

台灣地區地下水觀測網水質指標井
之選定方法評估

Investigation on Methods to Establish of Ground Water Quality
Index Wells for Ground Water Monitoring Network in Taiwan



主辦機關：經濟部水利署

執行單位：國立交通大學

承辦單位：國立交通大學防災工程研究中心

中華民國九十一年十二月

計畫研究人員

主持人：單信瑜¹

協同主持人：張良正²

顧問：林裕彬³

研究人員：葉明生⁴、許文洪⁵、龍元祥⁵

1：國立交通大學土木工程研究所副教授

2：國立交通大學土木工程研究所教授

3：中國文化大學景觀系副教授

4：國立交通大學土木工程研究所博士班生

5：國立交通大學土木工程研究所碩士班生

台灣地區地下水觀測網水質指標井之選定方法評估

摘要

目前由於「台灣地區地下水觀測網整體計畫」的執行，已獲得豐碩的成果，基於水資源管理中之水質與水量並重精神的考量，每年使用在台灣地區地下水檢測分析上的經費均相當可觀，經濟部水利署基於成本與效率之考量，針對現有觀測井規劃具有代表性（同時考量水文地質和地下水水質條件）之定期地下水水質檢測方式，以期掌握區域地下水水質變化之同時，降低檢測作業所需成本，以期利用最少之經費發揮站網之最大效益。

本計畫主要工作項目包括：資料蒐集分析；運用不同地理統計方法，選出最能確實反映該區水質特性之最佳方法；透過不同之統計方式，嘗試在可接受的水質精度範圍內，提出可減少監測數量或監測頻率之可行方案及模擬驗證工作。

以下即就各章之內容概要作一簡要說明：

第一章 前言

本計畫針對觀測井指標井的建立進行資料收集，且進行指標井建立評估技術的發展，主要希望對觀測井指標井建立方法進行分析確認，並進而發展具代表性指標井建立評估方法，以期利用最少的經費創造最大的效益。

第二章 計畫背景研究

就與本計畫有關之研究計畫成果介紹，先前相關研究計畫大致可區分為三類進行說明：

- 一、「台灣地區地下水觀測網整體計畫」成果
- 二、各水區之地下水觀測網評估相關研究計畫
- 三、地下水觀測網之地下水質相關研究計畫
- 四、指標井之相關研究計畫

本計畫所選定之水質指標井必須能及時反應整體區域之水質狀況，以作為地下水管理及使用依據，惟為能選定「最佳」之水質指標井須先探討相關之課題。主要乃是本計畫中水質指標井之功能，並不以污染預警為主要目的，而是要了解大區域當下之水質狀況及水質之長期變化，以作為水量利用管理之參考資訊。

第三章 工作方法及步驟

本計畫針對觀測井指標井的建立進行資料收集，且進行指標井建立評估技術的發展，主要希望對觀測井指標井建立方法進行分析確認，並進而發展具代表性指標井建立評估方法，其整體研究流程：

- 一、基本資料收集
- 二、指標井相關資料收集
- 三、關鍵課題探討
- 四、指標井選定方法評估
- 五、可行方案評估
- 六、模擬驗證

第四章 水質指標井相關資料蒐集分析

關於國外之相關站網案例之分析，區分為地下水位站網、地下水質站網及其它站網(空氣站網)等案例進行說明。

國內相關案例方面，有曾以多變量統計區分屏東平原地下水含水層水質特性與評估井體之維護探討(王瑞君，民國八十七年)，藉之判斷影響屏東平原地下水水質的主要因素。在國內案例方面，水資局主辦之台灣地區地下水觀測網水質調查分析及指標井選定研究(水資局，民國八十八年)提出的規劃，則兼具高污染潛勢區的水質污染預警目的。因此，對於含水層二以下，主要以地質統計為指標井篩選依據，對於含水層一，則以 DRASTIC 污染潛勢作為選定指標井的依據。並將監測井分級以區分各井所需要進行監測的水質項目。

並就上述國內外之各案例，就運用方法、監測網密度、頻率、項目等進行比較。

第五章 水質指標井選定方法評估

對單變數地質統計配合降低變異數法、多變量地質統計及卡門濾波理論等三種方法應用於站網設計之優點及限制進行評估，並就那一方法較適用於本計畫之目的與可行性作一說明。

(一)、於本計畫水質選定指標井目的之適用性

能同時考量較多水質項目，以進行水質指標井分析應是較佳之選擇，故於考量本計畫之目的，多變量地質統計方法應是較適用。

(二)、可行性

多變量地質統計方法理論方法明確，所需之工具大致已完備，因此，多變量地質統計方法應可應用於實際案例。

第六章 多變量地質統計應用於屏東平原水質指標井之選定

本計畫選定以多變量地質統計方法來作為指標井選定方法，並以屏東平原作為實際應用之探討。並就屏東平原含水層二及含水層一於各步驟之於實際應用結果作一說明。

屏東平原含水層二由 34 口中選定 20 口作為之水質指標井，含水層一由 41 口中選定 16 口作為之水質指標井。套疊含水層一與含水層二分別所選定之水質指標井位，含水層一與含水層二分別所選定之水質指標井有 6 站共站，亦即在只考量含水層一及含水層二之情況下，於含水層一及水層二之水質指標井共為 30 站，含水層一水質指標井為 16 口，含水層二口水質指標井為 20 口。

在水質指標井水質監測項目方面，應以延續目前監測項目為原則，以便日後持續對屏東平原的地下水水質進行長期的分析。另外在水質指標井水質監測項目之頻率，建議以每年為一次為原則。惟若只在所選定之水質指標井進行監測，將會缺乏所有觀測井在同一時刻之水質資料，而無法提供作為後續水質指標井網檢討之足夠資訊。因此，建議於每 3~5 年可再對每口觀測井皆進行目前水質項目採樣分析，以作為水質指標井網檢討之參考資訊。

Investigation on Methods to Establish of Ground Water Quality Index Wells for Ground Water Monitoring Network in Taiwan

Abstract

The current ground water monitoring network established and operated by the Water Resources Agency has successfully provided valuable information on the major aquifers of Taiwan. However, the cost to maintain the extensive monitoring of both the ground water levels and ground water quality is very high. As a result, the Water Resources Agency needs to develop a cost-effective ground water quality monitoring program that incorporates sampling from only a fraction of the existing monitoring wells. The intended monitoring program should produce information representative (in terms of hydro-geological and water quality) of the ambient water quality of the major aquifers with reduced cost.

The scope of the project includes information gathering, geostatistical analysis, and assessment various index well selection methods. The objective of the project is to assess the methods to develop and verify index monitoring well arrays which will yield water quality information of acceptable accuracy.

The results of this study showed that the multivariate geostatistics method is the most appropriate approach for selecting index monitoring wells. This study implemented the multivariate geostatistics method to develop and verify index monitoring well network in Pingtung Plain. Based on the results of this study, 20 out of a total 34 groundwater level monitoring wells in the second aquifer and 16 out of a total 41 groundwater level monitoring wells in the top aquifer were suggested to be designated as the index monitoring wells.

台灣地區地下水觀測網水質指標井之選定方法

評估

期末報告

目錄

摘要

目錄	I
表目錄	III
圖目錄	IV
第一章 前言	1-1
1.1 計畫緣起.....	1-1
1.2 計畫目的.....	1-2
1.3 工作項目及預期成果	1-3
第二章 計畫背景說明	2-1
2.1 先前相關計畫研究成果回顧	2-1
2.2 關鍵課題探討	2-63
第三章 工作方法及步驟.....	3-1
第四章 指標井相關資料收集	4-1
4.1 國外既有相關案例蒐集	4-1
4.2 國內指標井相關研究資料蒐集	4-56
4.3 各案例分析方法比較與結論	4-60
第五章 水質指標井選定方法評估	5-1
5.1 單變數地質統計配合降低變異數法於站網設計	5-1

5.2 多變量地質統計	5-14
5.3 卡門濾波理論應用於站網設計	5-28
5.4 水質指標井選定方法評估比較	5-46
第六章 多變量地質統計應用於屏東平原水質指標井之選定	6-1
6.1 屏東平原背景介紹	6-1
6.2 屏東平原水質指標井選定分析	6-12
6.3 屏東平原水質指標井方案評估驗證	6-48
第七章 結論與建議	7-1
7.1 結論.....	7-1
7.2 建議.....	7-2
參考文獻	8-1

附錄一、期中審查意見處理情形

附錄二、屏東平原地下水質常態化後變異元分析結果

附錄三、期末審查意見處理情形

表目錄

表 2.1-1	D 值之範圍及分數等級.....	2-32
表 2.1-2	R 值之範圍及分數等級.....	2-32
表 2.1-3	A 值之範圍及分數等級.....	2-33
表 2.1-4	S 值之範圍及分數等級.....	2-34
表 2.1-5	T 值之範圍及分數等級.....	2-34
表 2.1-6	I 值之範圍及分數等級.....	2-35
表 2.1-7	C 值之範圍及分數等級.....	2-35
表 2.1-8	常用水文地質參數之權重.....	2-36
表 2.1-9	濁水溪沖積扇及屏東平原地區含水層介質(A)評分表.....	2-37
表 2.1-10	濁水溪沖積扇及屏東平原地區土壤介質(S)評分表.....	2-37
表 2.1-11	濁水溪沖積扇及屏東平原地區未飽和層影響(I)評分表.....	2-38
表 2.1-12	背景水質檢測項目一覽表.....	2-43
表 2.1-13	濁水溪沖積扇與屏東平原 DRASTIC 分數分佈表.....	2-47
表 2.1-14	濁水溪沖積扇與屏東平原 DRASTIC 分數統計摘要.....	2-48
表 2.1-15	濁水溪沖積扇與屏東平原以 DRASTIC 分數選取井位一覽 表.....	2-51
表 2.1-16	濁水溪沖積扇與屏東平原監測井水質檢測超出標準井位一 覽表.....	2-52
表 2.1-17	濁水溪沖積扇與屏東平原監測井水質檢測超出標準井位數 量統計表.....	2-53
表 2.1-18	分級分類監測簡表.....	2-59
表 2.1-19	第二級檢測之監測井與檢測分類項目一覽表.....	2-59

表 4.1-1	觀測值與主要觀測井(Principal PD Well)之推估水位比較	4-4
表 4.1-2	觀測值與主要觀測井及選定半徑內所有觀測井推估值比較	4-4
表 4.1-3	Bangkok 水位觀測井分佈圖(PD 含水層)之排序結果	4-5
表 4.1-4	各種限制(Cut off)下之觀測井網水位資訊統計	4-7
表 4.1-5	各優選井網之參數推估誤差	4-12
表 4.1-6	國家水質評估計畫(NAWQA)地下水採樣設計	4-23
表 4.1-7	國家水質評估計畫(NAWQA)三種監測標的地下水水質之主要項目	4-26
表 4.1-8	國家水質評估計畫(NAWQA)水質監測井的選擇準則	4-28
表 4.1-9	EEA 各國地下水水質監測井網資料	4-37
表 4.1-10	EEA 建議之地下水質監測井網取樣分析之水質項目	4-39
表 4.1-11	美國賓州固定地下水質監測項目	4-46
表 4.1-12	各種方法設計井網之預測推估誤差(MPV)比較	4-55
表 4.2-1	屏東平原地下水質之各因子特徵值與貢獻率	4-58
表 4.2-2	屏東平原地下水質之各變數的因子負荷量	4-58
表 5.2-1	各水質參數初始值與對數值之間的相關係數	5-17
表 5.2-2	前三項主要因子的特徵值 (Eigen values) 以及對變異性的貢獻度百分比	5-18
表 5.2-3	三種水質項目的變異元參數	5-18
表 5.4-1	各種方法比較摘要分析	5-49
表 6.2-1	屏東平原含水層二水質及常態化後之資料(34 口)	6-13
表 6.2-2	屏東平原含水層二之巢式複變異元分析結果	6-17
表 6.2-3	屏東平原含水層二共區域化矩陣	6-21
表 6.2-4	屏東平原含水層二 28.5 公里空間尺度之各因子特徵值與貢	

	獻率.....	6-21
表 6.2-5	屏東平原含水層二各變數(不同水質項目)於各因子之負荷量.....	6-22
表 6.2-6	屏東平原含水層二 28.5 公里空間尺度之各因子得點(34 口).	6-23
表 6.2-7	屏東平原含水層二 28.5 公里空間尺度之各觀測井之排序分數與排序(34 口).....	6-25
表 6.2-8	屏東平原含水層一各因子特徵值與貢獻率.....	6-37
表 6.2-9	屏東平原含水層一各變數(不同水質項目)於各因子之負荷量.....	6-38
表 6.2-10	屏東平原含水層一各觀測井於各因子得點及排序(41 口)	6-39
表 6.3-1	水質指標井建議水質檢測項目	6-50
表 6.3-2	多變量地質統計分析排序與濃度高低排序之比較.....	6-58

圖目錄

圖 2.1-1 台灣地區地下水觀測網整體計畫之直接目標、間接目標與階段性目標關係	2-3
圖 2.1-2 地下水觀測網計畫工作項目關聯圖	2-5
圖 2.1-3 在拘限含水層及自由含水層之地下水位深度	2-32
圖 2.1-4 地下水質監測架構圖	2-41
圖 2.1-5 定期檢測井選定流程	2-45
圖 2.1-6 濁水溪沖積扇與屏東平原個別 DRASTIC 分數統計分佈圖	2-49
圖 2.1-7 濁水溪沖積扇與屏東平原整體 DRASTIC 分數統計分佈圖	2-50
圖 2.1-8 定期檢測井級別改變流程圖	2-54
圖 3-1 計畫整體分析流程圖	3-3
圖 4.1-1 Bangkok 水位觀測井分佈圖(PD 含水層).....	4-3
圖 4.1-2 CV 值在不同限制(Cut off)及井數下之關係	4-8
圖 4.1-3 運用單變數之克利金方法之優選井網	4-11
圖 4.1-4 運用聯合克利金方法之優選井網	4-11
圖 4.1-5 六邊形佈井方式示意圖	4-13
圖 4.1-6 47 口觀測井所得之 Equus Beds 地下水水位	4-14
圖 4.1-7 244 口觀測井所得之 Equus Beds 含水層的地下水水位	4-15
圖 4.1-8 所選定的靠近 Williams Lake in Minnesota 的指標水位觀測井位置	4-17
圖 4.1-9 Williams Lake in Minnesota 相關圖表	4-18
圖 4.1-10 Williams Lake 區域主因子 1 與主因子 2 的因子負荷	

(component loading)相關圖	4-19
圖 4.1-11 Geostatistical Temporal/Spatial(GTS) Optimization Algorithm 分析流程.....	4-41
圖 4.1-12 監測井網優選	4-48
圖 4.1-13 隨時刻移動之優選動態站網示意圖	4-51
圖 4.1-14 Chicago Urban Area 地區既有空氣臭氧站網分佈圖	4-53
圖 4.1-15 各時刻站網優選結果	4-54
圖 5.1-1 降低變異數法於指標井站網設計之分析流程圖	5-13
圖 5.2-1 多變量地質統計理論於水質指標井選定之應用流程圖	5-22
圖 5.2-2 巢式聯合變異圖	5-23
圖 5.2-3 金塊效應	5-24
圖 5.2-4 指數模式一	5-24
圖 5.2-5 指數模式二	5-25
圖 5.3-1 卡門濾波結合地下水流數值模式之運算流程	5-38
圖 5.3-2 卡門濾波理論應用於水質指標井選定之流程	5-44
圖 6.1-1 屏東平原區域範圍及觀測站網分布圖	6-8
圖 6.1-2 屏東平原水文地質剖面圖	6-9
圖 6.1-3 屏東平原地區地下分層概念圖	6-10
圖 6.2-1 屏東平原含水層二 Fe 與 Na 之複變異元圖	6-15
圖 6.2-2 屏東平原含水層二 TDS 之變異元圖	6-16
圖 6.2-3 屏東平原含水層二所有觀測井之位置及排序(34 口)	6-27
圖 6.2-4 屏東平原含水層二所有觀測井之排序分數	6-34
圖 6.2-5 屏東平原含水層二選定之水質指標井分佈圖(20 口)	6-35
圖 6.2-6 屏東平原含水層一 Fe 與 Mn 配對複變異元圖	6-42
圖 6.2-7 屏東平原含水層一所有觀測井之位置及排序(41 口)	6-43

圖 6.2-8	屏東平原含水層一所有觀測井之排序分數.....	6-46
圖 6.2-9	屏東平原含水層一選定之水質觀測井分佈圖(16 口).....	6-47
圖 6.3-1	屏東平原選定含水層一(16 口)與含水層二(20 口)水質指標 井位置圖.....	6-49
圖 6.3-2	含水層二 89 年度 34 口水質指標井之導電度資料等值圖 (. S/cm).....	6-52
圖 6.3-3	含水層二 89 年度 20 口水質指標井之導電度資料等值圖 (. S/cm).....	6-53
圖 6.3-4	分別利用 34 口井及 20 口井資料所推估各格網點值之差值 絕對值等值圖(. S/cm).....	6-54
圖 6.3-5	89 年度排序 21~34(非水質指標井)之導電度監測值與推估誤 差關係.....	6-55
圖 6.3-6	含水層二 CV 值與井數之關係.....	6-56
圖 6.3-7	含水層二 CV 值誤差與井數之關係.....	6-56

第一章 前言

1.1 計畫緣起

行政院於民國 85 年 11 月核定經濟部辦理「台灣地區地下水觀測網整體計畫」，分 3 期 17 年（81 年度至 97 年度）在台灣地區（含澎湖本島）共 11 個地下水區建立 990 口地下水觀測井，並進行地下水相關試驗調查，收集長期、整體之水文地質、地下水水文及地下水水質資料，俾以完整資料進行地下水管理工作。該計畫正依預定進度積極的進行站網的建立，目前站網建置已於濁水溪沖積扇及屏東平原建置完成，民國 88 年及 89 年於嘉南平原建置 40 站共 105 口分層觀測井，並已獲得豐碩的成果，大量的水文、地質及地下水水質相關資料，已為將來的地下水管理奠下良好的基礎。對於目前已建置或未來即將建置的觀測網水井而言，觀測井建造只是第一階段，後續龐大的觀測井地下水水質資料取得之同時，仍須龐大的地下水採樣與檢測費用，如何建立具代表性、低成本及有效的工作效率，是令人值得關切的重點。

隨著「台灣地區地下水觀測網整體計畫」的持續執行，在台灣地區的觀測井已經累積相當龐大的井數，再者依行政院 85.11.19 台(85)經 41029 號函核定「台灣地區地下水觀測網整體計畫」指示：「經濟部選定水質指標井，監測基本水質達二十八項.....」，基於水資源管理中之水質與水量並重精神的考量，每年使用在台灣地區地下水檢測分析上的經費均相當可觀，經濟部水利署基於成本與效率之考量，因此於九十一年度辦理「台灣地區地下水觀測網水質指標井之選定方法評估」委辦計畫，針對現有觀測井規劃具有代表性（同時考量水文地質和地下水水質條件）之定期地下水水質檢測方式，以期掌握區域地

下水水質變化之同時，降低檢測作業所需成本，以期利用最少之經費發揮站網之最大效益。

1.2 計畫目的

本計畫針對觀測井指標井的建立進行資料收集，且進行指標井建立評估技術的發展，主要希望對觀測井指標井建立方法進行分析確認，並進而發展具代表性指標井建立評估方法，以期利用最少的經費創造最大的效益。主要工作項目包括：資料蒐集分析；運用不同地理統計方法，選出最能確實反映該區水質特性之最佳方法；透過不同之統計方式，嘗試在可接受的水質精度範圍內，提出可減少監測數量或監測頻率之可行方案及模擬驗證工作。

1.3 工作項目及預期成果

本計畫工作項目如下：

一、研究方法及相關資料蒐集分析

蒐集目前國內外對於地下水指標井的評估與建立程序與方法，且蒐集歷年之地下水水質，作為與後續作業結果相驗證及未來選定評估方法之依據。

二、運用地理統計（geostatistical analysis）方法，選出最能確實反映該區水質特性之最佳方法

本階段藉由利用地理統計方法，進行地下水區水質特性的前置評量作業，並配合歷年地下水水質資料進行驗證工作，以期藉由本階段作業驗證並評量出地理統計工具與地下水質間之關連性。

三、透過不同方式，提出可減少監測數量或監測頻率之可行方案將工作項目二、之地理統計指標，配合地下水用途之考量標準，提出具通性之關係，提出減少監測數量或監測頻率之可行方案，並對可行方案提出優缺點之評估結果。

四、模擬驗證

利用上述三階段作業結果，並配合歷年地下水水質資料，驗證可行方案之信賴度結果。

本計畫之預期成果如下：

- 一、完成國內外水質指標井研究方法的收集。
- 二、瞭解水文地質與背景水質間之關連性。
- 三、建立可行性水質指標井評估程序。
- 四、完成可行性水質指標井評估方案。

第二章 計畫背景研究

2.1 先前相關計畫研究成果

先就與本計畫有關之研究計畫成果介紹，先前相關研究計畫大致可區分為三類進行說明：

- 一、「台灣地區地下水觀測網整體計畫」成果
- 二、各水區之地下水觀測網評估相關研究計畫
- 三、地下水觀測網之地下水質相關研究計畫
- 四、指標井之相關研究計畫

2.1.1 「台灣地區地下水觀測網整體計畫」成果

一、計畫緣起

近年來面對國人對水資源之需求日益殷切，各種標的之用水競相開發，地面水源不敷應付，因此大量使用地下水，造成地下水超抽，衍生國土資源損害及其它社會問題，諸如地層下陷、海水入侵、水質鹽化等，顯示水、土資源保育為刻不容緩之主要課題。造成此等水、土資源損害之主要原因之一，即在於缺乏可靠之地下水及水文地質等背景資料，致經營管理及管制工作難以落實。

政府有鑑於此，乃自民國 77 年度起由行政院農委會補助台灣省水利處前身水利局辦理「改善台灣地區地下水文基本資料收集系統之規劃研究」，分四期五年完成台灣地區之地下水觀測站網規劃，並於民國 79 年 1 月 31 日將規劃結果提報行政院經建會第 536 次委員會討論，其結論為：

- 1、建立台灣地區地下水監測系統（包括水文地質、地下水水文及地下水水質）確實必要，原則同意。為求順利推動此項長期性之台灣地區地下水監測系統計畫，依水利法規定，應請中央水利主管

機關（經濟部）負責統籌辦理該監測系統之規劃、督導及經費籌措事宜。

- 2、地下水觀測站網之建立及相關資料之建檔等工作原則仍由台灣省水利局負責辦理，所需人事及業務經費，請經濟部編列預算支援。
- 3、目前屏東、嘉南、雲林、宜蘭等沿海地區超抽地下水，地盤嚴重下陷，應請台灣省政府切實責成有關縣市政府作有效之管制。

行政院於 79 年 2 月 22 日台 79 經 03432 號函核復，同意經建會第 536 次委員會之討論結論。本前身局水利司乃根據該次會議結論成立「台灣地區地下水觀測網整體計畫」，並負責統籌規劃、督導及經費籌措事宜，另由中央地質調查所、台灣省政府水利處前身水利局、台灣省環保處、工研院能資所、台糖公司地下水開發保育中心及其他有關單位配合執行。本計畫係經多次會議研商審議，彙整各單位意見後陳請行政院核定實施，並經行政院 85 年 11 月 19 日台 85 經 41029 號函核定。

二、計畫目標

本計畫之目標分為直接目標與間接目標，直接目標將分階段加以完成，間接目標則配合其他計畫之推動（如「地層下陷防治執行方案」）分年分期達成各階段性目標，各目標之關係如圖 2.3.1-1 所示。

台灣地區地下水觀測網整體計畫

計畫目標

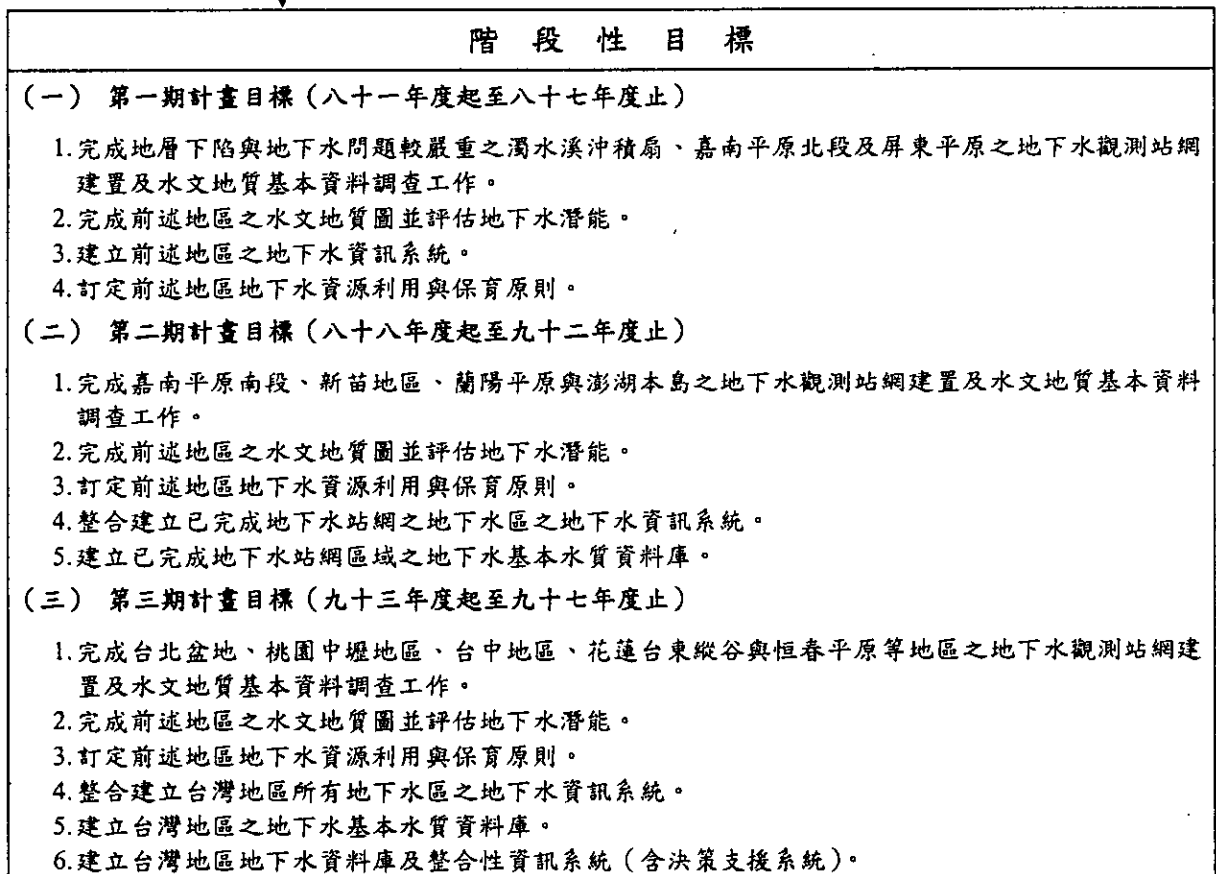
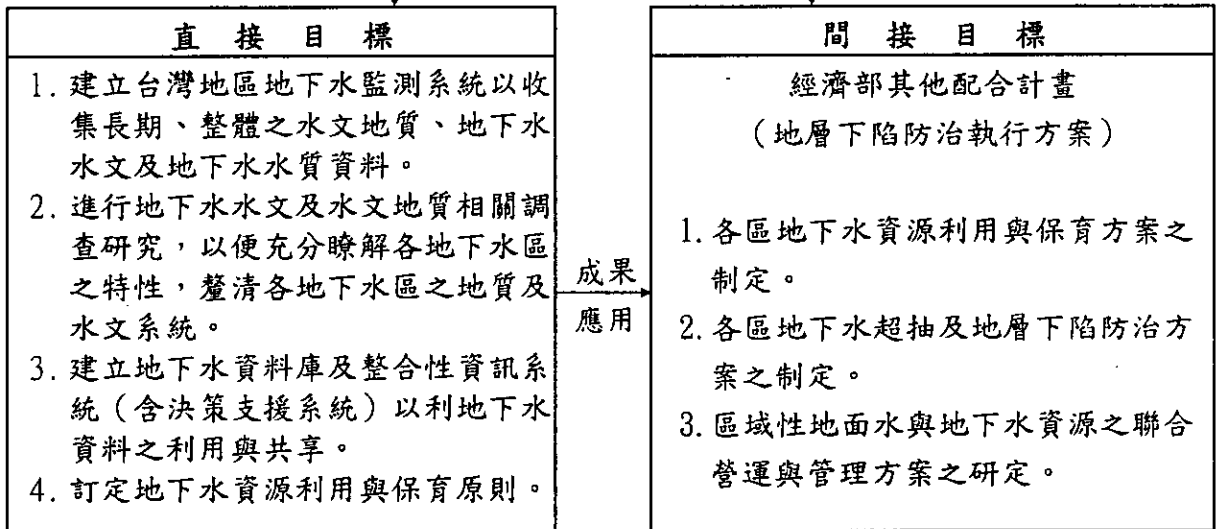


圖 2.1-1 台灣地區地下水觀測網整體計畫之直接目標、間接目標與階段性目標關係

三、計畫範圍

本計畫以台灣地區為實施範圍，涵蓋經濟部所訂之九個地下水區及恆春平原與澎湖本島，建立 517 站水文地質調查站及 990 口地下水觀測井，分三期辦理。第一期計畫自民國 81 年度至 87 年度，分 7 年完成國內目前地下水超抽較嚴重之濁水溪沖積扇、嘉南平原北段及屏東平原等地下水區。各地下水區水文地質調查站及地下水觀測井之實際建置數目，原則先依規劃之站井數完成一半後，再依據站井建置所獲得之水文地質及地下水水文資料，以地質統計及數值模擬方法，進行站井數量及密度之評估修正後，再據以完成各地下水區之站井建置，故各地下水區實際完成之站井數與原規劃之站井數將略有差異。

至民國 90 年底為止，第一期站網已完全建置完成，第二期之站網建置，亦配合已建置之嘉南平原及蘭陽平原觀測網站，進行站井佈置檢討。

四、計畫內容

第一期計畫兼具防災之考量，主要工作內容分成水文地質調查、地下水觀測站網建立及運作管理、地下水資源經理與資訊系統規劃、重要地區地下水調查與補注試驗、地層下陷監測調查（地層下陷防治執行方案之先期作業）等五大工作項目進行，各工作項目之關聯如圖 2.1-1 所示。茲將工作項目之實施要項與工作內容分述如下：

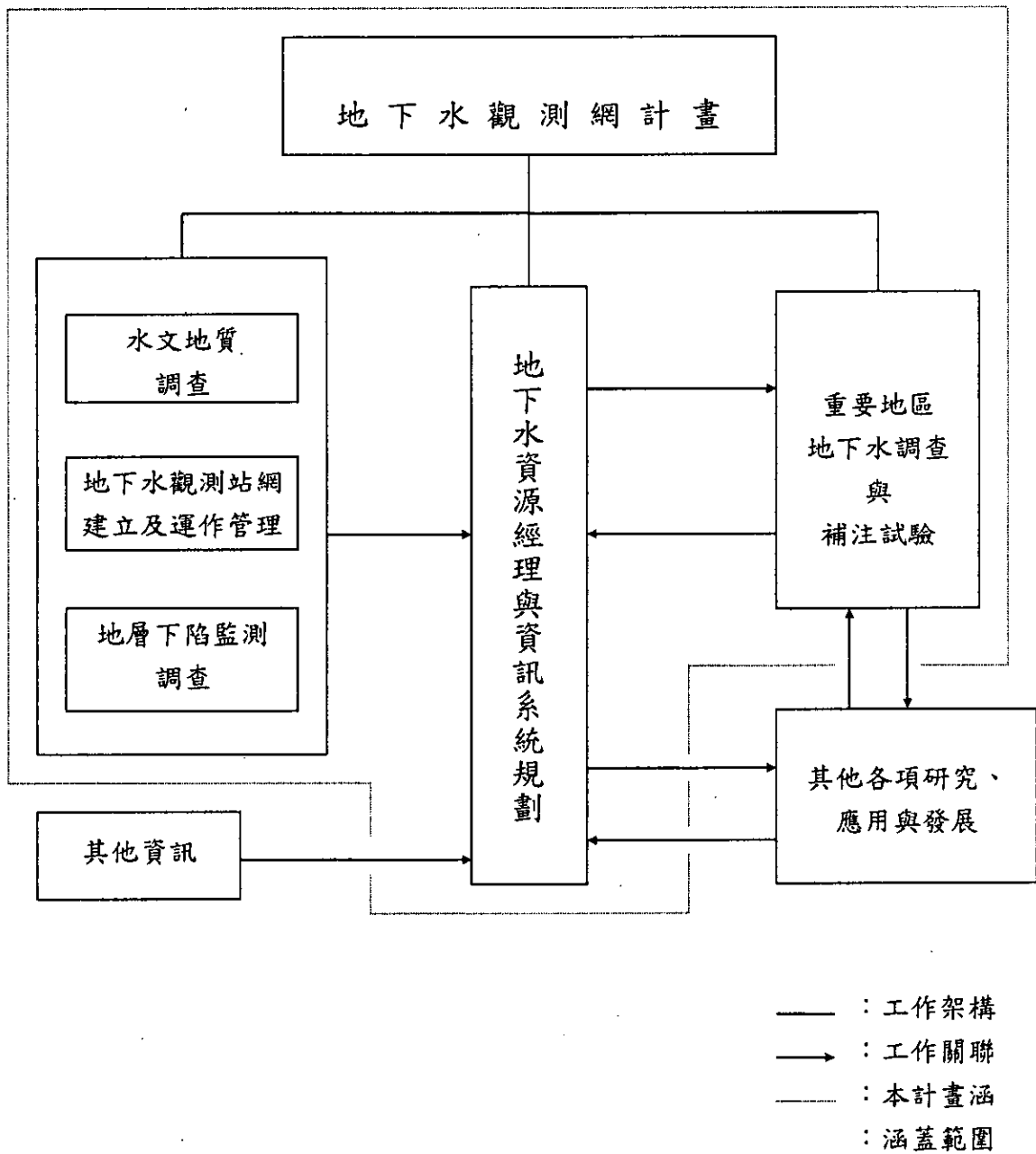


圖 2.1-2 地下水觀測網計畫工作項目關聯圖

2.1.2 各水區之地下水觀測網評估相關研究計畫

計畫名稱：區域性地下水觀測站網檢討(I) (民國八十四年度)－濁水溪
沖積扇觀測站井佈置檢討

主辦單位：經濟部水利司

承辦單位：國立交通大學土木工程研究所

一、計畫概要

為加強地下水之管理，改善台灣地區地下水文地質基本資料之質與量，農委會於民國 77 年起至民國 81 年止委託台灣省水利局及經濟部中央地質調查所辦理「改善臺灣地區地下水基本資料蒐集系統之規劃研究」完成全省地下水觀測站網全面更新之規劃，並自民國 81 年起，由經濟部水利司統籌進行「臺灣地區觀測站網之建立計畫」，由台灣省水利局及中央地質調查所分別負責其中「臺灣地區地下水觀測站網建立及運作管理」兩項子題，擬按規劃分期完成臺灣地區地下水觀測站井之建置，第一期計畫優先辦理地下水問題較嚴重之濁水溪沖積扇、屏東平原及朴子溪以北部份站井，預定於民國 87 年完成。至民國 83 年止，水利局與中央地質調查所已在濁水溪沖積扇完成 48 站地下水位觀測站的設立，並採一站多井，總共完成 138 口水位觀測井的設置，水位觀測井設置同時並鑽鑿地質鑽探井，除少數地點外，地質鑽探井皆與水位觀測站同址，總共已完成 53 站地質鑽探井的鑽鑿。水位觀測井的鑽設委由臺糖公司鑽井隊負責，每口井皆做水力試驗以求得含水層 (Aquifer) 之水文地質參數，並取水樣做水質分析，且都有岩性柱狀圖及完整的井結構報告，包括濾管及封隔位置等。地質鑽探井則由中央地質調查所委託工業技術研究所能源與資源研究所及臺糖鑿井隊施工，中央地質調查所並委託相關研究機構就鑽探所

得之岩心進行各種地質相關檢驗分析。

鑑於地下土層結構變化往往相當複雜，合理的地下水站網設置工作應該是先初步規劃，接著進行部份站井設置並收集資料，再重新檢討然後才再進行設置的一連串回饋修正的過程。因此雖然地下水觀測站網已執行過初步的規劃，由於已有更多且詳實的水文地質資料，因此有必要在此新的資料及對水文地質新的了解下，整合各單位的資料及成果，逐步重新分析尚未設立的觀測井位置及深度，並藉此建立一套詳實的站網分析技術。

二、濁水溪沖積扇站網檢討結果

由於濁水溪沖積扇在富水層（含水層）二已設置之觀測井共 44 口，扣除漢寶及線西兩個無導水係數（T 值）記錄之站之後，以其餘的 42 站加入規劃中尚未設立的 53 站（共計 95 站），執行克利金推估，則可求得其克利金變異量總合（totv）等於 123.764。以此結果與上述之降低變異數法佈井所得之結果比較，顯示出若利用該方法佈井，則只需佈至 28 口井（已設觀測站與降低變異數法建議之前 28 站之分佈見圖 4-10），其統計上所得到的區域性觀測精度，即可達到規劃中再設立 53 站之後可達到的精度範圍。意即就富水層（含水層）二而言，應用地質統計分析方式來佈井，本研究區域總共需要大約 70 口井，其區域性精度就可達到原先規劃之 95 口井所能達到的精度範圍。站井數目減少的主要原因為地質統計所得之觀測井位置較具統計上的意義，此項結果假設尚未設立的 53 站皆將於富水層（含水層）二設立觀測井。

計畫名稱：區域性地下水觀測站網檢討(II) (民國八十五年度)—濁水
溪沖積扇觀測站井佈置及觀測頻率檢討

委託單位：經濟部水利司

執行單位：國立交通大學土木工程研究所

一、計畫概要

為加強地下水之管理，改善台灣地區地下水文地質基本資料之質與量，農委會於民國 77 年起至民國 81 年止委託台灣省水利局及經濟部中央地質調查所辦理「改善臺灣地區地下水基本資料蒐集系統之規劃研究」完成全省地下水觀測站網全面更新之規劃，並自民國 81 年起，由經濟部水利司統籌進行「臺灣地區觀測站網之建立計畫」，由台灣省水利局及中央地質調查所分別負責其中「臺灣地區地下水觀測站網建立及運作管理」及「水文地質調查研究」兩項子題，擬按規劃分期完成臺灣地區地下水觀測站井之建置，第一期計畫優先辦理地下水問題較嚴重之濁水溪沖積扇、屏東平原及朴子溪以北部份站井，預定於民國 87 年完成。至民國 83 年止，水利局與中央地質調查所已在濁水溪沖積扇完成 48 站地下水位觀測站的設立，並採一站多井，總共完成 138 口水位觀測井的設置，水位觀測井設置同時並鑽鑿地質鑽探井，除少數地點外，地質鑽探井皆與水位觀測站同址，總共已完成 53 站地質鑽探井的鑽鑿。水位觀測井的鑽設委由臺糖公司鑽井隊負責，每口井皆做水力試驗以求得含水層 (Aquifer) 之水文地質參數，並取水樣做水質分析，且都有岩性柱狀圖及完整的井結構報告，包括濾管及封隔位置等。地質鑽探井則由中央地質調查所委託工業技術研究能源與資源研究所及臺糖鑿井隊施工，中央地質調查所並委託相關研究機構就鑽探所得之岩心進行各種地質相關檢驗分析。

鑑於地下土層結構變化往往相當複雜，合理的地下水站網設置工作應該是先初步規劃，接著進行部份站井設置並收集資料，再重新檢討然後才再進行設置的一連串回饋修正的過程。因此雖然地下水觀測站網已執行過初步的規劃，由於已有更多且詳實的水文地質資料，因此有必要在此新的資料及對水文地質新的了解下，整合各單位的資料及成果，逐步重新分析尚未設立的觀測井位置及深度，並藉此建立一套詳實的站網分析技術。

二、計畫成果

- 1、根據去年度（84 年度）第一期之站網檢討成果，建議濁水溪沖積扇在扇頂自名竹大橋以東至集集以西區域可能為重要補注區，亦應設立地下水觀測站，目前亦（85 年度）已在該區進行站網建置，惟該區域水文地質資料不足，故目前該區域不列入本次檢討範圍之內。
- 2、已完成整個濁水溪沖積扇地下分層架構，並將全區分為四個含水層。各層以透水係數為主及地下水位為輔進行分析，並綜合考量用地取得的難易，目前已完成濁水溪沖積扇三度空間的站網設計建議，需再增設站數約 20 站，相對於原規劃中需再增設 53 站，減少了 33 站，需增設總井數為 65 口，惟實際增設井數需依現場鑽探資料再做調整。
- 3、站網檢討所節省的人力、經費及時程如下表所示：

	建置人力 (人)	運作 管理 人力 (人/年)	建置經費 (萬元)	運作管理經 費(萬元/年)	設置時程 (年)
水文地質調查	19	—	8,316	—	1
水位觀測井 建置	7	7	15,750	1,560	1.6
合計	26	7	24,066	1,560	—

- 4、已完成濁水溪沖積扇定率及序率電腦數值模擬模式的建立，可支援將來地表地下聯合營運的需求。
- 5、經分析顯示，一般而言濁水溪沖積扇各觀測井一天之內水位變化不太大，惟若將考慮時距延長為月，則水位變化量（水位變化標準差）將大為增加，水位變化最大者為海園及嘉興 2 站。
- 6、由頻率分析顯示，濁水溪沖積扇各觀測井之觀測頻率長短不一，頻率最高者約需 44 小時觀測一次，頻率最低者亦需 390 小時觀測一次，且目前的分析，並未顯示出空間分布上的特殊結構。
- 7、由頻率分析顯示，濁水溪沖積扇各觀測井之地下水位觀測頻率分佈範圍甚廣，可從約 50 小時觀測一次至 500 小時觀測一次不等，且其中趙甲、溫厝、荊桐、後安、蔡厝等站不同深度的觀測井其觀測頻率卻有很大的差異，值得進一步的探討。
- 8、經由數種代表性水質指標之地質統計分析顯示，若將來在新增的水位觀測井增加水質取樣分析，將可大幅降低水質推估的誤差，其總變量降低率依不同指標從 17%至 37%不等。

計畫名稱：區域性地下水觀測站網檢討(III) (八十六年度)—屏東平原
觀測站網佈井及觀測頻率檢討

主辦單位：經濟部水資源局

承辦單位：國立交通大學土木工程研究所

一、計畫概要

目前地下水觀測站的第一期分區預定時程為85年度完成屏東平原規劃站井數的一半，86年度完成濁水溪沖積扇所有剩餘之觀測站井，87年度再完成屏東平原其餘站井。規劃中，屏東平原之水位觀測站與地質鑽探井各預計設立60站；目前水位觀測站已設站共有34個，地質鑽探站已設站共有33站。配合此實施時程，本研究在84年度及85年度已完成濁水溪沖積扇觀測站網的整體評估及具體建議，今年度（86年度）將應用前2年度完成的站網評估設計方法，完成屏東平原的觀測站網評估。計畫工作項目如下：

1、全程目標：

本計畫目標在配合以往及新設觀測井所產生之水文地質資料配合水文地質地下含水層分析、區域變數理論、地下水數值模擬及卡門濾波（Kalman Filter）時間序列分析等發展出較嚴謹的監測網規劃分析的方法，並對配合濁水溪沖積扇、屏東平原及後續建立站網的區域，進行站網位置、深度及觀測頻率等之檢討並作出具體的建議。

2、第一年計畫目標（84年度）：

第一年計畫目標在根據濁水溪沖積扇最新的水文地質成果建立地下水站網評估的方法，並完成濁水溪沖積扇自彰雲大橋以下之地下水模式建立及觀測站之數目、位置及深度進行初步評估與建議。

3、第二年計畫目標（85年度）：

延續第1年之成果，第2年計畫在配合站網建立時程，對整個自集集大橋以西之濁水溪沖積扇之站網作最完整的建議，包括空間分佈及觀測頻率，並建立沖積扇之水文地質架構及數值模擬模式，可為進一步推估地下水潛能及營運規劃之基礎。

4、第三年計畫目標（本年度）：

整合前兩年建立之站網評估方法，檢討評估屏東平原之地下水觀測網，對站井分佈數目及觀測頻率做具體的建議，為配合水質水位同時考量的需求，除了水位之外並增加代表性水質指標的空間分析。

二、計畫成果

1、已完成整個屏東平原地下分層架構，並將全區分為四個含水層。

各層以透水係數為主及地下水位為輔進行分析，並綜合考量用地取得及現場施工，目前已完成屏東平原三度空間的站網設計建議，需再增設站數約 17 站，相對於原規劃中需再增設 26 站，減少了 9 站，需增設總井數為 47 口，惟實際增設井數需依現場鑽探資料再做調整。

2、站網檢討所節省的人力、經費及時程如表所示：

	建置人力 (人)	運作 管理 人力 (人/年)	建置經費 (萬元)	運作管理經 費(萬元/年)	設置時程 (年)
水文地質調查	5	—	2,160	—	0.3
水位觀測井 建置	2	2	3,861	421	0.45
合計	7	2	6,021	421	—

- 3、由頻率分析顯示，屏東平原之觀測頻率分佈不一，可從 8 小時一次至 193 小時一次，其中又以 50 至 100 (小時/次) 較多，為整體觀測頻率比濁水溪沖積扇的 44 至 390 (小時/次) 大。其中林園、溪埔、清溪等站，不同深度的觀測井其觀測頻率卻有頗大差異，值得進一步探討。
- 4、崎峰觀井一、東港觀井一、二與觀井三，其導電度值皆為兩萬以上，配合碳十四定年測定水質年代以瞭解是否為海水入侵之範圍。其中崎峰觀井一與東港觀井一其導電度相當高，但經碳十四定年測定結果其年代卻很年輕，可能為海水入侵之區域範圍。而東港觀井二與觀井三導電度值高相對其碳十四定年測定亦屬於較古老年代，其是否為海水入侵之區域須針對地質待進一步加以研究分析。
- 5、本計畫之井網佈置，主要以透水係數做為評估站網精度所考慮之因子，建議含水層一，二與三之一層新增設後就水質參數於空間上的分佈而言，新增之位置並非統計上之最佳。當加設新增設井，相對各水質參數於空間上的分佈資料量亦增加，仍可大量改進推估成果之精度。

6、目前以 GMS 地下水模擬軟體與 FEMWATER 程式建立之模式已能初步反映觀測水位之變化趨勢，但其模式之精確性可經由反覆率定，更進一步的提高。

計畫名稱：嘉南平原區域性地下水觀測站井佈置檢討(民國90年度)

委辦單位：經濟部水資源局

承辦單位：國立交通大學防災工程研究中心

一、計畫概要

本計畫目標在配合嘉南平原及蘭陽平原新設觀測井所產生之水文地質資料，配合水文地質含水層分析及區域變數理論等較嚴謹的監測網規劃分析的方法，對嘉南平原、蘭陽平原及澎湖本島等地區進行地下水觀測站網站井位置、深度等之檢討並作出具體的建議。就整體水資源的觀點而言，水質與水量必須同時考量，本研究在此考慮的水質是以大區域的背景水質及其變化的情形，因此本研究將選定幾種水質的代表性指標如導電度、總溶解固體量等，以目前的水質資料為基礎，探討水質在空間上的分佈情形。

二、計畫成果

- 1、嘉南平原北段含水層一、二以區域內國小為可能設井位置之優選結果，約再增設 34 站時，即可達到原規劃之精度。
- 2、嘉南平原北段於考量觀測井之共站原則，及考量佈井效率之情況下，建議於嘉義平原北段於含水層一、二增設井數為 30 站。本計畫所建議之 30 站已有優先次序，惟於 20 站後佈井效率不高，可由後續之執行單位依經費自行調整。
- 3、嘉南平原北段配合深層抽水井（深度超過 200 公尺）分佈統計，建議港墘等 6 站做為超過 300 公尺深觀測井之增設位置。另配合地震前後地下水位變化相關研究，建議於台南白河新增一站地下水位觀測井（300M 深）。

- 4、本計畫綜合中央地調所與台糖對蘭陽平原之水文地質分析結果，初步訂定蘭陽平原水文地質架構，將蘭陽平原含水層區分為含水層一、含水層二、含水層三、及含水層四。
- 5、根據本計畫工作會議之結論，暫不建議嘉南平原南段新增站井，待後續有更確實之水文地質分析成果後，可再重新探討設井之必要性。惟本計畫仍就目前所收集之水文地質相關資料，進行嘉南平原南段之井網設計，以供後續執行單位參考。
- 6、蘭陽平原站井尚少，惟就目前資料顯示地下水之水質尚稱良好，沿海地區地下水位低於海平面有超抽地下水跡象。
- 7、蘭陽平原含水層一以區域內國小為可能設井位置之優選結果，約再增設 4~5 口時，即可達到原規劃之精度。
- 8、於考量佈井效率之情況下，建議於蘭陽平原於含水層一增設井數為 10 口。
- 9、考量共站原則及配合蘭陽平原之岩盤深度及含水層分佈狀況，建議增設之站址（共 10 站）及設井層次。
- 10、於澎湖本島對原先規劃之 14 口觀測井建議區分為第一優先及第二優先設置，第一優先包含馬公國小、山水國小、隘門國小、赤崁國小、成功國小（取代志清國小）、興仁國小、大池國小等 7 站。而第二優先包含：風櫃國小、龍門國小、湖西國小、講美國小、後寮國小、竹灣國小及內垵國小等 7 站。
- 11、澎湖地區鑽井成本較本島高很多，而且需要考慮到機具搬運的問題，建議於年度經費許可下，選擇第一優先之井位，集中於一年度中執行完畢。
- 12、由水質及水位分析結果顯示嘉南平原地下水之導電度、氯鹽及總溶解固體量等均甚高，鹽水溪以北地區 50 公尺以下之含水層水位

大都遠低於海平面，因此嘉南平原地下水之水質與水量均相當不理想，地下水管理應以保育為主。

2.1.3地下水觀測網之地下水質相關研究計畫

計畫名稱：台灣地區地下水觀測網水質調查分析及指標井選定研究
(1/3) (民國 88 年度)--子題一、台灣地區地下水觀測網水
質調查分析

委託單位：經濟部水資源局

執行單位：台糖公司新營總廠

台糖公司糖業研究所

交通大學土木工程研究所

此計畫為經濟部前水資源局於民國 88 年委託臺糖公司新營總廠、臺糖公司糖業研究所及本工作團隊執行之計畫。依據台灣地區地下水觀測網整體計畫，第二期起除繼續辦理各區地下水文觀測站井建置及相關試驗外，對既設觀測井作地下水基本水質之監測與分析，唯有量與質並重，才能進行水資源之有效調配應用。針對已建置之觀測井，除了沿續以往作基本水質檢測外，並探討其變化、海水入侵、人為汙染等並配合地質統計理論評估分布密度，以選定水質指標井，探討指標井之環境背景，研析各指標井之水質觀測頻率（子題三），並將所有水質資料建成電腦數值檔資料庫，以利進一步應用與分析。

本次調查的觀測站集中在濁水溪及屏東地區，從民國 78 年至 86 年共有 124 站共計分層觀測井 275 口。觀測站因應當地水文地質情況設置一到五層的分層觀測井，材質主要為不鏽鋼，口徑為直徑六吋，觀測層次最深達 294 公尺（雲林舊庄、彰化花壇）。

根據台灣地區地下水觀測網整體計劃與審查委員之建議，總計 31 個測定項目：酸鹼值（pH 值）、水溫、導電度（EC）、氧化還原電

位 (ORP)、氯鹽 (Cl)、硬度 (Hardness)、化學需氧量 (COD)、生化需氧量 (BOD)、大腸菌密度 (E. coli)、總鹼度 (Alkalinity)、總溶解固體 (TDS)、硫酸根 (SO_4^-)、硫化物 (S^-)、氨氮、硝態氮與亞硝態氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$)、鈉 (Na)、鉀 (K)、砷 (As)、鈣 (Ca)、鎂 (Mg)、鐵 (Fe)、錳 (Mn)、鉻 (Cr)、銅 (Cu)、鋅 (Zn)、鎘 (Cd)、汞 (Hg)、鉛 (Pb)、銀 (Ag)、總有機碳 (Total organic carbon, TOC)。

- 1、採樣前 purging 效應：本次採樣前皆先抽離 3 倍井水量，並每 5 分鐘記錄導電度一次，因此可利用此數據來評估 purging 對於導電度 (水質) 的效應。結果顯示 270 口觀測井中有 203 口之導電度 (75%) 不因抽水而變化，但 25% 的觀測井抽水前後導電度有大於 5% 的差異。
- 2、本次檢驗第一次採樣前期時發現 88 口有大腸菌，但後期與第 2 次採樣卻都無檢出大腸菌。經檢討後，認為第一次採樣前期消毒並不完全後期採用高溫殺菌，bailer 則經消毒水泡洗，結果較正確。因為經重覆採樣卻無檢出大腸菌故此次檢驗之全部觀測井應皆無大腸菌污染。
- 3、濁水溪沖積扇 185 個觀測井之水質中，不符合台灣地區飲用水標準之井體數達到 5% 以上者之項目分別為：總溶解固體、硬度、氯、硫酸鹽、氨態氮、砷、鐵、錳等 8 項。不符合台灣地區灌溉水標準之井體數達到 5% 以上者之項目分別為：導電度、總溶解固體、硫酸鹽等三項。不符合台灣地區擬議中甲級地下水標準之井體數達到 5% 以上者之項目分別為：導電度、總溶解固體、硬度、氨態氮、砷、鐵、錳等 7 項。

- 4、屏東平原 90 個觀測井之水質中，不符合台灣地區飲用水標準之井體數達到 5% 以上者之項目分別為：總溶解固體、硬度、氮、硫酸鹽、氨態氮、砷、鐵、錳、鎘等 9 項。不符合台灣地區灌溉水標準之井體數達到 5% 以上者之項目分別為：導電度、總溶解固體、硫酸鹽、鎘等 4 項。不符合台灣地區擬議中甲級地下水標準之井體數達到 5% 以上者之項目分別為：導電度、總溶解固體、硬度、氮、氨態氮、砷、銅、鐵、鎳、鎘等 10 項。
- 5、就氯鹽與碳酸鹽類之比值而言，濁水溪沖積扇 185 個觀測井也未受海水污染者有 175 口 (95%)，輕度海水污染者有 4 口 (2%) (全興(三)、海園(二)、東石(二)、金湖(二))，中度海水污染者有 2 口 (1%) (宜梧(一)、宜梧(三))，高度海水污染者有 2 口 (1%) (瓊埔(一)、宜梧(二))，嚴重海水污染者亦有 2 口 (1%) (海園(一)、金湖(一))。屏東平原 90 個觀測井中未受海水污染者有 78 口 (87%)，輕度海水污染者有 1 口 (1%) (新埤(一))，高度海水污染者有 3 口 (3%) (溫豐(一)、石化(一)、崎峰(二))，嚴重海水污染者有 7 口 (8%) (新園(二)、東港(一)、東港(三)、東港(四)、林園(二)、林園(三)、大潭(二))，等於海水者有 1 口 (1%) (崎峰(一))。
- 6、各觀測井水質之 Piper 菱形圖顯示，濁水溪沖積扇觀測井中屬於 I 區者 (為 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) 型，即鹼土類重碳酸鹽之水質) 有 72%，屬於 II 區者 (為 NaHCO_3 型，即鹼重碳酸鹽類之水質) 有 17%，屬於 III 區者 (為 CaSO_4 或 CaCl_2 型，即鹼土類非碳酸鹽型之水質) 有 5%，而屬於 IV 區者 (為 Na_2SO_4 或 NaCl 型，即鹼類非碳酸鹽型之水質) 有 6% (分別為東石(一)、瓊埔(一)、宜梧(一)、宜梧(二)、宜梧(三)、港東(一)、港東(二)、箔子(一)、海園(一)、海園(二))。

斯刺(一)、全興(三)等 12 個觀測井)。屏東平原觀測井中屬於 I 區者有 78%，屬於 II 區者有 8%，屬於 IV 區者有 5%，而屬於 IV 區者 13% (分別為崎峰(一)、崎峰(二)、塭豐、大潭(二)、東港(一)、東港(三)、東港(四)、石化、林園(二)、林園(三)、新園(二)等 11 個觀測井)。

7、各觀測井水質之 Wilcox 圖顯示，濁水溪沖積扇觀測井，有 10 種 Wilcox 型態，其中高鹽害中鈉害 (C3S2) 以上者有 12 口，分別為東石(一)、東石(二)、瓊埔(一)、宜梧(一)、宜梧(二)、宜梧(三)、港東(一)、港東(二)、海園(一)、海園(二)、全興(三)、文昌(一)。屏東平原觀測井也有 6 種 Wilcox 型態，其中高鹽害中鈉害 (C3S2) 以上者亦有 12 口，分別為崎峰(一)、崎峰(二)、崎峰(三)、塭豐、大潭(二)、東港(一)、東港(三)、東港(四)、石化、林園(二)、林園(三)、新園(二)。

本研究之測定項目計有 31 個項目，建立此等長期資料庫有其必要性，可以作為地下水利用之重要指標，亦可作為地下水水質變遷探討之依據。

計畫名稱：台灣地區地下水觀測網水質監測調查分析(2/5)

委託單位：經濟部水資源局

執行單位：台糖公司新營糖廠地下水開發保育中心

台糖公司台糖研究所

政府為地下水資源永續利用及促進地表水及地下水聯合運用，建立台灣地區地下水觀測網，收集水文地質及地下水水文資料，以建立國家性水文監測站網。地下水水質監測為子計畫之一，自民國88~93年為期5年，本計畫具有2項基本目的，一為提供水源調配之水質依據，再則提供污染監測的參考。

本計畫之水質檢測共有水溫、pH、氧化還原電位、導電度、溶氧、總溶解固體、主要陰陽離子（如鉀、鈉、鈣、鎂……）、重金屬、如鋅、鎘、鉻、汞……）等共31項。採樣法依照行政院環境保護署「地下水採樣方法」(NIEA W103.50B)，抽出三倍井水（purgings）後採樣，現場以冰桶保存，24小時內專車送至台糖研究所水質化驗中心（位於台南市），化驗室於24小時內化驗完畢。

濁水溪地區地下水觀測網觀測井共有191口，深度介於地面下200~300m之間，但最深可達350m，在此觀測深度內的水文地層，可分為四層：第一層深度約從0~50m深，第二層約從50~110m深，第三層約從110~280m深，第四層約從280~350m深。

89年度濁水溪地區（彰雲兩縣）地下水水質檢驗，主要結論如下：

- 1、大腸菌經過重覆檢測，54口中有11口檢出大腸菌。
- 2、砷濃度過高的井有20%（38口），可能和自然地層環境有關。
- 3、超過一半的井，其鐵、錳、及氨氮濃度超過環保署飲用水水源水質標準，但因檢測的地下水環境多處於還原態，應屬地層礦物中

溶出。

4、污染性重金屬及 TOC 檢測結果皆在限值內。

較需注意的區域性問題有兩類：一為水質鹽化，其淺層含水層（60m 內）水質鹽化嚴重，淺層觀測井 70% 其 TDS 已大於 500mg/l，另外，雲林沿海地區主要含水層也有鹽化的趨勢。二為扇頂補注區之硝酸鹽氮污染，數據顯示本區扇頂補注區如二水、田中等地，地下水中之硝酸鹽氮濃度已大於 1mg/l，高於背景值（0.1mg/l）約 10 倍，應進一步加強監測。

計畫名稱：台灣地區地下水觀測網水質監測調查分析 (3/5)

委託單位：經濟部水資源局

執行單位：台糖公司新營糖廠地下水開發保育中心

台糖公司台糖研究所

本計畫係應用台灣區地下水觀測網之觀測網作為地下水水質監測調查，以提供水資源單位調配地下水資源時之水質依據。本 (90) 年度監測的範圍有：嘉南地區 (100 口井)，恒春地區 (新建 3 口井，利用民井共 19 口)，彰雲地區 (191 口井) 及屏東地區 (134 口井)，並在中壠工業區新建 1 口觀測井。計畫主要成果如下：

子題一、嘉南地區

嘉南地區地下水觀測網觀測井共有 100 口，觀測最深可達地面下 289m，本區地形平緩，河流多成曲流，由東往西流向台灣海峽。地層極複雜，多為砂泥互層，分層明顯但沿續性不佳，層厚變化大，地下水上下流通不佳。觀測深度內的水文地層，可約分為五層：第一層深度約從 0~60m 深，第二層約從 60~140m 深，第三層約從 140~200m 深，第四層約從 200~250m 深，第五層約從 250~300m 深。根據地下水中氡濃度，40 年來的地下水自然補注，僅限於上部 60m 內的地層，同理，人為污染應僅局限於上部 60m 範圍內，深度 60m 以下的地下水都屬於自然的地下水，沒有人為污染，所以若要監測人為污染，只需監測第一含水層即可。

90 年度地下水水質檢驗，初步結論如下：

- 1、總檢測數為 100 口，其中導電度有 82 口超過 $750\mu\text{S}/\text{cm}$ ，表示太鹹不適飲用。
- 2、大腸菌，31 口中有 24 口檢出大腸菌。

- 3、砷濃度大於 0.05mg/l 的井有 72% (72 口)，可能和自然地層環境有關。
- 4、所有井的氨氮濃度超過環保署飲用水水源水質標準 (0.1mg/l)。
- 5、總有機碳檢測有 32 口大於 4mg/l。
- 6、抽水時逸出的甲烷氣，超過 5000ppm 有 25 口。
- 7、鐵濃度大於 0.3mg/l 的井有 81% (81 口)，錳濃度大於 0.05mg/l 的井有 88% (88 口)。
- 8、鋅銅鉻鎘鉛銀汞等重金屬皆在標準內。上述檢測結果，其中砷、氨氮、鐵錳及總有機碳，可能因檢測的地下水環境多處於還原態，應屬地層礦物中溶出，並不表示人為污染。

嘉南地區的地下水水質不佳，因砷及氨氮濃度太高，若沒有處理，並不適合飲用。若要作為灌溉用水，因導電度超過 750 μ S/cm 的井有 82%，可能只有少數淡水層適合灌溉，否則以鹹水灌溉長期會使作物枯死，土壤鹼化。作為工業用水，除了應考慮鹹淡及硬度外，有 25% 的水層含有大量甲烷氣，儲水時應氣液分離，小心爆炸。

本區深層地下水因泥層封隔，補注條件不良，近年來又大量抽取，形成三個顯著之沉降錐，水位降至海平面下 25 公尺，分布於朴子溪及八掌溪之間的沿海、下營及小新營，可能導致地層下陷。加上本區地下水的水質不良，所以本區深層地下水應禁止開發，勸導民眾只開發淺層含水層。

子題二、恒春地區觀測井建置及水質調查

根據台灣地區地下水觀測網整體計畫，恒春地區的分層觀測井建置預計於民國 95 年開始，今年 (90 年) 先行建置分層觀測井一站三口，以先行瞭解恒春地區之水文地質結構，並同時利用民井 15~20

口採水以初步調查水質分布。

恒春地區的地下水產水層主要以平原區及西台地為主，井深多在 150m 以內，產水量可達 100cmh 以上。地下水流由兩側流向谷地，由南流向北。

根據實際鑽鑿的地層砂樣，並比對井測數據，地面下 37m 以上有一層主要的阻水層，推測本層是全新世與更新世的交界，因此觀一井以監測淺層地下水為主，將濾水管放在 4~10m 及 22~28m。37m 以下至 150m 都是厚層的粗砂夾礫石層，推測應屬四溝層，可能為陸海交界，含有大量珊瑚及貝殼，因底部未鑿穿，故下部接觸未知。本層應是區域的主要產水地層，因局部夾有細粒泥層，可能有分層的現象，但估計不會隔絕完全，因此觀二設在 82~94m，觀三設在 132~144m。

射察一分級試水靜水位約在 3.87m，T 值為 $0.04\sim 0.08\text{m}^2/\text{min}$ ，本口井的安全出水量（不會導致井體出砂）約為 6cmh，定量試水靜水位約在 2.08m，T 值為 $0.08\text{m}^2/\text{min}$ 。射察二分級試水靜水位約在 3.19m，T 值為 $0.05\sim 0.06\text{m}^2/\text{min}$ ，本口井的安全出水量大約大於 15cmh，定量試水靜水位約在 3.40m，T 值為 $0.058\text{m}^2/\text{min}$ 。射察三分級試水靜水位約在 3.57m，T 值為 $0.009\sim 0.02\text{m}^2/\text{min}$ ，本口井的安全出水量約為 4.5cmh，定量試水靜水位約在 3.62m，T 值為 $0.014\text{m}^2/\text{min}$ 。恒春地區地下水水質檢驗，結果如下：

- 1、總檢測數為 19 口，其中導電度有 8 口（42%）超過 $750\mu\text{S}/\text{cm}$ ，表示太鹹不適飲用。
- 2、砷濃度大於 $0.05\text{mg}/\text{l}$ 的井有 6 口（32%），可能和自然地層環境有關。
- 3、氨氮濃度超過環保署飲用水水源水質標準（ $0.1\text{mg}/\text{l}$ ）有 7 口

(37%)，大於 1 mg/l 有 1 口 (5%)。

- 4、硝氮濃度超過 1 mg/l 有 6 口 (32%)，沒有大於 10 mg/l 的井。
- 5、總有機碳檢測都小於 4mg/l。
- 6、重金屬都在飲用水源水質標準內。
- 7、鐵濃度超過環保署飲用水水源水質標準(0.3mg/l)有 10 口(53%)。
- 8、錳濃度超過環保署飲用水水源水質標準(0.05mg/l)有 5 口(26%)。

子題三、彰雲地區

根據自來水公司資料，目前彰化縣全縣的自來水供應，皆依賴地下水，雲林縣則有部份由嘉義區地面水供應，但仍有相當部份依賴地下水。水權資料統計顯示，目前彰雲地區共有自來水井 291 口，深度最深達 350 m。

本區的觀測井水質調查工作，最早為中興大學謝永旭教授（謝，1994~1998），在建井當年所檢驗，共有導電度、pH 等 32 項水質，88 年度及 89 年度第 2 次及第 3 次檢驗是台糖新營廠地下水中心（台糖地下水中心，1999~2000），今年（90 年度）已是第 4 次檢驗。

90 年度彰雲地區地下水水質持續性監測，結果如下：

- 1、大腸菌總檢測數為 48 口，其中 21 口無檢出(44%)，檢出微量(1~200 CFU/100ml)有 7 口 (15%)，檢出顯著 (>200 CFU/100ml) 有 20 口 (42%)。
- 2、導電度總檢測數為 190 口，其中有 47 口 (25%) 超過 750 μ S/cm，表示太鹹不適飲用。與 89 年度比較，更鹹的井有 19 口 (10%)，更淡的井有 48 口 (25%)。雲林沿海的宜梧及口湖地下水趨向更鹹化，可能因為地面低易受海水淹而鹹水滲入。
- 3、重金屬都在飲用水源水質標準內。

4、硝氮總檢測數為 44 口，都位於扇頂補注區及淺層易受污染之含水層，其中濃度超過 0.5 mg/l 有 23 口 (52%)，有 3 口大於 10 mg/l (水源水質標準)。

5、總有機碳檢測都小於 4mg/l。

子題四、屏東地區

民國 84 年至 87 年，屏東平原的地下水觀測井建置完成共有觀測井 134 口 (謝永旭與蘇苗彬，1995~1998)，在建井同年度，並進行基本水質檢測，以上可稱為第一次檢測數據。台糖地下水中心 88~89 年度持續對屏東平原觀測井採樣、化驗與分析 (台糖地下水中心，1999~2000)，在資料庫中稱為第 2 次及第 3 次檢測。今年度 (90 年度) 可稱為第 4 次檢測，主要集中在 3 個方向，地下水質鹽化、扇頂硝氮污染及淺層重金屬污染監測。

因為屏東地區的飲用水仍有部份依賴地下水，根據水權資料統計，目前屏東地區共有自來水井 85 口，深度最深達 350m，因此本計畫評估地下水水質，主要以環保署的飲用水水源水質標準為主。

90 年度屏東地區地下水水質持續性監測，結果如下：

1、大腸菌總檢測數為 56 口，其中 13 口無檢出(23%)，檢出微量(1~200 CFU/100ml) 有 10 口 (18%)，檢出顯著 (>200 CFU/100ml) 有 33 口 (59%)。

2、導電度總檢測數為 133 口，其中有 36 口 (27%) 超過 750 μ S/cm，表示太鹹不適飲用。與 89 年度比較，更鹹的井有 8 口 (6%)，更淡的井有 21 口 (16%)。90 年度檢測地下水淡化趨向較多的原因，可能因為 90 年度採樣時值雨季 (90 年 8 月) 受到地面水補注的影響。

- 3、重金屬（鐵錳除外）都在飲用水源水質標準內。
- 4、硝氮總檢測數為 44 口，都位於扇頂補注區及淺層易受污染之含水層，其中濃度超過 0.5 mg/l 有 32 口（73%），但沒有大於 10 mg/l 的井。
- 5、總有機碳檢測都小於 4mg/l。

子題五、中壢工業區觀測井建置

中壢工業區的開發很早，據鑿井商私下透露，近 10 年該區的地下水位下降很快，可能已達 30m 以下，而各工廠的水井也有加深的情況，新鑿之水井達 400~500m 深。另外中壢工業區的地層上部 0~2.5m 為紅土層，2.5~21m 為礫石層，因此除上部紅土層可能為不透水層外，2.5~21m 的礫石層很容易受污染滲入。經與地主接洽後，設在財團法人農業工程中心內。根據實際鑽鑿的地層砂樣，並比對井測數據，地面 0~0.25m 為紅土，2.5~21m 為粗中礫石層，推測本層可能是全新世河階堆積設為觀(一)井，21~52m 推測為頭科山層的砂泥層，36~52m 有局部砂層，設為觀(二)井。

中壢觀一的靜水位約在 10.681，T 值為 0.029~0.033m²/min，本口井的安全出水量（不會導致井體出砂）約為 6cmh，定量試水靜水位約在 10.632m，T 值為 0.03m²/min。中壢觀二的靜水位約在 19.021m，分級試水的 T 值為 0.0013~0.0014m²/min，本口井的安全出水量（不會導致井體出砂）大約大於 1.3cmh，定量試水靜水位約在 18.791m，T 值為 0.0015m²/min。水位觀測將移交給水利處第二河川局。

桃園中壢地區地下水位呈現下降趨勢，深層水層缺乏補充，長期抽取會導致含水層枯竭，應加強管制。

2.1.4 指標井之相關研究計畫成果

台灣地區地下水觀測網水質調查分析及指標井選定研究(2/3)(民國 88 年度)--子題三、水質指標井選定及觀測頻率分析

一、計畫概要

此分項計畫為經濟部前水資源局於民國 88 年委託國立交通大學防災工程研究中心及本工作團隊執行之計畫。本研究目的主要在綜合考量水質監測目的、污染潛勢、地質統計及水質變化等因素針對濁水溪沖積扇及屏東地區，進行水質指標井選定及水質監測項目與頻率的建議。本研究建議的監測架構可分為背景水質檢測、定期檢測及連續監測等三個層次，其中連續監測只在特殊情況及目的下才進行，背景水質監測則在每口井建井後進行，主要規劃的重點在定期檢測部份，定期檢測又分為 2 級，第 1 級只進行水溫、pH 值、導電度、總溶解固體量等基本水質檢測，原則上建議每口井在完井初期都要進行，第 2 級檢測項目則依土地利用的不同而不同。第一級井的取捨以地質統計分析建議，第二級井則以污染潛勢及水質現況做分析建議，目前本研究定期檢測中之第一級監測井總數濁水溪沖積扇 125 口與屏東平原 101 口，佔目前總數 314 口的 71.97%。第二級井在濁水溪沖積扇共有 62 口，屏東平原共 26 口，佔目前總數 314 口的 28.03%。

二、計畫研究流程

(一)、資料收集：

收集各觀測井水質資料、土地利用圖層、水文地質架構、水文地質參數資料及其他相關研究報告與資料供後續分析之用。

(二)、污染潛勢 (DRASTIC) 分析：

污染潛勢代表著較淺層的含水層就水文地質架構的觀點該含水層曾受到從地表滲漏而下的污染質污染的可能性，它所反映的是整體的趨勢而非針對某一特定污染質，本研究應用美國環保署發展的污染潛勢分析系統 (DRASTIC)，分析濁水溪沖積扇及屏東平原之污染潛勢，並以其作為淺層含水層 (含水層 1)，定期監測井選定的參考。

1、DRASTIC 考量之水文地質參數及其評分

上述提到水文地質參數有七項，即為 DRASTIC 名稱命名之由來：

D: 地下水位深度 (Depth to water)

R: 淨補注量 (net Recharge)

A: 含水層介質 (Aquifer media)

S: 土壤介質 (Soil media)

T: 地形坡度 (Topography)

I: 未飽和層影響 (Impact of vadose zone)

C: 含水層水力傳導特性 (Conductivity of the aquifer)

此七項水文地質參數皆可用地圖形式來表現。DRASTIC 系統將考慮之七個水文地質參數分別轉換成 0~10 分之分數等級。分別說明如下：

(1).D (地下水位深度)

在受壓含水層中，D 值為地面至含水層頂部之深度；在自由含水層，D 表示地面至地下水位之深度 (圖 2.1-3)。一般而言，D 值愈小，則地下水受污染之可能性愈高，其所對應的分數也較高。可從表 2.1-1 得知在實際應用上，D 值範圍及其對應之分數等級。

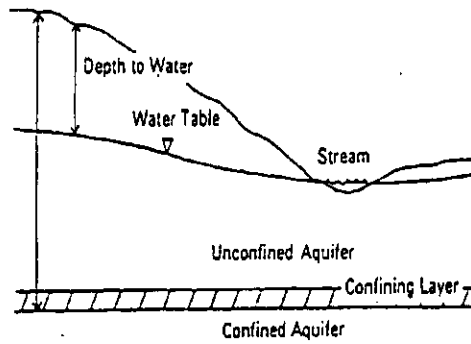


圖 2.1-3 在拘限含水層及自由含水層之地下水位深度

表 2.1-1 D 值之範圍及分數等級

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

(2).R (淨補注量)

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

表 2.1-2 R 值之範圍及分數等級

範圍(range)		分數等級 (rating)
呎	公尺	
0~2	0~5	1
2~4	5~10	3
4~7	10~17	6
7~10	17~25	8
10+	25+	9

(3).A(含水層介質)

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

表 2.1-3 A 值之範圍及分數等級

範圍 (range)	分數等級 (rating)	典型分數等級 (typical rating)
塊狀頁岩(massive shale)	1-3	2
變質/火成岩(metamorphic/igneous)	2-5	3
風化之變質/火成岩 (weathered metamorphic/igneous)	3-5	4
薄層砂岩、石灰岩、頁岩層 (thin bedded sandstone,limestone,shale sequeuces)	5-9	6
塊狀砂岩(massive sandstone)	4-9	6
塊狀石灰岩(massive limestone)	4-9	6
砂及礫石(sand and gravel)	6-9	8
玄武岩(basalt)	2-10	9
喀斯特石灰岩(Karst limestone)	9-10	10

(4).S(土壤介質)

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

表 2.1-4 S 值之範圍及分數等級

範圍 (range)	分數等級 (rating)
薄或無(thin or absent)	10
砂礫(gravel)	10
砂(sand)	9
收縮及結塊粘土 (shrinking and/or aggregated clay)	7
砂質壤土(sandy loam)	6
壤土(loam)	5
粉質壤土(silty loam)	4
粘質壤土(clay loam)	3
非收縮及非結塊粘土 (nonshrinking and nonaggregated clay)	1

(5).T (地形坡度)

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

表 2.1-5 T 值之範圍及分數等級

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

(6).I (未飽和層影響)

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

表 2.1-6 I 值之範圍及分數等級

範圍 (range)	分數等級 (rating)	典型分數等級 (typical rating)
坩/粘土(Silt/clay)	1-2	1
頁岩(shale)	2-5	3
石灰岩(limestone)	2-7	6
砂岩(sandstone)	4-8	6
層狀石灰岩、砂岩、頁岩 (bedded limestone,sandstone,shale)	4-8	6
含坩土及黏土之砂與礫石 (sand and gravel with significant silt and clay)	4-8	6
變質岩/火成岩(metamorphic/igneous)	2-8	4
砂及礫石(sand and gravel)	6-9	8
玄武岩(basalt)	2-10	9
喀斯特石灰岩(karst limestone)	8-10	10

(7).C (含水層水力傳導特性)

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

表 2.1-7 C 值之範圍及分數等級

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

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

表 2.1-8 常用水文地質參數之權重

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

2、 DRASTIC 污染評估指標之決定

當決定上述七個水文地質參數之分數值(rating)及權重值(weighting)後，則其相應之乘積和即為 DRASTIC 污染評估指標值，如下式所示

DRASTIC=

$$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \dots\dots\dots (2.1-1)$$

下標 r 代表分數值(rating)

下標 w 代表權重值(weighting)

指標值僅提供地下水污染潛勢間”相對”之程度大小關係，並不能指出污染潛勢之絕對大小值。

3、 地下水觀測網地質資料及其對應之 DRASTIC 分級

本單位由農試所之全省平地土系資料並加上中央地質調查所之地質剖面圖上之土層種類，得知濁水溪沖積扇及屏東平原地區之土壤組成有下列幾種:礫(石)層、壤質粗砂、帶砂壤土、極細砂、壤土、坩土、坩質壤土、粘質壤土、坩質粘土等。以上所提到的地質資料中，

與 DRASTIC 系統之水文地質參數中的 A(含水層介質)、S(土壤介質)、I(未飽和層影響)有關。茲將本研究所有的地質資料與 DRASTIC 系統相比較，依據 DRASTIC 系統來分級在濁水溪沖積扇及屏東平原地區之 A(含水層介質)、S(土壤介質)、I(未飽和層影響)，並給定其相關的分數。如表 2.1-9~表 2.1-113 所示。

表 2.1-9 濁水溪沖積扇及屏東平原地區含水層介質(A)評分表

含水層介質	分數
礫石層	10
極粗、粗、及中砂層	8
細及極細砂層	5
粉砂、泥及黏土層	2

表 2.1-10 濁水溪沖積扇及屏東平原地區土壤介質(S)評分表

土壤介質	分數
石礫	10
粗砂土、砂土	9
細砂土、壤質粗砂土、壤質砂土	8
壤質細砂土、粗砂質壤土、砂質壤土、細砂質壤土	7
極細砂土、壤質極細砂土、極細砂質壤土	6
壤土	5
粉土、粉質壤土	4
砂質粘壤土	4
粘質壤土、粉質粘壤土	3
粉質粘土	2
粘土	1

表 2.1-11 濁水溪沖積扇及屏東平原地區未飽和層影響(I)評分表

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

(三)、地質統計分析：

地質統計分析的主要目的在以統計的觀點分析各觀測井對研究區域整體統計內插精度的影響程度，並以此為基礎排定各井之水質檢測優先順序，本計劃乃應用本研究群過去所發展的克利金推估及其對應之變異量分析進行各分層井位水質檢測優先順序之排定，以為後續定期檢測水井篩檢之參考。

(四)、水質變化分析：

雖然至目前為止大多數觀測井僅有兩次水質檢測紀錄，難已真正評估各站之水質變化情形，本研究仍以僅有的水質資料分析其變化情形，並探討可能的因素，以作為其他分析的參考。

(五)、水質監測項目及頻率分析：

定期檢測項目的決定為本研究重點之一，本研究在參考各種水質標準及相關法規並考慮委託單位之水質監測目的，在邀集相關單位及學者討論後做出建議。

(六)、土地利用：

不同土地利用型態對環境產生的污染型態亦是不同，因此本研究對於選定的檢測井將根據其土地利用型態分類，建議不同的檢測項目。

(七)、水質監測架構及項目建議：

水質監測整體而言應是隨著監測結果，根據監測目的適當調整的動態過程，因此本研究將水質檢測初步分為背景水質檢測及水質檢測兩大類，定期檢測並分為兩級，並建議不同級別間之修正程序。

(八)、分級監測指標井選定：

監測井的選定及檢測項目的決定最重要的指標之一乃是該站井過去的水質檢測結果，惟由於地下水污染質的傳輸過程相對緩慢，因此若以長期水資源保育的觀點而言，監測井的選定除當下的水質檢測結果之外，亦應考量該井所在區域受污染的可能性，因此本研究乃綜合上述 2、3、4 項之分析結果，並依據 7 項所建議的監測架構，初步選定不同級別之監測井。

三、計畫研究成果

(一)、地下水水質監測架構

前水資源局所統轄的地下水監測井網是以水資源的管理為主要的考量，因此，目前的監測井以地下水位的連續觀測為主要任務。然而，基於充分利用資源的考量，行政院經建會認為這個地下水監測井的系統具有非常高的價值，除了地下水位監測外，有必要利用這些既有的監測井來進行地下水水質的監測。

但是，在濁水溪沖積扇與屏東平原共有 314 口監測井的龐大數量之下，定期水質監測的工作十分艱鉅，且需要非常多的資源。然而在目前的狀況下，雖然由於井數眾多取樣分析工作龐大，但是基於有效利用這些監測井的原則，仍然應該妥善規劃出監測計畫。目前所構想的監測計畫，以區域性監測網和局部性監測網為考量要點。基本上，目前站網的佈置較符合區域性的監測網的旨意。因此，當要選擇指標井與相關之水質指標參數做加密監測分析時，則應該以局部性監測網的角度來思考。

雖然，目前在約 1800 km² 的濁水溪沖積扇上的監測井佈設約 50 餘站，密度約為每 36 km² 一站，密度遠低於局部性監測網的一般密度。但是，仍然可由選擇適當的監測指標參數，得出密度較高且較可反應水質連續性變化的資料。

因為區域性監測網的密度很低，且採樣分析頻率也低，因此若僅從中挑選出極少數測站做最基本參數的連續監測，在資料的分析比對和應用上可能會遭遇到很大的困難。因此，在規劃中，將一併建議整個地下水監測網的監測頻率與項目。

如圖 4.2.1-1 所示，本計畫建議監測共區分為三個層次。首先是地下水背景水質普測。其次，是地下水水質的定期監測。

地下水水質監測三個層次的目的，各有不同。背景水質分析目的在建立基本背景水質的資料庫，除了可以判斷地下水水質的狀況之外，也可供日後定期監測水質指標變化分析的基準。定期監測的目的在於定期檢測地下水水質的狀況；因為選擇幾項最重要最具有代表性的基本水質指標監測，所以這些指標參數的變化可以反映出地下水質變化的狀況和潛在原因。另外在特定目的和特定狀況之下，可選定適合的井位進行連續監測，例如對於選定的特殊敏感地區做長期的觀察

或者是協助特定目的之學術研究，抑或是要掌握短時間內重要的水質變化等等，連續性監測屬於非經常性監測。

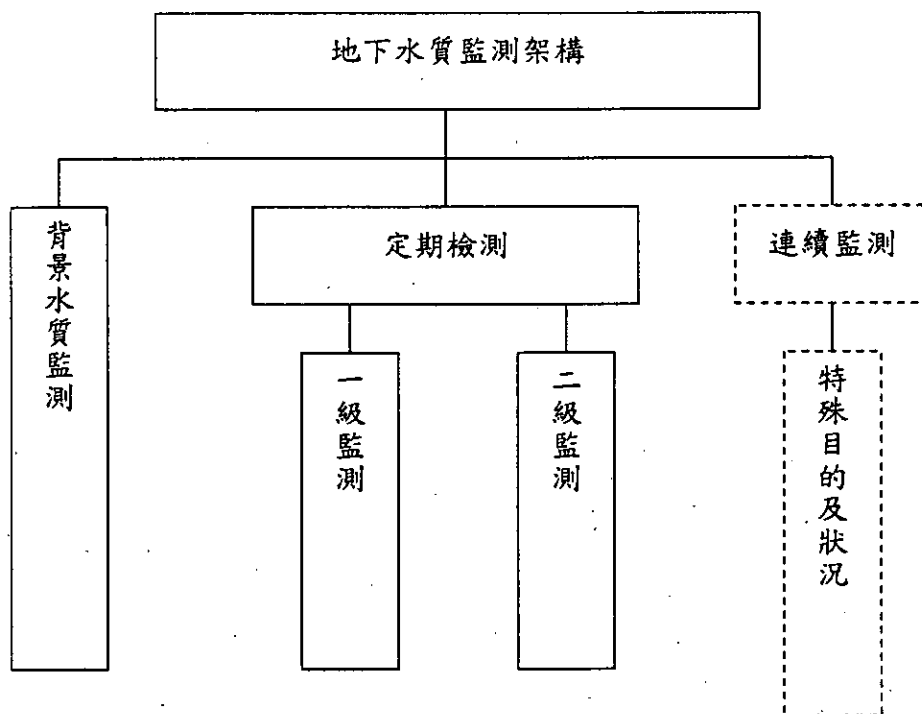


圖 2.1-4 地下水質監測架構圖

(二)、背景水質監測

為求能夠對於本區域的地下水質建立基本資料，做為地下水資源使用的依據，建議能夠全面性地做一次普查，依據「水體分類水質標準」和「飲用水水源水質標準」，做所有涵蓋參數的普測。取樣分析所得的資料可以做為地下水資源運用的基準。

由於所牽涉的分析參數眾多，因此建議只做一次。這些參數在未來若有任何變化，可以藉由定期或連續監測的指標參數反映出來，有必要時再做個別水質參數分析確認即可。另外，再由這些參數中選擇最重要的項目，在一年中作每季取樣分析，以建立起每站的基本背景水質資料和趨勢，作為未來定期監測的基礎。背景水質普測的目的不僅是要先行建立地下水水質的背景基本資料庫，同時做為區域地下水利用的參考。並可以作為未來地下水資源保護的依據。地下水水質愈是良好的地區，地下水資源的價值愈高，因此地下水保護的工作愈重要與迫切。

背景水質檢測項目主要參考陸域地面水體（河川、湖泊）分類及水質標準--保護生活環境相關環境基準、保護人體健康相關環境基準、飲用水水源水質標準(I)、(II)、污水注入地下水體標準。因為考量所需要的經費問題以及地下水水質權責問題，所以揮發性有機物和半揮發性有機物、農藥等特定污染物的項目並不列入。至於重金屬方面，因為先前中興大學所做分析中已經包含進去，所以不擬排除之。

此外，因為中興大學所做的分析項目以涵蓋許多層面的考量，所以也一併納入。因此，總共的增加項目僅有 TOC、TOX、鉛、鎳、酚等 5 項。建議實施方法是爾後設置監測井時增加這些分析項目，連同目前以分析的項目總共有 33 項。背景水質檢測係於新設地下水監測井實施，建議進行分析之水質項目共計 33 項，列於表 2.1-12 中。

表 2.1-12 背景水質檢測項目一覽表

背景水質檢測項目
頻率:於新設地下水監測井實施
溫度、導電度、總溶解固體、總硬度、pH、BOD、COD、大腸菌類 數、氧化還原電位(ORP, Eh)、硫化物、亞硝酸鹽氮、硝酸鹽氮、氨氮、 氯鹽、鈣、鎂、鐵、錳、鎘、鉻、銅、鋅、汞、砷、硫酸鹽、鈉、鉀、 總鹼度、TOC、TOX、鉛、鎳、酚

(三)、連續監測

在作分析項目選擇之前，可以先就一般水質分析目的來考量。對於基本參數而言，檢討一般地下水水質調查中的過濾或診斷型的分析項目是最好的起始點。

根據上述，基本上應該考慮選擇的監測項目共計有：水位、溫度、pH、ORP(Eh)、DO、比導電度 EC/TDS、TOC、TOX 等 7 個具有指標意義的項目。然而，在目前尚未開發出可以在現地置於監測井中連續分析監測 TOC 和 TOX 的水中探頭。所以，可選擇的參數剩下 5 項。目前所知的長期水中監測儀器，可一次裝置三個探頭連續監測（4 個 port，其中一個必須要安裝流通器（Flow Circulator），使水流通，以便量得具有代表性之數據）。水位和水溫不佔用 port，因此直接納入。另外，比導電度 EC/TDS 和 DO 可以合併成一組探頭，pH 和 ORP 可以合併成一組探頭，因此尚有一個 port 可以選擇。考量該地區的狀

況，建議選擇氨氮。至於其他可以選擇的探頭包括：濁度、氨 (Ammonia)、氯鹽、硝酸鹽等。

最佳的安排為水位和水溫、pH、Eh、比導電度 EC/TDS、DO、氨氮。這些項目只適用於因特殊監測目的及狀況之少數監測井。

(四)、定期(一、二級監測)檢測

1、定期(一、二級監測)監測井選定

上節所述之背景水質檢測為每井新設時須進行的項目，連續監測井在特殊目的時才進行，因此又有定期間測井需要進行選定。定期監測井的選定原則上以各井過去的水質檢測記錄為依據，惟在目前各水井尚未實施定期檢測，因此無歷史資料可資應用。而且，就長期性的水質監測而言，除了實際的檢測資料以外，尚需要考量各井所在區未受污染的可能性，以便能在實際污染發生時能儘早發現。因此，本計畫針對定期檢測井之選定，乃以圖 2.1-5 所示之流程進行。

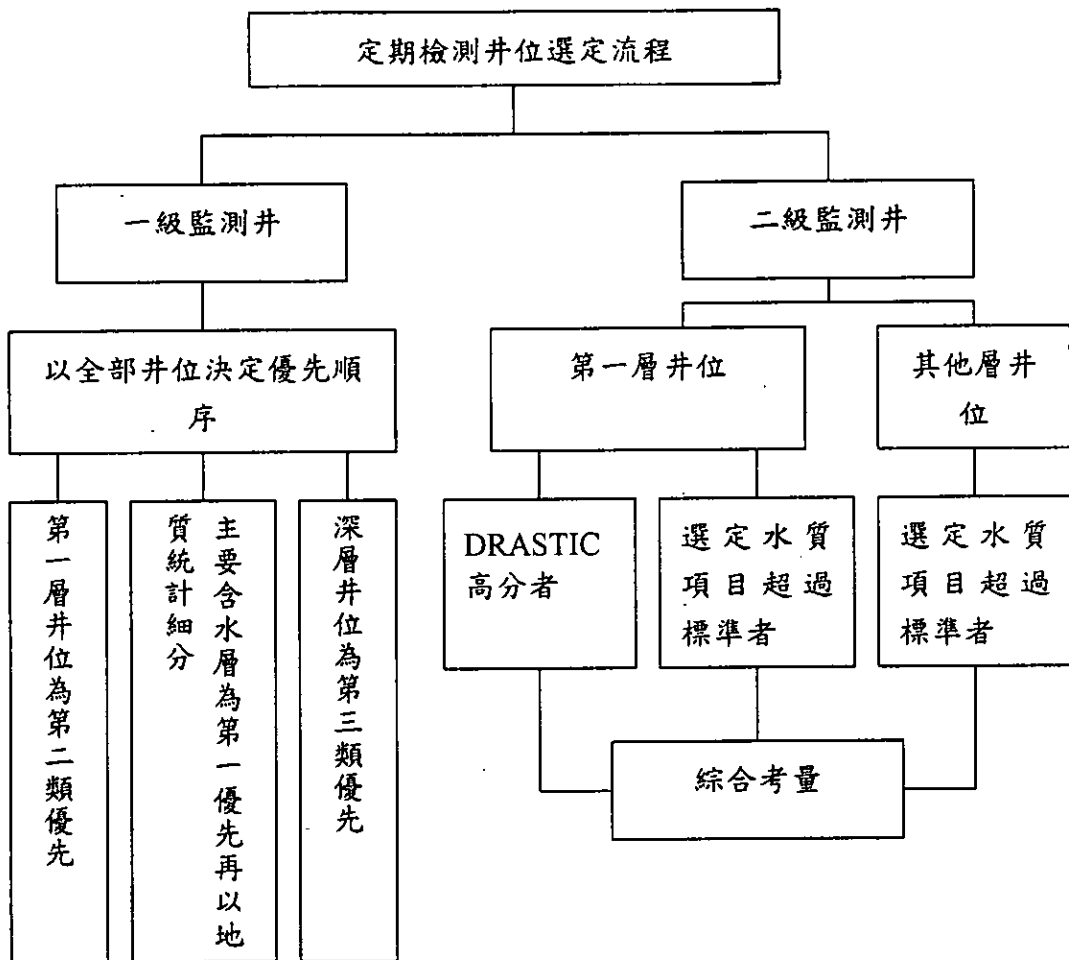


圖 2.1-5 定期檢測井選定流程

(1) 一級監測井選定

一級監測井原則上只檢測溫度、酸鹼度 (pH)、導電度 (EC)、氧化還原電位 (ORP (Eh)) 等四種能以現場儀器量測的基本水質。若是經費不足而必須在現有井中做篩選，則圖 2.1-5 所示將以各流域主要含水層中之井為第一類優先；亦即主要水層之水井優先檢測。

(2) 二級監測井選定

如圖 2.1-5 所示，二級監測井選定原則係依據各監測井位 DRASTIC 污染潛勢分析與目前各井之水質分析結果。其中 DRASTIC 由於主要反應淺層含水層受污染之潛勢，而且污染物質大多由地表向下入滲，因此原則上同一地點若有污染，淺層之井位應先反應。所以，以 DRASTIC 選定兩區域淺層（第一含水層）定期檢測井位，其他層位則以水質項目超出標準者選定。

目前濁水溪沖積扇之 2-1 及 2-2 含水層與屏東平原之 3-1 及 3-2 含水層為地下水利用之主要含水層。而一般抽水井之濾管全開，因此較淺之含水層的水也為民眾所利用。至於主要含水層以下之含水層因深度較深，根據一般資料顯示，尚未被廣泛抽水，且受污染的可能性較低。所以，目前之第二級監測井選定侷限於兩流域之主要含水層的監測井。

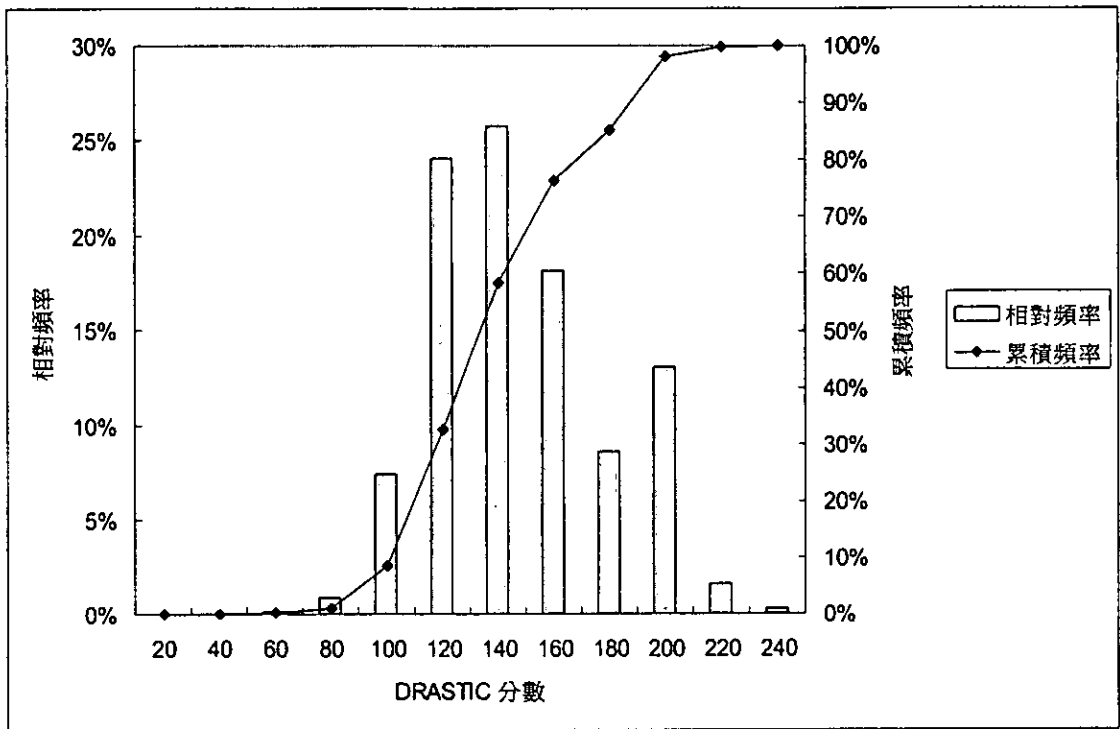
根據 DRASTIC 污染潛勢分析的結果，濁水溪沖積扇與屏東平原的污染潛勢分數分佈。其統計分佈圖表如圖 2.1-6 圖 2.1-7 及表 2.1-13 表 2.1-14 所示。其中顯示屏東平原之污染潛勢較濁水溪沖積扇高出許多。

表 2.1-13 濁水溪沖積扇與屏東平原 DRASTIC 分數分佈表

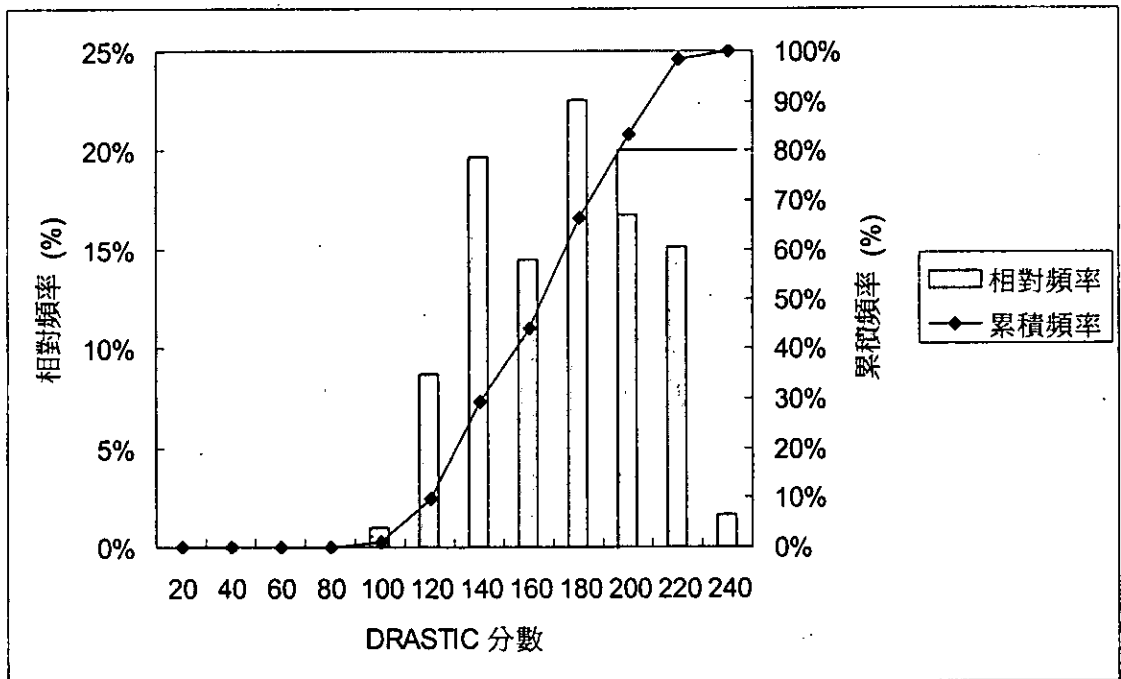
分數	分佈百分比		
	濁水溪沖積扇	屏東平原	整體
0-40	0.00%	0.00%	0.00%
40-60	0.14%	.00%	0.10%
60-80	0.86%	.00%	0.60%
80-100	7.45%	.97%	5.46%
100-120	24.07%	8.71%	19.35%
120-140	25.79%	19.68%	23.91%
140-160	18.19%	14.52%	17.06%
160-180	8.60%	22.58%	12.90%
180-200	13.04%	16.77%	14.19%
200-220	1.58%	15.16%	5.75%
220-240	0.29%	1.61%	0.69%

表 2.1-14 濁水溪沖積扇與屏東平原 DRASTIC 分數統計摘要

	濁水溪	屏東	整體
平均數	138.7292	164.6355	146.6964
標準誤	1.165853	1.791647	1.04705
中間值	132	166	142
眾數	125	158	180
標準差	30.80148	31.5452	33.2428
變異數	948.7315	995.0997	1105.084
峰度	-0.57882	-0.96702	-0.79947
偏態	0.37293	-0.10266	0.237379
範圍	164	130	169
最小值	57	96	57
最大值	221	226	226
總和	96833	51037	147870
個數	698	310	1008



(a) 濁水溪沖積扇 DRASTIC 分數統計分佈圖



(b) 屏東平原 DRASTIC 分數統計分佈圖

圖 2.1-6 濁水溪沖積扇與屏東平原個別 DRASTIC 分數統計分佈圖

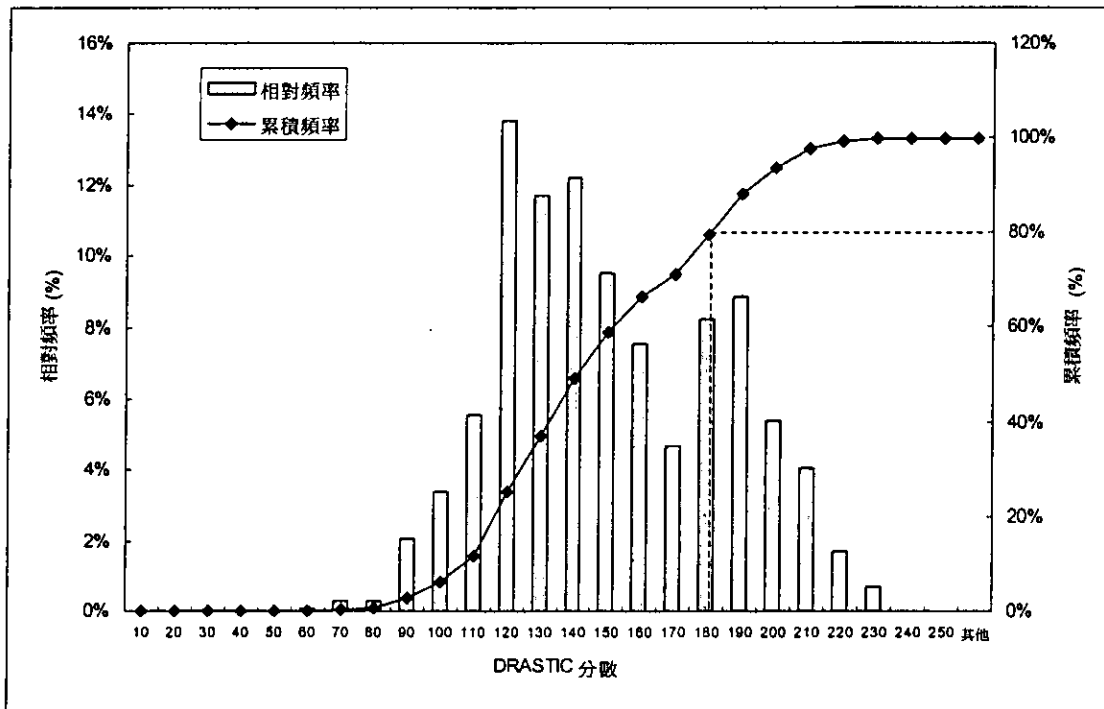


圖 2.1-7 濁水溪沖積扇與屏東平原整體 DRASTIC 分數統計分佈圖

根據這些結果，選擇以 DRASTIC 分數位居最高 20% 區位內之監測井為第二級監測對象。對應之濁水溪沖積扇與屏東平原兩處整體 DRASTIC 分數門檻為 180。如此選定濁水溪沖積扇 9 口與屏東平原 11 口，分別佔濁水溪沖積扇與屏東平原監測井之總數之 4.81% 與 8.66%。合計選出 20 口監測井，佔總監測井數 314 口之 6.37%。所選定之淺層含水層監測井如表 2.1-15 所列。

表 2.1-15 濁水溪沖積扇與屏東平原以 DRASTIC 分數選取井位一覽表

濁水溪沖積扇	屏東平原
線西、田尾、田中、柑園、新光、新民、西螺、荊桐、六合	高樹、鹽埔、建興、萬隆、餉潭、枋寮、瑪家、海豐、清溪、潮寮、潮洲
共9口	共11口

根據背景水質調查結果，水質超出舊有之台灣省自來水與灌溉水標準者為數眾多。而且主要的項目為氨氮、大腸菌數、酸鹼度(pH)、導電度(EC)、總溶解固體(TDS)五項。但為配合未來可能頒佈之地下水體分類標準與本計畫第二級監測所依據的飲用水水源標準 (I)，並綜合水質指標研討會時的結論，因此利用來檢討水質異常狀況的準則為：

- 氨氮<1.0 ppm
- 大腸菌數<50
- pH=6.5-8.5
- 導電度和總溶解固體合併考量，以導電度低於 2000 m/cm 為準。

根據上述所得到的各監測井結果如表 2.1-16。在數量上的統計如表 2.1-17。

表 2.1-16 濁水溪沖積扇與屏東平原監測井水質檢測超出標準井位一覽表

濁水溪	含水層1	含水層2-1
氮氮(>1.0 ppm)	新光、觸口、鯉魚、舊庄、豐榮、海園、明德、九隆、安和、文昌、東榮、溫厝、虎溪、線西、洛津、三和、花壇、田尾、東光、合興	溪洲、後安、北港、新光、新民、觸口、鯉魚、東光、花壇、瓊埔、舊庄、文昌、宜梧、東石、水林、大溝、安南、嘉興、潭墘、崙子、蔡厝、元長、漢寶、好修、安和、芳苑、國聖
大腸菌(>50)	芳草、香田、明德、舊庄	虎溪、虎尾、舊庄
EC(>2000)	海園、文昌	瓊埔、宜梧
pH(<6.5)	柑園、崁腳、三和、古坑、石榴	崁腳、大溝、水林

屏東	含水層1	含水層2
氮氮(>1.0 ppm)	永芳、海豐、東港、大嚮、德興、港東、新埤、潮洲、林園、崎峰	潮州、東港、大嚮
EC(>2000)	林園、崎峰、東港、港東	崎峰、東港、大潭
pH(<6.5)	老埤	

表 2.1-17 濁水溪沖積扇與屏東平原監測井水質檢測超出標準井位數量統計表

(a) 濁水溪沖積扇

	含水層1		含水層2	
濁水溪	wells	percentage	wells	percentage
氮氮(>1.0 ppm)	20	10.70%	27	14.44%
大腸菌(>50)	4	2.14%	3	1.60%
EC(>2000)	2	1.07%	2	1.07%
pH(<6.5)	5	2.67%	3	1.60%
總計	27	14.44%	30	16.04%

(b) 屏東平原

水質超出標準	含水層1		含水層2	
屏東	wells	percentage	wells	percentage
氮氮(>1.0 ppm)	10	7.87%	6	4.72%
EC(>2000)	4	3.15%	3	2.36%
pH(<6.5)	1	0.79%	0	0.00%
總計	11	8.66%	6	4.72%

這些水質有明顯異常的監測井中，位於 DRASTIC 分數 180 以上區位的濁水溪沖積扇 4 口與屏東平原 2 口。因此最後第二級監測井總數濁水溪沖積扇 62 口與屏東平原 26 口，分別佔該地區監測井總數之 33.16%及 20.47%。合計 88 口，為總監測井 314 口的 28.03%。

2、定期(一、二級監測)監測井級別變化原則

目前選定的第二級監測井係依據 DRASTIC 污染潛勢分析結果與背景水質分析結果研判選定。未來如何利用第一級監測之基本水質資料來認定可能的異常狀況而斷定必須躍升級監測，是很重要的問題。監測井級別修正之流程如圖 2.1-8 所示。

首先，第一級監測井之數量減少方式，可依據後續三至四年的監測結果做地質統計分析，根據其結果，可以選定優先排除之監測井。但建議最好維持每口井在年度維護抽水作業時持續監測。

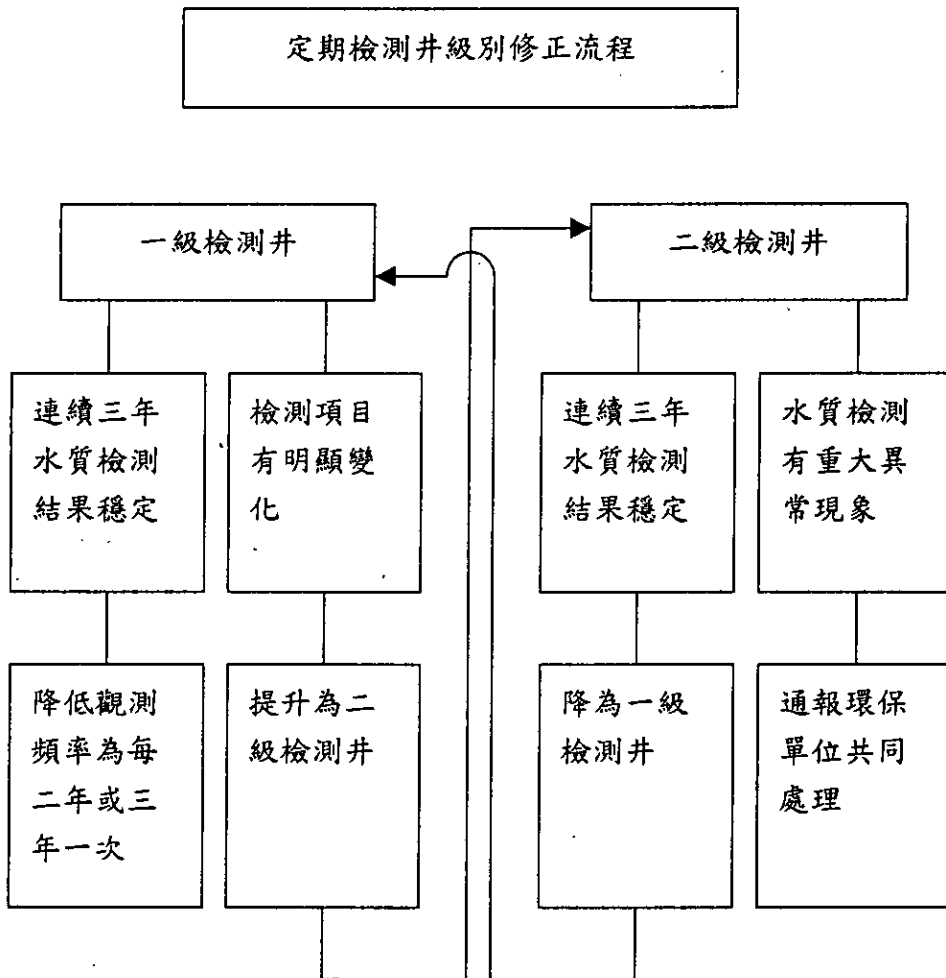


圖 2.1-8 定期檢測井級別改變流程圖

(1)降級

首先，由現有之第二級監測井降級至第一級監測的準則比較簡單。只要針對 DRASTIC 選定之第二級監測井，因為代表較易受污染的地下水體，因此不考慮降級。但是監測井數目上可以減少。未來應該利用連續二至三年以上，也就是四至六筆以上的資料做地質統計分析，選定可以優先降級者。對於因為背景水質異常而列為第二級監測井者，若後續連續兩次監測顯示水質項目皆符合標準，且其他的項目沒有太大變動的狀況，則考慮恢復至第一級監測。

(2)升級

第一級監測井升級，因為基本水質項目只有 pH、ORP(Eh)、導電度(EC)、溫度等，因此很難判定污染狀況。但是倘若水質有重大變化，則可以間接顯示出來。建議以未來三年以上的時間建立這些監測井基本水質項目的資料，作為爾後判斷的依據。由於國外法令與文獻資料中均未記載相關的作法，因此初步訂定當各基本水質項目有急遽變化或明顯持續變化時，將監測提升至第二級。導電度與急遽變化的判斷標準暫訂為超過前三次平均值之 20%，明顯持續變化的標準訂為變化率為 5%。

以目前的基本水質項目而言，pH 值發生急遽變化的可能性較低，因為其定義為氫離子濃度之對數值，且土壤與地下水本身具有一定程度的緩衝能力，所以反應較不明顯。所以建議 pH 值的急遽變化的判斷標準暫訂為超過前三次平均值之 5%，明顯持續變化的標準訂為變化率為 2%。這個建議準則，有待未來深入研究詳加探討。此外，若某第一級監測井鄰近有重大產業變革，如設立工業區等行為，則應該將監測層級提升，以便密切觀察該行為對地下水水質之影響。

地下水質變化的研判，除了水質本身的變化以外，還有許多包括氣候、產業型態變化等等綜合性的考量，因此建議未來能夠由專人負責水質資料之分析與管理，以利對水質狀況做出最佳之判斷與建議。

3、定期(一、二級監測)監測井監測項目及頻率

定期監測項目將是未來整體監測計畫的骨幹，其頻率設定為每年和每半年。定期監測的項目較少，但都可以反映出區域或局部水質的重要變化。事實上，這一部份的監測結果應該是未來對水質變化分析和水資源應用的最重要依據。

構想中的定期監測方式為：建構一個分類分級的地下水水質監測系統系統。在監測的頻率方面，區分為兩級，分級方式則主要依據利用 DRASTIC 污染潛勢分析結果以下各節的敘述歸納而得。而在監測的重點分析項目分類方面，則依據各監測井所在位置周邊的土地利用方式，真對最有可能出現的污染物類別選取分析的項目。基本上，可以區分為農業、畜牧養殖業、工業三種利用方式。因此，在目標地區中的監測井，共可以區分為九種分類分級組合。

每一井位之不同監測深度，視為獨立監測井。第一級監測頻率每年一次，第二級監測每半年一次。淺層監測井因所監測的地下水較容易且較迅速受到地表污染的影響，因此依據污染潛勢分析的結果可以判斷淺層監測井所在的位置是否較為重要。若監測井所代表的地下水層極有可能被污染，則應該將之歸屬於第二級，做比較密集的監測，以保護該處的地下水。較深含水層之監測井，則先規劃為一般監測狀況，即第一級監測。但是若於普測時發現水質有超出標準的狀況，需要做進一步評估與瞭解則採取加密監測，將監測頻率提升到第二級。

1. 第一級監測水質分析項目

第一級監測水質分析每年進行一次。因為考量要進行水質分析的井數眾多，因此水質分析以現地實施最佳。一級監測井原則上只檢測溫度、酸鹼度 (pH)、導電度 (EC)、氧化還原電位 (ORP (Eh)) 等四種能以現場儀器量測的四項基本水質，。

由於根據前人的經驗顯示，監測井最好能夠至少每年抽水一次，以便確保監測井的效能維持在正常狀況。因此，希望能配合每年一次的抽水，對所有的監測井做最基本的水質監測。

為了要使得監測儘量能夠利用有限的資源得到最大的效果，因此所選擇的項目為最基本的水質指標。但是，這些水質指標也都能夠充分反映出水質的變化，判斷異常狀況的發生。四項監測項目中，溫度是最基本的量測項目。而酸鹼度、導電度/總溶解固體、氧化還原電位的變化可以反映出地下水質的改變，並可以供推斷是否有污染物質的侵入或者僅屬於天然的變化趨勢。

這四項基本水質分析，可以利用攜帶式的小型分析儀器量測抽出水樣的水質，或者是利用可裝設多功能的水質監測探頭，在抽水後，將探頭置入監測井內量測。整個量測的時間很短，可以在一小時之內完成。

2. 第二級監測水質分析項目

第二級監測水質分析增加頻率——每半年一次。第二級的監測頻率為第一級基本水質監測的兩倍，而且分析較多。

為了要兼顧前水資源局對地下水可供利用的水質狀況判斷，以及可能的污染狀況判定兩項任務，第二級監測水質分析項目的選擇以適用的水質標準和污染水質指標同時考慮。然而，為了要和環境保護機關在權責上能夠清楚的劃分，因此水質分析項目不考慮納入數量龐大的特定個別污染物質。

根據以上的原則，第二級水質分析項目選定主要參考我國的水體

分類標準（保護人體健康基準）、飲用水水源標準（I），並包括總有機碳(TOC)、總有機鹵化物(TOX)、BOD、COD、氨氮等具有污染指標意義的項目（表 2.1-18）。這些項目仍然將依照土地利用分類而有所區分。

農業區可能發生的污染為農藥和肥料的使用造成，因此第二級監測項目中，TOC、TOX 兩項可以作為反映農藥污染的指標，而含氮化合物的分析則可反映肥料造成的污染狀況。畜牧養殖區的污染以過高的有機物質和氨氮、微生物為主，因此分析項目包含了 BOD、COD、氨氮、大腸菌數。而 TOC 不僅涵蓋了 BOD、COD，也包括其他的污染物質在內，所以和 TOX 一起包括在畜牧養殖區的分析項目內，可以對於其他類的污染作為指標。工業區可能發生的污染狀況非常多，各種不同的工廠、行號都製造不同的污染，包括重金屬類、揮發性和半揮發性有機物、強酸、強鹼、以及其他的有毒物質。因此在項目的選擇上，除了 TOC、TOX 兩項指標之外，僅能夠將飲用水水源標準（I）中包含的幾項重金屬污染物納入，而暫時不考量揮發性和半揮發性有機物和其他的重金屬。雖然如此，但是 TOC、TOX 兩項指標仍可以有效地反映出有機物質污染狀況。

此外，針對背景水質調查中發現特定項目有超過適用水質標準或有明顯地上升趨勢時，應該將該井納入第二級監測。在監測項目中並應該增列這些特定的項目，以便評估水質變化的趨勢和判斷地下水是否有被污染的狀況。

至於各井位檢測分類的判定，則利用土地利用圖，以該井周圍約 500 m 半徑的範圍來考量。但是因為工業和畜牧養殖業所造成可能的污染較農林業嚴重，因此即使在範圍內主要為農林地，但涵蓋有 5% 以上的面積為工業或畜牧養殖業型態，則該井位將劃歸為工業或畜牧養殖業類檢測。

表 2.1-18 分級分類監測簡表

	第一級 (每年)	第二級 (每半年)
農業(A)	溫度、pH、EC、ORP (Eh)	增加 TOC、TOX、亞硝酸鹽氮、硝酸鹽氮
畜牧養殖(H)	同上	增加 TOC、TOX、BOD、COD、大腸菌類數、氨氮
工業(I)	同上	增加 TOC、TOX、氯鹽、硫酸鹽、酚、鈉、錳、鎘、鉻、汞、砷、鉛、硒

當第二級監測顯示出地下水遭到污染時，基於水資源局與環保署之間權責劃分的考量，應由水資源局行文環保署，由環保署進行評估與（或）進一步監測，以便對污染狀況做深入的瞭解。

而於濁水溪沖積扇及屏東平原建議第二級檢測之監測井與檢測分類項目及頻率如表 2.1-19 所列。

表 2.1-19 第二級檢測之監測井與檢測分類項目一覽表

(a) 濁水溪沖積扇

檢測分類	檢測項目	含水層 1	含水層 2-1
工業 (每半年)	溫度、pH、 EC/TDS、ORP (Eh)、TOC、TOX、 氯鹽、硫酸鹽、 酚、鈉、錳、鎘、	柑園、炭腳、古坑、田中、石榴[5]	瓊埔、炭腳[2]

	<p>鉻、汞、砷、鉛、 錳</p>		
<p>畜牧養殖 業(每半年)</p>	<p>溫度、pH、 EC/TDS、ORP (Eh)、TOC、TOX、 BOD、COD、大腸 菌類數、氨氮</p>	<p>西螺、荊桐、新 光、觸口、鯉魚、 舊庄、豐榮、海 園、明德、九隆、 安和、文昌、東 榮、溫厝、虎溪、 線西、洛津、三 和、花壇、田尾、 東光、合興、芳 草、香田、明德[25]</p>	<p>溪洲、後安、北 港、新光、新民、 觸口、鯉魚、東 光、花壇、舊庄、 文昌、宜梧、東 石、水林、大溝、 安南、嘉興、潭 墘、崙子、蔡厝、 元長、漢寶、好 修、安和、芳苑、 國聖、虎溪、虎尾 [28]</p>
<p>農業(每半 年)</p>	<p>溫度、pH、 EC/TDS、ORP (Eh)、TOC、TOX、 亞硝酸鹽氮、硝酸 鹽氮</p>	<p>新民、六合[2]</p>	<p>[0]</p>

總計	62	32	30
----	----	----	----

(b) 屏東平原

檢測分類	檢測項目	含水層 1	含水層 2
工業 (每半年)	溫度、pH、 EC/TDS、ORP (Eh)、TOC、TOX、 氯鹽、硫酸鹽、 酚、鈉、錳、鎘、 鉻、汞、砷、鉛、 硒	鹽埔、老埤[2]	[0]
畜牧養殖業 (每半年)	溫度、pH、 EC/TDS、ORP (Eh)、TOC、TOX、 BOD、COD、大腸 菌類數、氨氮	高樹、餉潭、永 芳、海豐、東港、 大嚮、德興、港 東、新埤、潮洲、 林園、崎峰、潮 寮、清溪[14]	港東、潮州、東 港、大嚮、崎峰、 大潭[6]
農業 (每半年)	溫度、pH、 EC/TDS、ORP	建興、萬隆、枋 寮、瑪家[4]	[0]

2.2 關鍵課題探討

本計畫為針對現有觀測井規劃具有代表性(同時考量水文地質和地下水水質條件)之定期地下水水質檢測方式,以期掌握區域地下水水質變化之同時,降低檢測作業所需成本,以最少之經費發揮站網之最大效益。而為達此目的,所選定之水質指標井必須能及時反應整體區域之水質狀況,以作為地下水管理及使用依據,惟為能選定「最佳」之水質指標井須先探討下列之課題:

一、本計畫水質指標井之定義

本計畫中水質指標井之功能,並不以污染預警為主要目的,而是要了解大區域當下之水質狀況及水質之長期變化,以作為水量利用管理之參考資訊。因此除能反應含水層之長期水質狀況外,於選定水質指標井更應以含水層之水量利用作為權重考量。在有限之經費限制下,以既有之井網為基礎,選定最佳之水質監測策略,包括井位及水質項目,以期在上述的限制條件下對含水層水質有最高精度之描述。

二、以何種之水質指標作為水質指標井之選定依據

現行觀測站網之水質採樣分析項目總共包含約 30 個水質項目,勢必無法運用所有水質項目來進行水質指標井之選定。較可行之評估方法為先選定數個較具代表性之水質項目作為水質指標井之選定依據。本工作團隊所評估之指標井選定方法中,多變量地質統計比傳統之單變量降低變異數法之優勢,即為可同時考慮較多之水質項目來作為水質指標井之選定依據。

由於本計畫將以多變量地質統計之方法作為選定水質指標井之依據。本工作團隊初步選定之水質項目為: EC、TDS、Cl⁻、Na⁺、Ca²⁺、

Mg、SO₄²⁻、Eh、Fe 及 Mn 等 10 個與水文地質較相關之水質項目來評估水質指標井。另外，經選定評估後之水質指標井需進行採樣分析水質項目，將以上述 10 個水質項目為基礎，再參考灌溉用水水質標準與飲用水水源水質標準之相關水質項目，在不超過目前觀測井網之分析水質項目中決定水質指標井之採樣分析項目。

三、所選定之水質指標井是否可為隨時間而變動之動態水質指標井且優缺點為何。

若在有限之經費限制下，以得到統計上區域性的精度最高為唯一考量，則可以既有之井網，設計一動態監測系統，即在固定井網下，提出動態之水質監測“行程”（何時至那一口監測井採樣），可掌握區域地下水水質變化，又能最節省成本。雖然動態水質指標井能提供較佳之監測精度，惟要選定動態水質指標井所需應用之理論較複雜，參數資料及計算量都較多，在實際應用時，有可能受限於計算量而必須將實際情況簡化。另外由於是動態水質指標井之設計，每口水質指標井之水質資料在時間上有中斷不連續之情形，而此地下水質資料於未來將要進行其它分析時，有其潛在的不方便。

採用固定之水質指標井，雖然可能無法達到較高之監測精度，惟因其每次採樣之觀測井皆固定，在實際運作時將會較簡易可行。且各口水質指標井之水質資料不會中斷，對於水質資料進行其它分析時，比較不會有資料不足或有不適用情況發生。

由於固定或動態水質指標井各有優缺點，本工作團隊認為長期而言應同時包含固定及動態水質指標井可能是較佳之組合。

四、於實行水質指標井網後，是否仍必須搭配目前現行整個觀測站網之水質監測方式

雖然經由水質指標井之選定方法評估，可選定水質指標井並可依所選水質指標井網來進行水質監測。惟對目前現行之水質監測方式（即每口觀測站網觀測井皆定期進行水質採樣分析）是否要並行，本工作團隊初步規劃水質指標井監測方式與現行之水質監測方式並行，惟現行水質監測方式之頻率應可再減少，因若只在所選定之水質指標井進行監測，將會缺乏所有觀測井在同一時刻之水質資料，而無法提供作為後續水質指標井網檢討之足夠資訊。

五、於考量水質指標井設計時，應以地下水區之各含水層整體考量

台灣地區地下水觀測網整體計畫第一期計畫自民國八十一年度至八十七年度，已完成之濁水溪沖積扇、及屏東平原而言，其水文地質架構為多層含水層所組成，而觀測站網之建置亦是一站多井之觀測方式（即一站分層觀測）。對於水質指標井選定評估時，可能仍為各含水層分別進行分析，惟最後應以各層之水質指標井選定結果，在考量水文地質架構情況下，進行三度空間之水質指標井位置檢討及整體考量。

六、如何檢驗所選出之指標井統計上於空間上及時間上之代表性

本計畫目前所應用的方法為地質統計，本身即以變數在空間上之統計相關性為理論核心，因此就統計上而言，以其為基礎所設計出的井網，在空間上的代表性本就容易掌握。本研究為充分利用目前並不充裕的水質監測資料，在以地質統計選定監測井之時，對原始資料的篩選將以能獲得最多統計樣本數為考量。

至於時間上的統計代表性，目前由於各水質項目監測次數不足，並無法做較嚴格的檢驗，本研究初步將以過去已有之不同年度水質資料為基礎，選年度並比較，該年度所有監測資料相對於指標井網之資料及其推估值間之差異，以檢驗指標井網在不同時期之代表性。以下將進一步以集合的概念對此做法進行簡單的說明：令 S 為以往某一年度所有之監測資料， I 為該年度於指標井網上之監測資料，則有 $I \subset S$ ，令 $S' = S - I$ ，則 S' 為該年度除了指標井網外其他站井之監測資料。檢驗的方式則為先應用地質統計之方法，以 I 的資料推估得與 S' 相同位置，但數值不同的推估資料並令其為 I' ，接著再比較分析 I' 相對 S' 以及 $I' \cup I$ 相對 S 間，統計上的差異。

第三章 工作方法及步驟

本計畫針對觀測井指標井的建立進行資料收集，且進行指標井建立評估技術的發展，主要希望對觀測井指標井建立方法進行分析確認，並進而發展具代表性指標井建立評估方法，其整體研究流程如下所示：

一、基本資料收集

收集觀測站網水質資料、水文地質架構、水文地質參數資料及其他相關研究報告與資料供後續分析之用。

二、指標井相關資料收集

蒐集目前國內外對於地下水指標井的評估與建立程序與方法以及案例，以供指標井方法選定評估及可行方案之參考。

三、關鍵課題探討

由本計畫為針對現有觀測井規劃具有代表性（同時考量水文地質和地下水水質條件）之定期地下水水質檢測方式，以期掌握區域地下水水質變化之同時，降低檢測作業所需成本，以期利用最少之經費發揮站網之最大效益。而為達此目的，如 2.2 節所示，應就水質指標井之選定時可能需考量重點先行探討，而經由關鍵課題探討後，同時亦提供後續工作執行時之參考。

四、指標井選定方法評估

此工作項目為本計畫之核心，本工作團隊將就所收集之各種理論方法進行了解及評估。於計畫中，將分別對單變量降低變異數法、多變量地質統計及卡門濾波理論進行應用於水質指標井選定之可行性及優劣點。

首先，本計畫將會對各上述理論方法作一介紹，並分析各理論方法運用於選定指標井之流程，配合各理論方法之流程步驟，即可了解各理論方法所需之參數資訊及運算量與記憶體之要求。最後再根據各方法之流程及所需參數之實際可行性，及所選定指標井代表之意義，決定一理論方法來進行指標井選定工作。

五、可行方案評估

本計畫選定屏東平原作為實際案例，配合工作項目四、之方法評估結果，以較可行之方法所選定指標井為基礎，再配合實際操作可行性等執行層面相關考量，提出較可行之方案。

六、模擬驗證

利用工作項目五、所提出之可行方案，配合本計畫所收集之屏東平原歷年水質資料，進行所選定方案，於空間上及時間上代表性之模擬驗證。

於指標井選定之驗證，利用觀測站網水質資料分析所得的監測井位置排序，可以利用歷年的水質資料以及在計畫執行期限中新近完成的水質資料來進行驗證，而模擬驗證之方法如 2.2 節所示。

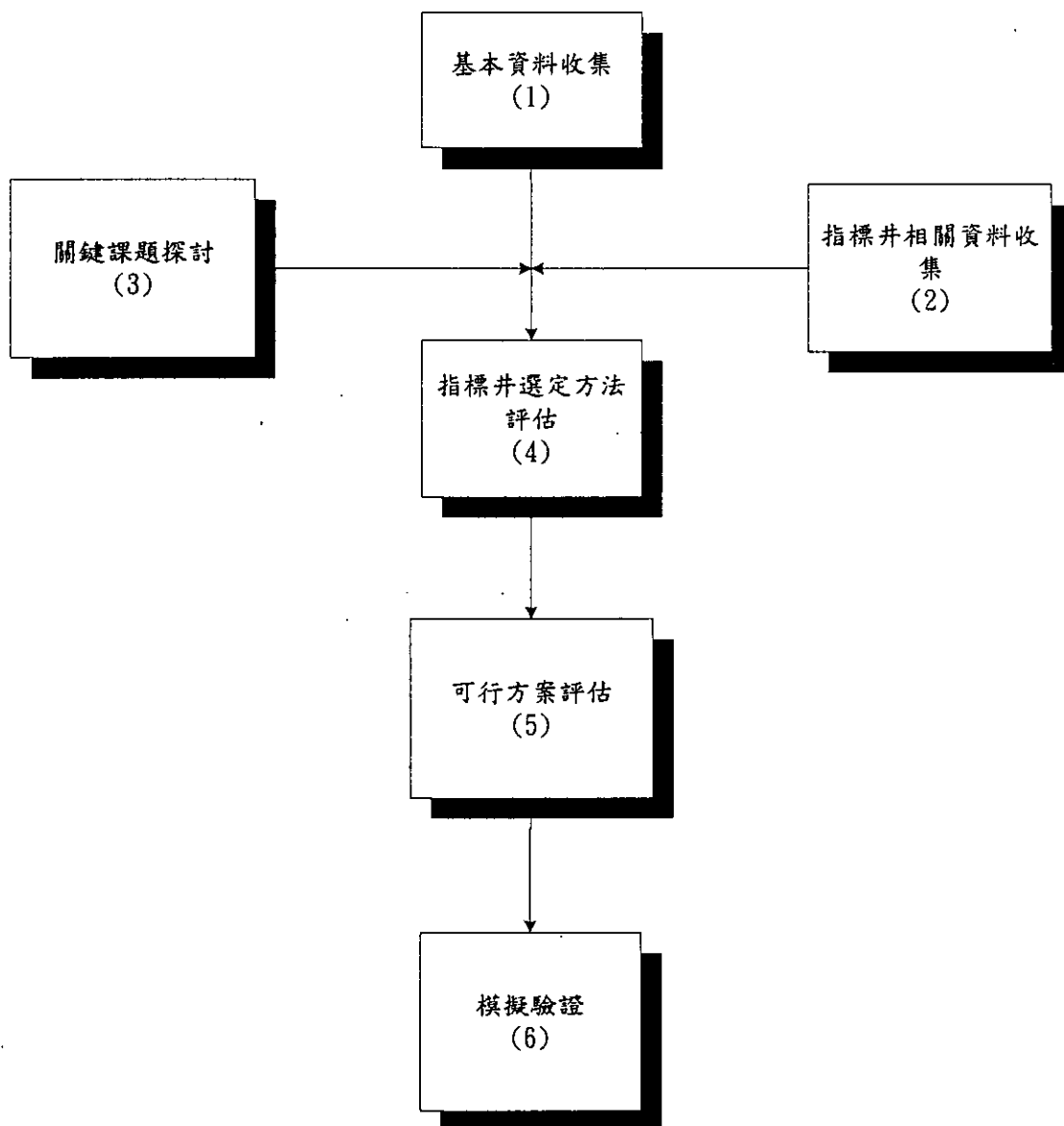


圖 3-1 計畫整體分析流程圖

第四章 水質指標井相關資料蒐集分析

4.1 國外相關案例蒐集分析

關於國外之相關站網案例之分析，將區分為地下水位站網、地下水質站網及其它站網(空氣站網)等案例進行說明：

4.1.1 地下水位觀測站網案例

一、Bangkok 水位觀測站網評估 (Gangopadhyay et al.;2001, “Evaluation of Ground Water Monitoring Network by Principal Component Analysis”, GROUND WATER)

(一)、研究目的

本參考案例出處為 Gangopadhyay et al.;2001，其研究目的為運用多變量分析中之主要因子分析方法(Principal component analysis)，來決定觀測站網中那些觀測井可提供主要之地下水位變化之資訊，並依此理論發展出一新的站網評估方法；亦在即有之觀測站網中，以最少之成本，只需觀測那些觀測井，即可獲得最多之地下水位資訊。其研究實際應用在 Bangkok 地區之含水層水位觀測站網優選。

(二)、研究方法步驟

本案例主要運用運用多變量分析中之主要因子分析方法，其概念為：若由 P 口觀測井收集地下水位資料，則各觀測井收集之水位資料應具有相關性，且其中一口所收集之水位資料之部份資訊將可由其餘 P-1 口觀測井之水位資料中獲得。而主要因子分析在此研究之應用即是推估各井之水位資料相關性，以減少需要進行水位觀測之觀測井數目。其方法其運用之步驟如下：

- 1、決定主要因子分析之搜尋半徑 R
- 2、列出位於以某口觀測井 i 為中心，搜尋半徑內之所有觀測井，共 P 口。
- 3、即以此 P 口井，進行主要因子分析，並得出因子負載矩陣(the factor loading matrix)。
- 4、配合因子負載矩陣，及選定主要觀測井(Principal well)門檻，即可選出以觀測井 i 為中心，搜尋半徑內之主要觀測井為那幾口。重複上述之步驟 1~步驟 4，將會因選定作為搜尋半徑中心之觀測井的不同，而有各種不同組合及主要觀測井分析結果。
- 5、決定觀測井之排序。以某觀測井被選為主要觀測井之次數與被選入進行主要因子分析之次數兩者之比值，作為所有觀測井之排序。比值愈高，代表此觀測井於解釋地下水位變動時，所佔重要性愈高。

(三)、分析案例

1、案例分析結果

此方法實際應用在 Bangkok 地區之含水層水位觀測站網優選，在分析時，以各口觀測井為變數(variables)，1978 年~1990 年之歷年平均地下水位為觀測值(samples)。由圖 4.1-1，於含水層 PD 層中，共有 86 口水位觀測井。表 4.1-1 為於完成步驟 4 後，即可以真正觀測值與以搜尋半徑內之選定主要觀測井(principal wells)進行線性迴歸之推估水位作一比較。而表 4.1-2 為觀測值、以搜尋半徑內選定主要觀測井進行線性迴歸之推估水位及以搜尋半徑內所有觀測井進行線性迴歸之推估水位三者進行比較，由表中可看出主要觀測井之水位資訊已大致可代表搜尋半徑內之水位變化。

最後，依步驟 5，即可決定此 86 口觀測井之排序(如表 4.1-3)，而其中最後之 13 口觀測井因作為邊界水位觀測井，故不給予排序(rank)。而於表 4.1-3 中，較高之排序值，代表此觀測井能涵蓋較多的地下水位變化資訊，亦即代表此觀測井愈重要。

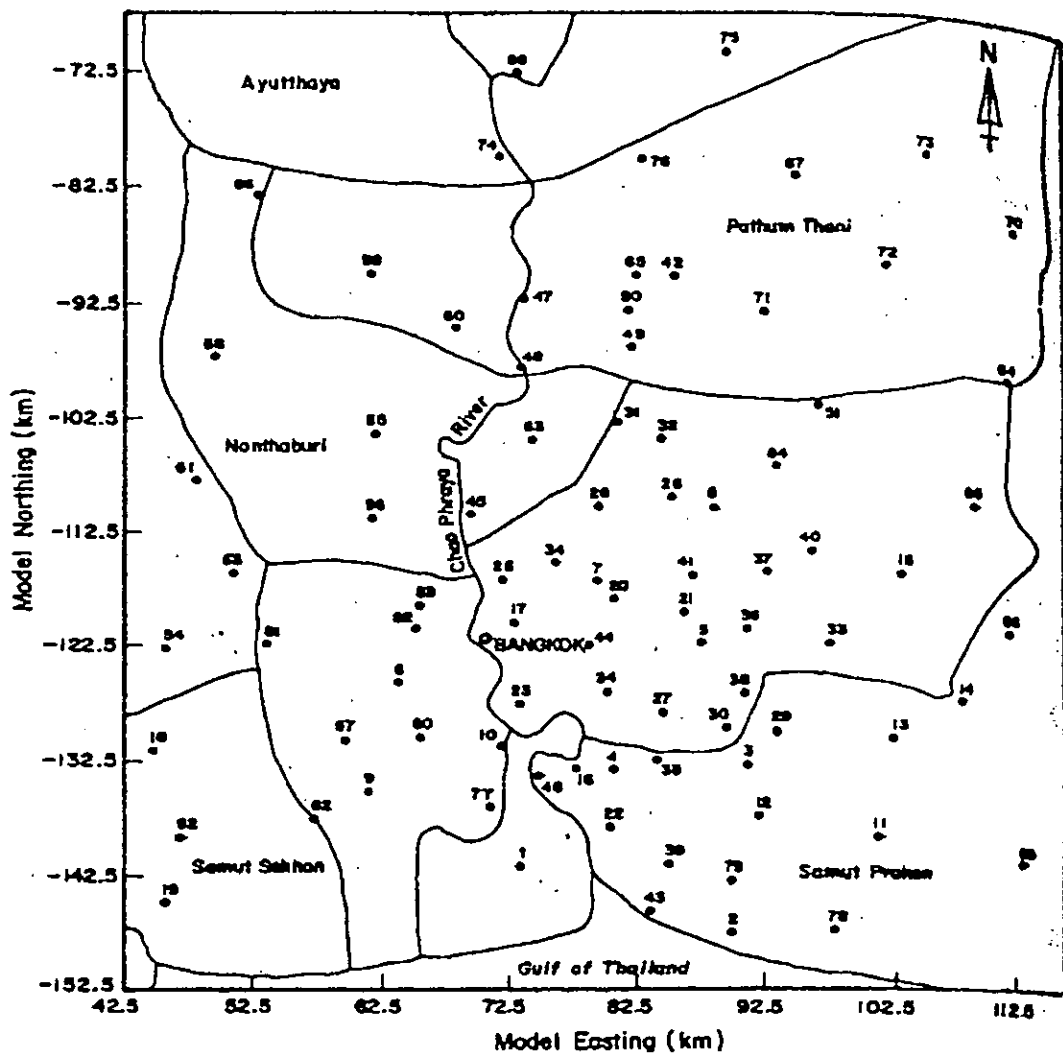


圖 4.1-1 Bangkok 水位觀測井分佈圖(PD 含水層)

表 4.1-1 觀測值與主要觀測井(Principal PD Well)之推估水位比較

Table 3 Comparison of Observed and Predicted Water Levels for PD Wells			
PD Well Number	Water Level in 1988 (m below MSL)		Principal PD Well Number(s) Used in Prediction
	Observed	Predicted	
13	37.15	37.75	14
24	30.82	30.63	23, 16, 5, 46, 30
29	33.72	33.56	30, 28, 27
32	24.86	24.79	26, 8, 28, 49, 84
46	30.82	30.73	10, 23, 1, 24
48	19.61	20.17	63, 50

表 4.1-2 觀測值與主要觀測井及選定半徑內所有觀測井推估值比較

Table 4 Comparison of Observed and Predicted Water Level Using Principal Wells and Wells Within the Search Radius			
PD Well Number	Water Level in 1988 (m below MSL)		
	Observed	Predicted Using	
		Principal Wells (Number)	Wells Within Search Radius (Number)
32	24.86	24.79 (3)	24.83 (7)
48	19.61	20.17 (2)	19.56 (6)

表 4.1-3 Bangkok 水位觀測井分佈圖(PD 含水層)之排序結果

Serial Number (1)	PD Well Number (2)	Number of Times as Principal Well (3)	Number of Times as a Close Well (4)	Rank (Col 3/Col 4) (5)
1	86	1	1	1.000
2	74	1	1	1.000
3	68	1	1	1.000
4	61	1	1	1.000
5	56	3	3	1.000
6	55	1	1	1.000
7	51	2	2	1.000
8	42	4	4	1.000
9	1	4	4	1.000
10	26	8	9	0.889
11	8	7	8	0.875
12	38	7	9	0.778
13	65	3	4	0.750
14	34	5	7	0.714
15	31	5	7	0.714
16	6	5	7	0.714
17	46	7	10	0.700
18	28	7	10	0.700
19	23	7	10	0.700
20	84	4	6	0.667
21	48	4	6	0.667
22	25	6	9	0.667
23	17	6	9	0.667
24	15	2	3	0.667
25	82	3	5	0.600
26	36	6	10	0.600
27	30	6	10	0.600
28	27	7	12	0.583
29	40	4	7	0.571
30	39	4	7	0.571
31	33	4	7	0.571
32	3	4	7	0.571
33	83	3	6	0.500
34	81	1	2	0.500
35	62	1	2	0.500

Serial Number (1)	PD Well Number (2)	Number of Times as Principal Well (3)	Number of Times as a Close Well (4)	Rank (Col 3/Col 4) (5)
36	57	2	4	0.500
37	44	5	10	0.500
38	43	2	4	0.500
39	29	5	10	0.500
40	24	7	14	0.500
41	14	1	2	0.500
42	10	4	8	0.500
43	2	2	4	0.500
44	32	3	7	0.429
45	35	5	12	0.417
46	5	5	12	0.417
47	63	2	5	0.400
48	45	2	5	0.400
49	16	4	10	0.400
50	9	2	5	0.400
51	4	4	10	0.400
52	77	3	8	0.375
53	22	3	8	0.375
54	7	4	11	0.364
55	79	2	6	0.333
56	78	1	3	0.333
57	60	1	3	0.333
58	53	1	3	0.333
59	50	2	6	0.333
60	37	3	9	0.333
61	49	2	7	0.286
62	21	3	11	0.273
63	20	3	11	0.273
64	80	2	8	0.250
65	13	1	4	0.250
66	47	1	5	0.200
67	12	1	7	0.143
68	85	0	1	0.000
69	71	0	2	0.000
70	59	0	1	0.000
71	54	0	3	0.000
72	41	0	10	0.000
73	11	0	3	0.000
74	76	0	0	Boundary well
75	75	0	0	Boundary well
76	73	0	1	Boundary well
77	72	0	0	Boundary well
78	70	0	1	Boundary well
79	69	0	0	Boundary well
80	67	0	0	Boundary well
81	66	0	0	Boundary well
82	64	0	0	Boundary well
83	58	0	0	Boundary well
84	52	0	2	Boundary well
85	19	0	1	Boundary well
86	18	0	2	Boundary well

2、分析結果比較

雖然，經由此方法已決定了 86 口觀測井之排序，但仍尚未決定需要留下多少口觀測井持續進行觀測。在此案例應用上，以 CV 值 (Coefficient of variation) 來衡量觀測站網之不確定性。其定義如下：

$$CV = \text{水位標準偏差} / \text{水位平均值}$$

如表 4.1-4 所示，在不同排序值之限制下，有各種井數不同之觀測站網產生，而隨著站網井數之遞減，其 CV 值將會增加。因此 CV 值可提供決策者作為決定站網井數之參考資訊，當 CV 值不再隨井數之增加而明顯降低時，應可為一適當之井數。如由圖 4.1-2 所示，於 56 口井時，應是此案例一適當之選擇。

表 4.1-4 各種限制(Cut off)下之觀測井網水位資訊統計

Table 6 Calculation of Potentiometric Head Statistics for Years 1978-1990																
Group	Cutoff (Number of Wells)	Statistics	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	Average
1	0.0 (86)	E[h]	17.97	19.6	20.95	21.84	22.17	22.24	21.81	20.87	20.75	21.71	22.45	23.41	23.73	—
		SD[h]	10.37	10.39	9.94	9.88	9.55	9.28	8.73	8.02	7.83	8.16	8.37	9.15	9.4	—
		CV[h]	0.577	0.530	0.474	0.452	0.431	0.417	0.400	0.384	0.377	0.376	0.373	0.391	0.396	0.429
		Error(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—
2	0.1 (80)	E[h]	18.43	20.04	21.34	22.2	22.5	22.54	22.09	21.11	20.99	21.95	22.67	23.64	23.95	—
		SD[h]	10.5	10.53	10.04	9.98	9.66	9.39	8.85	8.15	7.95	8.29	8.51	9.32	9.56	—
		CV[h]	0.570	0.525	0.470	0.450	0.429	0.417	0.401	0.386	0.379	0.378	0.375	0.394	0.399	0.429
		Error(%)	-1.27	-0.88	-0.84	-0.63	-0.33	-0.16	0.09	0.47	0.37	0.48	0.69	0.87	0.77	-0.12
3	0.2 (79)	E[h]	18.36	19.97	21.22	22.07	22.37	22.4	21.96	20.97	20.86	21.81	22.52	23.5	23.79	—
		SD[h]	10.55	10.58	10.04	9.98	9.66	9.36	8.83	8.1	7.91	8.26	8.45	9.29	9.52	—
		CV[h]	0.575	0.530	0.473	0.452	0.432	0.418	0.402	0.386	0.379	0.379	0.375	0.395	0.400	0.430
		Error(%)	-0.43	-0.06	-0.28	-0.04	0.25	0.14	0.45	0.52	0.49	0.76	0.64	1.14	1.02	0.30
4	0.3 (73)	E[h]	18.21	19.79	20.84	21.69	21.99	22.02	21.61	20.64	20.56	21.5	22.26	23.24	23.54	—
		SD[h]	10.78	10.82	10.18	10.11	9.78	9.47	8.94	8.19	7.99	8.36	8.58	9.44	9.65	—
		CV[h]	0.592	0.547	0.488	0.466	0.445	0.430	0.414	0.397	0.389	0.389	0.383	0.406	0.410	0.443
		Error(%)	2.58	3.14	2.96	3.04	3.25	3.07	3.35	3.26	2.99	3.45	3.38	3.92	3.49	3.19
5	0.4 (64)	E[h]	18.01	19.56	20.59	21.45	21.75	21.78	21.36	20.4	20.34	21.31	22.07	23.13	23.43	—
		SD[h]	11.15	11.19	10.52	10.46	10.11	9.82	9.26	8.49	8.27	8.7	8.92	9.89	10.1	—
		CV[h]	0.619	0.572	0.511	0.488	0.465	0.451	0.434	0.416	0.407	0.408	0.404	0.428	0.431	0.464
		Error(%)	7.28	7.92	7.69	7.80	8.01	8.05	8.31	8.30	7.75	8.62	8.41	9.40	8.82	8.13
6	0.5 (56)	E[h]	16.74	18.22	19.37	20.25	20.6	20.69	20.34	19.52	19.49	20.48	21.26	22.51	22.86	—
		SD[h]	10.93	10.95	10.37	10.31	10.02	9.76	9.23	8.54	8.29	8.78	9.05	10.26	10.51	—
		CV[h]	0.653	0.601	0.535	0.509	0.486	0.472	0.454	0.438	0.425	0.429	0.426	0.456	0.460	0.488
		Error(%)	13.14	13.37	12.84	12.55	12.92	13.05	13.37	13.85	12.72	14.06	14.18	16.61	16.06	13.68
7	0.6 (40)	E[h]	13.9	15.41	16.59	17.45	17.9	18.05	17.8	17.1	17.26	18.06	18.8	19.96	20.23	—
		SD[h]	10.7	10.83	10.49	10.4	10.15	9.87	9.36	8.65	8.51	8.87	9.15	10.19	10.32	—
		CV[h]	0.770	0.703	0.632	0.596	0.567	0.547	0.526	0.506	0.493	0.491	0.487	0.511	0.510	0.564
		Error(%)	33.39	32.58	33.27	31.74	31.64	31.05	31.37	31.63	30.66	30.67	30.54	30.62	28.78	31.51
8	0.7 (32)	E[h]	11.95	13.43	14.54	15.34	15.81	16	15.88	15.32	15.73	16.37	17.12	18.21	18.44	—
		SD[h]	10.62	10.87	10.52	10.36	10.12	9.82	9.37	8.67	8.74	8.97	9.27	10.29	10.29	—
		CV[h]	0.889	0.809	0.724	0.675	0.640	0.614	0.590	0.566	0.556	0.548	0.541	0.565	0.558	0.637
		Error(%)	54.00	52.68	52.49	49.29	48.60	47.09	47.41	47.27	47.24	45.79	45.23	44.57	40.87	48.31
9	0.8 (24)	E[h]	7.81	9.18	10.51	11.41	12.04	12.34	12.44	12.21	12.91	13.4	14.13	15.14	15.46	—
		SD[h]	7.6	8.03	8.23	8.23	8.25	8.06	7.81	7.38	7.92	8.1	8.51	9.37	9.33	—
		CV[h]	0.973	0.875	0.783	0.721	0.685	0.653	0.628	0.604	0.613	0.604	0.602	0.619	0.603	0.690
		Error(%)	68.63	65.01	65.04	59.44	59.07	56.53	56.85	57.29	62.58	60.82	61.54	58.34	52.35	60.68
10	0.9 (22)	E[h]	6.61	7.91	9.19	10.09	10.68	11.11	11.3	11.2	12.06	12.54	13.25	14.26	14.61	—
		SD[h]	6.72	7.09	7.23	7.24	7.17	7.22	7.1	6.84	7.71	7.89	8.33	9.27	9.26	—
		CV[h]	1.017	0.896	0.787	0.718	0.671	0.650	0.628	0.611	0.639	0.629	0.629	0.650	0.634	0.705
		Error(%)	76.17	69.09	65.81	58.61	55.85	55.74	56.97	58.92	69.42	67.40	68.62	66.32	60.00	64.14
11	1.0 (22)	E[h]	6.61	7.91	9.19	10.09	10.68	11.11	11.3	11.2	12.06	12.54	13.25	14.26	14.61	—
		SD[h]	6.72	7.09	7.23	7.24	7.17	7.22	7.1	6.84	7.71	7.89	8.33	9.27	9.26	—
		CV[h]	1.017	0.896	0.787	0.718	0.671	0.650	0.628	0.611	0.639	0.629	0.629	0.650	0.634	0.705
		Error(%)	76.17	69.09	65.81	58.61	55.85	55.74	56.97	58.92	69.42	67.40	68.62	66.32	60.00	64.14

E[h], SD[h], and CV[h] are the mean, standard deviation, and coefficient of variation of potentiometric head, respectively.
E[h] and SD[h] are in meters; potentiometric head values are meters below MSL. The error is the percentage deviation of the CV[h] values from the CV[h] values of group 1.

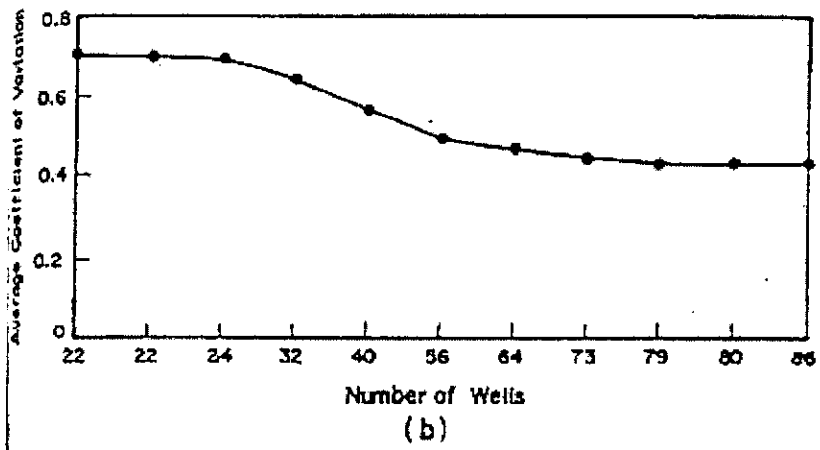
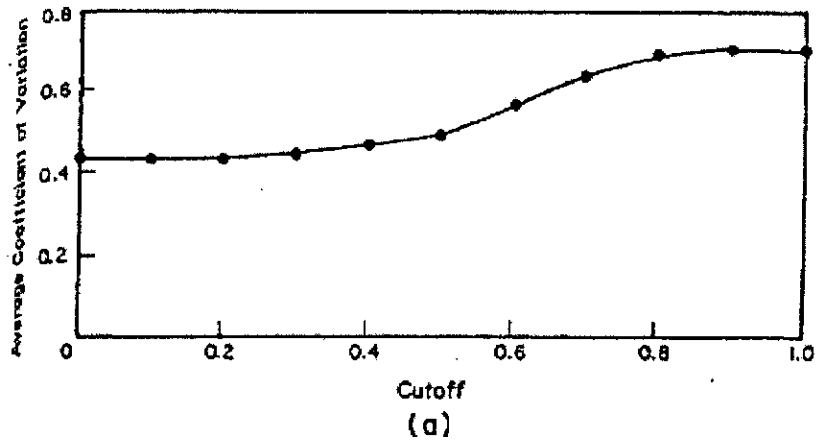


Figure 3. Plot of average coefficient of variation with (a) cutoff, and (b) number of wells.

圖 4.1-2 CV 值在不同限制(Cut off)及井數下之關係

二、Yolo County Basin, Calif 地下水觀測站網評估(Fethi et al.; 1994, “Multivariate Geostatistical Design of Ground- Water Monitoring Networks”, Journal of water Resources planning and management,ASCE)

(一)、研究目的

本參考案例之作者為 Fethi et al.;1994，其研究目的為運用多變量地質統計之聯合克利金方法(Cokriging)，以推估誤差最低為目標，來設計觀測多項地下水參數之地下水站網。其研究應用 Yolo County Basin, California 地區之觀測導水係數(T)與單位洩降出水量(Specific capacity, SC)之觀測站網。最後，並與單變數之克利金方法(Univariate kriging)之運用各別參數推估之站網比較兩者之優劣，證明運用多變量地質統計之聯合克利金方法(Cokriging)所設計之站網為較佳且較為經濟。

(二)、研究方法步驟

- 1、先根據各地下水參數之已有之觀測值，建立變異元(Variogram)及各參數間之複變異元(Cross variogram)。而所建立之變異元及各參數間之複變異元，可作為推估空間上變異程度之函數。
- 2、利用聯合克利金方法可估算出各種站網分佈設計之推估誤差的特性，作為評估站網設計優劣之基準。
- 3、運用 Branch and Bound 之最佳化搜尋方法，在固定可用成本之限制條件下，優選出最佳站網分佈。

(三)、分析案例

應用 Yolo County Basin, California 地區既有之導水係數(T)與單位洩降出水量(SC)觀測值，以既有之觀測點為候選井位，進行站網最佳化，其分析結果如圖 4.1-3 及圖 4.1-4 所示。

圖 4.1-3 為分別以 $\log T$ 及 $\log SC$ 為分析參數，運用單變數之克利金方法，在最大設井數為 10 口之條件下，所優選之站網，其中 6 口之井位重覆，亦即分別以 $\log T$ 及 $\log SC$ 為分析參數，優選井數總合為 14 口。圖 4.1-4 為以 $\log T$ 及 $\log SC$ 為分析參數，運用聯合克利金方法，在最大設井數為 10 口之條件下，所優選之 10 口站網。

而表 4.1-5 為上述優選站網之各參數推估誤差結果，由表中，可看出 $\log T$ - $\log SC$ 之推估誤差仍比 $\log T$ 及 $\log SC$ 之總合為低。且就成本效益考量，以聯合克利金方法之設井數為 10 口，而分別以 $\log T$ 及 $\log SC$ 為分析參數，以單變數之克利金方法優選井數總合則為 14 口。

由實際案例之應用，運用多變量地質統計之聯合克利金方法，其優點為：以優選相同之井位進行多參數之觀測，即以較少之成本，來減少參數推估誤差。

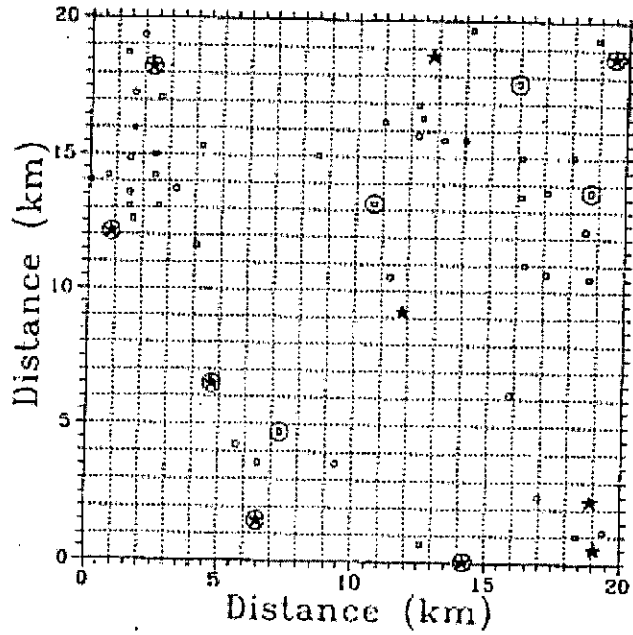


FIG. 5. Optimal Network Layouts Using Univariate Approach: Candidate Nodes (C), Optimal Monitoring Sites for $\log T$ (*), and $\log SC$ (o)

圖 4.1-3 運用單變數之克利金方法之優選井網

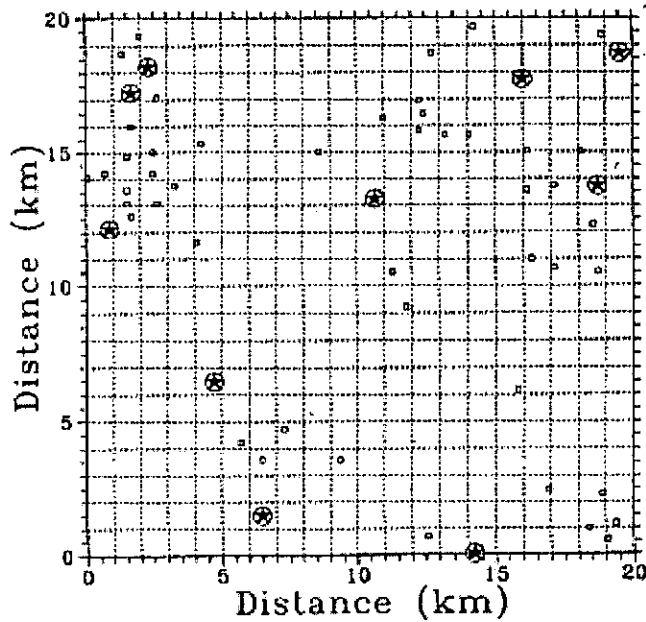


FIG. 6. Optimal Monitoring Network Layout Using Multivariate Approach for $\log T$ - $\log SC$ Joint Estimation: Candidate Nodes (C), Optimal Monitoring Sites for $\log T$ (*), and $\log SC$ (o)

圖 4.1-4 運用聯合克利金方法之優選井網

表 4.1-5 各優選井網之參數推估誤差

TABLE 3. Variance of Estimation

Estimation (1)	Variance of estimation (2)
Estimation of $\log T$	0.372
Estimation of $\log SC$	1.341
Joint estimation $\log F$ - $\log SC$	0.386

三、水位觀測井網統計設計(Using PCA)

Statistical Design of Water-Level Monitoring Networks, U.S.

Geological Survey Circular 1217

<http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1217/html/boxc>

(一)、Equus Beds aquifer 地下水位觀測井網評估

地質統計的結果可以得出對於監測井數量與空間配置上對於整體井網的觀測結果知不確定性的數據，也可以用來減少既有井網中的觀測井數量。在美國的案例中，Equus Beds aquifer, an intensively used aquifer in central Kansas 水位觀測井網的數目從現有的 244 口減少。既有的井空間分布並不均勻，有 80% 集中在南半區。Olea (1984) 透過六邊形佈局的方式(圖 4.1-5)，建議減少到對其中 47 口井的監測。刪減後的井網觀測結果(圖 4.1-6)和刪減前(圖 4.1-7)的結果相當接近。等水位線圖中有 95% 以上的值是在 5% 的差異範圍內，而估計的平均水位標準差從 10 英尺提高到 12 英尺。

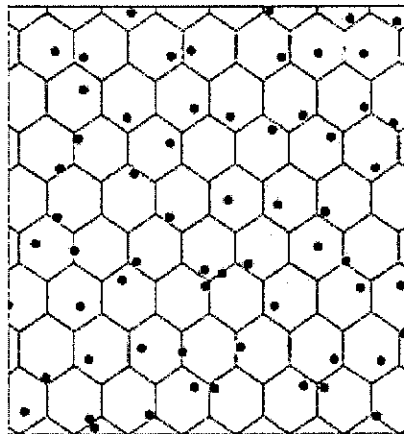


圖 4.1-5 六邊形佈井方式示意圖，六邊形較正方形更有效率

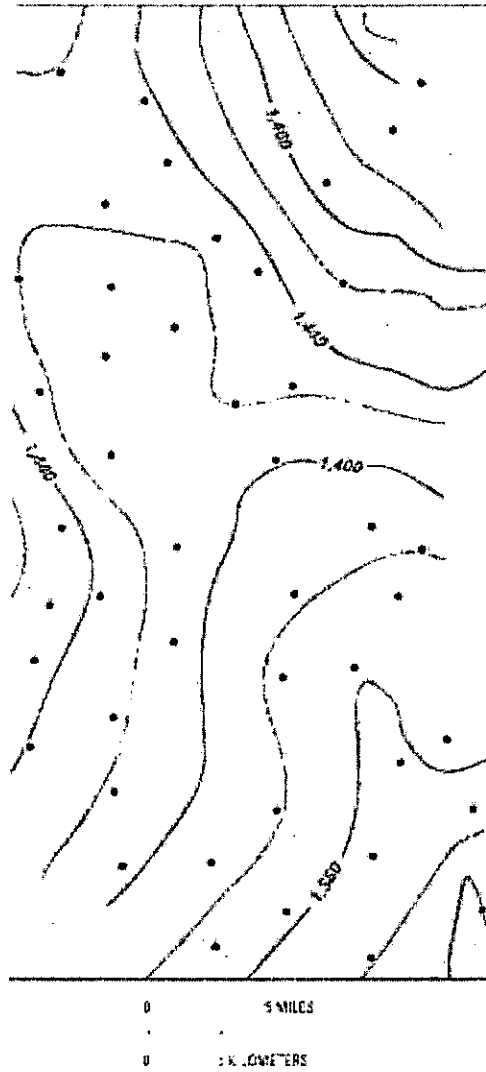


圖 4.1-6 47 口觀測井所得之 Equus Beds 地下水水位，觀測井佈設基準為 16 平方英里六邊形。(Modified from Olea, 1984)

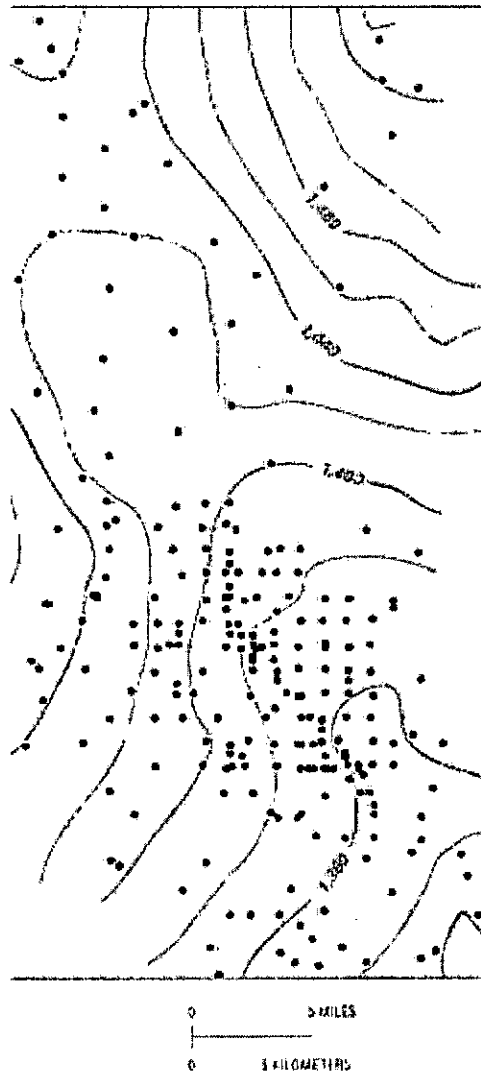


圖 4.1-7 244 口觀測井所得之 Equus Beds 含水層的地下水水位。黑點為觀測井位置。(Modified from Olea, 1984)

這個方法的目的是在於分析整個區域觀測網的精確度，但是對於特定小區域的水位洩降或流向、水質等資訊則無法提供適當的訊息，這些因素在井網的規劃時必須要透過相關的資訊提供在決策時整體考量。此外，這種地質統計分析方法的基本假設是未來的地下水資源利用不會對於整體的空間相關性有太大的影響。

(二)、主因子分析(Principal component analysis, PCA)

主因子分析(PCA)是一種資料轉換的技巧，用來在多變量資料叢集中找出結構性。PCA 的主要目標是決定原始變數的幾個線性組合(主因子)以用來在不犧牲許多資訊的狀況下進行資料的摘要分析。Winter et al. (2000)舉出了一個將 PCA 應用在 Williams Lake in Minnesota 地下水位量測的案例，如圖 4.1-8 所示。

圍繞著這個湖的 50 口井每口都有 300 次以上的水位量測記錄。在進行 PCA 分析時，首先找到了兩個主因子(PC-1 和 PC-2)與井中的水位變化一致且加起來共佔了水位資料變異性(variance)的 93%。圖 4.1-9 中 PC-1 因子分數和 15 號井中的水位變化以及 PC-2 因子分數和 22 號井水位變化極為接近，而 20 號井的水位變化則看起來像是 PC-1 和 PC-2 的混和。

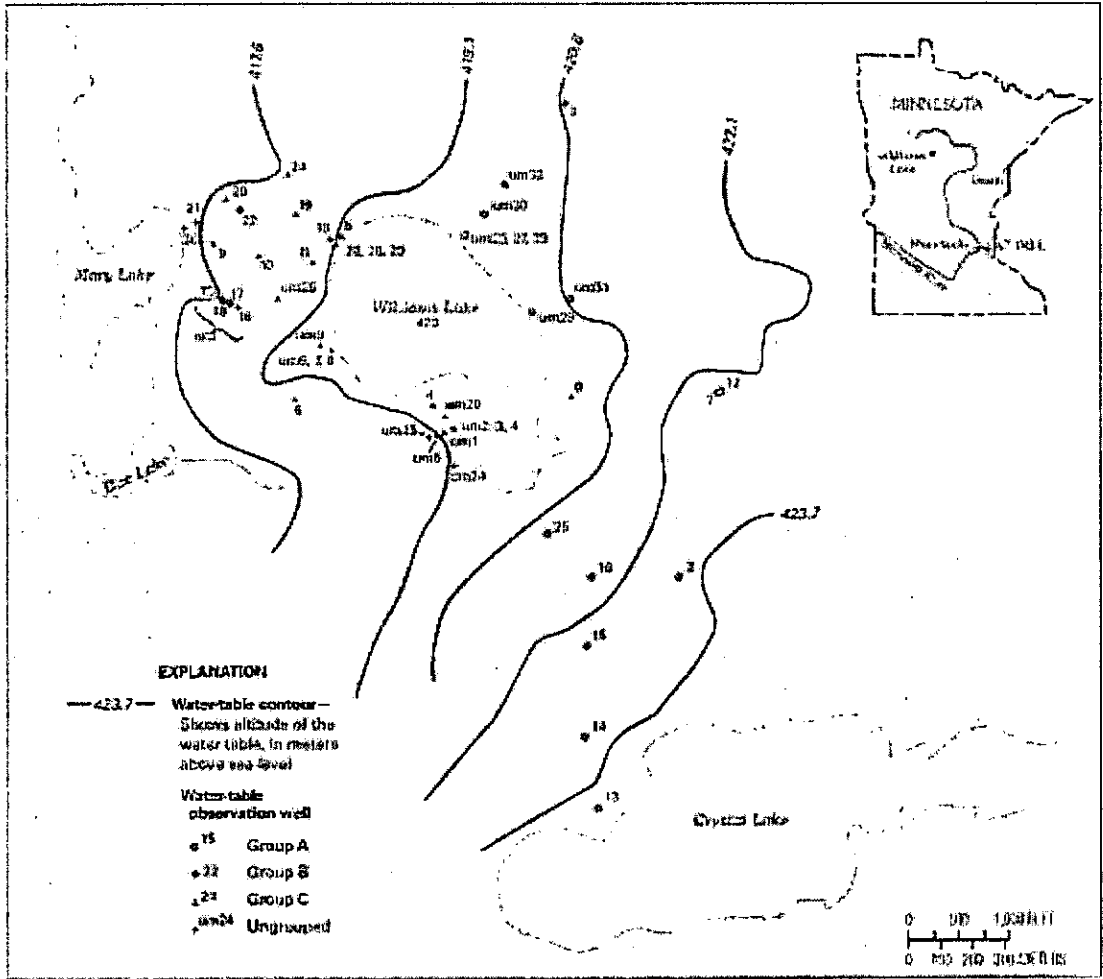


圖 4.1-8 所選定的靠近 Williams Lake in Minnesota 的指標水位觀測井位置。(Modified from Winter and others, 2000.)

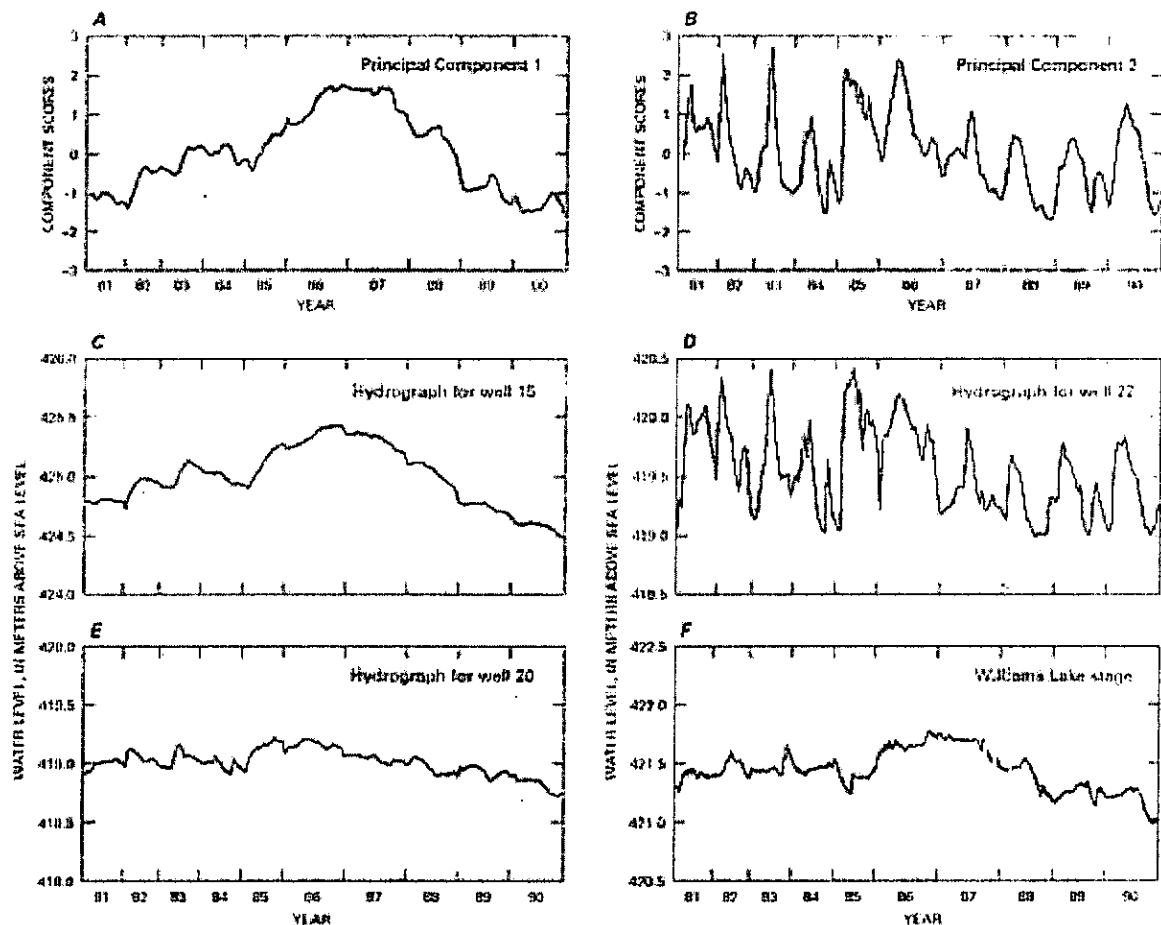


圖 4.1-9 Williams Lake in Minnesota 相關圖表。(A)為主因子 1 (PC-1) 的組分(Component Scores)，(B)為主因子 2 (PC-2)的組分，(C)15 號井中的水位，(D)22 號井中的水位，(E)20 號井中的水位，(F) Williams Lake 水位。圖中各觀測時間的時距並不一定相同。(Modified from Winter and others, 2000.)

對任一口井，地下水位變化型式 PC-1 和 PC-2 的相對權重反映在主因子的負荷(loading)上。因子負荷是該井水位觀測值和每一個主因子之間的相關係數。每一口井對應 PC-1 和 PC-2 的因子負荷表示於圖 4.1-10 中，顯示出大多數的井可以區分為三個族群。許多的井對於 PC-1 具有高負荷卻對於 PC-2 具有低負荷(Group A)。另一方面，有些井對於 PC-2 有高負荷而對 PC-1 具有低負荷(Group B)。還有一些井同時對於 PC-1 和 PC-2 具有高負荷(Group C)。前述的 15、22、20 號井分屬於這三個族群。

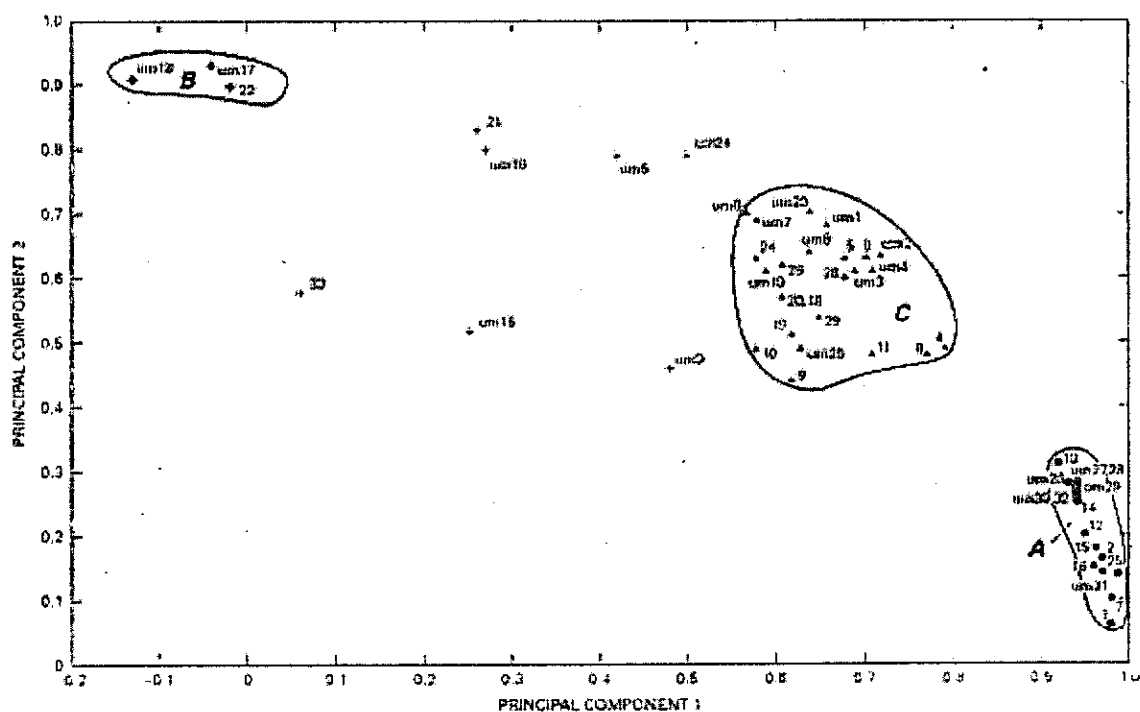


圖 4.1-10 Williams Lake 區域主因子 1 與主因子 2 的因子負荷 (component loading) 相關圖。(Modified from Winter and others, 2000.)

這三種地下水位變化的型式反映出補注和地下水位深度之間的關係以及井位於湖的上游或下游的位置關係。例如 Group A 在湖的上游而且這些井中地下水位相對較深。另一方面，Group B 的三口井中的水位較接近地表。Group C 的井中除了一口以外，其餘都在湖的下游，而井中的水位變化與湖面水位變化有相當高的相似性。

PCA 的分析結果提供了地下水位變化型式之間相似和相異性的基本了解，對於選擇長期的觀測井來說相當具有價值。例如，首要的考量是每一個族群中都要選取監測井。在這三個族群以外的井則必須要另外考量，以確認是否這些井所代表的是特殊的關鍵水文地質條件，因此是這三個族群的觀測井無法提供相關訊息的。

四、USGS 美國奧立岡州地下水指標井網

http://or.water.usgs.gov/projs_dir/projpage.html

奧立岡州的基本記錄蒐集(Collection of Basic Records, CBR)指標井網是國家監測井網的一部分，其目的是監測地下水位隨氣候的變化。

USGS Oregon 區水位觀測指標井(Water-level Index Well)計畫，是 Oregon 地區基本地下水資料收集計畫的一部分。過去各地的地區性的觀測井所反映的是對於人為活動造成的地下水狀況變化。但是一個可以反映出氣候變化影響的穩定長期的觀測井網過去並未建立。這個井網的主要功能包括：(1)將短期觀測計畫的資料用長期天候影響的觀點納入資料庫；(2)提供乾旱狀況指標；(3)提供對於長期天然補注和隨時間變化的變異性之推估；(4)從人為活動導致(例如抽水或灌溉)的引起變化之地下水位記錄將氣候效應過濾出來。選擇基本水位觀測井網的邏輯是將重點放在較低度開發的地區，這種地區的水位變化主要是受到氣候影響而非人為活動影響。這些適當的位置多半是在主要含水層系統露頭或受拘限性(poorly confined)較低的地區，這些地區的地下水的主要補注來源僅只是從地表水或降雨。這些長期水位觀測井的水位觀測頻率為至少每兩個月一次，但在符合成本考量之下，頻率儘可能提高。

目前每個區域都有各自的觀測井網，也有這些觀測井的詳細資料。因此 USGS 訂定選擇指標井的原則，以利從現有的觀測井中篩選出適當的指標井。最終的指標井井網，將是一個較稀疏的井網，用以取得未受干擾的長期地下水位記錄。水位記錄主要將反映氣候造成的變化而非人為活動的影響。氣候變化的影響主要是以月或更長的時距觀點影響補注的因素，但不包括大氣氣壓和潮位的影響。

指標井選擇的方式是先在地圖上劃定人為活動較少的區域，在這些區域中的觀測井必須符合以下原則，才能列入指標井的候選名單：

- 開孔位於單一水文地質單元
- 井的設置良好可以取得可靠的水位資料
- 位於非拘限含水層或接近地表的拘限含水層因而可以反映氣候變動影響
- 受到抽水的影響很小且未來也預期保持此一狀態
- 基本上不受到灌溉、渠道、或其他人為補注來源的影響
- 長期的可及性
- 井從未乾枯

其他的偏好條件：

- 可代表較大面積(例如區域性含水層)
- 該位置的相關資料完整
- 長時間的水位觀測記錄存在
- 地質記錄存在

從各地區初步篩選出來的可能觀測井中，再由 USGS 和奧立岡州水資源部的專家根據地下水使用的狀況決定指標井，指標井將設於地下水開發較密集地區和緊急水源區。自 1997 年從 17 口觀測井中挑選出 6 口指標井之後，每兩個月觀測一次水位。

4.1.2 地下水質監測站網案例

一、美國國家水質評估計畫地下水水質評估計畫監測井選擇標準程序 (USGS, 1995)

根據美國全國的國家水質評估計畫(National Water Quality Assessment Program, NAWQA)美國地質調查局(USGS)從現有的水質監測井或者是新設監測井，已達到該計畫的要求。這個計畫所包括的水質監測井共有三種標的，分別為：水文地質單元調查(Hydrogeologic Study Unit Survey)、土地使用影響研究(Land Use Studies)、流線研究(Flowpath Studies)。不論是哪一種標的的監測井，監測井選擇的準則，都包括了在位置上和井的其他條件上的要求。首先，觀測井所蒐集到的資料必須符合計畫的目標(如表 4.1-6 所示)，而各種標的之地下水水質主要之分析項目如表 4.1-7 所示。

表 4.1-6 國家水質評估計畫(NAWQA)地下水採樣設計

	研究標的		
研究標的	研究單元調查 (Study Unit Survey)	土地使用研究 (Land Use Studies)	流線研究 (Flowpath Studies)
General objective	To supplement existing data in providing broad overview of ground-water quality within each Study Unit	To examine natural and human factors that affect the quality of shallow ground water that underlies key types of land use	To examine ground-water quality along inferred flowpaths and interactions of ground water with surface water

Spatial domain	Ground-water resource throughout Study Unit	Uppermost part of ground-water system in specified land-use settings	Shallow flow systems in specified settings
Selection of areas	Aquifer system divided typically into 3-5 subunits on the basis of physiographic and hydrogeologic features	Typically, 2 -4 Land-Use Studies per Study Unit Each land-use setting represents a combination of a land-use type and a hydrogeologic subunit	Typically, 1-2 Flowpath Studies per Study Unit Generally, unconsolidated shallow aquifers Upper part of flowpath generally lies within one of land-use settings examined in Land-Use Studies Typically, located in indicator basin1 for surface-water sampling design
Number of wells sampled	Minimum of 30 wells in each subunit General goal for spatial density is one well per 38 mi ² (100 km ²)	Minimum of 30 wells in each land-use setting	Typically, 10-12 wells along flowpath and 10 wells for areal sampling
Well-selection strategy	Spatially distributed, with random selection of suitable water-supply or	Spatially distributed, with random selection of suitable water-supply	Generally, wells installed by the Study Unit that are distributed at multiple depths along flowpath

	monitoring wells within each subunit	wells or of sites where monitoring wells can be installed within each Land-Use Study area	and areally in vicinity of flowpath
Temporal Sampling strategy	Each well typically sampled once during an intensive period	Each well typically sampled once during an intensive period Additional seasonal sampling at selected wells in some Study Units	Variable; multiple samples from most wells

1 An indicator basin is a basin with homogeneous land use and physiographic conditions. Basins are chosen to be as large and representative as possible while still encompassing primarily one Environmental Setting (Gilliom and others, 1995).

表 4.1-7 國家水質評估計畫(NAWQA)三種監測標的地下水水質之主要項目

水質項目或 項目群組	研究單元調查 (Study-Unit Survey)	土地使用 研究 (Land-Use Studies)	流線研究 (Flowpath Studies ¹)	方法 ²
現場量測				
- 溫度	Req	Req	Req	Field
- 電導度	Req	Req	Req	Field
- pH	Req	Req	Req	Field
- 溶氧	Req	Req	Req	Field
- 酸中和能 力(Acid neutralizing capacity, ANC)(為過 濾水樣) ³	Req	Req	Req	Field incremental
- 鹼度 (Alkalinity) (過濾後水 樣) ³	Req	Req	Req	Field incremental
- Turbidity ⁴	Req	Req	Req	Field
主要無機物	Req	Req	Req	NWQL SC2750

養分	Req	Req	Req	NWQL SC2752
經過濾之有機碳	Req	Req	Opt	NWQL SC2085
殺蟲劑	Req	Req	Opt	NWQL SC2001/2010 NWQL SC2050/2051
揮發性有機物 (VOCs)	Req	Req or Opt ⁵	Req or Opt ⁶	NWQL SC 2090
銾氣(Radon)	Req	Req or Rec ⁷	Req or Rec ⁶	NWQL LC 1369
微量元素 ⁴	Opt	Opt	Opt	NWQL SC 2703
鐳(Radium)	Opt	Opt	Opt	NWQL-Opt
鈾(Uranium)	Opt	Opt	Opt	NWQL-Opt
氚, 氚-氬, 氟氯化碳 (CFCs) ⁸	Rec	Rec	Rec	NWQL LC1565 (tritium)
環境同位素 ⁹	Rec	Rec	Rec	NWQL-Opt

[Req, Required; Rec, Recommended; Opt, Optional; NWQL, National Water Quality Laboratory; SC, Schedule; LC, Laboratory Code]

表 4.1-8 則列出了水質監測井選擇的最低標準，這些標準隨著研究的目標而異。

表 4.1-8 國家水質評估計畫(NAWQA)水質監測井的選擇準則[排水口、泉水不能代替監測井，但可以取樣分析資料另行整理。]

三種標的監測井都適用的準則

1. 監測井設置於適當的位置和深度，井的開孔位於所欲研究的含水層。
2. 井中量測到的水位所代表之水文地質單元已知¹。
3. 井中量測到的水位的水之來源之水文地質單元已知¹。
4. 不使用為了要監測特定之已知或可能污染源的監測井。
5. 不使用靠近高速公路的監測井，因為可能經常使用農藥維護植生。若必須要使用這些井，則應該要有使用農藥的完整記錄。
6. 不使用具有很長(相較於開孔段長度)的濾料段的監測井[很長的濾料段將使得流入井中的水之來源具有較高的不確定性]。
7. 開孔段的頂端至少必須位於預期之地下水位幾公尺以下(降低旱季時井水乾枯並避免因為非飽和土壤狀況造成資料詮釋的困難)。
8. 井的完整性經過確認。
9. 井的設置和井中的抽水設備不會影響水質項目分析結果²。
10. 已經考慮抽水率可能造成的偏差(Bias)。
11. 監測井可以達到取樣所需要的抽水率：通常至少達到每分鐘一加侖。
12. 監測井必須位於鄰近之水處理設施、壓力槽、儲水槽等的地下水流場上游。
13. 若使用既有的抽水井，只能選用使用潛式幫浦的井，且優先選擇使用以水為潤滑劑的幫浦。

表 4.1-8 國家水質評估計畫(NAWQA)水質監測井的選擇準則(續)

研究單元調查監測井之其他準則

- 可選擇既有的抽水井、觀測井、或水質監測井。
- 井的選擇方式以在方格狀的子區域中隨機選取(Scott, 1990; Alley, 1993)。
- 只選擇觀測井、水質監測井、或低產水量的抽水井以避免產生難以斷定水源之複雜問題(高產水量的井會從其他非監測目標的水文地質單元取得補注水)。
- 井管是 PVC 或者是不銹鋼材質。
- PVC 井管是利用螺旋接合而非利用黏著劑接合。
- 不銹鋼井管的井篩是連續鋼絲或 PVC 井管的井篩是機器切割的細縫。

土地利用研究單元調查監測井之其他準則

- 監測井位置平均散佈於土地利用影響調查區域(同時考量土地利用與水文地質條件)中，選擇土地利用方式在過去十年已經達到長期穩定型態的位置。
- 除了參考井(Reference wells)之外，只選擇位於目標土地利用區之中或下游的位置。
- 若是既有井，則必須是要在 1995 年以後屬於土地利用研究所設置的監測井，其他的土地利用監測井也可以被選取，但是必須先進行水質取樣分析以確認其符合表 4.1.5-1 中所列舉的準則。若選擇既有井，則應該選擇觀測井、水質監測井、或低產水量的抽水井以避免產生難以斷定水源之複雜問題(高產水量

的井會從其他非監測目標的水文地質單元取得補注水)。

- 井管是 PVC 或者是不銹鋼材質。
- 井管具有較短的開孔段，通常小於 3 公尺。

土地利用研究單元調查監測井之其他建議準則

- PVC 井管是利用螺旋接合而非利用黏著劑接合。
- 不銹鋼井管的井篩是連續鋼絲或 PVC 井管的井篩是機器切割的細縫。

流線研究水質監測井之建議準則

- 新設置之專屬井。
- 井管是 PVC 或者是不銹鋼材質。
- PVC 井管是利用螺旋接合而非利用黏著劑接合。
- 不銹鋼井管的井篩是連續鋼絲或 PVC 井管的井篩是機器切割的細縫。
- 井管具有較短的開孔段，通常介於 1 至 1.5 公尺之間。

二、歐盟地下水質監測井網 European Environmental Agency (EEA, 1996)

<http://reports.eea.eu.int/92-9167-023-5/en/page003.html>

歐洲環境保護署需要的地下水資訊包括資源的現況以及此現況對於環境的壓力的相關性和反應(因果關係)。該監測計畫涵蓋所有歐盟的會員國，進行資料的比較分析以進行層級分析(stratified design)和監測網設計。

該網絡應該對於 EEA 區域的水資源狀況具有代表性。對於地下水來說，代表性的站井將進行各國主要地下水區域的監測。這些資訊將使得歐盟的環境政策目標正確且具有高成本效益。這些站井將以各國現有的監測網絡為基礎，建立整合且經過分析整理的 EEA 資料庫。這些資料將不會用來評估各國的地下水狀況是否符合歐盟訂定的各項水質標準。

該井網的設計要達成的目標包括定義資訊的需求、考量監測井的數量與位置、取樣頻率與分析項目、產生之統計資料、效果準則與品質保證程序。此外，必須要檢核此井網的代表性。監測的成果將要能夠讓歐盟和各國劃設和監測地下水質與水量分區、確保目前和未來的地下水水源，並對於因為排放到地下水含水層的污染物造成的水質劣化提供早期預警。

監測站井的基本需求為建立背景資料。一般目的的監測基本資料建立地下水的水質資料庫以作為未來地下水資源規劃的基礎。提供未來跨國使用地下水的責任釐清基礎資料。找出地下水水質變化的長期趨勢(包括火山活動、礦物溶解、海水入侵等地質條件的影響)，且長期監測來自於擴散、空氣傳播、點源等污染對於地下水的影響，預測已知污染源可能的污染行為會造成的衝擊。提供資訊以評估地下水開

發或管理手段對於特定區域的影響和可能的解決方案。提供全球氣候變遷等大尺度效應對於地下水的影響，例如酸化及其造成的水中化學反應加速等。

井網的型式有三種類型：基本井網、特殊井網、臨時井網。基本井網也稱為參考站井(Reference stations)提供地下水的一般資訊和背景水質，監測計畫應該具有持續性和永久性。水質資料可用來評估長期水質變化趨勢。井網設計可以參考以下概念：(a)站井可以按照正方形或其他規則幾何形狀佈設，各站井之間距離固定；(b)站井應該位於主要的含水層；(c)其他的含水層的選擇以代表性為考慮基準。

這些站井的位置應該避開受到人為活動嚴重影響的區域，例如抽水集中的地區等，但事實上可能有困難避開。

特殊井網是用來監測特定的區域且針對特定的污染，例如點源。這些站井可稱為 Impact stations。這些井可以視為獨立的井網。其所得之資料可以補充大區域大間距井網的資料。

臨時井網是針對特定的地下水計畫設置的。通常井設置得較為密集。

(一)、『代表性』的定義

代表性的定義有幾種描述方式。例如，它的水位資料和地下水資源總量的關係、它的水質和含水層整體水質變化的關係等。統計學上有固定的程序可以量化資料對於取樣族群(sampled population)和整體族群(total population)之間的代表性。

歐盟國家中，法國和義大利的監測井網目的是監測飲用水的水質。其他國家的監測井網的目的包括了偵測海水入侵和評估空氣污染物對地下水水質的影響。西班牙、英國、葡萄牙設置的監測井都包括了偵測了海水入侵的作用；以評估空氣污染影響為目的的監測井網大

部分都是北歐國家(例如挪威)設置的。大多數的監測井都是由在空間上平均分布或者是集中位於飲用水井的附近。這兩種佈設的目的不同，但都與集中在衝擊區域(Impact areas)的井網也不相同。由於各地水文地質狀況相異且監測目的不同，所以各國境內的井網在密度上的差異很大。歐盟國家的地下水含水層的面積從 35 至 79,258 km²，監測井密度則為 0.004 至 0.57 sites/km²。

歐盟國家監測的地下水水質參數區分為以下族群：

1. 基本參數(Descriptive parameters)，例如電導度、pH、濁度、氣味；
2. 主要離子(例如： Ca , Mg , Na , K , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-);
3. 其他參數(例如： TOC , Br , F , cyanide, hydrocarbon benzene);
4. 重金屬(例如： Cr , Pb , Cd , Hg , Ni);
5. 包括有機溶劑在內的有機物質(例如： $trichloroethene$; $tetrachloroethene$; $1,1,1$ $trichloroethane$; $1,1$ - $dichloroethene$);
6. 農藥(除草劑與殺蟲劑)(herbicides, insecticides).

大多數的監測計畫都對基本參數和主要離子進行分析，也經常包括重金屬。但是在有機溶劑和農藥方面差異較大，有機物質分析項目從 15 到 106 種，農藥從 1 到 64 種。

取樣頻率方面，依據監測目的而異，最低的是兩年一次，最高的是一年 12 次(每月)。

(二)、EEA 監測井網可行方案

EEA 希望建立監視型觀測井網，他們擁有的選擇是利用各國現有的分級方式，按照各國當地的污染狀況將監測井分區或分級來監測不同的水質項目。這個方式被認為是最經濟有效且可行的方式。在此一架構中，分區或分級共有三個目的：

1. 透過將各地下水區域劃分出各個較為均質的子區域，降低系統中的變異性，在各分級中分配監測的資源，藉之提高監測井網的效率。
2. 確保收集到所有不同種類含水層水質資料以對各國的地下水水質狀況進行較公平的比較。
3. 企圖確保各國和各區域所呈報的水質統計資料對該區域來說具有較高的代表性，亦即降低偏差(Bias)。

分區或分級的方式可依照地理區域或水文地質條件等來劃分。

EEA 選擇地下水監測井網之監測井位置時的兩個重要考量：

- 地下水緩慢的移動速度和較長的停留時間；
- 水與含水層材料之間可能有相當程度的物理和化學作用。

因此，EEA 水質監測井網中，監測井的距離取決於分辨區域污染和點源污染源、以及國與國之間和區域與區域之間、主要監測井網(主要井網、特定井網、或臨時性井網)之間的污染之策略。雖然歐盟尚未訂定最低監測井密度的要求，但是以下幾項為決定密度時的主要考慮依據：

- 區域或國家的面積
- 區域的地質和水文地質複雜度
- 主要含水層的大小及其地質和水文條件
- 該區域的可及性和地主同意設井的可能性

- 既有的監測井網
- 井網的目標和時間限制
- 井網建置和例行監測的經費限制

井網的主要需求為：

- 應該觀測所有主要的含水層。這些含水層由地質資料和已知的地下水源劃分
- 監測井之間的距離依照地質條件而定
- 井網應該建立在已有詳實的水文地質資料的既有井網之上，以降低成本
- 監測目前未被抽水作為水源的淺層或深層含水層相當重要
- 高入滲率的區域監測密度應該較高

水質監測的項目應該涵蓋主要三大的污染種類，包括從大氣擴散、土地使用、掩埋場等點源造成的污染。

EEA 建議的井網設置準則為：

- 監測井應該建立在既有的各國井網之上
- 各國目前和未來重要的含水層都應該納入
- 監測井的分佈應該具有幾何上的規則性，基本上各含水層每 20 至 25 km² 應該設置一口
- 在範圍廣大、水文地質構造相似且衝擊度較低(例如人口密度低、可耕作面積比例小、主要是森林或草原、沒有主要污染源的區域)的含水層中，監測井的密度可以較低
- 選擇監測井位置不應該僅以飲用水抽取點(因飲用水水源通常集中於一些衝擊度較低的區域)或者是污染集中的區域為考量，因為這些位置的資料無法提供適當的比較基準。

表 4.1-9 EEA 各國地下水水質監測井網資料

	監測井總數			地下水含水層總面積 (km ²)			監測井密度 (km ² per well)		
	孔隙 介質	卡斯 特介 質	其他 介質	孔隙 介質	卡斯 特介 質	其他 介質	孔 隙 介 質	卡 斯 特 介 質	其 他 介 質
Austria	1600	450	*	17000	*	*	11	*	*
Belgium	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Denmark	1100	*	*	43216	*	*	39	*	*
Finland	20		30	35	*	30	2	*	1
France	16112	2490	20480	*	*	*	*	*	*
Germany	2378	80	327	45900	13200	62245	19	165	190
Greece	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Iceland	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Ireland	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Italy	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Luxembourg	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Netherlands	375	*	5	35000	*	*	93	*	*
Norway	21	*	*	*	*	*	*	*	*
Portugal	74	*	*	*	*	*	*	*	*
Spain	1147	408	1377	79258	54628	38644	69	134	28
Sweden	*	*	*	*	*	*	*	*	*
United Kingdom	346	270	1920	13534	11004	75219	39	41	39

* No information

(三)、水質取樣頻率

較淺層的含水層，基本監測井網的取樣頻率為每年兩次，一次在高水位時，例如在大量的入滲或從補注源補注之後；一次在低水位時，亦即在入滲最少的時期或者是大量抽水之後。

若與較淺之含水層同一位置有較深層含水層的監測井，則二者應該根據上述淺層含水層的取樣原則在同一時間取樣。對於卡斯特地區，因為入滲速率甚高，因此取樣頻率應該據之提高。

(四)、水質分析項目

水質分析項目共分七大群組(表 4.1-10)：

1. 描述性基本參數(Descriptive parameters);
2. 主要離子(Major ions);
3. 其他參數(Additional parameters);
4. 重金屬(Heavy metals);
5. 有機物質(Organic substances);
6. 殺蟲劑(Pesticides);
7. 微生物(Microbes).

水質分析項目取決於井網的目的和經費。目前歐盟所有國家的監測井網都分析第 1, 2, 3 群水質項目。第 4, 5, 6 項則只有一部分的歐盟國家進行分析；第 4, 5 項主要是在監測特定污染源的監測井網中才做；第 4, 6 項主要是針對農業造成的污染。

表 4.1-10 EEA 建議之地下水質監測井網取樣分析之水質項目

群組	群組名稱	水質項目
1	基本參數(Descriptive determinants)	Temperature, <i>pH</i> , <i>DO</i> , <i>EC</i>
2	主要離子(Major ions)	<i>Ca</i> , <i>Mg</i> , <i>Na</i> , <i>K</i> , <i>HCO₃⁻</i> , <i>Cl</i> , <i>SO₄⁻²</i> , <i>PO₄⁻³</i> , <i>NH₄⁺</i> , <i>NO₃⁻</i> , <i>NO₂⁻</i> , Total organic carbon
3	其他參數(Additional determinants)	Choice depends partly on local pollution source as indicated by land-use framework
4	重金屬(Heavy metals)	<i>Hg</i> , <i>Cd</i> , <i>Pb</i> , <i>Zn</i> , <i>Cu</i> , <i>Cr</i> . Choice depends partly on local pollution source as indicated by land-use framework
5	有機物質(Organic substances)	Aromatic hydrocarbons, halogenated hydrocarbons, phenols, chlorophenols. Choice depends partly on local pollution sources as indicated by land-use framework.
6	殺蟲劑(Pesticides)	Choice depends in part on local usage, land-use framework and existing observed occurrences in groundwater.
7	微生物(Microbes)	Total coliforms

三、AFCEE 地下水質監測井網優選方法

美國空軍環境卓越中心(Air Force Center for Environmental Excellence, AFCEE)利用地質統計方法研究長期監測(Long-Term Monitoring, LTM)井網的佈設，以確保只取得和分析對於決策有重要資料(Cameron and Hunter, 2002)。該方法利用克利金法來將網格中的取樣點和取樣頻率作優選，因此該方法中區分為空間和時間分析兩部分，該方法稱為 Geostatistical Temporal/Spatial (GTS) Optimization Algorithm，其分析流程如圖 4.1-11。此法可以得出現有井網中在空間和時間上的贅餘(Redundancy)，時間上的贅餘代表了在個別的取樣點過高的取樣頻率，拉長取樣間的時距可以減少贅餘，且不會有顯著的資料上的損失。空間上的贅餘代表了過多的監測井，因此可以將井網中的監測井篩選之後將數量減少(Cameron and Hunter, 2002)。

GTS 是一個因地制宜的技術，但是在採用此分析方法之前，先決條件是已經擁有大量的數據資料。一個典型的 GTS 分析，井網中至少必須有 40 口以上的監測井和足夠的水質資料。時間序列資料則應該至少涵蓋四季，以充分考量季節性的變化，理想上最好每口井有 8 筆以上的水質資料。這些水質資料儲存在美國空軍的環境資料庫中(Environmental Resources Program Information Management System, ERPIMS)。

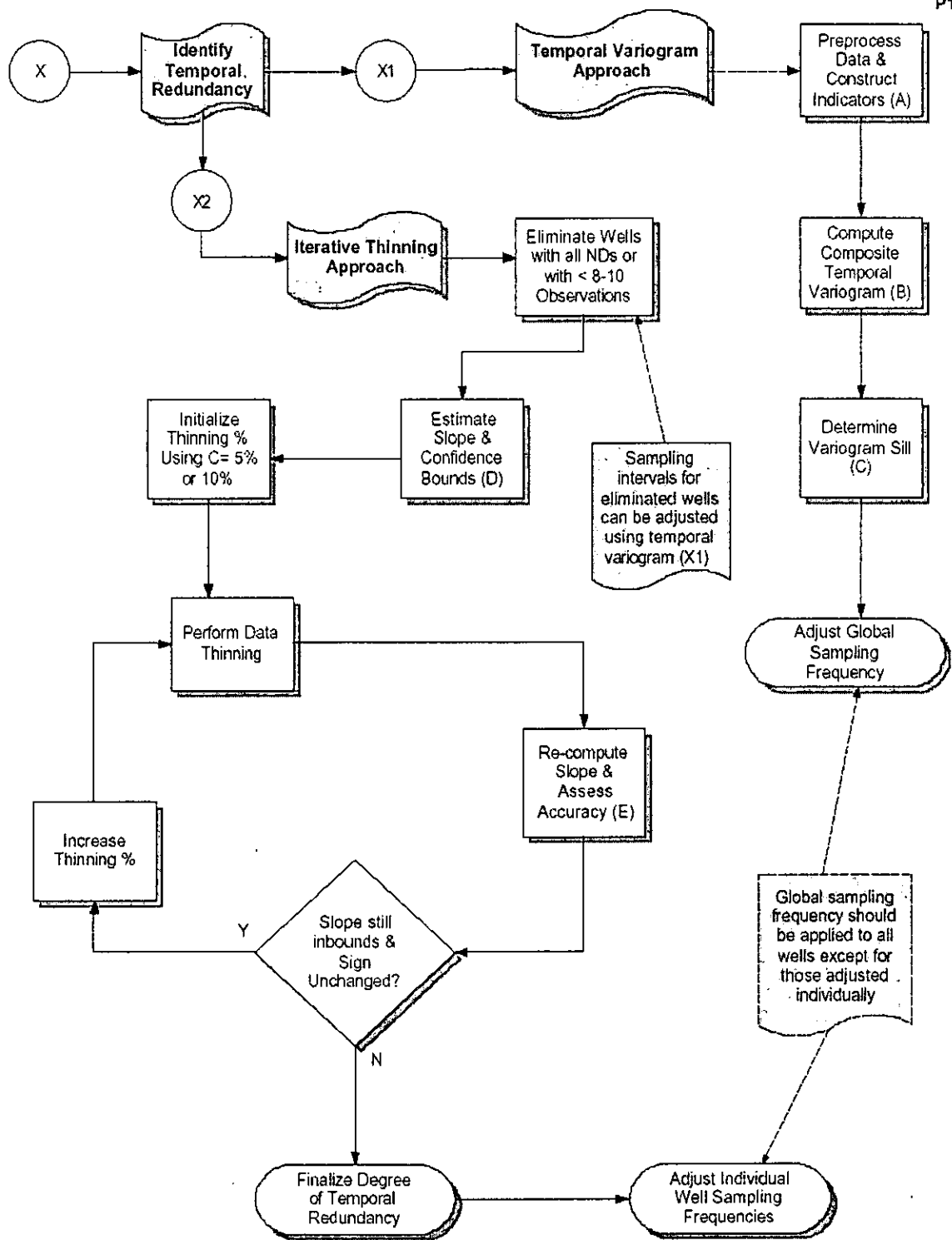


圖 4.1-11 Geostatistical Temporal/Spatial(GTS) Optimization Algorithm
分析流程

(一)、時間上的優選

優選的考量，在時間上則指在連續的監測數據上有密切的關係，因此降低監測頻率不會降低對於水質變化趨勢分析的準確性；空間上則指有些井所提供的資料對於水質空間變化上的解析度幫助不大，減少該井的水質資料，部會顯著影響對於水質的空間變化分析精度。在時間優選方法包括兩個階段：(a)計算複合時間趨勢變異元(Composite temporal variogram)；以及(b)『反覆瘦身』在選定的井之水質取樣事件。第一階段要做的是將許多井的水質資料綜合起來作時間關聯性分析，得出變異元；此分析將在同一口井取樣事件之間的時距作為計算變異元時的『距離』。將時間當作是距離變數，可以得出一維變異元來求出在每一對量測時距拉長或縮短時的平均相關性。此變異元在時間上達到 Sill，亦即『上限』的時間點可作為是取樣事件之間無時間相關性的時間間隔分割點，亦即沒有時間上贅餘的分界點。在較此一時距短的時間間隔之內取樣則會具有某些相關性，因此在統計上來說這筆資料就有贅餘性。

由於許多井的資料都混合起來作分析以求出複合時間變異元，因此上述求出的時距並不代表對於個別的監測井最適當的取樣頻率，而只是一個平均值。對於監測井網監測頻率調整而言，則必須要由此一維變異元的結果，對於頻率進行調整，最後確認取樣頻率所對應的取樣間隔較上述的最短時距長。

第二個階段，是設計關鍵的 sentinel 監測井，包括了的水質變化有明顯的長期趨勢的監測井或者是有特殊需求需要按照特定頻率取樣的監測井。對於個別監測井取樣頻率的優選，採用『反覆瘦身』(Iterative thinning)，亦即暫時將任意的的水質資料從時間序列中刪除。此法包括：(1)利用整個時間序列估計趨勢；(2)只取一部分的資料進

行瘦身後的時間序列分析；(3)從新估計時間趨勢，判斷新的水質變化斜率和原來的斜率間之差異。持續的『瘦身』反覆進行，直到新的斜率和原本斜率間有明顯的差異。這個方法在資料不足或者是水質不具有可辨識的時間趨勢狀況下無法使用。

(二)、空間上的優選

空間上的優選分析，含意為若某一口井提供的資料是贅餘的，則其附近的井所提供的水質資料基本上是相同的；亦即不再監測此井也不會影響到水質空間分佈的精確度。

這一部分的步驟包括：(1)利用克利金法作初步分析；(2)對各井分派總體權重(稱為 global kriging weights)以量測他們對於水質空間分佈的相對貢獻；(3)暫時移除具有最低整體權重的井並重新推估水質分佈；(4)利用克利金變異數(variance)分析來評估水質分佈是否有明顯的改變且不確定性明顯提高。若不然，則刪除這些井，並重複進行上述步驟，直到移除某一些井會造成明顯變化為止。

總體權眾提供了井的位置提供獨立的空間資料的相對排序，贅餘性高的井具有最低的總體權眾，因為這些井的小範圍權重(local kriging weights)通常較小。設定一個門檻值可以刪除總體權重低於此值的井。

當監測的水質參數不只一項時，則不能只進行一次分析。一個可行的方法是對於所有重要的水質參數進行總體權重分析，並求出平均值，然後進行篩選。

Johnson et al. (1996)提出了利用試誤法(trial-and-error)來分析 Savannah River 場址個別井的時間序列資料以辨認出時間上的贅餘性。Reed et al. (2000a)則利用數值模擬、克利金法、簡單的遺傳演算

法(GA)來分析猶他州 Hill 空軍基地場址的井網以求出空間贅餘,在降低了 60%的監測費用之下,還能夠維持總體的污染物總量估計精確度。目前已有不少套裝的軟體可以整合克利金法和提森多邊形法(Thiessen polygons)以及傳統的統計迴歸分析,讓使用者可以分析監測井網的空間與時間贅餘(Cameron and Hunter, 2000; Aziz et al., 2000),但是目前對於長期觀測井網設計時各項因此之間的利害得失權衡尚無法量化。

四、美國賓州固定井網水質監測

美國賓州的監測井網。過去都是在特定設施監測。賓州環保部的水資源管理局(Bureau of Water Supply Management)負責流通(ambient)地下水質監測。BWSM 採取綜合兩種監測計畫，固定站網網絡(Fixed Station Network, FSN)和流通水質監測。

FSN 計畫對於地下水區域(groundwater basins)進行長期監測。三個主要目標為：(1)訂定一般的基線地下水質(general baseline quality)；(2)監測地下水質的變化；(3)產生統計報告並評估取樣結果和趨勢。FSN 取樣可以讓 BWSM 了解長期地下水水質變化的趨勢並可以評估土地利用管理對於地下水質的影響。

井的位置選擇以能夠提供未受影響的背景水質為原則。流通水質取樣每年取樣兩次。

監測水質項目共 27 項，如表 4.1-11 中所列。此監測計畫自 1985 年建立，至 1999 年共已取得 1106 個取樣點的水質資料，存於 EPA STORET 系統中。1985 年時建立的取樣點已經有 34 次水質記錄。

表 4.1-11 美國賓州固定地下水質監測項目

	Analyte	Abbreviation	MCL
1.	pH	pH	(SMCL) 6.5-8.5 pH units
2.	T. Alkalinity (CaCO ₃)	Alk	No level
3.	T. Filterable Residue	TDS	(SMCL) 500 mg/L
4.	T. Ammonia Nitrogen	NH ₃ -N	No level
5.	T. Nitrite-Nitrogen	NO ₂ -N	1 mg/L
6.	T. Nitrate-Nitrogen	NO ₃ -N	10 mg/L
7.	T. Phosphorus	P	No level
8.	T. Organic Carbon	TOC	No level
9.	T. Hardness	TH	No level
10.	Calcium	Ca	No level
11.	Magnesium	Mg	No level
12.	Sodium	Na	(guidance level) 20 mg/L
13.	Potassium	K	No level
14.	Chloride	Cl	(SMCL) 250 mg/L
15.	Sulfate	SO ₄	(SMCL) 250 mg/L
16.	Silica	SiO ₂	No level
17.	Arsenic	As	0.05 mg/L
18.	Barium	Ba	2 mg/L
19.	Cadmium	Cd	0.005 mg/L
20.	Chromium (total)	Cr	0.1 mg/L
21.	Copper	Cu	(al) 1.3 mg/L
22.	Iron	Fe	(SMCL) 0.3 mg/L
23.	Lead	Pb	(al) 0.015 mg/L
24.	Manganese	Mn	(SMCL) 0.05 mg/L
25.	Zinc	Zn	(SMCL) 5 mg/L
26.	Mercury	Hg	0.002 mg/L
27.	Turbidity	Turb	(Performance Standard) 0.5 NTU - 1.0 NTU
T indicates Total; (al) indicates action level MCL - Maximum Contaminant Level SMCL - Secondary Maximum Contaminant Level			

1999 年對於 FSN 的水質記錄進行趨勢分析(Reese and Lee, 2000)，分析的項目共 21 項。許多影響地下水水質的因子是彼此相關的，例如：土地利用和人口趨勢與地質和地理條件相關，而水質又與地質和土地利用狀況相關。

雖然通常很難百分之百確認水質變化受到地理因子影響的原因，但是一些變化的概況卻是眾所週知的，例如：硫酸鹽和硝酸鹽的降低和土地利用型態改變以及農耕方式的改善和污水處理改善相關等。

五、The Netherlands 地下水質監測井網(Pebesma, Edzer Jan 1996)

荷蘭的地下水水質監測井網在經過數年的運作之後，檢討監測井的數量與監測頻率。控制監測費用的因子包括設井的費用、水質取樣費用(取樣點與取樣頻率)、水質分析費用(水質分析項目)、模擬的費用(開發較佳的軟體來詮釋水質變化)。

利用將總成本視為監測密度的函數來進行優選，某一監測密度的成本包括量測的成本和對應的有限知識造成的成本(圖 4.1-12)；若可以得知後者(亦即『未監測』的成本)和監測密度間的損失函數關係，則這個方式就相當簡單。這個損失函數(Loss function)必須要由地下水水質知識的價值來明確定義，因之可以得出未監測造成的損失(成本)。總成本最低的監測密度，就是最佳方案。同樣地，水質項目的分析也可以比照上述方式進行。但是，最困難的部分也就在於定義水質參數的價值，況且，這個價值會隨著時間因為法規和用水狀況的變動而改變。一個最簡單的方式，是參考各項水質標準來以及超出標準後的經濟影響來賦予此知識的量化指標。

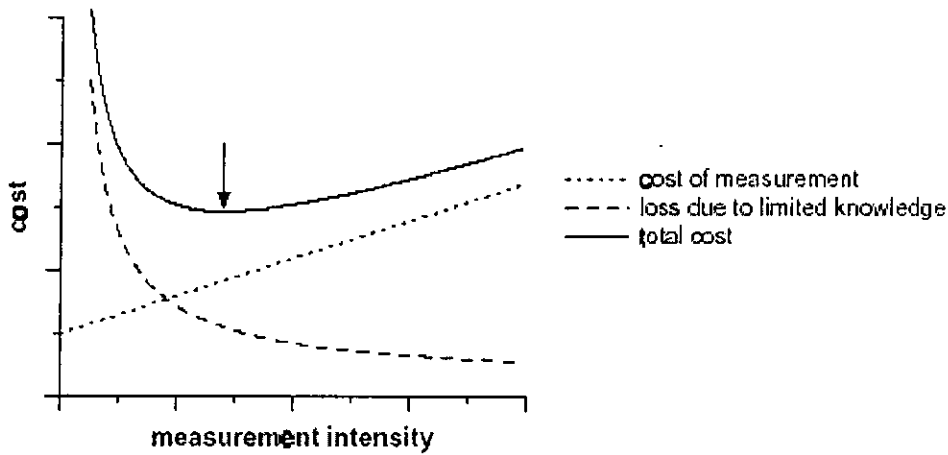


圖 4.1-12 監測井網優選：總成本為量測密度的函數，箭頭所指處為最優之量測密度。

該研究並以荷蘭的地下水監測井網為例進行分析。其結論包括，水質變化和土壤和土地使用的分區有密切的關係，但和其他的分區幾乎沒有關聯。其次，由比較減少數量前後的水質分布圖來看，監測井網密度有重大的影響。若將短期間的水質變化趨勢作外插並佐以當地的特殊狀況影響的誤差一起考量則可以對長期的地下水水質穩定變化趨勢進行預測。額外的資訊可以提升對於水質分布圖的正確性，這些額外的資訊包括模式的模擬結果或者是其他的量測資料。若有地下水水流(流向與流速)資料輔助，地下水水質變化分布的預測將更準確。

六、德國地下水監測井網 Jedlitschka, 2002

德國的飲用水水源 70%以上由地下水供應。德國的水資源由 16 個州自行管理，但為了協調各州的工作，聯邦政府組成了聯邦水資源工作委員會(Federal States Working Party, LAWA)，該委員會並於 1983 年提出了地下水水質監測計畫。

(一)、監測類型

監測包括三種類型：基本或參考監測井網(Basic or reference monitoring network)、使用者相關井網(User related monitoring)、排放相關井網(Emission related monitoring)。

- 基本井網包括量測基線水質和趨勢量測兩種，基線量測井必須要：描述天然地下水水質狀況、提供與受人為活動影響的井之水質的比較基準。趨勢量測井必須要：判定地下水水質長期變化趨勢、提供辨識出有害物質影響的比較基準、檢核地下水政策。
- 使用者相關監測井(主要是為了飲用水水質)必須要：監測飲用水保護區域上游、監測原水、監測飲用水、地下水保護區的監測。
- 排放相關監測井的目的則是控制潛在污染源的污染排放狀況。

(二)、監測參數與頻率

LAWA 的地下水觀測評估與地下水水質指引(1993)中有詳細描述。基本井網共有 2000 口監測井，其中巴伐利亞有 280 口，均由聯邦主管。設井時針對所有水質項目取樣分析。之後，根據狀況，在項目上調整。監測頻率為每年兩次或四次。以巴伐利亞為例，280 口監測井涵蓋了 70,000 km² 的面積，其每年監測與維護的成本約 2,000,000 馬克。

4.1.3 其它站網案例 s

Chicago Urban Area 空氣臭氧站網評估(Wikle et al.; 1999, “Space-Time Dynamic Design of Environmental Monitoring Networks”, Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistic)

(一)、研究目的

本參考案例出處為 Wikle et al.;1994，其研究目的為運用卡門濾波(Kalman filter)，來設計空間上及時間上動態之最佳環境監測站網。其藉由所建立之動態模式，能利用 t 時刻所提供之監測資訊，用於推估 $t+1$ 時刻之預測值，並同時可得預測值之推估誤差，再配合最佳化之方法求得 $t+1$ 時刻之最佳站網，如此即可設計一最佳之動態監測站網。最後，並將此方法運用在 Chicago Urban Area 空氣臭氧站網之評估。

(二)、研究方法步驟

- 1、為了評估可能之最佳化站網，必需先建立動態模式來描述系統於時間上及空間上之架構及系統噪音。於本案例中簡化系統之描述，以一階馬可夫鏈來建立系統方程式。
- 2、建立監測方程式，包含了各時刻之監測位置與監測誤差之資訊。
- 3、運用卡門濾波理論，配合上述建立之系統方程式與監測方程式，即可求得各時刻之預測值推估誤差。
- 4、利用卡門濾波可求得各時刻之預測值推估誤差特性，配合最佳化之方法進行設計站網。而於其研究中，所運用之站網最佳化之方法為使用簡單交換機制(simple exchange algorithm)，其概念為藉由卡門濾波求得各時刻之預測值推估誤差之分佈，即將下一時刻之監測點移至推估誤差為最大處，以藉由進行監測來降低推估誤

差。惟嚴格而言，以此法所之之井網並非統計上的最佳，其示意如圖 4.1-13

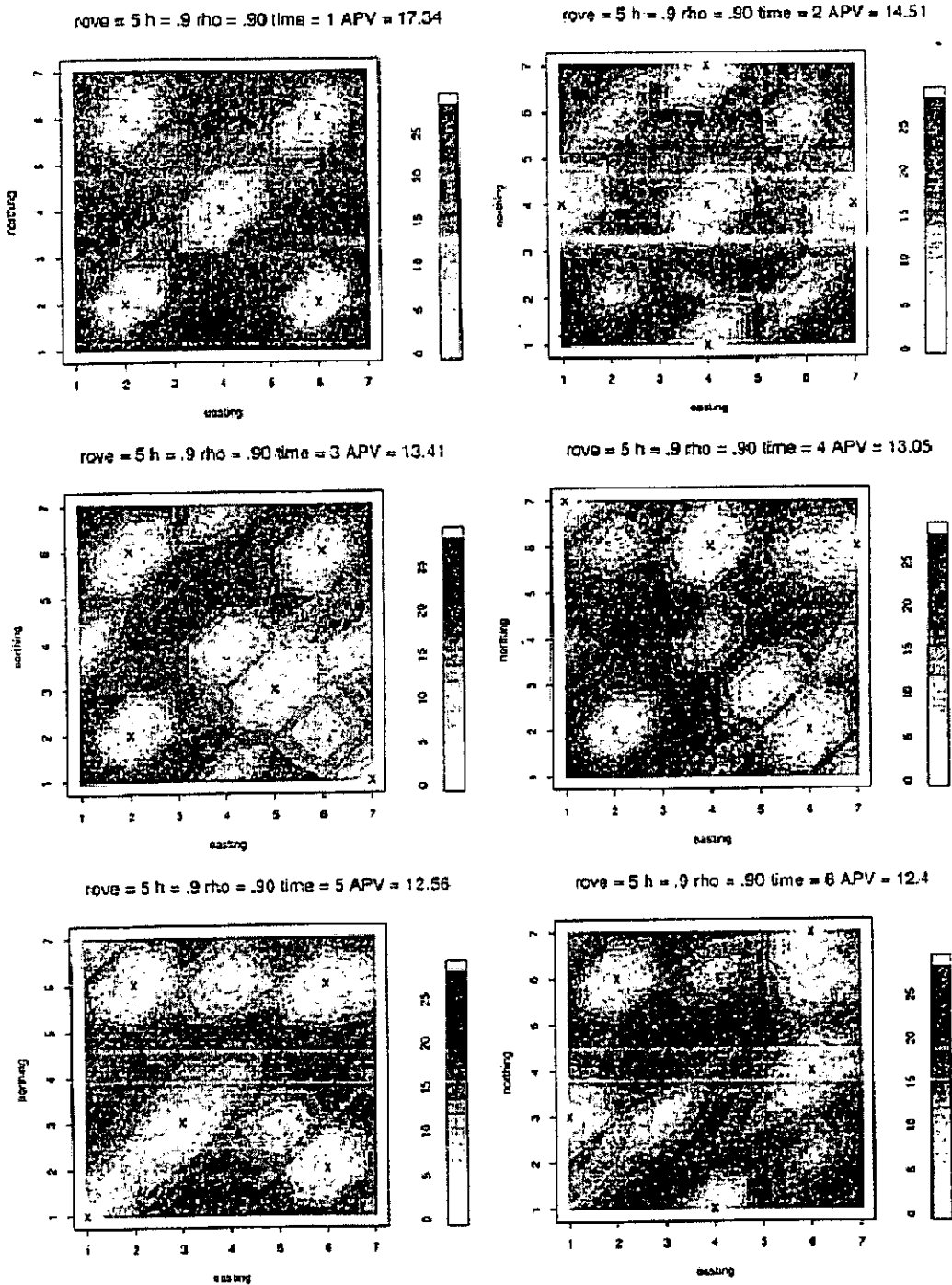


圖 4.1-13 隨時刻移動之優選動態站網示意圖

(三)、分析案例

1、案例分析結果

應用 Chicago Urban Area 地區 Chicago Urban Area 空氣臭氧站網評估，以既有 21 個監測點為候選站網(如圖 4.1-14)，進行空間上及時間上動態站網最佳化。

圖 4.1.11-3 為利用上述步驟，允許設站數為 5 站之時刻 1~時刻 9 最佳化動態站網。

2、分析結果驗證比較

如表 4.1-15 所示，其研究中，將上述實際案例之分析結果，分別與站網固定之情況、站網隨機產生之情況比較，由表中可看出以本研究優選之動態站網預測推估誤差為最小(Minimum prediction variance, MPV)。

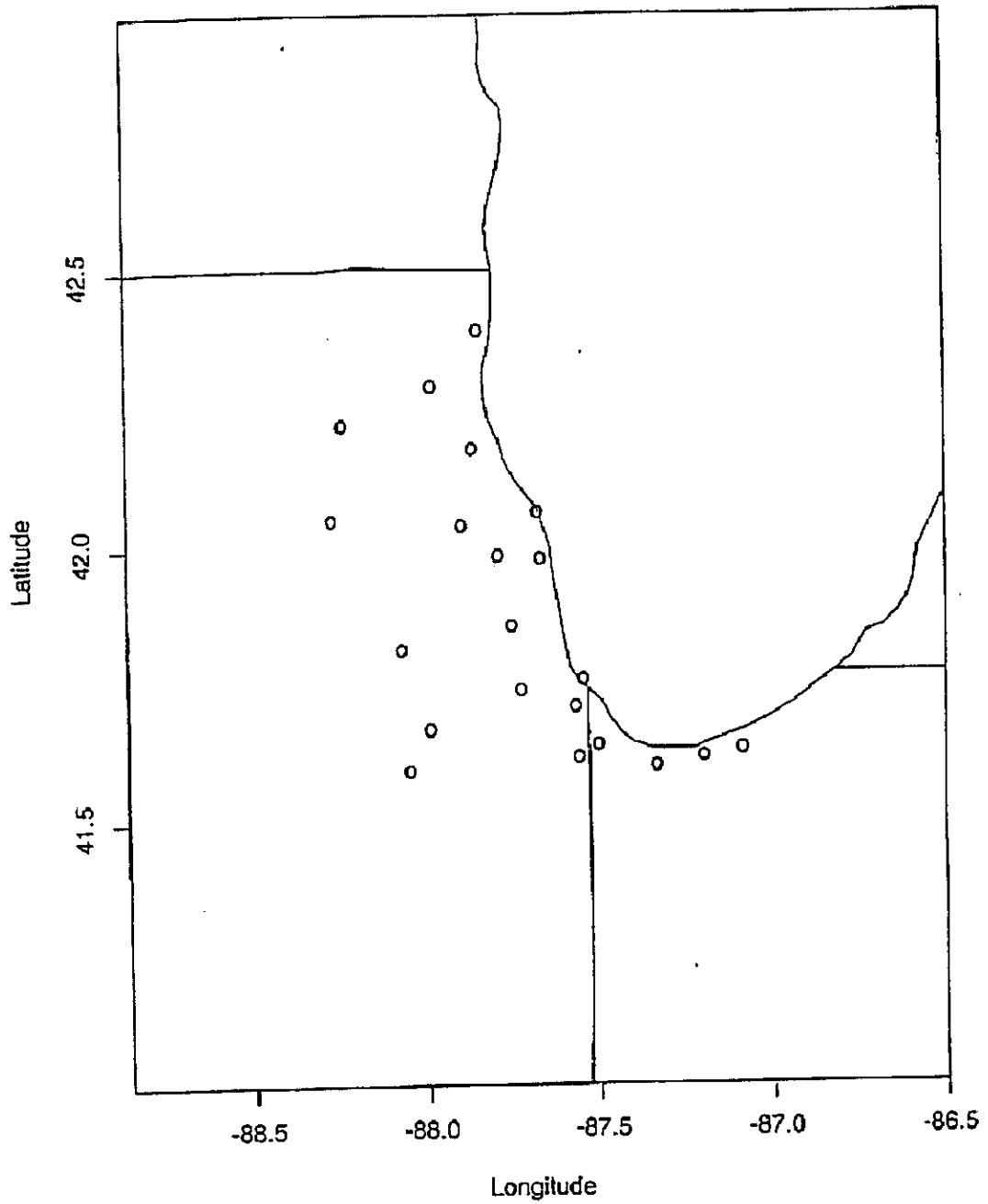


Figure 6. Locations of 21 Ozone Monitoring Stations in the Chicago Urban Area.

圖 4.1-14 Chicago Urban Area 地區既有空氣臭氧站網分佈圖

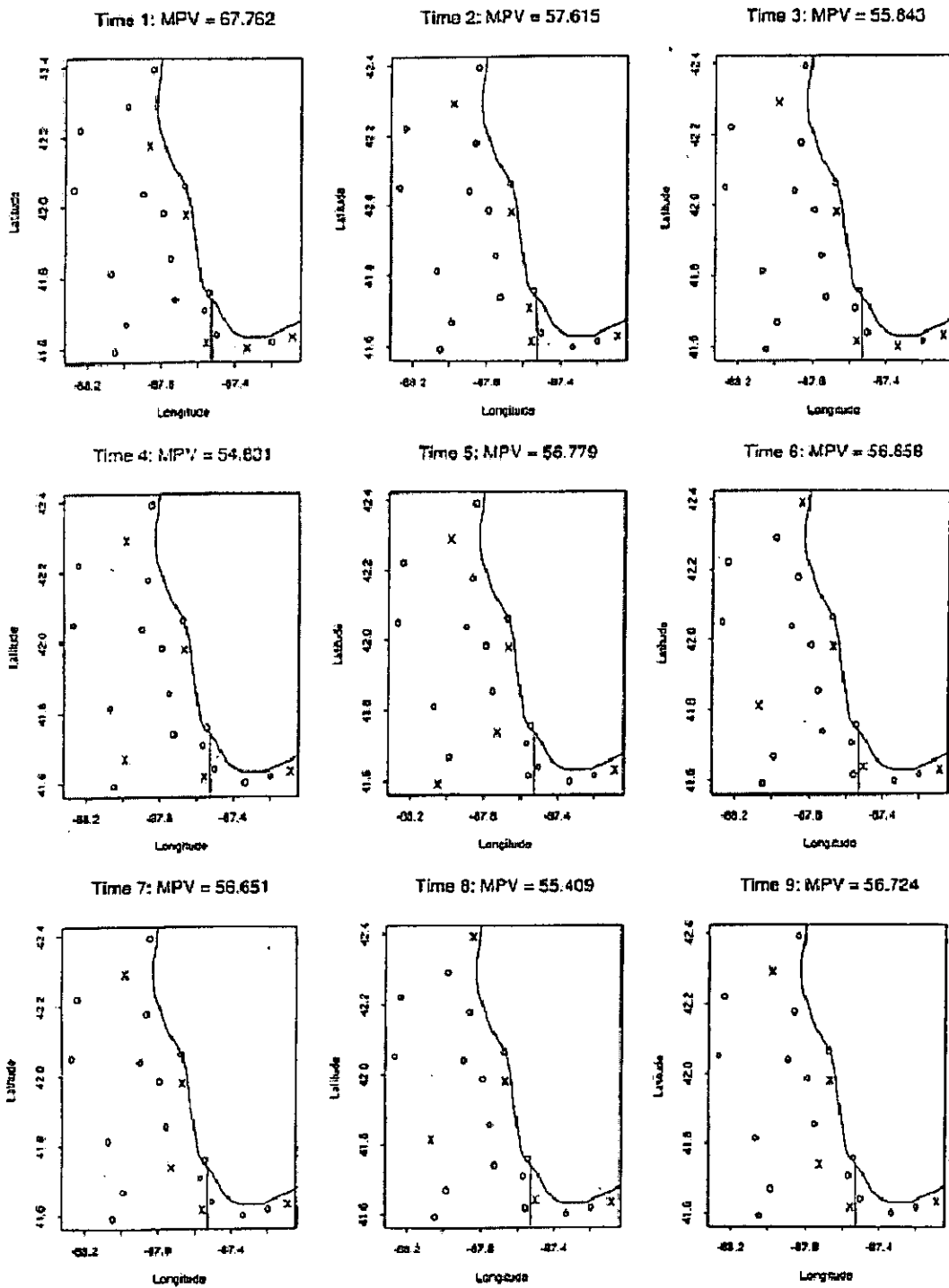


Figure 7. Optimal Design Locations (x) for the Chicago Monitoring Network Over the First Nine Times, Allowing Five Roaming Monitors.

圖 4.1-15 各時刻站網優選結果

表 4.1-12 各種方法設計井網之預測推估誤差(MPV)比較

Table 2. Minimized MPV Results from Chicago Area Ozone Network

<i>Design</i>	<i>Time 1</i>	<i>Time 3</i>	<i>Time 5</i>	<i>Time 7</i>	<i>Time 9</i>
Dynamic	67.76	55.84	56.78	56.65	56.72
Optimal fixed	67.76	64.14	63.10	63.03	63.01
Random ^a (min.) ^b	73.59	62.29	61.61	61.40	61.31
Random (mean) ^c	157.90	149.90	148.60	148.60	148.50

^a Based on 500 initial random designs fixed over all times.

^b The minimum MPV of all 500 random designs at each time.

^c The mean MPV of the 500 random designs at each time.

4.2 國內相關案例蒐集分析

以多變量統計區分屏東平原地下水含水層水質特性與評估井體之維護探討(王瑞君，中華民國 87 年 6 月,台灣大學)

(一)、研究目的

了解地下含水層水質特性是地下水觀測站網建立目的之一，並且能提供維護井體方法。目前對於地下水質特性分類判斷上，因受到地形地勢變化、地下礦物質複雜性、與質地結構間變異性，對於水質特性區分上常常具有不確定性影響，造成在水井維護工作上增加許多難度。

本研究藉由屏東平原地下水水質基本資料建立，利用多變量統計之因子分析法，評估屏東平原地下含水層水質空間分佈特性和分類主要影響其井體危害因子，並加以充分瞭解屏東平原地下水水質變化情形，以提供日後屏東平原在井體清洗判斷使用恰當方法、與未來井體維護之經濟價值衡量。

由數據執行結果顯示，屏東平原地下水水質特性分類上，最主要以「海水入侵因子」、「有機污染因子」、「含水層質地因子」、與「還原性因子」四個因子為具代表性，並且在屏東附近沿海地區是受到這四個因子影響最大區域，尤其是以「海水入侵因子」顯示出有逐漸由海向陸地入侵現象及分層入侵至內陸情形；而「有機污染因子」在屏東平原地下水中，最主要是受到畜牧廢水與生活廢污水的排放所致；而架設井體所使用的材質，以PVC管和鍍鋅鋼管的井體結構容易受到有機質吸附和鋅離子沉澱，造成井體腐蝕與阻塞現象。對於屏東平原在井體維護工作上需要進行洗井規劃的觀測井，以在海水入侵與

地盤下陷地區且為PVC套管材質觀測井需要做有效規劃維護清洗工作，避免加速井體的倒塌與破壞淪為廢井機會。

(二)、研究方法

在本研究中探討地下含水層水質特性分析項目，係根據「臺灣地區地下水觀測網」之屏東平原觀測井基本水質分析資料中19種水質分析項目作為基本資料，各項檢測項目為：酸鹼值(pH值)、比電導度(EC)、氧化還原電位(Eh)、氯鹽(Cl)、硫酸鹽(SO₄²⁻)、硝酸鹽(NO₃⁻)、氨氮(NH₃-N)、化學需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、總鹼度(Alk.)、總溶解固形物(TDS)、硫化物(H₂S)、鈣(Ca)、鎂(Mg)、鐵(Fe)、錳(Mn)、鋅(Zn)、鈉(Na)、鉀(K)。

(三)、分析案例

前臺灣省水利處於民國 78 至 79 年和 84 至 87 年間檢測屏東平原 39 站 92 口分層觀測井地下水質分析結果，經數據標準化透過因子分析結果從表 4.2-1 可知，在水質檢測分析 19 個項目中可由 6 個特徵值大於 1 主成份變數作為屏東平原地下含水層水質特性代表，並主成份總變異量代表性在 75.50%。而各主成份與原始變數關係可利用因子負荷量(表 4.2-2)可說明，當因子負荷量高即表示該成份在含水層間地下水質變化具較高關係性。

表 4.2-1 屏東平原地下水質之各因子特徵值與貢獻率

因子	特徵值	貢獻率 (%)	累計 特徵值	累計貢獻率 (%)
一	6.45	33.93	6.45	33.93
二	2.34	12.32	8.79	46.25
三	1.69	8.90	10.48	55.16
四	1.38	7.26	11.86	62.42
五	1.30	6.82	13.16	69.24
六	1.19	6.26	14.35	75.50

表 4.2-2 屏東平原地下水質之各變數的因子負荷量

	因子一	因子二	因子三	因子四	因子五	因子六
酸鹼度	-0.102	0.024	0.037	-0.644	-0.211	-0.309
電導度	☆ 0.890	-0.022	0.360	-0.010	0.057	0.083
氯鹽	☆ 0.818	0.096	0.355	0.082	-0.086	0.256
硫酸鹽	☆ 0.910	-0.005	0.181	-0.024	0.119	0.098
硝酸鹽	-0.090	0.006	-0.059	-0.430	-0.492	0.035
氮氣	0.519	-0.202	0.663	-0.109	0.307	-0.134
鈣	0.459	0.270	0.142	0.177	-0.077	0.557
鎂	0.183	-0.023	☆ 0.923	0.027	-0.050	0.181
鉀	0.237	0.083	☆ 0.915	0.006	0.067	0.158
鈉	0.669	-0.173	0.595	-0.033	0.004	-0.082
鐵	0.032	0.011	-0.119	0.132	☆ 0.765	0.084
錳	0.493	0.427	-0.133	0.106	0.095	0.345
鋅	-0.058	0.105	-0.008	☆ 0.803	-0.098	-0.213
總溶解固形物	☆ 0.897	0.021	0.327	0.021	0.036	0.157
氧化還原電位	-0.005	0.280	-0.177	0.108	-0.041	☆ -0.739
化學需氧量	☆ 0.713	0.105	-0.258	0.067	0.029	-0.285
生化需氧量	0.007	☆ 0.811	0.040	0.271	0.050	-0.226
總酸度	0.014	0.242	0.282	-0.207	☆ 0.731	-0.057
硫化物	0.021	☆ 0.824	-0.049	-0.144	0.102	0.012

(註：☆為相關顯著)

(四)、結論

1. 利用多變量統計分析19項因子能將屏東平原地下水質區分為「海水入侵因子」、「有機污染因子」、「含水層質地因子」與「還原性因子」四個因子為代表性。

2. 在屏東平原附近沿海地區是受到這四個因子影響最大區域，尤其是「海水入侵因子」，顯示出有逐漸往內陸入侵現象，並且入侵現象是屬於分層入侵進行。
3. 「有機污染因子」在屏東平原地下水水質影響上最主要是受到畜牧廢水與生活廢污水排放，以致於在高屏河流域、東港溪、林邊溪沿岸、和沿海附近地區地下水水質有受到有機污染現象。
4. 地下水井體材質使用為PVC材料者，則易吸附有機質，滋生硫化氫腐蝕井管；而以鍍鋅鋼管井體材質者，易使井管中鋅離子隨地下水接觸而溶入地下水中及沉澱在井管四周，增加地下水中重金屬鋅濃度、與腐蝕和阻塞套管及濾水管。
5. 在屏東平原地下水井井體維護工作上，建議須針對地下水質分類特性，即「海水入侵因子」、「有機污染因子」、「含水層質地因子」、與「還原性因子」這四個主要因子作預防措施及使用恰當清洗井體方法，以避免加速水井淪為廢井可能。
6. 在地下水水質中具有「有機污染因子」地區，建議應該規劃週期性井體清洗與維護工作，以避免地下水微生物或細菌滋生而腐蝕與阻塞井體
7. 由於架設井體所使用材質，有機會受地下水或地質條件等影響因素造成井體破壞機會，尤其是使用PVC與鍍鋅鋼材料，因此建議未來在架設觀測井之際，應避免使用這兩種材質為井體材料。
8. 海水入侵與地盤下陷現象在屏東平原沿海地區甚為嚴重，因此建議在於井體維護上應該注意與慎重。

4.3 各案例分析方法比較與結論

此節將就上述國內外之各案例分析方法，就運用方法、監測網密度、頻率、項目及在台灣之適用性等進行比較：

一、運用方法比較

根據本計畫報告中所提出的指標井相關國外案例分析，絕大部分以水位監測井的篩選為主，極少數是以水質指標井為篩選標的。

利用單變數地質統計方法來考慮水質監測指標井的設置，國內的經驗為前水資源局主辦之台灣地區地下水觀測網水質調查分析及指標井選定研究(前水資源局，民國 88 年)。以導電度進行分析的結果，對於濁水溪沖積扇與屏東平原的監測井進行篩選，可以得到優先捨去的監測井井位的排序。但是，雖然導電度(考量導電度與總溶解固體 *TDS* 之間的密切相關性)幾乎可以算是最重要的一項水質參數，但是僅以導電度單一參數來進行篩選，其代表性仍具有相當的討論空間。但是濁水溪沖積扇與屏東平原的案例，因為沿海地區的地下水有鹽化的現象與持續加劇的趨勢，因此以導電度來作為考量的基準，仍屬於最佳的選擇。

在多變量地質統計方面，不論是利用聯合克利金法、主因子分析，都可以根據既有的水位監測井之水位資料，研判出對於水位趨勢變化最具有代表性的站井，找出影響水位變化的主要因子，且可以對於個別站井對於整體井網觀測結果的相對影響程度作出排序(Olea, 1984; Fethi et al.; 1994; Winter et al., 2000; Gangopadhyay et al.; 2001)。國外的經驗顯示，利用多變量地質統計可以明確掌握地下水水位變化的趨勢，對於選擇指標井來說是最有效率且效果最佳的方法。

國內方面曾以多變量統計區分屏東平原地下水含水層水質特性

與評估井體之維護探討(王瑞君，民國八十七年)，藉之判斷影響屏東平原地下水水質的主要因素。該研究的成果對於屏東平原地下水的概況作出了基本的分析，提供日後屏東平原在井體清洗判斷使用恰當方法、與未來井體維護之經濟價值衡量。

在利用卡門濾波方面則以空氣臭氣站網評估(Wikle et al.; 1994)較具有代表性，在地下水的應用上較缺乏經驗。國外的經驗顯示，要利用卡門濾波法來分析地下水的問題，在考量地下水水位變化上，過去曾經有過經驗，例如 Zhou (1991)曾經利用卡門濾波結合 MODFLOW 發展出 KALMOD，但是由於系統的複雜性，僅能考慮小區域的問題。也因此利用卡門濾波法來分析地下水水質監測井，在技術上有相當的困難，因此截至目前為止，尚未有相關的研究成果(Zhou, 2002)。

二、監測網密度、頻率、項目

就監測井網的站井密度、監測頻率與項目方面，本計畫蒐集了美國國家與州政府地下水監測計畫、歐盟、德國、荷蘭等國家與地區的地下水水質監測現況以及監測井設置的原則。根據各國的井網現況、設置目的、與未來需求不同，因此在站井的選取上有不同的準則，但是對於水質項目方面的建議則相當一致。

其中以歐盟環保署的監測井網特性與本計畫最相近，因此其資料最具有代表性。基本的監測項目與目前水利署所選擇的三十餘項相近，而歐盟目前站井的平均密度約為每 20 - 25 km² 一站。

在國內案例方面，前水資源局主辦之台灣地區地下水觀測網水質調查分析及指標井選定研究(前水資源局，民國 88 年)提出的規劃，則兼具高污染潛勢區的水質污染預警目的。因此，對於含水層二以下，

主要以地質統計為指標井篩選依據，對於含水層一，則以 DRASTIC 污染潛勢作為選定指標井的依據。並將監測井分級以區分各井所需要進行監測的水質項目。

該研究建議的監測架構可分為背景水質檢測、定期檢測及連續監測等三個層次，其中連續監測只在特殊情況及目的下才進行，背景水質監測則在每口井建井後進行，主要規劃的重點在定期檢測部份，定期檢測又分為 2 級，第 1 級只進行水溫、pH 值、電導度、總溶解固體量等基本水質檢測，第 2 級檢測項目則依土地利用的不同而不同。第一級監測井總數濁水溪沖積扇 125 口與屏東平原 101 口，佔目前總數 314 口的 71.97%。第二級井在濁水溪沖積扇共有 62 口，屏東平原共 26 口，佔目前總數 314 口的 28.03%。

三、各案例相關方法在台灣之適用性

本章所蒐集與分析的地下水監測相關案例，可以區分為兩個面向來考量。首先，在各國的水質監測井設置密度與監測頻率方面，因個別計畫的監測目的、地下水資源的重要性、地下水利用的程度、水質之變化、污染潛能、可用經費等，而各有所不同。若目的為建立地下水區域的長期水質趨勢變化，不考慮人為影響，則監測井密度較低，且設置專屬的水質監測井，且監測井的位置多選擇遠離高度開發與人口密集的區域。另一方面，若水質監測的目的為即時了解目前使用的地下水水質(流通地下水水質，Ambient water quality)，則以現有的生產井所抽出的地下水為取樣標的，且採集地下水集中或大量使用區的水樣。若以建立地下水背景水質為目的，且輔以地下水污染趨勢分析，則監測井的分布在空間上較為平均，密度亦較高；亦主要目的建立長期背景水質變化之外，且並不以『污染偵測』為目標。這些監測

井與本計畫所欲建立的指標井目的相同。

特定高污染潛勢場址(例如廢棄物處理設施、工業區等)所設置的地下水監測井不同，這些特定區域的水質監測井係以『污染偵測』為目的，並非以監測區域性的水質變化為原則，因此與本計畫的目的截然不同。

其次，就監測井選擇的方法上而言，基本上並無地區性的區隔，亦即方法的適用性並無地區性的差異。但必須要注意的是，在使用各種方法時，必須先針對各地區的水文地質條件具有充分的了解，才能夠妥善地利用這些方法。具體而言，利用地質統計方法的關鍵之一，即必須要對於地下水進行妥善分層，在區分出主要的水文地質單元之後，針對個別的含水層進行分析。同時，必須要對於各含水層的邊界條件具有相當的了解才能夠對於分析的結果作出有意義的詮釋。

對於台灣地區來說，地下水的水質監測問題的分析，具有相當的困難性。除了在先天條件上，例如濁水溪沖積扇和屏東平原因為阻水層的連續性較差，因此水文地質單元無法明確區分之外，還有相當多的人為因素。人為因素中最重要的包括了台灣地區的地下水抽水井過去並無有效管制，且停用之後並無適當的封井措施，因此廢棄的抽水井往往成為貫通阻水層的路徑。這兩大因素，是台灣地區地下水水質的變化較不易掌握的重要原因之一。

即便如此，地質統計方法仍是目前考慮地下水水質空間變化的最佳工具。縱然台灣的地下水含水層狀況複雜，只要掌握了含水層的水文地質條件，仍可以利用地質統計方法進行有效的分析與評估。

第五章 水質指標井選定方法評估

5.1 單變數地質統計配合降低變異數法於站網設計

5.1.1 理論基礎

一、區域性變數理論

地質統計學上常以一種空間隨機函數 $Z(X)$ 表示任何與地質有關之參數，稱為區域性變數（以下簡稱Re.V.），其中 $X=(x,y,z)$ 代表點所在之空間位置。一般而言，Re.V.所呈現的兩大特質可歸納如下：

- 1、隨機性（randomness），即在所分析區域中任一點值，皆具不確定性。
- 2、結構性（structure），對任一研究區域而言，Re.V.除具有上述的隨機性，亦同時具有某種統計上的結構性，如Re.V.於空間上可能具有某種趨勢（trend），又稱為空間傾向值（drift）；以及Re.V.於不同位置的觀測值之間亦可能具有某種程度的相關性（correlation）。在區域性變數理論中，則以半變異元（semivariogram）作為此相關性之量化表示式。

半變異元亦稱為半變異數（semi-variance），其可以Re.V.沿特定方向但不同位置間之隨機函數或其殘數值（residual）之差的變異程度來表示，其定義式如下：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Z(x) - Z(x+h))^2] \quad (5.1-1)$$

其中， h 為相異兩點間之分離向量；若Re.V.具等向性(isotropic)，則 h 為任兩點之分離距離。以下則假設Re.V.為等向性。

就計算上而言，半變異元亦可由下列經驗式求得：

(1) 假設Re.V.符合穩定 (stationary)，亦即Re.V.之平均值為常數，則半變異元可由下式估算[Journel，1984]：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (5.1-2)$$

(2) 假設Re.V.呈現非穩定 (nonstationary) 狀態，可將隨機函數 $Z(x)$ 視為一定常數項 $m(x)$ — 稱之空間傾向值 (drift)，與一隨機項 $R(x)$ — 稱之殘數值 (residual) 之和；亦即

$$\begin{aligned} E[Z(x)] &= m(x) \\ Z(x) &= m(x) + R(x) \end{aligned}$$

則半變異元可以由下式估算：

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [R(x) - R(x+h)]^2 \quad (5.1-3)$$

其中，式(5.1-2)與式(5.1-3)中之 n 為落於間距 h 內之任相異兩樣本點的組合配對數 (pairs)。

有了以上半變異元的推算公式，可計算出各間距內之半變異元值，而最後半變異元模式之建立則由 h 對 $\gamma(h)$ 之關係圖中以迴歸法或觀察方式決定。

繼續並介紹三個與半變異元相關之名詞：

1、基值 (sill)：

在對 $\gamma(h)$ 關係圖中，當 $\gamma(h)$ 漸增且收斂至一定值 C ，則此 C 值稱之為基值。

2、影響範圍 (range)：

在對 $\gamma(h)$ 關係圖中，基值所對應之分離距 $h=r$ ，稱之為影響範圍 (range) 或影響半徑 (radius of influence)。

3、金塊效應 (nugget effect)：

就式(5.1-1)而言， $Z(x)$ 應有 $\gamma(0)=0$ ，惟在實際應用上，常有當 $h=0$ 時， $\gamma(0)=C_0 \neq 0$ 的情況發生，此稱為金塊效應。

一般而言，半變異元模式以以下三種模式為最常見，其分別為：

(1) 指數模式(Exponential model)：

$$\gamma(h) = C_0 + Sill[1 - \exp(-3h / Range)] \quad (5.1-4)$$

(2) 高斯模式(Gaussian model)：

$$\gamma(h) = C_0 + Sill\{1 - \exp[-(3h / Range)^2]\} \quad (5.1-5)$$

(3) 球狀模式(Spherical model)：

$$\gamma(h) = C_0 + Sill\left[\frac{3}{2}(h / Range) - \frac{1}{2}(h / Range)^3\right] \quad (5.1-6)$$

Re.V除了本身之結構性之外，在不同的Re.V之間，可能也有某種程度上之空間的相關性。在區域性變數理論中，則以複半變異元 (Cross-Semivariogram)作為此相關性之表示。

如同前述之半變異元之定義，複半變異元可定義如下：

$$\gamma_{kk'}(h) = \frac{1}{2} E \left[\left(Z_k(x) - Z_k(x+h) \right) \left(Z_{k'}(x) - Z_{k'}(x+h) \right) \right] \quad (5.1-7)$$

然而，在真正計算複半變異元時，將會發現複半變異元大多無法如同半變異元一般能夠由前述之模式來建立。因此Myers[1982]提出了一個方法，可由二個變數之半變異元模式及二個變數和之半變異元模式之關係來推估出此二變數之複半變異元模式。其關係式如下：

$$\gamma_{kk'}(h) = \frac{1}{2} \left[\gamma_{k,k'}^+(h) - \gamma_k(h) - \gamma_{k'}(h) \right] \quad (5.1-8)$$

其中 $\gamma_{kk'}(h)$: 變數k 與 k' 之複半變異元

$\gamma_{k,k'}^+(h)$: 變數k 與 k' 之和之半變異元

$\gamma_k(h)$: 變數k 之半變異元

$\gamma_{k'}(h)$: 變數 k' 之半變異元

二、克利金推估

克利金法為一種由地質統計學為理論基礎所發展出來的內插方法，其具有最佳線性不偏性推估(BLUE)之特質，可對有限區域內的Re.V.進行推估。此外，不同特性的Re.V.，有不同的克利金推估方法，針對Re.V.為非定常性時，我們介紹通用克利金法(Universal Kriging)。

當Re.V.為非定常性時，

$$m(x) = \sum_{l=1}^k a_l f_l(x) \quad (5.1-9)$$

其中， $f_l(x)$ 為已知函數， a_l 為未知係數。

克利金推估乃是以已知點推估未知點 X_0 之值，其可以表示為線性的形式：

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{i0} Z(X_i) \quad (5.1-10)$$

其中， $Z^*(X_0)$ 為位置 X_0 之推估值， $Z(X_i)$ 為位置 X_i 之觀測值， λ_{i0} 為位置 X_i 推估 X_0 之權重。

上式之 λ_{i0} 需滿足不偏性 (unbiasedness) 及最小推估方差 (minimum squared error)，這些條件可寫成：

$$E[Z^*(X_0) - Z(X_0)] = 0 \quad (5.1-11)$$

$$\text{Var}[Z^*(X_0) - Z(X_0)] = \min. \quad (5.1-12)$$

將式(5.1-9)及式(5.1-10)代入式(5.1-11)可進一步寫成：

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{i0} f_l(x_i) = f_l(x_0) \quad (5.1-13)$$

其中 $l = 1, \dots, k$

而式(5.1-13)可利用標準拉格蘭茲法，加入k個拉格蘭茲參數 μ_l ，並對 λ_0 作偏微分使等於零，則可得到下式：

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{i0} \gamma_{ij} + \sum_{l=1}^k \mu_l f_l(X_j) = \gamma_{j0} \quad (5.1-14)$$

其中 $j=1, \dots, n$

聯合式(5.1-13)及式(5.1-14)即是通用克利金系統，並可表為下列之矩陣式：

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & - & - & 0 & 1 & 1 & - & - & 1 \\ 0 & 0 & - & - & 0 & f_1^2 & f_2^2 & - & - & f_n^2 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & - & - & 0 & f_1^k & f_2^k & - & - & f_n^k \\ 1 & f_1^2 & - & - & f_1^k & \gamma_{11} & \gamma_{12} & - & - & \gamma_{1n} \\ 1 & f_2^2 & - & - & f_2^k & \gamma_{21} & \gamma_{22} & - & - & \gamma_{2n} \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 1 & f_n^2 & - & - & f_n^k & \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & - & - & \gamma_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{10} \\ \mu_{20} \\ - \\ - \\ \mu_{k0} \\ \lambda_{10} \\ \lambda_{20} \\ - \\ - \\ \lambda_{n0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ f_0^2 \\ - \\ - \\ f_0^k \\ \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ - \\ - \\ \gamma_{n0} \end{bmatrix} \quad (5.1-15)$$

而式(5.1-7)所述的克利金變異數(Kriging variance)可進一步寫為

$$\sigma_{uk}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_{i0} \gamma_{i0} + \sum_{l=1}^k \mu_l f_l(X_0) - \gamma_{00} \quad (5.1-16)$$

三、降低變異數分析

克利金變異數可作為新設井位置的指標[de Marsily, 1979]，例如有最高推估不確定性的地區可當作是新的設井位置，因此我們可以在具有較高的克利金變異數之區域設井。降低變異數法(以下簡稱VRA)[Rouhani, 1983]則更進一步將新增井位對整個推估地區造成的精確度增量納入考量，故每次的佈井皆能考慮到前一個增加的井造成整個區域變異數的改變，如此一來可達到單點佈井之最大精確度。

首先，建立一個當在區域中一點新設井而造成相對於其他任意點的克利金變異數降低量的關係。這樣的關係類似一種反應函數(response function)，它提供了 $Z(X_0)$ 在精確度上的改進程度，藉由計算當在 X_0 新增一口井時，相對於其它各點的改進程度，可進一步地計算整個區域的總變異數降低量，再比較當其它位置為新設井位置時所造成的總變異數降低量，以作為設井的依據。

利用前述得到的代表克利金系統之矩陣(5.1-15)，將該矩陣簡化為如下的符號：

$$AW_0 = a_0 \quad (5.1-17)$$

當我們利用 N 個已知點來推估位置 X_0 之值，且其對應的克利金變異數為 $V_0(N)$ 可寫為：

$$V_0(N) = \gamma_{00} - \begin{bmatrix} \mu_{10} & \cdots & \mu_{k0} & \lambda_{10} & \cdots & \lambda_{N0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ f_0^2 \\ \vdots \\ f_0^k \\ \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \end{bmatrix} \quad (5.1-18)$$

由式(5.1-17)中的定義，且A為對稱矩陣，

$$V_0(N) = \gamma_{00} - W_0^T a_0 \quad (5.1-19)$$

$$V_0(N) = \gamma_{00} - a_0^T A^{-1} a_0 \quad (5.1-20)$$

其中，上標T表示向量置換 (transpose)。

當我們在 X_* 新增一量測點時，式(5.1-20)中的A矩陣改寫成近似A的矩陣 A_* ， A_* 即是A矩陣中新增最底部的一列及最右邊的一行， $V_0(N+1)$ 可寫成以下形式：

$$V_0(N+1) = \gamma_{00} - \begin{bmatrix} a_0^T & \gamma_{0*} \end{bmatrix} A_*^{-1} \begin{bmatrix} a_0 \\ \gamma_{0*} \end{bmatrix} \quad (5.1-21)$$

其中

$$A_* = \begin{bmatrix} A & a_* \\ a_*^T & \gamma_{**} \end{bmatrix}$$

$$a_*^T = \begin{bmatrix} 1 & f_*^1 & \cdots & f_*^k & \gamma_{1*} & \gamma_{2*} & \cdots & \gamma_{N*} \end{bmatrix}$$

Nobel與Daniel[1977]介紹一個相關近似矩陣 (bordered matrices) 的定理指出

$$A_*^{-1} = \begin{bmatrix} A & a_* \\ a_*^T & \gamma_{**} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} F & P \\ P^T & \alpha \end{bmatrix} \quad (5.1-22)$$

其中

$$F = A^{-1} + \alpha A^{-1} a_* a_*^{-1} A^{-1}$$

$$\alpha = \left[\gamma_{**} - a_*^T A^{-1} a_* \right]^{-1} = [V_*(N)]^{-1}$$

$$P = -\alpha A^{-1} a_*$$

A為可逆矩陣

將式(5.1-22)代入式(5.1-21)得到下式

$$V_0(N+1) = \gamma_{00} - a_0^T A^{-1} a_0 - \alpha a_0^T W_* W_*^T a_0 + 2\alpha \gamma_{*0} a_0^T W_* - \alpha \gamma_{*0}^2 \quad (5.1-23)$$

考慮式(5.1-20)，則變異數的降低量可寫成

$$V_0(N) - V_0(N+1) = \frac{1}{V_*(N)} \left[\gamma_{*0} - a_0^T W_* \right]^2 \quad (5.1-24)$$

其中

$$W_*^T = [\mu_{1*} \quad \mu_{2*} \quad \cdots \quad \mu_{k*} \quad \lambda_{1*} \quad \cdots \quad \lambda_{N*}]$$

$V_*(N)$ ：尚未在 X_* 設井前，推估此點的變異數

λ_{i*} ：尚未在 X_* 設井前，推估此點 $\hat{Z}(X_*)$ 的克利金權重

μ_{k*} ：尚未在 X_* 設井前，推估 $\hat{Z}(X_*)$ 的拉格蘭茲參數

最後，將 W_* 代入式(5.1-24)，則得到因新增的已知點所引起的變異數降低量 VR_{*0} 為：

$$\begin{aligned} VR_{*0} &= V_0(N) - V_0(N+1) \\ &= \frac{1}{V_*(N)} \left[\gamma_{*0} - \sum_{i=1}^N \lambda_{i*} \gamma_{i0} - \sum_{l=1}^k \mu_{l*} f_l(X_0) \right]^2 \end{aligned} \quad (5.1-25)$$

其中

γ_{ij} 為 $\hat{Z}(X_i)$ 與 $\hat{Z}(X_j)$ 的半變異元值

式(5.1.1-25)定義為在位置 X_* 設一新觀測點而造成位置 X_0 的「變異數降低量 VR_{*0} 」，也就是當新增一觀測點時所增進克利金推估值的信賴度。

在 $Re.V$ 為定常性時，均以一般克利金法 (Ordinary Kriging) 推估。依照上述導證方法，可得到以一般克利金法推估的結果，式(5.1-25)化簡為下式：

$$VR_{*0} = \frac{1}{V_*(N)} \left[\gamma_{*0} - \sum_{i=1}^N \lambda_{i*} \gamma_{i0} - \mu \right]^2 \quad (5.1-26)$$

VR_{*0} 只與半變異元、已知點的分佈幾何及 X_* 之克利金變異數有關，因此它是一個用來設計與規劃預期井位的適合工具。另外一個優點是此演算法的計算效率較優。此外， VR_{*0} 為一正定矩陣，這表示任何一個新加入井位都將降低克利金變異數，亦即會令整個區域的推估更加精確，而這些新增的點並不會改變此區域原有的半變異元的結構。

5.1.2 降低變異數法於指標井站網設計之流程

本小節主要說明降低變異數法於指標井站網設計之流程（圖 5.1-1），井網設計之作業項目茲分別說明如下。

步驟(1)：已知觀測站井歸層

根據已有站井的分佈以一站多井為原則，故以濾水管深度對映到已知之地層架構得到之井位分佈作為分層依據。

步驟(2)：研究區域邊界定義

參考區域水文地質資料，來擬定研究區域邊界。

步驟(3)：決定可能作為指標井之井位

一般於觀測站網增設檢討時，直接以用地取得較有可能之國小位置作為後續井網設計時之可能設站井點。而對於本計畫之指標井站網評估，即只以已設站之井位作為可能捨去站井之選擇位置。

以上為井網設計之前置作業，而於後續之井網分布及站井選定主要步驟為先對資料較充足之含水層之所選定之水文地質參數結構分析，再進行降低變異數法初步排定各井之捨去優先次序，並計算對應之效能曲線以決定有效井數。

步驟(4)：水文地質參數結構分析

此為整個水文地質參數分析的第一步驟，目的為了解整個含水層各水文地質參數的統計結構，並為後續分析的基礎。

因考慮分析區域有空間傾向值(Drift)存在，可以多變數線性迴歸求得空間傾向值之後，繼續再以殘數值(Residual)進行結構分析。

步驟(5)：總降低變異量比及效率分析

對於井網之增設評估時，其主要的精神在於對區域中每增加一個觀測點，則會由於此觀測點的加入，提高此區域中對觀測點以外的點之內差精度(區域總變異量降低)。反之亦然，在進行指標井選

定，每減少一口井之水質檢測，其區域水質推估變異量將增加，而使變異量增加最少的井，應是當時可優先停止水質檢測的井，如此可依序決定出各井被捨去的優先順序。當結構分析之量化表示式及可能捨去井位置決定之後，便進行本研究對井網規劃的最後一個程序-增加變異量分析，由各可能捨去井之位置來決定下一個將捨去的觀測井位置。

由於地下水觀測站網建置計畫雖然非常必要，然而在成本及效益評估上卻不容易有明確的量化指標，因此配合站網各井點的降低推估誤差效率，定義佈井效率以作為可能指標井選定井數之參考資訊。此處之佈井效率定義為：

$$E(n) = \frac{TV_{(n)}(x_n, y_n) - TV_{(n-1)}(x_n, y_n)}{TV_{(n)}(x_n, y_n)} \quad (5.1-27)$$

(x_n, y_n) : 第 n 口井之位置

$E_{(n)}$: 第 n 口井之誤差降低效率

$TV_{(n-1)}(x_n, y_n)$: 在未捨去第 n 口井之前, 以 (x_n, y_n)

為中心, 影響半徑(Range)範圍內之總變異量

$TV_{(n)}(x_n, y_n)$: 捨去第 n 口井之後, 再以 (x_n, y_n) 為中心, 影響半徑

範圍內之總變異量

步驟(6)：初步選定各層指標井

在考慮分析誤差及配合總降低變異量比及效率分析，初步規劃各層指標井站網之位置及數量。

步驟(7)：各層井網分佈檢討

根據各層之指標井選定分析結果，在考慮地質結構情形下，或參考其它分析之結果，如污染潛勢分析系統(DRASTIC)之分析成果，進行三度空間之指標井站網位置檢討。

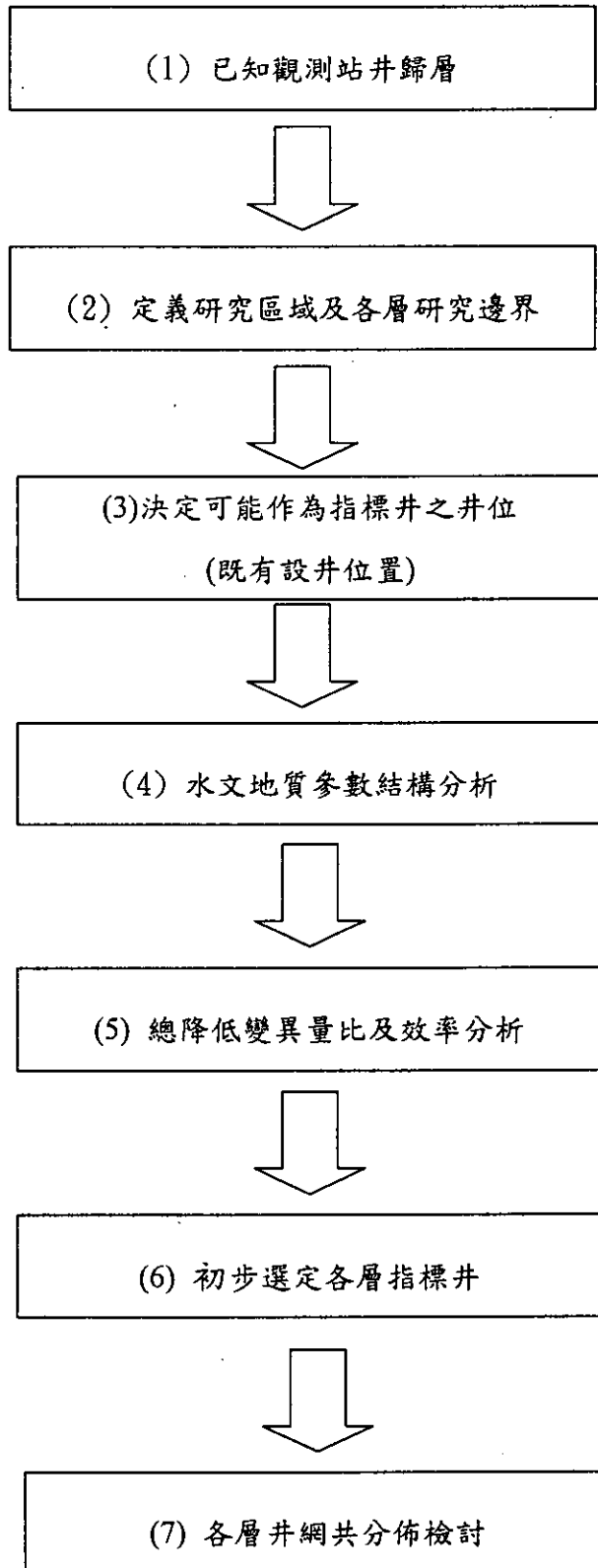


圖 5.1-1 降低變異數法於指標井站網設計之分析流程圖

5.2 多變量地質統計

5.2.1 多變量地質統計理論

克利金法等地質統計方法係採用實際資料在空間上或時間上的特性進行統計推估。多變量分析提供了像主要因子分析 (principal component analysis) 及相關因子分析等方法，將量測所得的變數值間之相互關係進行分級。因為多變量地質統計同時利用了空間上或時間上之相關性與多變量之間的關係來找出不同尺度之空間變異性的來源，所以可以說是結合了地質統計及多變量分析二者之優點。

由於在許多相關理論書籍 (Deutsch and Journel, 1992; Wackernagel, 1995; Goovaerts 1997) 及文獻 (Goovaerts, 1992; Wackernagel, 1994) 中都已經對多變量地質統計方法有詳細的敘述，以下僅作一摘要說明。

在地質統計中以變異元 (variogram) 來量化資料之相關性，這些資料也包括空間上或時間上之共變異量函數。地質統計中，將這些變異元模式稱之為空間或時間結構 (structure)，並以空間上或時間上之各觀測值之相關性定義之。

取樣值和取樣點距離間的關聯性可以利用變異元來量化 (Lin and others, 2001)。變異元 (variogram) 之定義式如下：

$$\gamma(h) = (1/2)\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] \quad (5.2-1)$$

其中

h ：為各配對之取樣點之間距

Var ：為變異數

$Z(x)$ ：為 x 位置上之區域性變數值

$Z(x+h)$ ：為 $x+h$ 位置上之區域性變數值

變異元則可由下列經驗式求得：

$$\gamma(h) = 1/[2n(h)] \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (5.2-2)$$

其中：

$\gamma(h)$ ：為間距 h 內之變異元

n ：為落於間距 h 內之任相異兩樣本點的組合配對數(pairs)

利用類似方法可得出在不同的變異元之間可能存在的空間相關性，若以複變異元 (Cross-variogram) 來表示，則其定義如下：

$$\gamma_{\alpha\beta}(h) = 1/[2n(h)] \sum_{i=1}^{n(h)} [Z_{\alpha}(x_i + h) - Z_{\alpha}(x_i)][Z_{\beta}(x_i + h) - Z_{\beta}(x_i)] \quad (5.2-3)$$

要對一組隨機函數做多變量分區化，則是利用成空間上的線性多變量模式來進行，以方便多變量資料的運算與分析 (Wackrangel, 1995)。複變異元套疊模式之線性組合如下式所示：

$$\gamma_{\alpha\beta}(h) = \sum_{u=1}^{N_s} \gamma_{\alpha\beta}^u(h) = \sum_{u=1}^{N_s} b_{\alpha\beta}^u g^u(h) \quad (5.2-4)$$

其中：

N_s ：為空間尺度之數目

$b_{\alpha\beta}^u$ ：為係數

$g_{\alpha\beta}^u(h)$ ：為變異元函數

根據以上的套疊模式，空間尺度中 m 個分區變數之係數 $b_{\alpha\beta}^u$ 之 $m \times m$ 維的共區域化矩陣可以表示為：

$$B^u = (Q^u \sqrt{\Lambda^u})(Q^u \sqrt{\Lambda^u})^T = A^u A^{uT} \quad (5.2-5)$$

其中 Q^u 為空間尺度 u 之特徵向量(eigen vectors)矩陣， Λ^u 為空間尺度 u 之特徵向量(eigen values)對角矩陣， A^u 為分區因子 $Y_p^u(x)$ 與空間因子 $Z_i^u(x)$ 之間的轉換係數矩陣。

此外，可以用下式計算各個在空間尺度u中之變數配對的分區相關係數 $r_{\alpha\beta}^u$ ：

$$r_{\alpha\beta}^u = \frac{b_{\alpha\beta}^u}{\sqrt{b_{\alpha\alpha}^u b_{\beta\beta}^u}} \quad (5.2-6)$$

一組隨機函數 $Z_i(x)$ ，可以被分解成多組的空間上的非相關因子 (Goovaerts, 1992; Rouhani and Wackernagel, 1990; Wackernagel 1995)。

$$Z_i(x) = \sum_{u=1}^{N_i} Z_i^u(x) \quad \text{with} \quad Z_i^u(x) = \sum_{p=1}^m a_{ip}^u Y_p^u(x) \quad (5.2-7)$$

其中

$Y_p^u(x)$ ：為空間尺度u之分區因子，p表示不同的因子

N_s ：為空間尺度之數目

利用聯合克利金法(co-kriging)求得之 x_0 點的空間因子 Z_k^u ，可由下式表示：

$$Z_k^u(x_0) = \sum_{i=1}^m \sum_j^n \lambda_{ji} Z_i(x_j) \quad (5.2-8)$$

克利金系統可由下式求解，

$$\sum_{\eta=1}^m \sum_{\tau=1}^n \lambda_{\tau\eta} \gamma_{i\eta}(x_j - x_\tau) - \mu_i = b_{ik}^u g^u(x_j - x_0)$$

$$\text{and} \quad \sum_{\tau=1}^n \lambda_{\tau i} = 0 \quad (5.2-9)$$

其中：

μ_i ：拉格蘭茲參數 (Largrange multiplier)

$g^u(x_j, x_0)$ ：第u個基本變異元函數 $g^u(h)$ 以第j個取樣點和 x_0 點代入所得之值

i：為 1, ..., p

j : 為 1, ..., n

多變量地質統計的方法為因子克利金法 (Factorial Kriging) (Sandjivy, 1984; Wackernagel, 1995) 曾經被用在許多研究上 (Sousa, 1988, 1994; Wackernagel and Sanguinetti, 1993; Jimenez-Espinosa et al.; 1993, Barata et al, 1997, Wen et al, 1997; Nunes et al, 2000, Batista et al, 2001a)。

以變異元表達的分區化變數之每一種空間結構，都可以利用因子克利金法來分解，得出不同型式的對應 (mapping) (Batista, 1998; Batista et al, 2001b)。此外，也可以計算得出各參數配對之間相關性，如下表 5.2-1 中的範例所示。表中的範例顯示出利用對數值分析，Zn 與 Pb、Co 與 Zn、Zn 和 Co 與 Ni、Cr 與 Ni 等配對之間具有顯著的相關性。

表5.2-1 各水質參數初始值與對數值之間的相關係數

Initial											Log										
	Values	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Cr	Mn	Fe	Cd		Values	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Cr	Mn	Fe	Cd
Cu	1.00	0.15	0.18	0.00	0.49	0.44	-0.01	0.07	0.16		1.00	0.36	0.45	0.24	0.46	0.4	0.21	0.21	0.28		
Pb		1.00	0.17	0.01	0.05	0.05	0.00	0.13	0.17			1.00	0.58	0.21	0.29	0.25	0.14	0.26	0.35		
Zn			1.00	0.03	0.22	0.24	0.03	0.03	0.14				1.00	0.50	0.63	0.47	0.44	0.44	0.52		
Co				1.00	0.02	-0.01	0.61	0.21	0.51					1.00	0.58	0.20	0.68	0.47	0.73		
Ni					1.00	0.98	0.01	0.06	0.17						1.00	0.74	0.36	0.41	0.51		
Cr						1.00	-0.01	0.06	0.14							1.00	0.05	0.33	0.19		
Mn							1.00	0.21	0.38								1.00	0.33	0.43		
Fe								1.00	0.31									1.00	0.35		
Cd									1.00											1.00	

同一個範例利用主要因子分析 (Principal component analysis, PCA) 的結果則列於表 5.2-2 中。表中顯示整體變異性中的 62%，由第一個 (F1) 和第二個主要因子 (F2) 所造成的。所有變數的主要因子 F1 座標均為正值。另一方面，F2 則可以區分為兩群，一群為 Mn, Co, Cd, Fe (主要是受到地質礦物因素控制)，另一群為 Pb, Cu, Cr (受到污染狀況的控制)。

表5.2-2 前三項主要因子的特徵值 (Eigen values) 以及對變異性的貢獻度百分比

	F1 - Axis 1	F2 - Axis 2	F3 - Axis 3
Eigenvalue	4.21	1.39	0.93
Percentage	46.76	15.45	10.44
Cu	0.57	-0.40	-0.17
Pb	0.54	-0.29	-0.69
Zn	0.83	-0.14	-0.23
Co	0.78	0.51	0.11
Ni	0.83	-0.23	0.35
Cr	0.59	-0.61	0.43
Mn	0.60	0.57	0.02
Fe	0.61	0.10	0.21
Cd	0.73	0.34	-0.14

該範例中，因子克利金法所得出之利變異元參數列於表 5.2.1-3 中。這些參數係利用標準化的資料分析(將每個數值減去平均值，再除以標準差)。這些參數顯示變數具有不同的空間行為，例如 Cu 和 Pb 具有異向性，Zn 具有等向性。

表5.2-3 三種水質項目的變異元參數

Variogram parameters	C ₀	C ₁	A ₁ (m)
Cu - Spherical Model	0.14	0.532	90° - 3360; 0° - 1680
Pb - Spherical Model	0.308	0.715	90° - 3360; 0° - 1680
Zn - Spherical Model	0.14	0.88	2160

- C₀ - is the nugget effect; C₁ - is the sill of the first structure and A₁ - is the range of the first structure.

應用多變量地質統計理論可以針對已有的水質資料進行分析。此分析方式優於傳統的地質統計分析之處為除了可以分析多個水質參數的空間變異性之外，且可以分析各水質參數間的關聯性之空間變異性。

首先就多個水質參數的空間變異性而言，傳統的地質統計分析，一次僅能夠針對單一參數進行分析，例如選擇導電度（EC）來分析。此時 EC 即為(5.2.1-1)式中的 $Z(x)$ 函數。其分析結果之變異元 $\gamma(h)$ 可以顯示出在研究的區域中，導電度變化趨勢與監測井之間距離的關係。分析結果可以提供兩個重要的資訊，第一個是導電度變異性與空間尺度的關係，藉此可以得知監測井的數目與密度是否足以反應出導電度的整體變化趨勢；第二個是就空間上的位置而言，可以辨識出哪些監測井的導電度數值最能夠具有代表性，亦即當進一步分析之後可以得知，若要從現有的監測井中篩選時，應該優先選出哪些監測井來觀測。這樣的排序可以用 $PL_{EC} = \{MW_i\}_{EC}$ 來表示，此矩陣中共有 n 個監測井(MW)。若對於 pH 來分析，則又可以得到另一組獨立的排序矩陣 $PL_{pH} = \{MW_i\}_{pH}$ 。

然而，這種方法的缺點在於一次只能分析單一的水質參數。就現實狀況而言，從目前的地下水觀測井網取樣分析所得出的地下水水質參數共有二十多項，各單項的分析不一定能夠得到一致的結果。亦即，導電度的地質統計分析結果與 pH、ORP、DO、各種重金屬離子濃度和其他水質參數地質統計分析的結果，都不一致。要利用這些個別參數的地質統計結果來判斷監測井的配置數量、空間分布、乃至於判斷監測井的優先順序，是不可能達成的。若必須要從這些水質參數中，選擇一個單項來作為判斷的依據，也並沒有理論基礎可以支持這樣的做法。

多變量地質統計法則是一次分析多項水質參數。其結果則是用前述的複變異元 $\gamma_{ab}(h)$ 來描述。例如選擇分析導電度、氯鹽 (Cl^-) 兩項參數配對做多變量地質統計分析，利用所得到的複變異元 $\gamma_{ab}(h)$ ，則可分析出對這二者而言，其數值的空間變化狀況，以及對這兩項

參數中的每一項個別監測井數值的影響程度排序。同時，多變量地質統計可以得到這兩項參數之間的相關性。這個相關性則是由(5.2-6)式中的相關係數 $r_{\alpha\beta}^u$ 表示。

非相關因子分析，則是將一特定水質參數，例如 EC 作為主要因子，亦即(5.2-7)式中的 $Z_i(x)$ ，而將 pH、ORP 等 p 個參數作為(5.2-7)式中的 $Y_p(x)$ ，而對空間尺度 u 而言， $Z_i(x)$ 與 $Y_p(x)$ 之關係式則為(5.2-7)式中的 $Z_i^u(x) = \sum_{p=1}^m a_{ip}^u Y_p^u(x)$ 。其中係數 a_{ip} 的數值（正負號與大小）則代表了 $Y_p(x)$ 對 $Z_i(x)$ 的貢獻度，選擇兩種因子配對，利用(5.2-5)，(5.2-6)兩式亦可得出其相關性 $r_{\alpha\beta}^u$ 。

利用因子克利金法，求出各水質參數配對之間的相關性，則可以判斷出水質參數的區域特性，乃至於判斷出影響這些參數變化的原因。藉此，也有助於監測井網空間配置上的考量。

利用多變量地質統計分析之後，可以求出的監測井相關性排序矩陣則為：

$$\begin{bmatrix} MW_{11} & MW_{12} & \dots & \dots & MW_{1n} \\ MW_{21} & \dots & \dots & \dots & MW_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ MW_{m1} & & & & MW_{mn} \end{bmatrix}$$

得到上列的排序矩陣與各水質參數間之相關性矩陣之後，就可以進行指標井的選擇。其關鍵在於判斷哪些水質參數之間是具有相關性的，並找出其原因，以及此相關性和空間尺度的關係，也就是找出其變化的原因，諸如地質礦物、人為活動等因素。同時，也排除掉那些和空間尺度或其他水質參數相關性很低的水質項目。

5.2.2 多變量地質統計理論於水質指標井選定之應用評估

多變量地質統計理論於水質指標井選定之步驟如下(圖 5.2-1)：

(1)、轉換地下水水質項目為常態化變數(Normalized Variable)

於進行多變量質統計分析前，應將選定分析之水質項目之數據進行常態化，其定義為：

$$\tilde{z}_{\alpha i} = \frac{z_{\alpha i} - m_i^*}{s_i} \quad (5.2-10)$$

其中：

$\tilde{z}_{\alpha i}$ ：代表第 α 口井之第 i 個變數(水質項目)，常態化後之水質數據

m_i^* ：第 i 個變數(水質項目)之平均值

s_i ：第 i 個變數(水質項目)之標準偏差

而之各觀測井水質資料經由常態化後，即可組成提供後續分析所需之資訊。

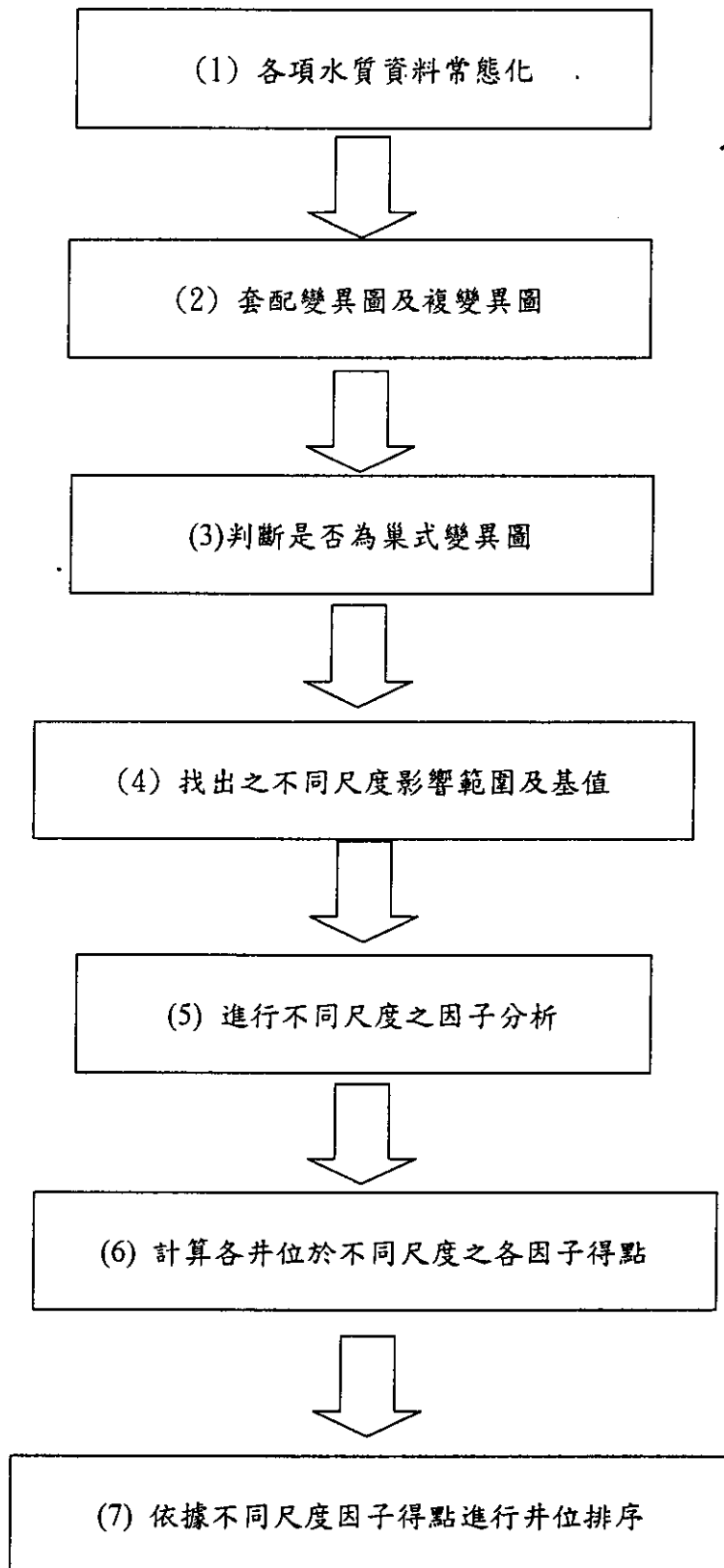


圖 5.2-1 多變量地質統計理論於水質指標井選定之應用流程圖

(2)、變異元分析

本計畫以 VARIOWIN 程式作為地下水水質複變異元分析之工具，套配常態化變數之變異圖 (Variogram) 及複變異圖 (Cross-Variogram)。最早於 1993 年發表 VARIOWIN 1.0 版 [Pannatier,1994]，目前最新之版本為 VARIOWIN 2.2 版。

(3)、探討步驟(2)之變異圖是否為巢式(Nest Structure)變異圖

巢式變異圖之範例如下，若有二變數其複變異圖如圖 5.2-2 所示，其模式由金塊效應(圖 5.2-3)以及兩指數模式(圖 5.2-4 及圖 5.2-5)三結構所組成，其複變異則如下所示：

$$\gamma_{\alpha\beta}(h) = 0.29 + 0.19(1 - \exp(-3h/432)) + 0.31(1 - \exp(-3h/1200))$$

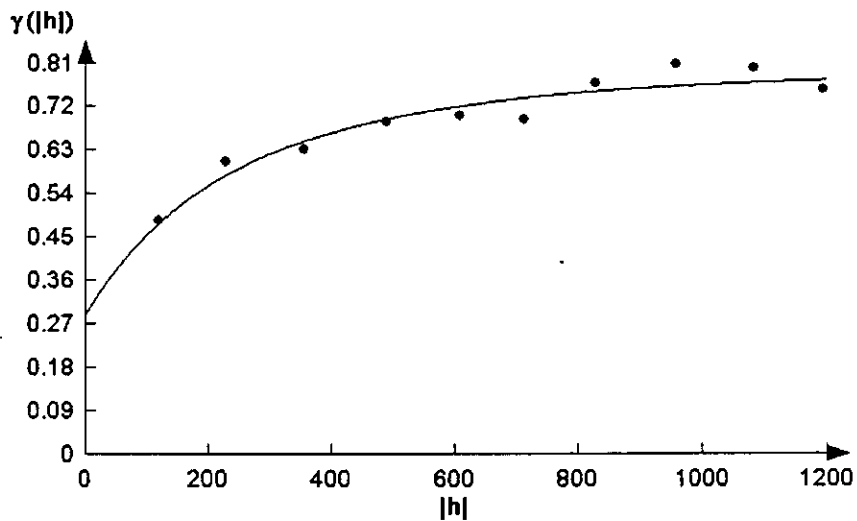


圖5.2-2 巢式聯合變異圖

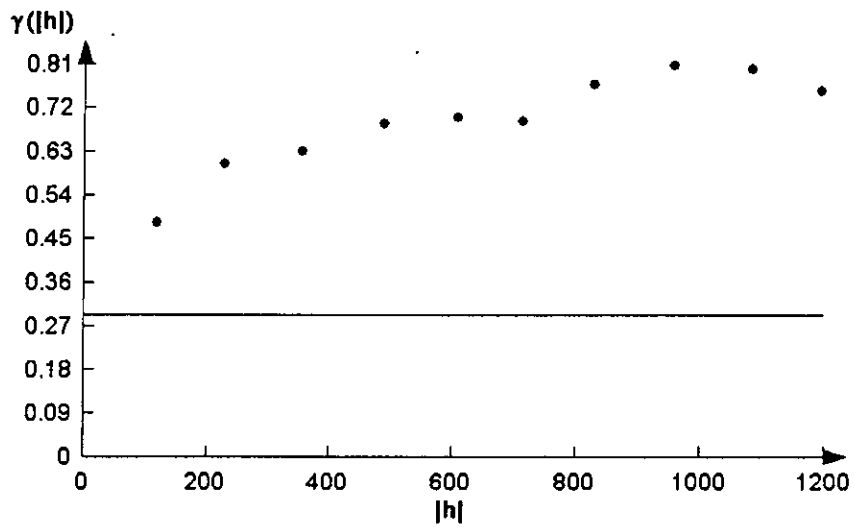


圖5.2-3 金塊效應

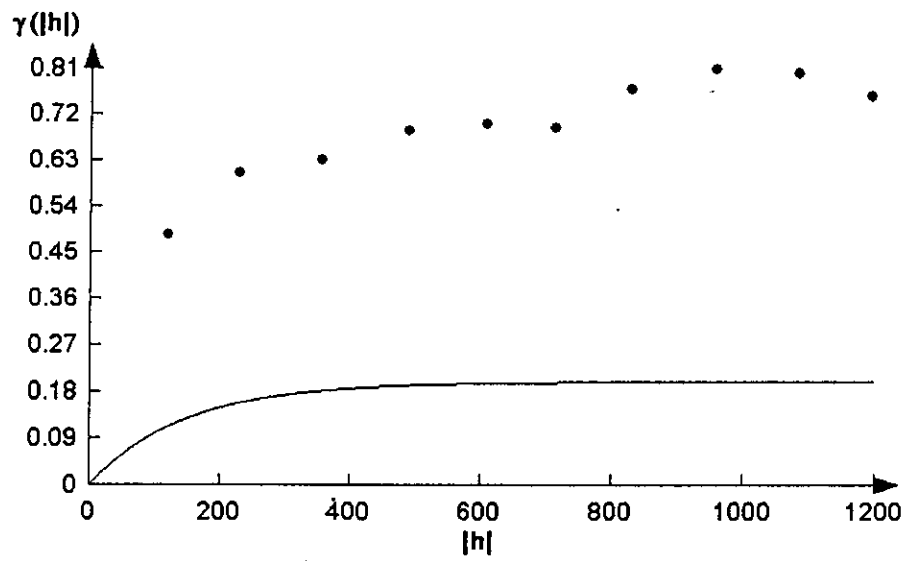


圖5.2-4 指數模式一

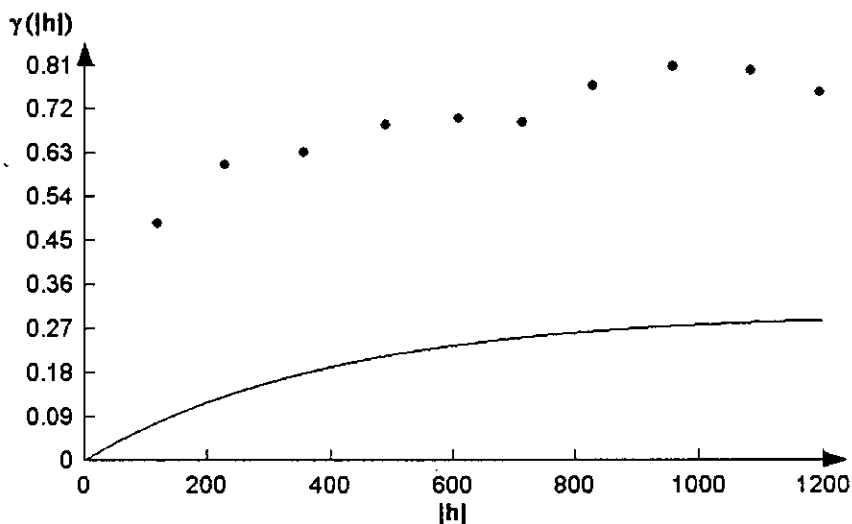


圖5.2-5 指數模式二

(4)、找出(3)巢式變異圖之不同尺度(Scale)影響範圍(Range)及基值(Sill)

如上述步驟(3)之範例，其結果顯示小尺度(Short Range)之影響範圍為 432，基值為 0.19;而大尺度(Long Range)為影響範圍 1200，基值為 0.31。因需求出不同變數(即不同水質項目)配對之複變異元，因此步驟(2)~(4)是分析流程中最費時之工作。

(5)、藉由(4)得共變異矩陣並進行不同尺度之因子分析(Factor Analysis)

將欲分析之變數(水質項目)配對，並重覆上述步驟(2)~(4)之分析，則可得出不同變數(即不同水質項目)配對之套疊模式，根據各不同變數配對分析所得之係數 $b_{\alpha\beta}^u$ ，即可組合成不同空間尺度之共區域化矩陣。並將不同空間尺度之共區域化矩陣視為共變異矩陣，進行不同尺度之因子分析，如式(5.2-5)之分析後將可得到各因子之特徵

值及貢獻率，並可得到各變數(即各水質項目)於各因子之負荷量(Factor Loading)。另外，於進行因子分析，亦可計算得出與各因子之負荷量相對應之標準分數係數矩陣(Standard Scoring Coefficient Matrix)，以供步驟(6)計算各井於各因子得點。

(6)、計算各地下水監測站於不同尺度之各因子得點(Factor Score)

經由步驟(5)所得之標準分數係數矩陣(Standard Scoring Coefficient Matrix)，即可計算各地下水監測站於不同尺度之各因子得點。配合各因子之特徵值及貢獻率(即各別因子可解釋之變異量)，若不考慮貢獻率較低之因子，可只選定 p 個主要因子計算進行各井之因子得點。其表示式如下：

$$F_{\alpha}^u = \tilde{Z}_{\alpha i}^u \hat{L}_2^* \quad (5.2-11)$$

其中：

F_{α}^u ：為各井於某一空間尺度 u 之 p 個主要因子之得點

\hat{L}_2^* ：標準分數係數矩陣

$\tilde{Z}_{\alpha i}^u$ ：為步驟(1)中 $\tilde{z}_{\alpha i}$ 所組成之矩陣

7、依據不同尺度因子得點大小排序測站

在計算各井於不同尺度之各因子得點之後，配合步驟(5)所得之各因子之貢獻率，根據下式計算在不同空間尺度下各井之排序分數。

$$R_{\alpha}^u = \sum_{m=1}^p \omega_m^u F_{\alpha m}^u \quad (5.2-12)$$

其中：

R_{α}^u ：為在空間尺度 u ，第 α 口井之排序分數

$F_{\alpha m}^u$ ：為在空間尺度 u ，第 α 口井於第 m 個主要因子之因子得點

ω_m^u ：為在空間尺度 u ，第 m 個主要因子之因子得點之權重，
為第 m 個主要因子之貢獻度與所有 p 個主要因子累計貢獻度之比值

而上述不同空間尺度下各井之排序分數，即可作為水質指標井選定之參考依據，亦即排序分數愈大，則於水質指標井選定之排序愈前。

5.3 卡門濾波理論應用於站網設計

5.3.1 卡門濾波 (Kalman Filtering) 理論

所謂濾波依 R.E.Kalman 氏定義如下：

「濾波為一種數學上之運作，為一已知動態系統上根據過去既有的資料或觀測值而對現在、未來或該系統過去之變數，做更精確的描述。」卡門濾波理論係於 1960 年發表，此理論之特性如下：

- 1、卡門濾波理論之構成，為將系統之狀態量，經觀測系統誤差而校正之，此為卡門濾波理論之一大特徵。
- 2、當演算時，無需保存以往之資料，在施以逐項計算後，即可求得最適宜之解答。是故適合電子計算機之計算，尤其對於線上計算 (on-line)，更能發揮其功能。
- 3、卡門濾波理論能於演算過程中可即時校正參數及預測輸出量。

由於卡門濾波理論基礎建立在最小線性變異量誤差估計法 (LMV 估計法) 與正交法則 (Orthogonality Principal) 之上，故先分別作一介紹：

- 1、最小線性變異量誤差估計法介紹 (Linear Minimum Variance of Error Estimation, LMV Estimator)：

LMV 估計法理論如下所示：

- (1) 選定平方差損失函數 (squared-error loss function) 為損失函數 (loss function)，其定義如下所示：

$$L(X, \hat{X}) = \|X - \hat{X}\|^2 = (X - \hat{X})^T (X - \hat{X}) \quad (5.3-1)$$

其中 X : 真值

\hat{X} : 為 X 之最佳推估值

(2) 定義貝貽風險 (Bayes risk , $\beta(e)$) :

$$\begin{aligned}\beta(e) &= E\{[x - e(Y)]^T [x - e(Y)]\} \\ &= \int \int_x [a - e(Y)]^T [a - e(Y)] f_{x,Y}(a, Y) da dY \\ &= \int \left\{ \int_x [a - e(Y)]^T [a - e(Y)] f_{x|Y}(a, Y) da \right\} f_Y(Y) dY\end{aligned}\quad (5.3-2)$$

其中 $e(Y)$: 利用觀測資料 Y 所得之最佳線性推估值

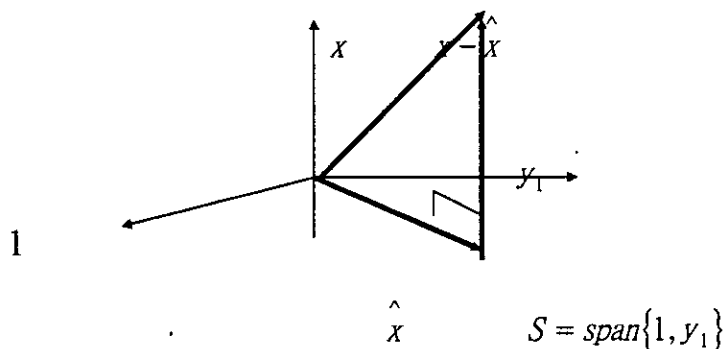
$f_{x,Y}(a, Y)$: 為 X, Y 共同機率分佈函數

$f_{x|Y}(a, Y)$: X 之條件機率分佈函數

$f_Y(Y)$: Y 之機率分佈函數

(3) 根據貝貽法則，選擇最佳的線性估計，使貝貽風險為最小，即使 (1) 中之 loss function 的期望值為最小。

2、正交法則 (Orthoggonality Principal)



若其 LMV 估計為如下之型式:

$$e_0(Y) = \hat{x} = a_0 + b_0^T Y \quad (5.3-3)$$

則由上圖可明顯看出 $e_0(Y)$ 會滿足下列兩點:

(1) LMV 估計法所得最佳推估值 $e_0(Y)$ 為不偏估(unbiased)，即：

$$\begin{aligned} & E(x) = E[e_0(Y)] \\ \text{或} \quad & E[x - (a_0 + b_0^T Y)] = 0 \end{aligned} \quad (5.3-4)$$

即 $[X - e_0(Y)]$ 與 1 正交。

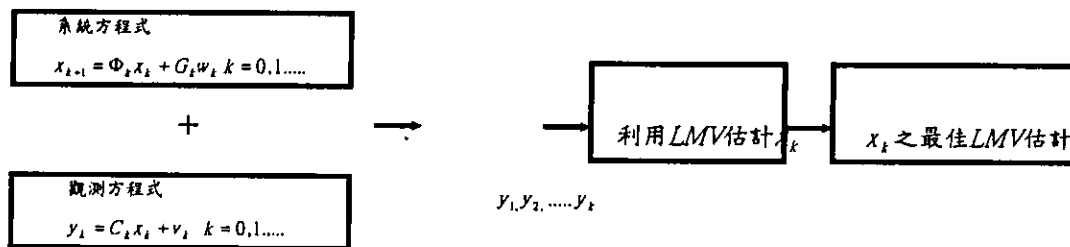
(2) LMV 估計所得最佳推估值 $e_0(Y)$ 之誤差與資料 Y (即 $Y=[y_1, \dots, y_m]$) 成正交。

即

$$E\{(x - e_0(Y))Y\} = E\{[x - (a_0 + b_0^T Y)]Y\} = 0_{m \times 1} \quad (5.3-5)$$

3、卡門濾波理論之假設

在具備了LMV估計法與正交法則理論基礎之後，考慮時間不連續的系統，其系統方程式與觀測方程式分別如下所示：



系統方程式：

$$x_{k+1} = \phi_k x_k + G_k w_k \quad k = 0, 1, \dots \quad (5.3-6)$$

觀測方程式：

$$y_k = C_k x_k + v_k \quad k = 1, 2, \dots \quad (5.3-7)$$

其中

k ：表 time step

X ：狀態向量

ϕ : 狀態轉移矩陣

C : 觀測矩陣

W : 狀態誤差向量

V : 觀測誤差向量

Y : 觀測向量

G : 系統關連矩陣

並假設：

(1) W_k, V_k 為不相關，且期望值均為零且相互獨立之白噪音 (white noise)。其共變量如下所示：

$$\begin{aligned} E(W_k W_l^T) &= \begin{cases} Q_k & k = l \\ 0_{p \times p} & \text{otherwise} \end{cases} \\ E(V_k V_l^T) &= \begin{cases} R_k & k = l \\ 0_{m \times m} & \text{otherwise} \end{cases} \\ E(W_k V_l^T) &= 0_{p \times m} \quad \text{for all } k, l \end{aligned} \quad (5.3-8)$$

(2) 起始狀態之 x_0 為一隨機向量，與系統過程和觀測噪音皆不相關。

(3) x_0 之期望值為 \bar{x}_0 ，其定義如下：

$$\bar{x}_0 = E(x_0) \quad (5.3-9)$$

且其共變量為

$$\text{Cov}(x_0) = E[(x_0 - \bar{x}_0)(x_0 - \bar{x}_0)^T] \quad (5.3-10)$$

4、卡門濾波理論推導過程

其推導過程如下所示：

(1) \hat{X}^c 為 LMV 估計法利用 $y_k - \bar{y}_k$ ，估算 $X_k - \bar{X}_k$ 所得之最佳推估值。

$$\text{則} \quad \hat{X}^c = b_x + K(y_k - \bar{y}_k) \quad (5.3-11)$$

由正交法則可得 \hat{X}^c 為不偏估值，所以

$$E(\hat{X}^c) = E(X - \bar{X}_k) \quad (5.3-12)$$

且同理可得

$$E(y_k) = E(\bar{y}_k) \quad (5.3.1-13)$$

則

$$b_x = E(\hat{X}^c) = E(X - \bar{X}_k) = 0_{n \times 1} \quad (5.3-14)$$

$$\hat{X}^c = K(y_k - \bar{y}_k) \quad (5.3-15)$$

(2) 由 (1) 之推導可得

$$\hat{X} = \bar{X} + \hat{X}^c \quad (5.3-16)$$

所以

$$\hat{X} = \bar{X} + \hat{X}^c = \bar{X} + K(y_k - \bar{y}_k) \quad (5.3-17)$$

(3) 分別由系統方程式和觀測方式得到下式：

$$\bar{x}_k = \Phi_{k-1} \hat{x}_{k-1} \quad (5.3-18)$$

$$\bar{y}_k = C_k \Phi_{k-1} \hat{x}_{k-1} \quad (5.3-19)$$

(4) 由於 $K_k(y_k - \bar{y}_k)$ 為 LMV 估計法利用 $(y_k - \bar{y}_k)$ 資料，估算 $(x_k - \bar{x}_k)$ 所得之最佳估值，故由正交法則可得下式：

$$E = \{ [x_k - \bar{x}_k - K_k(y_k - \bar{y}_k)](y_k - \bar{y}_k)^T \} = 0_{n \times m} \quad (5.3-20)$$

(5) 由於

$$y_k - \bar{y}_k = C_k(x_k - \bar{x}_k) + v_k \quad (5.3-21)$$

所以

$$\begin{aligned} E[(x_k - \bar{x}_k)(y_k - \bar{y}_k)^T] &= E\{ (x_k - \bar{x}_k)[C_k(x_k - \bar{x}_k) + v_k]^T \} \\ &= E\{ (x_k - \bar{x}_k)[(x_k - \bar{x}_k)^T C_k^T + v_k^T]^T \} \\ &= E[(x_k - \bar{x}_k)(x_k - \bar{x}_k)^T] C_k^T \end{aligned} \quad (5.3-22)$$

定義 M_k

$$E[(x_k - \bar{x}_k)(x_k - \bar{x}_k)^T] \triangleq M_k \quad (5.3-23)$$

所以

$$E[(x_k - \bar{x}_k)(y_k - \bar{y}_k)^T] = M_k C_k^T \quad (5.3-24)$$

(6) 同理

$$\begin{aligned} E[(y_k - \bar{y}_k)(y_k - \bar{y}_k)^T] &= C_k E[(x_k - \bar{x}_k)(x_k - \bar{x}_k)^T] C_k^T + E(v_k v_k^T) \\ &= C_k M_k C_k^T + R_k \end{aligned} \quad (5.3-25)$$

(7) 由 (4)、(5)、(6) 可得

$$K_k = M_k C_k^T (C_k M_k C_k^T + R_k)^{-1} \quad (5.3-26)$$

(8) 根據 M_k 之定義與

$$x_k - \bar{x}_k = \Phi_{k-1}(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + G_{k-1}W_{k-1} \quad (5.3-27)$$

定義 P_{k-1} 為 $x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}$ 之共變量

$$P_{k-1} = E[(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})^T] \quad (5.3-28)$$

可得
$$M_k = \Phi_{k-1}P_{k-1}\Phi_{k-1}^T + G_{k-1}Q_{k-1}G_{k-1}^T \quad (5.3-29)$$

(9) 由於

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_k(y_k - \hat{y}_k) \quad (5.3-30)$$

所以

$$\begin{aligned} P_k &= E[(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T] \\ &= E\{ [x_k - \bar{x}_k - K_k(y_k - \hat{y}_k)][x_k - \bar{x}_k - K_k(y_k - \hat{y}_k)]^T \} \\ &= M_k - M_k C_k^T K_k^T - K_k C_k M_k + K_k (C_k M_k C_k^T + R_k) K_k^T \end{aligned} \quad (5.3-31)$$

又因為

$$K_k = M_k C_k^T (C_k M_k C_k^T + R_k)^{-1} \quad (5.3-32)$$

即

$$K_k (C_k M_k C_k^T + R_k) = M_k C_k^T \quad (5.3-33)$$

所以

$$\begin{aligned} P_k &= M_k - M_k C_k^T (C_k M_k C_k^T + R_k)^{-1} C_k M_k \\ &= M_k - C_k (C_k M_k C_k^T + R_k) K_k^T \\ &= M_k - M_k C_k^T K_k^T \\ &= M_k - K_k C_k M_k \end{aligned} \quad (5.3-34)$$

可得如下之卡門濾波運算過程：

$$\bar{x}_k = \phi_{k-1} \hat{x}_{k-1} \quad (5.3-35)$$

$$M_k = \phi_{k-1} P_{k-1} \phi_{k-1}^T + G_{k-1} Q_{k-1} G_{k-1}^T \quad (5.3-36)$$

$$K_k = M_k C_k^T (C_k M_k C_k^T + R_k)^{-1} \quad (5.3-37)$$

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_k (y_k - C_k \bar{x}_k) \quad (5.3-38)$$

$$P_k = (I - K_k C_k) M_k \quad (5.3-39)$$

5.3.2 卡門濾波理論於指標井站網設計之應用方法

一、卡門濾波於水位觀測站網評估之應用

由上述之理論介紹，於應用於卡門濾波理論時，需先建立系統方程式及觀測方程式。因此，若要進行本計畫之指標井選定工作，系統方程式應為地下水質傳輸模式，而觀測方程式則為描述各時刻之地下水質之監測站網。而此部份仍尚未有相關研究進行整合，惟目前已有卡門濾波與地下水流數值模式之整合程式，如 KALMOD 程式 (ZHOU YANGXIAO, July, 1991)，其結合卡門濾波理論與美國地質調查局 (U.S.G.S.) 發展之地下水流數值模式 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)。在此即以 KALMOD 程式為例，說明卡門濾波於水位觀測站網評估之應用：

1、結合卡門濾波與 MODFLOW

由 (5.3.1) 節可知當卡門濾波要應用於 MODFLOW 時，先要找出其系統方程式及觀測方程式，因此可轉換得系統方程式，如下所示：

$$h_k = A_k h_{k-1} + B_k u_k + w_k \quad (5.3-40)$$

並由觀測井之位置、深度及觀測頻率，可得觀測方程式，如下所示：

$$y_k = C_k h_k + v_k \quad (5.3-41)$$

其中

A_k : 即 $\{A_{1,k}\}^{-1} A_{2,k}$

B_k : 即 $\{A_{1,k}\}^{-1} A_{3,k}$

w_k : 系統噪音

y_k : 觀測水位值

C_k : 觀測矩陣

V_k : 觀測誤差

u_k : 為已知值之向量, 即由源匯項所組成

有了系統方程式與觀測方程式之後, 可結合卡門濾波與 MODFLOW, 而得到以下之運算流程(圖 5.3-1)。

$$\bar{h}_k = A_k \hat{h}_{k-1} + B_k u_k \quad (5.3-42)$$

$$M_k = A_k P_{k-1} A_k^T + Q_k \quad (5.3-43)$$

$$K_k = M_k C_k^T \{C_k M_k C_k^T + R_k\}^{-1} \quad (5.3-44)$$

$$\hat{h}_k = \bar{h}_k + K_k \{y_k - C_k \bar{h}_k\} \quad (5.3-45)$$

$$P_k = \{I - K_k C_k\} M_k \quad (5.3-46)$$

其中：

\hat{h}_k : time step k時經過觀測井水位修正之水頭

\bar{h}_k : time step k時之及時預測水頭

P_k : $h_k - \hat{h}_k$ 之共變量, $\text{cov}\{h_k - \hat{h}_k\}$

M_k : $h_k - \bar{h}_k$ 之共變量, $\text{cov}\{h_k - \bar{h}_k\}$

Q_k : 系統噪音之共變量

R_k : 觀測誤差之共變量

K_k : 卡門權重

I : 單位矩陣

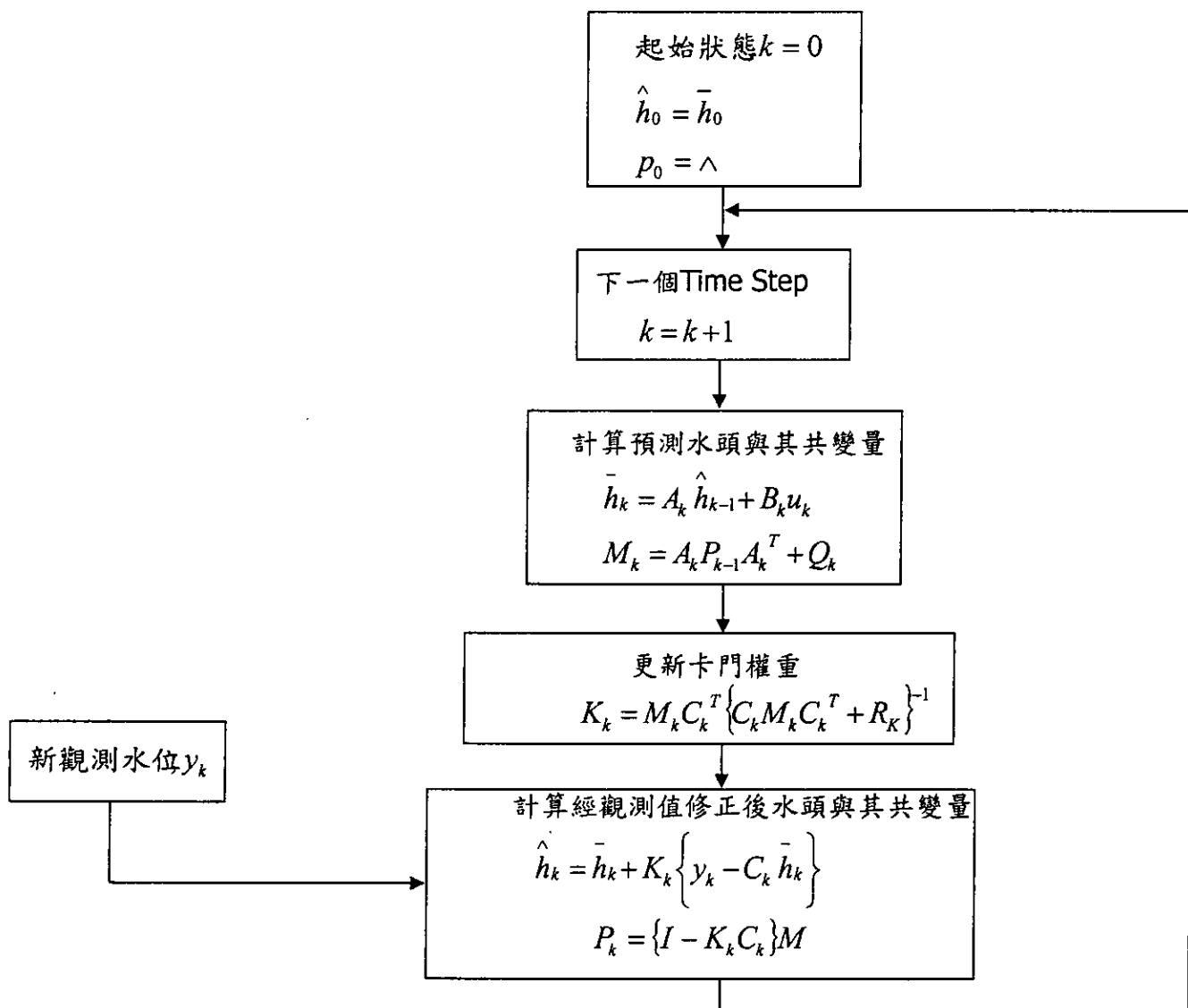


圖 5.3-1 卡門濾波結合地下水流數值模式之運算流程

2、卡門濾波與 MODELW 整合後所需參數

KALMOD 除了需要輸入地下水流模式之水文地質參數及源匯項之外，尚需輸入卡門濾波之參數，如下所示：

(1) 系統噪音之共變量 (Q_k)

$$q_{i,j} = \sigma_i \sigma_j \rho(l) \quad (5.3-47)$$

其中

$q_{i,j}$ ：為系統噪音共變量(Q_k)之第*i*列,第*j*行之元素,
即格網*i*與格網*j*間之系統噪音共變量

σ_i, σ_j ：分別為格網*i*與格網*j*之系統噪音標準誤差

l ：格網*i*中心與格網*j*中心之距離

$\rho(l)$ ：系統噪音之相關係數,為*l*之函數

系統噪音其代表意義即為模式之不確定性。換言之，就是系統方程式之誤差項。當一地下水流數值模式模擬真實情況時，必有其假設之簡化條件，而有了簡化條件必然無法完全模擬出真實反應，而會造成模式上之不確定性。在卡門濾波中，即由系統噪音項來代表此不確定性。若系統噪音值愈小，表示此模式愈能精確的模擬真實反應。在實際應用中，系統噪音之相關係數有不同的相關模式可以套用，而目前 KALMOD 程式中，有指數相關模式、高斯相關模式、球形相關模式、逆距離相關模式等四種模式可以選擇。

(2) 觀測程序之相關參數 (C_k, R_k)

不同的觀測井佈置與觀測頻率，會組合排列成各種的觀測矩陣 (C_k)。雖然觀測井的位置不能隨時間改變，但可能因觀測頻率之不同，而造成觀測矩陣 (C_k) 隨時間之改變。

而觀測誤差共變量 (R_k) 即代表觀測井量測地下水位之精度，

即為觀測方程式之誤差項。一般而言，觀測誤差遠小於其它因素所造成的不確定性。而且觀測方程式與模式的定率部分（即系統方程式）無關，所以觀測誤差與系統噪音無關。

(3) 起始水頭之共變量 (P_0)

起始水位的共變量代表著起始水位的不確定性。此共變量與起始水位類似，其影響會隨著模擬時刻增加而消滅。

(4) KALMOD 參數之率定

在 KALMOD 參數率定過程中，假定系統噪音、觀測矩陣及觀測誤差不隨時間改變。如此隨著時間增加，起始條件之影響會漸漸消失，即所有共變量會與時間無關，即 $M_k = M, P_k = P$ 。

定義

$$n_k = y_k - C_k \bar{h}_k \quad (5.3-48)$$

其中

n_k : innovation vector

y_k : 為觀測地下水位值

C_k : 觀測矩陣

\bar{h}_k : 由 time step k-1 之觀測地下水水位值所得於 time step k 之地下水水位的最佳線性估計值

接著由(5.3.2-9) 式可得 n_k 之平均值，如下所示：

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N n_k \quad (5.3-49)$$

k time step

若 $\bar{n} \approx 0$ ，即表示模式之定率部分的參數可被接受，此即為一般地下水數值模式之率定過程。在完成了模式定率參數之率定後，接續工作為對序率參數進行率定。在系統噪音、觀測矩陣及觀測誤差不隨時間改變之假設下，可推導出 n_k 之共變量理論值如下所示：

$$\text{cov}\{n_k\} = z = CMC^T + R \quad (5.3-50)$$

而樣本共變量可由下式所得：

$$S = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (n_k - \bar{n})(n_k - \bar{n})^T \quad (5.3-51)$$

而在率定過程，即反覆微調卡門濾波中之參數，直到 $z \approx s$ ，如此即完成模式之序率參數的率定。以此方法重覆交替模式之定率與序率參數的率定，直到模式輸出之結果可被接受。

3、卡門濾波應用於地下水觀測站網設計之方法

若要將卡門濾波應用於地下水觀測站網設計時，除需先建立上述之地下水流數值模式及並需完成定率參數(即地下水流數值模式之各項參數)與序率參數(即整合卡門濾波所需之各項參數)的率定，來配合下列之流程以進行水位觀測站網之評估：

(1)、定義觀測井網之品質指標：

一般而言，定義觀測井網之品質指標之型式有二種：一為以卡門濾波計算所得經過觀測值更新後，此時刻各格網水頭誤差之標準偏差(即square root of diagonal of the matrix P_k)之累加為井網品質之指標；二為以卡門濾波計算所得經過觀測值更新後，下一時刻各格網水頭預測值誤差之標準偏差(即square root of diagonal of the matrix M_k)之累加為井網品質之指標。

(2)、在有限經費下達到最高之觀測品質，即所謂最佳井網設計 (optimal design of monitoring network)。為達此目的可從下列兩點著手：

A、井網密度

B、觀測頻率

而上述之井網密度及觀測頻率即建構出各時刻之觀測矩陣 (C_k)，直覺上，愈多的觀測井數和愈高的觀測頻率，會得到較低之標準偏差 (square root of diagonal of the matrix P_k 或 M_k) 之累加。所以一般井網設計上會先設定一門檻，即井網之標準偏差 (square root of diagonal of the matrix P_k 或 M_k) 之累加所需不可超過所設定之標準，並以此作為井網最佳化之限制條件。

(3)、地下水觀測站之最佳化

由式(5.3-3)至(5.3-7)可看出若模式經過參數率定後，在相同的地下水文環境與觀測誤差之下，能影響估計誤差的就只剩下觀測矩陣 (C_k)。藉由改變觀測矩陣，即相對的改變觀測井之密度與觀測頻率，可得到不同之 P_k 。而不同之 P_k 即代表不同井網設計之觀測精度。

由此可知，利用卡門濾波理論於站網評估時，只要給定一觀測矩陣 (可為固定站網或可隨時間而變動之動態站網)，即可評估出站網設計之精度。如何決定最佳之觀測矩陣之方法如下：

A、利用優選方法

如遺傳演算法結合卡門濾波理論來優選觀測矩陣。惟此方法若應用於大區域之案例時，因需大量計算，會受限於電腦硬體之限制，而無法應用於實際大區域之案例。

B、採用可隨時間而變動之動態站網，即以各時刻站網配合卡門濾波理論所推估經過觀測值更新後各格網水頭誤差之標準偏差（即 square root of diagonal of the matrix P_k ）作為下一時刻監測站網選定之依據。即可將此一時刻之監測站網，在下一時刻移至水頭誤差之標準偏差較高之站井位置進行監測。採用此方法雖最容易，惟所選定動態站網之可能不為最佳化。

C、試誤法(trial and error)

不斷嘗試各種井網密度與觀測頻率，直到找出一個能達到井網精度要求，卻又最經濟之佈井方案，若考慮到研究區域為面積廣大，模式格點及井位數目太多，若只利用試誤法要找出最佳井網設計似乎不太可行，亦可先評估降低變異數法分析各種參數所得之佈井方案，然後從中找出最佳之站網佈置方案。

二、卡門濾波於水質指標井選定之應用

由上述卡門濾波整合 MODFLOW 於水位觀測站網評估之應用，可了解到若欲應用卡門濾波理論時，需先建構系統方程式及觀測方程式。因此進行水質指標井選定時，所需系統方程式為地下水質傳輸模式之控制方程式，而觀測方程式即進行採樣分析之井位與進行採樣之時間所組成。較困難之處，即是需建立地下水質傳輸模式以及系統噪音之估算；另外，對於地下水質檢測分析之誤差也比觀測水位(水位計)之誤差較難估算。本計畫即就卡門濾波理論應用於水質指標井選定之流程，進行規劃，其流程如圖 5.3-2 所示，其步驟說明如下：

步驟(1)：目標函數及限制式設定

設定監測精度(即推估值誤差之標準偏差總和)為限制式，考量監測成本最低為目標，進行指標井井位及監測頻率之最佳化。

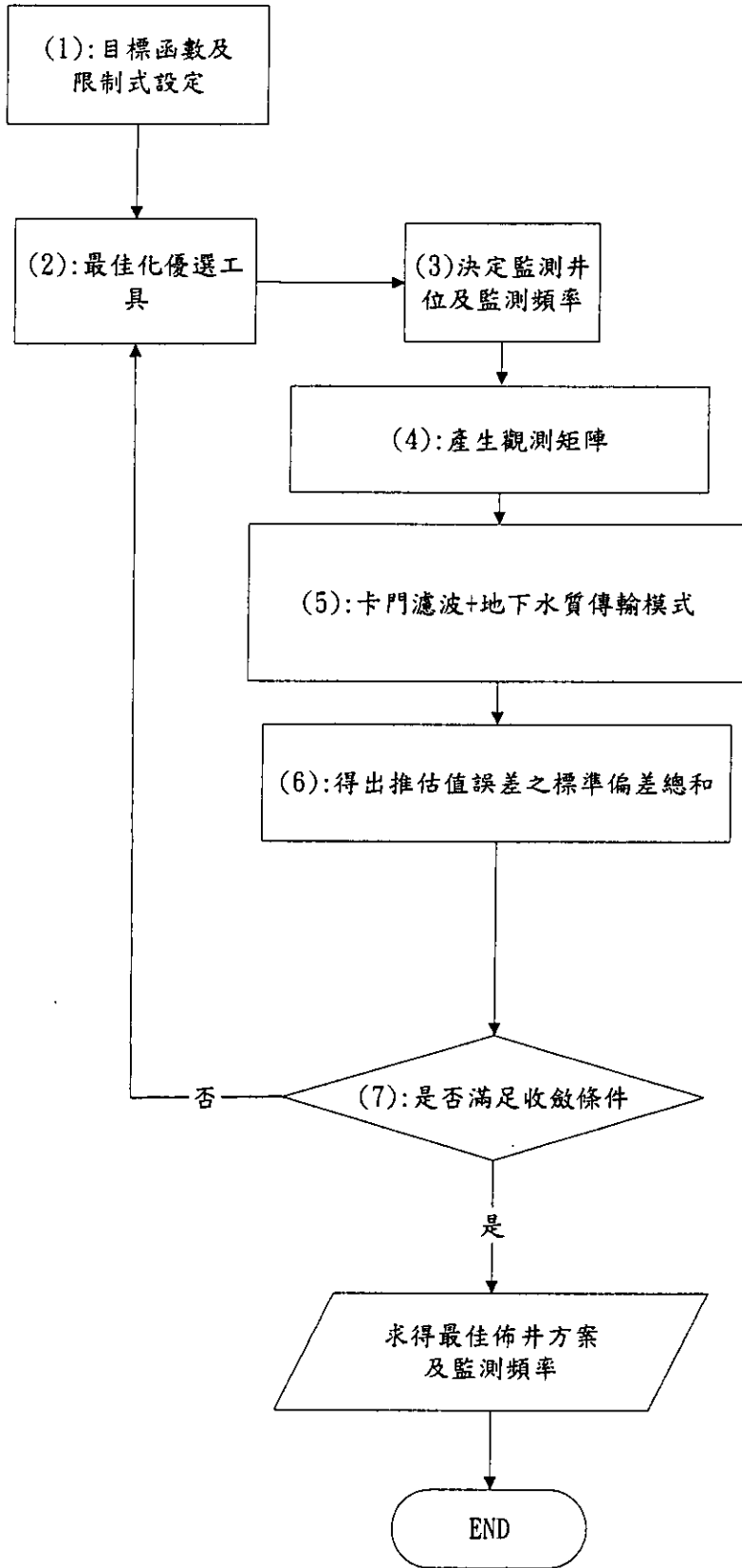


圖5.3-2 卡門濾波理論應用於水質指標井選定之流程

步驟(2)：最佳化優選工具

配合步驟(1)所設定之目標函數與限制式，選擇合適之最佳化優選工具，如遺傳演算法。

步驟(3)：決定指標井井位及監測頻率

配合最佳化優選工具決定指標井井位及監測頻率。

步驟(4)：產生觀測矩陣

經由步驟(3)之決定指標井井位及監測頻率，即可產生觀測矩陣，以供觀測方程式之用。

步驟(5)：卡門濾波結合地下水質傳輸模式

以地下水質傳輸模式之控制方程式為系統方程式，並配合觀測方程式，以整合卡門濾波理論，並進行系統噪音之估算以及相關參數之率定工具。

步驟(6)：得出推估值誤差之標準偏差總和

經由卡門濾波結合地下水質傳輸模式之運算，即可計算出推估值誤差之標準偏差總和，以供研判是否達到滿足優選之收斂條件。

步驟(7)：是否滿足收斂條件

若優選結果符合收斂條件要求，即完成在成本考量情況下，指標井井位及監測頻率之最佳化。不然，即再持續進行優選之工作。

5.4 水質指標井選定方法評估比較

經由上述之理論介紹，以下將就各方法之優點與限制作一說明：

一、單變數地質統計配合降低變異數法於指標井站網設計之優點與限制

(一)、優點

- 1、理論方法明確，且所需之工具皆已完備。
- 2、此方法運用在地下水觀測站網之設計分析上，國內外已有相當多的實際案例，並且本工作團隊亦曾成功運用在水質指標井之選定上。

(二)、限制

- 1、傳統單變數地質統計配合降低變異數法，一次僅能夠針對單一參數進行站網設計。雖能分別針對各別參數進行站網分析，最後仍需將各別參數所得之站網分佈進行整合，惟整合時難有量化標準來決定各別參數所得站網之優先次序。
- 2、只能考量所分析參數在地質統計上之特性，尚無法考量含水層物理條件的變化如參數分佈及邊界條件等。
- 3、套配常態化變數之變異圖(Variogram)時，仍需專業人士之主觀判斷。
- 4、只能進行選定區域內指標井空間分佈上的設計，而無法直接進行時間上相關規劃如觀測頻率及動態井網等。

二、多變量地質統計理論於水質指標井選定之應用評估之優點與限制

(一)、優點

- 1、理論方法明確，且所需之工具大致已完備。
- 2、多變量地質統計比傳統之單變量降低變異數法之優勢，即為可同時考慮較多之水質項目來作為水質指標井之選定依據。
- 3、此理論方法已被實際運用在地下水位觀測站網之檢討上。

(二)、限制

- 1、雖為可同時考慮較多之水質項目來作為水質指標井之選定依據，惟能考量之水質項目仍有限。
- 2、套配常態化變數之變異圖 (Variogram) 及複變異圖 (Cross-Variogram) 時，仍需專業人士之主觀判斷。
- 3、只能考量所分析參數在地質統計上特性，尚無法真正考量實際地下水流及水質之物理條件。
- 4、只能考量選定空間上之指標井，而無法進行時間上之指標井之選定。

三、卡門濾波理論應用於站網設計之優點與限制

(一)、優點

- 1、此方法能藉由系統方程式及觀測方程式考量含水層相關的物理性質。
- 2、可同時評估各含水層之觀測井位置，並可進一步利用卡門濾波分析觀測頻率。

3、可運用此方法配合監測之資料，建立隨時間而變動之動態監測站網。

(二)、限制

1、相較於地質統計方法，描述地下水質傳輸現象之系統方程不論在模式建立及後續之計算上皆較為複雜。

2、系統噪音之推估不易，易造成站網評估本身之不確定性。

3、卡門濾波結合地下水質傳輸之模式尚未有現成模式可用。且因地下水質傳輸之系統方程式為非線性，因此尚需配合非線性卡門濾波，提高了整合之困難度，除此之外，尚需配合最佳化工具，才可進行井位優選。

4、應用於大區域之實際案例時，此演算法需大量之計算量及記憶體。

四、計畫之目的與可行性之考量評估

經由上述對單變數地質統計配合降低變異數法、多變量地質統計及卡門濾波理論等三種方法應用於站網設計之優點及限制評估後，以下將就那一方法較適用於本計畫之目的與可行性作一說明。

(一)、於本計畫水質選定指標井目的之適用性

於第 2.2 節中，已闡明本計畫中水質指標井之功能，並不以污染預警為主要目的，而是要了解大區域當下之水質狀況及水質之長期變化，以作為水量利用管理之參考資訊。且現行觀測站網之水質採樣分析項目總共包含約 30 個水質項目，勢必無法運用所有水質項目來進行水質指標井之選定，而能同時考量較多水質項目，以進行水質指標井分析應是較佳之選擇。故於考量本計畫之目的，多變

量地質統計方法應是較適用。

(二)、可行性

上述之三種評估方法中，因單變數地質統計配合降低變異數法所需之工具皆已完備，且也已真正運用於水質指標井之選定上。而較可行之評估方法為先選定數個較具代表性之水質項目作為水質指標井之選定依據。相對的，卡門濾波理論若要運用於水質指標井之選定，相關模式與工具尚需開發，且須克服運算量之問題。

另外，多變量地質統計方法理論方法明確，所需之工具大致已完備，因此，多變量地質統計方法應可應用於實際案例。

以上三種方法的比較，摘要於表 5.4-1 中。

表 5.4-1 各種方法比較摘要分析

比較項目	單變數地質統計配合降低變異係數法	多變量地質統計	卡門濾波
基礎理論	完備	完備	完備
水質項目完整性	考慮單一水質項目較佳；考慮多項水質則尚無合理方法予以權衡	可同時考量許多水質項目	理論上應可考量多項水質
空間分析完整性	完整	完整	完整
時間序列分析	欠缺	欠缺	完整
分析工具	完備，但尚無整合之軟體	大致完備，但尚無整合之軟體	尚待發展
相關經驗	豐富	較少	欠缺
難易度	較簡單	適中	難度高
分析成本	較低	適中	極高
實用性	尚可	佳	低
綜合可行性	尚佳	佳	低

第六章 多變量地質統計應用於屏東平原水質指標井之選定

6.1 屏東平原背景介紹

一、屏東平原水文地質

屏東平原地質為一構造陷落之谷地，東側沿平原有一主要斷層，據前人研究為地下水主要補給帶，斷層之西向下陷落，形成谷地。區域內地層大致由西向東逐漸變老，其變質程度亦由西向東漸次趨深，其東、西、北三面山麓丘陵地區岩層屬第三紀上新世至漸新世之固結岩層，黑色板岩為主，偶夾石英岩，結構細緻，透水性及含水性均低。而平原內地下水主要含水層之地質均為未固結岩層，屬第四紀沖積岩層，依其性質可分為：平原北端之嶺口礫岩層；平原東面山麓邊緣地帶之古期沖積扇堆積層以及分布最廣、為平原內地下水主要含水層之現代沖積層。

高屏河流域可分為四個主要的地質區，說明如下：

(一)第三紀早期（始新世）至中期（中新世）的輕度變質岩區

本區屬中央山脈和玉山山塊區，是由輕度變質的堅硬石英砂岩和具劈理的板岩構成，中央山脈有較多的板岩，玉山山塊則含較多的石英砂岩。這些岩石是由砂、頁岩等沈積岩輕度變質岩形成，沈積年代距今約六千萬至二千萬年。

(二)中新世沈積岩區

本區是玉山山塊和阿里山山脈向南延伸的丘陵區，主要是荖濃溪的西岸及楠梓仙河流域，是由沈積岩的砂岩、頁岩互層構成，並包含少量海底火山噴發的枕狀玄岩。沈積岩的沈積年代主要在第三紀晚期（距今約一千五百萬年至五百萬年），少數則在中期。

(三)上新至更新世的沈積岩區

主要是由第三紀最晚期的上新世（距今約五百萬至二百萬年）和第四紀更新世（距今二百萬年至一萬年）的礫岩、泥岩和珊瑚礁石灰岩構成。這些岩層主要分布在屏東平原的西側和荖濃溪下游的西岸。

(四)更新世至現代的沈積層分布區

這些沈積層主要是為膠結的礫、沙、泥等疏鬆沈積物，分布於山區的河階地、沖積扇，和現代的河川沖積平原與海岸平原。

數百萬年前，由於造山運動的影響引起了「古屏東山脈」和中央山脈南段之間南北向的斷層滋生，如荖濃斷層和潮州斷層等，造成深且狹長的凹槽—屏東谷地，同時谷地上也產生許多南北向的斷層。根據中國石油公司鑿井鑽探的研究，屏東平原至少下陷了近千公尺，使得「古屏東山脈」和中央山脈南段分離陷落而成「古屏東谷地」。中央山脈南段部份地質脆弱，如板岩、泥岩等，經由雨水沖刷及河川的侵蝕作用，礫砂、石、岩塊即被挾帶到河川下游而堆積成為沖積扇，而這些主要河川即為旗山溪、荖濃溪、隘寮溪、及林邊溪等。現今千頃平野的屏東平原即為上述各河川長年累月所沖積而成。由於沖積物的特性，這些長時間在斷崖和谷地交接處形成一連串的沖積扇，其扇端至今仍為地下水豐富且多為自流井的地方。

從玉山山脈流下來的溪水，變順著南北向的斷層，切出互相平行的古旗山溪及古荖濃溪。也就是說現在看到的屏東古地面上又堆積了近千公尺的近代堆積物，而原陷落的東界大斷層就是荖濃斷層和潮州斷層。除源於玉山山脈的兩大河系旗山溪和荖濃溪外，從中央山脈溪流出的溪流也在此大斷層下形成沖積扇，最典型的代表是古濁口溪和古隘寮溪這些溪流，越堆越大的沖積扇，迫使古荖濃溪流逐漸向西邊遷移，也因此越來越向古旗山溪靠近，最後兩條大河合併成一條—古

高屏溪。荖濃溪大致上是沿著斷層發育的，是分隔中央山脈與阿里山脈的地質地貌的界線。潮州斷層接續荖濃斷層，成為屏東平原的東界。兩斷層的東方山脈隆起，直上 3000 公尺，形成中央山脈南段的大武山主陵線，也是南台灣的主要分水嶺。由於中央山脈的西流溪谷甚多，而且落差大，沖刷量多，因此在斷崖與谷地的交接區，形成一連串的沖積扇，其扇端至今仍為地下水豐富的地方。

在中央山脈沖積扇形成的同時，古旗山溪、古荖濃溪從上游搬下大量泥沙，逐漸將屏東谷地填平，並且堆積出廣大的沖積平原，河道也越來越長。在二萬年前的冰河時期，古高屏溪向下侵蝕能力變強，將原屏東平原切割出大峽谷。到了一萬五千年前，氣候開始變暖，海水上升到今天的高度，於是一部份峽谷被海水淹沒成海底峽谷。

這個沖積平原，東有斷層分界的高山，西隔鳳山丘陵、內門丘陵與嘉南平原相望。本區南北長約 60 公里，東西寬約 20 公里，面積 1140 平方公里。範圍北自境內里港，九如之平地起，南至東港、林邊、枋寮沿岸，西由高屏溪起，東至平地鄉與山地鄉交界，係由高屏溪、旗山溪、荖濃溪、隘寮溪、林邊溪等網狀河流沖積而成，是多個沖積扇的綜合再綜合。地質以礫、砂、及黏土地層構成。屏東平原的東邊的大武山山脈，中央山脈南段的主峰北大武山高約 3,090 公尺，距平原東側的老埤只有 17 公里。高山與平原的交界是直線狀的斷層崖，從六龜開始，直伸到枋寮東南沿海附近，這一段的斷層稱作潮州斷層。

屏東平原的生成可分為幾個階段，先是六龜附近地陷形成南北走向狹長的六龜地溝，同時整個屏東平原的地區下陷形成大規模的地溝構造凹地，荖濃溪是沿著潮州斷層流動的溪谷，旗山溪則從陷落盆地的西側流入地溝。後來因為一連串的沖積扇地在地溝的東側，大斷層

崖的下方堆積，逐漸把荖濃溪逼向西方，高屏溪也受到沖積扇的逼迫，向西移動，同時間各大小溪流都陸續帶來大量堆積物充塞屏東地溝，最後堆積成了屏東平原。

從山地流出的大小河流，在潮州斷層崖下形成一連串的沖積扇，也有一些舊期沖積扇被切割後殘留的小丘與傾斜台地。隘寮溪從斷層崖的中段流出，由於流路分歧，形成廣大的沖積扇，順波向西南漫流，流過的河灘地，面積廣大，而且時常泛濫。1929—1938 年在隘寮溪的出口南側建築長堤，逼溪水向西北流，繞鹽埔與里港等地之北，匯入高屏溪，廣大河灘變成了農田。

東港溪河川流量並非完全來自降雨之地表逕流，尚包括地下水及地面水使用後迴歸水。由於東港溪流域之上層地質結構以沙礫石為主，基岩頗深，具有優良之導水性能，因此伏流水之現象甚為明顯。流域內以內埔以北之粗礫地層帶地下涵水最豐，而麟洛及潮州交互地帶則民間自社自流井到處可見。

根據東港溪主支流各河床水位地勢高低、舊河道路經、及屏東平原之地下水流向研判，除來自高山集水區的水源供應外，牛角灣溪、麟洛溪、及龍頭溪可能有來自隘寮溪水門橋以下河段之河床滲漏伏流水源，而佳平溪、民治溪、溪洲溪及牛埔溪多來自林邊溪來義段以下之伏流水源。

平原東側沿平原的主要斷層，為地下水主要補給帶，而平原內地下水主要含水層之地質均為未固結岩層，依其性質可分為(經濟部中央地質調查所，1997)：平原北端之嶺口礫岩層，平原東面山麓邊緣地帶之古期沖積扇堆積層以及分布最廣、為平原內地下水主要含水層之現代沖積層。屏東平原主要含水層有 2-3 層，每層約 10-30 公尺，流域之上游為自由含水層，自地面 40-140 公尺間，地層多由砂礫石

等所組成，透水性甚優；屏東、麟洛一帶為拘限含水層，主要水層位於 30-100 公尺間，由中粗砂及礫石等所組成；萬丹、潮洲一帶主要水層位於 60-140 公尺間，由中粗砂及礫石所組成；新園附近水層位於 10-29 公尺之間，由粗砂及礫石組成，深層組織較細；海岸地帶主要水層位於 100-130 公尺以下，為中粗砂及礫石並含黏土。

屏東沖積平原東側之礫石台地則屬紅棕壤，僅東港、林邊、佳冬沿海一帶有鹽土錯雜其間。中央山系南端高山地區土壤多為石質土。恆春半島地區之恆春縱谷平原土壤多屬水稻土及盤層土；沿海地區土壤多為紅棕壤，發育不良，其組織大體粘重，呈強酸性反應；佳樂水一帶為黃棕壤，表土多為灰黃棕色，呈酸性反應，有機質含量低。

根據經濟部中央地質調查所(1997)的資料顯示屏東平原的水文地質概況中，東北部地層分層較不明顯，主要的阻水層可能只有一層，地下水上下流通限制較少。西南部地層(內埔至東港)分層明顯，大致有兩層主要的阻水層，地下水上下流通已受限制。本區地層由多個沖積扇組成，標高由東向西降低，扇頂處以厚層礫石為主，分別向西、西北、西南扇狀展開，地層向西砂、泥層厚度漸厚，層次漸多。地下水的流向，基本受到沖積扇地層控制，流向有主要兩個分量，由東向西(沖積扇)及由北向南(由陸至海)，合成區域流向為由東北向西南流。

二、地下水區範圍及邊界

依據地調所調查研究成果，本區為一南北延展之長條行平原，北側和東側以中洲、美濃、泰山、大響及枋山沿線平原和山區交換處為邊界。西側中洲、溪埔、永芳、及林園附近，則以旗山至鳳山丘陵之稜線為邊界；此一邊界主要通過嶺口礫岩層，若假設稜線即為礫岩層之地下水分水線，則分水線兩側之降雨入滲形成地下水後，將各自向東西分流，因此西側邊界亦屬於零流邊界。南側邊界以海岸線為準，

如此面積約 1,330 平方公里。屏東平原區域範圍及觀測站網分佈如圖 6.1-1 所示。

三、地下分層

隨著屏東平原新觀測站網的陸續建立，使得本區域的水文地質概況有更多的資料可供研判、分析。經濟部中央地質調查所依其各觀測站的位置劃分為九個剖面(詳細內容可參考台灣地區地下水觀測網第一期計畫 84 及 85 年度「屏東平原水文地質調查研究報告」及根據經濟部中央地質調查所，「台灣地區地下水觀測網第一期計畫屏東平原水文地質調查研究總報告」，並依據其岩性作地層的對比，了解其地下水含水層分佈的情形，以進行地下分層分析。概念分層之原則為將屏東平原地層分為七層，其中第二、四、六層為阻水層(黏土層)，第一、三、五、七層則為含水層一、含水層二、含水層三之一、含水層三之二等，其剖面如圖 6.1-2 所示，屏東平原地區地下分層概念如圖 6.1-3 所示。各含水層厚度及分佈之概況如下

1、含水層一

含水層一為屏東平原含水層系統之表層，分布範圍涵蓋全區，厚度從 23.5 至 83.5 公尺不等，平均厚度約 49.9 公尺，為一自由含水層。地下水位以潮州斷層下各沖積扇頂區最深，深度約達 45 公尺左右，往西南則水位漸接近地表，較近者約於地表下數公尺處。本層同時也是雨水、河水等補注地下必經之處。

2、含水層二

含水層二位於含水層一和阻水層一之下，分布範圍涵蓋全區，其深度在地表下 43 至 152 公尺間，厚度從 9 至 79.5 公尺不等，平均厚度約 51.5 公尺。本層之岩性以礫石層最為發達，出水能力良好，與含水層一構成屏東平原地下水開發之主要層次，淺井開發含水層一，

大部分深井之深度達含水層二為止。

3、含水層三之一

含水層三之一位於含水層二和阻水層二之下，分布範圍涵蓋全區，其深度在地表下 95 至 210 公尺間，厚度從 49.5 至 89 公尺不等，平均厚度約 70.8 公尺。本層之岩性以礫石層最為發達，因深度較深，地下水開發不如含水層一、二普遍。

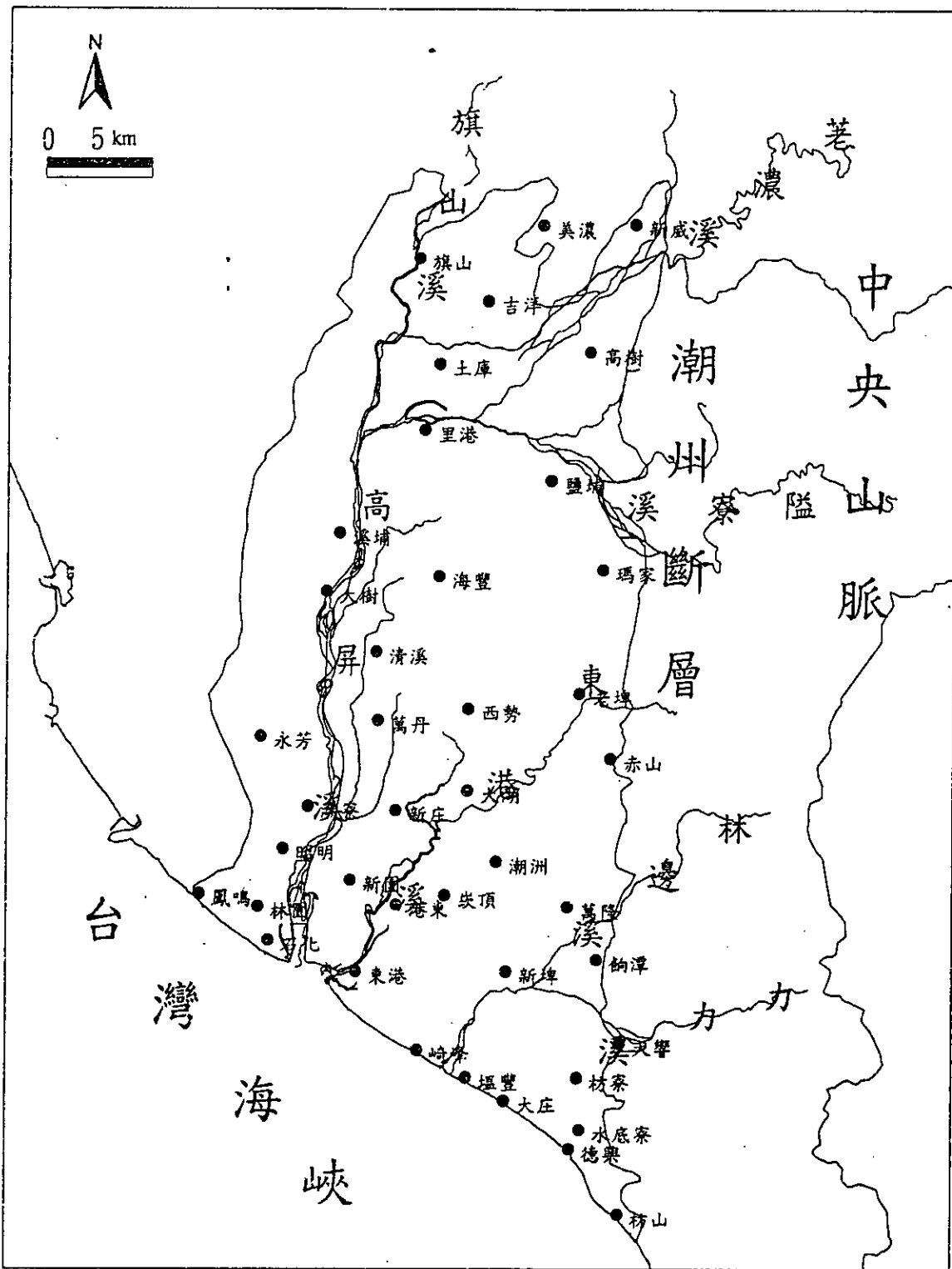


圖6.1-1 屏東平原區域範圍及觀測站網分布圖

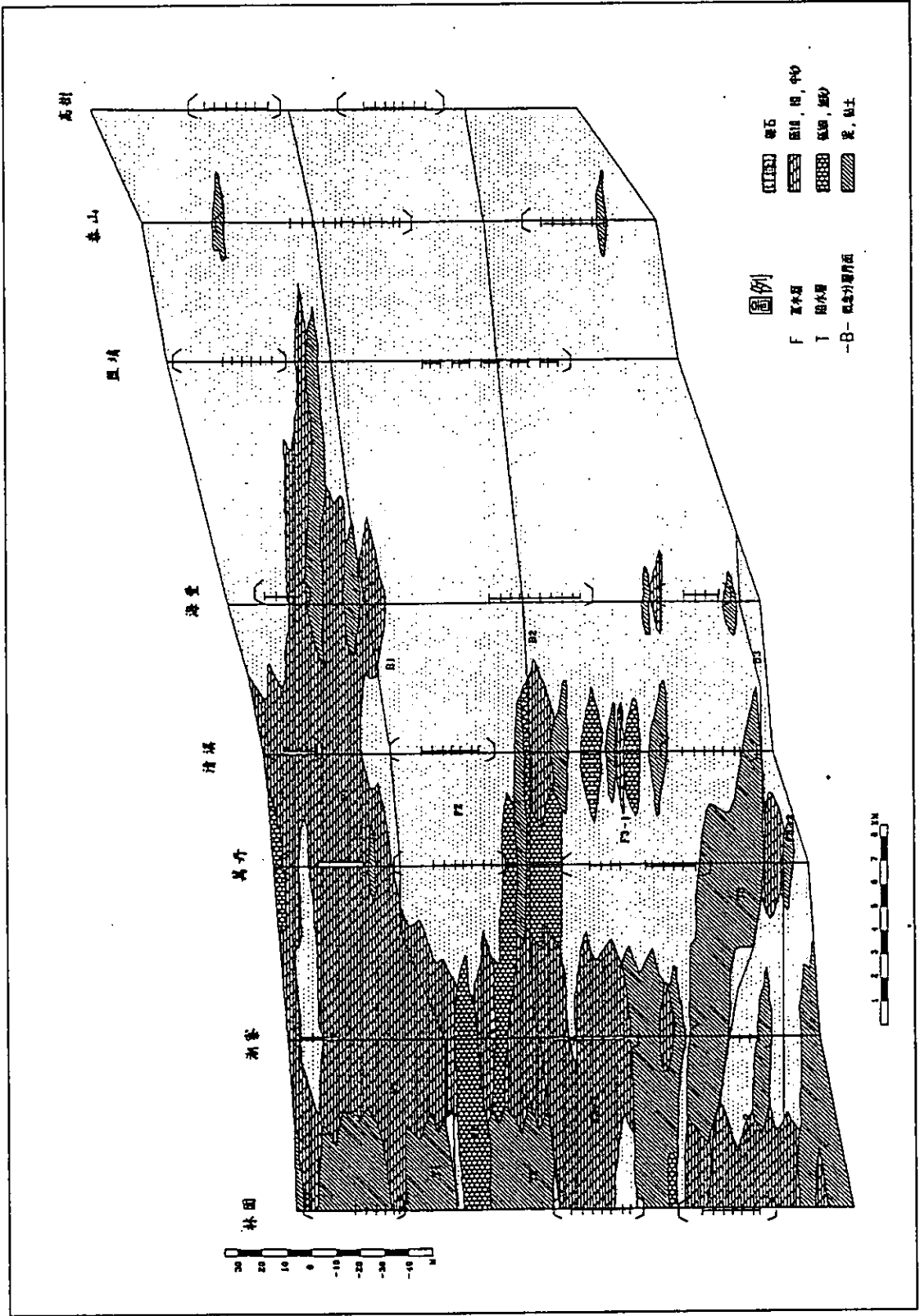


圖 6.1-2 屏東平原水文地質剖面圖
 資料來源：經濟部水資源局，區域性地下水觀測站網檢討 (III)，民國 86 年 6 月。

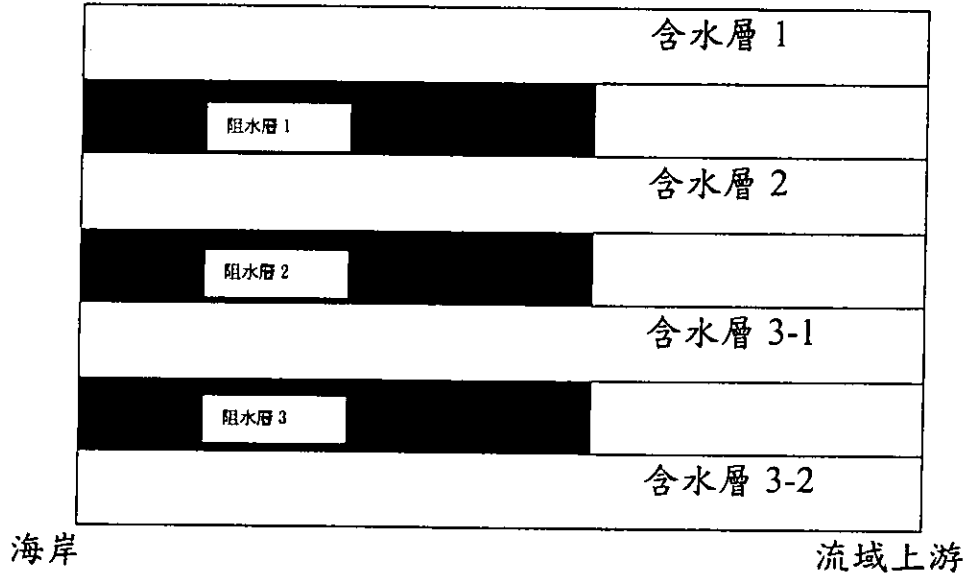


圖 6.1-3 屏東平原地區地下分層概念圖

4、含水層三之二

含水層三之二位於含水層系統之最底層，分布範圍涵蓋全區，其頂部深度在地表下 174 至 214 公尺間。本層之岩性以礫石層為主，觀測網計畫之鑽探深度未貫穿本層，其底部位置尚未能確定，因深度較大，地下水開發情形較少。

三、屏東平原歷年地下水質採樣分析

屏東平原歷年地下水質採樣分析說明如下：

- 1、民國 84 年至 87 年，屏東平原的地下水觀測井建置完成共有觀測井 134 口（謝永旭與蘇苗彬，1995~1998），在建井同年度，並進行基本水質檢測，以上稱為第 1 次檢測數據。
- 2、台糖地下水中心於 88~89 年度持續對屏東平原觀測井採樣、化驗與分析（台糖地下水中心，1999~2000），可為第 2 次及第 3 次檢測。
- 3、民國 90 年度為第 4 次檢測，主要集中在 3 個方向，地下水質鹽化、扇頂硝氮污染及淺層重金屬污染監測。

由於 88 年度於屏東平原僅對 90 口觀測井進行採樣分析，而 89 年度及 90 年度之採樣分析中，雖然皆對屏東平原 134 口觀測井進行採樣，惟各觀測井之分析項目並未齊全。故本計畫利用目前歷年之水質資料，原則上每口觀測井將取最近有進行分析之水質資料，來篩選補齊 134 口之水質資料，以供進行作為評估水質指標井之用。

6.2 屏東平原水質指標井選定分析

由第五章之方法評估，本計畫選定以多變量地質統計方法來作為指標井選定方法，並以屏東平原作為實際應用之探討。其應用之流程如圖 5.2-1 所示。以下即就屏東平原含水層二及含水層一於各步驟之於實際應用結果作一說明：

6.2.1 屏東平原含水層二水質指標井選定分析

一、含水層二觀測井排序分析

1、選定水質項目分析及水質資料常態化

本計畫將以與水文地質較相關之水質項目來評估水質指標井。本工作團隊初步選定之作為評估水質指標井之水質項目為：EC、TDS、Cl⁻、Na、Ca、Mg、SO₄²⁻、Eh、Fe 及 Mn 共 10 項，後續之分析即是以此 10 項視為 10 個變數，而各觀測井之水質數據即為樣本。在選定分析水質項目時，考量水利署水質監測之任務乃是以掌握長期地下水的整體水質變化為主，因此，以對於長期水質變化影響最深遠的地質化學相關項目為主。換言之，排除人為污染相關的水質項目，因此重金屬污染，有機污染等水質項目皆未被選入。參考屏東平原地下水水質資料，雖然有不少狀況氨氮超過相關標準，且硝態氮有微幅增加趨勢，但是這些水質項目的濃度多半僅略為超過標準值，相對濃度較低。因而，目前和近幾年之內，影響屏東平原地下水之適用性的還是導電度和 TDS 二者。且 EC 和 TDS 與海水入侵關係最密切，而 Eh 為能夠反應地下水的氧化還原狀態之參數，其餘的 7 項離子，都是與含水層或阻水層地質礦物關係密切者，也都是影響長期水質變化的最重要因子。而於選定水質項目(即變數)後，於分析前需將各井(即各樣本)之水質數據進行常態化，屏東平原含水層二原水質數據及水質常態化後之資料如表 6.2-1 所示。

表 6.2-1 屏東平原含水層二水質及常態化後之資料(34口)

井名	位置		分層	EC (umho/cm)	EC 常態化	TDS mg/l	TDS 常態化	Cl mg/l	Cl 常態化	Na mg/l	Na 常態化	Ca mg/l	Ca 常態化	Mg mg/l	Mg 常態化	SO4(2-) mg/l	SO4(2-) 常態化	Eh mg/l	Eh 常態化	Fe mg/l	Fe 常態化	Mn mg/l	Mn 常態化
	X(m)	Y(m)																					
九如一	196776	2515370	2	582	-0.245	424	-0.234	46.8	-0.244	23.7366	-0.228	58.7809	-0.145	9.2224	-0.297	40.8	-0.398	-1.100	-1.100	0.1741	-0.486	0.1279	-0.317
九曲一	190015	2506507	2	270	-0.288	270	-0.268	19.5	-0.255	45.5710	-0.208	40.5438	-0.443	15.6587	-0.232	47	-0.355	0.060	0.060	4.4819	2.129	0.3734	0.437
大潭一	197221	2484469	2	764	-0.220	468	-0.224	11	-0.259	78.1881	-0.177	19.1788	-0.793	24.5705	-0.143	0	-0.677	-1.286	-1.286	0.8253	-0.090	0.0398	-0.587
大潭二	210206	2481360	2	274	-0.288	184	-0.286	8.86	-0.260	5.9974	-0.245	30.4702	-0.608	10.6973	-0.282	31.7	-0.460	0.416	0.416	0.1123	-0.523	0.0070	-0.688
中州一	195993	2528009	2	522	-0.253	405	-0.238	8.86	-0.260	11.4071	-0.239	65.4135	-0.036	13.1979	-0.257	84	-0.103	-0.600	-0.600	0.7252	-0.151	0.1270	-0.319
西勢二	200397	2502704	2	516	-0.254	374	-0.245	6.02	-0.261	7.8929	-0.243	76.3034	0.142	12.9530	-0.260	62.9	-0.247	-0.761	-0.761	0.8646	-0.067	0.1764	-0.168
東港二	193156	2485971	2	19600	2.398	11750	2.248	5976	2.201	1576.3144	1.216	299.7251	3.799	233.8117	1.954	392	2.002	-0.744	-0.744	8.2476	4.415	0.7159	1.489
建興一	204395	2507086	2	666	-0.233	436	-0.231	19.5	-0.255	7.8725	-0.243	86.2896	0.306	18.5900	-0.203	66.4	-0.223	1.076	1.076	0.1074	-0.526	0.0089	-0.682
美濃二	205000	2533450	2	610	-0.241	400	-0.239	13.9	-0.258	13.1807	-0.238	66.8161	-0.013	21.4270	-0.175	75.6	-0.160	0.289	0.289	0.0617	-0.554	0.0112	-0.675
泰山一	209266	2521392	2	222	-0.295	153	-0.293	9.93	-0.259	7.5666	-0.243	18.6402	-0.801	7.3788	-0.315	10.1	-0.608	3.420	3.420	0.1188	-0.519	0.0061	-0.691
高樹二	208068	2525407	2	498	-0.257	358	-0.248	11	-0.259	10.0138	-0.241	60.8729	-0.110	13.9205	-0.250	112	0.089	0.576	0.576	0.0538	-0.559	0.0045	-0.696
崎岸二	197199	2480945	2	5180	0.394	3620	0.466	2162	0.628	537.5870	0.250	42.4668	-0.412	97.8846	0.592	240	0.964	-1.464	-1.464	0.2848	-0.419	0.0544	-0.542
清溪二	194408	2506330	2	776	-0.218	335	-0.253	21.7	-0.254	11.7056	-0.239	108.0698	0.662	20.3159	-0.186	103	0.027	-0.304	-0.304	0.0656	-0.552	0.8633	1.942
新庄二	195738	2496246	2	471	-0.260	286	-0.264	7.8	-0.260	16.9474	-0.234	55.8012	-0.193	11.0157	-0.279	69.6	-0.201	-0.803	-0.803	1.9118	0.569	0.3074	0.235
溪埔二	191978	2513893	2	293	-0.285	230	-0.276	13.1	-0.258	14.8748	-0.236	20.9301	-0.764	13.2482	-0.257	3.36	-0.654	-0.067	-0.067	0.5733	-0.243	0.1758	-0.170
萬丹二	194540	2501970	2	580	-0.245	448	-0.229	13.1	-0.258	10.8889	-0.240	80.6520	0.213	15.0353	-0.239	104	0.034	-0.465	-0.465	0.1682	-0.489	0.4037	0.530
萬崙一	207502	2497136	2	373	-0.274	325	-0.256	13.1	-0.258	15.3879	-0.236	60.1327	-0.122	19.0914	-0.198	40.3	-0.401	1.491	1.491	0.0847	-0.540	0.0184	-0.653
瑪家二	208976	2511539	2	444	-0.264	268	-0.268	8.15	-0.260	5.0555	-0.245	55.2350	-0.203	12.1655	-0.267	82.6	-0.112	0.661	0.661	0.1466	-0.502	0.0061	-0.691

鹽埔二	205622	2517240	2	387	-0.272	310	-0.259	9.93	-0.259	5.9246	-0.245	47.3363	-0.332	14.5702	-0.243	53.8	-0.309	54	1.033	0.0443	-0.564	0.0065	-0.690
大湖二	200368	2497500	2	441	-0.264	338	-0.253	22.7	-0.254	9.9196	-0.241	61.2910	-0.103	11.7497	-0.272	65.54	-0.229	-140	-0.609	0.7552	-0.133	0.1743	-0.174
大樹二	191135	2510159	2	167	-0.303	89	-0.307	8.88	-0.260	20.0509	-0.231	9.6817	-0.948	6.3497	-0.326	5.04	-0.642	22	0.763	0.1918	-0.475	0.2811	0.154
中正一	185015	2503504	2	657	-0.234	386	-0.242	19.5	-0.255	59.6291	-0.195	56.5789	-0.181	9.6815	-0.292	30.1	-0.471	-141	-0.617	1.5823	0.369	0.4364	0.631
石化二	187485	2487965	2	38400	5.010	24650	5.075	12942	5.074	6144.2824	5.465	275.2350	3.398	555.5888	5.178	678	3.957	-215	-1.244	2.8389	1.132	1.6094	4.234
吉洋一	200032	2529333	2	513	-0.254	336	-0.253	12.8	-0.258	12.6975	-0.238	63.0901	-0.074	13.8549	-0.251	99	0.000	-12	0.475	0.2666	-0.430	0.0100	-0.679
赤山二	209521	2499542	2	501	-0.256	335	-0.253	15.6	-0.257	62.6600	-0.192	35.0838	-0.532	8.4469	-0.305	504	2.768	-119	-0.431	0.1647	-0.491	0.2515	0.063
昭明二	188414	2493802	2	578	-0.245	329	-0.255	32.3	-0.250	32.8544	-0.220	59.7227	-0.129	15.0247	-0.239	3.31	-0.654	-159	-0.770	1.6857	0.432	0.4170	0.571
彭厝一	201104	2515658	2	424	-0.267	296	-0.262	19.5	-0.255	7.9031	-0.243	56.3781	-0.184	13.9666	-0.249	56.4	-0.291	46	0.966	0.1034	-0.529	0.0131	-0.669
港東二	195798	2490241	2	1336	-0.140	698	-0.174	179	-0.190	43.6416	-0.209	119.1599	0.844	32.0485	-0.068	30.8	-0.466	-174	-0.897	2.4875	0.919	0.4484	0.668
新南一	203915	2520763	2	566	-0.247	410	-0.237	9.94	-0.259	12.6798	-0.238	71.5359	0.064	15.0851	-0.238	10.6	-0.604	12	0.678	0.1027	-0.529	0.0162	-0.660
新威二	210915	2533502	2	1251	-0.152	614	-0.192	22.7	-0.254	215.2394	-0.050	13.1441	-0.891	2.8209	-0.361	97.8	-0.008	-111	-0.363	0.0126	-0.584	0.1202	-0.340
襟山二	197100	2531368	2	478	-0.259	319	-0.257	6.75	-0.261	29.8000	-0.222	52.4	-0.249	14.5	-0.244	22.8	-0.521	-167	-0.837	1.78	0.489	0.22	-0.034
柳潭二	208707	2486714	2	484	-0.258	246	-0.273	26.6	-0.252	73.4481	-0.182	22.2673	-0.742	9.3701	-0.295	12	-0.595	-92	-0.202	2.0129	0.631	0.4080	0.544
紫華一	205264	2511656	2	544	-0.250	374	-0.245	11.7	-0.259	5.3140	-0.245	68.7845	0.019	15.9964	-0.229	80.7	-0.125	14	0.695	0.0539	-0.559	0.0090	-0.682
開禧一	209883	2518620	2	339	-0.279	240	-0.274	3.91	-0.262	5.2484	-0.245	40.7549	-0.440	11.8324	-0.271	50.9	-0.329	46	0.966	0.0319	-0.572	0.0067	-0.689

2、變異元分析

將上述 10 個水質項目配對進行變異元分析，其中 Fe 與 Na 之複變異元如圖 6.2-1 所示；TDS 之變異元分析如圖 6.2-2 所示。屏東平原含水層二之所有變異元分析結果如附錄二所示。其中 Eh 本身之變異元及與其它水質項目配對之複變異元，呈現負相關之趨勢，因此在後續之分析中將只考慮 EC、TDS、Cl⁻、Na、Ca、Mg、SO₄²⁻、Fe 及 Mn 等 9 項水質項目進行分析。

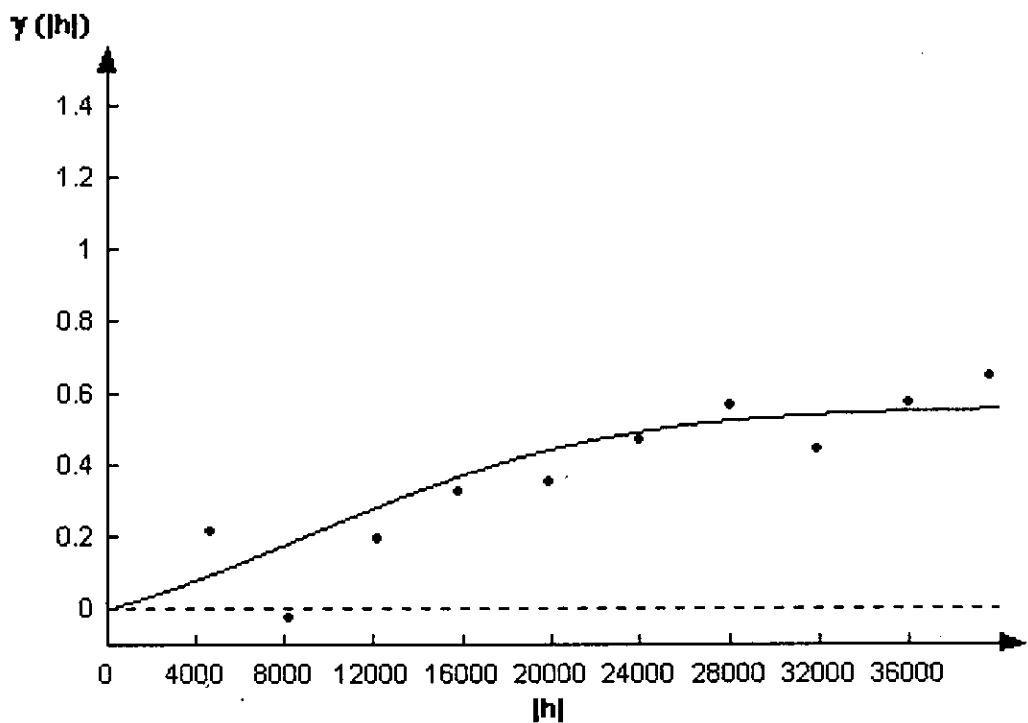


圖 6.2-1 屏東平原含水層二 Fe 與 Na 之複變異元圖

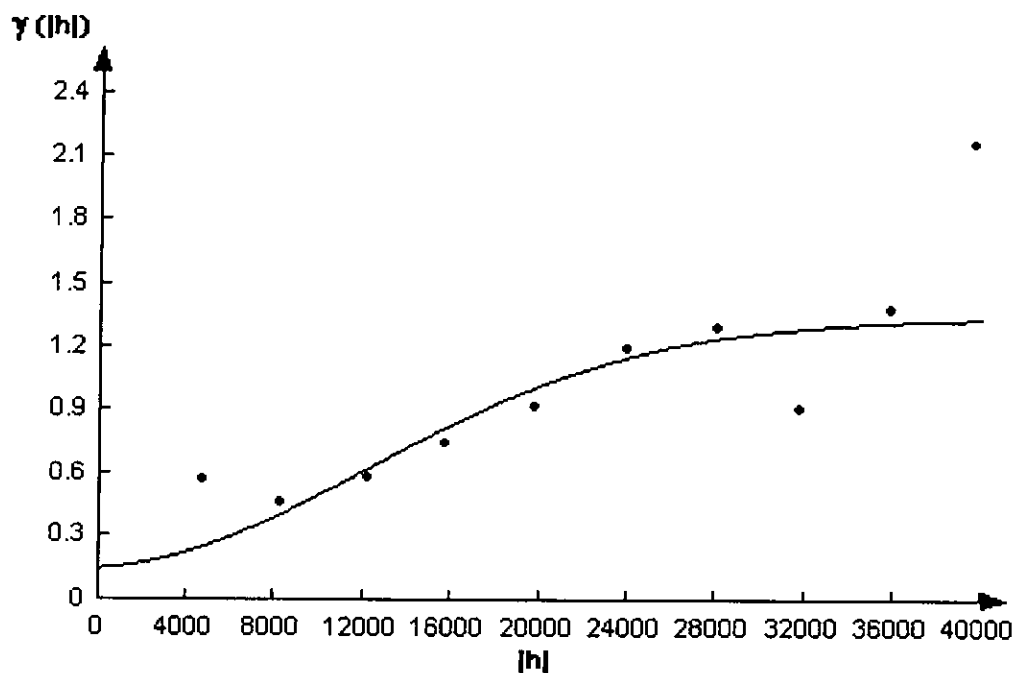


圖 6.2-2 屏東平原含水層二 TDS 之變異元圖

3、探討步驟 2 之變異圖是否為巢式(Nest Structure)變異圖

配合使用 VARIOWIN 2.2 變異元分析軟體，不同水質項目配對之巢式複變異元分析結果如表 6.2-2 所示。由表中所列，於屏東平原含水層二之巢式複變異元主要是由金塊效應、高斯模式及冪級數 (POWER) 模式所組成。

表 6.2-2 屏東平原含水層二之巢式複變異元分析結果

	EC	TDS	Cl	Na	Ca
EC	Nugget : 0.075 Gaussian : range : 30000 sill : 1.1 Power : power : 0.81 slope : 4e-05	--	--	--	--
TDS	Nugget : 0 Gaussian : range : 30000 sill : 0.6 Power : power : 0.8 slope : 0.0002	Nugget : 0.15 Gaussian : range : 29800 sill : 1.1 Power : power : 0.64 slope : 0.000108	--	--	--
Cl	Nugget : 0.12 Gaussian : range : 30000 sill : 0.5504 Power : power : 0.78 slope : 0.0002	Nugget : 0.12 Gaussian : range : 26000 sill : 0.75 Power : power : 0.73 slope : 0.0002	Nugget : 0.36 Gaussian : range : 30000 sill : 0.85 Power : power : 0.01 slope : 0	--	--
Na	Nugget : 0.12 Gaussian : range : 28000 sill : 0.69 Power : power : 0.74 slope : 0.0002	Nugget : 0.3 Gaussian : range : 28000 sill : 0.87 Power : power : 0.4 slope : 0.0002	Nugget : 0.18 Gaussian : range : 28200 sill : 0.5322 Power : power : 0.76 slope : 0.0002	Nugget : 0.125 Gaussian : range : 30000 sill : 1.15 Power : power : 0.61 slope : 0.00012	--
Ca	Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : 0.54 Power : power : 0.77 slope : 0.0002	Nugget : 0 Gaussian : range : 24000 sill : 0.66 Power : power : 0.74 slope : 0.0002	Nugget : 0.05 Gaussian : range : 25000 sill : 0.575 Power : power : 0.73 slope : 0.0002	Nugget : 0.05 Gaussian : range : 30000 sill : 0.475 Power : power : 0.75 slope : 0.0002	Nugget : 0.2 Gaussian : range : 25000 sill : 0.95 Power : power : 0.59 slope : 1.4e-4

Mg	<p>Nugget : 0.03 Gaussian : range : 30000 sill : 0.69 Power : power : 0.78 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0.1199 Gaussian : range : 29600 sill : 0.72 Power : power : 0.75 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0.18 Gaussian : range : 29000 sill : 0.48 Power : power : 0.77 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0.21 Gaussian : range : 29800 sill : 0.6 Power : power : 0.74 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0.175 Gaussian : range : 30000 sill : 0.4 Power : power : 0.74 slope : 0.0002</p>
SO ₄ ²⁻	<p>Nugget : 0.18 Gaussian : range : 28000 sill : 0.45 Power : power : 0.73 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0.2 Gaussian : range : 28000 sill : 0.52883 Power : power : 0.7 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0.12 Gaussian : range : 26200 sill : 0.21 Power : power : 0.79 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0.225 Gaussian : range : 30000 sill : 0.575 Power : power : 0.66 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0.2 Gaussian : range : 29000 sill : 0.4 Power : power : 0.68 slope : 0.0002</p>
Eh	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 25000 sill : -0.49783 Power : power : 0.01 slope : 0</p>	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 27000 sill : -0.34 Power : power : 0.64 slope : -3.2e-05</p>	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 29400 sill : -0.35 Power : power : 0.69 slope : -3.2e-05</p>	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : -0.33691 Power : power : 0.01 slope : 0</p>	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : -0.44 Power : power : 0.01 slope : 0</p>
Fe	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 25000 sill : -0.49783 Power : power : 0.01 slope : 0</p>	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 27000 sill : -0.34 Power : power : 0.64 slope : -3.2e-05</p>	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 29400 sill : -0.35 Power : power : 0.69 slope : -3.2e-05</p>	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : -0.33691 Power : power : 0.01 slope : 0</p>	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : -0.44 Power : power : 0.01 slope : 0</p>
Mn	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 30000 sill : 0.48 Power : power : 0.77 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 30000 sill : 0.6 Power : power : 0.75 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0 Gaussian : range : 30000 sill : 0.3639 Power : power : 0.79 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0.12 Gaussian : range : 29200 sill : 0.69 Power : power : 0.66 slope : 0.0002</p>	<p>Nugget : 0.025 Gaussian : range : 30000 sill : 0.325 Power : power : 0.78 slope : 0.0002</p>

	Mg	SO ₄ ²⁻	Eh	Fe	Mn
Mg	Nugget : 0.2 Gaussian : range : 30000 sill : 0.85 Power : power : 0.62 slope : 0.0002	--	--	--	--
SO ₄ ²⁻	Nugget : 0 Gaussian : range : 26000 sill : 0.18908 Power : power : 0.81 slope : 0.0002	Nugget : 0.375 Gaussian : range : 30000 sill : 0.55 Power : power : 0.79 slope : 0.00011	--	--	--
Eh	Nugget : -0.125 Gaussian : range : 28800 sill : -0.325 Power : power : 0.79 slope : -2e-05	Nugget : 0 Gaussian : range : 29000 sill : -0.34 Power : power : 0.6 slope : -0.00019	Nugget : 0.4399 Gaussian : range : 30000 sill : 0.35 Power : power : 1.06 slope : 10e-06	--	--
Fe	Nugget : 0.06 Gaussian : range : 28000 sill : 0.37435 Power : power : 0.73 slope : 8e-05	Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : 0.225 Power : power : 0.77 slope : 0.0002	Nugget : 0 Gaussian : range : 28400 sill : -0.14 Power : power : 0.87 slope : -4.6e-05	Nugget : 0.225 Gaussian : range : 28400 sill : 0.8 Power : power : 0.82 slope : 5.4e-05	--
Mn	Nugget : 0.09 Gaussian : range : 28800 sill : 0.6 Power : power : 0.71 slope : 0.0002	Nugget : 0.15 Gaussian : range : 30000 sill : 0.48 Power : power : 0.65 slope : 0.0002	Nugget : -0.039 Gaussian : range : 30000 sill : -0.38 Power : power : 0.85 slope : -3.6e-05	Nugget : 0 Gaussian : range : 30000 sill : 0.66 Power : power : 0.59 slope : 0.0002	Nugget : 0.225 Gaussian : range : 30000 sill : 0.8 Power : power : 0.75 slope : 0.00012

4、找出步驟 3 巢式變異圖之不同尺度(Scale)影響範圍(Range)及基值(Sill)

由表 6.2-2 所示，屏東平原含水層二可區分為二個空間尺度，其中套疊高斯模式之影響範圍約為 25 公里~30 公里(平均為 28.5 公里);而套疊冪級數 (POWER)模式之影響範圍約為 40 公里，而各不同水質項目配對之巢式複變異元之套疊模式、影響範圍及基值如表 6.2-2 所示，其中由於影響範圍為 40 公里之冪級數 (POWER)模式之係數值不大，且可將其視為空間傾向值之效應，因此在後續之水質指標井之分析即以平均影響範圍為 28.5 公里之高斯模式為主。

5、藉由步驟 4 得共變異矩陣並進行不同尺度之因子分析(Factor Analysis)

由表 6.2-2 中不同水質項目配對之巢式複變異元之基值，即可組成不同空間之共變異矩陣，其中屏東平原含水層二 28.5 公里之空間尺度共區域化(coregionalization matrix)矩陣如表 6.2-3 所示。而後續之因子分析乃是將此共區域化矩陣視為共變異矩陣，以進行不同尺度之因子分析。

將表 6.2-3 之共區域化矩陣，利用 SPSS 統計分析軟體進行不同尺度之因子分析，含水層二 28.5 公里空間尺度之各因子特徵值與貢獻率列於表 6.2-4 中。尤其中可以發現，因子一之貢獻率即達到 58.3%，因子一、二、三、四、五合計貢獻率達 93%以上，而其餘之 4 個主要因子之影響應可忽略。

另外，各變數(不同水質項目)的各因子之負荷量如表 6.2-5 所示。

表 6.2-3 屏東平原含水層二共區域化矩陣

	EC	TDS	Cl	Na	Ca	Mg	SO ₄ ²⁻	Fe	Mn
EC	1.1	0.6	0.5504	0.69	0.54	0.69	0.45	0.465	0.6
TDS	0.6	1.1	0.75	0.87	0.66	0.72	0.52883	0.32	0.48
Cl	0.5504	0.75	0.85	0.5322	0.575	0.48	0.21	0.465	0.3639
Na	0.69	0.87	0.5322	1.15	0.475	0.6	0.575	0.33	0.69
Ca	0.54	0.66	0.575	0.475	0.95	0.4	0.4	0.34	0.325
Mg	0.69	0.72	0.48	0.6	0.4	0.85	0.18908	0.37435	0.6
SO ₄ ²⁻	0.45	0.52883	0.21	0.575	0.4	0.18908	0.55	0.225	0.48
Fe	0.465	0.32	0.465	0.33	0.34	0.37435	0.225	0.8	0.66
Mn	0.6	0.48	0.3639	0.69	0.325	0.6	0.48	0.66	0.8

表 6.2-4 屏東平原含水層二 28.5 公里空間尺度之各因子特徵值與貢獻率

因子	特徵值	貢獻率(%)	累計特徵值	累計貢獻率(%)
一	5.131	58.307	5.131	58.31
二	0.977	11.102	6.108	69.41
三	0.855	9.720	6.963	79.13
四	0.673	7.652	7.636	86.78
五	0.558	6.336	8.194	93.12
六	0.3140	3.5720	8.508	96.69
七	0.2670	3.0310	8.775	99.72
八	0.0242	0.2750	8.799	100.00
九	0.0004	0.0045	8.800	100.00

表 6.2-5 屏東平原含水層二各變數(不同水質項目)於各因子之負荷量

	因子一	因子二	因子三	因子四	因子五	因子六	因子七	因子八	因子九
EC	0.830	0.120	0.011	0.021	-0.621	-0.095	0.014	-0.043	-0.005
TDS	0.929	-0.004	-0.298	-0.194	0.263	0.070	0.157	-0.103	0.001
Cl	0.711	0.341	-0.239	0.159	0.173	-0.272	0.193	0.067	-0.005
Na	0.899	-0.229	-0.025	-0.378	0.063	-0.245	-0.284	0.024	0.004
Ca	0.687	0.081	-0.416	0.419	0.030	0.223	-0.269	0.012	-0.001
Mg	0.741	0.283	0.088	-0.301	-0.123	0.297	0.120	0.068	0.007
SO4	0.603	-0.801	0.006	0.235	-0.068	0.025	0.182	0.031	0.003
Fe	0.566	0.245	0.506	0.379	0.094	-0.101	-0.011	-0.032	0.010
Mn	0.748	-0.071	0.522	-0.042	0.199	0.130	-0.062	0.003	-0.013

6、計算各地下水監測站於不同尺度之各因子得點(Factor Score)

利用步驟 1 之常態化後之數據及利用式(5.2-11)，計算各觀測井於各因子得點。其中 28.5 公里範圍空間尺度之各因子得點如表 6.2-6 所示。

表 6.2-6 屏東平原含水層二 28.5 公里空間尺度之各因子得點(34 口)

井名	位置		因子一	因子二	因子三	因子四	因子五	因子六	因子七	因子八	因子九
	X(m)	Y(m)									
東港二	193156	2485971	3.230	0.457	0.261	-0.622	1.130	3.250	0.872	2.370	-62.500
九曲一	190015	2506507	2.290	-0.573	-0.564	-0.059	-0.499	-0.422	-0.406	2.470	-34.100
石化二	187485	2487965	-0.484	3.330	3.670	2.830	2.850	0.706	2.610	-5.740	40.800
港東二	195798	2490241	1.190	-0.263	-0.840	-0.071	-0.745	1.280	-0.328	0.976	3.710
餉潭二	208707	2486714	0.999	-0.416	-0.192	0.125	-0.642	-0.748	-0.100	1.710	6.560
昭明二	188414	2493802	0.807	-0.334	-0.414	0.079	-0.781	0.079	-0.166	1.290	13.000
新庄二	195738	2496246	0.770	-0.327	-0.341	-0.093	-0.224	-0.081	-0.233	0.897	-3.190
中正一	185015	2503504	0.761	-0.376	-0.368	0.067	-0.566	-0.021	-0.156	1.230	15.600
旗山二	197100	2531368	0.623	-0.312	-0.323	0.031	-0.576	-0.092	-0.155	1.160	-8.290
清溪二	194408	2506330	0.324	-0.013	-0.613	-0.180	-0.076	1.010	-0.366	-0.774	74.800
西勢二	200397	2502704	0.027	-0.199	-0.334	-0.076	-0.258	0.393	-0.184	0.203	-0.195
大湖二	200368	2497500	-0.028	-0.183	-0.207	-0.074	-0.193	0.063	-0.151	0.200	0.839
溪埔二	191978	2513893	-0.063	-0.164	0.030	0.086	-0.586	-0.733	0.009	0.809	4.960
萬丹二	194540	2501970	-0.132	-0.051	-0.311	-0.168	0.065	0.431	-0.237	-0.475	29.300
中州一	195993	2528009	-0.119	-0.144	-0.216	-0.122	-0.045	0.131	-0.162	0.026	-4.200
大潭一	197221	2484469	-0.108	-0.072	0.014	0.129	-0.610	-0.782	0.077	0.928	-13.300
大樹二	191135	2510159	-0.133	-0.205	0.129	0.122	-0.547	-0.972	0.040	0.721	20.900
赤山二	209521	2499542	-0.566	0.333	0.322	-1.060	3.450	-1.060	-0.558	-3.750	-4.040
九如一	196776	2515370	-0.387	-0.188	-0.114	0.018	-0.361	0.043	-0.035	0.241	6.280

新威二	210915	2533502	-0.513	-0.244	0.212	0.145	0.168	-1.030	0.166	0.339	3.930
吉洋一	200032	2529333	-0.520	-0.062	-0.111	-0.151	0.124	0.073	-0.124	-0.487	-9.620
崎峰二	197199	2480945	-0.939	0.801	1.140	-0.376	1.270	-1.040	0.253	-2.040	-15.600
泰山一	209266	2521392	-0.504	-0.179	0.152	0.088	-0.480	-0.772	0.076	0.513	-4.180
大響二	210206	2481360	-0.534	-0.120	0.082	0.022	-0.331	-0.544	0.018	0.179	-5.150
瑪家二	208976	2511539	-0.570	-0.078	-0.055	-0.112	0.018	-0.073	-0.082	-0.372	-7.460
彭厝一	201104	2515658	-0.571	-0.077	-0.074	-0.049	-0.196	-0.017	-0.063	-0.208	-5.270
萬巒一	207502	2497136	-0.574	-0.021	-0.123	-0.013	-0.332	0.085	-0.082	-0.223	-4.700
新南一	203915	2520763	-0.547	-0.133	-0.216	0.065	-0.611	0.369	-0.027	0.199	-2.650
關福一	209883	2518620	-0.601	-0.084	0.032	-0.029	-0.197	-0.344	-0.018	-0.075	-4.800
鹽埔二	205622	2517240	-0.606	-0.051	-0.011	-0.045	-0.189	-0.208	-0.040	-0.145	-5.350
建興一	204395	2507086	-0.608	-0.040	-0.275	-0.092	-0.190	0.616	-0.122	-0.466	-5.900
美濃二	205000	2533450	-0.631	0.037	-0.142	-0.115	-0.061	0.180	-0.099	-0.535	-6.510
高樹二	208068	2525407	-0.652	-0.017	-0.060	-0.183	0.247	0.011	-0.122	-0.686	-7.800
繁華一	205264	2511656	-0.632	-0.031	-0.140	-0.119	-0.026	0.221	-0.104	-0.492	-5.960

7、依據不同尺度因子得點大小排序測站

最後，配合表 6.2-6 之各觀測井於各因子得點，並由表 6.2-4 中各因子特徵值與貢獻率作為不同主要因子得點之權重依據，代入式 (5.2.-12) 計算各井之排序分數。表 6.2-7 為 28.5 公里空間尺度之各觀測井之排序分數與各井之排序，而此排序即可作為屏東平原含水層二之水質指標井選定之重要參考依據。圖 6.2-3 為屏東平原含水層二所有各觀測井之位置及排序。

表 6.2-7 屏東平原含水層二 28.5 公里空間尺度之各觀測井之排序分數與排序(34 口)

井名	位置		排序分數	排序
	X	Y		
東港二	193156	2485971	2.1300	1
九曲一	190015	2506507	1.1600	2
石化二	187485	2487965	0.9320	3
港東二	195798	2490241	0.5690	4
餉潭二	208707	2486714	0.4620	5
昭明二	188414	2493802	0.3520	6
新庄二	195738	2496246	0.3510	7
中正一	185015	2503504	0.3340	8
旗山二	197100	2531368	0.2580	9
清溪二	194408	2506330	0.1350	10
西勢二	200397	2502704	-0.0518	11
大湖二	200368	2497500	-0.0767	12
溪埔二	191978	2513893	-0.1060	13
萬丹二	194540	2501970	-0.1130	14
中州一	195993	2528009	-0.1190	15
大潭一	197221	2484469	-0.1220	16
大樹二	191135	2510159	-0.1440	17
赤山二	209521	2499542	-0.1900	18
九如一	196776	2515370	-0.2780	19
新威二	210915	2533502	-0.3150	20

吉洋一	200032	2529333	-0.3270	21
崎峰二	197199	2480945	-0.3330	22
泰山一	209266	2521392	-0.3470	23
大響二	210206	2481360	-0.3550	24
瑪家二	208976	2511539	-0.3600	25
彭厝一	201104	2515658	-0.3680	26
萬巒一	207502	2497136	-0.3710	27
新南一	203915	2520763	-0.3760	28
關福一	209883	2518620	-0.3850	29
鹽埔二	205622	2517240	-0.3850	30
建興一	204395	2507086	-0.3880	31
美濃二	205000	2533450	-0.3890	32
高樹二	208068	2525407	-0.3920	33
繁華一	205264	2511656	-0.3930	34

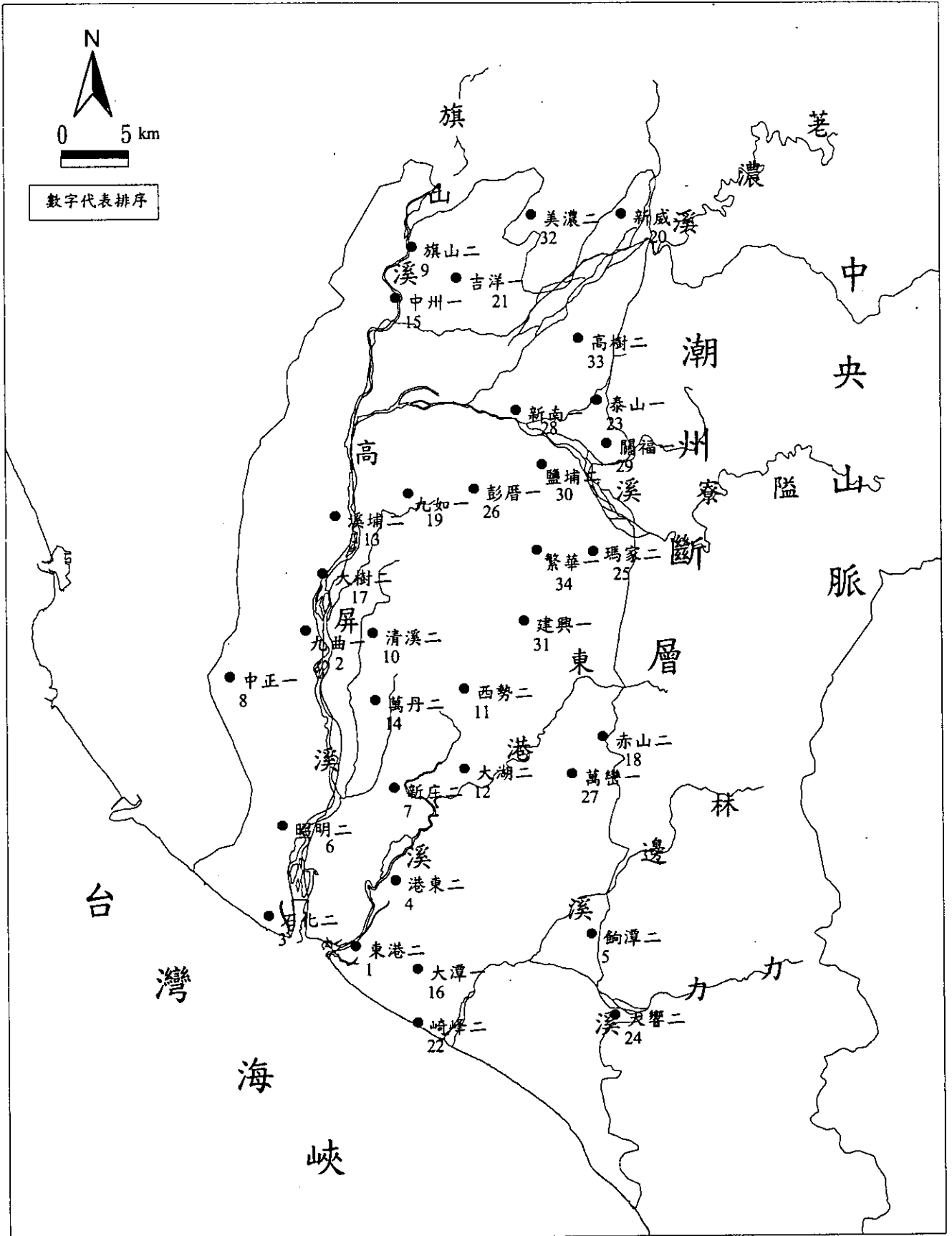


圖6.2-3 屏東平原含水層二所有觀測井之位置及排序 (34口)

二、含水層二水質因子分析結果

由表 6.2-3 所列出之屏東平原含水層二之水質參數共變異矩陣，可以觀察出以下幾項特點：

- (1) EC 與 Mg , Na , Ca , Cl 等四個水質參數相關性最高， TDS 亦與這四個水質參數有最高之相關性。亦即屏東平原地下水中之 TDS 主要貢獻者為 Mg , Na , Ca , Cl 四種離子。
- (2) Fe 與 Mn 二者之相關性最高。台灣的黏土礦物中富含鐵與錳兩種元素，含水層中所含的細顆粒材料應該是這兩種離子的來源。應可歸因於當含水層地質材料中含有富含鐵錳礦物且地下水環境處於還原態($Eh < 0$)時，因為鐵離子、硫離子之 Eh - pH 穩定性關係，導致地下水中的鐵含量較高。根據經濟部水利署委託台糖公司的研究報告(2002)中指出，含水層中硫化鐵礦物之存在應該是影響地下水中鐵離子以及硫離子濃度的因素；而利用硫化鐵平衡常數則可以預測地下水中之鐵濃度。
- (3) SO_4^{2-} 濃度與其他水質參數之相關性均不高，顯示其存在較不受到水中其他離子變化的影響。雖然硫酸鹽亦為海水之主要成份之一，但是相對於 Mg , Na , Ca , Cl 四種離子， SO_4^{2-} 濃度與變化率均較低。亦即，含水層中 SO_4^{2-} 濃度與含水層地質材料之礦物特性相關性的影響可能較海水入侵影響高。

含水層二 28.5 公里空間尺度之各因子特徵值與貢獻率列於表 6.2-4 中。尤其中可以發現，因子一之貢獻率即達到 58.3%，因子一、二、三、四、五合計貢獻率達 93% 以上。各因子之特性與成因可依據表 6.2-5 中之因子負荷量來分析。

因子一與所分析的九項水質參數均成正相關，尤其依序以 TDS , Na , EC , Mn , Mg , Cl 為最。

總溶解固體(Total dissolved solids, TDS)為水中陰陽離子之總和，主要包括了鈣、鎂、鈉、鉀、碳酸根、硫酸根、氯鹽、以及其它微量元素($< 10 \text{ mg/l}$)。水中的總溶解固體含量過高，容易引起下痢及其他胃腸不適症狀。環保署飲用水源水質標準，規定限值為 500 mg/l 。導電度乃表示水的導電性質，其大小與溶解性離子濃度有密切關係，故通常可間接得知水中總溶解固體物的含量。沿海地區地下水之 EC 值,亦可作為海水入侵與否之參考。因水中溶解性離子濃度對作物生長之影響甚鉅，故導電度可用為該地區地下水適合灌溉與否之參考。

由表 6.2-6 中各井位之因子得點觀察可以發現因子一得點高者多集中於沿海地區，依序為東港、九曲、港東、餉潭、昭明、新庄、中正等，並往北延伸。因為因子一的貢獻率達到 58.3%，故可以斷言屏東平原含水層二水質的主要變因是鹽化的影響。

根據水資局委託台糖公司研究結果(民國八十八，八十九年)，屬於地下水已鹽化區域的石化、崎峰、塭豐，其中石化井的鹽度最高。東港的導電度有異常，而石化、塭豐鹽化有加重趨勢。沿海的含水層一水位石化、東港、崎峰、塭峰、大潭的水位已低於海水面，其中崎峰水位最低。

這一項結果與王瑞君(民國八十七年)針對屏東平原地下水水質進行分析所得出之結果相似，故因子一可視為『海水入侵因子』。

此外，水資局的資料(水資局，八十九年)指出，87 年以前至 89 年 1 月導電度變大之觀測井共有 73 口的變化率大於 10%，有鹹化趨勢的井為總數 133 口中之 55%；其中以新園變化最大。導電度變小的井共有 18%，並共有 24 口變化率大於 10%。

89 年的下半年內屏東平原地區水質變化相當快，有 48%的井導電度降低。當時檢測的 133 口井中，有一半以上的井在半年內導電度

變化達 10%以上，進而推測屏東地區因為地下水自然補注及海水流入地層影響很大，因此水質變化快速。並推論可能因為 89 年 9 月是地下水豐水期，補注的淡水可能將鹹水往海側方向沖淡及推動，因此 1 月至 9 月的水質變化以變淡為主。

因子二的貢獻率約為 11.1%，明顯較因子一為低。主要的正相關因子依序為 *Cl*, *Mg*, *Fe*, *EC*, *Ca*，而與 *TDS*, *Na*, SO_4^{2-} , *Mn* 呈負相關。因子得點最高者為石化、崎豐、赤山、東港，愈往北方愈呈現負相關。屏東沖積平原東側之礫石台地則屬紅棕壤，應該富含這鐵氧化物。風化土壤被沖機至下游，隨時日而逐漸因為化學作用釋出其中的鐵。此外，根據王瑞君(民國八十七年)之研究指出因屏東平原沖積扇群由細粒礫石、砂、沉泥、黏土沉積組成，質地愈往西南方愈細，沉積物中含有以碳酸鹽存在之碳酸鎂礦物質，因溶解和離子交換使鎂和鐵等礦物質溶解於地下水中，造成在阻水層附近的鎂和鐵離子濃度較高，根據 *Eh-pH* 關係判斷，當 $Eh < 0$ 且其值較負而 $pH < 8$ 時，鐵離子較易從沉澱物狀態成為以亞鐵離子(Fe^{2+})存在。因子二之得點分布顯示在潮州斷層至高屏溪南岸之間有較明顯的往北遞減趨勢，應該是受到高屏溪沖積構造之影響。因此，因子二可視為『含水層質地因子』。

因子三正相關的水質參數主要為 *Mn*, *Fe*，其次為 *Mg*, *EC*, SO_4^{2-} ，其餘均為負相關。因子得點最高者為石化、崎豐、赤山、東港、大樹、大響、新威等井位，愈往北方愈呈現負相關，整體變化趨勢與因子二幾乎相同。因子三也屬於『含水層質地因子』。

中央山系南端高山地區位於潮州斷層以東，地質係由頁岩、板岩、石英岩、煤層、礫岩錯綜構成，地表的土壤風化或岩層中的沉積質溶解，可能與鐵與錳的變化趨勢相關。因這些風化的土壤歷經許久的沖積作用被搬運到高屏溪下游，形成含水層的一部分。

過去各地地下水水質檢測結果發現，台灣的地下水中經常發現鐵和錳的濃度超過飲用水水質標準的狀況，可歸因於亞熱帶地區土壤中所含的鐵與錳較多，導致在地下水中溶解出來較多的鐵離子與錳離子。氧化鐵和氧化錳多存在於地表的黏土中，因為沉積作用成為了含水層的一部份。

此外，根據過去對於屏東平原的水質分析(水資局，民國八十九年)結果，89 年度的水質檢測發現有超過一半的井，鐵、錳濃度都超過環保署飲用水水源水質標準(Fe 超過標準的有 40%， Mn 超過標準的有 67%)，並指出檢測時的地下水環境多處於還原態，因此也推論鐵、錳應該是在還原狀態下由地層礦物中溶出，在地下水中的濃度較高應該屬於自然現象。日後若有長期觀測的結果，應該可以建立起其長期變化趨勢。

因子四正相關的水質參數為 Ca , Fe , SO_4^{2-} , Cl , EC ，且前三項相關性最強，其餘均為負相關。因子得點最高者為石化、新威、大潭、餉潭、大樹、泰山、溪埔、昭明、新南，亦即集中於鄰近高屏溪與林邊溪兩側。因子得點為負者主要集中於高屏溪-旗山溪與東港溪之間的井位。大岡山、小岡山、半屏山、壽山、鳳山一帶的台地與孤丘均為石灰岩，直至鳳鼻頭沒入海域，而往南恆春半島亦有石灰岩層，因此含有較多的 Ca 與 SO_4^{2-} 。因子四也屬於『含水層質地因子』，與含水層土壤中之石灰質成分相關，而此石灰質成分之來源可能是風化土壤沖積所致或者是海中貝類生物的殘骸。。

第五個因子正相關的水質參數為 TDS , Mn , Cl , Fe , Na , Ca ，前三項相關性最強，其餘均為負相關。因子得點最高者為赤山、石化、崎峰、東港、高樹、瑪家、新威、吉洋等，由沿海順高屏溪往東北側延伸。

屏東平原東北側麓山帶，高雄縣東側有廣大面積的泥岩分布，其

中老麓溪西岸為上新-更新世地層之六龜礫岩，主要由厚礫岩、粗粒砂岩、砂質頁岩、泥岩組成。泥岩為海相沈積岩化而成，且在岩化的過程中產生類似水泥的水化作用，而以矽酸鈣膠體與鋁酸鈣膠體將砂、沈泥及粘土等顆粒緊密膠結而成，但由於屬海相沈積，故含有硫酸鈉等鹽類，泥岩風化而成的土壤含可溶性鹽成份很高。更由於硫酸鈉極易溶於水，並解離成鈉與硫酸根離子，而硫酸根離子又與泥岩中扮演膠結角色之矽酸鈣膠體反應產生硫酸鈣外，其餘矽酸鈣膠體成分則形成不具膠結性的水合物。因子五也屬於『含水層質地因子』。

五個主要因子中，因子二、三、四、五都與鐵離子有密切關係，除了和地質因素相關之外，也可能與井管材料的腐蝕有關。根據王瑞君(民國八十七年)的研究，屏東平原地下水因子分析中第四個因子主要為鋅的影響，推斷是因為井管材料水解的影響，鋅離子因水解繼而沉澱於井管四周造成。本研究所得到的鐵離子濃度也可能部份是因為井管材料的氧化還原作用造成。農工中心研究水利署所屬之觀測井，利用井體攝影判斷觀測井井體狀況，其觀察結果中有以下幾項可能影響水質監測結果：

1. 靜水位以上管壁破漏（易導致淺層污染水滲入）。
2. 井管變形偏斜（易導致洗井時機械撞擊損壞井管）。
3. 井管接頭積垢腐蝕（可能原因為接頭焊接不良、井水受污染等）。
4. 井壁破裂（可能原因為地層變動、施工不良、洗井不當等）。
5. 濾管積垢、腐蝕、破裂。
6. 井底泥沙淤積以致井深減少。
7. 井水有懸浮物質。
8. 積垢腐蝕之顏色與形狀：

- (1)白色的懸浮顆粒—碳酸物，如碳酸鈣、碳酸鎂，可能地下水硬度高。
- (2)紅色的井垢—水井處於好氧狀態，紅色表示氧化鐵。
- (3)黑色的黏液沾附井體—水井處於厭氧狀態，黑色表示具腐蝕性的硫化物。可能的原因包括井體中有過豐的有機物、含水層的流速緩慢、井體水溫分層現象與井水長期缺乏抽水。
- (4)井壁有球狀結核—核內是厭氧的硫化物，核表面是好氧的鐵細菌，因細菌黏液滋生而形成球狀結構。

上述的幾個現象，都指向井管或濾管材料可能受到損傷或腐蝕，且當水中導電度、氯鹽、鈉皆高顯示可能有海水入侵時，則更容易對井體造成腐蝕。因此農工中心研判地下水監測結果顯示鋅、鐵、錳含量高之可能原因為：鋅含量高可能係鍍鋅管材質之井受到腐蝕使鋅元素釋出。鐵與錳含量高，則容易成為鐵與錳細菌營養鹽，井管容易腐蝕、濾孔容易積垢淤塞。

若欲將井管腐蝕對水質監測結果可能造成的影響分離以確認含水層中鐵、錳、鋅等金屬離子的實際濃度與變化趨勢，則有待未來更深入的研究。

三、含水層二水質指標井選定

經由上述之各觀測井排序分析，於含水層二之指標井選定優先次序分別可參照表 6.2-7 之排序。另外，在決定選定水質指標井之井數方面，將參照各井之排序分數繪製於圖 6.2-4 上，由圖 6.2-4 可看出於第 20 口井時，應是較合理之含水層二水質指標井井數，最後，於屏東平原含水層二所選定之水質指標井分佈及排序如圖 6.2-5 所示。

含水層二各觀測井之排序分數

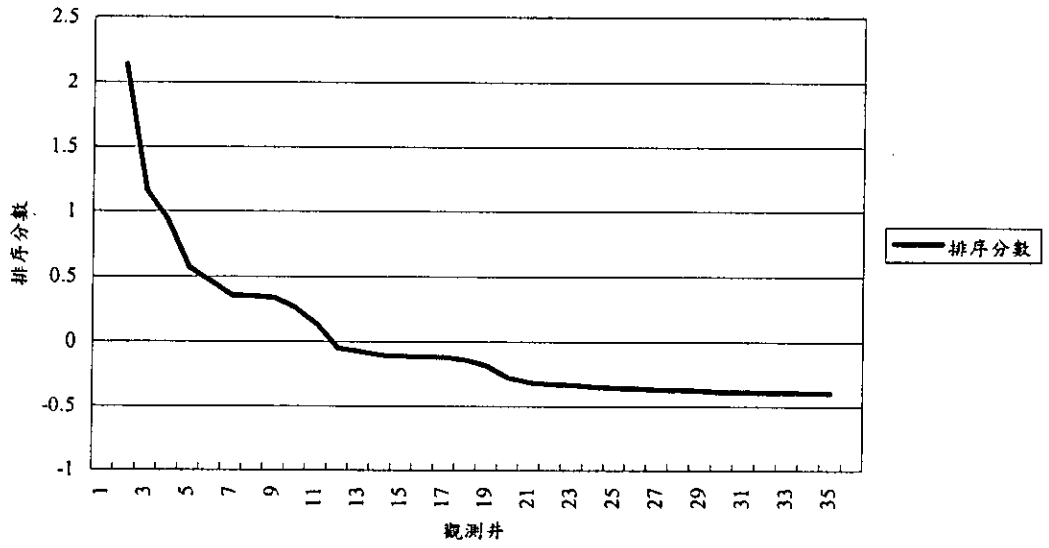


圖 6.2-4 屏東平原含水層二所有觀測井之排序分數

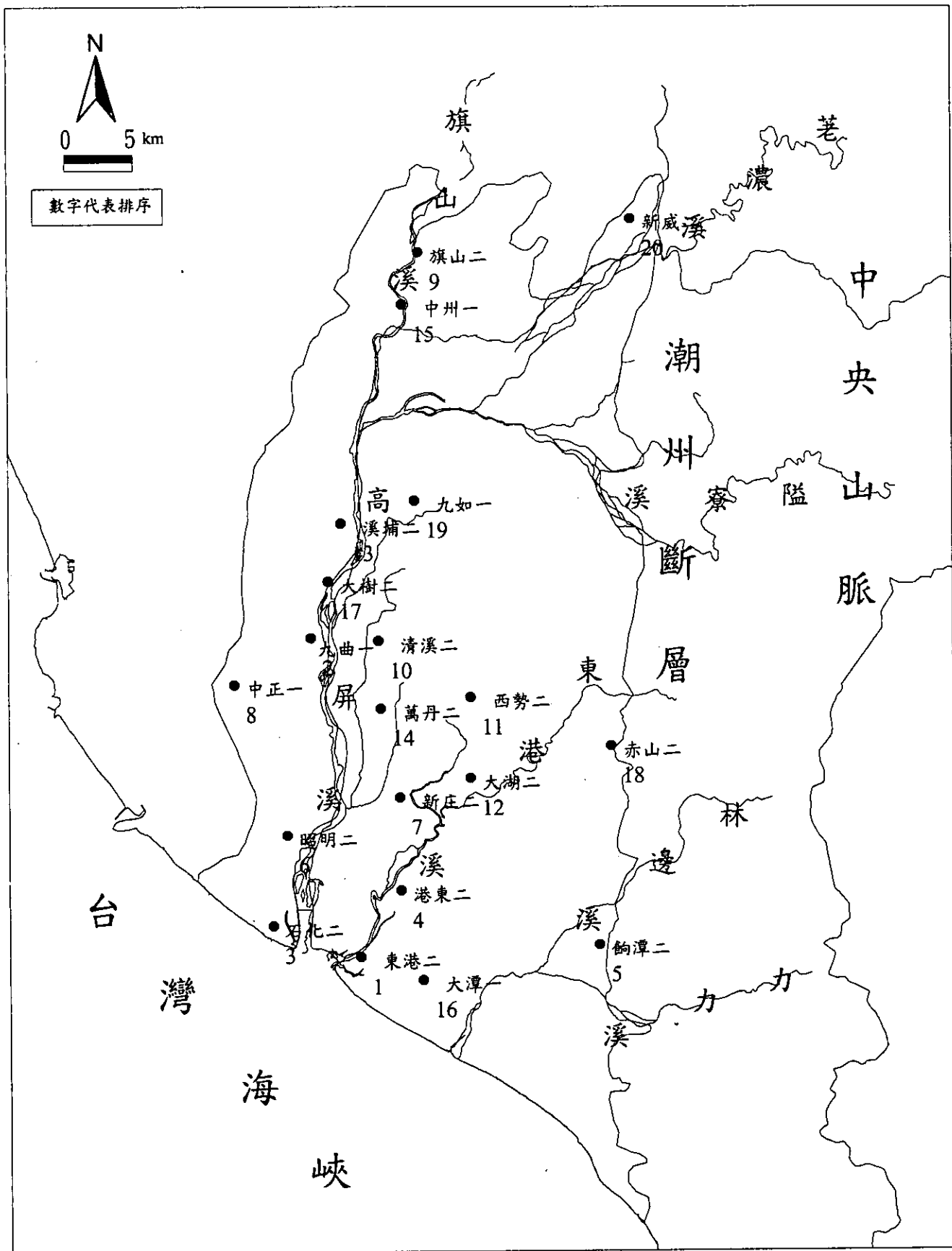


圖6.2-5 屏東平原含水層二選定之水質指標井分佈圖 (20口)

6.2.2 屏東平原含水層一水質指標井選定分析

一、含水層一觀測井排序分析

在進行屏東平原含水層一之分析過程中，由於步驟 2~3 進行變異元分析及巢式(Nest Structure)變異圖探討時，發現屏東平原含水層一不同水質項目配對無法套疊複變異元(如圖 6.2-6 所示)。故於屏東平原含水層一之分析上，即直接利用常態化後數據進行傳統因子分析。

經利用 SPSS 統計分析軟體進行分析後，屏東平原含水層一各因子特徵值與貢獻率如表 6.2-8 所示。由表中可看出，前 3 個之主要因子之總變異量為 96.1%，因此，其餘之 6 個主要因子之影響不大。另外，屏東平原含水層一各變數(不同水質項目)的各因子之負荷量如表 6.2-9 所示。

配合表 6.2-8 及表 6.2-9 之分析，屏東平原所有含水層一之各觀測井於各因子得點及排序如表 6.2-10 所示。而屏東平原含水層一所有各觀測井之位置及排序如圖 6.2-7 所示。

表 6.2-8 屏東平原含水層一各因子特徵值與貢獻率

因子	特徵值	貢獻率(%)	累計特徵值	累計貢獻率(%)
一	6.67	74.111	6.670	74.111
二	1.475	16.384	8.145	90.495
三	0.556	6.18	8.701	96.675
四	0.153	1.701	8.854	98.376
五	0.09936	1.104	8.953	99.480
六	0.0427	0.474	8.996	99.954
七	0.0033	0.03665	8.999	99.991
八	0.0008	0.0090	9.000	100.000
九	0.0000	0.0003	9.000	100.000

表 6.2-9 屏東平原含水層一各變數(不同水質項目)於各因子之負荷量

	因子一	因子二	因子三	因子四	因子五	因子六	因子七	因子八	因子九
EC	0.9560	-0.0850	-0.1540	-0.0350	0.2000	-0.1220	0.0070	0.0060	0.0000
TDS	0.9880	-0.0960	0.0220	0.1010	-0.0450	-0.0180	-0.0240	0.0020	-0.0040
Cl	0.0984	-0.1090	0.0100	0.1210	-0.0540	-0.0210	-0.0300	-0.0050	0.0030
Na	0.9560	-0.2180	0.0660	-0.0740	0.0860	0.1450	-0.0040	0.0130	0.0010
Ca	0.8700	0.3280	0.1830	-0.2970	-0.1150	-0.0410	-0.0030	0.0000	0.0000
Mg	0.9800	-0.1780	0.0110	-0.0170	0.0610	0.0490	0.0180	-0.0230	-0.0001
SO4	0.9730	-0.0740	0.0790	0.1400	-0.1390	-0.0160	0.0380	0.0080	0.0000
Fe	0.1670	0.8950	0.0386	0.1140	0.0980	0.0120	0.0010	0.0000	0.0000
Mn	0.4520	0.6730	-0.0582	0.0090	-0.0350	0.0410	0.0010	0.0000	0.0000

表 6.2-10 屏東平原含水層一各觀測井於各因子得點及排序(41 口)

井名	位置		因子一	因子二	因子三	因子四	因子五	因子六	因子七	因子八	因子九	排序分數	排序
	X(m)	Y(m)											
崎峰一	197199	2480945	4.966	-0.216	-1.571	1.469	-1.331	2.793	0.190	0.120	-0.084	3.572	1
東港一	193156	2485971	3.157	-0.652	1.896	-1.953	-0.509	-4.202	0.502	1.297	0.677	2.292	2
德興一	207000	2474613	0.863	3.781	1.403	1.135	-0.320	-1.368	-1.942	-3.194	-1.253	1.354	3
石化一	187485	2487965	1.070	-0.828	2.445	0.572	5.373	1.261	0.219	0.002	-0.310	0.884	4
土庫	198425	2524645	-0.165	2.660	-0.808	-1.086	0.710	0.567	0.029	1.952	2.830	0.256	5
新埤一	202895	2485957	-0.282	1.662	0.570	-1.375	-0.269	1.097	-0.090	1.124	0.212	0.077	6
新威一	210915	2533502	-0.125	0.573	-0.113	-1.668	-0.057	0.802	2.862	-2.017	0.197	-0.030	7
林園一	186809	2490130	-0.156	0.631	-0.927	-0.038	0.455	-0.278	-0.306	2.132	-1.759	-0.066	8
港東一	195798	2490241	-0.267	0.954	-0.471	0.044	0.273	0.010	-0.189	0.520	-0.450	-0.067	9
萬丹一	194540	2501970	-0.452	1.359	0.447	1.005	-0.219	0.012	1.699	1.012	0.188	-0.069	10
塭豐	200355	2479195	-0.045	-0.580	1.013	-0.419	-0.240	0.919	-1.764	-1.149	2.003	-0.072	11
潮寮一	190004	2496500	-0.406	0.918	1.006	-0.074	-0.659	0.471	2.719	0.621	-0.895	-0.093	12
吉洋(舊)	201510	2528640	-0.295	0.650	-0.851	1.128	0.511	-0.587	0.171	0.190	0.338	-0.143	13
鳳鳴一	182982	2490949	-0.277	0.521	-0.822	1.072	0.382	-0.523	0.749	-0.261	-0.609	-0.151	14
潮州一	202232	2492984	-0.350	0.554	0.156	0.284	-0.170	0.089	0.101	1.004	-1.727	-0.156	15
昭明一	188414	2493802	-0.413	0.526	1.040	-0.851	-0.621	1.191	-1.593	0.649	0.461	-0.172	16
餉潭一	208707	2486714	-0.145	-0.173	-0.777	-0.775	0.252	0.026	-0.832	-0.011	0.404	-0.194	17
鹽埔一	205622	2517240	-0.066	-0.491	-0.741	-1.399	0.165	-0.038	1.501	-1.660	-0.868	-0.197	18

清溪一	194408	2506330	-0.451	0.630	0.174	1.251	-0.088	-0.132	0.229	0.110	1.138	-0.200	19
枋山	210142	2470440	-0.111	-0.413	-0.725	-0.930	0.235	-0.122	0.327	-1.300	-1.174	-0.209	20
老牌一	207504	2503670	-0.100	-0.460	-0.722	-1.351	0.155	0.186	-0.736	-0.485	0.090	-0.215	21
溪埔一	191978	2513893	-0.161	-0.325	-0.570	-0.827	0.091	0.066	-0.258	-0.582	-0.106	-0.221	22
水底寮	207650	2475845	-0.188	-0.379	-0.465	-0.499	0.059	0.099	-0.862	-0.014	-1.207	-0.238	23
大礮一	210206	2481360	-0.140	-0.490	-0.753	-0.738	0.170	-0.100	-0.487	-0.167	0.520	-0.242	24
大丘一	202810	2477706	-0.184	-0.424	-0.507	-0.607	0.058	0.057	-1.125	0.438	-0.985	-0.247	25
海豐一	198476	2511130	-0.303	-0.123	-0.353	0.562	0.049	-0.330	-0.164	0.351	0.297	-0.258	26
萬隆一	206802	2490112	-0.176	-0.491	-0.767	-0.253	0.186	-0.288	-0.171	-0.410	0.184	-0.262	27
枋寮一	207476	2479160	-0.203	-0.496	-0.786	0.167	0.183	-0.429	-1.327	1.229	-1.261	-0.278	28
大樹一	191135	2510159	-0.220	-0.561	-0.554	0.326	0.012	-0.510	0.594	0.425	-0.643	-0.286	29
崁頂一	198929	2490845	-0.222	-0.606	-0.304	-0.424	-0.099	0.021	-0.033	-0.736	0.232	-0.291	30
瑪家一	208976	2511539	-0.231	-0.496	-0.784	0.480	0.223	-0.569	-0.228	0.087	0.992	-0.293	31
里港一	197514	2520447	-0.246	-0.511	-0.795	0.703	0.220	-0.636	0.310	-0.615	1.218	-0.304	32
高樹一	208068	2525407	-0.249	-0.571	-0.784	0.848	0.188	-0.770	0.741	-0.461	1.331	-0.313	33
大湖一	200368	2497500	-0.259	-0.566	-0.643	0.583	0.124	-0.520	0.005	-0.573	0.173	-0.315	34
赤山一	209521	2499542	-0.398	-0.525	1.472	-1.263	-1.098	1.339	-0.221	-0.606	0.295	-0.317	35
西勢一	200397	2502704	-0.282	-0.582	-0.753	1.000	0.213	-0.708	-0.168	-0.452	0.960	-0.335	36
美濃一	205000	2533450	-0.383	-0.664	0.475	0.158	-0.442	0.272	-1.341	0.371	-0.770	-0.365	37
旗山一	197100	2531368	-0.378	-0.793	0.280	0.762	-0.442	-0.251	0.131	0.277	-1.363	-0.386	38
永芳一	186942	2500950	-0.432	-1.023	1.726	-0.793	-1.373	0.961	0.207	0.532	-0.540	-0.405	39
新庄一	195738	2496246	-0.593	-1.084	1.229	1.731	-0.942	-0.073	0.025	-0.075	1.199	-0.523	40

新園一	192774	2491800	-0.704	-0.899	2.012	2.044	-1.368	0.196	0.523	0.326	0.066	-0.524	41
-----	--------	---------	--------	--------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	--------	----

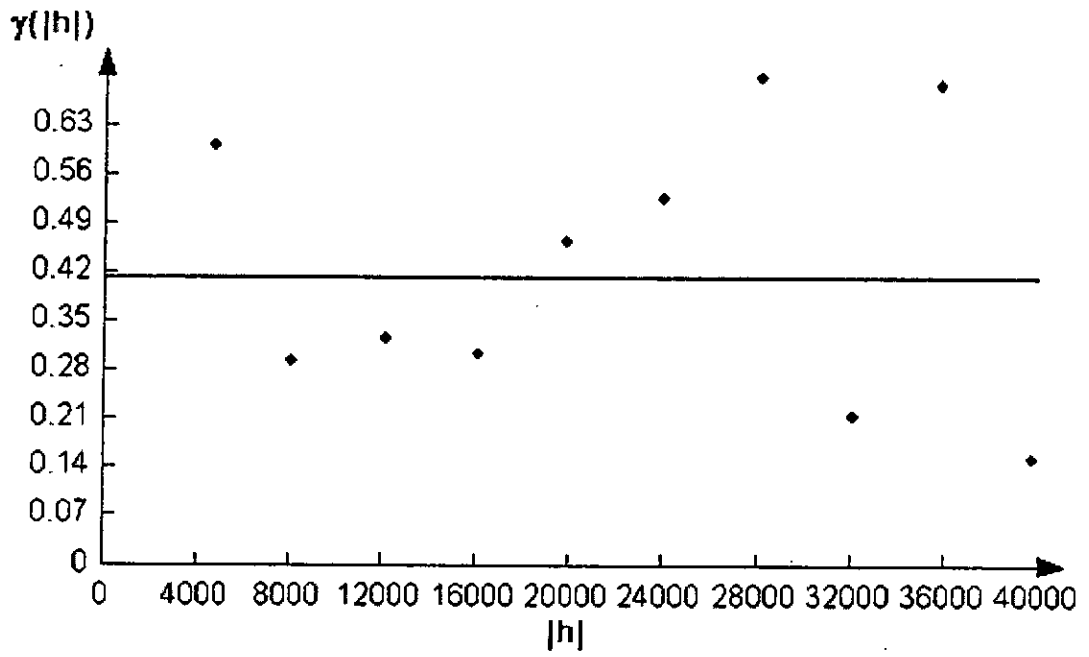


圖 6.2-6 屏東平原含水層一 Fe 與 Mn 配對複變異元圖

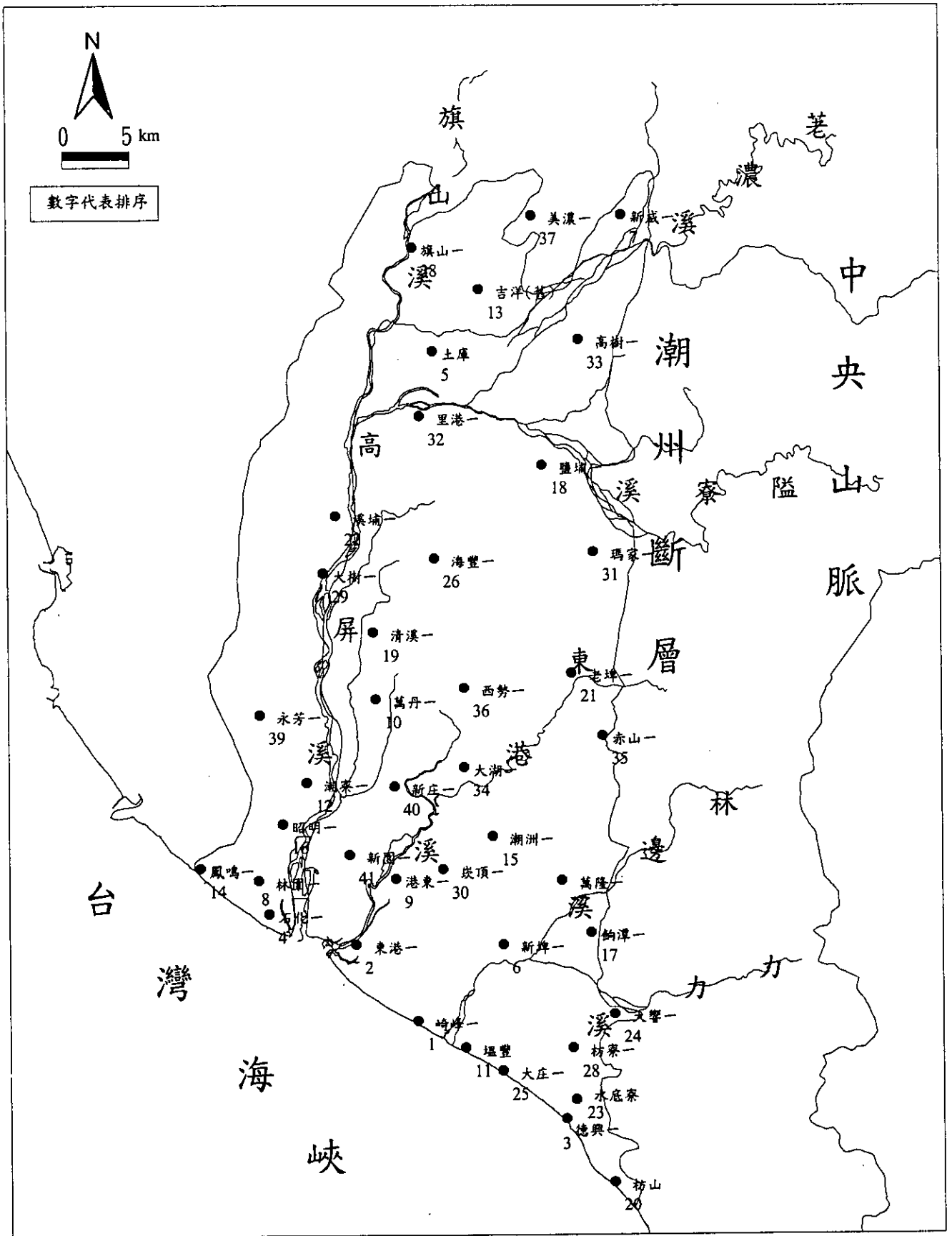


圖 6.2-7 屏東平原含水層一所有觀測井之位置及排序 (41口)

二、含水層一水質因子分析結果

含水層一的分析，與含水層二有所不同，係利用水質項目直接進行因子分析，而非利用多變量地質統計求出各水質參數的相關性之後為之。

含水層一的因子特徵值與貢獻率顯示，前三個因子的累積貢獻率即達到 96.7%。

因子一的貢獻率高達 74.1%。因子一與所有的水質參數均呈正相關，其中依序為 TDS , Mg , SO_4^{2-} , EC , Na ，這五項參數的因子負荷皆為 0.96 以上， Ca 之因子負荷則為 0.87。

各井位因子得點為正值者，依序為沿海之崎峰、東港、石化、德興，其餘井位負荷因子皆為負值。且負值之絕對值最大者為沿高屏溪之昭明、潮寮、萬丹、清溪、吉洋等。

根據水資局委託台糖公司研究結果(民國八十九年)，屬於地下水已鹽化區域的石化、東港、崎峰、塭豐的含水層一水位已低於海水面；而新園、大庄的水位也低於海水面，且新園已有鹽化的趨勢。

依此可斷定因子一為『海水入侵因子』，亦即地下水受海水影響而有鹽化現象的因子。其中崎峰、德興兩站含水層一之 TDS 與 EC 遠較含水層二為高；而東港含水層一、二、三之一、三之二之 TDS 與 EC 均非常高；石化則含水層二之 TDS 與 EC 高於含水層一者。

高屏溪沿岸因子得點負值絕對值較大的井位，則可能因高屏溪水與地下水含水層交互作用發達，因此 TDS 與 EC 均不高；且多半含水層一之觀測值高於以下含水層之觀測值。

因子二的貢獻率為 16.4%。與因子二正相關的參數為 Fe , Mn , Ca ，其餘因子負荷量均為負值。負值絕對值最大者依序為 Na , Mg , Cl , TDS , EC , SO_4^{2-} 。

因子得點正值者由大而小依序為德興、土庫、新埤、萬丹、港東、潮寮、吉洋、林園、清溪、新威、潮洲、昭明、鳳鳴，多位於高屏溪下游附近。除了少數幾個井位例如德興、港東之外，其餘各因子得點為負值的井位，其絕對值之分布雖無明顯之趨勢。愈遠離高屏溪與東港溪且愈往東側而有遞增之趨勢。推論因子二之影響因素與含水層二之因子三相似，皆與 *Fe*, *Mn* 密切相關，故因子二可歸屬於『含水層質地因子』

因子三的貢獻率為 6.18%。因子負荷為正值的水質參數依序為：*Ca*, *SO₄²⁻*, *Na*, *Fe*, *TDS*, *Mg*, *Cl*，而 *EC* 與 *Mn* 之因子負荷為負值。

因子得點由高至低依序為石化、新園、東港、永芳、赤山、德興、新庄、昭明、塭豐、潮寮、新埤、美濃、萬丹、旗山、清溪、潮洲，除赤山外均集中於屏東平原東南側，尤其是在鄰近高屏溪(旗山溪-隘寮溪會流口以下)、東港溪處。此狀況與含水層二之因子四頗為類似。不僅在於水質參數的類似，也在於因子得點為正值之井位空間分布；唯一不同之處在於含水層二以高屏溪和林邊溪為兩條主軸，含水層一以高屏溪和東港溪為兩條主軸。推斷因子三也屬於『含水層質地因子』，與含水層土壤中之石灰質成分相關，而此石灰質成分之來源可能是風化土壤沖積所致或者是海中貝類生物的殘骸。

由以上的因此分析，可概略得知影響屏東平原地下水水質變化的主要因子。若日後有更多的長期觀測資料，則可以更明確地建立屏東平原地下水水質的變化趨勢。

三、含水層一水質指標井選定

在決定選定水質指標井之井數方面，將參照含水層一各井之排序分數繪製於圖 6.2-8 上，由圖 6.2-8 可看出於約在第 16 口井時，應是較合理之含水層一水質指標井井數，最後，於含水層一之水質指標井分佈如圖 6.2-9 所示。

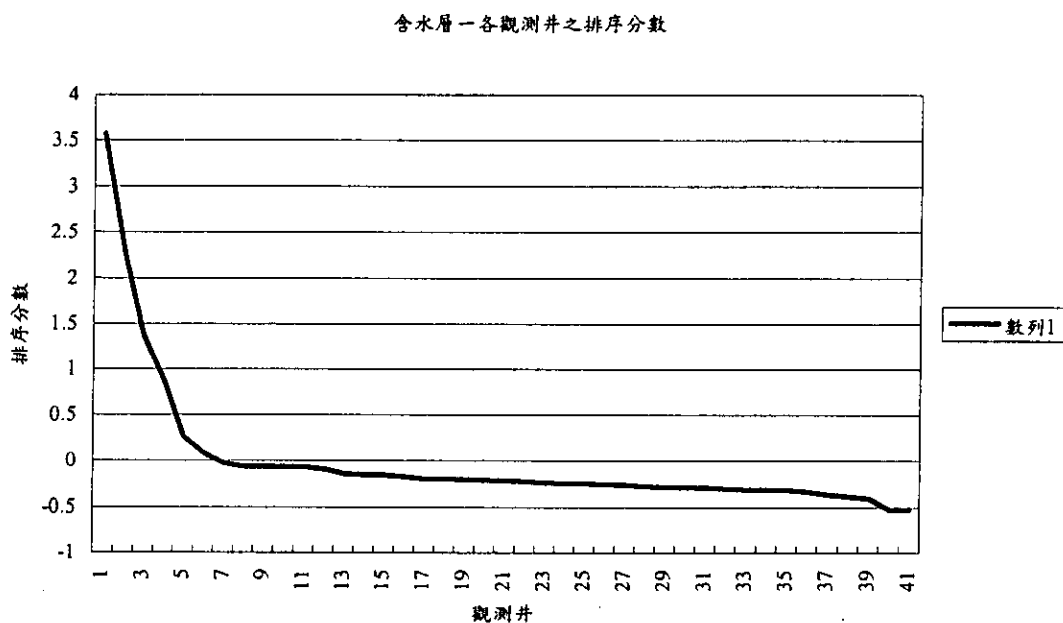


圖 6.2-8 屏東平原含水層一所有觀測井之排序分數

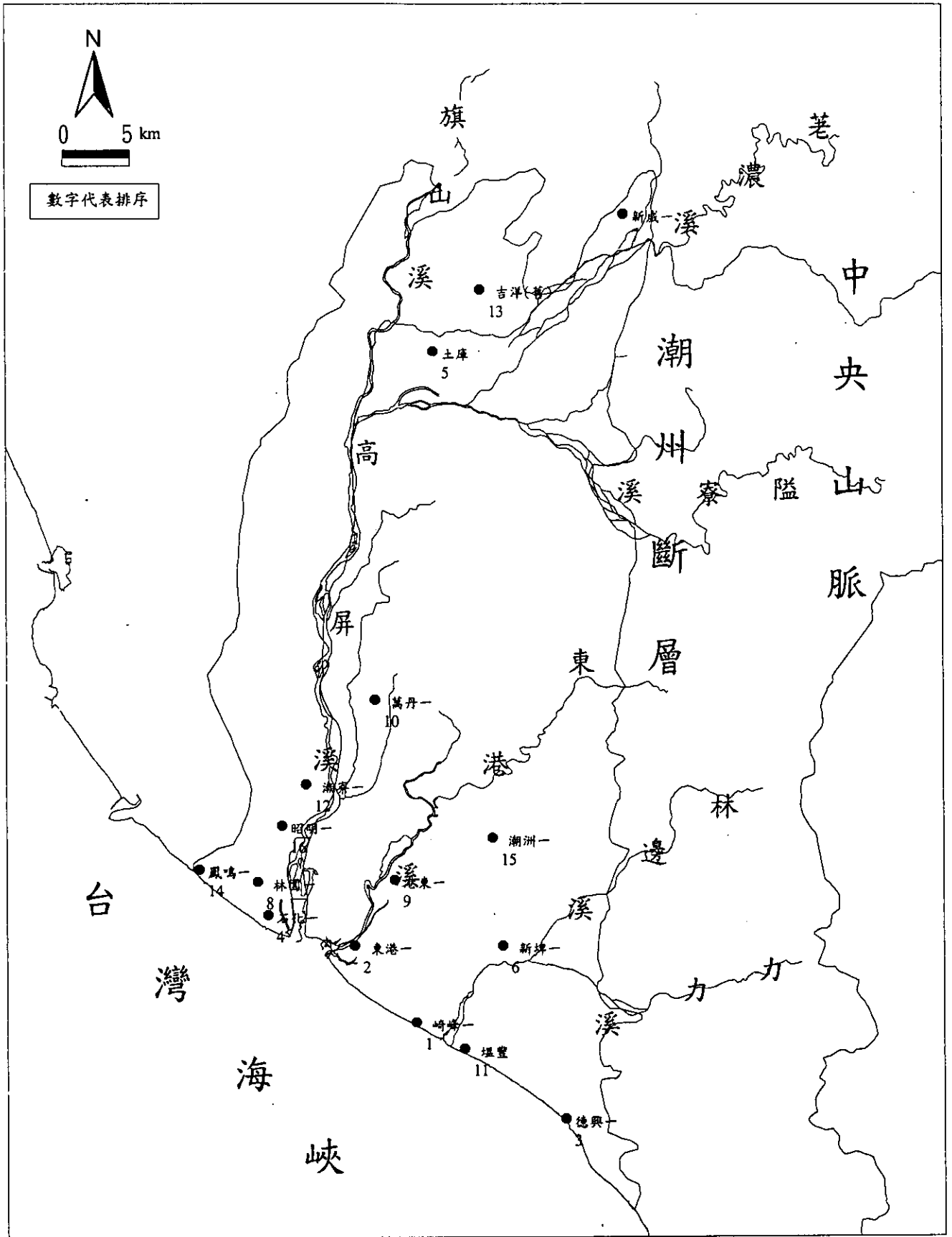


圖6.2-9 屏東平原含水層一選定之水質指標井分佈圖 (16口)

6.3 屏東平原水質指標井方案評估驗證

6.3.1 屏東平原水質指標井方案評估

本計畫選定屏東平原作為實際案例，經由上述之屏東平原含水層一及含水層二之水質指標井選定，再配合實際操作可行性等執行層面相關考量，提出較可行之方案。以下即就水質指標井之井位、分析項目及頻率來評估。

一、水質指標井之井位

對於水質指標井選定評估時，雖為各含水層分別進行分析，惟最後應以各層之水質指標井選定結果，在考量水文地質架構情況下，進行三度空間之水質指標井位置檢討及整體考量。

就屏東平原而言，其屏東平原地區地下概念分層如圖 6.1-3 所示，應就含水層一、含水層二、含水層三之一及含水層三之二之進行各層分析所得之水質指標井網進行空間上之套疊檢討，以提出屏東平原之水質指標井網方案。而由於本計畫之研究範例，僅就含水層一與含水層二之水質指標井網進行空間上之分析。圖 6.3-1 即為套疊含水層一與含水層二分別所選定之水質指標井位。含水層一與含水層二分別所選定之水質指標井有 6 站共站，亦即在只考量含水層一及含水層二之情況下，於含水層一及水層二之水質指標井共為 30 站，含水層一水質指標井為 16 口，含水層二口水質指標井為 20 口。

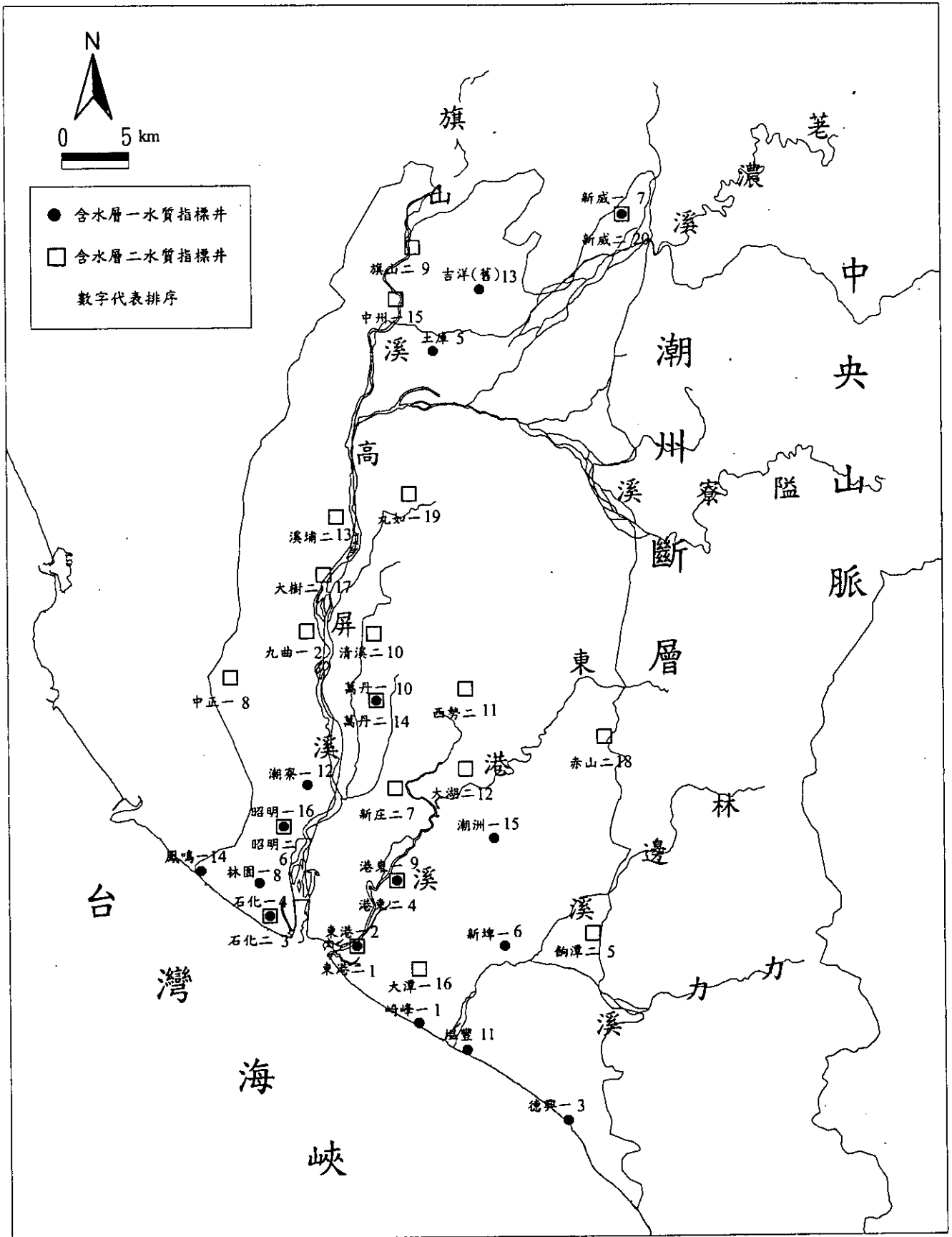


圖 6.3-1 屏東平原選定之含水層一 (16口) 與含水層二 (20口) 水質指標井位置圖

二、水質指標井之分析項目及頻率

在水質指標井水質監測項目方面，應以延續目前監測項目為原則，以便日後持續對屏東平原的地下水水質進行長期的分析。水質監測建議分析項目如表 6.3-1 所示。本計畫建議之 33 項水質檢測項目係依據歷年來貴署監測之項目為準，以期未來所蒐集之地下水質資料具有延續性，可以進行較完整的分析。

表 6.3-1 水質指標井建議水質檢測項目

水質檢測項目
溫度、導電度、總溶解固體、總硬度、pH、BOD、COD、大腸菌類數、氧化還原電位(ORP, Eh)、硫化物、亞硝酸鹽氮、硝酸鹽氮、氨氮、氯鹽、鈣、鎂、鐵、錳、鎘、鉻、銅、鋅、汞、砷、硫酸鹽、鈉、鉀、總鹼度、TOC、TOX、鉛、鎳、酚

另外在水質指標井水質監測項目之頻率，建議以每年為一次為原則。惟若只在所選定之水質指標井進行監測，將會缺乏所有觀測井在同一時刻之水質資料，而無法提供作為後續水質指標井網檢討之足夠資訊。因此，建議於每 3~5 年可再對每口觀測井皆進行目前水質項目採樣分析，以作為水質指標井網檢討之參考資訊。

6.3.2 屏東平原水質指標井方案模擬驗證

為驗證所選定水質指標井於時間上的統計代表性，本計畫以含水層二之水質指標井網為例，選定以導電度為驗證之水質項目，而於年度資料之選擇上，如 6.1 節所介紹屏東平原歷年 4 次之水質檢驗中，

以 89 年度及 90 年度之導電度資料為最完整，而在 6.2 節進行水質指標井之選定分析所利用之導電度資料乃是 90 年度之資料。因此下列之驗證分析即以 89 年度之導電度資料進行模擬驗證。

以下將區分為 89 年度之導電度資料空間上之推估驗證及統計上之驗證：

一、空間上之推估驗證

由於經水質指標井之選定分析，於含水層二之 34 口井中，選定 20 口作為水質指標井。圖 6.3-2 為利用 89 年度含水層二 34 口之導電度資料所內插至各格網點(1 公里 x1 公里格網)之等值圖；而圖 6.3-3 為利用 89 年度含水層二 20 口水質指標井之導電度資料所內插各格網點(1 公里 x1 公里)之等值圖；圖 6.3-4 為分別利用 34 口井及 20 口井資料所推估各格網點值之差值絕對值等值圖，平均上各格網點之導電度相差 224 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，而由圖 6.3-4 可看出相差較大之值出現在崎峰二(排序 22)與大響二(排序 24)之間，而其原因仍是在此範圍中並無觀測井被選定為水質指井，且此範圍亦位於屏東平原之邊界上，在沒有邊界資料控制點之條件下，造成差值會較大。

另將排序 21~34 口(即非水質指標井)之 89 年度導電度監值與利用 20 口水質指標井資料之推估值誤差關係繪於圖 6.3-5，由圖可看出此 14 口井之推估誤差只有三口大於 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，其分別為崎峰二、大響二及萬巒一等三口井，而其中崎峰二、大響二之二口井即位於圖 6.3-4 差值較大之區域。

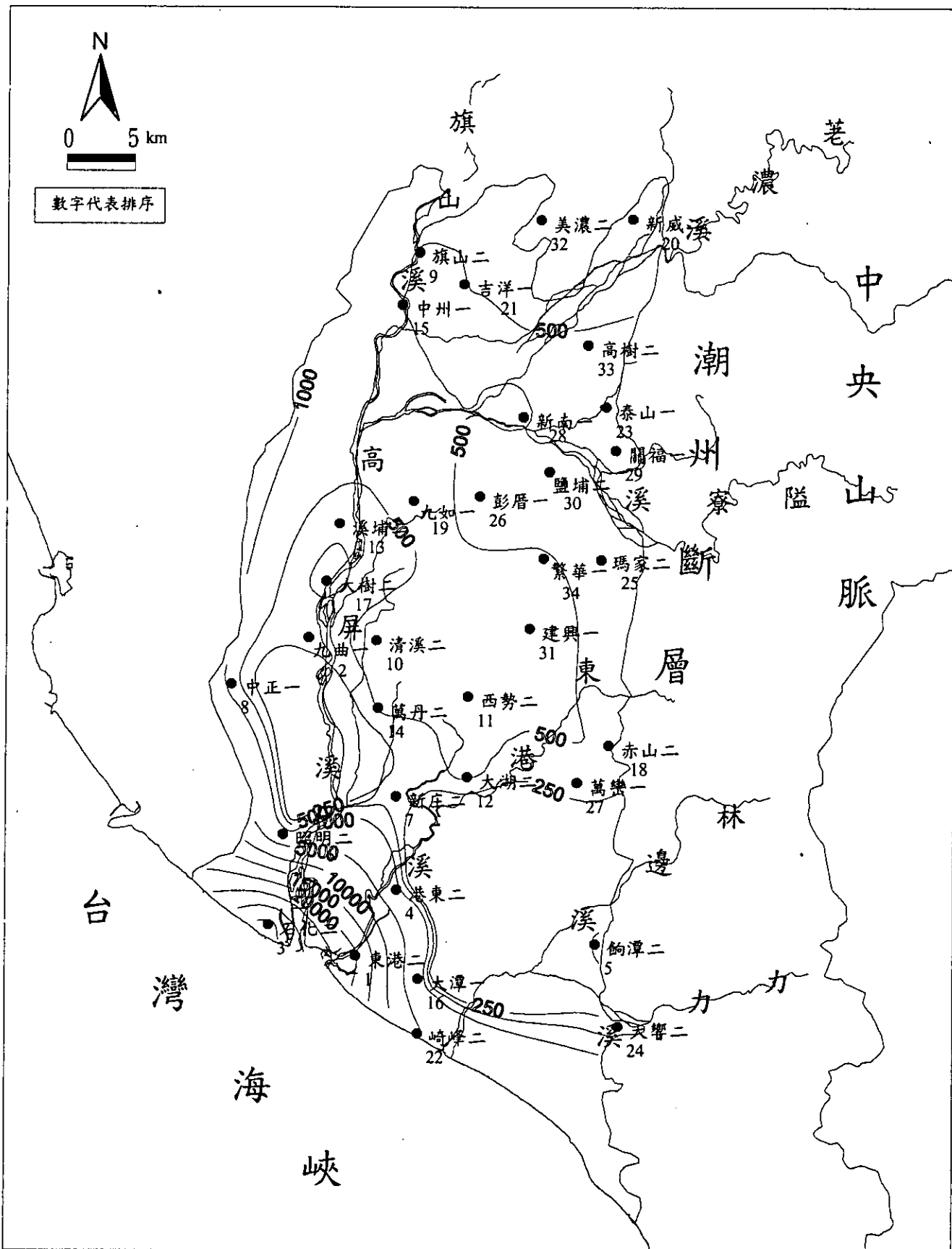


圖6.3-2 含水層二89年度34口水質指標井之導電度資料等值圖($\mu\text{S}/\text{cm}$)

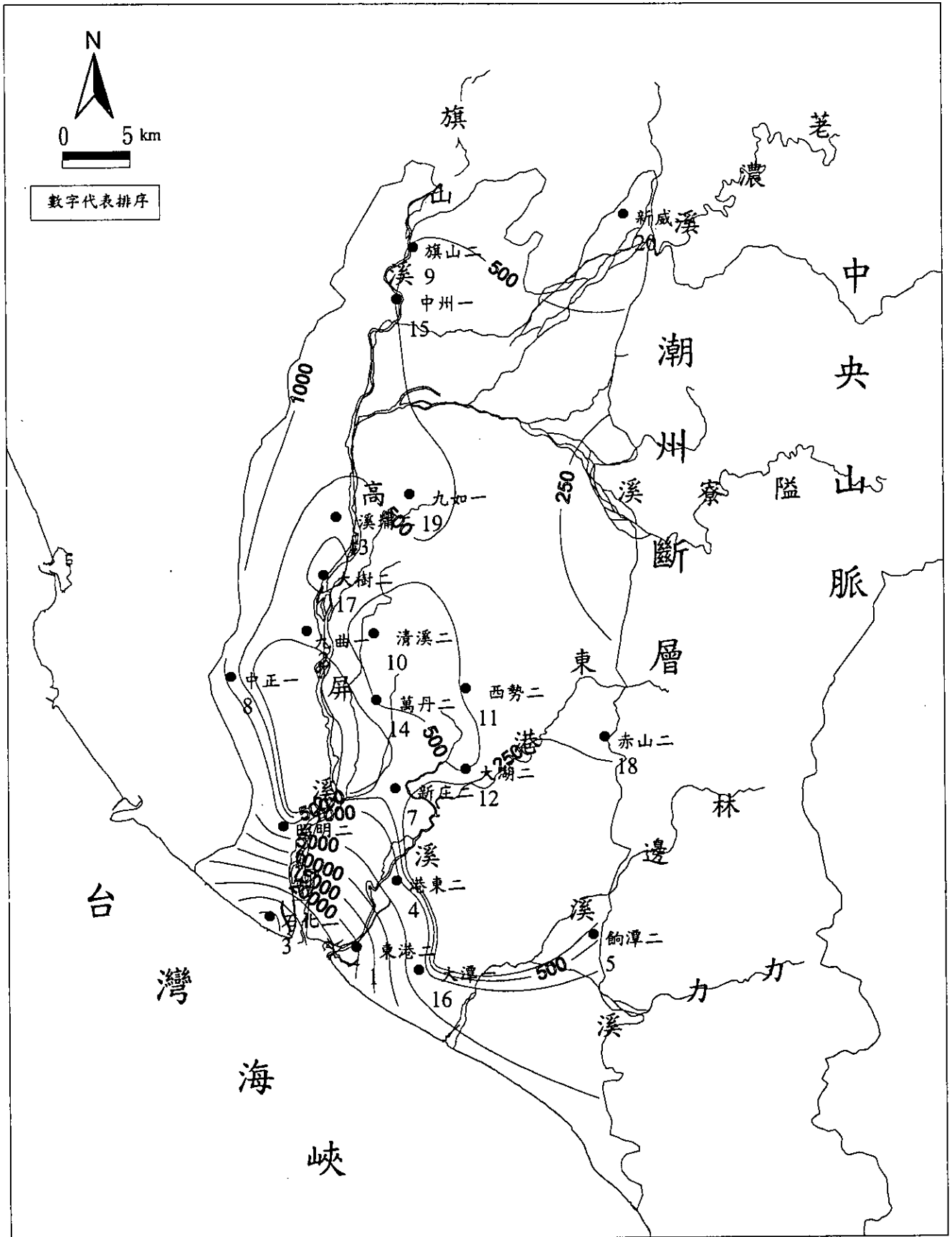


圖6.3-3 含水層二89年度20口水質指標井之導電度資料等值圖($\mu \cdot S/cm$)

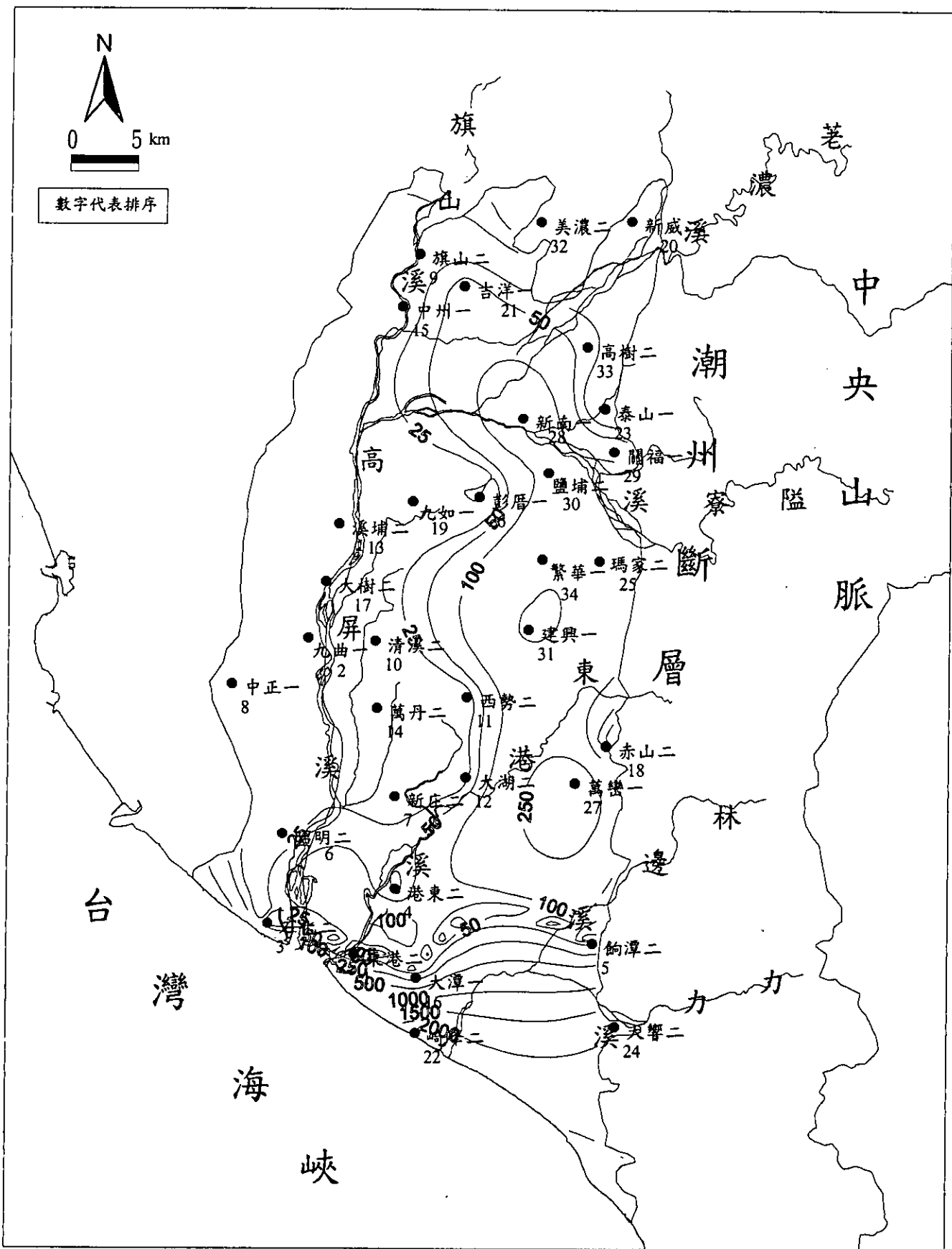


圖 6.3-4 分別利用 34 口井及 20 口井資料所推估各格網點值之差值絕對值等值圖 ($\mu \cdot S/cm$)

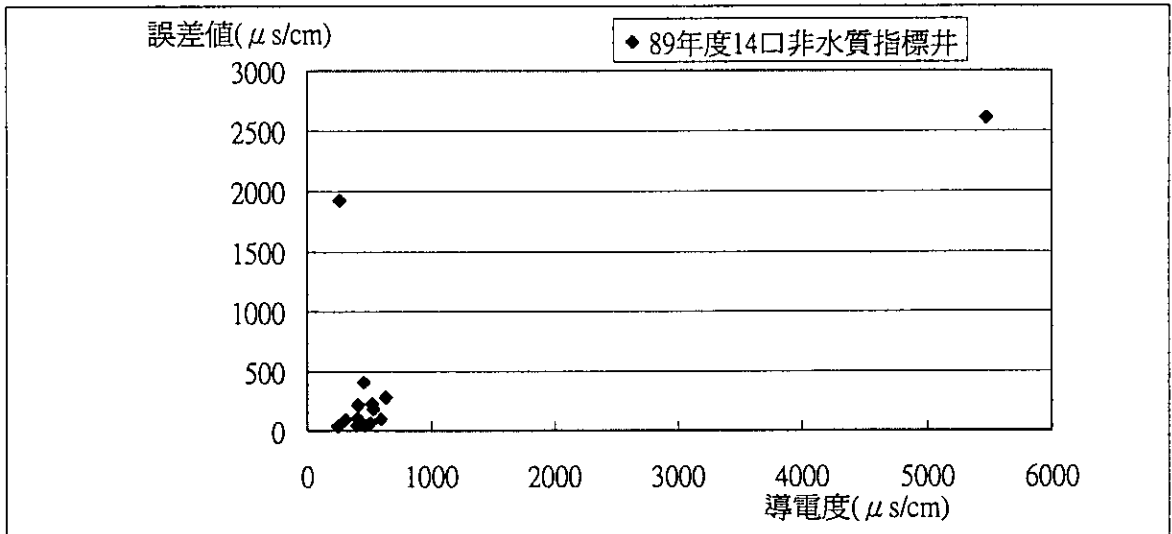


圖 6.3-5 89 年度排序 21~34(非水質指標井)之導電度監測值與推估誤差關係

二、統計上之推估驗證

本計畫參照第四章第 4-16 頁所收集「Bangkok 水位觀測站網評估」案例之 CV 值(Coefficient of variation) 來衡量觀測站網之不確定性之精神，並定義本計畫研究案例之 CV 值如下：

$$CV = \text{水質標準偏差} / \text{水質平均值}$$

即運用不同井數之水質標準偏差及水質平均值來計算 CV 值，以含水層二之導電度為例，圖 6.3-6 為 89 年度及 90 年度之 CV 值與被選定為水質指標井井數之關係圖；圖 6.3-7 則為 CV 值之誤差百分比(定義為 $(CV_0 - CV) / CV_0$ ， CV_0 為 34 口之 CV 值)與選定為水質指標井井數之關係圖，由圖 6.3-6 及圖 6.3-7 可看出以選定水質指標井排序為次序之 90 年度與 89 年度之 CV 值與其誤差百分比趨勢相似。

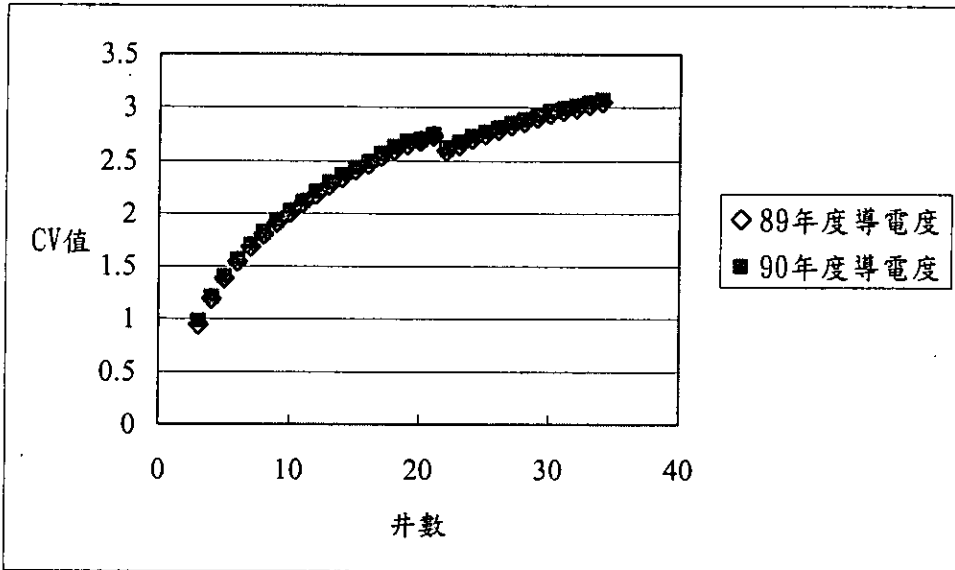


圖 6.3-6 含水層二 CV 值與井數之關係

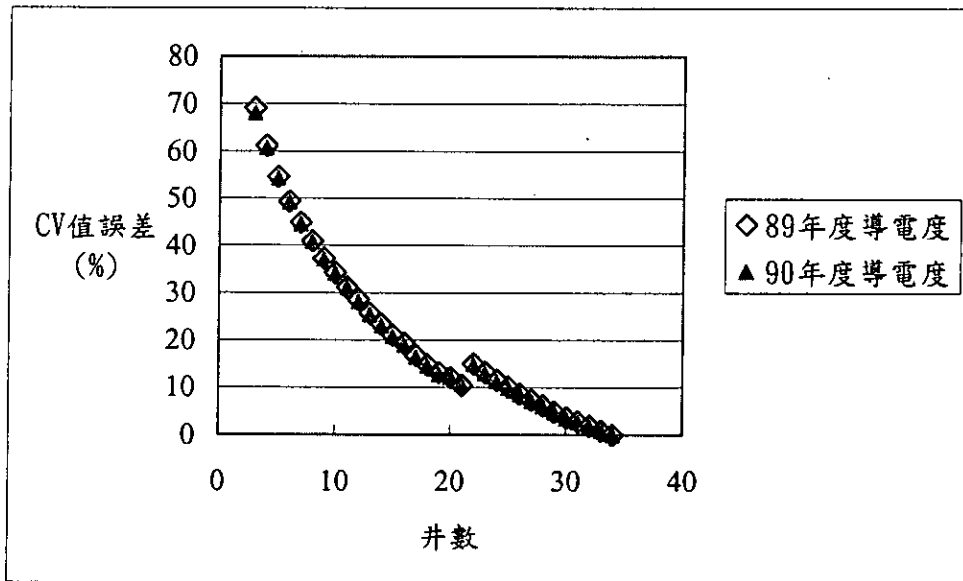


圖 6.3-7 含水層二 CV 值誤差與井數之關係

三、多變量地質統計分析排序與濃度高低排序之比較

為探討多變量地質統計分析排序與濃度高低排序之差異，將含水層二之 EC、TDS、Cl⁻、Na、Ca、Mg、SO₄²⁻、Fe 及 Mn 等 9 項常態化後之水質濃度資料(如表 6.2-1 所示)累加，以進行濃度高低之排序，並再與本計畫運用多變量地質統計所選定之指標井排序比較其差異，其結果如表 6.3-2 所示。由表 6.3-2 所示，以多變量地質統計分析所選定之含水層二之 16 口指標井之中，有 10 口指標井之濃度高低之排序在前 16 名；亦即含水層二分別以多變量地質統計分析排序與濃度高低之排序，雖然在前 16 口中有 10 口是相同，但乃有 6 口井之差異。由於各水質項目濃度之加總係呈現水質項目濃度之和，並非反映水質項目之變異性，因此所得出的排序與利用地質統計方法所得之排序不同。

由於指標井之目的為運用較少且較具代表性之井來推估整體區域水質狀況，因此採用本計畫選用之地質統計方法來選定較能夠反映整體水質狀況的指標井應是較合理的方式。若是以污染監測為選定指標井的原則，則各水質項目濃度之高低應是重要之參考資訊。

表 6.3-2 多變量地質統計分析排序與濃度高低排序之比較

井名	位置		分層	多變量地質統計分析		濃度高低分析	
	X(m)	Y(m)		排序分數	排序	濃度總合(常態化)	排序
東港二	193156	2485971	2	2.130	1	20.978	2
九曲一	190015	2506507	2	1.160	2	0.577	4
石化二	187485	2487965	2	0.932	3	37.278	1
港東二	195798	2490241	2	0.569	4	0.286	6
餉潭二	208707	2486714	2	0.462	5	-1.626	13
昭明二	188414	2493802	2	0.352	6	-1.758	15
新庄二	195738	2496246	2	0.351	7	-1.692	14
中正一	185015	2503504	2	0.334	8	-1.487	12
旗山二	197100	2531368	2	0.258	9	-2.395	26
清溪二	194408	2506330	2	0.135	10	0.625	3
西勢二	200397	2502704	2	-0.052	11	-2.362	24
大湖二	200368	2497500	2	-0.077	12	-2.532	28
溪埔二	191978	2513893	2	-0.106	13	-3.210	31
萬丹二	194540	2501970	2	-0.113	14	-1.386	10
中州一	195993	2528009	2	-0.119	15	-2.457	27
大潭一	197221	2484469	2	-0.122	16	-4.456	34
大樹二	191135	2510159	2	-0.144	17	-2.576	29
赤山二	209521	2499542	2	-0.190	18	0.113	7
九如一	196776	2515370	2	-0.278	19	-3.692	33
新威二	210915	2533502	2	-0.315	20	-3.196	30
吉洋一	200032	2529333	2	-0.327	21	-1.962	18
崎峰二	197199	2480945	2	-0.333	22	0.458	5
泰山一	209266	2521392	2	-0.347	23	-0.605	8
大響二	210206	2481360	2	-0.355	24	-3.224	32
瑪家二	208976	2511539	2	-0.360	25	-2.152	21
彭厝一	201104	2515658	2	-0.368	26	-1.983	19
萬巒一	207502	2497136	2	-0.371	27	-1.447	11
新南一	203915	2520763	2	-0.376	28	-2.271	23
關福一	209883	2518620	2	-0.385	29	-2.394	25
鹽埔二	205622	2517240	2	-0.385	30	-2.139	20
建興一	204395	2507086	2	-0.388	31	-1.215	9
美濃二	205000	2533450	2	-0.389	32	-2.264	22
高樹二	208068	2525407	2	-0.392	33	-1.954	17
繁華一	205264	2511656	2	-0.393	34	-1.880	16

第七章 結論與建議

7.1 結論

- 1.經由單變數地質統計配合降低變異數法、多變量地質統計及卡門濾波理論等三種方法應用於站網設計之優點及限制進行評估。為能同時考量較多水質項目，以進行水質指標井分析應是較佳之選擇。故於考量本計畫之目的，多變量地質統計方法應是較適用。多變量地質統計方法理論方法明確，所需之工具大致已完備，因此，多變量地質統計方法應可應用於實際案例。
- 2.本計畫選定以多變量地質統計方法來作為指標井選定方法，並以屏東平原作為實際應用之探討。屏東平原含水層二由 34 口中選定 20 口作為之水質指標井，含水層一由 41 口中選定 16 口作為之水質指標井。含水層一與含水層二分別所選定之水質指標井有 6 站共站，亦即在只考量含水層一及含水層二之情況下，於含水層一及水層二之水質指標井共為 30 站。
- 3.在水質指標井水質監測項目方面，應以延續目前監測項目為原則，以便日後持續對屏東平原的地下水水質進行長期的分析。另外在水質指標井水質監測項目之頻率，建議以每年為一次為原則，若貴署於有寬裕之經費，則建議可提高採樣頻率至每年採樣兩次。
- 4.含水層二 28.5 公里空間尺度之各因子特徵值與貢獻率，因子一之貢獻率即達到 58.3%，因子一、二、三、四、五合計貢獻率達 93% 以上。因子一可視為『海水入侵因子』，因子二可視為『含水層

質地因子』因子三也屬於『含水層質地因子』，因子四也屬於『含水層質地因子』，與含水層土壤中之石灰質成分相關，而此石灰質成分之來源可能是風化土壤沖積所致或者是海中貝類生物的殘骸，因子五也屬於『含水層質地因子』。五個主要因子中，因子二、三、四、五都與鐵離子有密切關係，可能不單純和地質因素相關。根據王瑞君(民國八十七年)的研究，屏東平原地下水因子分析中第四個因子主要為鋅的影響，推斷是因為井管材料水解的影響，鋅離子因水解繼而沉澱於井管四周造成。本研究所得到的鐵離子濃度也可能是因為井管材料的氧化還原作用造成。若欲將井管腐蝕對水質監測結果可能造成的影響分離以確認含水層中鐵、錳、鋅等金屬離子的實際濃度與變化趨勢，則有待未來更深入的研究。

5. 含水層一的因子特徵值與貢獻率顯示，前三個因子的累積貢獻率即達到 96.7%，因子一的貢獻率高達 74.1%。因子一與所有的水質參數均呈正相關，其中依序為 TDS, Mg, SO₄²⁻, EC, Na，這五項參數的因子負荷皆為 0.96 以上，Ca 之因子負荷則為 0.87。

7.2 建議

1. 水質指標井之設置係為了節省水質監測的經費，固然指標井可以提供頗為精確的水質參數推估，但是為求區域水質資料的完整與未來針對指標井做進一步的調整，本研究建議對於被選定為水質指標井以外的水位觀測井，以每 3 - 5 年的時間間隔，仍進行一次的水質採樣；並進行地質統計分析，以作為指標井數量與位置調整之依據。

2. 水質指標井水質資料應定期與環保署淺層監測井之水質資料以及區域內土地利用狀況進行比對分析，以掌握水質變化之趨勢與相關原因。當土地利用狀況或地下水使用型態有重大改變時，指標井的佈設應即時加以檢討。

3. 觀測井之腐蝕狀況應詳加調查，對於損壞與腐蝕嚴重之觀測井應予以處理，以確定採集之水樣可以代表實際之地下水水質。

參考文獻

1. 台灣地區地下水觀測網第一期計畫屏東平原水文地質調查研究總報告，經濟部中央地質調查所，2002。
2. 吳明隆，「SPSS 統計應用實務」，松崗電腦圖書資料股份有限公司，2002。
3. 農業工程研究中心，「水井調查定位與井體攝影分析(1/4)」，經濟部水資源局，2001。
4. 台灣地區地下水觀測網水質監測調查分析(4/5)成果報告，經濟部水利署，2002。
5. 台灣地區地下水觀測網水質監測調查分析(3/5)成果報告，經濟部水資源局，2001。
6. 嘉南平原區域性地下水觀測站井佈置檢討，經濟部水資源局，2001。
7. 台灣地區地下水觀測網水質監測調查分析(2/5)成果報告，經濟部水資源局，2000。
8. 台灣地區地下水觀測網水質調查分析及指標井選定研究成果報告，經濟部水資源局，1999。
9. 台灣地區地下水觀測網整體計畫第一期(81~87 年度)成果彙編，經濟部水資源局，1999。
10. 王瑞君，“以多變量統計區分屏東平原地下水含水層水質特性與評估井體之維護探討”，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文，1998。
11. 「區域性地下水觀測站網檢討(III)-屏東平原觀測站井佈置及觀測頻率檢討」，經濟部水資源局，1997。
12. 行政院環境保護署環境檢驗所，水質檢測方法，1997。
13. 經濟部水利司，區域性地下水觀測站網檢討(II)-濁水溪沖積扇觀測站井佈置及觀測頻率檢討，1996。
14. 張良正、龔誠山等，「區域性地下水觀測站網檢討(I)-濁水溪沖積扇觀測站井佈置檢討」，經濟部水利司，1995。
15. 黃俊英，「多變量分析」，中國經濟企業研究所，1991。
16. American Public Health Association (1995) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Edition.

17. Aziz, J. J., Newell, C. J., Rifai, H. S., Ling, M., & Gonzales, J. R. (2000) Monitoring and Remediation Optimization System (MAROS).
18. BUREAU OF WATER South Carolina Department of Health and Environmental Control, 2000, South Carolina Ambient Ground Water Quality Monitoring Network 2000 Annual Report.
19. Cameron, K. & Hunter, P. (2000). "Optimization of LTM Networks: Statistical Approaches to Spatial and Temporal Redundancy." Proceedings from the American Institute of Chemical Engineers, 2000 Spring National Meeting, Remedial Process Optimization Topical Conference, Atlanta, GA.
20. Christopher K. Wikle and J. Andrew Royle, "Space-Time Dynamic Design of Environmental Monitoring Networks", *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, Vol.4, No.4, p.489-507, 1999.
21. Dunn, A. J., and G. R. Mehuys, "Relationship between gravel content of soils and saturated hydraulic conductivity in laboratory tests." *Soil science of America, Special Issue No.13*, pp.55-63, 1984.
22. DEUTSCH CV, JOURNAL AG (1992) Geostatistical software library and user's guide, Oxford University Press, New York.
23. EINAX JW, SOLDT U (1998) Multivariate geostatistical analysis of soil contaminations, *Fresenius Journal Anal. Chem.* 361: 10-14.
24. Fethi Ben-Jemaa, Miguel A. Marino, and Hugo A. Loaiciga, Members, "Multivariate Geostatistical Design of Ground-Water Monitoring Networks", *ASCE*, Vol.120, No.4, 1994.
25. Frans C. Van Geer, "Using Kalman Filtering to Improve and Quantify the Uncertainty of Numerical Groundwater Simulations -- Application to Monitoring Network Design", *Water Resources Research*, Vol.27 No.8, p.1995-2006., 1991.
26. GOOVAERTS P (1992) Factorial kriging analysis: a useful tool for exploring the structure of multivariate spatial soil information. *Journal of soil science* 43: 597-619.
27. GOOVAERTS P, WEBSTER R (1994) Scale-dependent correlation between topsoil copper and cobalt concentrations in Scotland. *European Journal of Soil Science*, 45(1): 79-95.
28. GOOVAERTS P (1994) Study of spatial relationships between two sets of variables using multivariate geostatistics. *Geoderma*, 62: 93-107.

29. GOOVAERTS P (1997) Geostatistics for natural resource evaluation. Oxford University Press, Oxford.
30. Hydrologic Support and Assessment Section Water Quality Division Arizona Department of Environmental Quality, AMBIENT GROUNDWATER QUALITY OF THE DOUGLAS BASIN: A 1995-96 BASELINE STUDY
31. I.T. Jolliffe (1986) Principal component analysis, Springer-Verlag, New York.
32. Jedlitschka, J., 2002, GROUNDWATER MONITORING IN GERMANY, (Federal Ministry for the Environment), Obmann der LAWA-Arbeitsgruppe "Grundwasser und Wasserversorgung"
<http://www.oieau.fr/ciedd/contributions/at1/atelier1 fra.htm>
33. Lin YP (2002) Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals. Environmental Geology, 42 , 1-10.
34. Lin, YP, TK Chang, CW Shi and CH Tsen (2002) Factorial and indicator kriging with geographic information system to delineate spatial variations and pollution sources of soil heavy metals, Environmental Geology. (Accepted)
35. Marija J. Norusis (1993) SPSS for Windows : Professional Statistics, SPSS Inc.
36. Michael G. McDonald and Arlen W. Harbaugh, "A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model", U.S. Government printing office , 1988.
37. Pannatier, Yvan , Variowin : software for spatial data analysis in 2D / Yvan Pannatier, New York : Springer, c1996.
38. Pebesma, E, 1996, Mapping Groundwater Quality in the Netherlands, University of Utrecht
39. ROUHANI S, WACKERNAGEL H, (1990) Multivariate geostatistical approach to space-time data analysis. Water Resources Research, 26, 585-591.
40. Statistical Design of Water-Level Monitoring Networks, U.S. Geological Survey Circular 1217 <http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1217/html/boxc>.
41. Subhrendu Gangopadhyay, Ashim Das Gupta, and M.h. Nachabe, "Evaluation of Ground Water Monitoring Network by Principal Component Analysis", GROUND WATER, Vol.39, No.2, p.181-191, 2001.
42. USGS, 1995, GROUND-WATER DATA-COLLECTION PROTOCOLS AND PROCEDURES FOR THE NATIONAL WATER-QUALITY ASSESSMENT PROGRAM: SELECTION, INSTALLATION, AND DOCUMENTATION OF

WELLS, AND COLLECTION OF RELATED DATA, U.S. Geological Survey, Open-File Report 95-398

43. USGS, 1995, GUIDELINES FOR INDEX WELL SELECTION WITHIN A CBR FUNDED NETWORK', http://oregon.usgs.gov/projs_dir/or002cbr/
44. WACKERNAGEL H (1994) Cokriging versus kriging in regionalized multivariate data analysis. *Geoderma*, 62, 83-92.
45. WACKERNAGEL H (1995) *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*, Berlin, Germany.
46. Zhou, Yangxiao, "KALMOD, A Stochastic-Deterministic Model for Simulating Groundwater Flow with Kalman filtering, Part A, Methodology", International Institute for Environmental and Hydraulic Engineering Delft, The Netherlands, July, 1991.
47. Zhou, Yangxiao, "KALMOD, A Stochastic-Deterministic Model for Simulating Groundwater Flow with Kalman filtering, Part B, User's Manual", International Institute for Environmental and Hydraulic Engineering Delft, The Netherlands, July, 1991.

附錄一、台灣地區地下水觀測網水質指標井之選定方法評估期中審查
意見處理情形

期中審查意見	處理情形
中央大學應用地質學系陳教授家洵：	
<p>一、第四章內容相當豐富，國內外案例蒐集亦相當完整。但缺乏整體性的分析，整章的內容較傾向「介紹」。建議加入第 4.3 節，分析與結論，明確指出這些方法的優、缺點，對台灣地下水站網的可行性...等。換言之，若能有“交叉”對比各方法的優、缺點，則本章的貢獻將更豐碩、具體。</p>	<p>一、報告第四章之相關案例，已依委員建議，依各案例之分析目的重新排列。並加入第 4.3 節來比較各案例之分析方法優點與限制。</p>
<p>二、圖 4.2.1-1 地下水質監測架構圖及圖 4.2.1-2 定期檢測井選定流程的監測頻率及檢驗項目...等，尚需加強解釋及理由。如 4-73 頁：第一級監測，每年一次四個檢測項目的代表性。</p>	<p>二、由於此部份章節乃節錄既有之計畫成果，於期末報告中，將再加強重點之說明。關於圖 4.2.1-1 及圖 4.2.1-2 之相關說明已補充於 2-40 頁及 2-44 頁至 2-46 頁及 2-56 頁至 2-62 頁。而於期中報告 4-73 頁之規劃每年一次四個檢測項目中，主要須進行導電度之量測，而其它項目乃是考量儀器可同時一併量測得知。</p>
<p>三、期末報告宜注意撰寫的組織性、層次感、目的及格式。</p>	<p>三、已依委員建議，已對期末報告加強內容之編排。</p>
<p>四、表號、公式號請縮減至一般公認形式。請列出每一篇論文或參考文獻，請勿以「重要」參考文獻來一筆帶過。</p>	<p>四、已依委員建議修訂。於參考文獻中已補列各篇文獻。</p>
成功大學資工系李教授振誥：	
<p>一、本計劃到目前為期中報告，其內容與工作項目合乎進度，目前僅列綱要與原則之方案。希望期末報告能有實際案例成果。</p>	<p>一、期末報告中，已以屏東平原為實際分析案例，並提出分析成果說明。</p>

二、請將 4-57 頁中 Drastic 之工作評分項目內容與標準列出。	二、4-57 頁中 DRASTIC 之評分項目內容與標準已補充於期末報告之 2-31 頁至 2-38 頁之說明。
三、不同區域規模大小其所處之空間與時間水質項目之指標井(空間位置與評估時間)可能不同，建議以地下水分區與分含水層方式來探討。	三、本計畫採用多變量地質統計方法，於分析過程中，已依地下分層來考量指標井網，且運用地質統計之變異元分析，將可反應地下水分區之空間結構。
四、多變量地質統計之應用，建議應建立評估準則，例如：選取水質或捨去誤差等。以免不同時間與不同水質項目所評估之結果有所誤差，以利指標井數之確立。	四、本計畫利用多變量地質統計分析多項水質參數得出監測井優先順序排序，並提出捨去部分井位後誤差之分析方法。日後水利署可依照其經費許可彈性擬定監測站井數量，依據排序挑選監測井，並評估誤差。
五、建議水質指標井之位置應與觀測井網之觀測井相互配合並注意是否同一含水層之指標位置，以利未來評估作業。	五、本計畫所規劃選定之指標井，即在既有之觀測井網中選出，並無規劃再增設另一井網。
六、不同水質評得之空間變異可能不同，以致指標井所選之位置可能不同；建議對評選水質先確定後(最好以簡單與亦測量為準)，再討論如何取得最佳指標井。	六、本計畫選定之多變量地質統計評估方法，最大之優點即是能考量較多之水質項目來作為水質指標井之選定依據，並且本計畫將以與水文地質較相關之水質項目來評估水質指標井。
台灣大學 鄭教授克聲：	
一、計畫中對過去有關地下水水質觀測網之研究有完整之收集及回顧。但期中報告書之撰寫與編排方式，一讓人誤解為是本計畫已完成之研究成果，建議於期末報告中注意章節格式。	一、參照依委員意見修訂，對有關地下水水質觀測網研究之收集回顧，於撰寫編排及期末報告章節名稱已作調整。
二、有關卡門濾波理論於站網設計，於期中報告中尚未有完整之系統與觀測模式之敘述，建議於期末報告中予以說明。另外卡門率波演算時距要選擇多長亦	二、由於本計畫重點在於指標井選定方法之評估，而對於卡門濾波理論於站網設計應用工具，目前也僅有應用於水位觀測井網設計之 KALMOD。而對於應用於水質站網設計，建立其系統與觀測模式即是困難之處，因此本計畫藉由對於卡門濾

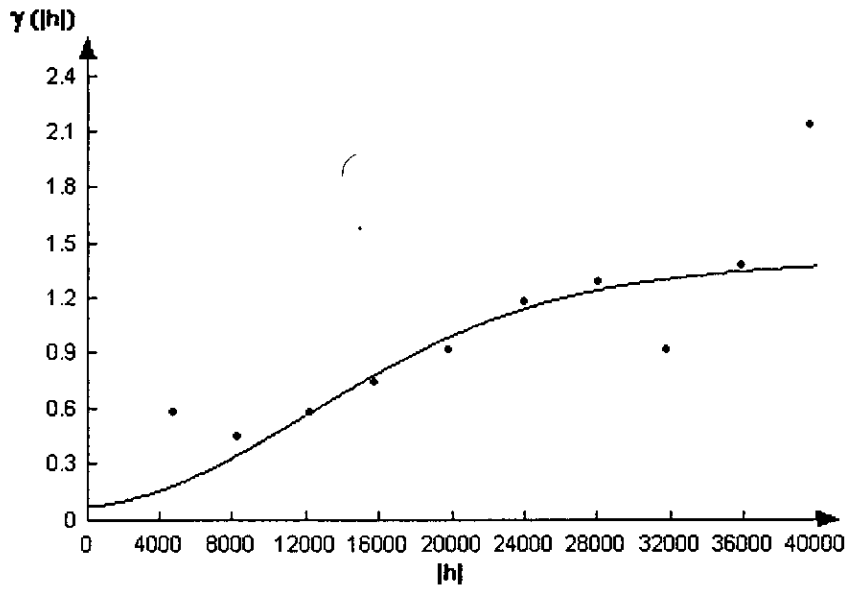
<p>應考慮計畫時程與研究計畫擬節省觀測經費之目標。</p>	<p>波應用於水質站網評估之流程規劃，以探討其優點、限制及可行性。</p>
<p>台灣師範大學化學系吳教授家誠：</p>	
<p>一、不同功能與目的之情況下，可能水位與水質需兩種或兩種以上選定與評估方法。如此較完全適切。</p>	<p>一、本計畫選定水質指標井之目的，僅為掌握區域地下水長期水質變化，並不為地下水位而規劃。若為其它目的，應如委員所言，應另有其它評估流程所選出之井網較宜。</p>
<p>二、宜加入報告摘要。</p>	<p>二、於期末報告中，已加入報告摘要。</p>
<p>三、水質驗證項目宜考慮穩定之水質因素與有機水質污染項目，在國內現況污染現象之配合(如：Mn 在屏東平原之使用並不恰當)。</p>	<p>三、由於本計畫係利用挑選出來的較可能具有空間結構的水質參數進行地質統計，並非針對重金屬或有機物污染為之，而 Mn 為台灣地下水中常見之金屬離子，因此也選擇進行分析。</p>
<p>四、水質參數取得之時所用之採樣法會影響水質參數之合理性與評估方法確立之合理性，宜加以留意。</p>	<p>四、本計畫由歷年水質分析數據，進行指標井選定。於分析過程中，對於異常(過大或過小)之數據，將會再就其數據與原報告查核。</p>
<p>本署曾科長鈞敏：</p>	
<p>一、本計劃實例應用部分為何選定屏東平原？為何不以具較長水質資料之濁水溪流流域為例？比得較佳之驗證結果。</p>	<p>一、由本計畫之執行期間較短，考量實際案例所需之分析資料及時間，選定地下分層明確、範圍較小且井數較少之屏東平原為案例。雖濁水溪沖積扇有較長之水質資料，惟就各觀測井歷年之水質檢驗次數與屏東平原相差不多。</p>
<p>二、本計劃選定之方法，應加些介面讓本署承辦人員能簡單使用於各地下水層之水質之指標井選定。</p>	<p>二、本畫將於期末報告中，就評估選定之評估方法，列出分析步驟與分析工具，提供貴署承辦人員使用分析時作為依據，惟部份分析步驟仍需相當之主觀判斷。</p>
<p>本署水文技術組：</p>	
<p>一、截至十月中旬止，本計畫進度及工作項目內容符合計畫契約書規定，另對於承辦單位交通大學所付出努力及成果甚表感激。</p>	<p>--</p>
<p>二、請款時請函送前期款之經費累計暨本季計畫執行進度表俾辦理消核</p>	<p>二、遵照辦理。</p>

附錄二、屏東平原地下水質常態化後變異元分析結果

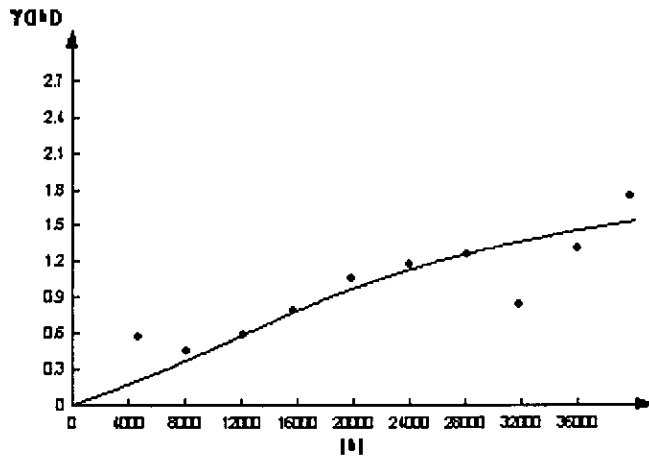
	EC	TDS	Cl	Na	Ca
EC	Nugget : 0.075 Gaussian : range : 30000 sill : 1.1 Power : power : 0.81 slope : 4e-05	--	--	--	--
TDS	Nugget : 0 Gaussian : range : 30000 sill : 0.6 Power : power : 0.8 slope : 0.0002	Nugget : 0.15 Gaussian : range : 29800 sill : 1.1 Power : power : 0.64 slope : 0.000108	--	--	--
Cl	Nugget : 0.12 Gaussian : range : 30000 sill : 0.5504 Power : power : 0.78 slope : 0.0002	Nugget : 0.12 Gaussian : range : 26000 sill : 0.75 Power : power : 0.73 slope : 0.0002	Nugget : 0.36 Gaussian : range : 30000 sill : 0.85 Power : power : 0.01 slope : 0	--	--
Na	Nugget : 0.12 Gaussian : range : 28000 sill : 0.69 Power : power : 0.74 slope : 0.0002	Nugget : 0.3 Gaussian : range : 28000 sill : 0.87 Power : power : 0.4 slope : 0.0002	Nugget : 0.18 Gaussian : range : 28200 sill : 0.5322 Power : power : 0.76 slope : 0.0002	Nugget : 0.125 Gaussian : range : 30000 sill : 1.15 Power : power : 0.61 slope : 0.00012	--
Ca	Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : 0.54 Power : power : 0.77 slope : 0.0002	Nugget : 0 Gaussian : range : 24000 sill : 0.66 Power : power : 0.74 slope : 0.0002	Nugget : 0.05 Gaussian : range : 25000 sill : 0.575 Power : power : 0.73 slope : 0.0002	Nugget : 0.05 Gaussian : range : 30000 sill : 0.475 Power : power : 0.75 slope : 0.0002	Nugget : 0.2 Gaussian : range : 25000 sill : 0.95 Power : power : 0.59 slope : 1.4e-4

Mg	Nugget : 0.03 Gaussian : range : 30000 sill : 0.69 Power : power : 0.78 slope : 0.0002	Nugget : 0.1199 Gaussian : range : 29600 sill : 0.72 Power : power : 0.75 slope : 0.0002	Nugget : 0.18 Gaussian : range : 29000 sill : 0.48 Power : power : 0.77 slope : 0.0002	Nugget : 0.21 Gaussian : range : 29800 sill : 0.6 Power : power : 0.74 slope : 0.0002	Nugget : 0.175 Gaussian : range : 30000 sill : 0.4 Power : power : 0.74 slope : 0.0002
SO ₄ ²⁻	Nugget : 0.18 Gaussian : range : 28000 sill : 0.45 Power : power : 0.73 slope : 0.0002	Nugget : 0.2 Gaussian : range : 28000 sill : 0.52883 Power : power : 0.7 slope : 0.0002	Nugget : 0.12 Gaussian : range : 26200 sill : 0.21 Power : power : 0.79 slope : 0.0002	Nugget : 0.225 Gaussian : range : 30000 sill : 0.575 Power : power : 0.66 slope : 0.0002	Nugget : 0.2 Gaussian : range : 29000 sill : 0.4 Power : power : 0.68 slope : 0.0002
Eh	Nugget : 0 Gaussian : range : 25000 sill : -0.49783 Power : power : 0.01 slope : 0	Nugget : 0 Gaussian : range : 27000 sill : -0.34 Power : power : 0.64 slope : -3.2e-05	Nugget : 0 Gaussian : range : 29400 sill : -0.35 Power : power : 0.69 slope : -3.2e-05	Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : -0.33691 Power : power : 0.01 slope : 0	Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : -0.44 Power : power : 0.01 slope : 0
Fe	Nugget : 0.03 Gaussian : range : 28000 sill : 0.465 Power : power : 0.75 slope : 8e-05	Nugget : 0 Gaussian : range : 24800 sill : 0.32 Power : power : 0.71 slope : 0.0002	Nugget : 0 Gaussian : range : 27000 sill : 0.465 Power : power : 0.74 slope : 8e-05	Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : 0.33 Power : power : 0.74 slope : 8e-05	Nugget : 0.24 Gaussian : range : 30000 sill : 0.34 Power : power : 0.66 slope : 0.0002
Mn	Nugget : 0 Gaussian : range : 30000 sill : 0.48 Power : power : 0.77 slope : 0.0002	Nugget : 0 Gaussian : range : 30000 sill : 0.6 Power : power : 0.75 slope : 0.0002	Nugget : 0 Gaussian : range : 30000 sill : 0.3639 Power : power : 0.79 slope : 0.0002	Nugget : 0.12 Gaussian : range : 29200 sill : 0.69 Power : power : 0.66 slope : 0.0002	Nugget : 0.025 Gaussian : range : 30000 sill : 0.325 Power : power : 0.78 slope : 0.0002

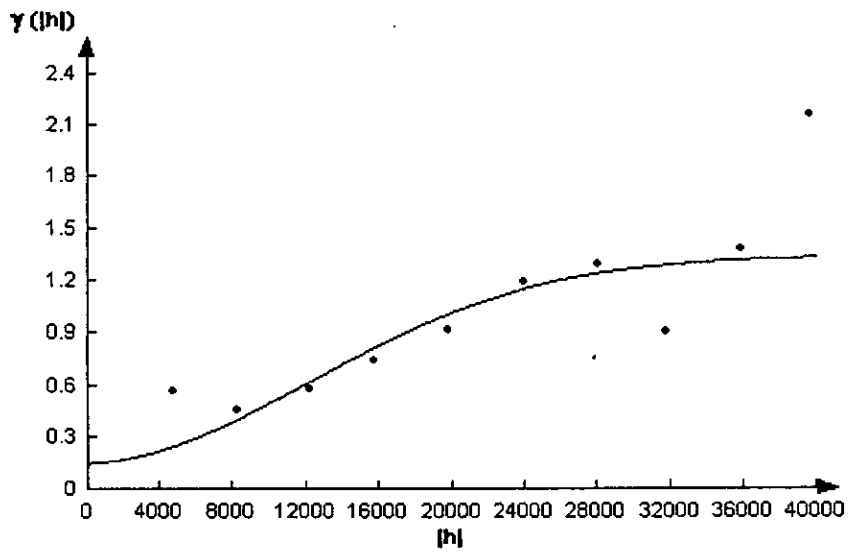
	Mg	SO ₄ ²⁻	Eh	Fe	Mn
Mg	Nugget : 0.2 Gaussian : range : 30000 sill : 0.85 Power : power : 0.62 slope : 0.0002	--	--	--	--
SO ₄ ²⁻	Nugget : 0 Gaussian : range : 26000 sill : 0.18908 Power : power : 0.81 slope : 0.0002	Nugget : 0.375 Gaussian : range : 30000 sill : 0.55 Power : power : 0.79 slope : 0.00011	--	--	--
Eh	Nugget : -0.125 Gaussian : range : 28800 sill : -0.325 Power : power : 0.79 slope : -2e-05	Nugget : 0 Gaussian : range : 29000 sill : -0.34 Power : power : 0.6 slope : -0.00019	Nugget : 0.4399 Gaussian : range : 30000 sill : 0.35 Power : power : 1.06 slope : 10e-06	--	--
Fe	Nugget : 0.06 Gaussian : range : 28000 sill : 0.37435 Power : power : 0.73 slope : 8e-05	Nugget : 0 Gaussian : range : 28000 sill : 0.225 Power : power : 0.77 slope : 0.0002	Nugget : 0 Gaussian : range : 28400 sill : -0.14 Power : power : 0.87 slope : -4.6e-05	Nugget : 0.225 Gaussian : range : 28400 sill : 0.8 Power : power : 0.82 slope : 5.4e-05	--
Mn	Nugget : 0.09 Gaussian : range : 28800 sill : 0.6 Power : power : 0.71 slope : 0.0002	Nugget : 0.15 Gaussian : range : 30000 sill : 0.48 Power : power : 0.65 slope : 0.0002	Nugget : -0.039 Gaussian : range : 30000 sill : -0.38 Power : power : 0.85 slope : -3.6e-05	Nugget : 0 Gaussian : range : 30000 sill : 0.66 Power : power : 0.59 slope : 0.0002	Nugget : 0.225 Gaussian : range : 30000 sill : 0.8 Power : power : 0.75 slope : 0.00012



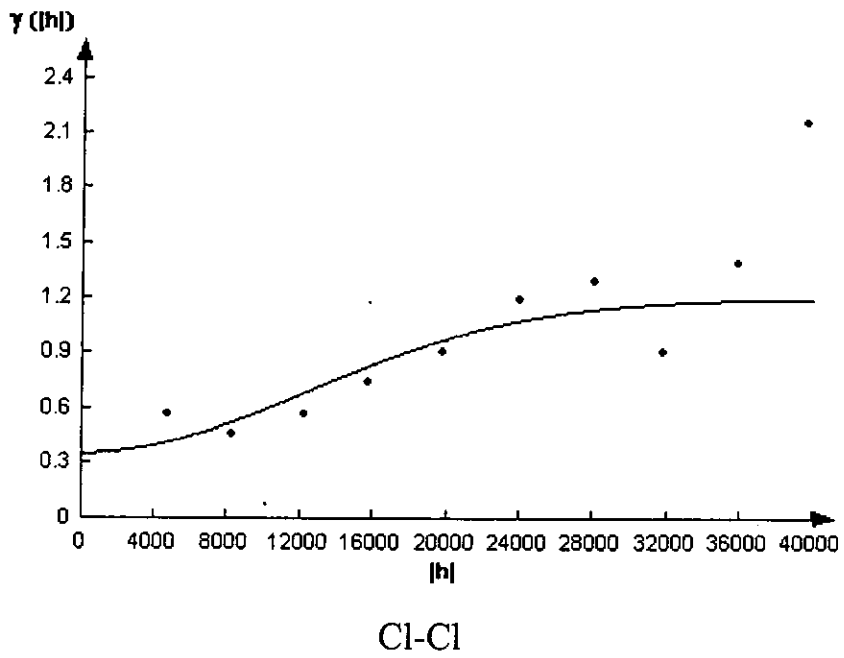
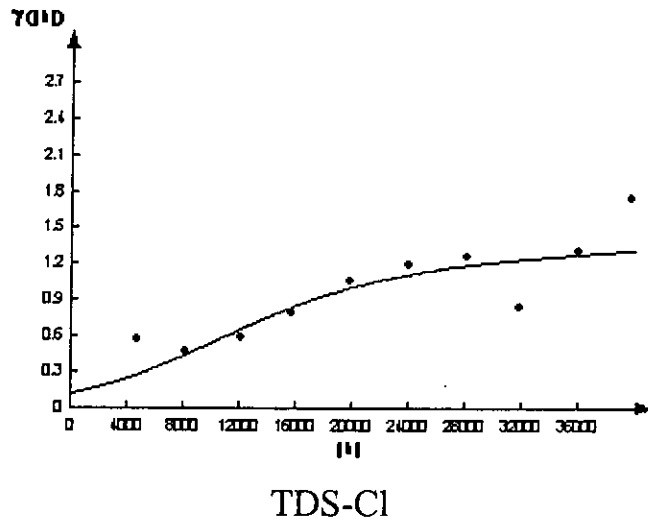
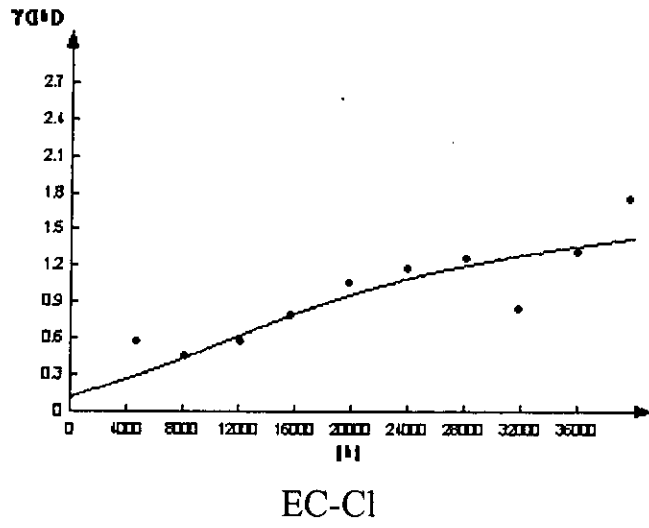
EC-EC

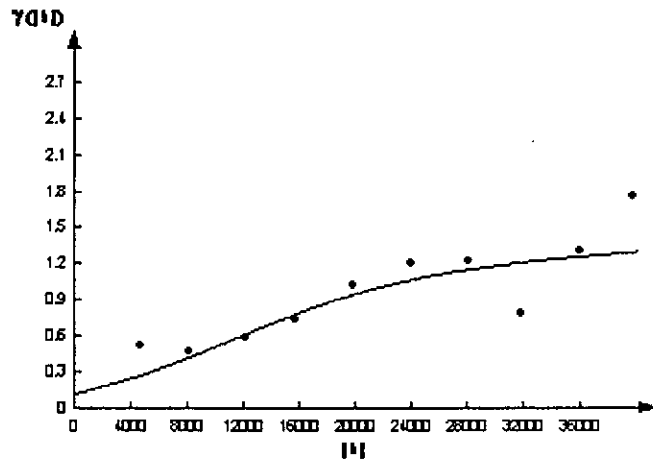


EC-TDS

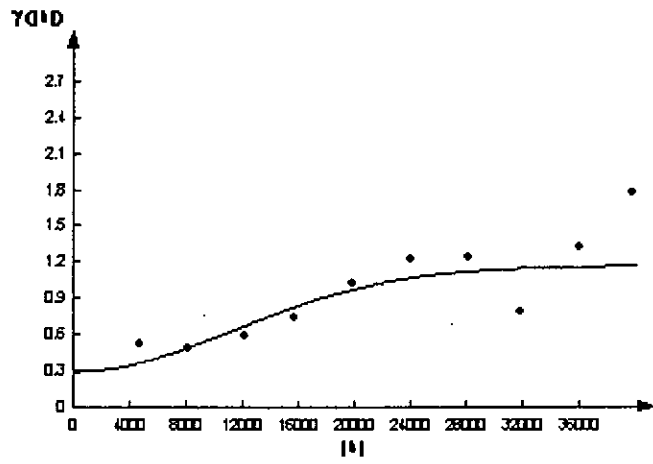


TDS-TDS

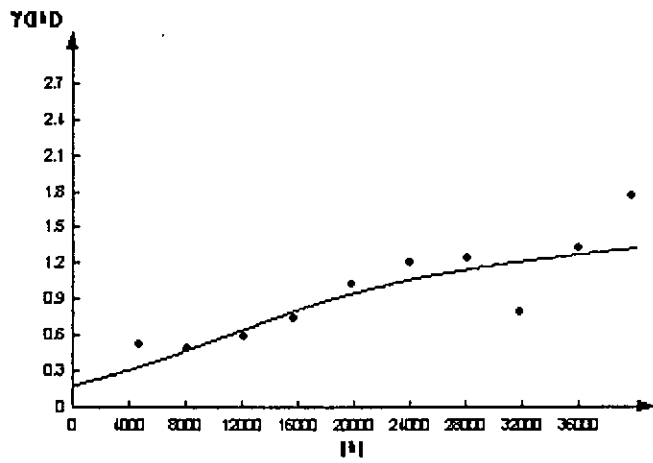




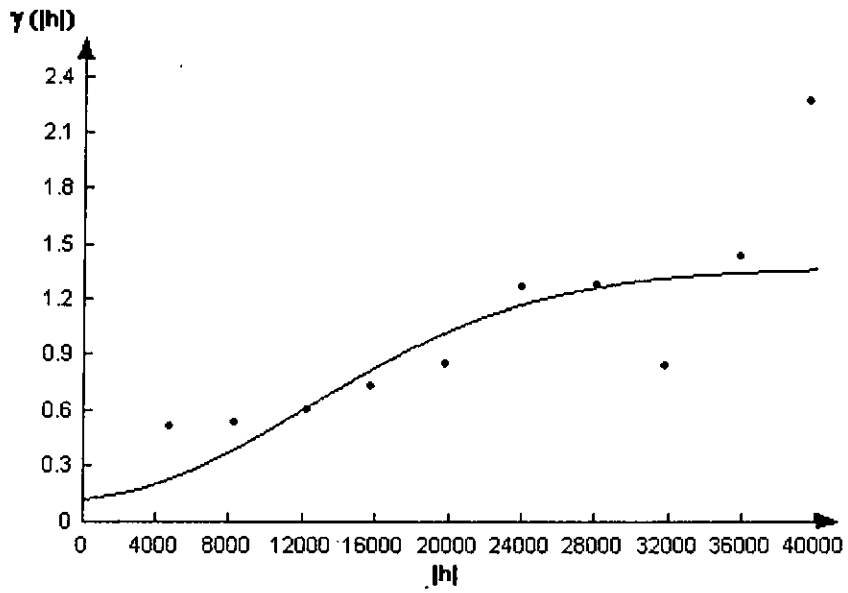
EC-Na



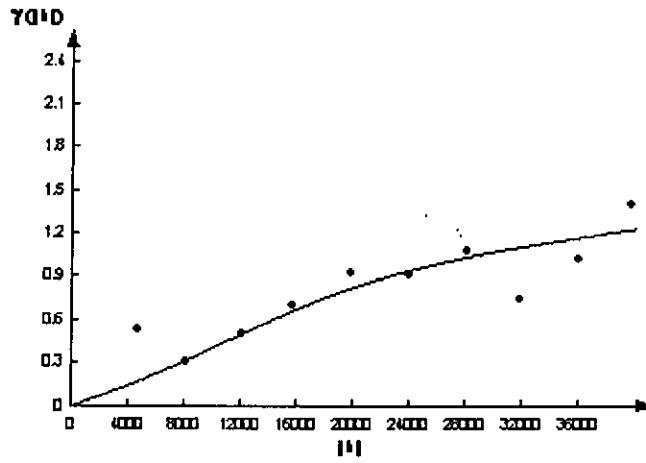
TDS-Na



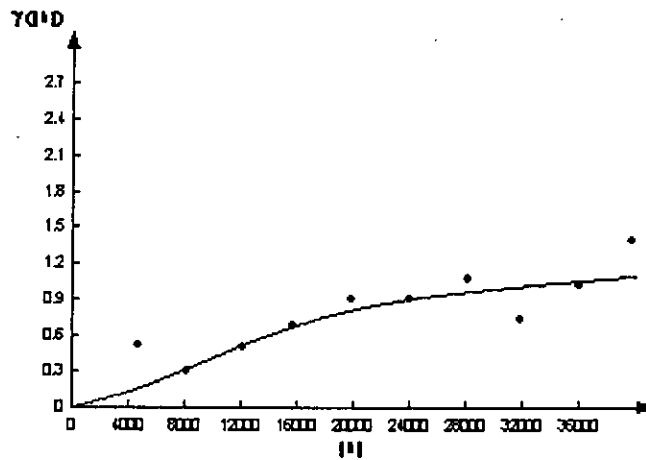
Cl-Na



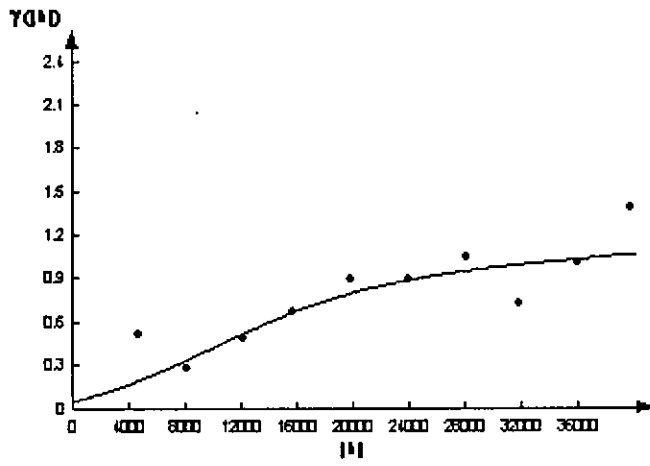
Na-Na



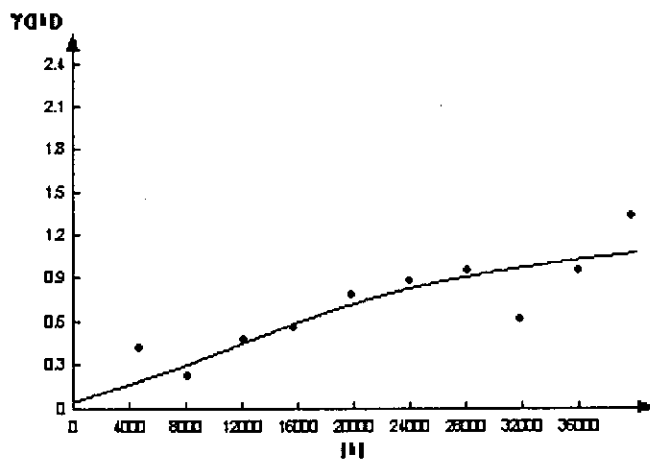
EC-Ca



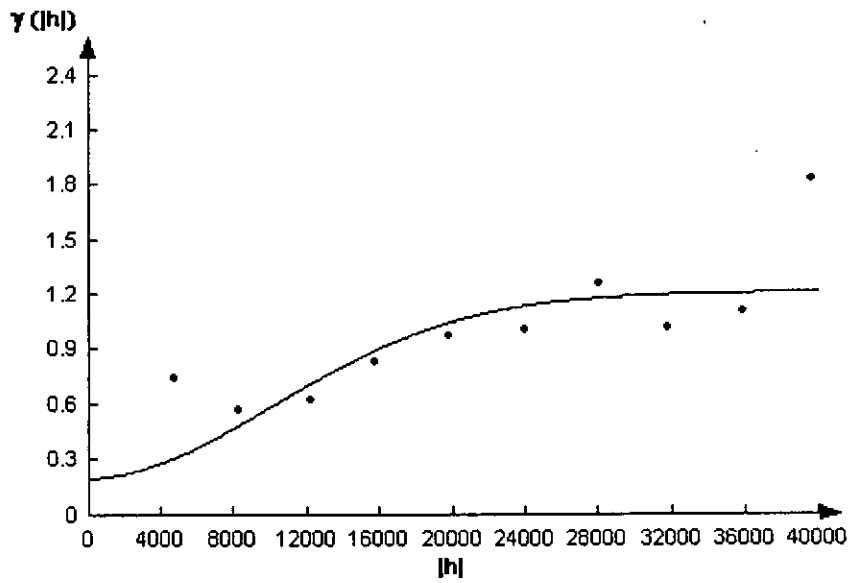
TDS-Ca



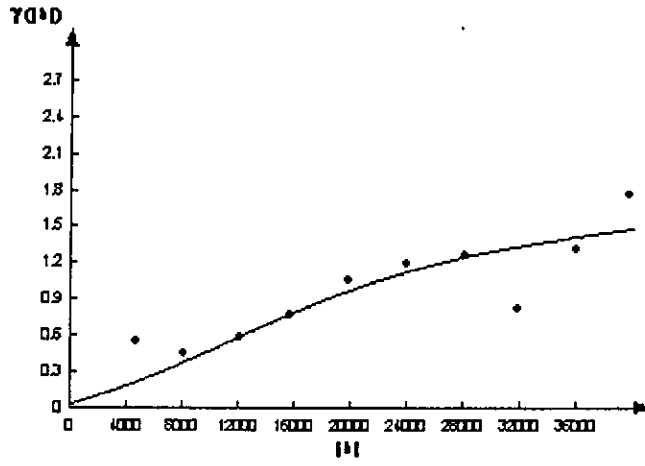
Cl-Ca



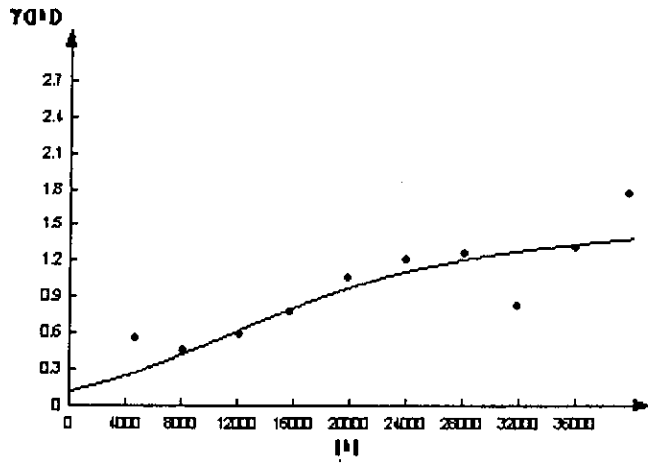
Na-Ca



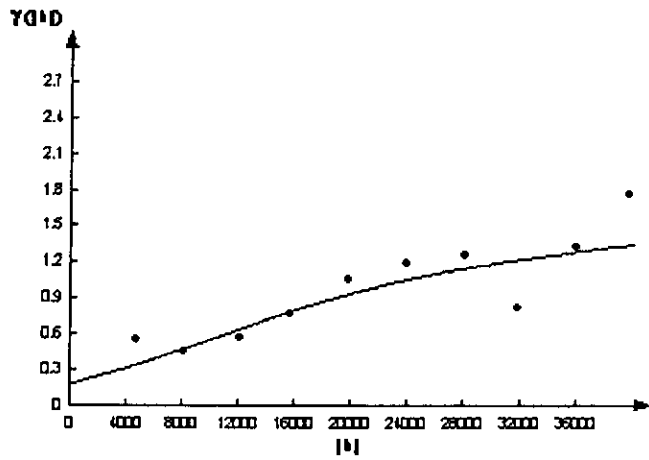
Ca-Ca



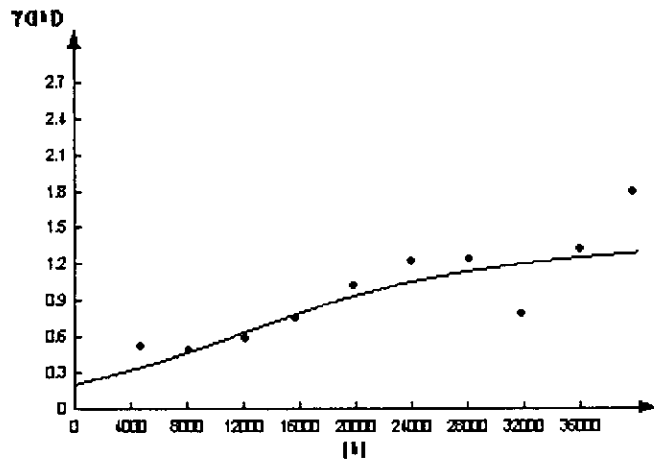
EC-Mg



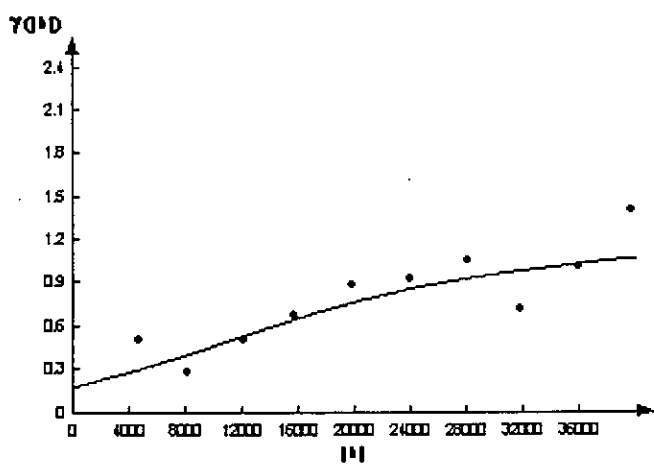
TDS-Mg



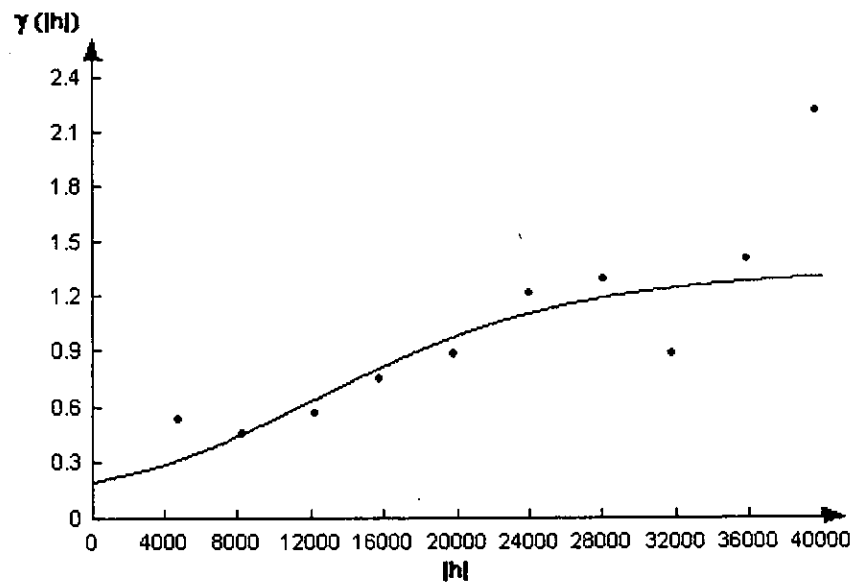
Cl-Mg



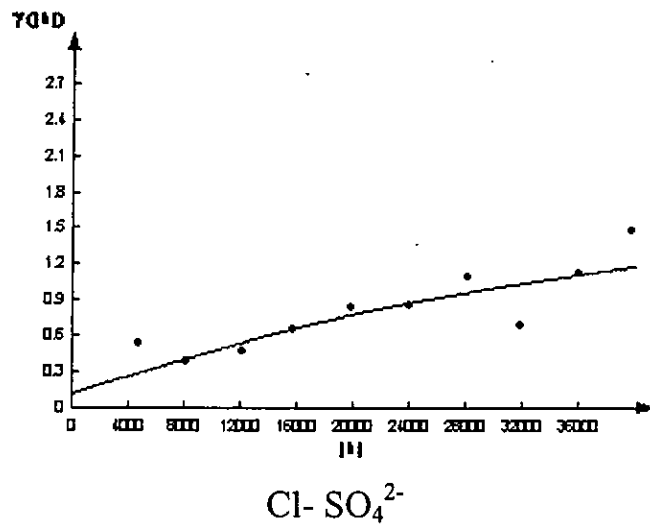
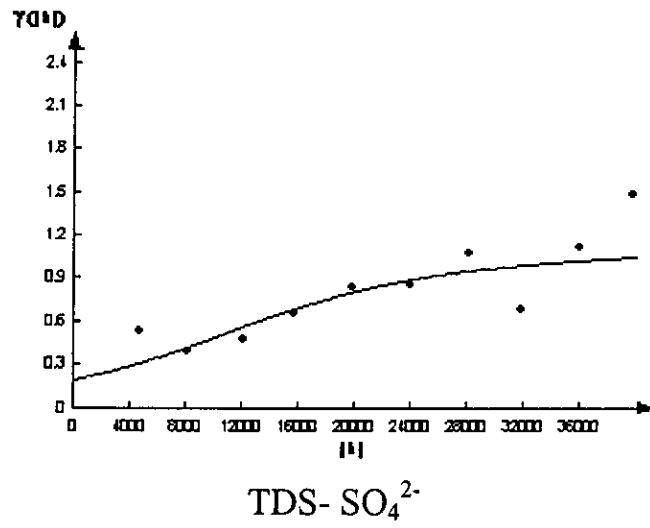
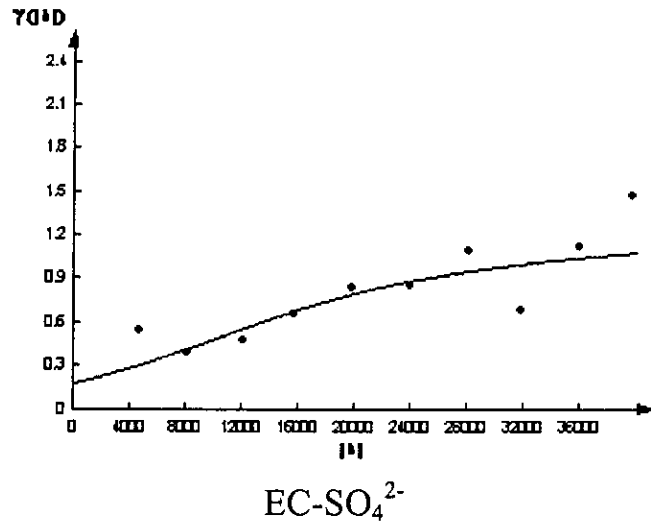
Na-Mg

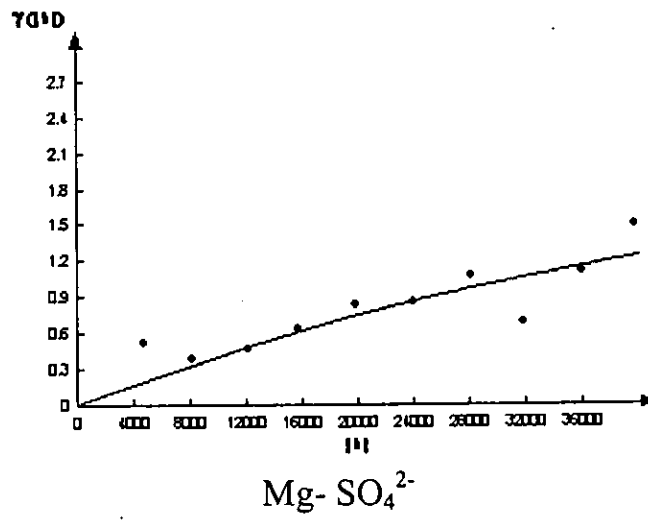
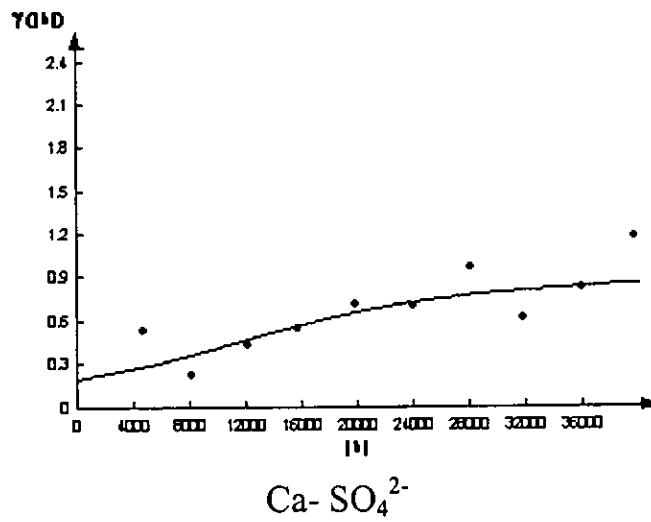
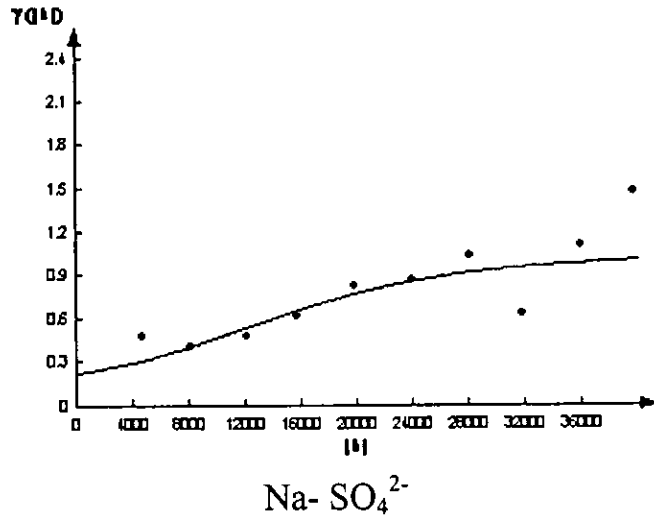


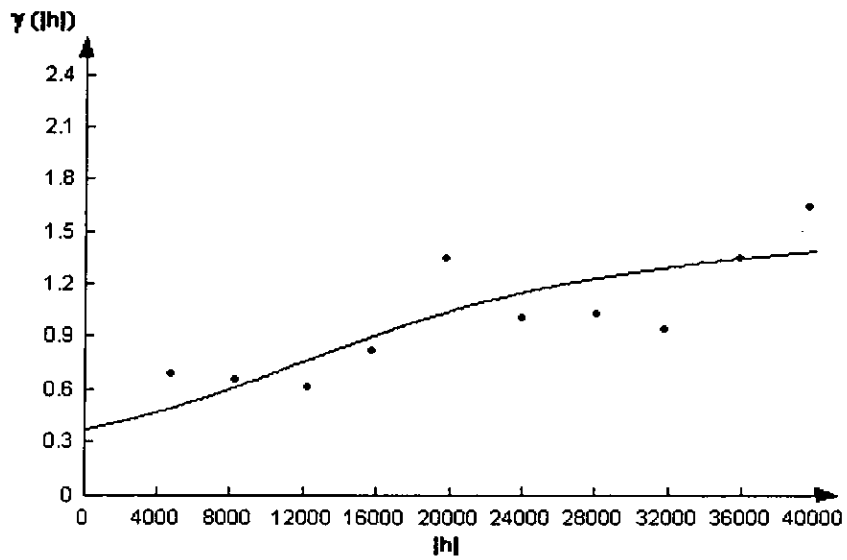
Ca-Mg



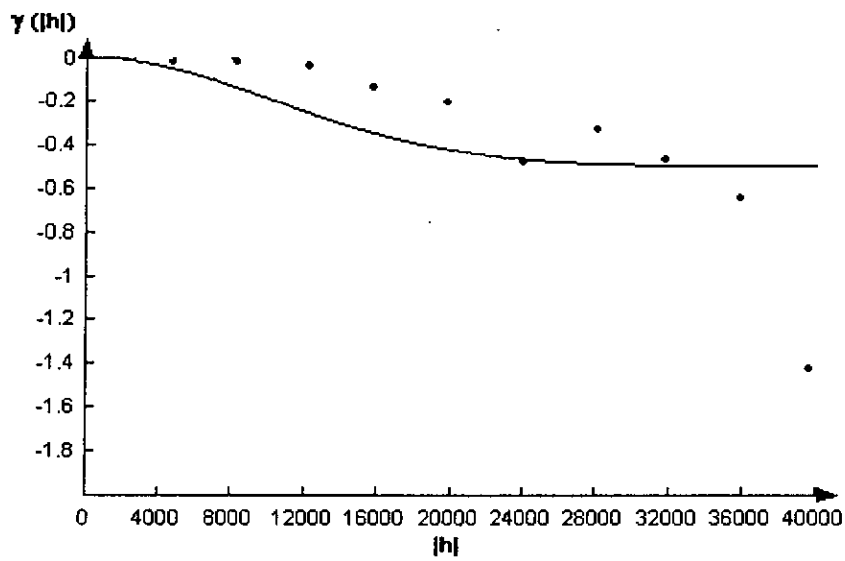
Mg-Mg



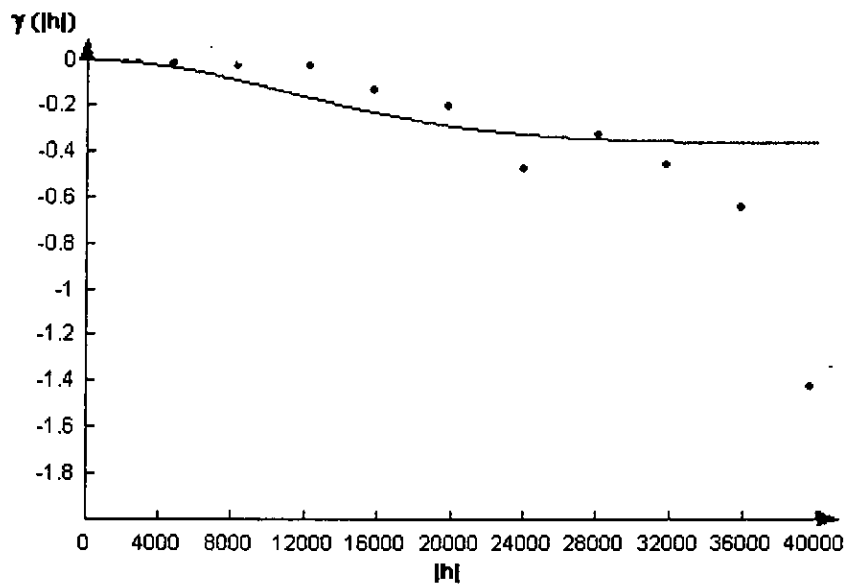




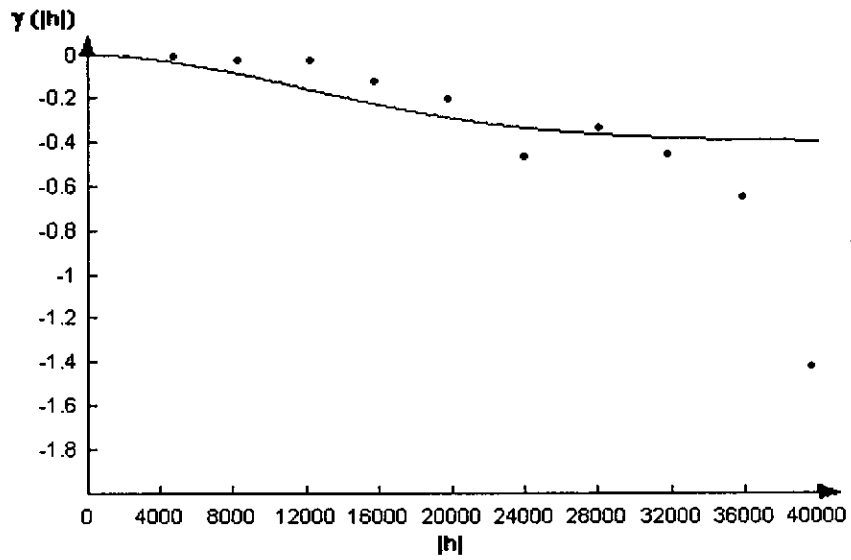
$\text{SO}_4^{2-} - \text{SO}_4^{2-}$



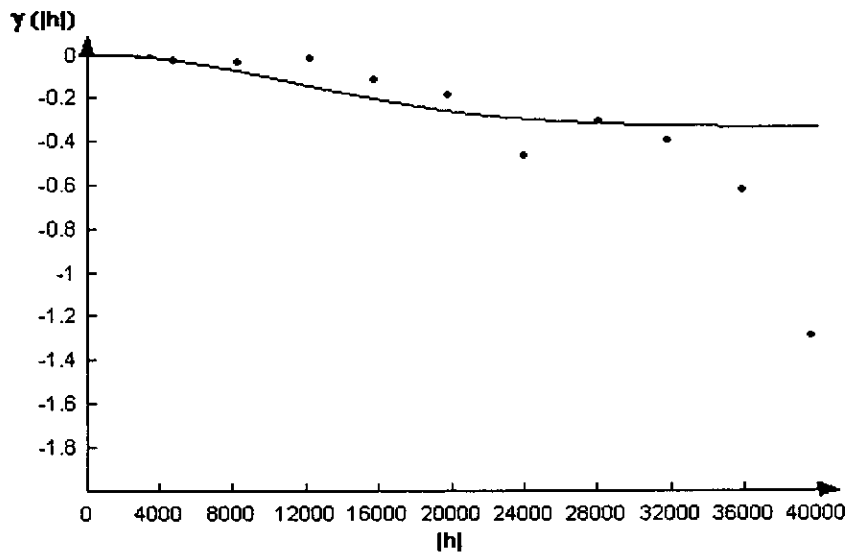
EC-Eh



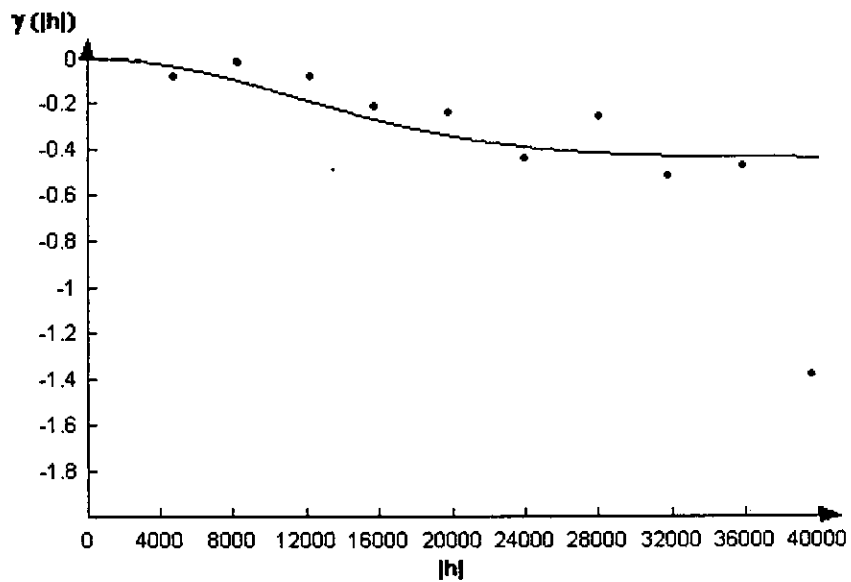
TDS-Eh



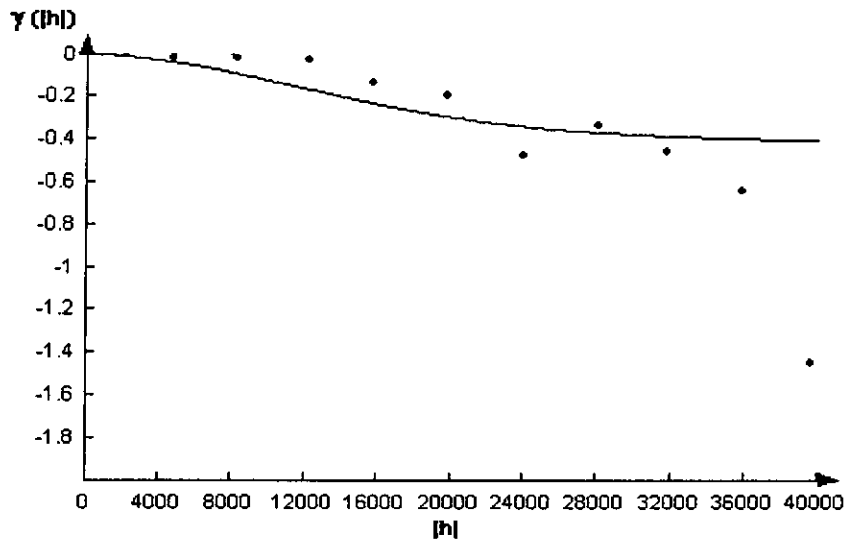
Cl-Eh



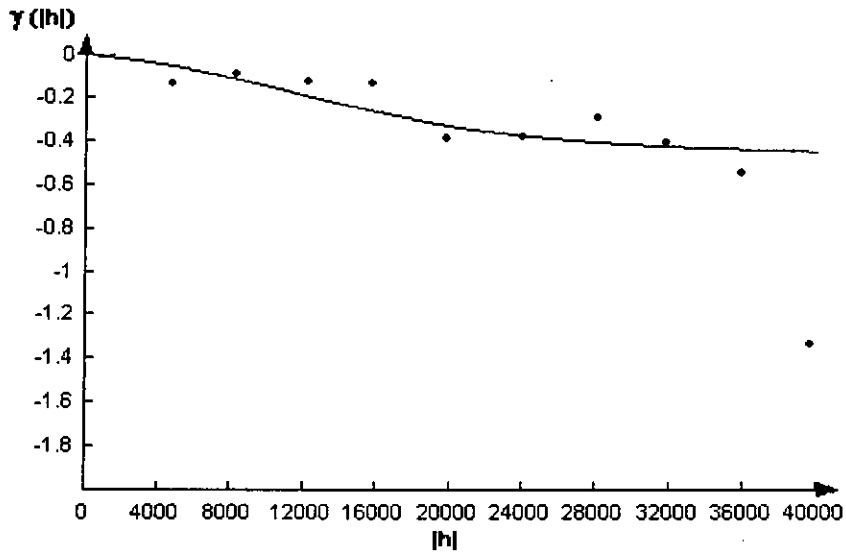
Na-Eh



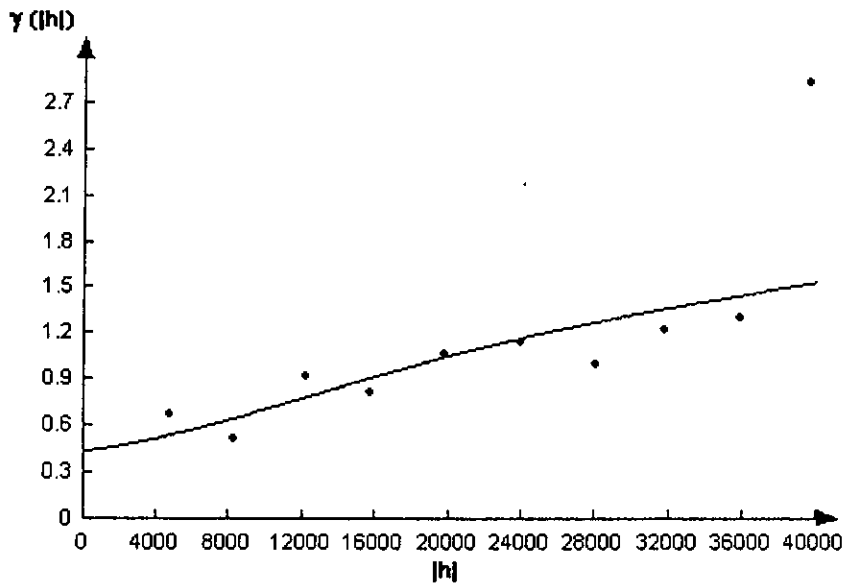
Ca-Eh



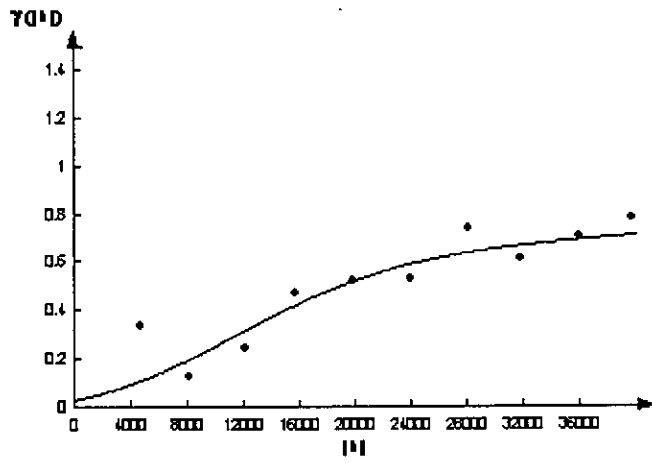
Mg-Eh



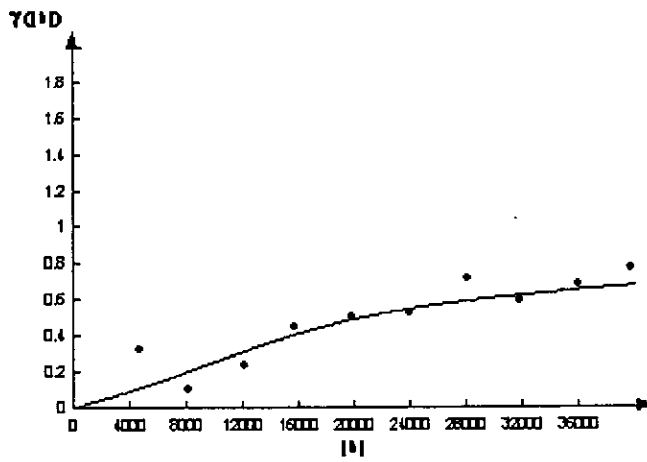
SO_4^{2-} -Eh



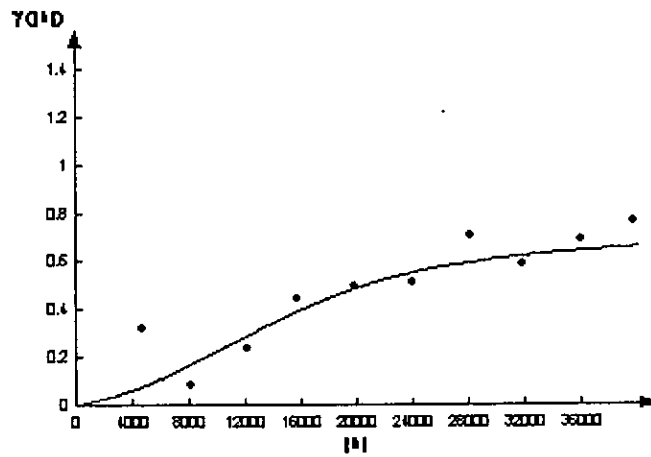
Eh-Eh



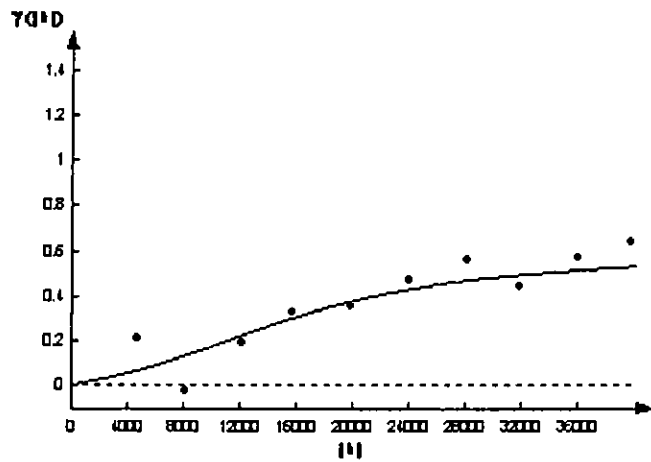
EC-Fe



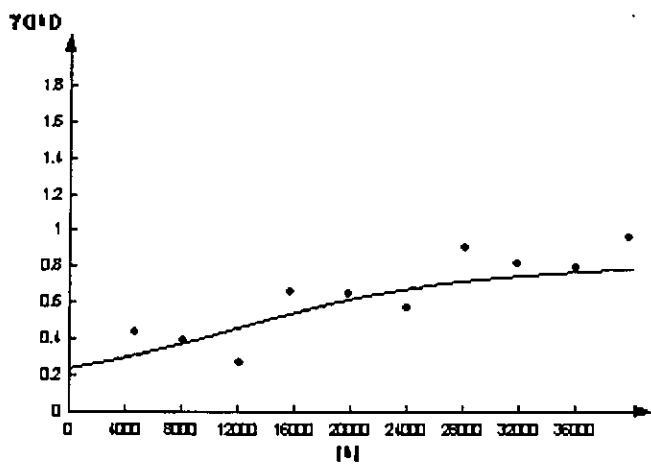
TDS-Fe



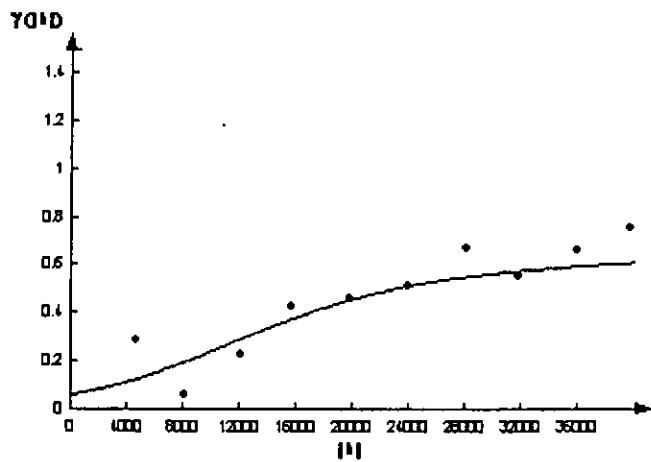
Cl-Fe



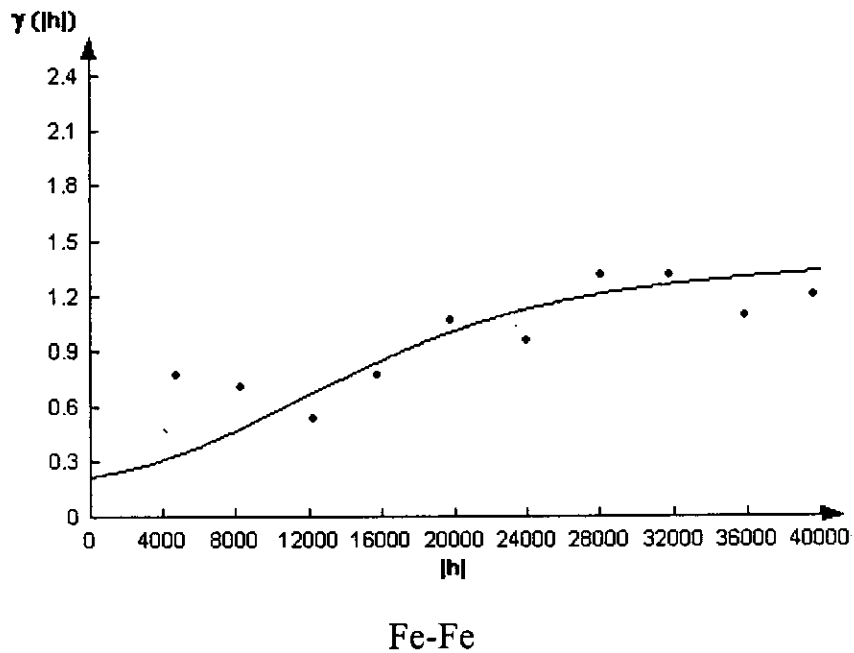
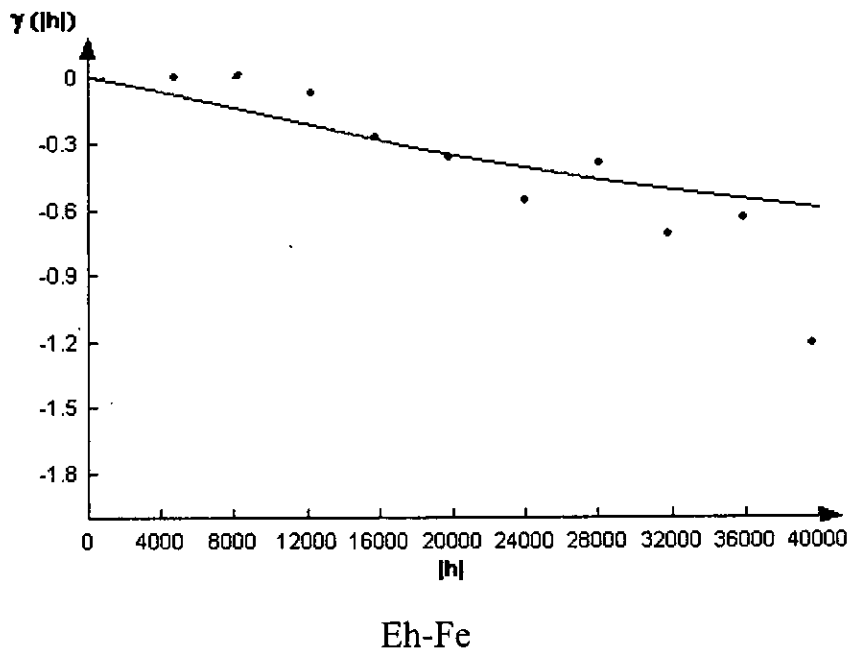
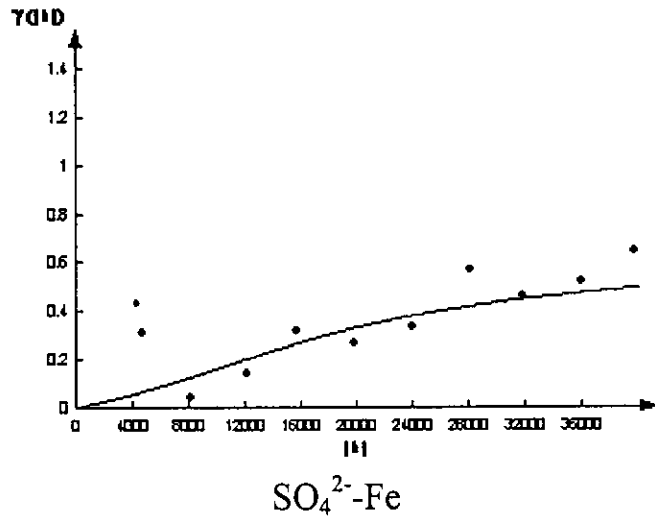
Na-Fe

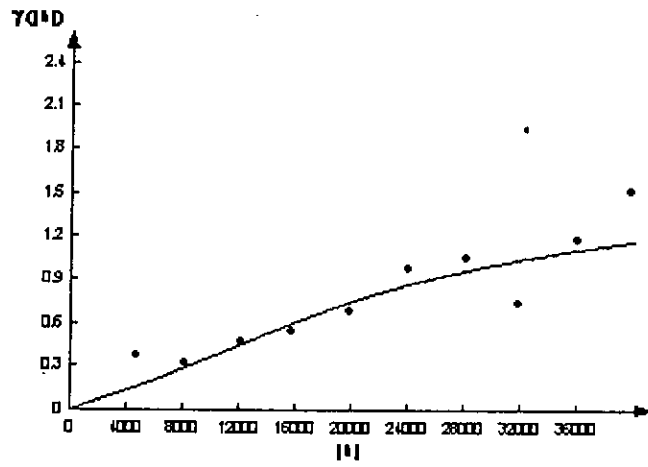


Ca-Fe

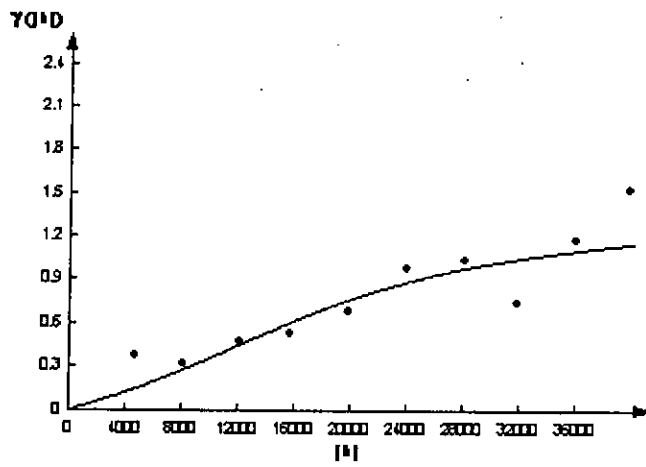


Mg-Fe

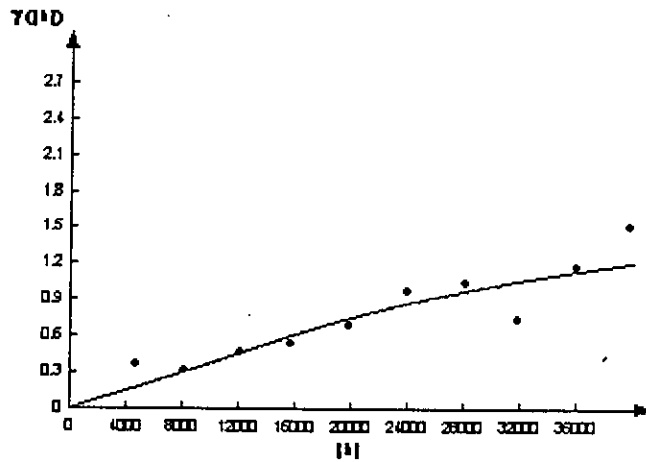




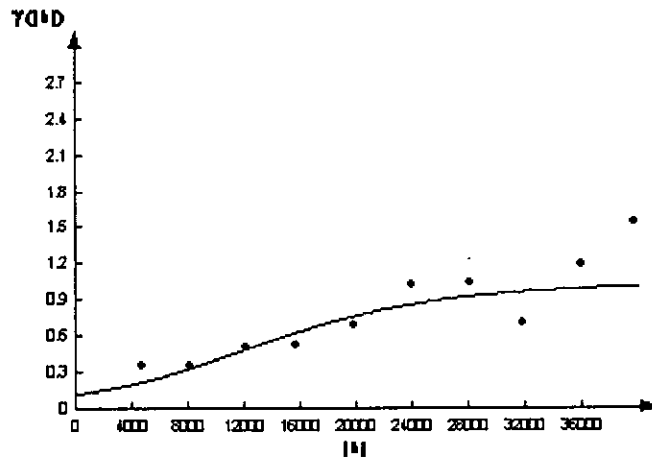
EC-Mn



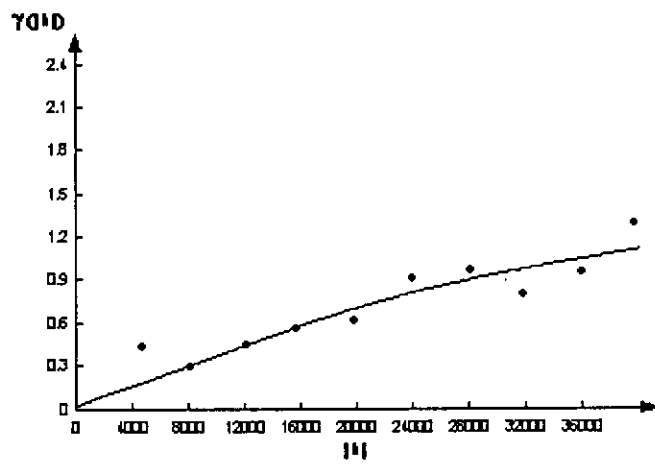
TDS-Mn



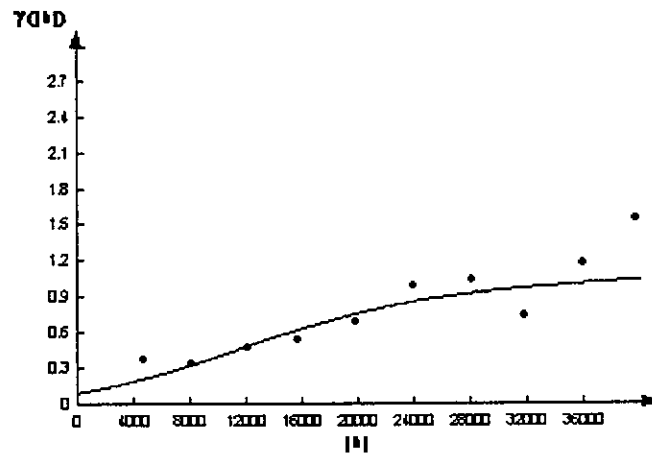
Cl-Mn



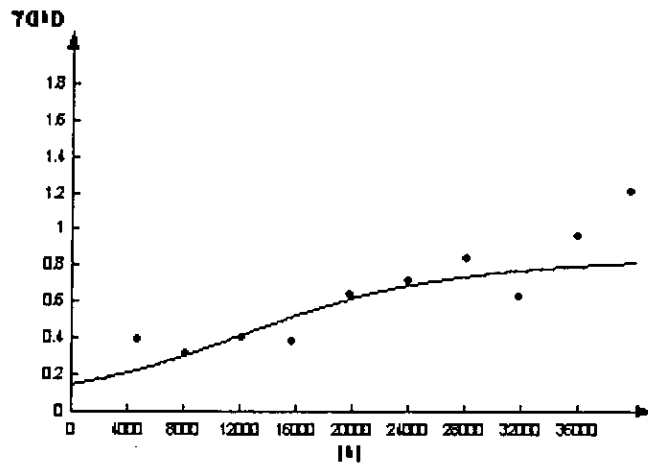
Na-Mn



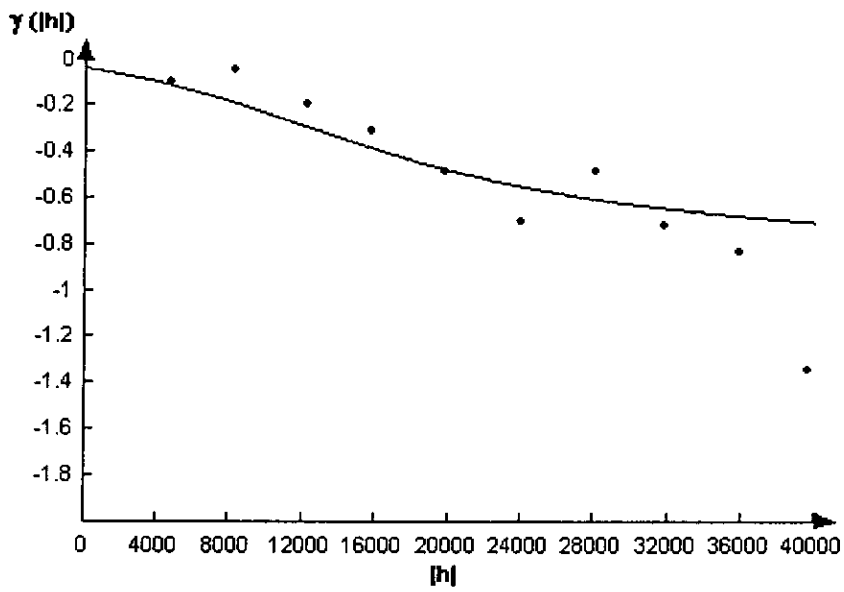
Ca-Mn



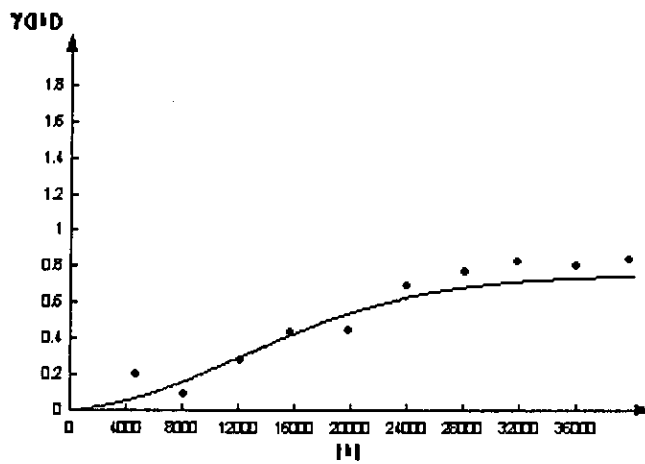
Mg-Mn



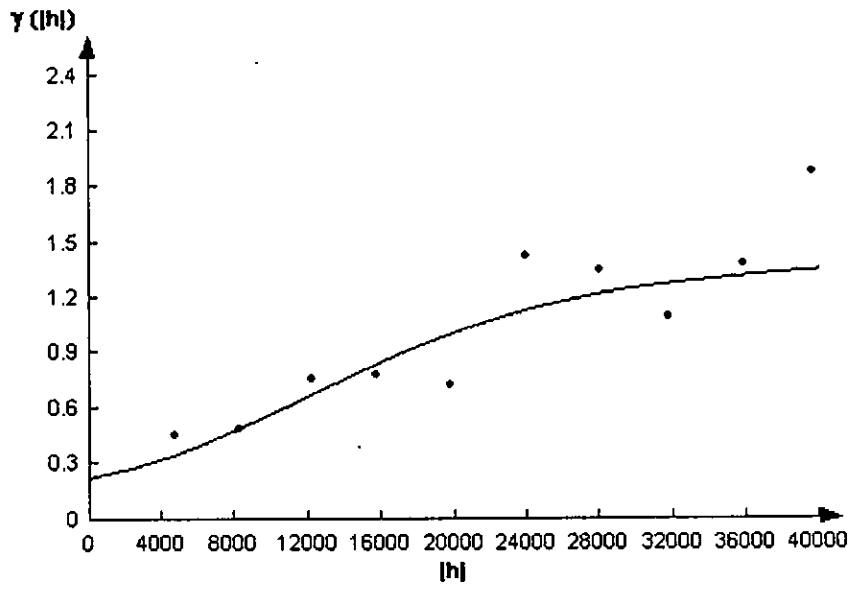
$SO_4^{2-}-Mn$



$Eh-Mn$



$Fe-Mn$



Mn-Mn

附錄三、台灣地區地下水觀測網水質指標井之選定方法評估期末審查
意見處理情形

期末審查意見	處理情形
中央大學應用地質學系陳教授家洵：	
一、建議每年兩次採樣。	一、將依委員之建議，指標井原則上為每年採樣一次；若貴署於有寬裕之經費，則建議可提高採樣頻率至每年採樣兩次。
二、目前的優先排序結果集中於九項檢測項目濃度或數值較高的區域。請於期末報告中比較本辦法與「濃度高低」順序的差別或相似性。或許結論是用統計方法證實「濃度高低」排列即可。若是如此，則可大幅降低水利署實務工作的負擔。	二、已依照委員之要求，將常態化之9項水質之濃度資料累加，以進行濃度高低之排序。並再與本計畫運用多變量地質統計所選定之指標井排序進行比較其差異。由於各水質項目濃度之加總係呈現水質項目濃度之和，並非反映水質項目之變異性，因此所得出的排序與利用地質統計方法所得之排序不同。 但由於指標井之目的為運用較少且較具代表性之井來推估整體區域水質狀況，因此採用本計畫選用地質統計方法來選定較能夠反映整體水質狀況的指標井應是較合理的方式。若是以污染監測為選定指標井的原則，則各水質項目濃度之高低應是重要之參考資訊。
三、33項檢測項目的必要性應與監測目的相符。	三、本計畫建議之33項水質檢測項目係依據歷年來貴署監測之項目為準，以期貴署未來所蒐集之水質資料具有延續性，可以進行較完整的分析。若未來貴署在水質監測的策略上有所變更，則相關水質監測項目亦應該據以調整，以符合貴署的監測目標。
四、地下水水位觀測井基本上並不適合作水質採樣之用，此點務請水利署特別留意。若用水位觀測井作地下水採樣之用，則需在採樣方法上予以規範。	四、委員之意見，請水利署參考辦理。
成功大學資工系李教授振誥：	
一、本計劃理論與分析過程合理，所估結果亦相當合理。	一、謝謝委員指教。
二、本計劃由於水文地質觀點來進行監測，故以水量利用管理來進行應屬合理，與環保署之監測井應不關聯。但要互相配合。	二、謝謝委員指教，此建議已加入於報告第7.2節之建議中。

<p>三、表 6.2-3 之對角線應 $r(h)=1.0$，其變異之差異請說明。</p>	<p>三、表 6.2-3 所代表之意義為屏東平原含水層二各水質項目於變異元平均影響範圍為 28.5 公里之高斯模式之基值所組成之共區域化矩陣(如 p5-15 第 5.2.1 節所說明)，而非相關係數矩陣。</p> <p>而後續之因子分析乃是將此共區域化矩陣視為共變異矩陣，以進行不同尺度之因子分析。</p>
<p>四、因子一、二、三...等之內容與涵義請再說明。</p>	<p>四、因子一、二、三...等，係將表 6.2-3 共區域化矩陣之視為共變異矩陣，利用 SPSS 統計分析軟體進行不同尺度之因子分析所得之結果。這些因子本身是統計分析的結果，依序代表影響水質變異性由高而低的水質項目的特徵，而與各井位的各項水質變異性相關，但與地質條件或其他條件並無直接的關聯。這些因子個別的物理意義則必須經過與水文地質、地質化學等各種影響條件的資料比對分析才能夠進一步探討。然這些因子的個別成因雖然不易探究，但並不影響對於指標井選定之排序。</p>
<p>五、請在評估項目時，應先確定本身目標，例如：海水入侵、抽水量等。</p>	<p>五、本計畫的評估係依據水利署對於含水層整體水質的掌握之目標進行，並非針對特定的影響含水層水質變化的項目。但是如海水入侵、抽水量等已經實際影響含水層水質的因素，皆以在反映在水質檢測結果中，亦即以實際水質資料為分析依據所選定之指標井已經反映了這些重要因素的影響。</p>
<p>六、6-18 頁中 Eh 之 Sill 為何為負值？</p>	<p>六、Eh 本身為負值，代表是該環境為還原狀態，傾向發生還原反應。第 6-18 頁中 Eh 與其它 9 項水質配對之複變異元分析結果，其基值皆為負值，其代表意義為這些水質項目濃度的變化傾向與 Eh 呈現負相關，愈是氧化的環境，這些離子較易形成穩定的沉澱物因而水中離子的濃度愈低。</p>
<p>台糖公司新營廠地下水保育中心陳地質師文福：</p>	
<p>一、目前已有彰雲、嘉南、高雄、屏東、竹苗及宜蘭共六個地下水區已建有觀測井評估指標井，評選指標井應擴大地區。(目前報告中只有屏東)</p>	<p>一、謝謝委員指教。由於本計畫之目的為對觀測井指標井建立方法進行分析確認，並進而發展具代表性指標井建立評估方法，以及可行方案及模擬驗證。因此本工作團隊即僅選定屏東平原作為選定方法之實際案例模擬驗證。</p>

<p>二、評選指標井是否應先考慮到水質項目，以及分布特性，例如：以水質鹽化(海水入侵)項目，可以考慮導電度、TDS 及氯鹽，在分析指標井之前，是否考慮海水污染靠海岸較嚴重，所以扇頂補注區，是否可排除在選井名單之外。或者另選污染監測井。(海水污染、硝酸鹽氮)</p>	<p>二、本計畫的評估係依據水利署對於含水層整體水質的掌握之目標進行，並非針對特定的影響含水層水質變化的項目，亦非以監測污染為目的。分析結果顯示導電度、TDS、氯鹽對於整體水質的變異性影響最大，而這些項目也正好是影響水質最重要的因子。將導電度、TDS、氯鹽排除在指標井選定分析所選用的水質項目之外，雖可以凸顯其他水質項目的影響，但恐不符合水利署掌握含水層整體水質之目標，故本計畫之分析並未採取該方式進行。</p>
<p>三、解釋深層含水層之水質特性(因子)可能需考慮地球化學原理，如水與沉積物交互作用，例如：錳還原、鐵還原、硫酸鹽還原等，以及礦物飽和，如：碳酸鈣(鎂、鐵)、硫化鐵(錳)等。</p>	<p>三、謝謝委員指教。本計畫已根據委員提供之資料在第六章中對於因子分析之結果做出補充說明。</p>
<p>水利署水文技術組:</p>	
<p>一、請承辦單位儘速依契約書相關規定辦理第二、三期請款及結案事宜。</p>	<p>一、遵照辦理。</p>