

國立交通大學

工學院專班永續環境科技組

碩士論文



台灣中部地區地下水水質特性分析

Characteristic Analysis of Groundwater Quality in Central Taiwan

研究生：許殊羚

指導教授：黃志彬博士

中華民國九十六年十一月

台灣中部地區地下水水質特性分析

Characteristic Analysis of Groundwater Quality in Central Taiwan

研 究 生：許殊羚

Student : Hsuling Shu

指 導 教 授：黃志彬 博士

Advisor : Dr. Chihpin Huang



A Thesis Submitted to Degree Program of Environmental Technology for Sustainability College of Engineering National Chiao Tung University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Degree Program of Environmental Technology for Sustainability

November 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年十一月

台灣中部地區地下水水質特性分析

學 生：許殊羚

指 導 教 授：黃志彬 博士

國 立 交 通 大 學
工 學 院 專 班 永 繢 環 境 科 技 組

摘要

台灣中部地區的濁水溪沖積扇為地下水補注量最充沛的區域，近來因為地下水超抽情形嚴重，因而造成水質惡化的情形。本研究利用三種分析方法進行中部地區地下水水質特性分析，以進一步找出代表性污染因子。以因子分析中部地區地下水，其中以「鹽化因子」為主要代表因子，其餘因子尚有「氮污染因子」、「有機性污染因子」及「礦物性因子」。

以Stiff水質形狀圖分析中部地區地下水，以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 離子凸出型佔最多比例， Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 離子凸出型佔次多比例。Piper水質菱形圖分析中部地區地下水，以I區佔最多比例，V區次之，顯示中部地區地下水水質尚稱良好。苗栗及彰化、雲林地區的沿海區域，部份地下水監測井分析結果顯示，已被海水影響有鹽化現象。將離子強度與導電度、總溶解固體進行迴歸分析，所得結果與文獻相同。統計中部地區地下水中總溶解固體與導電度比值為 0.69 ± 0.11 ，可代表中部地區地

下水水質特徵。

整體而言，中部地區地下水水質尚稱良好，惟於部份沿海區域水質已有鹽化現象，必須持續監測。由本研究所得地下水代表性污染因子，可提供地下水污染防治的參考。



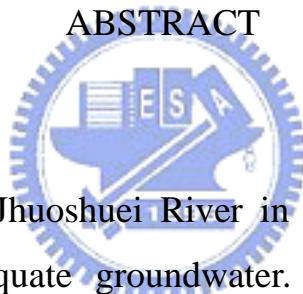
Characteristic Analysis of Groundwater Quality in Central Taiwan

Student : Hsuling Shu

Advisor : Dr. Chihpin Huang

Master Degree Program of Environmental Technology for Sustainability

ABSTRACT



The alluvial fan of Jhuoshuei River in central Taiwan is a known recharged area with adequate groundwater. It is a serious issue that groundwater could be pumped to make up the shortfall, maybe it is the reason why groundwater quality became worse recently. Three approaches to investigate ground water quality in central Taiwan have been applied in order to further establish the index of water quality. First, we have analyzed groundwater quality in central Taiwan area by factor analysis, the data showed that salinization factor could be the major factor. And other factors include nitrogen pollution factor, organic pollution factor and mineral factor.

Second, the ions-related data showed that groundwater quality is fine. The most classified type of Stiff diagram is a combination of calcium ion and hydrogen carbonate, the next is a combination of calcium ion and

sulfate; Piper diagrams has showed the most type is Type-I, the next is Type-II. Results of some monitor wells in coasting area of Miao-li, Chang-hwa and Yun-lin have showed that salinization may be caused by sea water. Third, regression data of ion strength, conductivity and total dissolved solids (TDS) seems the same as reference. The ratio of TDS to conductivity is 0.69 ± 0.11 , it could present the characteristics of groundwater quality in central Taiwan.

Overall speaking, groundwater quality in central Taiwan is quite good except for the salinization of groundwater in some coasting area. We suggest that the administrative agency has to keep monitoring for a long term. Eventually, representative groundwater pollution factors found from this study could provide as a reference for the pollution prevention and control of groundwater.



誌 謝

對於能夠完成個人的論文，首先要感謝指導教授黃志彬博士，從論文研究方向確立至論文研究過程期間，都給與學生細心的指導，對於論文逐字審閱，而使得論文更臻完備。另外感謝兩位口試委員袁如馨博士與周珊瑚博士對於論文的斧正與指導，並提供寶貴的意見，而使論文得以完成。

感謝吳坤立總經理給與本人的鼓勵及提攜，使得個人在工作繁忙之餘，能夠兼顧學業研究。還要感謝好友岳賢與育民，在論文研究期間不斷給與支持與鼓勵，才能有最大的動力完成。感謝同窗好友世如、鼎文與正周彼此的砥礪，也祝福大家完成自身的學業。

最後，要感謝我的父親和母親，感謝他們在我論文研究期間協助照顧家人，讓本人無後顧之憂，得以全心全力投入論文研究。衷心感謝幫助我的人，在此僅以本論文獻給所有支持、關心我的人。

目 錄

	頁 次
中文摘要	i
英文摘要	iii
誌謝	v
目錄	vi
圖目錄	viii
表目錄	ix
符號說明	x
縮寫表	xi
一、 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機與目的	2
二、 文獻回顧	4
2.1 地下水質污染對健康的影響	4
2.2 中部地區地下水水文水質調查研究	4
2.3 地下水水質特性分析研究	5
三、 研究方法	8
3.1 論文架構	8
3.2 研究區域地理背景	10
3.2.1 新竹苗栗臨海地區	10
3.2.2 台中地區	10
3.2.3 濁水溪沖積扇區	11
3.3 數據來源	14
3.4 數據分析	20
3.4.1 因子分析	20
3.4.2 水質特性分析	23
3.4.3 離子強度、導電度及總溶解固體間之關係	26
四、 結果與討論	29
4.1 地下水因子分析結果	29
4.1.1 苗栗縣地下水水質因子特性分析	30
4.1.2 台中/南投地下水水質因子特性分析	33
4.1.3 彰化縣地下水水質因子特性分析	36
4.1.4 雲林縣地下水水質因子特性分析	39
4.2 地下水水質特性分析	42

目 錄

	頁次
4.2.1 Stiff 水質形狀圖法.....	42
4.2.2 Piper 水質菱形圖法.....	46
4.3 離子強度、導電度及總溶解固體間之關係	49
4.3.1 離子強度結果.....	49
4.3.2 總溶解固體及導電度與離子強度之關係.....	50
五、	
5.1 結論.....	58
5.2 建議.....	59
參考文獻	
附錄一	地下水監測井原始數據



圖 目 錄

	頁次
圖 1 論文研究流程圖.....	9
圖 2 中部地區地下水監測井分布圖	14
圖 3 地下水水質 Piper 菱形圖分區示意圖.....	27
圖 4 苗栗縣地下水水質因子陡坡圖.....	31
圖 5 台中/南投地下水水質因子陡坡圖.....	34
圖 6 彰化縣地下水水質因子陡坡圖.....	37
圖 7 雲林縣地下水水質因子陡坡圖.....	40
圖 8 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 離子凸出型態監測井之 Stiff 圖解分析.....	45
圖 9 屬於IV區型態監測井之 Piper 圖解分析.....	48
圖 10 各監測井離子強度比較.....	55
圖 11 各監測井導電度與離子強度關係.....	56
圖 12 各監測井總溶解固體與離子強度關係.....	57



表 目 錄

	頁次
表 1 台灣地區水資源分區與地下水資源分區.....	13
表 2 中部地區地下水監測井測站位置.....	15
表 3 苗栗縣地下水水質轉軸後特徵值與變異量.....	31
表 4 苗栗縣地下水水質轉軸後因子負荷表及共通性.....	32
表 5 台中/南投地下水水質轉軸後特徵值與變異量.....	34
表 6 台中/南投地下水水質轉軸後因子負荷表及共通性.....	35
表 7 彰化縣地下水水質轉軸後特徵值與變異量.....	37
表 8 彰化縣地下水水質轉軸後因子負荷表及共通性.....	38
表 9 雲林縣地下水水質轉軸後特徵值與變異量.....	40
表 10 雲林縣地下水水質轉軸後因子負荷表及共通性.....	41
表 11 各區域地下水 Stiff 水質形狀統計.....	44
表 12 各區域地下水 Stiff 水質形狀比例計算.....	44
表 13 各區域地下水 Piper 水質菱形圖統計.....	47
表 14 各區域地下水 Piper 水質菱形圖比例計算.....	47
表 15 苗栗縣地下水監測井之監測參數及離子強度.....	52
表 16 台中/南投地下水監測井之監測參數及離子強度.....	53
表 17 彰化及雲林縣地下水監測井之監測參數及離子強度.....	54

符 號 說 明

μ : ionic strength

C_i : 離子濃度

Z_i : 離子電荷



縮 寫 表

pH	: 氢離子濃度指數
EC	: 導電度
TH	: 總硬度
TDS	: 總溶解固體
Cl^-	: 氯離子
$\text{NH}_3\text{-N}$: 氨氮
$\text{NO}_3\text{-N}$: 硝酸鹽氮
SO_4^{2-}	: 硫酸根離子
TOC	: 總有機碳
Cd	: 鎘
Pb	: 鉛
Cr	: 鉻
As	: 砷
Cu	: 銅
Zn	: 鋅
Fe	: 鐵
Mn	: 錳
Na	: 鈉
K	: 鉀
Ca	: 鈣
Mg	: 鎂
CO_3^{2-}	: 碳酸根離子
HCO_3^-	: 碳酸氫根離子
K^+	: 鉀離子
Na^+	: 鈉離子
Ca^{2+}	: 鈣離子
Mg^{2+}	: 鎂離子
Fe^{2+}	: 亞鐵離子



縮 寫 表

Mn^{2+}	：亞錳離子
Fe^{3+}	：三價鐵離子
Mn^{3+}	：三價錳離子
$Ca(HCO_3)_2$	：碳酸氫鈣
$Mg(HCO_3)_2$	：碳酸氫鎂
$NaHCO_3$	：碳酸氫鈉
$CaSO_4$	：硫酸鈣
$MgSO_4$	：硫酸鎂
$CaCl_2$	：氯化鈣
$MgCl_2$	：氯化鎂
Na_2SO_4	：硫酸鈉
$NaCl$	：氯化鈉
$CaCO_3$	：碳酸鈣



一、緒論

1.1 前言

水為生命中非常重要之要素，亦為國家重要資源，而水質良窳攸關民眾健康，亦可做為民眾生活品質之重要指標之一。地球水體總量約有 13.9 億立方公里，其中海洋水為最主要部分，佔全球總水量之 97.2%，陸地上之水僅佔全球之 2.8%；而淡水之分布幾乎都在陸地上，其中兩極冰帽及高山的冰川約佔了 2.15%，這都是人類難以利用的，所以人類實際可以利用的淡水約僅有 0.65%。在可利用的淡水中以地下水所佔的比例最高，約佔淡水資源的 95.7%，而地表水僅佔可用淡水資源的 4.3%左右^[1]。



以台灣地區的水文循環而言，台灣面積 36,000 平方公里，年平均降雨量約 2,500 公厘，推算年雨量為 905 億噸，其中年平均蒸發量 197 億噸占年雨量 21%，年平均逕流量 668 億噸占 74%，年平均地下水入滲量 40 億噸占 5%。台灣地區水資源問題，主要是因時間與空間分配不均造成，依據台灣地區降雨量統計，年平均降雨量可達 2000 公釐以上，普遍集中於每年的豐水期 5 月至 10 月之間，且降雨量集中某些特定區域，水庫集水因而未能獲得足夠之水量。受到地形影響，西部河川坡度陡峭，降水難以蓄留，東部地區河川尚有餘水可供引用，且部分河川長期遭污染水質呈現嚴重污染，已無法利用，於是興建水庫或仰賴抽取地下水，來支應水資源不足之情形。水庫集水區因過度開發，未做好水土保持工作，植被不足無法充分涵養水源，造成水庫淤積情形嚴重，有效蓄水量逐年降低。

台灣西南沿海平原，如濁水溪沖積扇、嘉南平原及屏東平原等地

區，原本地下水資源充沛，由於地下水取用方便，加上沿海養殖業之興起，地下水已有嚴重超抽現象，因此地下水資源管理日益重要。地下水之取用雖然較地表水方便，未受到時間及空間之限制，但其屬於有限資源，而且必須仰賴地表水長期補注，才能長久使用。近年來科技工業發展迅速，用水需求越來越大，而其他用途的用水量，日益成長，在地表水供應不足之情況下，轉而依賴地下水資源之運用，因此台灣部分地區之地下水已達嚴重超量使用之狀況。部份地區因為人口密集，或工業區之設立，造成地下水污染事件時有所聞，因此掌握地下水水質狀況實為水資源利用之重要工作。水質狀況可藉由水質監測結果瞭解，而水質監測項目繁多，如何使用監測數據來正確判斷水質狀況，可經由統計分析工具來達成此目的。



1.2 研究動機與目的

台灣地區水資源分區，分為北部、中部、南部及東部四個區域，而以地下水資源分區，台灣本島可分為九個區域，外島之澎湖亦劃分為第十個地下水區，台灣本島之地下水分區分別為 1.台北盆地 2.桃園中壢台地 3.新竹苗栗臨海地區 4.台中地區 5.濁水溪沖積扇 6.嘉南平原 7.屏東平原 8.蘭陽平原 9.花蓮台東縱谷(如表 1)。台灣的地下水資源以濁水溪沖積扇和屏東平原最為豐沛，但這兩個區域也是目前地下水超過限量使用最嚴重的地區^[2]。

本研究針對水資源分區之中部地區，涵括苗栗縣以南，雲林縣以北共六縣市，而以地下水資源分區範圍涵蓋新竹苗栗臨海地區、台中地區、濁水溪沖積扇等三個分區，進行水水質特性評析，並找出地下水代表性污染因子。

選定中部地區範圍之理由，主要因為中部地區之濁水溪沖積扇，其地下水補注量為台灣最充沛地區之一，根據經濟部水利署資料指出彰化雲林地區超抽地下水情形嚴重，已有地層下陷的狀況發生，易導致沿海地區或地勢低窪區域，容易發生海水倒灌或排水不易的問題，進而影響到地下水水質，產生水質惡化現象。地層下陷區域的地質結構，亦可能產生變化，後續若需進行公共建設工程，如橋樑、道路等，必須考量安全性增加工程施作的困難。地下水超量抽取的另一個影響，將造成海水入侵地下水水層，造成地下水水質及地質鹽化，水質將永久無法回復，對環境的傷害也將無法彌補。

蒐集國內歷年地下水水質分析相關文獻，其選用數據來源較侷限於 2003 年前的資料，因此為更能得到更具參考價值的資訊，本研究乃選用環保署區域性地下水監測井 2005 至 2006 年的監測結果。為了得到代表性的監測結果，環境監測所需費用通常很高，所以如何以有限之經費執行監測計畫，並能充分有效運用監測數據，得到正確的水質資訊，是相當重要的。因此本研究設法以不同分析方法，分析中部地區地下水水質，找出主要污染因子，可提供地下水污染防治工作參考。

二、文獻回顧

2.1 地下水水質污染對健康的影響

國內自來水的普及率尚未達 100%，民眾使用地下水水源為飲用的用途，仍為重要來源，因此地下水的水質若受到污染，恐影響民眾的健康甚鉅。台灣西南部沿海地區包括雲林、台南及嘉義等縣，早期即有民眾罹患烏腳病的病例，調查報告^[3]指出，雲林及台南縣地下水水中砷的污染仍然存在，建議需要持續監測地下水砷濃度，並控制民眾的污染暴露。

高雄市前鎮區因分布的產業結構複雜，數家石化工廠已營運數十年，高雄港務局管轄的碼槽區及加工出口區也位於本區，前鎮區仍然有不少民眾每天使用地下水。加油站早期地下油槽因設置不當而洩漏油品，污染部分地區地下水，加上工廠廢水和儲槽、管線洩漏對地下水污染的問題依舊存在。有研究報告^[4]評估本區所採集的地下水有揮發性有機污染物的污染，經健康風險評估後發現，若使用被污染的地下水為水源，將有致癌的風險，因此，政府相關單位不得忽視地下水的污染問題。

2.2 中部地區地下水水文水質調查研究

中部地區地下水超抽的情形，多年來即有許多調查報告指出，地下水若超量使用將會使地下水資源耗竭，沿海地區更易造成地層下陷，海水入侵等嚴重問題。謝氏^[5]研究濁水溪沖積扇扇端區的地下水因長期超抽，導致地下水水位持續下降，沿海地區地下水自噴現象已

不復見，彰化和美地區地下水總蘊藏量為 1458×10^6 立方公尺，流動量為 54.34×10^6 立方公尺/年，而地下水超抽量為 1.65×10^6 立方公尺/年，已造成部份地區有地盤下陷及水質惡化等情形。沿海地區的雲林縣北港、四湖、口湖、水林等鄉鎮，近年來養殖業興起，需要大量淡水供漁塭養殖使用，在水源需求下，漁民大量抽取地下水，造成口湖鄉的地下水水位，已低於海平面下 25 公尺。除了地下水水位的調查，劉氏^[6]將水質以不同方法分析如Piper 水質菱形圖、 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比值等方法，發現地下水水質有惡化情形，水質不良的地區以常發生於海水倒灌地區如植梧附近，水質明顯較差。

針對雲林地區水文地質，有學者^[7]研究北港溪源流區位於虎尾溪與北港溪連線以南的區域，地質主要以台南層堆積，泥質地層厚度高達 500 公尺以上，因為補注量少且泥層透水性差，其 T 值、K 值均低。濁水溪沖積扇則位於虎尾溪與北港溪連線以北的區域，主要可區分成三個分區：i. 扇頂區，位於西螺、惠來連線以東區域，舊河道最密集，屬於天然自由水區，T、K 值最高。ii. 扇央區，以扇頂區沿 2 m/min T 值等值線向西為界。東部區域河水、灌溉水及雨水之入滲多，西部區域則因位向斜谷，因而東、西兩側地層係數明顯較高。iii. 扇端區，地質以近期海進的堆積層為主，地層係數為沖積扇最低的區域，地層中多泥質，泥質質地軟弱鹽分又高，是主要造成本區地盤下陷及水質惡化的原因。

2.3 地下水水質特性分析研究

環境水體中水質監測項目眾多，為了解各類水體水質特性，可藉由統計方法找出代表性因子來建立水質指標，常使用的統計方法

有應用多變量統計分析的主成分分析、因子分析及群集分析等方法。在地下水綜合指標性的分析方法有 Stiff 水質形狀圖及 Piper 水質菱形圖法等方式。

屏東平原地下水水質變化情形，王氏^[8]研究報告提出，屏東平原地下水主要以 i.「海水入侵因子」 ii.「有機污染因子」 iii.「含水層質地因子」 iv.「還原性因子」四個因子具有代表性。以屏東附近沿海區域受這四個因子影響最大，並發現「海水入侵因子」顯示出海水有逐漸沿著海向陸地方向和分層入侵的現象。而「有機污染因子」顯示屏東平原地下水中，主要受到畜牧與生活廢水的排放影響。

高雄縣區域地下水水質特性，鄭氏^[9]研究報告提到，高雄縣區域地下水以主成分分析得到四個代表性因子，分別為 i.「鹽化因子」 ii.「礦物性因子」 iii.「鋅環境因子」 iv.「有機污染因子」，此四個因子可替代原高雄縣地下水質分析項目，可供解釋的整體變異量達 79.5%。而以群集分析探討顯示，高雄縣沿海部分區域的地下水有海水入侵和鹽化情形，而內陸地下水水質狀況一般優於沿海鄉鎮地區。此外，若以地下水污染指標分析方法如 Stiff 水質形狀圖及 Piper 水質菱形圖法分析，可以比較解釋水質污染特性及使用上的差異。

針對雲林沿海地區的地下水，郭氏^[10]以應用因子分析評估雲林沿海地區地下水質污染，分析結果顯示有兩個主要因子，可代表所有水質檢測項目，主要因子分別為 i.「海水鹽化因子」，是由總溶解固體量、電導度、硫酸鹽、氯鹽、鈉、鉀及鎂七個變量組成； ii.「砷污染因子」是由砷、總鹼度及總有機碳等三個變量組成，可解釋的整體變異量可達 78%

針對台北盆地、蘭陽平原、濁水溪沖積扇、嘉南平原、屏東平原與金門地區地下水，另有研究報告^[11]應用因子分析法、群集分析

法及Piper水質菱形圖法評估其地下水水質特徵。分析結果顯示，所有研究區域均顯示與鹽化因子有關，鹽化較嚴重的區域為濁水溪沖積扇、嘉南平原及屏東平原沿海地區。砷污染狀況較顯著的地區為蘭陽平原扇尾區、濁水溪沖積扇西南地區及嘉南平原。整體水質評估以台北盆地、蘭陽平原扇頂區及金門地區的地下水水質較其他地區良好。



三、研究方法

3.1 論文架構

本論文之研究流程如圖 1 所示，本研究主要以三種不同數據分析方法來探討中部地區地下水水質特性。首先進行數據蒐集，採用行政院環境保護署『全國環境水質監測資訊網』資料庫中地下水監測數據。將這些數據，分別利用多變量統計的因子分析方法，找出各區域地下水的主要因子；以 Stiff 水質形狀圖與 Piper 水質菱形圖分析各區域水質特性；進行中部地區地下水離子強度、總溶解固體與導電度迴歸計算，將其結果與文獻比較。將結果彙整之後，得到中部地區地下水水質特性結果，最後將所得結論進行論文撰寫。



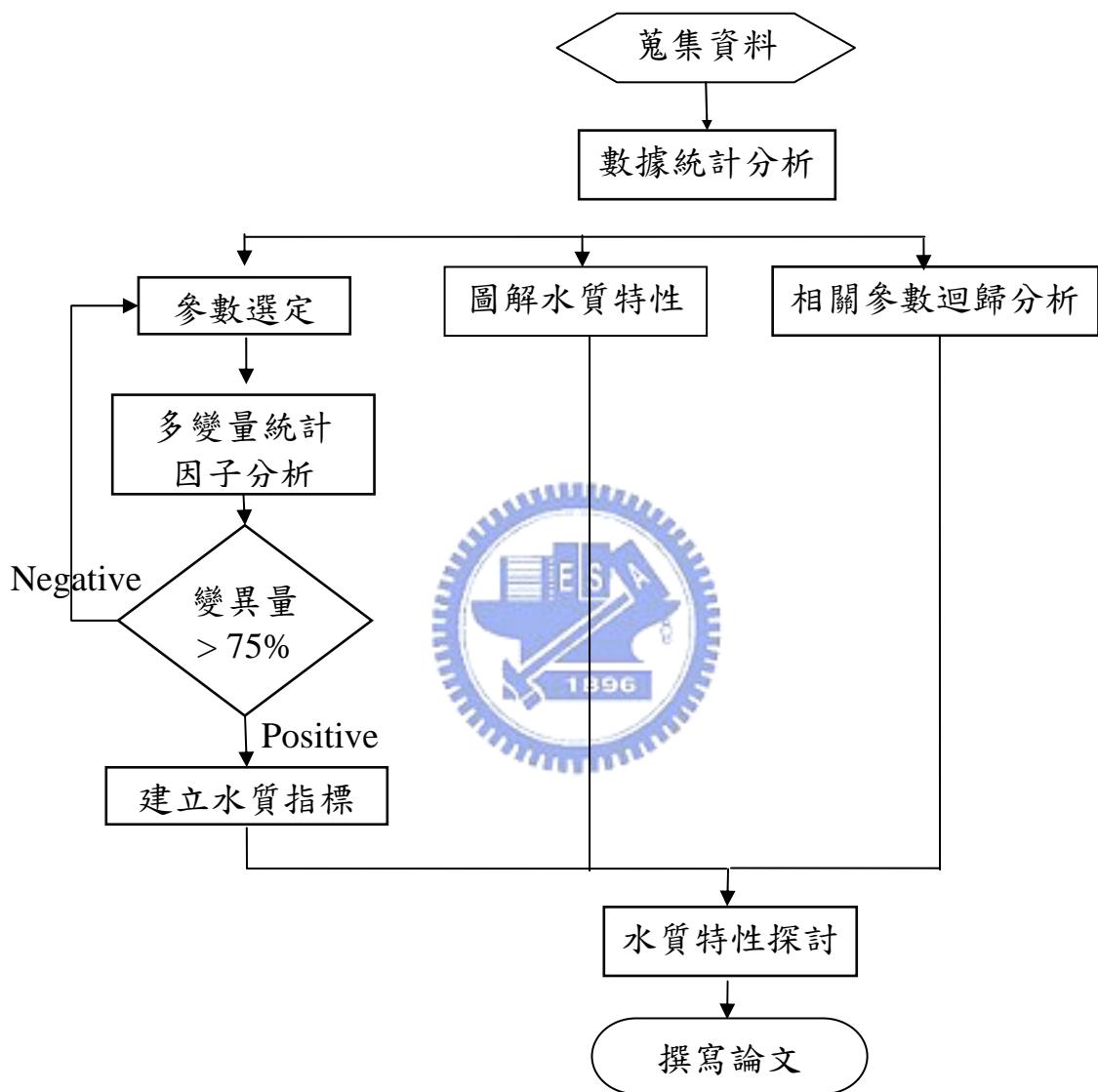


圖 1 論文研究流程圖

3.2 研究區域地理背景

本研究區域包括新竹苗栗沿海地區、台中地區及濁水溪沖積扇，以下略述研究範圍內地下水資源分區之相關背景狀況。

3.2.1 新竹苗栗臨海地區

本區在新竹縣市和苗栗縣境內屬第四紀地層所分布地區，北起鳳山溪、南至苗栗丘陵南端的火炎山（於大安溪北岸）。河川分布有鳳山溪、頭前溪、中港溪、後龍溪及西湖（烏眉）溪等，面積約1,000平方公里。本區可分為平原和台地性丘陵兩種類型。平原部分包含：新竹沖積平原、竹南平原、苗栗平原；台地性丘陵部分包括：飛鳳山丘陵、竹東丘陵、竹南丘陵及苗栗丘陵。本區的地形、地質複雜，平原部分地下水源尚稱豐富，丘陵部分均為第四紀更新世台地經侵蝕切割而成，因此大部分此類台地性丘陵多屬透水性不好的香山相頭崙山層分布，其特徵為地勢高，地下水來源少，出水量亦少。

3.2.2 台中地區

本區北起大安溪及其沖積扇，東自車籠埔斷層，南到八卦台地南端（近濁水溪），西止於八卦台地西緣和烏溪以北的台灣海峽，南北長約75公里，東西平均寬度約16公里，面積約1,200平方公里。本區有大安溪、大甲溪及烏溪三大流域，其中包括有盆地，合流沖積扇，海岸平原，和台地四種類型的地下水區。

台中盆地南北細長，北起大甲溪，南至名間附近，東以車籠埔逆斷層為界，西為大肚和八卦台地東緣。盆地地勢以大肚橋附近

為最低（盆底），地面標高約 25 公尺，台中市以北為大甲溪古沖積扇（又稱豐原沖積扇），扇頂的豐原附近標高約 260 公尺，扇端的台中市附近約 50 - 60 公尺；太平、霧峰間為大里溪合流沖積扇；霧峰西南為烏溪沖積扇，扇頂的烏溪大橋附近約 95 公尺，因此盆地北部的筏子溪、旱溪等水系，中部的大里溪水系，和南部烏溪、貓羅溪等水系均向盆地的烏日、大肚橋匯流，地下水系亦然。台中盆地地下水資源以烏日南方的烏溪、大里溪匯流點附近最為豐富，地下水資源大致與台北盆地相似；唯台北盆地在地面上至主要受壓含水層間有很厚的砂土質松山層，使出水量較多而且穩定，也少受污染；台中盆地地面上則為新舊沖積扇堆積物，多自由水，地下水容易受污染，水質較差。



3.2.3 濁水溪沖積扇區

彰化雲林地區可分為三個地下水系，北部洋子厝溪以北面積約 100 平方公里為和美地下水系，東南部虎尾溪（北港溪上游）以南，面積約 200 平方公里為北港溪源流區，均與濁水溪水系無關。彰化雲林地區其餘約 1,700 平方公里則是一般所稱的『濁水溪沖積扇』地下水系，所涵蓋地區多曾為濁水溪下游河道分流散布的範圍。本區地下水資源豐富，永續性出水量（即通稱的安全出水量）約為每年 15 億噸。其地下水主要來自濁水溪的河道滲透，也有扇面上各種水如雨水、灌溉水等的滲透。

濁水溪沖積扇北起洋子厝溪，南迄虎尾溪—北港溪，以彰雲大橋東側標高 100 公尺附近為扇頂，向西扇形開展，扇端到達海岸。濁水溪流域在扇頂以東的中、上游集水區面積 2,977 平方公里，包括中央山脈中段的西坡、玉山和阿里山的北端、雪山山脈的

南端。近 200 年來曾以舊濁水溪（麥嶼厝溪）、新虎尾溪、舊虎尾溪、虎尾溪、西螺溪（今濁水溪）等為主流，得以形成沖積扇。這些舊河道均為濁水溪下游的分流，舊河道透水性較佳，如葉脈狀，係沖積扇上重要的地下水流通道，因此地下水源豐富，但民國六十年前後在標高 5 公尺的扇端能看到的湧泉已無蹤影。



表 1 台灣地區水資源分區與地下水資源分區

水資源分區			地下水資源分區			
區域	面積 (平方公里)	範圍	區別	面積 (平方公里)		占全區域 %
北部	7347	台北市、縣 基隆市 宜蘭縣 桃園縣 新竹縣	台北盆地 蘭陽平原 桃園中壢台地 新苗地區(新竹部份)	380 400 1090 540	2410	33
		苗栗縣 台中縣、市 南投縣 彰化縣 雲林縣	新苗地區(苗栗部份) 台中地區 濁水溪沖積扇	300 1180 1800	3280	31
		嘉義縣 台南縣、市 高雄市、縣 屏東縣 澎湖縣	嘉南平原 屏東平原	2520 1130	3650	36
		花蓮縣 台東縣	花東縱谷	930	930	11
		合計	36002		10270	29

資料來源：經濟部水利署 <http://www.wra.gov.tw>

3.3 數據來源

本研究之數據資料來源乃引用行政院環境保護署，環境監測及資訊處之『全國環境水質監測資訊網』資料庫數據，摘錄 94 年至 95 年中部地區地下水水質監測數據，監測項目包括水溫、pH、導電度(EC)、總硬度(TH)、總溶解固體(TDS)、氯鹽(Cl⁻)、氨氮(NH₃-N)、硝酸鹽氮(NO₃⁻-N)、硫酸鹽(SO₄²⁻)、總有機碳(TOC)、鎘(Cd)、鉛(Pb)、鉻(Cr)、砷(As)、銅(Cu)、鋅(Zn)、鐵(Fe)、錳(Mn)、鈉(Na)、鉀(K)、鈣(Ca)、鎂(Mg)、鹼度等共 23 個項目。地下水監測井之分布為苗栗縣 37 口監測井、台中縣 10 口、台中市 4 口、南投縣 2 口、彰化縣 19 口、雲林縣 11 口，共有 83 口地下水監測井。各監測井之分布如圖 2 所示，各監測站名稱及位置詳列於表 2。



圖 2 中部地區地下水監測井分布

表 2 中部地區地下水監測井測站位置

區域	設置點	井站名稱	設置日期
苗栗縣	竹南鎮	苗栗種畜繁殖所	89年6月10日
苗栗縣	竹南鎮	大埔國小	89年6月10日
苗栗縣	頭份鎮	建國國中	89年6月11日
苗栗縣	頭份鎮	后庄國小	89年6月11日
苗栗縣	頭份鎮	新興國小	89年6月12日
苗栗縣	竹南鎮	竹南國小	89年6月10日
苗栗縣	頭份鎮	六合國小	89年6月12日
苗栗縣	頭份鎮	僑善國小	89年6月12日
苗栗縣	竹南鎮	海口國小	89年6月11日
苗栗縣	後龍鎮	外埔國小	89年6月13日
苗栗縣	後龍鎮	後龍海濱遊憩區	89年6月13日
苗栗縣	後龍鎮	成功國小	89年6月21日
苗栗縣	後龍鎮	溪洲國小	89年6月23日
苗栗縣	造橋鄉	造橋國小	89年6月22日
苗栗縣	頭份鎮	尖山國小	89年6月22日
苗栗縣	後龍鎮	新港國小	89年6月20日
苗栗縣	通霄鎮	啟明國小	89年6月14日
苗栗縣	頭屋鄉	頭屋國小	89年6月22日
苗栗縣	苗栗市	苗栗國中	89年6月21日
苗栗縣	苗栗市	苗栗農工職校	89年6月16日
苗栗縣	通霄鎮	新埔國小	89年6月14日
苗栗縣	公館鄉	鶴岡國小	89年6月15日
苗栗縣	苗栗縣	五穀國小	89年6月16日
苗栗縣	通霄鎮	通霄精鹽廠	89年6月18日
苗栗縣	銅鑼鄉	中興國小	89年6月15日
苗栗縣	通霄鎮	五福國小	89年6月15日
苗栗縣	竹南鎮	照南國小	83年4月16日
苗栗縣	頭份鎮	頭份國中	89年6月13日
苗栗縣	後龍鎮	大山國小	88年1月14日
苗栗縣	後龍鎮	後龍國中	88年1月15日
苗栗縣	苗栗市	苗栗縣立體育場	88年1月24日
苗栗縣	苗栗市	建功國小	89年6月16日
苗栗縣	西湖鄉	西湖國小	88年1月19日
苗栗縣	公館鄉	公館國小	88年1月22日
苗栗縣	銅鑼鄉	銅鑼國小	88年1月23日
苗栗縣	通霄鎮	通霄國中	88年1月24日
苗栗縣	苑裡鎮	苑裡國小	88年1月15日
台中市	南屯區	東興國小	85年9月9日
台中市	漢口路	中華國小	85年9月6日
台中市	南屯區	鎮平國小	85年10月18日
台中市	台中路	台中國小	85年10月5日
台中縣	大甲鎮	華龍國小	84年2月28日
台中縣	大安鄉	大安國中	85年10月20日

(接下頁)

表 2 中部地區地下水監測井測站位置(續)

區域	設置點	井站名稱	設置日期
台中縣	清水鎮	清水國小	84年4月20日
台中縣	梧棲鎮	梧南國小	84年2月11日
台中縣	龍井鄉	龍港國小	85年10月17日
台中縣	大肚鄉	大肚國小	85年10月13日
台中縣	烏日鄉	僑仁國小	85年9月11日
台中縣	大里市	大里國小	85年10月9日
台中縣	霧峰鄉	四德國小	85年9月16日
台中縣	烏日鄉	喀哩國小	85年9月13日
南投縣	草屯鎮	敦和國小	89年7月23日
南投縣	南投市	平和國小	89年9月23日
彰化縣	彰化市	大竹國小	89年8月3日
彰化縣	彰化市	快官國小	89年8月3日
彰化縣	竹塘鄉	竹塘國小	89年7月22日
彰化縣	北斗鎮	螺陽國小	89年8月1日
彰化縣	二林鎮	中正國小	89年7月21日
彰化縣	埤頭鄉	埤頭國小	89年7月22日
彰化縣	彰化縣	社頭國小	89年8月2日
彰化縣	芳苑鄉	芳苑工業區服務中	89年7月20日
彰化縣	二林鎮	萬興國小	89年7月21日
彰化縣	員林鎮	員東國小	89年8月2日
彰化縣	芳苑鄉	新寶國小	89年7月19日
彰化縣	溪湖鎮	溪湖國小	89年7月21日
彰化縣	埔鹽鄉	新水國小	89年7月21日
彰化縣	大村鄉	大村國中	89年8月2日
彰化縣	秀水鄉	華龍國小	89年8月3日
彰化縣	鹿港鎮	文開國小	89年7月22日
彰化縣	鹿港鎮	東興國小	84年4月26日
彰化縣	線西鄉	線西國小	89年7月23日
彰化縣	伸港鄉	伸東國小	89年7月23日
雲林縣	口湖鄉	文光國小	90年10月
雲林縣	口湖鄉	口湖國小	86年9月11日
雲林縣	北港鎮	青蚶分校	
雲林縣	大埤鄉	育英國小	86年9月01日
雲林縣	東勢鄉	仁和國小	86年9月2日
雲林縣	虎尾鎮	明倫國小	86年9月23日
雲林縣	台西鄉	大屯國小	86年9月23日
雲林縣	虎尾鎮	台西國小	86年9月23日
雲林縣	二崙鄉	平和國小	86年9月23日
雲林縣	二崙鄉	二崙國小	86年9月23日
雲林縣	麥寮鄉	大同國小	86年9月23日
雲林縣		橋頭國小	86年9月9日

各監測井監測頻率為每季執行一次，蒐集兩年間的數據，計有 8 季次共 664 筆數據，其中苗栗縣計有 296 筆數據；台中縣有 80 筆數據；台中市有 32 筆數據；南投市有 16 筆數據；彰化縣有 152 筆數據；雲林縣有 88 筆數據。各監測項目之採樣及分析方法均按照環保署公告方法執行，茲將採樣過程步驟，簡述如下。

1. 紀錄洗井記錄：

- i. 量測井管內徑、地下水位、井深高度、計算井水深度、計算井水體積，並記錄於現場採樣記錄表中。
- ii. 計算井水深度：

井水深度 (m) = 井底至井口深度 - 水位面至井口深度

iii. 記錄井水體積

直徑 2 吋監測井 井水體積 (L) = $2.0 \times$ 井水深度 (m)

直徑 4 吋監測井 井水體積 (L) = $8.1 \times$ 井水深度 (m)



2. 洗井

- i. 洗井時可採用貝勒管或採樣泵進行，使用可調整汲水速率之泵較能節省時間，洗井汲水速率應小於 2.5 L/min，以適當流速抽除 3 至 5 倍的井柱水體積，大致可將井柱之水抽換，以取得代表性水樣。
- ii. 校正現場測定儀器：pH 計、導電度計、(溶氧計、氧化還原電位計)。依照儀器標準作業程序進行校正。
- iii. 洗井汲水開始時，量測並記錄汲出水的溫度、pH 值、導電度及現場量測時間、依實際情況需求可配合執行溶氧、氧化還原電位之量測，同時觀察汲出水有無顏色、異樣氣味及雜質等，並作記錄。開

始洗井時，以小流量抽水，並記錄抽水開始時間。洗井過程中需繼續量測汲出水的溫度、pH 值、導電度、依實際情況需求可配合執行溶氧、氧化還原電位之量測，同時觀察汲出井水之顏色、異樣氣味，及有無雜質存在，並於洗井期間現場量測至少五次以上，直到最後連續三次符合各項參數之穩定標準，若已達穩定，則可結束洗井。

iv.所有洗井工作完成後，須以乾淨的刷子和無磷清潔劑清洗洗井器具，並用去離子水沖洗乾淨。所有清洗過器具的水須置於裝「清洗器具用水」的容器中，不可任意傾倒或丟棄。

3.採樣

i.採樣應在洗井後兩小時內進行為宜，若監測井位於低滲透性地質，洗井後，待新鮮水回補，應儘快於井底採樣，較具代表性。洗井時，若以 0.1~0.5 L/min 速率汲水，洩降超過 10 cm，或以貝勒管汲水且能把水抽乾，則屬於低滲透性地質之監測井。

ii.採樣前以乾淨的刷子和無磷清潔劑清洗所有的器具，並用試劑水沖洗乾淨，其清洗程序為：

- a.用無磷清潔劑擦洗設備
- b.用試劑水沖乾淨
- c.用甲醇清洗
- d.陰乾或吹乾

需清洗之設備，應包括：水位計、貝勒管、手套、繩子、採樣泵、汲水管線。

iii.換採樣點時應對採樣設備(貝勒管及採樣泵)做一設備清洗空白，其方法是將試劑水導入清潔之採樣設備及其採樣管線中，再將試劑水

移入樣品瓶中，依規定加入保存劑後，密封之，再與樣品一起攜回實驗室。

iv.如以貝勒管採樣，應將貝勒管放置於井篩中間附近取得水樣，且貝勒管在井中的移動應力求緩緩上升或下降，以避免造成井水之擾動，造成氣提或曝氣作用。

v.如以原來洗井之採樣泵採樣，則待洗井之水質參數穩定後，在不對井內作任何擾動或改變位置的情形下，維持原來洗井之低流速，直接以樣品瓶接取水樣。

vi.開始採樣時，記錄採樣開始時間。並以清洗過之貝勒管或採樣泵及其採樣管線，取足量體積的水樣，裝於樣品瓶內。並填好樣品標籤，貼於樣品瓶上。

vii.檢驗項目中有揮發性有機物者，其採樣設備材質應以鐵弗龍為佳，並且貝勒管應採用控制流速底面流出配件，使水樣由貝勒管下的底面流出配件之噴嘴流出，須裝滿瓶子，倒置測試是否無氣泡產生。

viii.依監測項目需求水樣應依照下列順序進行採樣：

a.溶解性氣體及總有機碳。

b.金屬。

c.主要水質項目之陽離子及陰離子。

3.4 數據分析

本研究採用三種數據分析方法：(i)應用統計方法中主成份分析，找出主要因子並建立水質指標；(ii)以 Stiff 水質形狀圖法及 Piper 水質菱形圖法分析水質特性；(iii)以迴歸方式分析，探討離子強度、導電度及總溶解固體間之關係。

3.4.1 因子分析 (Factor Analysis)

以統計軟體進行數據多變量統計，應用因子分析方法，得到主要影響因子，以瞭解各區域地下水水質特性。

因子分析^[12]最早起源於心理學(約於 1904 年左右)，因為心理學的研究領域中，有些較難直接量測，例如道德、操守等因子，而實際上這些因子也較模糊，希望藉由可測量到之變數而訂出這些因子。因子分析是欲以少數幾個因子來解釋一群相互之間有關係存在的變數的數學模式。其為主成分的擴展，能夠提供到更多不同的新變數，可讓我們對於原來的結構有更多了解與解釋。且與主成分分析(Principal Components Analysis (PCA))相同，均是針對內部相關性高的變數做資料的簡化，它們將每個變數相同看待，而無應變數與獨立變數，此為與迴歸分析不同之處。因子分析主要是選取因子，它能解釋原變數之間的相關情形，以下針對因子分析模式架構說明：

1.因子負荷(Loading)

因子分析是將 p 個變數 $x_1 \sim x_p$ 的每一個變數 x_1 分解成 q 個 ($q \leq p$) 共同因子(Common Factor) $f_j, j=1, \dots, q$ ，與獨特因子(Specific Factor) ε_i 的線性組合。因子分析的模式為：

$$\begin{aligned}
 \chi_1 &= \mu_1 + l_{11}f_1 + l_{12}f_2 + \dots + l_{1q}f_q + \varepsilon_1 \\
 \chi_2 &= \mu_2 + l_{21}f_1 + l_{22}f_2 + \dots + l_{2q}f_q + \varepsilon_2 \\
 &\quad \vdots \\
 &\quad \vdots \\
 \chi_p &= \mu_p + l_{p1}f_1 + l_{p2}f_2 + \dots + l_{pq}f_q + \varepsilon_p
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中 $f_1 \dots f_q$ 是共同因子，他們在每一變數 x_i 中都共同擁有，而 ε_i 是獨特因子，只有在第 i 個變數才擁有。 l_{ij} 為第 i 個變數 x_i 在第 j 個共同因子 f_j 的因子負荷（或簡稱負荷，Loading）。當資料標準化時，因子間是獨立且每個變數間都是標準化時，因子負荷即等於相關係數，因子負荷值越高表示主因子與變量數間，有著越高的相關性。

2. 變異最大旋轉法

由於因子真正的原點在因子空間是任意的，不同的旋轉會產生相同的相關矩陣，所以想辦法做旋轉，使因子結構有更簡單的解釋，也就是因子負荷不是很大就是小，這樣對每個因子都只有少數幾個顯著大的負荷變數，在解釋上較容易。最常用的旋轉方式是凱莎提出的變異最大旋轉法 (Varimax)。

設未旋轉前的因子負荷表如下表：

	f_1	f_2	\cdots	f_q	h_i^2
x_1	l_{11}	l_{12}	\cdots	l_{1q}	$\sum_{j=1}^q l_{1j}^2$
x_2	l_{21}	l_{22}	\cdots	l_{2q}	$\sum_{j=1}^q l_{2j}^2$
\vdots			\vdots		
x_p	l_{p1}	l_{p2}	\cdots	l_{pq}	$\sum_{j=1}^q l_{pj}^2$

為使每一列 $[l_{ij}]$ 中只有一個元素接近 1，而大部分其他的元素接近 0，因每一變數 x_i 的共通性 $h_i^2 = \sum_{j=1}^q l_{ij}^2$ 可能不同，所以 L 的每一列都除以 h_i ，因此有時亦稱為單位化的變異最大旋轉法(Normalized Varimax Rotation)即使下式最大：



$$\sum_{j=1}^q \left\{ \frac{\sum_{i=1}^p \left(\frac{l_{ij}^2}{h_i^2} \right)}{p} - \left[\frac{\sum_{i=1}^p \left(\frac{l_{ij}^2}{h_i^2} \right)}{p} \right]^2 \right\} \quad (2)$$

3. 確定主因子

(1) 特徵值 (Eigenvalue)

各因子的變異數等於其對應的特徵值，特徵值的名稱是來自於數學上矩陣的特徵值。每一因子量測得到多少變異數後，則可計算有幾個因子的變異數和(累積變異量)可以達到全部變異量總和的百分比，一般來說以不超過 5 至 6 個因子，就能解釋原有變異數達 70% 以上時，所得結果就已令人滿意。

(2) 凱莎 (Kaiser) 準則

因子分析後所得特徵值列表，保留特徵值大於 1 的因子，即除非選取的因子比原來變數解釋的還多，否則不取，這是凱莎 (1960) 提出的，也是最常被用來做選取因子個數的準則。

(3) 陡坡圖 (Scree) 檢驗

陡坡圖是 Cattell(1966)提出的一種圖形判斷方法，將特徵值與因子繪製散佈圖，特徵值為 Y 軸，因子為 X 軸，Cattell 建議當特徵值開始很平滑下降時，就不取用。

3.4.2 水質特性分析

以 Stiff 水質形狀圖法及 Piper 水質菱形圖法分析中部地區地下水水質特性，並分區比較水質特性之差異。Stiff 水質形狀圖可顯示水質中陰陽離子濃度平衡狀態，特徵相似的圖相代表水中離子組成相似，並可瞭解水質變化情形。而 Piper 水質菱形圖區分為五區代表水質化學相的型態，可歸類水質屬性特徵，可將不同水樣繪於同一張圖，相似的水樣將會位於相鄰的位置，利於綜合研判分析水質特性。

此兩種水質特性分析方法優點為，可利用圖形方式簡易評估水質特徵與水質屬性，缺點為水中陰陽離子部分測項有闕漏時，即無法以此種方式評估，另外有些水質測項如重金屬等，不在此方法研判之項目，若需整體評估水質受污染狀況，需再進行其他方式的評估。以下就 Stiff 水質形狀圖及 Piper 水質菱形圖的原理分別敘述：

1. Stiff 水質形狀圖法之原理概述

Stiff 水質形狀圖係採取地下水中常見之四種主要陰離子氯離子

(Cl⁻)、硫酸根 (SO₄²⁻)、碳酸根 (CO₃²⁻)、碳酸氫根 (HCO₃⁻) 及四種主要陽離子鉀 (K⁺)、鈉 (Na⁺)、鈣 (Ca²⁺)、鎂 (Mg²⁺) 離子等，將之分為陰陽離子各三行，每行之間有固定間隔。計算各離子之當量濃度含量，分別依序畫出代表上述離子之點 (Na⁺ 及 K⁺、HCO₃⁻ 及 CO₃²⁻ 合併計算) 後，將六點連結即得一不規則之六邊形，由此一六邊形之圖形特徵即可顯示水樣水質之特性。若 Stiff 圖之形狀相似，則其水質特性亦相似，另一方面也可瞭解地下水之水質組成含量及陰陽離子平衡狀態。

2. Piper 水質菱形圖法之原理概述

此法係利用水中常見之四種主要之陰陽離子，一共為八種離子，作為水質結構分類之依據，水中之鹼金屬 (Na⁺ + K⁺) 與碳酸根與碳酸氫根 (CO₃²⁻ + HCO₃⁻)，或鹼土金屬 (Ca²⁺ + Mg²⁺) 與硫酸根與氯離子 (SO₄²⁻ + Cl⁻)，計算其當量濃度佔各該陰陽離子之百分比，點繪於水質菱形圖上，該圖之右下方有一三角形，其三邊分別代表 Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻ + HCO₃⁻ 等陰離子。其左下方另有一同樣之三角形，其三邊分別代表 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ + K⁺ 等陽離子。因此每一水樣可依其成分佔總濃度百分比分別在左右兩個三角形各標定一點。由此二點分別作平行線，此二線交於圖上方菱形內之一點，此點即代表該水樣之水質。水質菱形圖中，一圖可同時繪上若干個水樣，相似之水樣，往往位於相鄰之位置。在菱形圖上之四邊各取其中心點 (50% meq/L)，對邊互相連線，即可將菱形圖分割成 I 、II 、III 、IV 、V 等五個區塊，如圖 3 所示。各區塊之水質特性分別說明如下：

I 區：為鹼土類碳酸氫鹽類，以碳酸氫鈣 (Ca(HCO₃)₂) 及碳

酸氫鎂 ($Mg(HCO_3)_2$) 為主。主要由於碳酸之雨水滴溶含鈣、鎂之岩石所致，故化學相為未遭受污染之正常地下水。一般在於淺層自由含水層，雨水及河水等皆在此範圍內。

II 區：為鹼金類碳酸氫鹽類，以碳酸氫鈉 ($NaHCO_3$) 為主，未受污染之深層正常地下水或拘限含水層地下水屬此範圍。

III 區：為鹼土類非碳酸氫鹽類，硫酸鈣 ($CaSO_4$)、硫酸鎂 ($MgSO_4$)、氯化鈣 ($CaCl_2$)、氯化鎂 ($MgCl_2$) 為主。受農業活動污染地下水、工礦業、硬水及火山活動區等地下水(溫泉水)，均屬於此區範圍。

IV 區：為鹼金類非碳酸氫鹽類，以硫酸鈉 (Na_2SO_4) 或氯化鈉 ($NaCl$) 為主，海水污染與海岸地區地下水等在此區範圍。

V 區：為中間型，已遭受污染但屬輕微，常分別併入 II 、 III 類。



3.4.3 離子強度、導電度及總溶解固體間之關係

將離子強度，導電度，總溶解固體 (TDS) ，各項數據利用統計軟體 (SPSS) 進行迴歸分析，得到參數間之相關性。

1.離子強度

離子強度代表溶液中離子的電性強弱的程度。為了描述溶液之電場強度即離子間相互作用的程度，路易斯 (G.N. Lewis) 和藍達 (M. Randall)^[13] 定義一個叫做離子強度 (ionic strength) 的參數，以符號 μ 代表，溶液中個別離子的強度為其濃度 (C_i) 與其電荷 (Z_i) 平方之乘積之二分之一，溶液總離子強度 (μ) 為個別離子強度之總和。離子強度代表溶液中任意一個離子周遭的靜電力干擾程度。

$$\mu = \text{ionic strength} = 1/2 \sum (C_i Z_i^2) \quad (3)$$

此處 C_i =離子物種 i 的濃度

Z_i =離子物種 i 的電荷



2.導電度

水之導電度係衡量電流通過溶液的能力，這是溶液之離子性質，其數值大小與水中電解質之總濃度、移動速度與溫度有關。故溶解物質之性質及濃度，以及水中之離子強度等均能影響導電度。導電度之單位為 $\mu\text{mho}/\text{cm}$ (25°C)，導電度之測值會隨溫度而改變，故一般測定時以 25°C 為標準溫度。

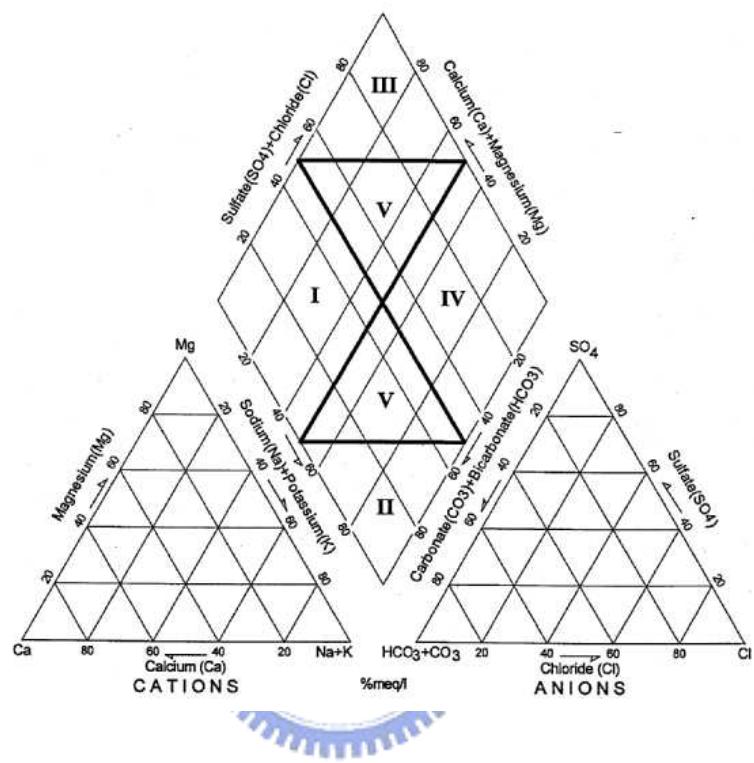


圖 3 地下水水質 Piper 菱形圖分區示意圖

3.導電度及總溶解固體與離子強度之關係

在複雜溶液中如果要得到該溶液的離子強度，必須逐一測定該溶液之陰陽離子濃度，這是繁瑣且成本高昂的工作，而 Langelier^[14] 及 Russell^[15] 提出兩項經驗式，可由水中導電度及總溶解固體量來推估離子強度：

Langelier 提出以下之近似式：

$$\mu = 2.5 \times 10^{-5} \times \text{TDS} \quad (4)$$

此處 μ ：水中之離子強度

TDS：水中之總溶解固體物濃度 (mg/L)

Russell 由 13 種組成差異極大的水樣，推導出下列離子強度與導電度間的關係式：


$$\mu = 1.6 \times 10^{-5} \times \text{Conductivity} \text{ (} \mu\text{mho/cm)} \quad (5)$$

而上二式相除，可得

$$\text{TDS (mg/L)} = 0.64 \times \text{Conductivity (} \mu\text{mho/cm)} \quad (6)$$

因此，水樣中之離子濃度(TDS)可自電導度乘以一因數來估計。

四、結果與討論

本研究以三種方式，探討中部地區各區域地下水水質特性，分別為：(i)應用統計方法中因子分析，找出主要因子並建立水質指標；(ii)以 Stiff 水質形狀圖法及 Piper 水質菱形圖法分析水質特性；(iii)以迴歸方式分析，探討離子強度、導電度及總溶解固體間之關係。以下則分別說明所得之結果。

4.1 地下水水質因子分析結果

本小節以多變量統計方法中之因子分析法，找出主要因子，分別探討中部地區各區域之地下水水質特性。中部地區的區域性監測井其中 83 口，具備較為完整之監測數據，因此選用此 83 口監測井 8 季次監測數據 (94 至 95 年每季監測一次)，並將 21 項監測項目作為輸入之統計變量數，包含一般項目之導電度、總硬度、總溶解固體、總有機碳；陽離子項目之氯氮、砷、鎬、鉛、鉻、銅、鋅、鐵、錳、鈉、鉀、鈣、鎂；以及陰離子項目氯鹽、硫酸鹽、硝酸鹽氮、鹼度等。本研究區域含括中部六縣市，其中部分縣市監測井數量較少，故依地理位置分布，將研究區域分成四個區域探討，分別為苗栗縣、台中/南投(包含台中縣、台中市及南投縣)、彰化縣及雲林縣四個區域。

各研究區域主要因子選取以其特徵值大於 1 為選取原則，因子負荷表列中，因子負荷值越高表示主因子與變量數間，有著越高的相關性。本研究將因子負荷值分成四個範圍，當負荷值小於 0.3 時為無顯著相關；當負荷值介於 0.3 至 0.5 時為弱相關；當負荷值介於 0.5 至 0.75 時為中度相關；當負荷值大於 0.75 時為強度相關。

4.1.1 苗栗縣地下水水質因子特性分析

苗栗縣地下水水質各因子轉軸後特徵值大於 1 共有 5 個因子，其總體累積變異量可達 78.56% ，如表 3 所示，而陡坡圖如圖 4 所示。轉軸後因子負荷表及共通性如表 4 所示。由表 3 與表 4 顯示因子一的導電度、硬度、TDS、氯鹽、硫酸鹽、鈉、鉀及鎂，呈現高度相關，鈣則呈現中度相關，因子變異量達 37.46 % ，海水中鈉、鉀、鎂、硫酸鹽及氯鹽與淡水差異很大，而導電度與水中離子濃度（以 TDS 濃度值代表）有直接相關性，因此本因子與海水的相關性大，可歸類為「鹽化因子」，藉由本因子之監測項目，可瞭解地下水是否受海水入侵而有鹽化的影響。因子二的氨氮、 TOC 及砷呈現高度相關，因子變異量為 12.70 % 。曾有學者 Harvey et al.^[16] ，提出無機碳與地下水中砷存在具關聯性，另畢氏^[17] 亦指出，吸附或錯合於腐植物質（以 TOC 濃度代表）的砷，可能會因腐植物質溶解伴隨著溶於水中，因苗栗縣地下水的砷濃度均很低，而氨氮與 TOC 一般均認為是人為有機性污染，因此本因子歸類為「有機性污染因子」。因子三的鐵、錳呈現高度相關，因子變異量為 10.17 % ，鐵、錳於台灣地區地下水一般濃度均有較高的情形，因為地質中的鐵錳礦物，長時間受地下水層溶出產生平衡相，若於缺氧的環境下會氧化成 Fe^{2+} 及 Mn^{2+} ，於氧化狀態則成 Fe^{3+} 及 Mn^{3+} 沉澱，本因子可歸類為「礦物性因子」。因子四的鹼度、鈣呈現高度至中度相關，因子變異量為 9.40 % ，鹼度代表碳酸氫根與碳酸根濃度一般以 $CaCO_3$ 表示，與鈣濃度呈現正相關，這是一般地下水水質特性，因此不將此因子列為主要因子。因子五的鎘、銅及鉛呈現高度相關，因子變異量為 8.83 % 。苗栗縣地下水中鎘、鉛及銅濃度極低，幾乎低於方法偵測極限（數 ppb ），因此不將此因子列為主要因子。

表 3 苗栗縣地下水水質轉軸後特徵值與變異量

因子	特徵值	變異量(%)	累積變異量%
1	7.867	37.46	37.46
2	2.667	12.70	50.16
3	2.136	10.17	60.33
4	1.974	9.40	69.74
5	1.854	8.83	78.56

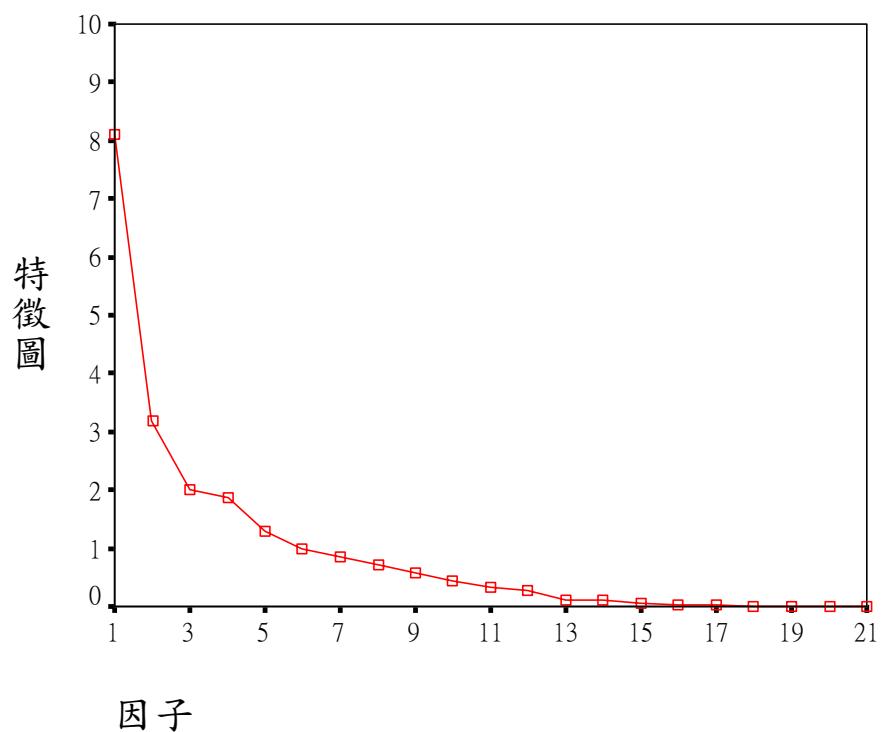


圖 4 苗栗縣地下水水質因子陡坡圖

表 4 苗栗縣地下水水質轉軸後因子負荷表及共通性

變量數	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	共同性
導電度	0.990	0.003	-0.024	0.097	-0.024	0.991
硬度	0.933	0.021	-0.018	0.232	-0.027	0.926
TDS	0.977	0.006	-0.018	0.078	-0.024	0.961
氯鹽	0.987	-0.003	-0.044	0.051	-0.027	0.980
氯氣	0.066	0.937	-0.005	0.036	0.024	0.884
硝酸鹽氮	-0.051	-0.099	-0.287	-0.659	0.150	0.551
硫酸鹽	0.776	-0.102	0.270	0.188	-0.006	0.720
TOC	-0.082	0.847	0.040	0.233	0.123	0.795
鹼度	-0.012	0.332	-0.130	0.853	-0.019	0.856
鈉	0.990	-0.007	-0.038	0.063	-0.024	0.985
鉀	0.989	-0.004	-0.058	0.065	-0.008	0.987
鈣	0.591	0.018	-0.067	0.692	-0.002	0.832
鎂	0.979	0.017	-0.005	0.106	-0.021	0.970
鐵	0.009	0.275	0.933	-0.091	0.003	0.954
錳	-0.008	0.014	0.970	-0.009	0.023	0.941
砷	0.020	0.886	0.332	0.004	0.023	0.896
鎘	-0.033	0.269	0.033	-0.093	0.788	0.704
鉻	0.437	0.034	-0.023	-0.188	-0.104	0.239
銅	-0.068	-0.017	-0.022	0.081	0.767	0.600
鉛	-0.028	-0.044	0.003	-0.077	0.768	0.598
鋅	-0.094	0.059	0.167	-0.294	-0.034	0.128

4.1.2 台中/南投地下水水質因子特性分析

台中/南投地下水水質各因子轉軸後特徵值大於 1 共有 7 個因子，其總體累積變異量可達 76.90% ，如表 5 所示，而陡坡圖如圖 5 所示。轉軸後因子負荷表及共通性如表 6 所示。由表 5 與表 6 顯示，因子一的導電度、硬度、 TDS 、硫酸鹽及鈣呈現高度相關，鹼度、鋅則呈現中度相關，因子變異量達 24.51 % ，地下水中的離子濃度 (TDS 、硫酸鹽) 與導電度測值呈正比，硬度組成包括鈣硬度，因此本因子為地下水之特性。因子二的鈉、鉀、砷及鹼度呈現高度至中度相關，因子變異量為 14.96 % ，因子三的氯氣、錳及鹼度鉛呈現高度至中度相關，因子變異量為 10.18 % ，因子四的氯鹽、鐵、錳及鋅呈現中度相關，因子變異量為 8.57 % ，因子五的鎘、銅及鉛呈現高度至中度相關，因子變異量為 7.63 % ，因子六的 TOC 呈現高度相關，因子變異量為 5.66 % ，通常自然水體中有機物含量較低，若水中有機污染物濃度增加，即可能為人為的污染，例如生活污水或工業污染，因此本因子可歸類為「有機性污染因子」。因子七的鉻呈現高度相關，因子變異量為 5.39 % ，本區域地下水鉻濃度極低，本因子不列入主要因子。

本區域所得的因子數量較多，顯示本區域地下水的特性較無法歸納成簡單因子，後續研究可根據本因子分析結果再進行群集分析，近一步得到台中南投地區地下水之水質特性。

表 5 台中/南投地下水水質轉軸後特徵值與變異量

因子	特徵值	變異量(%)	累積變異量%
1	5.148	24.51	24.51
2	3.141	14.96	39.47
3	2.137	10.18	49.65
4	1.801	8.57	58.22
5	1.602	7.63	65.85
6	1.188	5.66	71.51
7	1.132	5.39	76.90

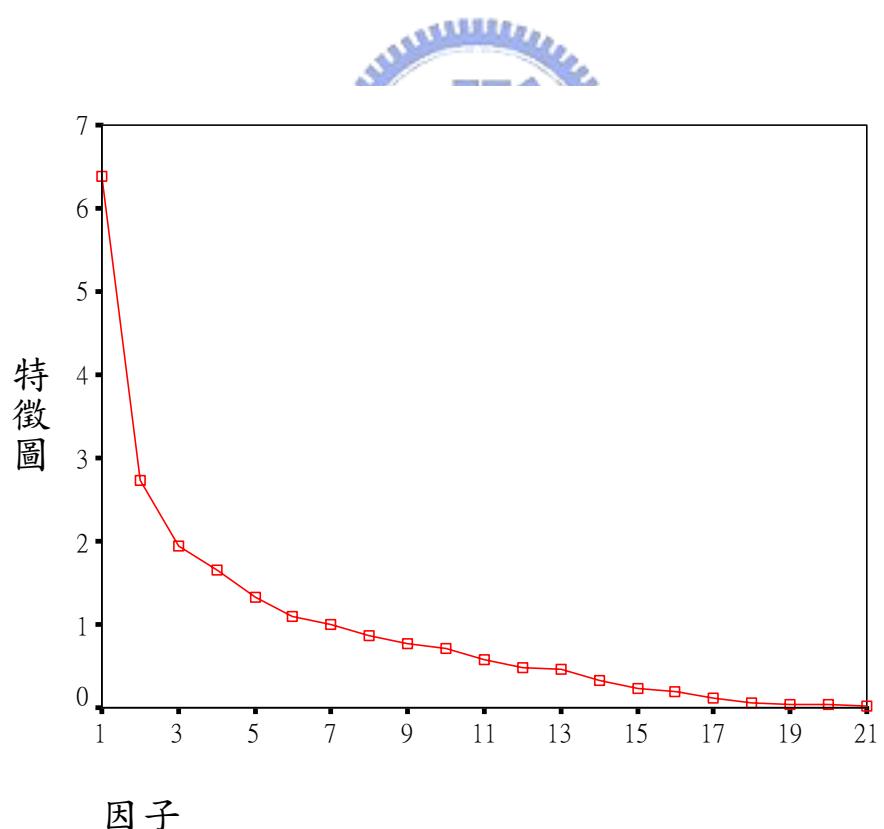


圖 5 台中/南投地下水水質因子陡坡圖

表 6 台中/南投地下水水質轉軸後因子負荷表及共通性

變量數	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6	因子 7	共同性
導電度	0.881	0.393	0.160	0.083	0.012	-0.015	0.024	0.964
硬度	0.942	0.138	0.203	-0.030	0.013	-0.020	0.060	0.954
TDS	0.875	0.263	0.016	0.066	0.022	0.077	0.111	0.859
氯鹽	0.358	0.391	0.062	0.563	0.032	-0.022	-0.244	0.662
氨氮	0.071	0.122	0.890	0.124	0.098	0.082	-0.169	0.872
硝酸鹽氮	-0.166	-0.414	-0.163	-0.459	0.089	-0.431	-0.081	0.636
硫酸鹽	0.810	-0.003	-0.366	-0.041	0.009	-0.046	-0.005	0.794
TOC	0.030	-0.003	0.031	-0.050	0.009	0.880	0.038	0.780
鹼度	0.536	0.502	0.571	-0.022	0.016	0.003	0.155	0.890
鈉	0.405	0.809	-0.127	0.155	-0.021	-0.028	-0.011	0.861
鉀	0.098	0.766	0.427	-0.118	0.080	-0.027	0.207	0.843
鈣	0.868	-0.057	0.349	-0.089	0.064	0.089	-0.032	0.900
鎂	0.369	0.481	-0.073	0.067	0.041	-0.412	0.323	0.654
鐵	-0.399	0.039	0.154	0.749	-0.053	-0.056	0.012	0.752
錳	0.067	-0.037	0.640	0.577	-0.092	0.021	0.116	0.770
砷	-0.053	0.851	0.059	0.055	0.036	0.068	-0.022	0.739
鎘	0.104	-0.137	0.005	-0.042	0.621	-0.065	0.128	0.438
鉻	0.095	0.096	-0.038	0.021	0.034	0.037	0.863	0.767
銅	0.146	0.059	0.118	0.137	0.784	0.090	-0.213	0.726
鉛	-0.186	0.195	-0.048	-0.136	0.742	-0.020	0.074	0.651
鋅	0.553	-0.189	-0.088	0.504	0.063	-0.101	0.144	0.638

4.1.3 彰化縣地下水水質因子特性分析

彰化縣地下水水質各因子轉軸後特徵值大於 1 共有 5 個因子，其總體累積變異量可達 75.79 %，如表 7 所示，而陡坡圖如圖 6 所示。轉軸後因子負荷表及共通性如表 8 所示。由表 7 與表 8 顯示，因子一的導電度、硬度、TDS、氯鹽、硫酸鹽、鈉、鉀及鎂，呈現高度相關，鈣則呈現中度相關，因子變異量達 37.72 %，此型態與苗栗縣所得之因子一有相似的果，因此亦歸類為「鹽化因子」。因子二的鹼度、鈣、錳及鋅呈現中度相關，因子變異量為 11.23 %。因子三的鎘、銅及鉛呈現高度相關，因子變異量為 10.96 %。因子四的氯氮及鹼度呈現中度相關，因子變異量為 8.76 %，因子五的鐵及砷呈現中度相關，因子變異量為 7.12 %。



表 7 彰化縣地下水水質轉軸後特徵值與變異量

因子	特徵值	變異量(%)	累積變異量%
1	7.921	37.72	37.72
2	2.359	11.23	48.95
3	2.301	10.96	59.91
4	1.840	8.76	68.67
5	1.495	7.12	75.79

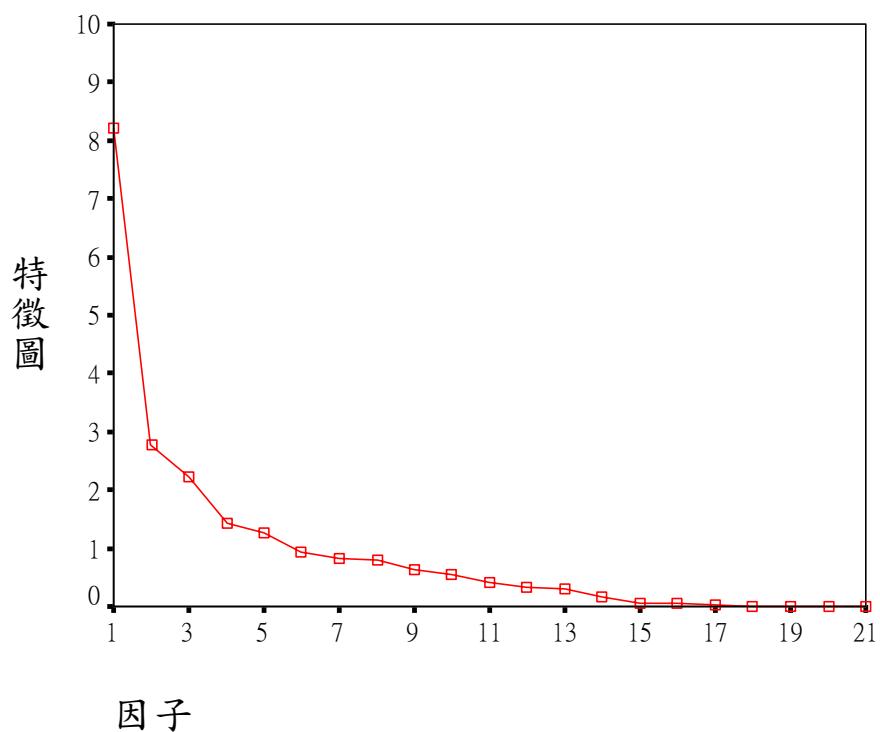


圖 6 彰化縣地下水水質因子陡坡圖

表 8 彰化縣地下水水質轉軸後因子負荷表及共通性

變量數	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	共同性
導電度	0.976	-0.160	-0.075	0.022	0.038	0.986
硬度	0.963	0.131	-0.029	0.151	0.120	0.983
TDS	0.974	-0.146	-0.074	0.020	0.039	0.978
氯鹽	0.963	-0.210	-0.081	-0.010	0.021	0.979
氯氮	0.257	-0.264	-0.211	0.650	-0.161	0.628
硝酸鹽氮	-0.078	-0.040	-0.065	-0.735	-0.290	0.636
硫酸鹽	0.869	0.297	-0.027	0.136	0.133	0.880
TOC	-0.146	0.093	0.456	0.413	-0.420	0.585
鹼度	-0.182	0.576	0.114	0.628	0.195	0.811
鈉	0.963	-0.210	-0.080	-0.007	0.016	0.978
鉀	0.933	-0.185	-0.071	0.089	-0.035	0.919
鈣	0.547	0.618	0.124	0.372	0.147	0.857
鎂	0.980	-0.102	-0.058	0.029	0.069	0.979
鐵	-0.048	0.398	-0.080	0.195	0.641	0.616
錳	-0.133	0.730	-0.104	0.074	-0.164	0.594
砷	0.264	-0.290	0.055	0.121	0.771	0.766
鎘	-0.031	0.072	0.827	0.017	0.133	0.708
鉻	0.321	0.168	-0.019	-0.117	0.168	0.174
銅	-0.096	-0.111	0.784	-0.001	-0.158	0.661
鉛	-0.058	-0.044	0.814	-0.041	0.012	0.669
鋅	-0.137	0.677	-0.010	-0.218	0.054	0.527

4.1.4 雲林縣地下水水質因子特性分析

雲林縣地下水水質各因子轉軸後特徵值大於 1 共有 5 個因子，其總體累積變異量可達 76.87% ，如表 9 所示，而陡坡圖如圖 7 所示。轉軸後因子負荷表及共通性如表 10 所示。由表 9 與表 10 顯示，因子一的導電度、硬度、 TDS 、氯鹽、氨氮、硫酸鹽、鈉、鉀、鈣及鎂均呈現高度相關，因子變異量達 44.36 % ，此型態與苗栗縣所得之因子一有相似的結果，因此亦歸類為「鹽化因子」。本縣的「鹽化因子」總體變異量已高達 44 % 以上，變量數的因子負荷均呈現高度相關性，代表此因子可充分代表雲林縣的水質特性，可由此因子的監測項目瞭解地下水是否受海水入侵影響。因子二的鹼度呈現中度相關，因子變異量為 8.67 % ，地下水中鹼度通常係由碳酸根及碳酸氫根組成，由鹼度可計算出其濃度。因子三的鎘、銅及鉛呈現高度相關，因子變異量為 8.46 % ，此因子型態與苗栗縣因子五相同。因子四的硝酸鹽氮呈現中度相關，因子變異量為 7.75 % 。台灣地區農業施作常使用化學氮肥，因此在一般淺層地下水通常會測得氮的存在，在含有溶氧的地下水中，含氮化合物會因水中溶氧作用氧化，而轉變為硝酸鹽氮。此因子可歸類為「氮污染因子」，此因子可作為地下水氮污染存在的指標。因子五的 TOC 及鉻呈現高度至中度相關，因子變異量為 7.63 % 。

表 9 雲林縣地下水水質轉軸後特徵值與變異量

因子	特徵值	變異量(%)	累積變異量%
1	9.316	44.36	44.36
2	1.821	8.67	53.03
3	1.776	8.46	61.49
4	1.628	7.75	69.24
5	1.602	7.63	76.87

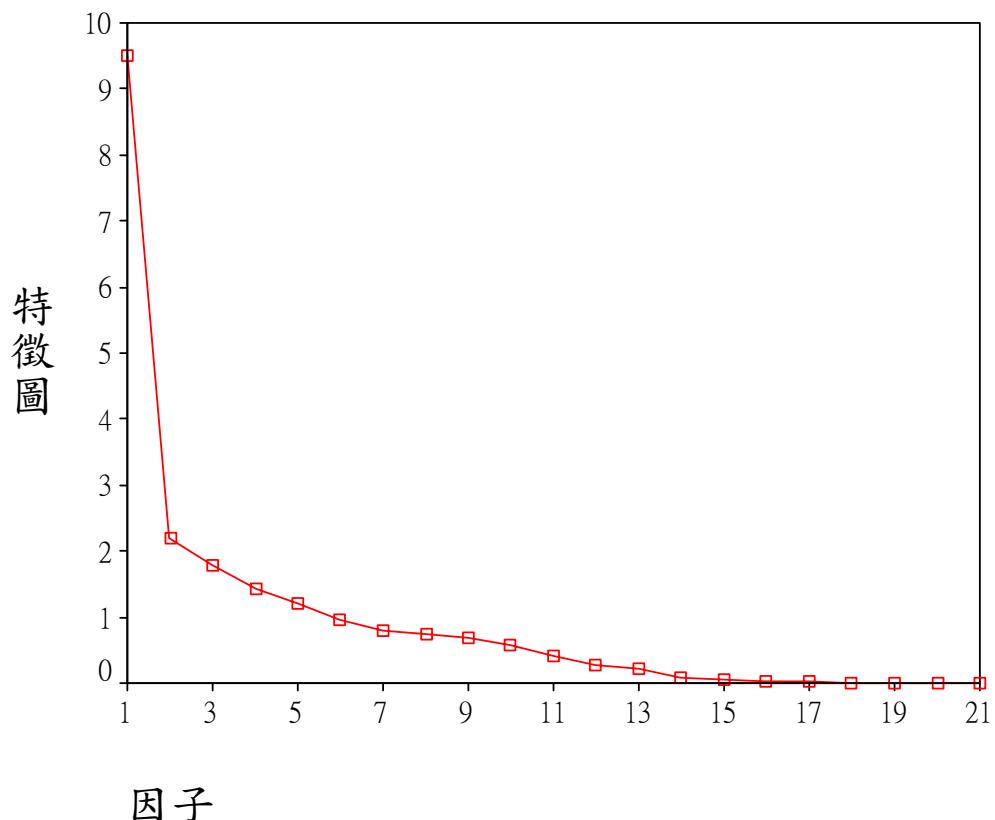


圖 7 雲林縣地下水水質因子陡坡圖

表 10 雲林縣地下水水質轉軸後因子負荷表及共通性

變量數	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	共同性
導電度	0.989	-0.013	-0.074	-0.056	0.025	0.987
硬度	0.990	0.067	-0.080	0.023	0.040	0.994
TDS	0.988	-0.018	-0.074	-0.049	0.028	0.986
氯鹽	0.986	-0.021	-0.074	-0.064	0.019	0.982
氯氮	0.796	-0.005	-0.122	-0.021	0.197	0.688
硝酸鹽氮	-0.152	0.365	0.056	0.555	-0.047	0.470
硫酸鹽	0.962	0.025	-0.058	0.069	-0.086	0.941
TOC	-0.093	-0.054	0.302	0.240	0.768	0.750
鹼度	-0.120	0.644	-0.139	0.407	0.102	0.625
鈉	0.985	-0.016	-0.072	-0.071	0.062	0.985
鉀	0.942	-0.034	-0.077	-0.048	-0.082	0.904
鈣	0.722	0.433	-0.067	0.351	0.100	0.847
鎂	0.977	0.011	-0.074	-0.045	0.097	0.972
鐵	0.445	-0.443	0.002	-0.068	0.350	0.521
錳	-0.289	-0.807	-0.062	0.157	0.118	0.777
砷	-0.070	0.088	0.023	-0.828	0.102	0.709
鎘	-0.162	0.203	0.726	-0.368	-0.117	0.744
鉻	0.347	0.204	-0.083	-0.110	0.514	0.445
銅	-0.187	0.107	0.687	0.136	0.329	0.645
鉛	-0.041	-0.318	0.765	0.087	-0.037	0.698
鋅	-0.013	0.156	0.058	0.246	-0.622	0.475

4.2 地下水水質特性分析

繪製 Stiff 水質形狀圖及 Piper 水質菱形圖，以兩種圖解分析法分析各區域水質特性，所得結果分別說明如下。

4.2.1 Stiff 水質形狀圖法

統計各區域地下水水質 Stiff 圖解分布範圍情形，如表 11 至表 12 所示。苗栗縣地下水離子凸出型以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- ，佔最多數 (62.5%)，次多數為 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 離子凸出型 (8.6%)；台中/南投地下水離子凸出型以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- ，佔最多數 (52.0%)，次多數為 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 離子凸出型 (28.8%)；彰化縣地下水離子凸出型以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- ，佔最多數 (70.4%)，次多數為 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 離子凸出型 (16.4%)；雲林縣地下水離子凸出型以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- ，佔最多數 (47.0%)，次多數為 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 離子凸出型 (22.9%)。

統計全區域地下水離子凸出型以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- ，佔最多數 (60.4%)，此型態為正常地下水特性，而次多數為 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 離子凸出型 (16.1%)。這個結果可以從地球化學的觀點來看^[18]，正常來說，地下水層中的 HCO_3^- 含量是由土壤層中的二氧化碳及方解石和白雲石的溶解所衍生而來，於幾乎全部沈澱性流域中，這些礦物溶解迅速，因此當接觸到含有二氧化碳的地下水時，在補注區 HCO_3^- 幾乎就一定成為優勢的陰離子。可溶性沈澱性礦物在溶解時可以釋放硫酸根或氯離子，最常見的硫酸鹽礦物是石膏 (gypsum)，硫酸鈣 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和硬石膏 (無水硫酸鈣)，這些礦物接觸到水時會迅速溶解，石膏的溶解反應會產生 Ca^{2+} 及 SO_4^{2-} ，當二氧化碳分壓範圍在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ bar 時，其優勢的陰離子將會是硫酸根離子。

另外屬於 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 離子凸出型態的監測井，分別為苗栗縣新埔國小及成功國小；彰化縣新寶國小；雲林縣文光國小湖口分校及口湖國小青蚶分校，從 Stiff 離子凸出型態圖（如圖 8），顯示新埔國小 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 當量濃度 (meq/L)，較其餘 4 口監測井濃度低於 100 倍以上，鈉、鉀及氯鹽在海水及淡水中的濃度差異極大，當地下水中的氯鹽及鈉、鉀濃度甚高時，即表示該地下水層已受海水入侵。從新埔國小 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 當量濃度判斷，此測站地下水未受到海水影響。進一步比對苗栗縣成功國小；彰化縣新寶國小；雲林縣文光國小湖口分校及口湖國小青蚶分校的地理位置，均是位於沿海地區或海岸地區，顯示此區域可能已受海水影響而有地下水鹽化現象。



表 11 各區域地下水 Stiff 水質形狀統計

縣市別	執行 站次	Stiff 圖解(凸出離子特徵)								
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Na ⁺ +K ⁺	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺
		HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
苗栗縣	291	182	18	1	16	30	17	25	1	1
台中/ 南投	125	65	2	0	12	4	3	36	1	2
彰化縣	152	107	0	0	5	0	8	25	7	0
雲林縣	83	39	0	0	8	0	17	19	0	0
全區域	651	393	20	1	41	34	45	105	9	3



表 12 各區域地下水 Stiff 水質形狀比例計算

縣市別	Stiff 圖解(凸出離子特徵)								
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Na ⁺ +K ⁺	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺
	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
苗栗縣	62.5%	6.2%	0.3%	5.5%	10.3%	5.8%	8.6%	0.3%	0.3%
台中/南投	52.0%	1.6%	0	9.6%	3.2%	2.4%	28.8%	0.8%	1.6%
彰化縣	70.4%	0	0	3.3%	0	5.3%	16.4%	4.6%	0
雲林縣	47.0%	0	0	9.6%	0	20.5%	22.9%	0	0
全區域	60.4%	3.1%	0.2%	6.3%	5.2%	6.9%	16.1%	1.4%	0.5%

備註：比例計算= ((凸出離子特徵站次)/(執行站次)) × 100%

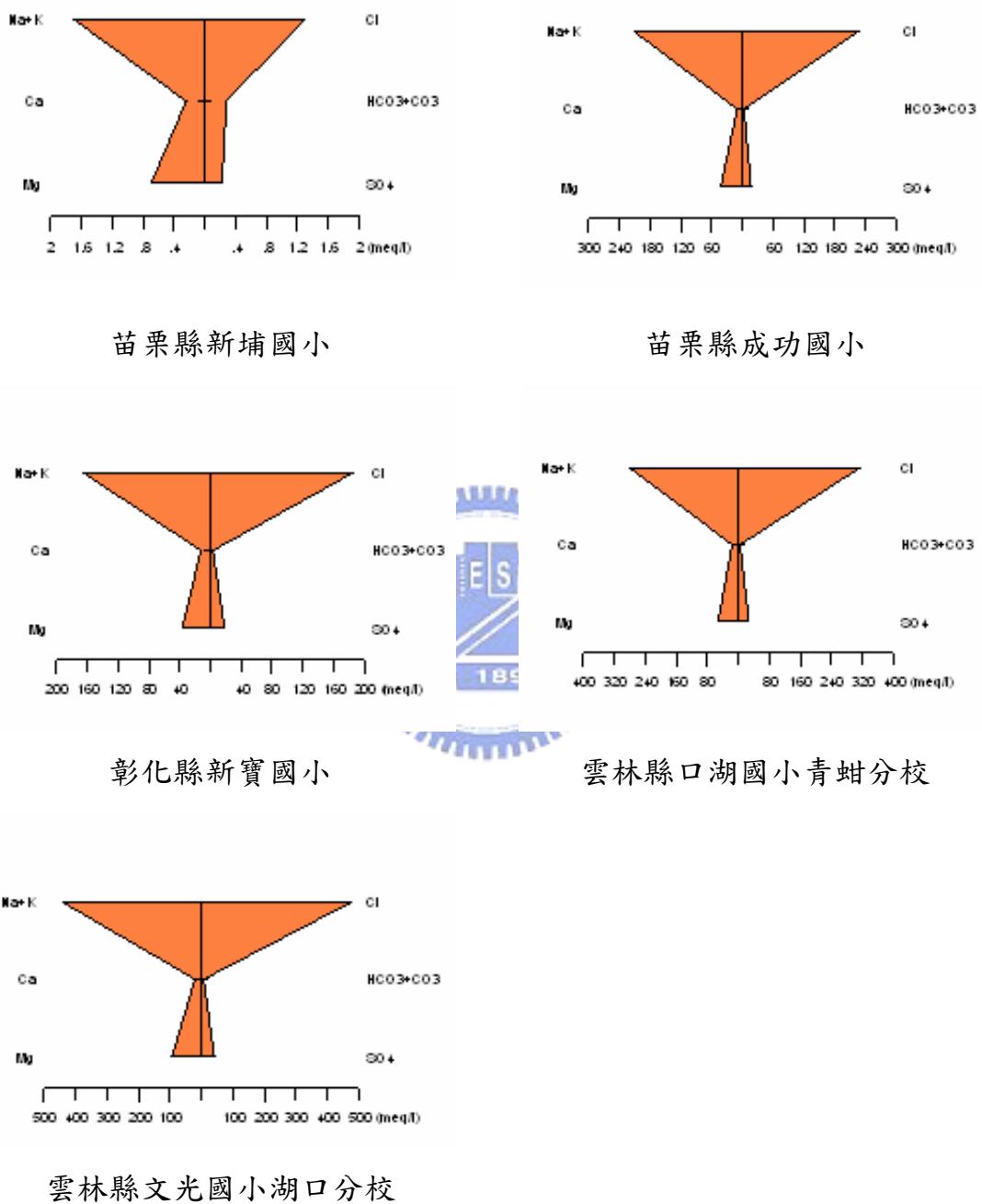


圖 8 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 離子凸出型態監測井之Stiff 圖解分析

4.2.2 Piper 水質菱形圖法

統計各區域地下水水質 Piper 圖解分布範圍情形，如表 13 及表 14 所示。苗栗縣 Piper 圖解分布以 I 區佔最多數 (51.2%)，次多數為 V 區 (36.8%)；台中/南投以 I 區佔最多數 (50.4%)，次多數為 V 區 (45.6%)；彰化縣以 I 區佔最多數 (71.1%)，次多數為 V 區 (17.1%)；雲林縣 I 區佔最多數 (47.0%)，無監測井分布於 II 區，其餘監測井分布於 III 區 (18.1%)、IV 區 (19.3%)、V 區 (15.7%) 等比例相近。

全區域 Piper 圖解分布以 I 區佔最多數 (55.1%)，此型態為水質以碳酸氫鈣 ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) 及碳酸氫鎂 ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$) 為主，一般未受污染正常地下水均屬此區。而佔次多數為 V 區 (31.2%)，是為中間型已屬輕度污染。而 IV 區 (8.3%) 以硫酸鈉 (Na_2SO_4) 或氯化鈉 (NaCl) 為主，海水污染與海岸地區地下水等在此區範圍，主要位於此區之地下水監測井為苗栗縣六合國小、新埔國小及成功國小；彰化縣新寶國小；雲林縣文光國小湖口分校及口湖國小青蚶分校（如圖 9）。以地理位置來看，苗栗縣新埔國小及六合國小非位於沿岸地區，由附錄一監測結果測值判斷，新埔國小地下水組成應屬 NaCl 型態，六合國小地下水組成應屬 Na_2SO_4 型態，但其離子濃度遠低於受海水影響測站，因此判斷此 2 口監測井地下水 Piper 圖解為 IV 區，應為此監測井的水質特徵，並無受到海水影響。

由 Stiff 水質形狀圖與 Piper 水質菱形圖，探討中部地區之地下水水質特性，由分析結果得知，此兩種分析方法所得結果相似，大部分地下水仍屬未受污染之地下水，水質良好。另外值得注意的是，Piper 水質菱形圖分析部分地區的地下水已有輕微受污染情形，需要持續監測。

表 13 各區域地下水 Piper 水質菱形圖統計

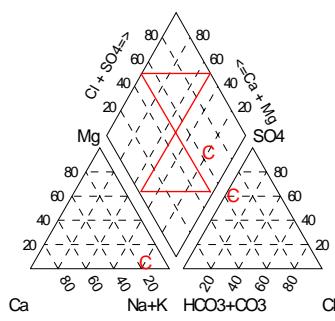
縣市別	執行站次	I	II	III	IV	V
苗栗縣	291	149	5	1	29	107
台中/南投市	125	63	0	5	0	57
彰化縣	152	108	0	9	9	26
雲林縣	83	39	0	15	16	13
全區域	651	359	5	30	54	203

表 14 各區域地下水 Piper 水質菱形圖比例計算

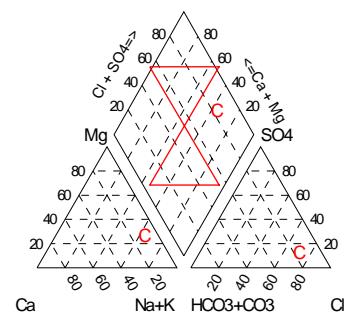
縣市別	I	II	III	IV	V
苗栗縣	51.2%	1.7%	0.3%	10.0%	36.8%
台中/南投市	50.4%	0	4.0%	0	45.6%
彰化縣	71.1%	0	5.9%	5.9%	17.1%
雲林縣	47.0%	0	18.1%	19.3%	15.7%
全區域	55.1%	0.8%	4.6%	8.3%	31.2%

備註：比例計算= ((區站次)/(執行站次)) × 100%

六合國小

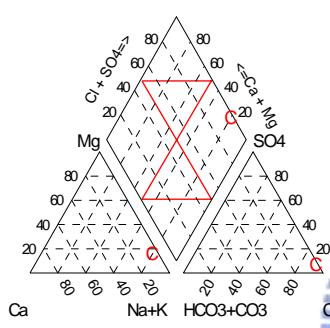


新埔國小



苗栗縣六合國小

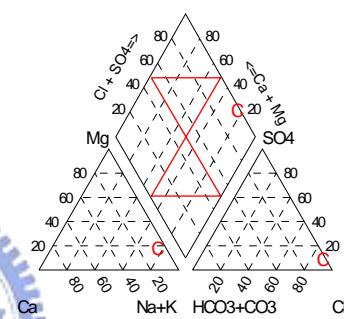
成功國小



苗栗縣成功國小

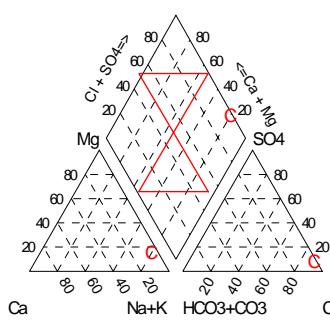
苗栗縣新埔國小

新寶國小



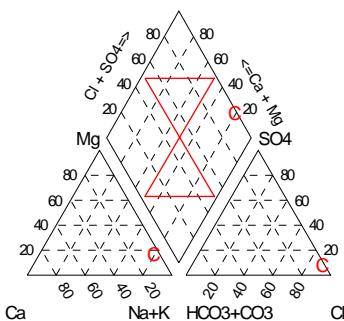
彰化縣新寶國小

口湖國小青蚶分校



雲林縣口湖國小青蚶分校

文光國小湖口分校



雲林縣文光國小湖口分校

圖 9 屬於IV區型態監測井之 Piper 圖解分析

4.3 離子強度、導電度及總溶解固體間之關係

本節將離子強度 (μ)、導電度 (EC) 及總溶解固體 (TDS) 等，各項數據利用統計軟體 (SPSS) 進行迴歸分析，得到參數間之相關性。並統計比較北區及南區的總溶解固體與導電度之比值差異。

4.3.1 離子強度結果

首先以 Lewis, Randall 提出之離子強度計算方法(見第三章「研究方法」式 3)，地下水中主要的陰離子濃度 (Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-}) 及陽離子濃度 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+)，計算求得地下水監測井的離子強度，再以 Langelier^[12] 由總溶解固體推估離子強度 (式 4)，計算得地下水之離子強度；另外再以 Russell^[13] 提出由導電度推估離子強度 (式 5)，計算得地下水之離子強度。以三種方式求得離子強度結果列於表 13。

中部地區地下水離子強度範圍 (表 13)，介於 0.003~0.625 之間，由上節 Piper 水質菱形圖分析結果得知，部分監測井可能受到海水影響，其離子強度發現亦呈現較高的數值，如苗栗縣成功國小為 0.295；彰化縣新寶國小為 0.248；雲林縣文光國小湖口分校為 0.625、口湖國小青蚶分校為 0.398，若將此四口監測井排除，重新計算中部地區地下水離子強度範圍，苗栗縣介於 0.003 ~ 0.020，平均值為 0.011 ± 0.005 ；台中/南投地區介於 0.005 ~ 0.021，平均值為 0.011 ± 0.005 ；彰化縣介於 0.007 ~ 0.046，平均值為 0.022 ± 0.009 ；雲林縣介於 0.017 ~ 0.048，平均值為 0.028 ± 0.010 ；中部地區全區域則介於 0.003 ~ 0.048，平均值為 0.015 ± 0.009 。其中最低值 0.003 為苗栗縣新埔國小與銅鑼國小；最高值 0.048 為雲林縣平和國小，各區域中以雲林縣地下水的離子強度整體平均值最高。

將三種方法計算所得結果作圖比較 (如圖 10)，一般地下水並無明顯差異，於可能受海水污染的監測井中則發現有差異性，以 TDS 及導電度推估得到之離子強度均較以陰陽離子計算所得離子強度來得高，探討其差異可能的原因有，1.水中含有其他未知離子：因受海水污染的地下水其成分已不若一般正常地下水，組成已改變，水中可能含有其他離子，因未偵測或未知離子干擾分析方法，而造成計算結果之誤差。2.總溶解固體分析誤差：這些地下水中含有高濃度的溶解性物質，分析時易因稀釋效應，造成分析結果高估。 3.導電度量測誤差：一般地下水以灌溉用水的標準評估應低於 750 ($\mu\text{mho}/\text{cm}$, 25°C)，而受海水污染的地下水導電度高達 20000 ($\mu\text{mho}/\text{cm}$, 25°C)，其中文光國小湖口分校已接近 50000 ($\mu\text{mho}/\text{cm}$, 25°C)。導電度之量測乃是以導電度計直接讀取，導電度計為非線性易受高鹽度影響而導致偏差發生。



4.3.2 總溶解固體及導電度與離子強度之關係

從上節所得結果顯示受鹽分影響的地下水有較高的離子強度，探討總溶解固體及導電度與離子強度之關係時，將這些數據刪除後再進行迴歸，各測站的導電度測值與離子強度，迴歸方程式如下。

$$\mu = 2.05 \times 10^{-5} \text{ EC}$$

相關係數 $r = 0.9921$

各測站的總溶解固體與離子強度迴歸分析後，得到迴歸方程式如下。

$$\mu = 2.90 \times 10^{-5} \text{ TDS}$$

相關係數 $r = 0.9955$

由迴歸所得到的結果，發現中部地區地下水的導電度、總溶解固體與離子強度有高度相關性，也可以呈現線性的關係 (如圖 11 及圖

12)。文獻中導電度與離子強度關係為 $\mu = 1.6 \times 10^{-5}$ EC，迴歸結果與文獻比較相近；導電度與離子強度關係，文獻所得結果為 $\mu = 2.50 \times 10^{-5}$ TDS，本研究所得結果與文獻結果相近。

進一步計算各監測井的總溶解固體與導電度比值，各區域結果如下，苗栗縣為 0.68 ± 0.11 ；台中/南投為 0.71 ± 0.14 ；彰化縣為 0.70 ± 0.07 ；雲林縣為 0.72 ± 0.07 。再將其全部平均計算得到結果為 0.69 ± 0.10 ，此結果可代表中部地區地下水總溶解固體與導電度比值。

為瞭解中部地區地下水水質特性與台灣其他區域是否有差異，因此將北部及南部地區(資料來源與本研究論文相同)進行相同步驟計算，地下水總溶解固體與導電度比值，北部區域為 0.66 ± 0.08 ，南部區域為 0.67 ± 0.07 。由計算結果比較，中部地區地下水總溶解固體與導電度比值，與北部及南部地區呈現接近的結果。

在檢測方法中導電度的量測是屬於較簡便經濟的的方式，而且可以在現場立即得到數值，不需將樣品攜回實驗室，減少運送過程的污染問題。因此從上述可得到導電度與總溶解固體呈現固定的比值，我們可以藉由導電度量測結果，推估得到可信度高的總溶解固體量，而總溶解固體量代表水中陰陽離子濃度的多寡，亦即可由導電度推估地下水水質的良窳。

表 15 苗栗縣地下水監測井監測參數及離子強度

設置地	監測站名	水溫	pH	導電度	總溶解固體	離子強度 $\mu 1$	離子強度 $\mu 2$	離子強度 $\mu 3$
苗栗縣	苗栗種畜繁殖所	25.1	6.3	518	349	0.009	0.009	0.008
苗栗縣	大埔國小	24.8	5.6	277	197	0.005	0.005	0.004
苗栗縣	建國國中	25.1	6.5	458	310	0.009	0.008	0.007
苗栗縣	后庄國小	25.7	6.4	926	608	0.019	0.015	0.015
苗栗縣	新興國小	25.8	6.4	460	336	0.009	0.008	0.007
苗栗縣	竹南國小	26.7	6.4	487	321	0.009	0.008	0.008
苗栗縣	六合國小	25.5	6.5	1032	688	0.016	0.017	0.017
苗栗縣	僑善國小	26.4	7.7	330	234	0.006	0.006	0.005
苗栗縣	海口國小	25.5	6.7	647	419	0.012	0.010	0.010
苗栗縣	外埔國小	27.7	7.1	1049	698	0.019	0.017	0.017
苗栗縣	後龍海濱遊憩區	25.1	7.2	638	412	0.011	0.010	0.010
苗栗縣	溪洲國小	26.4	6.3	367	251	0.006	0.006	0.006
苗栗縣	造橋國小	27.4	6.2	717	454	0.013	0.011	0.011
苗栗縣	尖山國小	28.2	6.7	729	467	0.013	0.012	0.012
苗栗縣	新港國小	25.2	5.8	327	236	0.006	0.006	0.005
苗栗縣	啟明國小	25.9	6.4	570	333	0.009	0.008	0.009
苗栗縣	頭屋國小	25.9	6.0	439	290	0.008	0.007	0.007
苗栗縣	苗栗國中	27.3	5.9	543	361	0.008	0.009	0.009
苗栗縣	苗栗農工職校	24.7	6.8	539	357	0.010	0.009	0.009
苗栗縣	新埔國小	25.1	5.5	309	198	0.003	0.005	0.005
苗栗縣	鶴岡國小	24.8	6.6	458	304	0.008	0.008	0.007
苗栗縣	五穀國小	24.5	6.6	477	318	0.009	0.008	0.008
苗栗縣	通霄精鹽廠	26.2	5.9	1036	732	0.016	0.018	0.017
苗栗縣	中興國小	24.6	7.0	572	358	0.012	0.009	0.009
苗栗縣	五福國小	25.1	6.1	413	332	0.006	0.008	0.007
苗栗縣	照南國小	25.8	6.4	796	554	0.015	0.014	0.013
苗栗縣	頭份國中	25.6	6.5	658	459	0.013	0.011	0.011
苗栗縣	大山國小	26.2	6.4	397	272	0.007	0.007	0.006
苗栗縣	後龍國中	24.8	6.4	624	455	0.011	0.011	0.010
苗栗縣	苗栗縣立體育場	25.0	6.7	592	418	0.012	0.010	0.009
苗栗縣	建功國小	25.6	6.6	858	550	0.018	0.014	0.014
苗栗縣	西湖國小	27.1	7.6	628	411	0.010	0.010	0.010
苗栗縣	公館國小	23.8	6.8	516	342	0.010	0.009	0.008
苗栗縣	銅鑼國小	25.6	5.1	270	225	0.003	0.006	0.004
苗栗縣	通霄國中	26.4	6.9	1025	685	0.020	0.017	0.016
苗栗縣	苑裡國小	26.2	6.6	922	643	0.020	0.016	0.015
苗栗縣	成功國小	25.7	7.5	22863	16563	0.295	0.414	0.366

備註:單位:水溫°C ; 導電度 $\mu\text{mho}/\text{cm } 25^\circ\text{C}$; 總溶解固體 mg/L

$$\mu 1 = 1/2(CiZi^2) ; \mu 2 = (2.5 \times 10^{-5} \times \text{TDS}) ; \mu 3 = (1.6 \times 10^{-5} \times \text{EC})$$

表 16 台中/南投地下水監測井監測參數及離子強度

設置地	監測站名	水溫	pH	導電度	總溶解固體	離子強度 $\mu 1$	離子強度 $\mu 2$	離子強度 $\mu 3$
台中市	東興國小	25.6	6.4	408	287	0.007	0.007	0.007
台中市	中華國小	25.6	6.3	417	296	0.008	0.007	0.007
台中市	鎮平國小	25.9	8.9	631	420	0.010	0.011	0.010
台中市	台中國小	25.4	7.1	452	328	0.009	0.008	0.007
台中縣	華龍國小	26.3	6.6	727	524	0.015	0.013	0.012
台中縣	大安國中	24.7	6.5	699	520	0.015	0.013	0.011
台中縣	清水國小	26.4	6.9	846	516	0.016	0.013	0.014
台中縣	梧南國小	26.0	7.4	790	540	0.015	0.014	0.013
台中縣	龍港國小	25.4	6.8	869	554	0.017	0.014	0.014
台中縣	大肚國小	27.2	5.8	392	285	0.006	0.007	0.006
台中縣	僑仁國小	26.6	6.5	637	484	0.012	0.012	0.010
台中縣	大里國小	25.6	6.6	456	317	0.009	0.008	0.007
台中縣	四德國小	26.4	7.0	1110	865	0.021	0.022	0.018
台中縣	喀哩國小	26.4	6.2	614	475	0.013	0.012	0.010
南投縣	敦和國小	26.1	6.9	337	240	0.006	0.006	0.005
南投縣	平和國小	25.3	6.2	291	203	0.005	0.005	0.005

備註:單位:水溫°C ; 導電度 $\mu\text{mho}/\text{cm}$ 25°C ; 總溶解固體 mg/L

$$\mu 1 = 1/2(CiZi^2) ; \mu 2 = (2.5 \times 10^{-5} \times \text{TDS}) ; \mu 3 = (1.6 \times 10^{-5} \times \text{EC})$$

表 17 彰化及雲林縣地下水監測井監測參數及離子強度

設置地	監測站名	水溫	pH	導電度	總溶解固體	離子強度 $\mu 1$	離子強度 $\mu 2$	離子強度 $\mu 3$
彰化縣	大竹國小	28.1	6.3	575	379	0.009	0.009	0.009
彰化縣	快官國小	26.4	6.2	414	279	0.007	0.007	0.007
彰化縣	竹塘國小	26.8	6.7	1270	975	0.030	0.024	0.020
彰化縣	螺陽國小	27.3	6.7	1112	813	0.025	0.020	0.018
彰化縣	中正國小	26.6	6.9	1225	910	0.028	0.023	0.020
彰化縣	埤頭國小	26.7	6.8	1120	759	0.024	0.019	0.018
彰化縣	社頭國小	28.5	7.1	736	485	0.014	0.012	0.012
彰化縣	芳苑工業區服務中心	28.0	6.8	1159	832	0.025	0.021	0.019
彰化縣	萬興國小	25.7	6.8	1002	706	0.022	0.018	0.016
彰化縣	員東國小	28.3	6.9	788	511	0.016	0.013	0.013
彰化縣	溪湖國小	26.5	6.9	1094	729	0.022	0.018	0.018
彰化縣	新水國小	27.3	6.6	1921	1600	0.046	0.040	0.031
彰化縣	大村國中	26.3	7.0	831	538	0.017	0.013	0.013
彰化縣	華龍國小	26.0	7.0	1139	836	0.024	0.021	0.018
彰化縣	文開國小	27.7	7.0	1023	676	0.020	0.017	0.016
彰化縣	東興國小	25.8	7.3	1293	972	0.028	0.024	0.021
彰化縣	線西國小	28.5	6.8	871	578	0.016	0.014	0.014
彰化縣	伸東國小	27.4	6.6	1006	675	0.020	0.017	0.016
彰化縣	新寶國小	26.6	7.5	19763	14439	0.248	0.361	0.316
雲林縣	育英國小	29.3	6.9	1263	860	0.024	0.022	0.020
雲林縣	仁和國小	27.7	6.6	980	648	0.017	0.016	0.016
雲林縣	明倫國小	26.9	6.9	1035	735	0.023	0.018	0.017
雲林縣	大屯國小	27.5	6.9	1255	838	0.025	0.021	0.020
雲林縣	台西國小	26.9	7.2	1092	728	0.019	0.018	0.017
雲林縣	平和國小	28.3	6.6	1914	1491	0.048	0.037	0.031
雲林縣	二崙國小	26.8	6.8	1179	847	0.027	0.021	0.019
雲林縣	大同國小	26.0	6.9	1530	1156	0.035	0.029	0.024
雲林縣	橋頭國小	27.0	6.7	1628	1116	0.034	0.028	0.026
雲林縣	文光國小湖口分校	26.3	7.0	46013	35800	0.625	0.895	0.736
雲林縣	口湖國小青蚶分校	27.1	7.2	30875	22638	0.398	0.566	0.494

備註:單位:水溫°C ; 導電度 $\mu\text{mho}/\text{cm } 25^\circ\text{C}$; 總溶解固體 mg/L

$$\mu 1 = 1/2(CiZi^2) ; \mu 2 = (2.5 \times 10^{-5} \times \text{TDS}) ; \mu 3 = (1.6 \times 10^{-5} \times \text{EC})$$

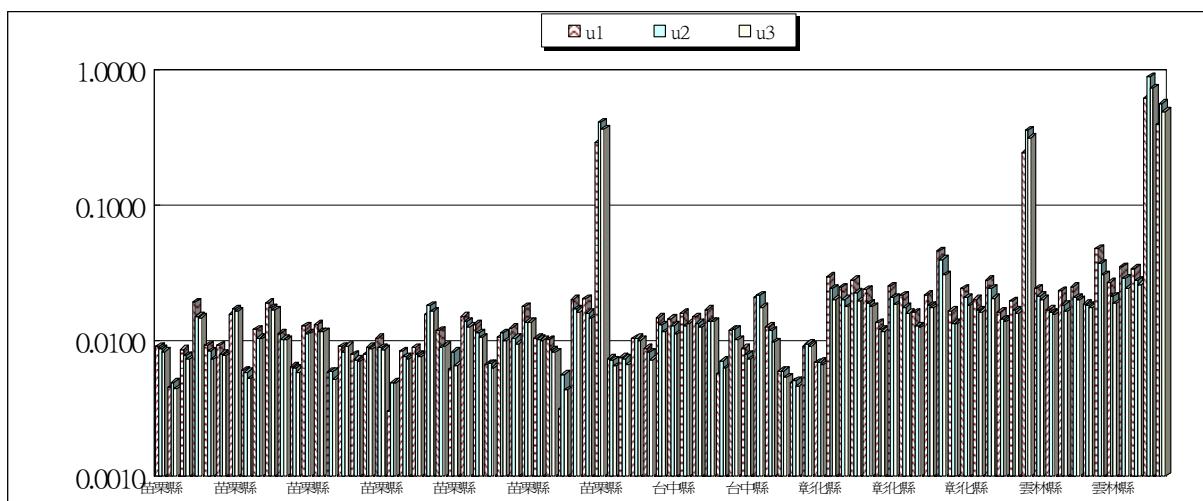


圖 10 各監測井離子強度比較



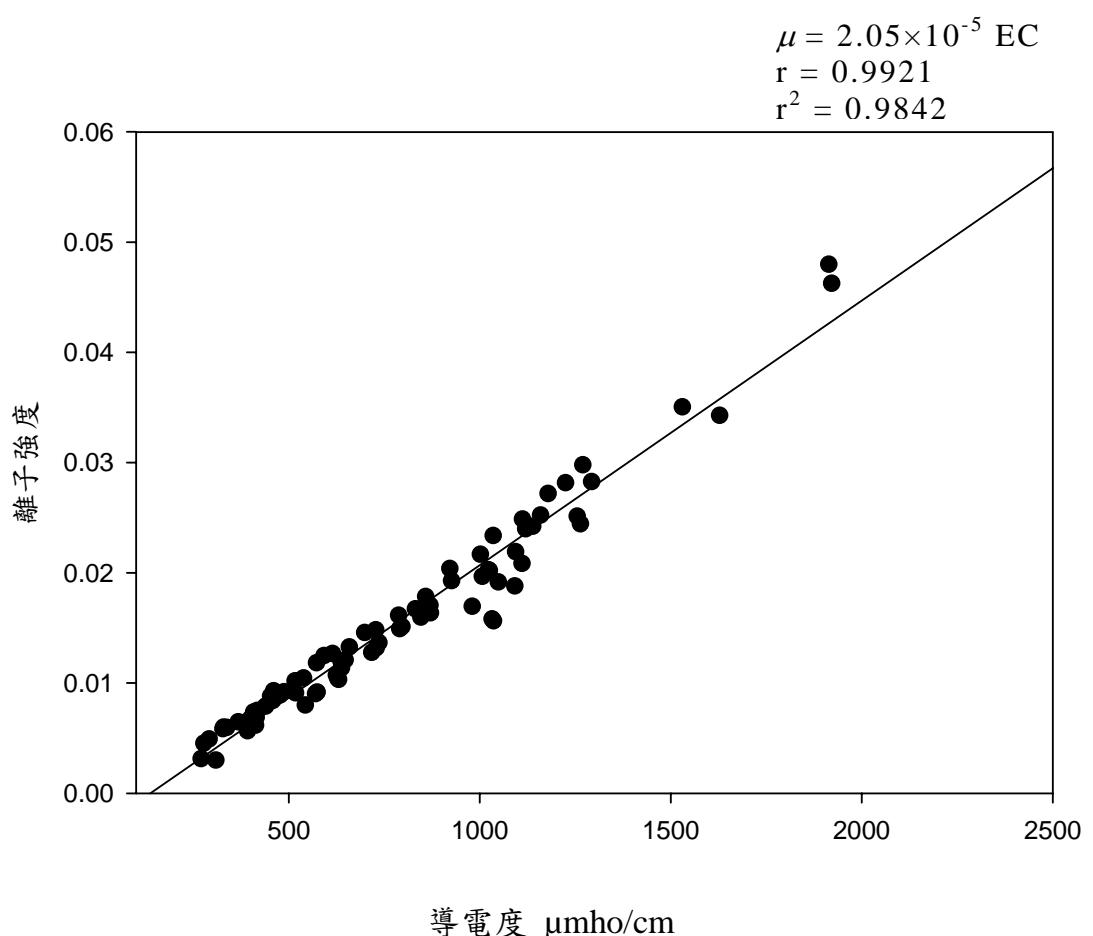


圖 11 各監測井導電度與離子強度關係

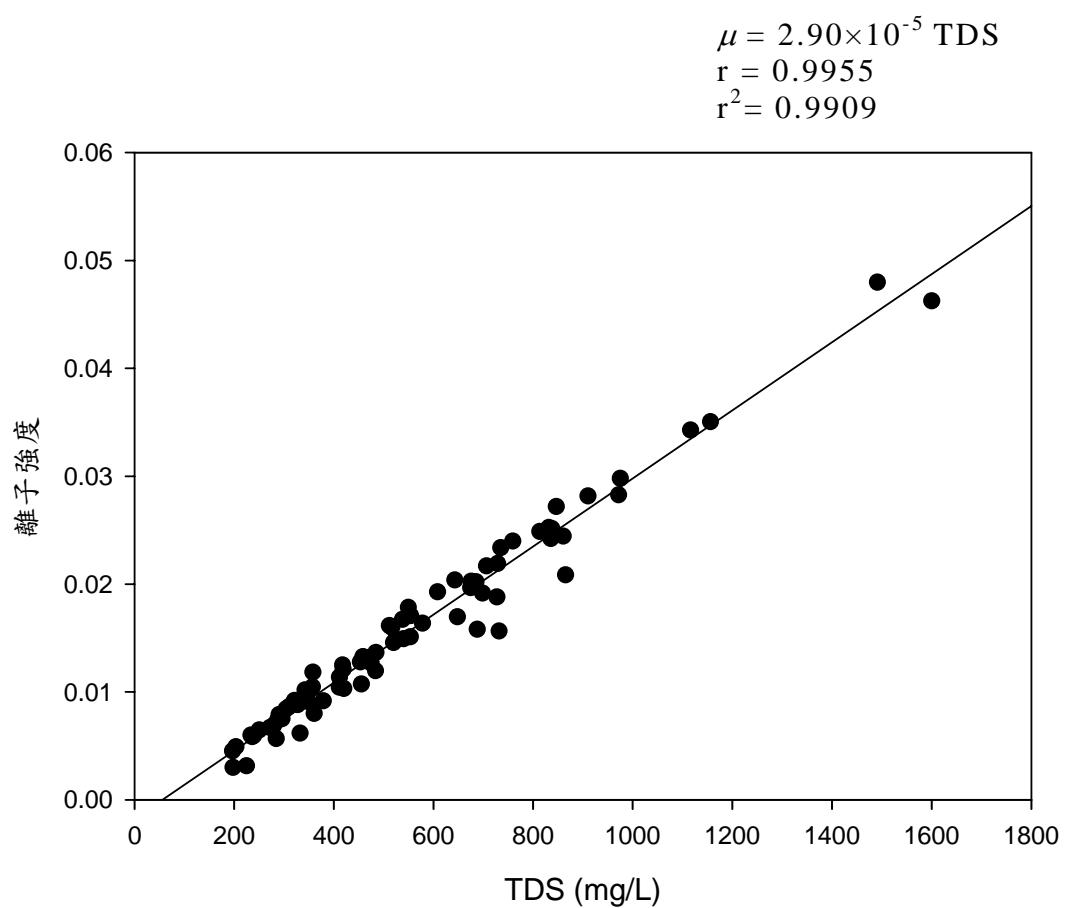


圖 12 各監測井總溶解固體與離子強度關係

五、結論與建議

5.1 結論

本研究應用三種方式，分別探討中部地區各區域地下水水質特性，所得之結論如下：

應用多變量統計之因子分析，找出中部地區地下水水質主要因子為苗栗縣分別有「鹽化因子」、「有機性污染因子」及「礦物性因子」三個；台中/南投地區為「有機性污染因子」；彰化縣為「鹽化因子」；雲林縣為「鹽化因子」及「氮污染因子」。

以Stiff 水質形狀圖及Piper水質菱形圖，分析中部地區地下水水質特性，得到一致的結果，中部地區地下水水質狀況大致良好，部分地區以Piper水質菱形圖評估，屬於IV區可能已受海水影響（如苗栗縣成功國小、彰化縣新寶國小、雲林縣文光國小湖口分校及口湖國小青蚶分校），以 Stiff 水質形狀圖分析亦呈現與海水特徵相似，屬於 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 離子凸出型，這些監測井需要持續監測，注意爾後的水質鹽化程度。

以三種不同方式計算分別求得中部地區地下水離子強度之差異不明顯。導電度、總溶解固體與離子強度迴歸分析，結果與文獻相近，進一步統計總溶解固體與導電度比值，比值為 0.69 ± 0.10 可代表中部地區地下水水質特徵，與北部及南部地區比較，結果相近。導電度量測方便，可於現場立即得到結果，由上述比值可藉由導電度即時推估水質受污染狀況。

5.2 建議

本研究中因子分析結果，發現各區域主要因子一幾乎都是屬於「鹽化因子」，顯示在中部地區有海水影響的問題，並且在部分監測井水質出現海水的特徵，建議相關管理單位持續調查追蹤，避免爾後地層下陷，水質鹽化等問題持續惡化。

多變量統計分析可經系統性分析簡化龐大的數據，得到代表性的因子，透過統計方法，較少主觀的因子干擾，所得結果較為客觀，因本研究僅針對中部地區進行分析，建議後續的研究可針對北區、南區或台灣地區的數據資料進行探討比較差異。



參考文獻

- [1] 單信瑜，2005，水環境教育教師研習活動教材。
- [2] 能邦科技顧問股份有限公司，台灣地區地下水資源 94 年修訂版，經濟部水利署，2005。
- [3] 顏妙榕，「地下水中鉛、鎘、銅、鉻、錳、鋅、鎳、砷、汞與氯鹽之區域性調查與健康風險評估」，高雄醫學大學，碩士論文，2003。
- [4] 林奧，「高雄市前鎮區地下水揮發性有機物污染與居民健康評估」，高雄醫學大學，碩士論文，2000。
- [5] 謝熾昌，「彰化縣和美地區地下水資源之研究」，國立台灣師範大學，碩士論文，1990。
- [6] 劉乃綺，「北港地區地下水水質變化之研究」，國立台灣師範大學，碩士論文，1985。
- [7] 洪華君，「雲林地區水文地質之研究」，國立台灣師範大學，碩士論文，1988。
- [8] 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，碩士論文，1997。
- [9] 鄭博仁，「應用多變量統計方法探討高雄縣地區地下水質之特性」，屏東科技大學，碩士論文，2002。
- [10] 郭益銘，「應用多變量統計與類神經網路分析雲林沿海地區地下水水質變化」，國立台灣大學，碩士論文，1998。
- [11] 張介翰，「應用多變量統計方法探討區域地下水之水質特徵」，國立台灣大學，碩士論文，2005。
- [12] 陳順宇，2004，多變量分析，華泰書局。

- [13] W.F. Langelier(1936) The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment, *American Water Works Association Journal* . 28:1500-01.
- [14] Russell,G.A. (1976) Deterioration of water quality in distribution system – Dimension of the problem. *18th Annual Public Water Supply Conference*, pp. 5-11.
- [15] 李敏華譯，1983，水質化學，復漢出版社。
- [16] Harvey, C.F., Swartz, C.H., Badruzzaman, A.B.M., Keon-Blute, N., Yu, W., Ali, M.A., Jay, J., Beckie, R., Niedan, V., Bradbander, D., Oates, P.M., Ashfaque, K.N., Islam, S., Hemond, H.F., and Ahmed, M.F. (2002). Arsenic mobility and groundwater extraction in Bangladesh. *Science* 298(5598) : 1602-06.
- [17] 畢如蓮，1995，「台灣嘉南平原地下水砷生成途徑與地質環境之初步探討」，國立台灣大學，碩士論文，1995。
- [18] Freeze, R. Allan and Cherry, John A.,1979,Groundwater,Englewood Cliffs, NJ/Prentice Hall

