Evaluation of Nitrate Contamination Potential in the Groundwater Catchment Area of Nan-Tou

Chen-Wuing Liu[1,2]

Abstract

Public concern over groundwater quality has grown significantly in recent years. Agriculture is considered as a major contaminant source of groundwater. Increasing evidence shows that the nitrate contamination exceeds the maximum contaminant level of groundwater in the upper Choushui river alluvial fan of Nantou. The objectives of the study were to apply factor analysis to identify factors that govern the chemistry of groundwater, and to determine the source of nitrate pollutant on its pathway using the groundwater quality data and land use type in this area. These results were integrated using DRASTIC to delineate the groundwater water vulnerability area and formulate the strategy for sustainable use of groundwater resources. Eight hydrochemical parameters including pH, EC, Hardness, NH_4^+, NO_3^-, Fe, Mn and S concentrations were considered to evaluate the characteristics of the groundwater by factor analysis. Three main hydrogeochemical factors were determined. Factor 1 has strong positive loadings on Fe, Mn and NH_4^+ which is a common type of the groundwater hydrochemical environment of Taiwan. Factor 2 has strong loadings on Hardness and EC representing a hardness water property. Factor 3 has strong positive loadings on nitrate and pH which is polluted probably from agriculture, industry and domestic sewage. Redox is the most plausible process determining the groundwater characteristics in this area where the groundwater has oxidized, acidic and high nitrate properties in Nan-Tou city and exhibits reduced, alkaline and low nitrate properties in Dou-Lio. Factor analysis shows the chemistry of groundwater is stable based on the data of 2004-2006. Contamination potential of nitrates is evaluated by DRASTIC. The score exceeds 160 define the scopes of groundwater vulnerable to pollution. The high contamination potential areas of nitrate are Pu-Li, the west of Tsau-Tuen, the southwest of Ming-Jian, the east of Ju-Bei and Nan-Tou city. These areas were agricultural active and densely populated. The nitrate pollution has no immediate threat to the downstream area of Choushui river alluvial fan. However, the present groundwater quality is not suitable for potable water use. In order to achieve sustainable use of groundwater resource, we should plan to remediate the nitrate contamination, construct sewer systems, reduce the use of agrichemicals and protect the areas of high contamination potential.

Keywords: Nan-Tou**,** Factor analysis**,** Contamination potential of nitrate, Groundwater, DRASTIC

---

1. Department of bioenvironmental systems engineering, National Taiwan University
2. Corresponding author, E-mail: lcw@gwater.agec.ntu.edu.tw

集水區上游南投地區地下水硝酸鹽氮污染潛勢評估

劉振宇 [1,2]

摘要

集水區上游地下水水質之良窳，直接影響中下游地下水使用之安全，近年來濁水溪沖積扇上游(南投區域)地下水因農業盛行導致硝酸鹽氮污染趨於嚴重，逐漸影響中、下地下水之利用，本研究以多變量統計方法之因子分析，評估本區地下水水質結構、特徵及其在空間及時間上之分佈與變化，並藉由現地水質調查及土地使用情況，研判潛在硝酸鹽氮污染源及可能之地下水污染途徑。然後結合 DRASTIC 模式，評估與劃定本地區地下水易受污染區，最後提出永續經營本區地下水使用方案。八項水質包括酸酸值、總硬度、電導度、氨氮、硝酸鹽氮、鐵、錳及硫化物爲因子分析之數據，本區域 2004~2006 年地下水水質因子分析研究果穩定。鐵錳及硬度因子爲台灣地下水水質特徵之一，皆爲地層中溶出，而硝酸鹽氮則爲地表人爲活動而導致；南投市之地下水水質呈氧化、酸性及高硝酸鹽氮之水質特徵，雲林斗六之地下水水質呈還原、中鹼性及低硝酸鹽氮之特徵；DRASTIC 模式評估本區之硝酸鹽氮地下水之污染潛勢結果，污染潛勢得分在 160 分以上之區域劃定爲易受污染區，其中呈現高硝酸鹽氮汙染潛勢包括埔里鎮、草屯鎮西半部、名間鄉西南側、竹山鎮北側及南投市內零星區域，皆爲南投縣之人口集中或農業盛行之區域。南投縣境內之硝酸鹽氮污染已超過 10 年以上且爲多重污染源，短期內雖未影響濁水溪沖積扇及台中盆地中游地下水區，但本區之地下水水質條件已不適民生用水之需。鄉鎮市應積極推動地下水污染防治，人口密集之鄉鎮市應加速興建衛生下水道，農業發達之鄉鎮應管理並輔導農戶減少使用農藥及化肥，以期達成地下水資源保育與永續利用之目標。

關鍵詞：南投、因子分析、硝酸鹽氮污染、地下水、DRASTIC

---

1. 國立臺灣大學生物環境系統工程學系暨水工試驗所
2. 通訊作者，電子郵件：lcw@gwater.agec.ntu.edu.tw

前言

集水區上游水質之良窳，對中下游地下水質影響重大，濁水溪沖積扇及台中盆地之上游爲南投地區 (以下簡稱本地區)，境內地勢除西側南投市、草屯鎮、名間鄉等爲平原地形外，其餘鄉鎮多爲臺地或山地地形，地形高差變化極劇，且本地區因位於地面水水源之上游區域，地表水資源供應充足，地下水資源於本地區不似彰化、雲林縣及台中盆地等西南縣市獲主管機關重視，因而經濟部水利署建置之地下水觀測站網多以平原地下水區爲主，僅部份觀測井設置於濁水溪沖積扇上游。環保署之觀測井多屬場置性污染之水質監測功能，南投縣政府自民國 91 年起逐步設置特定污染源地下水監測井達 22 口，由監測井之水質結果均顯示地下水氮污染情形逐年惡化。台灣省自來水公司原自南投名間抽取地下水作爲自來水水源，也於該年改抽取水里溪之河水替代，顯示硝酸鹽氮污染已嚴重影響民生用水水源，必須盡速評估本地區地下水氮之污染潛勢及因應方案。本研究目的爲調查、分析南投地區地下水水質變化、結構及特徵，採用 DRASTIC (US EPA, 1985) 評估本區污染潛勢，及提出有效之管理策略。

研究方法

研究區域

本區位居本島中央，台灣地理中心碑設於本縣埔里鎮，是全省唯一不濱海之縣份，面積遼闊，南北長約九十五公里，東西寬約七十二公里，境內地勢除西側南投市、草屯鎮、名間鄉等爲平原地形外，其餘鄉鎮多爲臺地或山地地形。本區內有台中地區與濁水溪沖積扇兩個主要地下水區，其地下水來源主要來自濁水溪沖積扇上游、台中盆地及埔里盆地等三區域 (圖 1)；楊萬全等 (1976) 曾推估埔里盆地之地下水流入量約爲每年 124×10^6 噸，約合 3.93 CMS，因此地下水蘊藏量相當豐沛，但經濟部水利署所建置之地下水觀測網，於本地區境內除竹山鎮外，並無針對本地區地下水資源特性 (水量及水質) 進行例行之觀測，所以對於本地區地下水流場特性及水質變化行爲方面，各界所知甚爲有限。

1997~2006 年水利署水文水資源資料庫中 13 口水位觀測井分別位於台中盆地及濁水溪沖積扇兩大地下水區，分析南投地區地下水位及水位歷線變化，各井每年平均水位之標準偏差值差異性較大，表示本區域之觀測井水位變動較爲明顯，且地下水水位特性爲易受到豐枯水年而產生變動，則表示該地區地下水層滲透性佳、補注特性良好，爲主要之地下水補注區；以埔里盆地地下水位歷線結果而言，水位歷線在夏季豐水期水位抬升，在枯水期水位下降，

乾溼變化最爲明顯，因此將豐水期間多餘之地面水引入沖積扇上游補注區內適宜之含水層，增加其補注量，作爲枯水期間抽取，以供各標的不足用水之使用，可達到地面水及地下水資源之聯合運用。

爲瞭解本區地下水流向，本研究蒐整經濟部水利署及南投縣政府之南投地區地下水水位資料，繪製 2003 年本區地下水等水位線之空間分佈 (圖 2)，南投地區地下水源起於中央山脈流至濁水溪沖積扇上游及台中盆地，流向大致以東南流至西此外，本區域之埔里盆地因地形之條件，地下水型態爲小區域型地下水區，且爲蘊含較豐富地下水之最佳儲水位置，此外名間地區也呈現類似於小區域型地下水區之型態。

本區地下水水質硝酸鹽氮、氨氮及硬度之濃度有普遍偏高情況，爲南投縣內首要追蹤之標的。本研究彙集濁水溪沖積扇上游地下水 (雲林、彰化、南投及台中) 2004~2006 年之 81 口觀測井水質資料觀測井分佈如圖 3，作爲南投縣地下水水質時空分佈特性之探討。

2004~2006 年之地下水硝酸鹽氮濃度分佈 (圖 4)，三年之平均濃度 (3.3、5.8 及 5.5 mg/l) 呈現升高趨勢，且高硝酸鹽氮污染皆集中於南投市區及名間鄉，淺層的硝酸鹽氮濃度高於深層，淺層地下水受到硝酸鹽氮污染較爲明顯，其穿透之深度範圍約在 52~125.5 m，並有超過管制限值的疑慮。2004~2006 年南投市之數口觀測井曾出現高濃度之硝酸鹽氮污染，由於附近產業結構以農業用地爲主，種植水稻、鳳梨、茶葉及生薑等作物，並盛產茶葉聞名，過量施用肥料可能導致高硝酸鹽氮污染，然而目前硝酸鹽氮濃度分佈尚未見明顯污染擴大，但高污染源接近於濁水溪沖積扇頂之區域，爲透水性良好之地下水補注區，未來硝酸鹽氮汙染可能有擴大之虞。本區域氨氮濃度分佈 (圖 5)，三年之平均濃度 (0.3、0.2 及 0.19 mg/l)，呈現略減的趨勢，氨氮高污染中心皆分佈在彰化、雲林一帶。本區域硬度濃度分佈 (圖 6)，三年之平均濃度 (257.9、248.4 及 232.1 mg/l)，但皆超過飲用水水質標準 (150 mg/l)，2005 及 2006 年於彰化淺層觀測井螺陽國小 (50)、柑園 1 (26) 之硬度分別爲 580.3 及 605.1 mg/l，顯示淺層硬度濃度偏高的趨勢，隨觀測井深度增加而降低，與硝酸鹽氮之垂向分佈相似，推測地下水硬度之來源爲地表或淺層地層。

自來水井水質檢測

主要選取南投縣境內台灣省自來水公司之水井，全區共 19 口水井，其中 11 口抽水/加壓井爲南崗工業區附近，另 10 口則靠近南投市區，以供居民作爲民生用水 (民國 91 年 9 月以前)，由於台灣省自來水公司之觀測井無法測得地下水位，因此現場僅進行量測水溫、pH 值及導電度至少五次以上，直到最後連續三次各項參數符合採樣方法所規定之穩定標準，取得

新鮮之水樣。所採水樣依檢驗項目分別盛裝於無菌袋、100 公升採樣瓶 (PE 瓶)，隨即將水樣置於冰箱中，並於當天將水樣利用全程低溫運至檢驗室分析，分析項目爲 pH、氨氮、硝酸鹽氮、鐵、錳、硬度、鈣及鎂。分析方法採用環保署公告之檢驗方法 (行政院環保署環境檢驗所 http://www.niea.gov.tw/)。

因子分析

本研究利用因子分析法 (Factor analysis) 進行水質資料分析，其目的爲尋找原來變數的線性組合使其變異數最大，進而將多個具相關之變數簡化爲少數幾個無相關之變數，若變數間皆不相關則無需利用此方法再簡化，屬一探索性資料分析方法。因子分析法與回歸分析最大之差異爲此法中每個變數皆視爲同等，而迴歸分析爲將變數分成自變數與應變數兩類，而因子分析的優點是能降低維度，即減少變數個數，只考慮幾個主因子而不計權重較小之因子，但缺點則是會損失少部份原始資料代表的訊息。而因子分析法之分析步驟簡述如下 (羅積玉，1994；陳順宇，1998)：

1. 原始資料之標準化

   由於各個變數之單位不同，故先將原始變量數 (15 項檢測項目) 與觀測樣本數 (100 口觀測井) 所構成的原始數據矩陣予以標準化轉換，標準化轉換後之數據矩陣，其平均值爲 0，變異數爲 1。

2. 相關矩陣之主成分分析

   由上述過程所產生之相關矩陣求解其特徵值及其相對應的特徵向量，再由單位特徵向量矩陣與上述之標準化數據矩陣，可得一組由原始變量所重新組合且彼此互不相關的新變量矩陣，然後其進行標準化處理。

3. 確定主因子

   由於因子分析法中各個變數皆爲同等，故由上述兩步驟可得數個新因子，且其數量與原始變量數相同，此時必須對這些因子進行刪減，且保留重要主因子以簡化問題，而主因子選取的方式一般有四種，包括陡坡測試 (scree test)、保留特徵值大於 1 之因子、因子特徵值之解釋能力小於 5 %予以刪除，或採用前面數個變異量總和達到全部變異量總和的 80-95 %之因子。

4. 因子軸旋轉

   爲使各個主因子與變數間關係更爲清楚，須將上述過程中產生之因子負荷矩陣進行旋轉，使因子負荷趨向 0 或 1 兩極化靠近，達到結構簡化與主因子意義清楚之目的。而

旋轉方式眾多，本研究使用最常見之變異最大旋轉法 (varimax rotation)，使因子負荷矩陣中，各因子負荷的總變異量達到最大。

5. 因子得分計算

最後得到之主因子爲原始變數之線性組合，故利用因子得分計算可由因子的角度解釋原始變量，並進行歸納。將轉置後的因子負荷矩陣、相關矩陣之逆矩陣與標準化後之數據矩陣三者相乘即爲因子得分。

由於南投地區地下水觀測井水質數據有限，因此再將雲林、彰化、台中等地地下水觀測水質數據，一併加入探討。水質項目包括酸鹼值 (pH)、總硬度 (Hardness)、導電度 (EC)、氨氮 (NH_4^+-N)、硝酸鹽氮 (NO_3^--N)、鐵 (Fe)、錳 (Mn)及硫化物 (S) 共計 8 項，作爲因子分析 (Factor Analysis) 項目，並以選近三年 2004~2006 年進行因子分析，探討本地區之水質特徵及污染指標並繪製主要因子之空間分佈，因子分析軟體採用 SPSS。

DRASTIC

DRASTIC 爲評估一地下水區之易受污染之空間分布模式，易受污染區經 DRASTIC 評估劃定後可作爲後續地下水污染防治工作之依據，DRASTIC 考慮七項地文與水文地質參數，以評估一地區受污染潛勢之程度。同時，由於此七項水文地質參數均可以地理資訊系統 (ArcGIS 8.3) 之地圖形式表現，將一地區之污染潛勢程度顯現於圖面上。DRASTIC 系統除對一般性污染物提出考慮水文地質參數之一般性權重外，尚針對農業行爲提出農業權重。DRASTIC 污染潛勢評估系統實際應用在南投地區時，所使用的七項參數之給定分數條件皆爲同一標準，所以從圖上所獲得之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，且參數之給定範圍爲 1~10，因此爲一指標性之評估模式，此爲 DRASTIC 模式之限制。

DRASTIC 七項水文地質參數爲:

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)

DRASTIC 系統將考慮之七個水文地質參數分別轉換成 1~10 分之分數等級，前述七項水文地質參數皆可用地圖形式來表現。

過去交通大學土木工程研究所 (1999) 及洪瑛鈞 (2002) 曾在台灣濁水溪沖積扇與金門地區進行 DRASTIC 污染潛勢評估，本研究以 DRASTIC 模式劃定南投縣地下水易污染區，以探討地表農業、工業及生活污水之硝酸鹽氮污染可能入侵含水層之區域，並將劃定污染區域與目前地下水硝酸鹽氮污染範圍進行比較；探討硝酸鹽氮之污染潛勢，並建議本區地下水污染防治之方案，已確保本區地下水之永續利用。

結果與討論

地下水水質特性分析

自來水水質分析

台灣省自來水公司共 19 口採樣井檢測 pH、氨氮、硝酸鹽氮、鐵、錳、硬度、鈣及鎂。水質檢驗結果與飲用水水源水質標準、灌溉水水質標準及地下水水質監測基準比較結果如表 1 所示。依據地下水監測基準爲 5 mg/L 及地下水管制標準、飲用水水源標準爲 10 mg/L，此次分析 19 樣本共有 9 項水樣超過飲用水水源水質標準，且共有 18 項水樣超過地下水管制標準，僅有一處之硝酸鹽氮濃度低於管制標準。水質分析結果顯示在本區地下水已不適合作爲飲用水質之來源。

因子分析

中央地質調查所之「台灣地區地下水觀測網整體計畫」第一期 (81~87 年度) 濁水溪沖積扇共完成 88 站水文地質鑽探，鑽探總深度爲 17,051.5 M，將濁水溪沖積扇劃分爲四個含水層，以四個阻水層區分。南投區域 (濁水溪上游等地) 含水層一深度爲 19~103 M 之間，最深之深度爲 103 M 平均厚度約 42 M，含水層二深度介於 35~217 M 之間，含水層二分布爲最廣，含水層三深度爲 140~275 M，含水層四深度大於 275 M。因此本研究在水質因子分析中將分爲兩種方式進行，一爲不分深淺層將所有觀測井進行分析，其二依據定義淺層深度爲 9~100 M，深層深度爲 100~260 M，將代表淺、深層地下水水質進行分層水質特徵之探討，分別繪製各因子得分分布圖作爲比較。

2004 年 (該年水質數據較爲完整) 濁水溪沖積扇及台中盆地上游 (包括南投、雲林及彰化等地區) 地下水之因子分析結果顯示，因子 1 解釋總變異量達 35.9 %（表 2），其中與鐵 (Fe)

及硬度 (Hardness) 呈高度相關性，而導電度 (EC) 及錳 (Mn) 呈中度相關 (表 3)。硬度 (Hardness) 乃由多種多價陽離子所引起，主要爲鈣與鎂，其他如鋁、鐵、錳、鋅等亦會增加硬度，且地下水因與地層中之礦物反應，導致水中硬度升高；鐵及錳爲岩石及土壤的組成成分之一，且由於地下水與地層礦物之交互作用，致使地下水之鐵與錳含量會較高 (張介翰，2006)；此外，當地下水流入地層後，開始發生還原反應，漸漸將溶氧消耗殆盡，因此，導致地下水硝酸鹽氮濃度漸減及鐵錳濃度逐漸升高，而南投地區地下水多屬此弱還原環境，所以有利於部分硝酸鹽氮、二價鐵及二價錳存在 (彭宗仁等，2001)。故因子 1 可命名爲「硬度及鐵錳因子」其空間分佈圖 7 所示；水質之軟硬與否，於飲用水中之主要影響爲味覺口感，對於公眾健康影響不大。由 34 口觀測井 (9~200 M) 之硬度及鐵錳因子得分結果，溪州 1 (34) 爲地下水水質最硬之地區如圖 7 所示，與淺井 (9~100 M) 之分析結果相同如圖 7(b) 所示，其溪州 1 (34) 之總硬度濃度爲 1060 mg/l (以 $CaCO_3$ 爲基準)，但由深井 (100~200 M) 之硬度及鐵錳因子潛勢如圖 7(c) 所示，六合 (29) 爲地下水水質最硬之地區，其總硬度濃度爲 560 mg/l (以 $CaCO_3$ 爲基準)，因此，濁水溪沖積扇上游 (南投地區) 地下水水質硬度因子空間分佈，可依據含水層深度不同，而產生水質硬軟程度也不同，含水層深度爲 20~50 M 水質硬度程度較爲明顯，故可推估淺層地下水易受到地面垂直入滲溶出造成硬度升高。

因子 2 解釋總變異量達 18.19 %（表 2），其中與 pH 及 NO_3-N 呈高度相關性，因氨氮經氧化作用形成硝酸鹽氮的過程中，會使 pH 成酸性反應，以致因子得分圖兩者呈負相關如表 3 所示；且南投地區因其農業活動頻繁，茶園旱作密集分布，大量使用人工肥料、動物排泄物，導致非點源氮化合物 (氨氮、硝酸鹽氮及亞硝酸鹽氮) 入滲污染地下水。因子 2 可命名爲「硝酸鹽氮污染因子」 如圖 8 所示，南投地區地下水硝酸鹽氮濃度介於 0.03 至 18 mg/l 之間，由觀測井不分層 (9~200 M) 及淺層觀測井 (9~100 M) 之硝酸鹽氮因子得分結果，新光 1 (6) 爲地下水水質硝酸鹽氮因子得分較高之區域如圖 8(a)(b)所示，本區域之硝酸鹽氮濃度爲 17.75 mg/l 及 pH 爲 5.12，顯示高硝酸鹽氮及酸性之水質特徵。深層觀測井 (100~200 M) 較高之硝酸鹽氮的地區則爲新光 2 (7)如圖 8(c) 所示，以此深度之含水層呈中性 (6.5) 及呈低硝酸鹽氮 (0.03~1.36 mg/l) 污染，較淺層地下水硝酸鹽氮汙染較不明顯，故可推估淺層地下水易受到地面垂直入滲溶出造成硝酸鹽氮污染升高之趨勢。高硝酸鹽氮因子得分區域皆位於濁水溪上游南投市一帶，然濁水溪沖積扇頂爲地下水補注區，其溶氧及含氮的化合物在溶氧的氧化下，易轉變成硝酸鹽氮，若以 0.5 mg/l 爲界高濃度硝酸鹽氮分佈在淺層 (9~120 M) 爲最廣；南投市與名間地下水高濃度硝酸鹽氮污染，其污染源應爲地表中受到人類活動所致，硝酸鹽氮汙

染其潛在的趨勢，與該區域的原生地質、水文、水文地質特性等亦關。南投市與名間之地質結構大多屬於沖積土及紅土組成，一般紅土的特性爲多鐵質、多孔隙，呈非拘限含水層，而各含水層水力傳導特性較佳 ($K=0.03\sim1.9410^{-3}$ m/sec)，由此可知南投市與名間鄉之水文、地質條件應有良好地下水補注特性，因此易造成地表硝酸鹽氮污染物垂直滲入，且因流通性佳進而影響深層之含水層，由於兩區域之土地利用以農業爲主，因而過量施用肥料，可能導致地表入滲造成高硝酸鹽氮污染，初步推測硝酸鹽氮汙染之主要爲農業施肥及飼料污染所致；根據彭宗仁等 (2007) 顯示名間鄉地下水 NO_3^-濃度無明顯的季節變化且變異係數皆不高，因此NO_3^-污染主要是受到長期農業活動所影響且 NO_3^-污染來源穩定，與本研究結果相符。因子 3 解釋總變異量達 12.76 %（表 3），主要爲硫化物 (S)，其餘皆呈低度相關性，因子 3 可命名爲「硫化物因子」，由於南投地區受硫化物污染的可能性極低，且硫酸鹽濃度皆未超過飲用水水源水質標準（250 mg/L），2005 及 2006 年皆未顯現故對水質影響不大。

爲進一步探討時序變化對於南投地區 (包括雲林及彰化等地區) 地下水水質之特性及關聯，分析 2004~2006 年之因子得分分佈，可瞭解三年間此區域不同年份與各分層之水質變化及水中化性的穩定程度。2004~2006 年以各因子與水質項目之負荷關係，取較高負荷之水質項目如表 4 所示，三年之因子分析結果顯示本區域地下水水質特性呈穩定現象，主要影響之水質特徵相似度高，仍以鐵、錳、硬度及硝酸鹽氮因子爲本區域水質特徵。結合 2004~2006 年淺層及深層地下水水質特性及因子分析結果，並瞭解南投地區地下水可產生氧化還原分區；由淺層地下水因子分析得分如圖 9 所示，南投市一帶 (深黑處) 爲高硝酸鹽氮污染潛勢區，此區域之水質硝酸鹽氮濃度高且呈酸性表示地下水水質爲氧化的特性，代表三年間南投市 (名間鄉) 一帶較爲氧化，但深層地下水並未有此現象。本區域地下水除淺層氧化水質特性，深層水質尚有還原的特性，由於還原環境易造成鐵、錳的釋出，深層地下水之高鐵錳濃度皆於雲林斗六 (深黑處) 以圖 10 所示，表示此區域之地下水水質趨向還原、中鹼性、低硝酸鹽氮污染特性。

硝酸鹽氮潛勢分析

DRASTIC 評估之污染潛勢如圖 11 顯示，南投縣境內污染潛勢得分較高之區域 (160 分以上) 包括埔里、草屯鎮西半部、名間鄉西南側及竹山鎮北側，將得分在 160 分以上之區域劃定爲易污染區；將 2006 年於南投地區硝酸鹽氮濃度 (共 27 點) 與 DRASTIC 模式中各因子之分數及總分進行迴歸分析，觀測井之硝酸鹽氮濃度與各項因子之分數與總分並無顯著之相關性，雖然高污染濃度區域和高污染潛勢區域無顯著相關，然而在部分高污染潛勢區域（如南

投市）附近出現高污染濃度區域，而南投地區內地下水質監測井主要集中於南投市區及草屯、名間、竹山等鄉鎮，在以上所述區域，地下水位深度 (D)、地形坡度 (T)等項目均有較高之得分 (7 分以上)；並由 D 值得結果顯示，草屯鎮及埔里鎮爲得分高之區域，其 D 值之權重爲 5，換言之，地下水深度較淺之地點，其污染潛勢經過加權計算後較其他因子具更高之影響；而 T 值得分結果顯示，得分在 9 分以上之行政區也位於埔里鎮、草屯鎮及南投市等地；上述得分較高之行政區，包括南投市、埔里鎮、草屯鎮、竹山鎮、名間鄉，除埔里鎮之外其他四個行政區位於南投縣西部，地勢緩和，而埔里屬於盆地地形，盆地中央之坡度亦屬平坦，與上述 T 值得分較高之區域相符合。而其他高污染潛勢地區中，埔里鎮並未設置水質監測井，無長期記錄當地水質之變化，在埔里應增設數處監測井；至於草屯鎮、竹山鎮、名間鄉 (名間鄉硝酸鹽氮污染擴散至地下水深層自由含水層，如圖 2 顯示該地地下水之匯流區) 等地，硝酸鹽氮濃度雖較南投市爲低，亦設有監測井以觀察水質變化，然而由於其高污染潛勢之特性，應持續進行水質之監測與分析，由圖 2 之地下水流向顯示名間、竹山等地之地下水來自於東側鄉鎮（如鹿谷鄉與集集鎮）。針對本區域之農業興盛區域，根據歐洲共同體於 2002 年 4 月所制訂出特定蔬菜中硝酸鹽最大限量標準 (2,000~4,500 mg NO_3/kg)，反觀國內 2005 年環境永續指數 (ESI) 的資料顯示，使用量平均值爲 152.7 公斤/公頃，由於台灣農民勤於耕種，一年多穫，作物複雜指數高，且氣候高溫多濕，肥料流失快，需要多次施肥，而其他國家大多僅需要施肥一次，因此會高於世界之平均值。未來建議本區應管制地下水補注區之產業活動及土地利用、各項開發計畫，限制地下水補注區之農藥施用肥料用量，協助農戶提出肥料管理計畫 (nutrient management plan)。此外於人口密集之鄉鎮市應提高衛生下水道普及率，以降低生活污水入滲所造成之硝酸鹽氮污染，以確保本區地下水永續利用之目標。

結論

本研究藉由濁水溪上游 (南投縣、彰化、雲林及台中盆地上游) 地下水水資源及水質數據之匯整、分析及模擬評估，建立縣區地下水資源及水質結構特性、劃定易污染區及硝鹽氮污染潛勢分析。本區各水井觀測站之水位歷線呈現多爲平穩狀態，各測站在 9 月以前之水位對降雨補注反應較不明顯，但在 9 月及 10 月以後均呈明顯上升，且水位高低依地形高程而變。由地下水位歷線顯示，地下水由東南及東北朝西流動，且於埔里及名間呈區域型地下水區。本區地下水水質以硝酸鹽氮污染較爲嚴重，19 口自來水公司供水井中 9 口水井之硝酸鹽濃度

超過飲用水水源水質標準 10 mg/l。由因子分析結果顯示本區之水質特徵爲鐵錳因子、硬度因子及硝酸鹽氮因子，其中鐵錳及硬度偏高主要源自地層礦物之溶出，而硝酸鹽氮之污染則屬農業活動及生活廢水入滲汙染地下水所致。而依據 DRASTIC 模式進行污染潛勢評估結果，南投縣境內之污染潛勢得分由 0-240 分之間，將得分 160 分以上之區域劃定爲易污染區，其中主要之行政區包括埔里鎮、草屯鎮西半部、名間鄉西南側、竹山鎮北側及南投市內零星區域，上述地區由於地勢較爲平坦，且地下水深度較淺，因此其污染潛勢較南投縣內其他地區爲高，同時南投縣之人口亦多集中於上述區域。

由目前研究結果顯示南投縣境內近 50 %之監測井其硝酸鹽氮濃度高於飲用水水源水質標準 (10 mg/l)，由於南投縣內之地下水監測井大多位於西半部各鄉鎮如草屯鎮、南投市、名間鄉、竹山鎮等地，以地下水保育管理之角度而言，監測井之設置未能涵蓋全區。爲確保南投縣之地下水資源供應無虞，可參考各國先進國家之地下水硝酸鹽污染防治工作與改善方案管制並減少化肥使用量，同時積極興建衛生下水道，減少生活污水進入地下水層，以達到南投縣地下水資源永續經營之目標。

謝誌

本研究承蒙南投縣政府環境保護局提供計畫經費資助，謹致謝忱。

引用文獻

交通大學土木工程研究所。1999。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(2/3)。經濟部水利署。

交通大學防災工程研究中心。2002。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(2/3)。經濟部水利署。

洪瑛鈞。2002。金門地區地下水污染潛勢分析。交通大學土木工程研究所碩士論文。

張介翰。2006。應用多變量統計方法探討區域地下水之水質特性。國立台灣大學生物環境系統工程學研究所。

彭宗仁、汪中和、饒欽良、紅玉倫。2001。南投地區烏溪流域集水區之水文同位素研究。第四屆地下水資源及水質保護研討會論文集 pp. 321-332。

彭宗仁、董奇矗、范家華、陳琦玲、林毓雯、劉滄琴。2007。南投名間農作區與鄉鎮區地下

水化學特徵比較。農業工程研討會 pp. 143-162。

雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心。2003。南投縣九十一年度地下水污染防治工作計畫。南投縣環境保護局。

雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心。2004。南投縣九十二年度地下水污染防治工作研究計畫。南投縣環境保護局。

楊萬全、張秉權、林金明。1976。南投縣埔里盆地的地下水。台灣水利 24：1-11。

陳順宇。1998。多變量分析。華泰書局。

華門工程顧問公司。2003。南投縣九十年度九二一震災建築廢棄物貯置場地下水監測井採樣及地面水水質監測計畫。南投縣環境保護局。

羅積玉。1994。多元統計分析方法與應用。科技圖書股份有限公司。

Kim, J.H., R.H. Kim, J.H. Lee, T.J. Cheong, B.W. Yum, and H.W. Chang. 2005. Multivariate statistical analysis to identify the major factors governing groundwater quality in the coastal area of Kimje, South Korea. Hydrol. Processes 19: 1261-1276.

Liu, C.W., K.H. Lin, and Y.M. Kuo. 2003. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. Sci. Total Environ. 313: 77-89.

Love, D., D. Hallbauer, A. Amos, and R. Hranova. 2004. Factor analysis as a tool in groundwater quality management: Two southern African case studies. Phys. Chem. Earth. 29: 1135-1143.

US EPA (Environmental Protection Agency). 1985. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrological settings. US Environmental Protection Agency.

Yung, Y.K., C.K. Wong, K. Yau, and P.Y. Qian. 2001. Long-term changes in water quality and phytoplankton characteristics in Port Shelter. Hong Kong. from 1988-1998. Mar. Pollut. Bull. 42: 981-992.

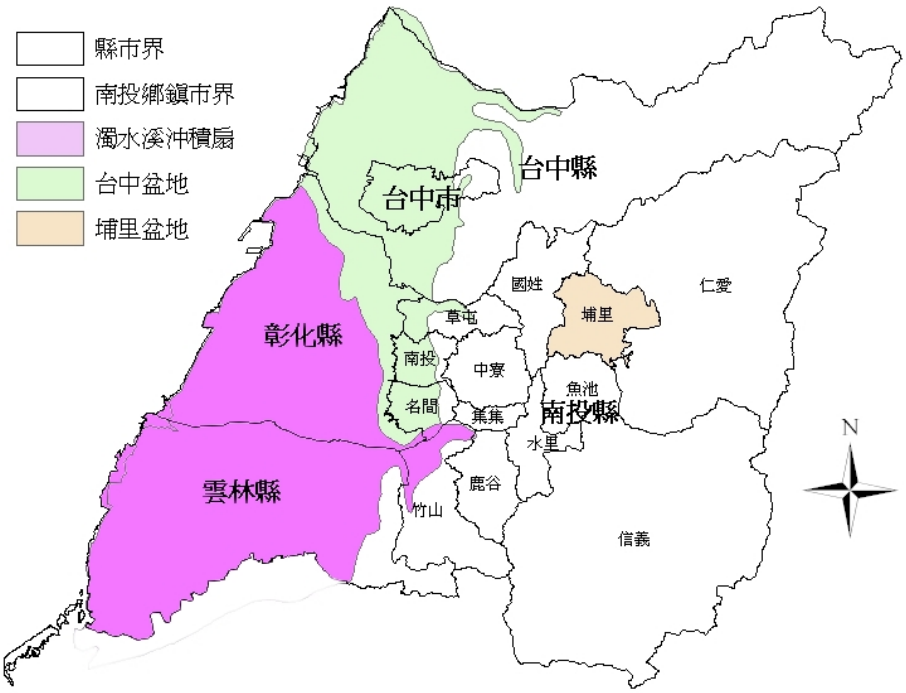


圖 1. 南投縣地理位置及中部地區地下水分區

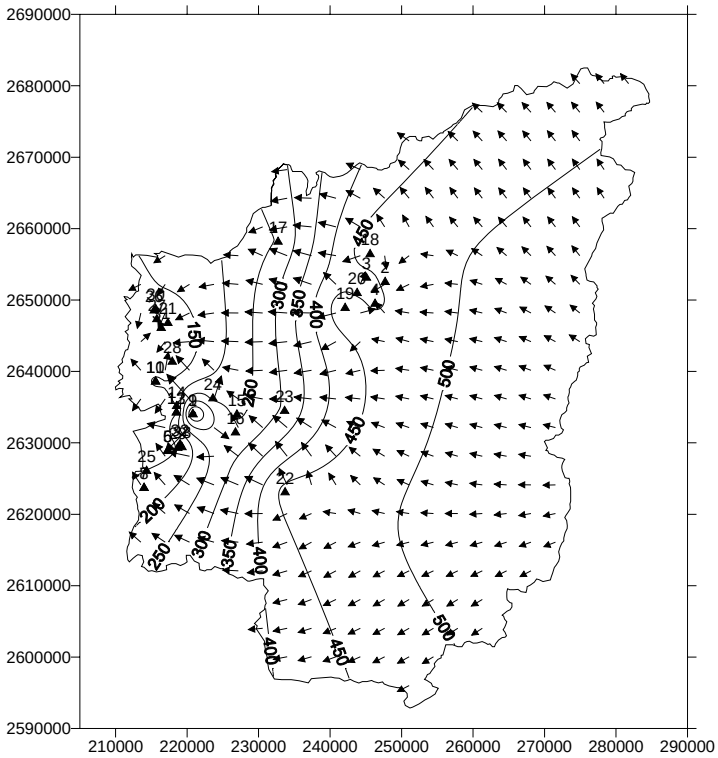


圖 2. 2003 南投縣境內地下水水位及流向(單位 M)

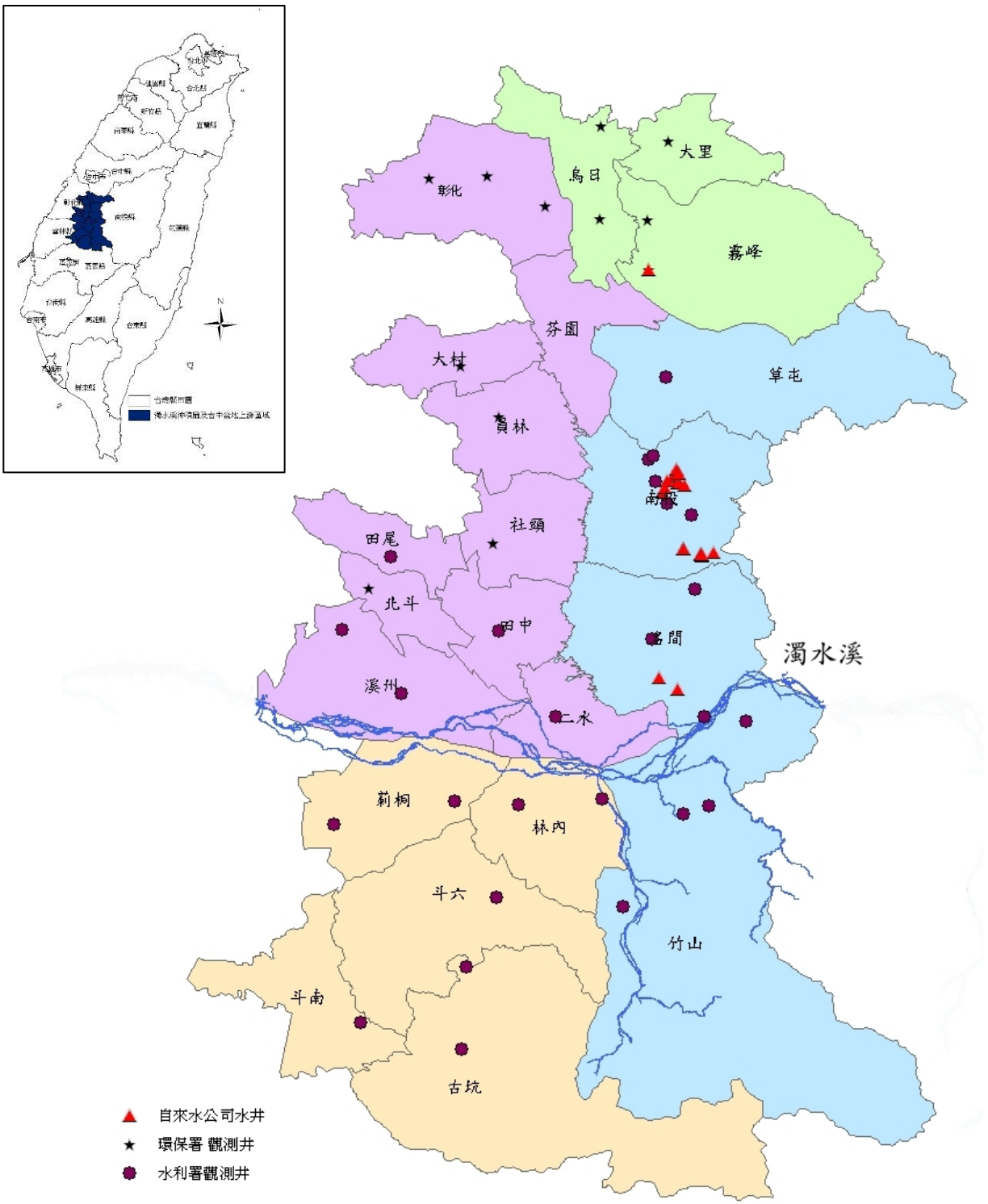


圖 3. 濁水溪沖積扇及台中盆地上游包括南投、彰化、雲林及台中地下水觀測井位置分布

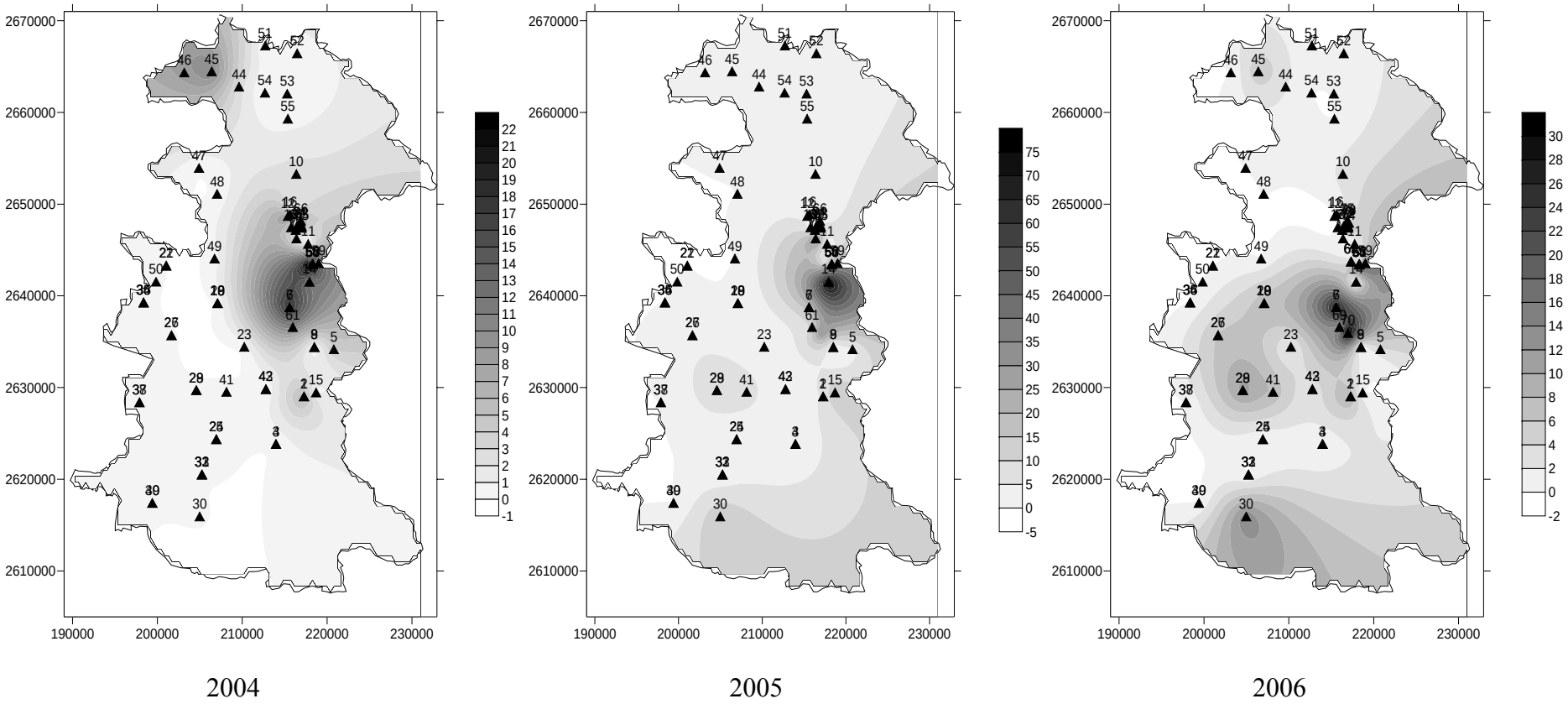


圖 4. 2004-2006 年濁水溪沖積扇及台中盆地上游(包括南投地區)地下水之硝酸鹽氮濃度(ppm)分佈

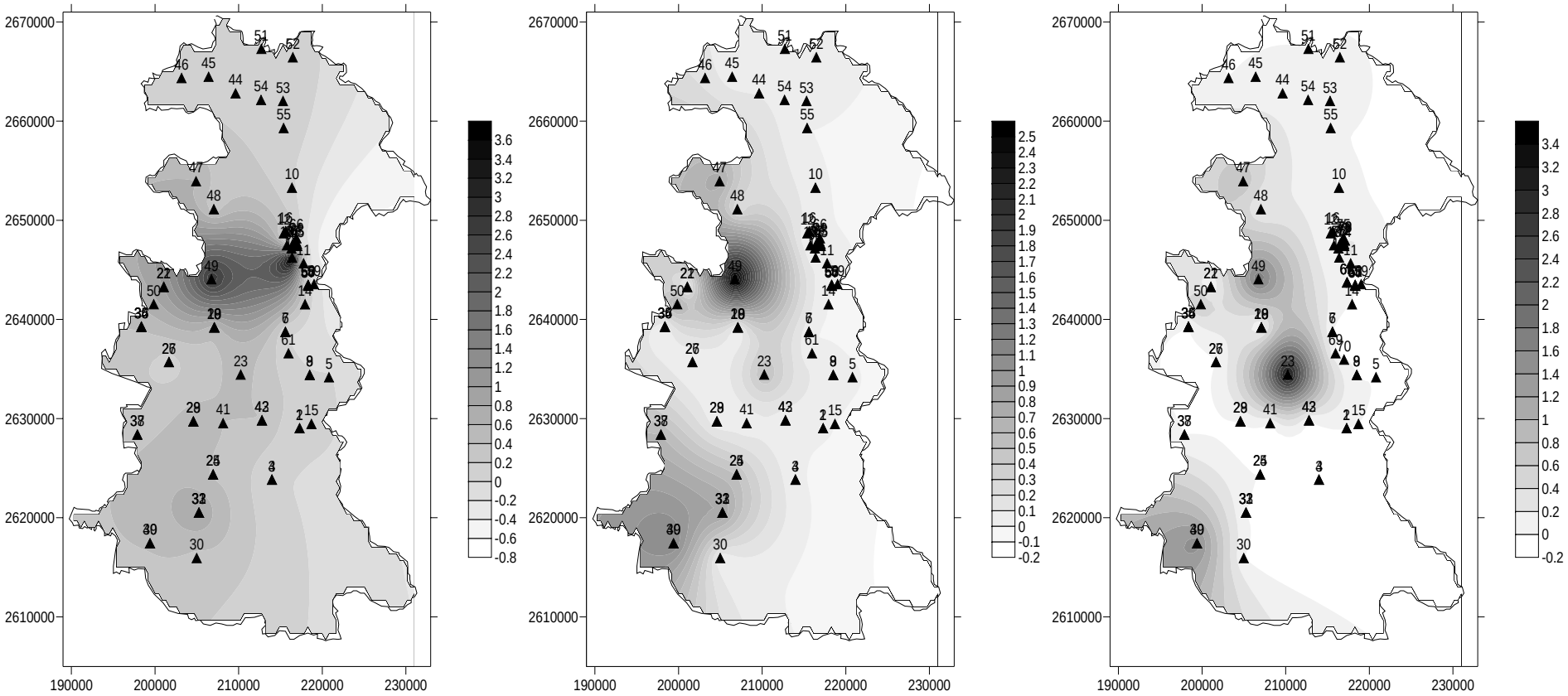


圖 5. 2004-2006 年濁水溪沖積扇及台中盆地上游(包括南投地區)地下水之氨氮濃度(ppm)分佈

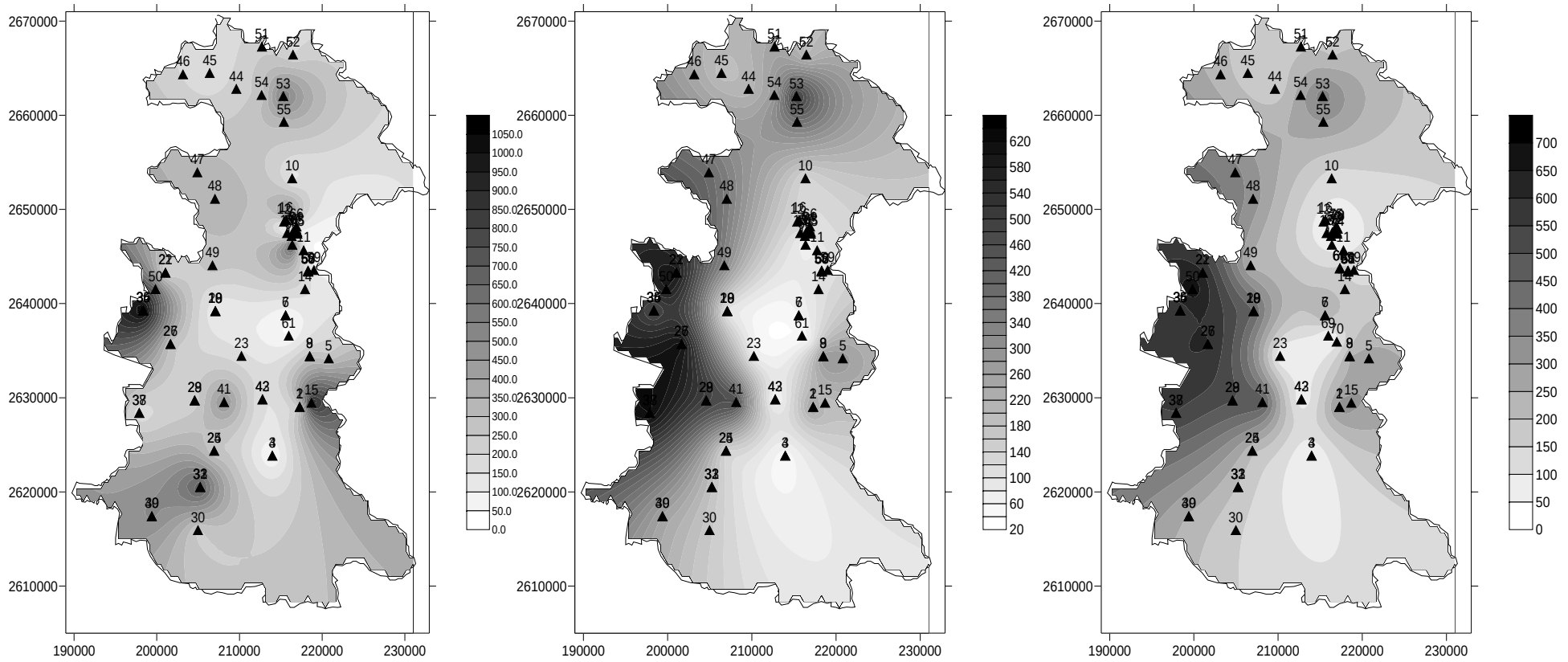
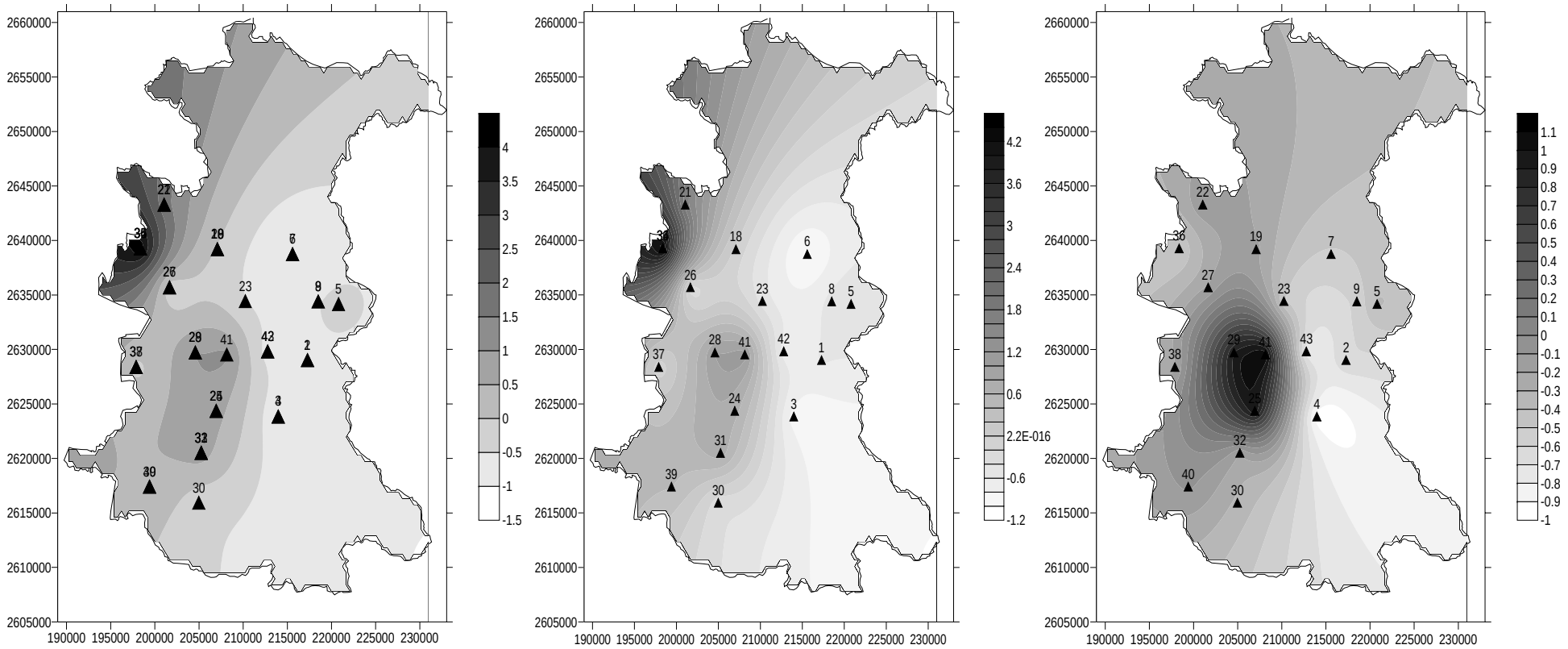
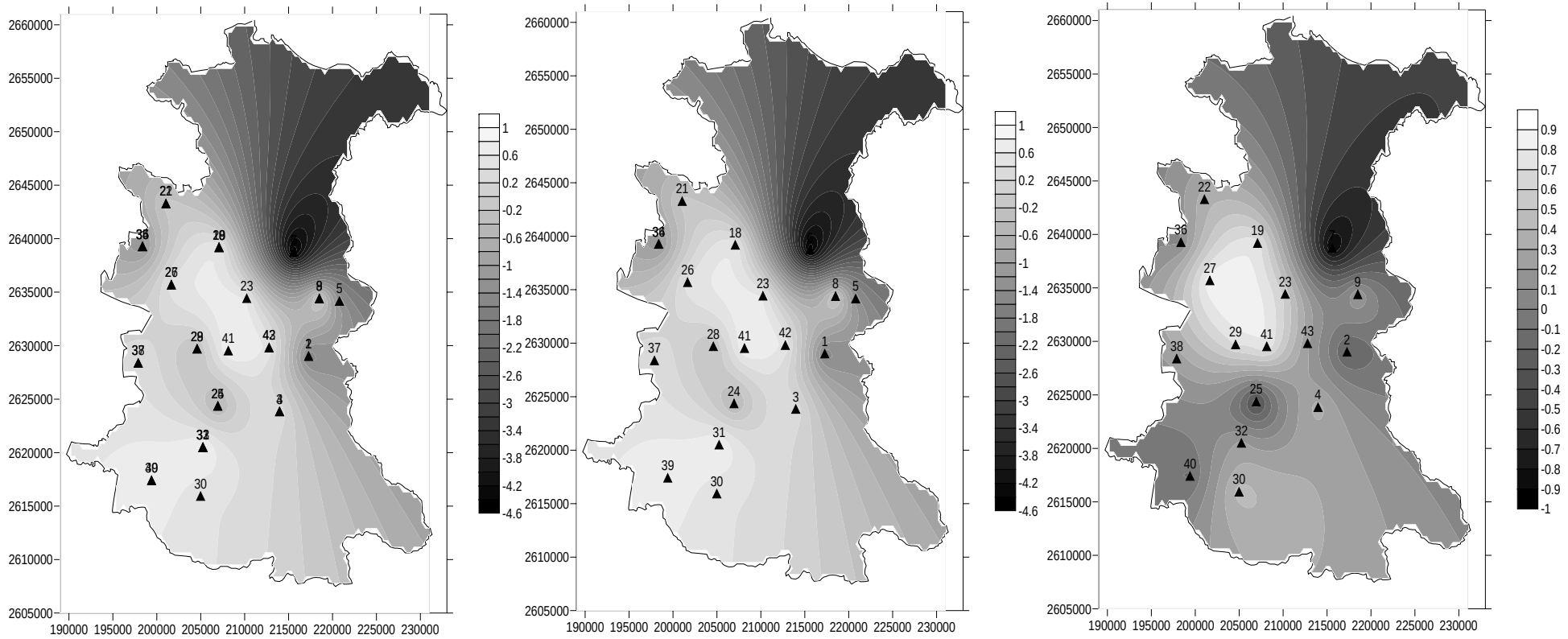


圖 6. 2004-2006 年濁水溪沖積扇及台中盆地上游(包括南投地區)地下水之硬度濃度分佈



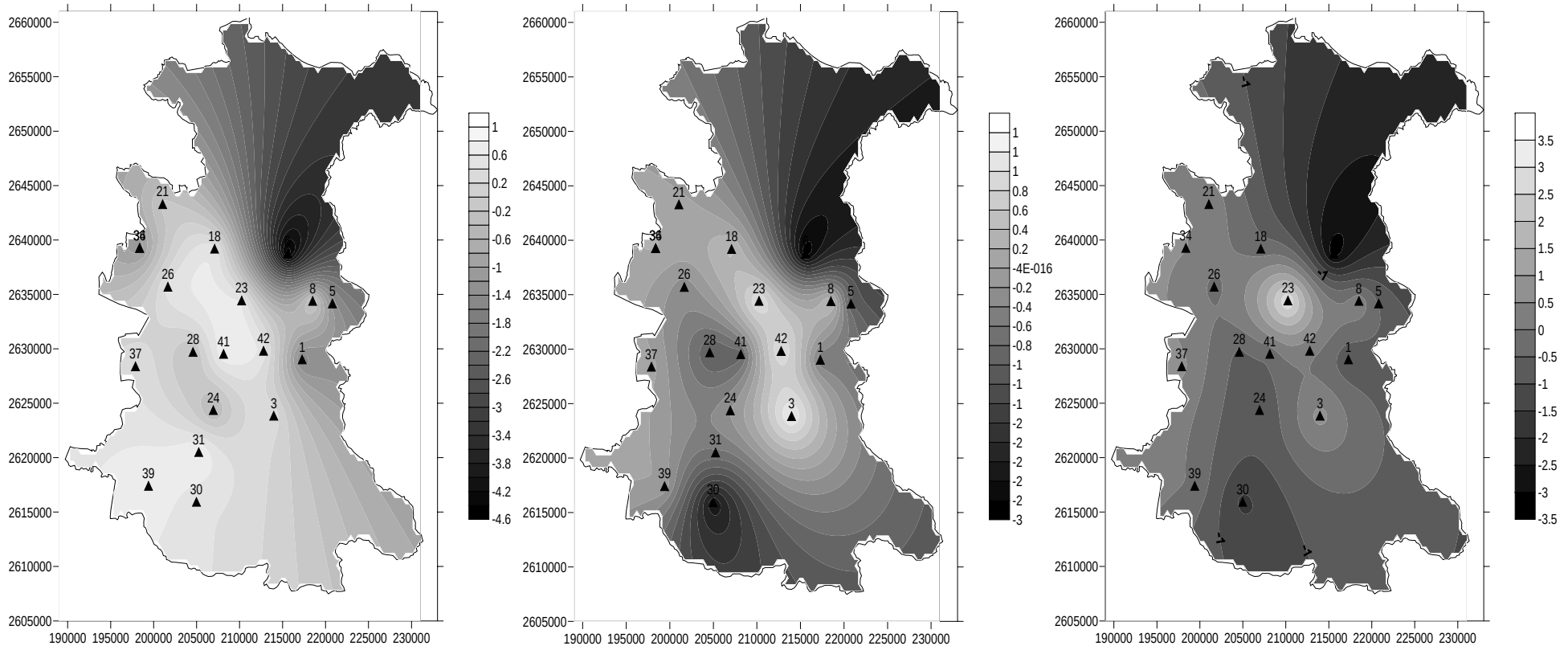
含水層 9-260M　　淺層 9-100M　　深層 100-260M

圖 7. 2004 年之硬度及鐵錳因子得分分布



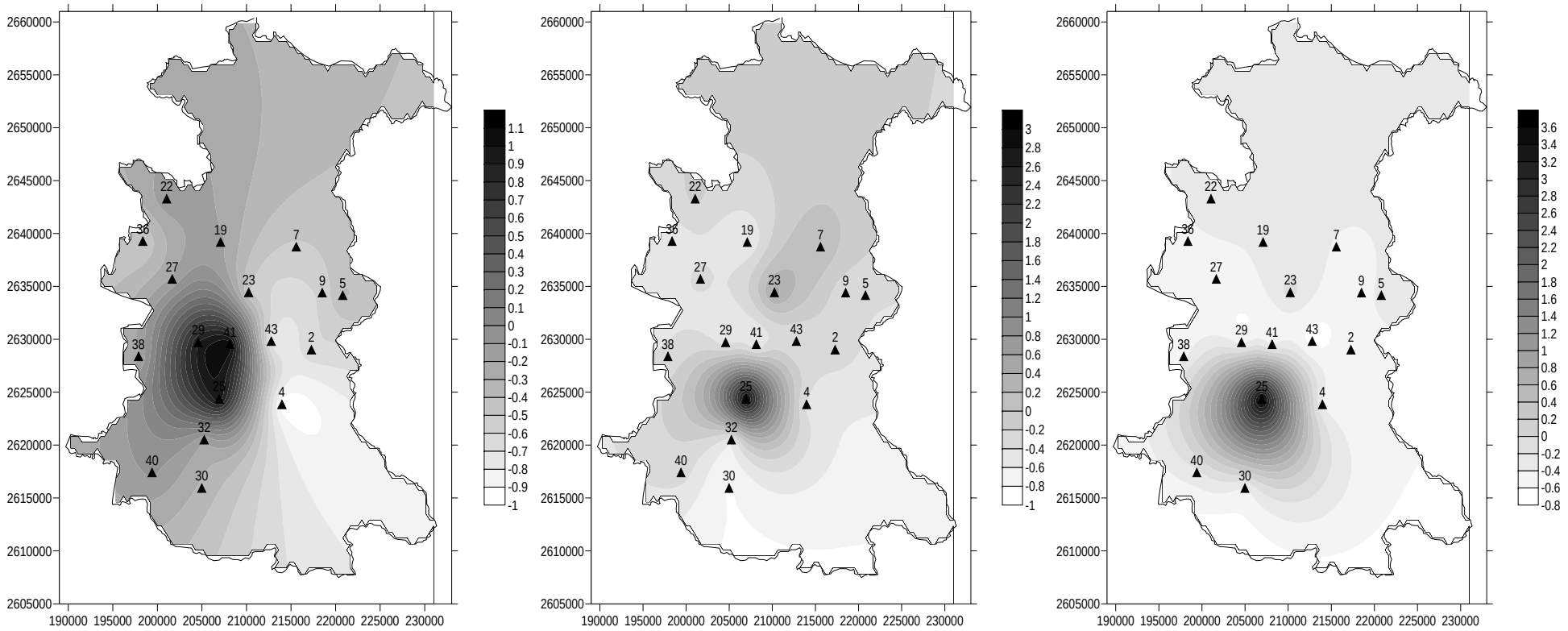
含水層 9-260M　　淺層 9-100M　　深層 100-260M

圖 8. 2004 年之硝酸鹽氮因子得分分布



2004 2005 2006

圖 9. 2004-2006 硝酸鹽氮因子得分分布(淺層)



2004 2005 2006

圖 10. 2004-2006 鐵錳因子得分分布(深層)

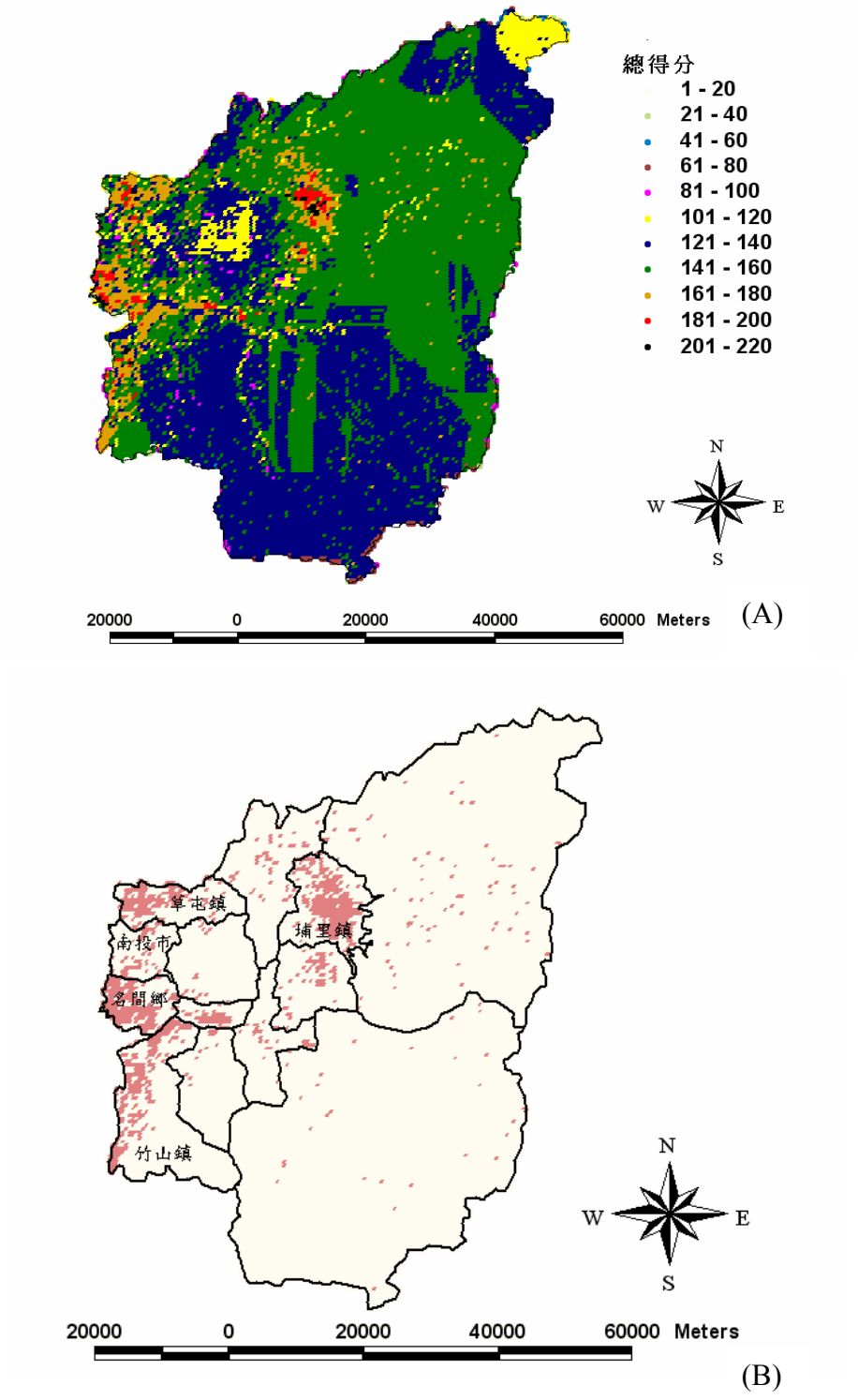


圖 11. 南投地區 DRASTIC 模式之總得分(A)與易污染區之位置(B)

表 1. 自來水水井水質檢驗結果與水質標準比較

檢驗項目	井深	pH 值	硝酸鹽氮	氨氮	鐵	錳	硬度	鈣	鎂
單位	m	---	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/Las $CaCO_3$mg/L	mg/L	mg/L
飲用水水源標準	---	6~8.5	<10	<0.1	<0.3	<0.05	150	-	-
灌溉用水水質標準	---	6~9	-	3 總氮（T-N）	<5	<0.2	-	-	-
地下水監測基準	---	-	<5	<0.05	<0.15	<0.025	150	-	-
嘉和 1	150.0	8.2	13.7	0.05	ND<0.046	ND<0.048	127.0	30.3	12.4
嘉和 2	150.0	8.1	14.6	0.10	ND<0.046	ND<0.048	139.0	33.5	13.5
嘉和 3	150.0	8.0	15.4	0.12	ND<0.046	ND<0.048	133.0	31.8	13.1
嘉和 4	150.0	7.5	19.3	0.08	ND<0.046	ND<0.048	123.0	29.8	11.8
嘉和 5	230.0	7.8	7.3	0.03	ND<0.046	ND<0.048	87.8	22.3	7.8
嘉和 6	170.0	7.5	12.9	0.07	ND<0.046	ND<0.048	70.2	14.6	8.2
嘉和 7	170.0	7.3	10.3	0.10	ND<0.046	ND<0.048	68.5	14.6	7.8
嘉和寬 1	9.7	8.0	14.1	0.50	ND<0.046	ND<0.048	174.0	39.0	18.6
炭寮	200.0	7.3	30.9	0.12	ND<0.046	ND<0.048	91.8	18.5	11.1
崁腳	195.0	7.4	12.6	0.04	ND<0.046	ND<0.048	42.4	8.4	5.2
南崗 1	150.0	7.6	9.1	ND<0.02	ND<0.046	ND<0.048	87.5	17.1	10.9
南崗 2	200.0	8.0	4.6	0.10	ND<0.046	ND<0.048	62.9	15.1	6.1
南崗 3	150.0	7.8	7.2	0.05	ND<0.046	ND<0.048	74.7	15.3	8.9
南崗 4	135.0	7.6	9.0	ND<0.02	ND<0.046	ND<0.048	48.5	8.8	6.4
南崗 11	150.0	7.8	9.6	0.06	ND<0.046	ND<0.048	101.0	19.9	12.5
南崗 15	170.0	7.9	5.7	0.07	ND<0.046	ND<0.048	54.6	11.3	6.4
南崗 16	170.0	7.4	7.6	0.07	ND<0.046	ND<0.048	55.7	10.3	7.3
南崗 17	150.0	7.4	7.1	0.05	ND<0.046	ND<0.048	92.1	18.6	11.1
南崗 18	150.0	7.4	4.9	0.04	ND<0.046	ND<0.048	80.8	17.7	8.9

為超過水質標準之水井水質項目

表 2. 因子分析特徵值大於 1 之因子及其變異數百分比

因子	特徵值	變異數百分比	累積變異數百分比
1	2.87	35.90	35.90
2	1.46	18.19	54.09
3	1.02	12.76	66.86

表 3. 2004 地下水質各因子與水質項目之負荷關係（絕對值大於 0.6 者以粗體表示）

水質項目	因子		
	因子 1	因子 2	因子 3
Fe	**0.906339**	-0.10569	-0.04238
Hardness	**0.808632**	0.056155	0.004856
EC	**0.642308**	0.078933	-0.20457
Mn	**0.635808**	0.014567	0.045523
NH_4-N	0.489944	0.370816	0.160429
NO_3^-N	-0.22202	**-0.89406**	-0.02696
pH	-0.53532	**0.705518**	-0.11984
S	-0.05333	0.001989	**0.967287**

表 4. 2004~2006 年各因子與水質項目之負荷關係

年份	因子分析		水質項目			變異量(%)
2004	因子 1	硬度及鐵錳因子	Fe	Hardness	Mn	35.90%
	因子 2	硝酸鹽氮因子	NO_3^-N	pH		18.19%
	因子 3	硫化物因子	S			12.76%
2005	因子 1	鐵錳因子	Fe	Mn	NH_4-N	34.16%
	因子 2	硬度因子	EC	Hardness		25.57%
	因子 3	硝酸鹽氮因子	pH	NO_3^-N		18.52%
2006	因子 1	鐵錳因子	Fe	Mn		36.74%
	因子 2	硬度因子	EC	Hardness		24.60%
	因子 3	硝酸鹽氮因子	pH	NO_3^-N		16.28%
2004~2006 (平均)	因子 1	鐵錳因子	Fe	Mn	NH_4-N	27.50%
	因子 2	硬度因子	EC	Hardness		24.90%
	因子 3	硝酸鹽氮因子	pH	NO_3^-N		15.75%