratigraphic units in the quaternary Po alluvial plain (Italy). *International Journal of Earth Sciences*, 1-21.
67. Mele, M., Bersezio, R., Giudici, M., Rusnighi, Y., & Lupis, D. (2010). The architecture of alluvial aquifers: an integrated geological-geophysical methodology for multiscale characterization. Paper presented at the Proceedings of the Second National Workshop “Multidisciplinary approach for porous aquifer characterization”. *Mem Descr Carta Geol d'It XC*.
68. Mendoza, G. F., Steenhuis, T. S., Walter, M. T., & Parlange, J. (2003). Estimating basin-wide hydraulic parameters of a semi-arid mountainous watershed by recession-flow analysis. *Journal of Hydrology*, 279(1), 57-69.
69. Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoullaud, B., King, D., & Tabbagh, A. (2003). Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 39(5), 1138.
70. Micro-g LaCoste (2012) g9 User's Manual, Colorado: Micro-g LaCoste, Inc.
71. Moon, S.-K., Woo, N. C., & Lee, K. S. (2004). Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 292(1), 198-209.
72. Morgan, L. (2005). *Critical Aquifer Recharge Areas: Guidance Document*: Washington State Department of Ecology.
73. Niwas, S., Tezkan, B., & Israil, M. (2011). Aquifer hydraulic conductivity estimation from surface geoelectrical measurements for Krauthausen test site, Germany. *Hydrogeology Journal*, 19(2), 307-315.
74. Ortega, A., Benito-Calvo, A., Porres, J., Pérez-González, A., & Martín Merino, M. (2010). Applying electrical resistivity tomography to the identification of endokarstic geometries in the Pleistocene Sites of the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Archaeological Prospection*, 17(4), 233-245.
75. Park, S. K., & Dickey, S. K. (1989). Accurate estimation of conductivity of

water from geoelectrical measurements—A new way to correct for clay. *Ground Water*, 27(6), 786-792.

76. Poeter, E. P., & Hill, M. C. (1999). UCODE, a computer code for universal inverse modeling. *Computers & Geosciences*, 25(4), 457-462.
77. Pool, D. (2008). The utility of gravity and water-level monitoring at alluvial aquifer wells in southern Arizona. *GEOPHYSICS*, 73(6), wa49-wa59.
78. Pool, D. R., & Eychaner, J. H. (1995). Measurements of Aquifer-Storage Change and Specific Yield Using Gravity Surveys. *Groundwater*, 33(3), 425-432.
79. Purvance, D. T., & Andricevic, R. (2000). On the electrical-hydraulic conductivity correlation in aquifers. *Water Resources Research*, 36(10), 2905-2913.
80. Randall, D., Cleland, L., Kuehne, C. S., George, W., & Sheer, D. P. (1997). Water supply planning simulation model using mixed-integer linear programming “Engine”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2), 116-124.
81. Rayner, S. F., Bentley, L. R., & Allen, D. M. (2007). Constraining aquifer architecture with electrical resistivity imaging in a fractured hydrogeological setting. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 12(4), 323-335.
82. Resources, G. D. o. N. (2011). Comprehensive State-wide Water Management Plan. from <http://www.gadnr.org/>
83. Rodell, M., Chen, J., Kato, H., Famiglietti, J. S., Nigro, J., & Wilson, C. R. (2007). Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal*, 15(1), pp 159-166.
84. Rodell, M., & Famiglietti, J. S. (2002). The potential for satellite-based monitoring of groundwater storage changes using GRACE: the High Plains aquifer, Central US. *Journal of Hydrology*, 263(1-4), Page 245-256.
85. Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18-39.
86. Scanlon, B. R., Mace, R. E., Barrett, M. E., & Smith, B. (2003). Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *Journal of Hydrology*, 276(1), 137-158.
87. SCHWARTZ, F. W., & ZHANG, H. (2003). *Fundamentals of Ground Water*.
88. Sen, P. N., Goode, P. A., & Sibbit, A. (1988). Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities. *Journal of Applied Physics*, 63(10),

4832-4840.

89. Sibuet, J.-C., Deffontaines, B., Hsu, S.-K., & Thureau, N. (1998). Okinawa trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), 30245-30267.
90. Sikandar, P., & Christen, E. (2012). Geoelectrical Sounding for the Estimation of Hydraulic Conductivity of Alluvial Aquifers. *Water resources management*, 26(5), 1201-1215.
91. Simandoux. (1963). Dielectric measurements in porous media and application to shaly formation. 18(Supplementary Issue), 22.
92. Singh, B. N., Singh, R. B., & Singh, J. (2005). Effects of ionization and penetration enhancers on the transdermal delivery of 5-fluorouracil through excised human stratum corneum. *International journal of pharmaceutics*, 298(1), 98-107.
93. Solomatine, D., Dibike, Y., & Kukuric, N. (1999). Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques. *Hydrological sciences journal*, 44(6), 879-894.
94. Sophocleous, M. A. (1991). Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: practical aspects. *Journal of Hydrology*, 124(3), 229-241.
95. Soupios, P. M., Kouli, M., Vallianatos, F., Vafidis, A., & Stavroulakis, G. (2007). Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: A case study of Keritis Basin in Chania (Crete–Greece). *Journal of Hydrology*, 338(1), 122-131.
96. Sun, N. Z., & Yeh, W. W. G. (1985). Identification of parameter structure in groundwater inverse problem. *Water Resources Research*, 21(6), 869-883.
97. Sun, N. Z., & Yeh, W. W. G. (1990). Coupled inverse problems in groundwater modeling. 1. Sensitivity analysis and parameter identification. *Water Resour. Res.*, 26(10), 2507-2525.
98. Taheri Tizro, A., Voudouris, K., & Basami, Y. (2012). Estimation of porosity and specific yield by application of geoelectrical method—A case study in western Iran. *Journal of Hydrology*.
99. Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., & Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31(9).
100. Taylor, A., Martin, N., Everard, E., & Kelly, T. (2012). Modelling the Vale of St Albans: parameter estimation and dual storage. Geological Society, London,

- Special Publications, 364(1), 193-204.
101. Urish, D. W. (1981). Electrical resistivity—hydraulic conductivity relationships in glacial outwash aquifers. *Water Resources Research*, 17(5), 1401-1408.
 102. USEPA. (1989). *Wellhead Protection Programs: Tools for Local Governments*. U.S. EPA, 440(6-89-002).
 103. USEPA. (1995). *Benefits and Costs of Prevention: Case Studies of Community Wellhead Protection*. U.S. EPA(813-B-95-005), 74.
 104. Vinegar, H., & Waxman, M. (1984). Induced polarization of shaly sands. *GEOPHYSICS*, 49(8), 1267-1287.
 105. Wahr, J., Swenson, S., Zlotnicki, V., & Velicogna, I. (2004). Time-variable gravity from GRACE: First results. *Geophysical Research Letters*, 31(11).
 106. Watkins, D. W., & McKinney, D. C. (1998). Decomposition methods for water resources optimization models with fixed costs. *Advances in Water Resources*, 21(4), 283-295.
 107. Waxman, M., & Smits, L. (1968). 1863-A-Electrical Conductivities in Oil-Bearing Shaly Sands. *Old SPE Journal*, 8(2), 107-122.
 108. Wenzel, H. G. (1996) The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30, *Marees Terrestres Bulletin d'Informations*, 124: 9425-9439.
 109. Worthington, P. F. (1993). The uses and abuses of the Archie equations, 1: The formation factor-porosity relationship. *Journal of applied geophysics*, 30(3), 215-228.
 110. Yapo, P. O., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204(1), 83-97.
 111. Zarroca, M., Bach, J., Linares, R., & Pellicer, X. M. (2011). Electrical methods (VES and ERT) for identifying, mapping and monitoring different saline domains in a coastal plain region (Alt Empordà, Northern Spain). *Journal of Hydrology*, 409(1), 407-422.
 112. Zecharias, Y. B., & Brutsaert, W. (1988). Recession characteristics of groundwater outflow and base flow from mountainous watersheds. *Water Resour. Res*, 24(10), 1651-1658.
 113. 工研院. (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. 台北, 台灣.
 114. 中央地質調查所. (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 Taipei, Taiwan: 經濟部中央地質調查所
 115. 王雲直. (2010). 應用專家系統於地下水模式參數檢定之研究—以濁水溪沖積扇為例. (碩士論文), 國立交通大學.

116. 皮先璋. (2000). 應用直流電阻法研究台灣西南海岸平原晚更新世與全新世地層界限. (碩士論文), 國立中央大學.
117. 行政院環保署. (2013). 全國環境水質監測資訊網. from <http://wq.epa.gov.tw/WQEPA/Code/?Languages=>
118. 江崇榮, & 陳瑞娥. (2008). 濁水溪沖積扇地下水水源保護區劃定之芻議.
119. 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, 61-90.
120. 江崇榮, 黃智昭, 陳瑞娥, & 費立沅. (2004). 屏東平原地下水補注量及抽水量評估. 經濟部中央地質調查所彙刊第十七號, 21-51.
121. 江崇榮, 黃智昭, 陳瑞娥, & 賴慈華. (2005). 濁水溪沖積扇地下水區之補注區與補注源探討. 經濟部中央地質調查所彙刊第十八號, 1-28.
122. 吳尹聿. (2012). 雲林地區濁水溪沖積扇地下水補注地質敏感區地電阻勘查. (碩士論文), 國立臺灣海洋大學, 基隆市. Retrieved from <http://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/g32/gswweb.cgi?o=dnclcdr&s=id=%22100NTOU5135007%22.&searchmode=basic>
123. 林正浩. (2011). 地下水溶解氣體地揮發機制之研究—安通溫泉地下水水氣及其他溶解氣體(甲烷、乙烷及三氯氟甲烷)濃度的同步變化. (碩士論文), 國立成功大學, 台南市. Retrieved from <http://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/g32/gswweb.cgi?o=dnclcdr&s=id=%22100NCKU5397002%22.&searchmode=basic>
124. 林朝榮. (1957). 台灣地形, 台灣省文獻委員會, 共 424 頁.
125. 邱詠恬. (2008). 利用 GPS 觀測資料探討宜蘭平原之現今地殼變形. 臺灣大學地質科學研究所學位論文(2008 年).
126. 姚又瑜. (2013). 應用重力模擬與地下水數值模式於流出量推估—以濁水溪沖積扇為例. (碩士論文), 國立交通大學.
127. 姚奕全. (2007). 應用地電阻法於崩積層含水特性調查與監測之初探. (碩士論文), 國立交通大學.
128. 徐年盛. (1995). 區域性地表水與地下水最佳聯合營運模式之研究. 台北: 國家科學委員會.
129. 徐年盛. (2011). 臺灣西部河川河槽作為地下水補注區可行性分析: 經濟部水利署.
130. 能邦科技顧問股份有限公司. (2000). 台灣地區地下水補注量估算: 經濟部水資源局.
131. 財團法人工業技術研究院. (2012). 101 年度重力基準維護及測量整合服務工作.
132. 康竹君, 張翠玉, & 李建成. (2008). 南沖繩海槽之最西端及梨山斷層最北

- 端：蘭陽平原的構造活動特性。中華民國地質學會會刊 (Western Pacific Earth Sciences), Vol. 8, 第 17-42 頁。
133. 張弼舜. (2011). 應用專家系統於穩健型地下水參數檢定模式之發展. (碩士論文), 國立交通大學.
 134. 張瑞津, 石再添, 楊淑君, 林譽方, 陳翰霖, & 董德輝. (1995). 高屏溪谷與潮州斷崖沖積扇的地形學研究.
 135. 陳文山, 鄂忠信, 陳勉銘, 楊志成, 張益生, 劉聰桂, ... 吳榮章. (2000). 上更新世台灣西部前陸盆地的演化-沈積層序與沈積物組成的研究.
 136. 陳文山, 楊志成, 吳樂群, 楊小青, 陳勇全, 顏一勤, ... 張徽正. (2004). 沉降環境的山麓河谷地形特性—探討臺北盆地, 蘭陽平原與屏東平原鄰近山麓地形與構造的關係: 經濟部中央地質調查所彙刊.
 137. 陳泓幃. (2009). 利用二維地電阻探測方法調查彰化地區濁水溪沖積扇頂地下水補注區邊界之研究. (碩士論文), 國立臺灣海洋大學.
 138. 陳偉圻. (2008). 應用專家系統於地下水模式自動化參數檢定之研究. (碩士論文), 國立交通大學.
 139. 曾憲雄. (2005). 人工智慧與專家系統: 理論、實務、應用.
 140. 游竣一. (2003). 應用直流電阻法與人控音頻大地電磁波法研究台灣西南海岸平原環境變遷. (博士論文), 國立中央大學, 中壢.
 141. 程自強. (2012). 臺灣地區重力變化: 觀測及分析. (博士論文), 國立交通大學. Retrieved from <http://thesis.lib.nccu.edu.tw/record/#GT079216817%22>.
 142. 黃亦青. (2008). 應用三維地電阻方法評估污染物的傳輸及分佈之可行性先導研究. (碩士論文), 嘉南藥理科技大學.
 143. 楊朝仲. (2002). 應用遺傳演算法與可微分動態規畫於地表地下聯合營運之多目標規劃. (博士論文), 國立交通大學, 新竹.
 144. 楊潔豪, 陳平護, & 陳洲生. (1991). 蘭陽地區地球物理測勘報告. 台北縣: 中央地質調查所.
 145. 經濟部中央地質調查所. (1999). 臺灣地區地下水觀測網第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告: 經濟部中央地質調查所.
 146. 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: 經濟部中央地質調查所.
 147. 經濟部中央地質調查所. (2012). 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.
 148. 經濟部水資源局, & 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: 經濟部中央地質調查所.
 149. 董倫道, 楊潔豪, & 陳平護. (1995). 水文地質調查研究及建檔-八十四年度報告-地球物理探測及地層對比之應用 (經濟部中央地質調查所, Trans.) 台

灣地區地下水觀測網第一期計畫：經濟部中央地質調查所。

150. 廖玲婉, 洪銘堅, 王逸民, 徐年盛, 游雅淳, & 劉宏仁. (2012). 以頻譜分析法評量地下水位時空變動. 工程環境會刊, 28, 1-18.
151. 臺灣省水利局, 經濟部中央地質調查所, & 經濟部水利司. (1995). 濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告: 經濟部中央地質調查所.
152. 劉威行. (2007). 地電阻法應用於淺層地下水偵測: 嘉義汴頭地區. (碩士論文), 國立中正大學.
153. 鄭屹君. (2010). 蘭陽平原古沉積環境分析. (碩士論文), 國立臺灣海洋大學.
154. 謝孟龍. (2006). 台灣山脈晚冰期及後冰期侵蝕速率是否不同—曾文溪及蘭陽溪平原岩芯紀錄的檢視. 第十一屆「台灣之第四紀」研討會論文集, 53-57.
155. 顏榮祥, 周乃昉, & 陳家榮. (1998). 南部區域水資源管理調配策略之比較. Paper presented at the 第九屆水利工程研討會, 桃園.
156. 蘇品如, 紀宗吉, 曾俊傑, & 黃國榕. (2009). 宜蘭蘭陽溪下游井下岩芯沉積環境分析. 共 75 頁.
157. 蘇洵韻. (2010). 利用超導重力儀訊號偵測地震造成的永久性重力變化. (碩士論文), 國立交通大學.