Nitrate Pollution of Groundwater in Recharge Area of Alluvial Fans, Taiwan

Wen-Fu Chen[1,3] and Hsueh-Yu Lu[2]

Abstract

Alluvial fans are the most important aquifers for its abundant reserve of groundwater resource in Taiwan. Groundwater extractions in alluvial fans of Choshui and Pingtung are over 80 % of total yield in Taiwan. Nitrate levels in Choshui alluvial fan aquifers were higher from 1991 because of agricultural N fertilizer application and untreated sewage leakage. High concentration of nitrate (nitrate-N>10mg/l) in drinking water is known to cause methemoglobinemia (blue baby syndrome) in infants while low concentration of nitrate (nitrate-N 1-10mg/l) is a probable carcinogen. In our monitoring period of 1997-2007, about 10 % of wells in Choshui alluvial fan have elevated nitrate level and a higher value of 32 % were detected in Pingtung alluvial fans because of where with a broader fan head recharge area. There are 7 wells in Choshui with nitrate-N concentrations that once exceed the standard for drinking water of 10 mg/l and 4 wells exceeding the standard in Pingtung. Nitrate concentrations in groundwater show seasonal variation that are lower concentrations in rainy season for the dilution of rainfall and stream water and the nitrate concentrations are higher in dry season with the soil water was evaporated. Denitrification is another important process to control the nitrate concentration under the detection limit in groundwaters of middle-lower fan. Nitrate is one of the world's most common pollutants in groundwater system. During the last 50 years, human activities have dramatically increased inputs of nitrogen to groundwater. We suggest that new comprehensive monitoring program should be implemented to monitor these localized areas on site where nitrate have been detected in groundwater above regulatory guidelines in public-supply wells, domestic wells of local communities and monitoring wells.

Key words: fan head recharge area, Choshui, Pingtung, groundwater, nitrate

---

1. Instiitute of Hot Spring Industry, Chianan University of Pharmacy and Science
2. Department of Earth and Environmental Sciences, National Chung Cheng University
3. Corresponding author, E-mail: chenwenfu@ntu.edu.tw

濁水溪與屏東平原地下水之硝酸鹽污染

陳文福 [1,3] 呂學諭 [2]

摘要

沖積扇地層是台灣重要的地下水資源區，其中濁水溪沖積扇及屏東平原沖積扇群，估計地下水占全台抽用量之80 %。飲水中含硝態氮所造成的危害，於高濃度（>10 mg/l）時可能造成孕婦流產及新生兒藍嬰症（缺氧致死）；中濃度（1-10 mg/l）時可能會致癌。監測數據顯示從1991年開始，濁水溪沖積扇扇頂的地下水含有中高濃度的硝態氮，因爲扇頂區礫石層透水性佳且缺乏泥層隔絕，易受農業化肥與生活污水滲入的影響。本研究整理1997－2007年於濁水溪及屏東平原地下水區的監測數據顯示：濁水溪地區約10 %觀測井的硝態氮濃度偏高，多位於扇頂補注區，曾超過環保署飲用水限值10 mg/l的井有：東和、坪頂、社寮、古坑、二水、新光、田中等7口，其中又以新光及古坑井超過限值的次數最多。屏東平原約有32 %的井硝態氮濃度偏高，其井數較多的原因爲屏東平原扇頂礫石層的分布比濁水溪地區更廣。監測十年間有四口井的濃度曾超過限值：萬巒一、建興一、泰山一及新庄一，又以建興一較嚴重。本研究也發現：降雨及河川水的補注，因稀釋而使硝酸鹽濃度降低，但在乾季時、因土壤水份蒸發，造成淺層地下水的硝酸鹽濃度升高。地下水往中下游流動，硝酸鹽因脫硝作用，濃度降低至檢測下限以下。淺層含水層受硝態氮污染已是全世界所面對的嚴肅課題，台灣亦然，並且台灣特殊的沖積扇含水層、其扇頂部份缺乏泥層保護，加上人口及農業活動密集，化肥或生活污水可能進入含水層。目前許多沖積扇地區，其地下水仍是自來水水源之一，當局應重視此區域性的污染。後續研究應擴大監測的樣本數，例如監測自來水水井及居民自有水井，以瞭解居民飲用水的硝態氮濃度。

關鍵詞：扇頂補注區、濁水溪、屏東平原、地下水、硝酸鹽

---

1. 嘉南藥理科技大學溫泉產業研究所
2. 國立中正大學地球與環境科學系
3. 通訊作者，電子郵件：chenwenfu@ntu.edu.tw

前言

沖積扇地層廣泛分布於台灣島山脈的東西部兩側（林朝棨，1957），是重要的地下水資源區，其中以濁水溪沖積扇（或稱濁水扇洲）及屏東平原東側的沖積扇群最爲重要，估計地下水年使用量約50-60億噸，占全台抽用量之80 %（經濟部水資源局，1999）。扇頂補注區的地層以礫石層爲主，透水性佳但缺乏泥層隔絕，污染很容易隨地下水流動，在溶氧濃度高時，水中含氮的物質常被氧化爲硝酸鹽，導致地下水中硝酸鹽濃度過高（陳文福等，2003）。含氮物質來源可能是農業化肥、生活污水、化糞池污水等。飲水中含過高硝酸鹽將對人體產生許多危害，例如：硝酸鹽在消化道中被還原成亞硝酸鹽，於高濃度（>10 mg/l）時，可能造成孕婦流產及新生兒藍嬰症缺氧致死；中濃度（1-10 mg/l）時、硝酸鹽爲一氧化劑，可能會致癌（Follett, 1989），目前我國環保署的飲用水水源標準之硝態氮限制濃度爲10 mg/l。

沖積扇地層的地下水，通常由扇頂進入、往扇中及扇尾流動。地層中有許多元素會參予氧化還原反應，例如：有機碳、溶氧、氮、硫、及重金屬（如鐵及錳），不但會形成新礦物並且也會改變地下水水質。氧化還原反應通常有微生物參予及催化，因反應所提供能量有高低差別，因此有些優先進行、有些較後（Chapelle, 2001）。以還原系列爲例：溶氧還原優先進行、然後依次硝酸鹽還原、錳還原、鐵還原、硫酸鹽還原、最後甲烷生成（Stumm and Morgan, 1981）。一般而言，剛補注入地下的水含有溶氧，往深處流動時，因無空氣接觸，漸被地層及地下水中的耗氧物（例如有機碳）消耗，溶氧漸漸減少，水流越深或越下游（進入拘限水層），還原系列依次進行，地下水質因此會有帶狀特徵分布（Champ *et al*., 1979; Chapelle, 2001）。除了地下水環境外，海洋沉積物也有類似的現象，由海水-沉積物交界面往越深處，還原程度越增加，氧化還原帶狀特徵依次出現，稱之爲「成岩序列」（diagenetic sequence）（Froelich *et al*., 1979）。

溶氧及硝酸鹽帶通常分布在地下水的源頭補注區，含溶氧帶的地下水，溶解之亞鐵離子較少，含氮物質（如有機氮及氨態氮）會傾向形成最終產物--硝酸鹽，以濁水溪沖積扇爲例，扇頂的觀測井如二水、田中、六合等井，都發現有中高濃度（>1 mg/l）的硝態氮（圖1及圖2）。統計1956-2001年的數據顯示，田中地區地下水的硝態氮濃度，可能從1991年開始升高（謝永旭，1994-2003；陳文福等，2003）。1997-2001年監測扇頂34口井也發現地下水中硝態氮濃度界於0.47~17.8 mg/l，四年來呈穩定增加的趨勢，累積曲線中間值分別爲：0.47、1.26、1.56、1.82 mg/l，年增加率約爲0.28 mg/l（陳文福等，2003）。本文的目的，爲整理及分析近十年來

（1997-2007）的地下水觀測網監測數據，探討濁水溪沖積扇及屏東平原的硝態氮濃度分布與趨勢，提供相關單位參考，呼籲國人重視此一污染問題，並提醒地區民眾應防範可能的健康威脅。

研究方法

本研究使用的井爲經濟部水利署及中央地質調查所設置的觀測井（經濟部中央地質調查所，1995，1999；台糖公司地下水中心，1999-2004）。濁水溪沖積扇的觀測站井共有191口，選擇其中位於扇頂補注區的22口，1997年至2001年爲每年監測一次，2002年至2003年、爲每月一次監測，2004至2005則監測20口（其中兩口因鄰近施工而廢棄）、旱雨季各一次，2007年的數據則是引用自農業工程研究中心（2007）的監測報告（表1、表2）。屏東平原的觀測井總數有134口，其中43口的硝態氮較高，應屬於扇頂補注區，1998-2007年每年監測一次（表3）。

採樣法依照環保署公告「地下水採樣方法」(NIEA W103.50B)，採樣前需預抽三倍井水(purging)。抽水時每隔5分鐘，記錄地下水之溫度、pH、導電度（EC）、水位、濁度，當抽出三倍井管水後、或pH及EC值穩定 (pH±0.1、EC±5 %)，才停止抽水與採樣，並填寫現場採樣記錄表。水樣以冰桶保存，於24小時內送回化驗室，硝態氮的檢測法爲馬錢子鹼比色法（NIEA W417.50A），檢測下限爲0.06 mg/l。

濁水溪沖積扇

彰雲地區含高濃度硝態氮的地下水主要分布於扇頂，氚定年數據顯示，都是50年內補入的新水（劉聰桂，1993-2001；Liu, 1995；陳文福等，2003），同時扇頂補注區的地下水也含有溶氧，含氮的化合物在溶氧的氧化下，轉變爲硝酸鹽。根據地下水勘測隊（1957）的調查，除兩口井外，本區硝態氮的背景濃度約在0.2 mg/l以下。又根據自來水公司的水質監測，約在1991年後，田中地區地下水中的硝態氮濃度有明顯增高的趨勢，由小於2.0增加爲6-10 mg/l之間。

沿地下水流動至中下游，硝態氮濃度很明顯減低，例如在田中－田尾之間，地下水中硝態氮由6.79-7.16 mg/l、驟降爲0.12 mg/l或更低，往更下游，濃度都在0.2 mg/l以下（圖2）。此現象應是地下水已漸進入硝酸鹽還原帶，因地層中有機質降解，致使水中硝酸鹽被脫硝作用還原成氮氣（Stumm and Morgan, 1995）：

$$5CH_2O + 4NO_3^- + 4H^+ = 5CO_2 + 2N_2 + 7H_2O$$

若以濃度0.5 mg/l爲界，高濃度硝態氮的地下水分布，在彰雲地區五個含水層中，以第一含水層的分布最廣，達全面積的1/8，顯示越淺層、越接近補注源的地下水中含硝態氮濃度越高（圖3）。

1997至2007年補注區20口觀測井，硝態氮濃度歷年變化如圖4。依不同水文地質區，可分成四個次分區：彰雲扇頂、山區、雲林扇頂及斗六沖積扇。

一、彰化扇頂區：有田中、溪州、田尾、柑園及二水，以田中的濃度最高，平均約5-8 mg/l，2003年1月至6月有明顯超過環保署飲用水源水質標準10 mg/l；其次爲柑園及二水，二水井曾在2000年時超過標準；溪州及田尾之硝態氮平均都在0.5 mg/l以下，可能因爲已經進入硝酸鹽還原帶。

二、山區井：有新光、坪頂、竹山、社寮，以新光及坪頂的濃度最高，平均約6-12 mg/l，有7次檢測值超過10 mg/l。新光及坪頂井的深度都已進入頭嵙山層的砂泥互層段，其中坪頂井的深度達186 m，含水層中泥層增多，對於地面水的補注應有阻絕的作用，另外其中的有機質應能還原硝酸鹽，但此兩口井的硝酸鹽濃度卻非常高，可能顯示該地之含水層已有破裂。此兩井位於八卦及斗六台地隆起之背斜軸，其含水層應存在破裂面，致使地面水能迅速進入較深的地下水層。

三、雲林扇頂區井：有六合、烏塗、刺桐、西螺及石榴，以六合及烏塗的濃度最高，平均約4-9 mg/l，接近10 mg/l，但仍沒有超過標準值。刺桐、西螺及石榴之硝態氮平均大都在0.5 mg/l以下，可能因爲已經進入硝酸鹽還原帶。

四、斗六沖積扇井：有崁腳、古坑、溫厝、東和，以古坑的濃度最高，平均約6-12 mg/l，有16次檢測值超過10 mg/l。其餘崁腳、溫厝及東和之硝態氮平均大都在5 mg/l以下（圖4）。

初步發現地下水的硝酸鹽氮濃度以旱季較高、雨季時較低，如古坑、新光、田中、坪頂等，例如在2002年8-9月時其地下水位最高、但硝態氮的濃度卻最低（<5 mg/l）；2003年4-7月時地下水位最低、但硝態氮的濃度有明顯的偏高（>10 mg/l）。可能因雨季時大量降雨，可沖稀地下水中硝酸鹽氮濃度，但旱季時，缺乏雨水補注，若有高濃度的化肥及灌溉水流入地下，則易形成較高硝酸鹽氮濃度的地下水（圖5）。

統計1997至2007年的監測數據顯示，補注區20口井硝態氮濃度最高可達23.2 mg/l（新光一2007年），中位數於2000年時最高、爲3.57 mg/l（圖6）。十年來曾超過10 mg/l的井有：東和、坪頂、社寮、古坑、二水、新光、田中等7口，其中又以新光及古坑井超過10 mg/l的次數最多，顯示其地下水受到硝態氮污染的情況最嚴重（表2）。

屏東平原

本區地層以多個沖積扇組成，地形由東向西降低，扇頂處以厚層礫石層爲主，分別向西、西北、西南扇狀展開，地層向西砂泥層厚度漸厚、層次漸多。地下水的流向，基本受到沖積扇地層控制，流向有兩個主要分量，由東向西（沖積扇）及由北向南（由陸至海），合成區域流向爲由東北向西南流（圖7）。

屏東地區深度約250公尺內的地質概況，其東北部地層以厚層礫石層爲主、分層較不明顯，主要的阻水層只有一至二層，地下水上下流通限制較少。西南部地層－港東至林園間、則分層明顯，大致有二層主要阻水層，地下水上下流通已受限制。若以深度作爲分層參考，第一含水層的深度約在0-60 m，第二含水層的深度約在60-120 m，第三含水層的深度約在120-250 m，第三含水層又可分爲兩段，但需注意，不同含水層分層深度隨區域而變（經濟部中央地質調查所，1997）。

屏東平原的東及北側爲沖積扇的扇頂位置，屬於區域性的地下水補注區。與濁水溪沖積扇相同，屏東地區地下水的硝態氮濃度也以補注區最高（圖8及圖9）。除少數例外、往下游及往地層深處，因硝酸鹽還原作用，使硝態氮的濃度降低。萬隆－林園剖面中的潮州及崁頂，其第三含水層上段，雖深度達150 m，且上覆有泥層，但硝態氮濃度達1.36-1.73 mg/l，顯然與大趨勢不合。其原因可能因局部地下水流在此層壓力極大，是本區的受壓水層，也是地方上常利用的自流井，可能因人爲使用，加速地下水的循還流動，地下水的補充速度大於脫硝作用，因此仍有硝酸鹽的存在（圖8）。

若以硝態氮0.5 mg/l爲界，圖9顯示屏東平原地下水硝態氮濃度的分層分布。以第一含水層的分布最廣，達平原的1/2面積，往第二含水層、其分布面積仍可達1/3，至第三含水層則分布較小、較局限，只有在隘寮溪及林邊溪兩沖積扇的扇頂部份。根據地下水工程處（1961）的調查，本區40年前地下水的硝態氮濃度約在0.2 mg/l以下，近年高濃度的硝酸態氮，應是人類社會經濟發展所致，例如農田化肥、生活污水及畜牧廢水。

經過1998-2007年度的監測，屏東平原觀測井總數134口中有43口井的硝態氮濃度經常大於0.5 mg/l，大都位於扇頂區（表3）。其中以建興一的濃度最高，達17.3 mg/l（2004年），其餘如泰山一井，也高達10.6 mg/l（2004年）。有四口井的濃度曾超過10 mg/l：萬巒一、建興一、泰山一及新庄一，其中又以建興一較嚴重，十年間有四年的數據是超過環保署飲用水限值。

1998-2007年間硝態氮的最高極大值發生於2004年（17.3 mg/l建興一），該年的降雨量較

少（約1100 mm），而2001年的硝態氮的極大值爲最低（3.69 mg/l建興一），該年的降雨量較多（約3100 mm），此兩年的年雨量相差達三倍，可能是影響地下水中硝態氮濃度的重要因素之一（圖10）。較高的降雨量應能沖淡地下水中的硝態氮濃度，例如本研究統計之高降雨年之硝態氮極大濃度爲17.3 mg/l、低降雨年之極大濃度爲3.69 mg/l，兩者差約四倍。

硝酸鹽濃度影響因素

自然界氮源大多來自生物分解，供需之間在生態系統中維持平衡，除了乾燥環境的地下水有自然硝酸鹽濃度富集的現象外（Stadler *et al*., 2008），未受污染的地下水中硝酸鹽並不高（Follett, 1989）。近代因化肥過量施用及人口增長、污水排放造成的多餘氮源，滲入地下後污染地下水，不論是先進國家（Ball and MacDonald, 2001; West, 2001; Brink *et al*., 2008; Panno *et al*., 2008）、或是開發中國家（Tang *et al*., 2004; Xu and Usher, 2006; Tirado, 2007; Fetouani *et al*., 2008; Hu *et al*., 2008; Ma *et al*., 2008; Umezawa *et al*., 2008），已成爲世界各國的普遍現象（Chern *et al*., 1999; Shomar *et al*., 2008; Mahvi *et al*., 2005; Majumder *et al*., 2008）。

在台灣的沖積扇地區，地下水中硝酸鹽主要的來源，應該也是農業化肥及生活污水，當滲入扇頂地下後，因地下水中仍有溶氧，不利於脫硝作用，故水中硝酸鹽能持續存在（圖11）。降雨及河川水的補注，因稀釋而使硝酸鹽濃度降低，但在乾季時、因土壤水份蒸發，造成淺層地下水的硝酸鹽濃度升高（Holz, 2008）。地下水往中下游流動，因地層中有機質降解、或還原性礦物（例如黃鐵礦）釋出電子，使得溶氧減少、然後發生脫硝作用，造成硝酸鹽濃度降低（Rivett *et al*., 2008; Schwientek *et al*., 2008; Thayalakumaran *et al*., 2008），最後、硝酸鹽被還原至極低濃度，通常都低於檢測下限（0.06 mg/l）以下。

結論與建議

濁水溪地區191口觀測井中約有20口（約10 %）的硝態氮濃度偏高，多位於扇頂補注區。1997至2007年數據顯示，曾超過10 mg/l的井有：東和、坪頂、社寮、古坑、二水、新光、田中等7口，其中又以新光及古坑井超過10 mg/l的次數最多，硝態氮濃度最高達23.2 mg/l（新光一2007年）。

屏東平原134口觀測井中約有43口（約32 %）的硝態氮濃度偏高，其井數較多的原因爲屏東平原扇頂礫石層的分布比濁水溪地區更廣。監測十年間（1998-2007年）有四口井的濃度曾

超過10 mg/l：萬巒一、建興一、泰山一及新庄一，其中又以建興一較嚴重，十年間有四年的數據超過環保署飲用水限值，硝態氮濃度最高達17.3 mg/l（2004年）。

硝酸鹽主要的來源，應該是農業化肥及生活污水，降雨及河川水的補注，因稀釋而使硝酸鹽濃度降低，但在乾季時、因土壤水份蒸發，造成淺層地下水的硝酸鹽濃度升高。地下水往中下游流動，硝酸鹽因脫硝作用，濃度降低至檢測下限以下。

淺層含水層受硝態氮污染已是全世界所面對的嚴肅課題，台灣亦然，並且台灣特殊的沖積扇含水層、其扇頂部份缺乏泥層保護，加上人口及農業活動都非常密集，因此化肥或生活污水可能進入含水層。目前濁水溪沖積扇及屏東平原沖積扇，其地下水都還是當地自來水的水源之一，相關當局應重視此區域性的污染問題。後續研究應擴大監測的樣本數，爲求監測水樣能代表居民的飲用水水質，應監測自來水水井及居民自有的水井，以瞭解居民目前飲用水的硝態氮濃度。

誌謝

感謝台糖公司地下水中心提供採樣的協助，台糖研究所提供水質分析的儀器及協助。感謝經濟部水利署贊助研究經費，諸位審查委員的寶貴意見。

引用文獻

地下水勘測隊。1957。大濁水沖積扇地區地下水源勘查報告。中國農村復興聯合委員會出版。共 206 頁。

地下水工程處。1961。屏東平原地下水源勘查報告。共 74 頁。

林朝棨。1957。台灣地形。台灣省文獻會。共 423 頁。

陳文福、林文勝、張國強、秦啓文、蔡克敏。2003。彰雲地下水補注區之溶氧與硝酸鹽氮濃度。經濟部中央地質調查所彙刊第十六號。第 125-139 頁。

謝永旭、蘇苗彬。1994-2003。地下水基本水質試驗分析研究。經濟部水利署與中興大學環境工程研究所出版。

臺糖公司地下水中心。1999-2004。台灣地區地下水觀測網水質調查分析。經濟部水利署出版。

劉聰桂。1993-2001。地下水定年分析。經濟部水利署出版。

經濟部中央地質調查所。1995。濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告。共 102 頁。

經濟部中央地質調查所。1997。屏東平原水文地質調查研究報告。共 163 頁。

經濟部中央地質調查所。1999。濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告。共 129 頁。

經濟部水資源局。1999。臺灣水文年報。

農業工程研究中心。2007。96 年度台灣地區地下水質檢測分析與評估計畫。經濟部水利署出版。

Ball, D.F. and A.M. MacDonald. 2001. Groundwater nitrate vulnerable zones for Scotland. British Geological Survey Commissioned Report CR/01/250.

Brink, C., W.J. Zaadnoordijk, S. Burgers, and J. Griffioen. 2008. Stochastic uncertainties and sensitivities of a regional-scale transport model of nitrate in groundwater. J. Hydrol. (in press)

Chapelle, F.H. 2001. Ground water microbiology and geochemistry. John Wiley & Sons, INC.

Champ, D.R., J. Gulens, and R.E. Jackson. 1979. Oxidation-reduction sequences in ground water flow systems. Can. J. Earth Sci. 16: 12-23.

Chern, L., G. Kraft, and J. Postle. 1999. Nitrate in groundwater - A continuing issue for Wisconsin citizens. The nutrient management subcommittee of the nonpoint source pollution.

Fetouani, S., M. Sbaa, M. Vanclooster, and B. Bendra. 2008. Assessing round water quality in the irrigated plain of Triffa, north-east Morocco. Agric. Water Manag. 95: 133-142.

Follett, R.F. 1989. Nitrogen management and ground water protection. Elsevier Science Publishers, 395p.

Froelich, P.N., G.P. Klinkhammer, and M.L. Bender. 1979. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. Geochim. Cosmochim. Acta 43: 1075-1090.

Holz, G.K. 2008. Searsonal variation in groundwater levels and quality under intensively drained and grazed pastures in the Montagu catchment, NW Tasmania. Agric. Water Manag. (in press)

Hu, K., B. Li, D. Chen, Y. Zhang, and R. Edis. 2008. Simulation of nitrate leaching under irrigated maize on sandy soil in desert oasis in Inner Mongolia, China. Agric. Water Manag. 95: 1180-1188.

Liu, T.K. 1995. Estimating flow and recharge rates of groundwater in western Taiwan using radiocarbon and tritium. Radiocarbon 37: 531-542.

Ma, J., Z. Ding, G. Wei, H. Zhao, and T. Huang. 2008. Sources of water pollution and evolution of water quality in the Wuwei Basin of Shiyang river, Northwest China. J. Environ. Manag. (in press)

Majumder, R.K., M.A. Hasnat, S. Hossain, K. Ikeue, and M. Machida. 2008. An exploration of

nitrate concentrations in groundwater aquifers of central-west region of Bangladesh. J. Hazard. Mater. (in press)

Mahvi, A.H., J. Nouri, A.A. Babaei, and R. Nabizadeh. 2005. Agricultural activities impact on groundwater nitrate pollution. Int. J. Environ. Sci. Tech. 2: 41-47.

Panno, S.V., W.R. Kelly, K.C. Hackley, H.H. Hwang, and A.T. Martinsek. 2008. Sources and fate of nitrate in the Illinois River Basin, Illinois. J. Hydrol. 359: 174-188.

Rivett, M.O., S.R. Buss, P. Morgan, J. Smith, and C.D. Bemment. 2008. Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes. Water Res. 42: 4215-4232.

Schwientek, M., F. Einsiedl, W. Stichler, A. Stogbauer, H. Strauss, and P. Maloszewski. 2008. Evidence for denitrificaiton regulated by pyrite oxidation in a heterogeneous porous groundwater system. Chem. Geol. 255: 60-67.

Shomar, B., K. Osenbruck, and A. Yahya. 2008. Elevated nitrate levels in the groundwater of the Gaza Strip: distribution and sources. Sci. Total Envir. 398: 164-174.

Stadler, S., K. Osenbruck, K. Knoller, A. Suckow, J. Sultenfub, H. Oster, T. Himmelsbach, and H. Hotzl. 2008. Understanding the origin and fate of nitrate in groundwater of semi-arid environments. J. Arid Environ. 72: 1830-1842.

Stumm, W. and J.J. Morgan. 1995. Aquatic chemistry. Wiley Interscience, New York, USA.

Tang, C., J. Chen, S. Shindo, Y. Sakura, W. Zhang, and Y. Shen. 2004. Assessment of groundwater contamination by nitrates associated with wastewater irrigation: a case study in Shijiazhuang region, China. Hydrol. Process. 18: 2303-2312.

Thayalakumaran, T., K.L. Bristow, P.B. Charlesworth, and T. Fass. 2008. Geochemical conditions in groundwater systems: implications for the attenuation of agricultural nitrate. Agricul. Water Manag. 95: 103-115.

Tirado, R. 2007. Nitrates in drinking water in the Philippines and Thailand. Greenpeace Research Laboratories Technical Note 10/2007.

Umezawa, Y., T. Hosono, S. Onodera, F. Siringan, S. Buapeng, R. Delinom, C. Yoshimizu, I. Tayasu, T. Nagata, and M. Taniguchi. 2008. Sources of nitrate and ammonium contamination in groundwater under developing Asian megacities. Sci. Total Environ. 404: 361-376.

West, D. 2001. Nitrates in ground water- a continuing issue for Idaho citizens. Idaho Department of Environmental Quality, State Ground Water Program, Ground Water Quality Information Series No.1.

Xu, Y. and B. Usher. 2006. Groundwater pollution in Africa. Taylor & Francis, London.

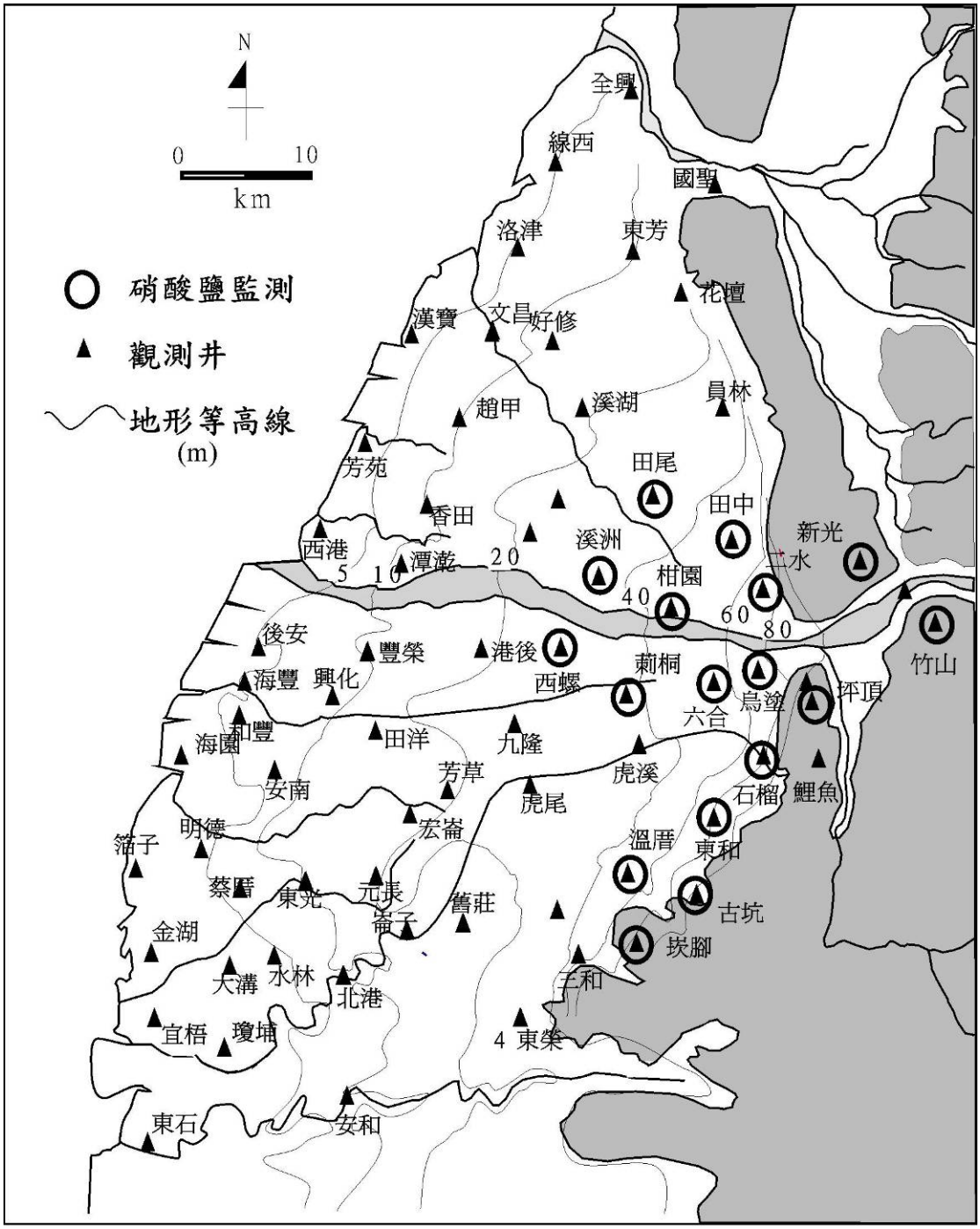


圖 1. 濁水溪地區地下水觀測站位置圖

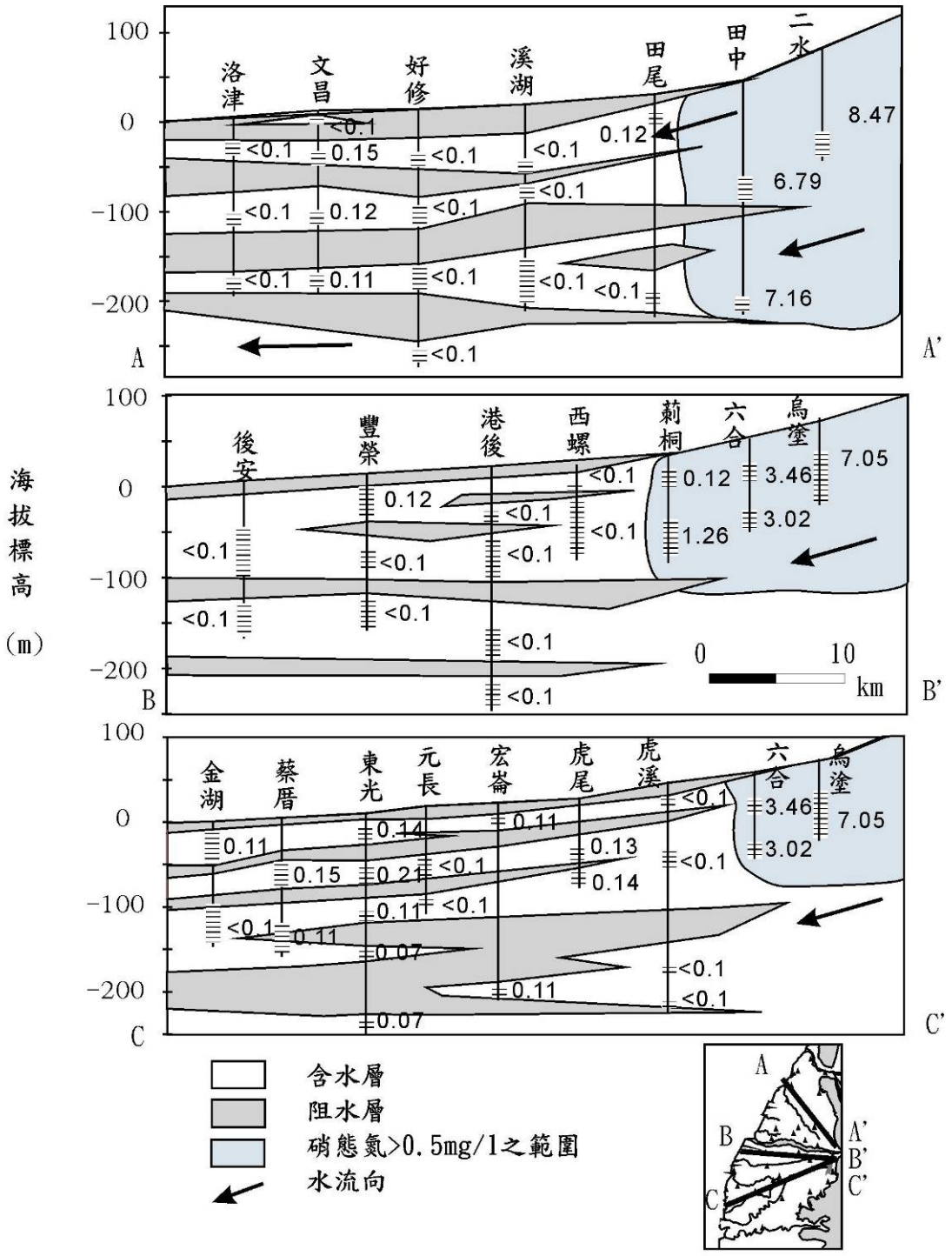


圖 2. 濁水溪沖積扇地下水之硝態氮濃度（2002 年）分布剖面

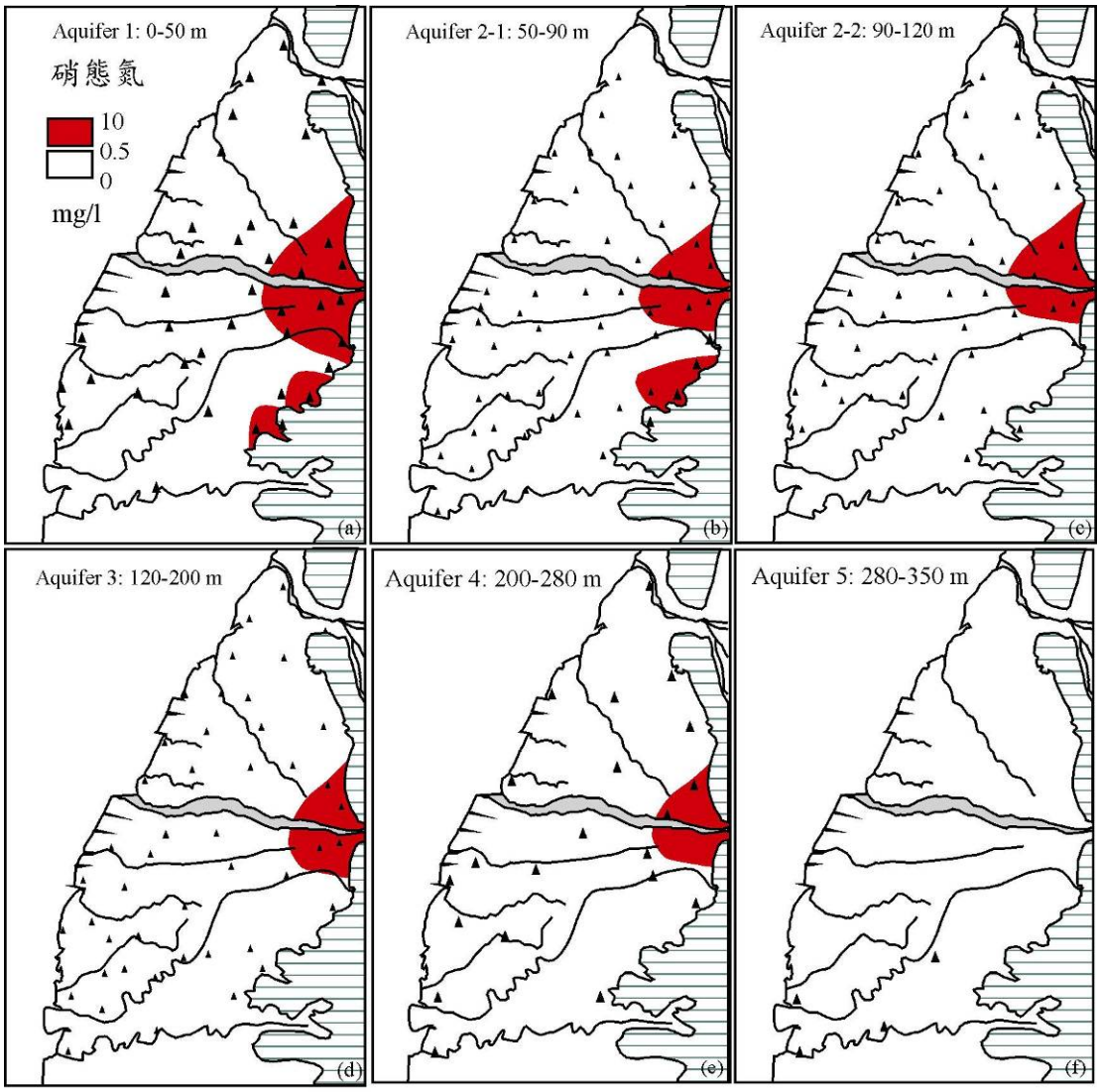


圖 3. 濁水溪地區地下水之硝態氮濃度大於 0.5mg/l 之分布

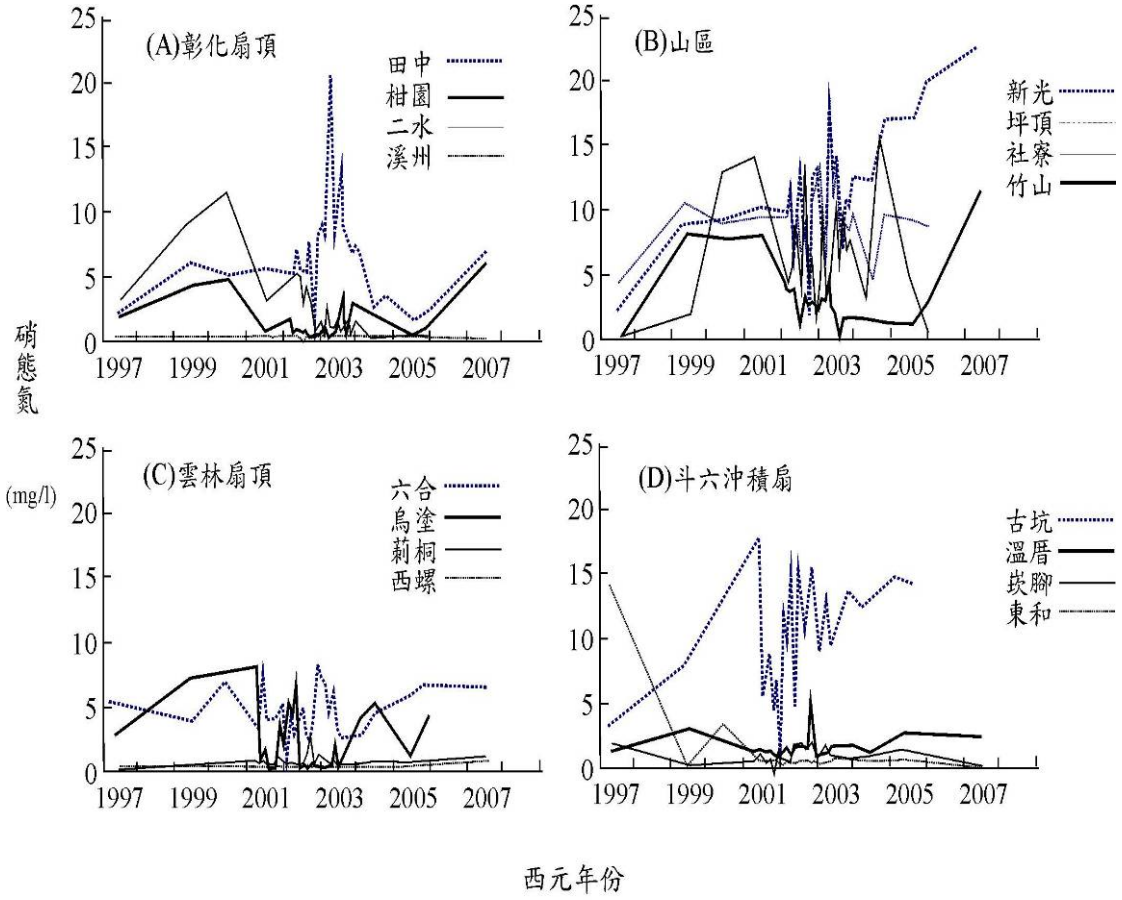


圖 4. 濁水溪補注區地下水中硝態氮濃度之監測結果

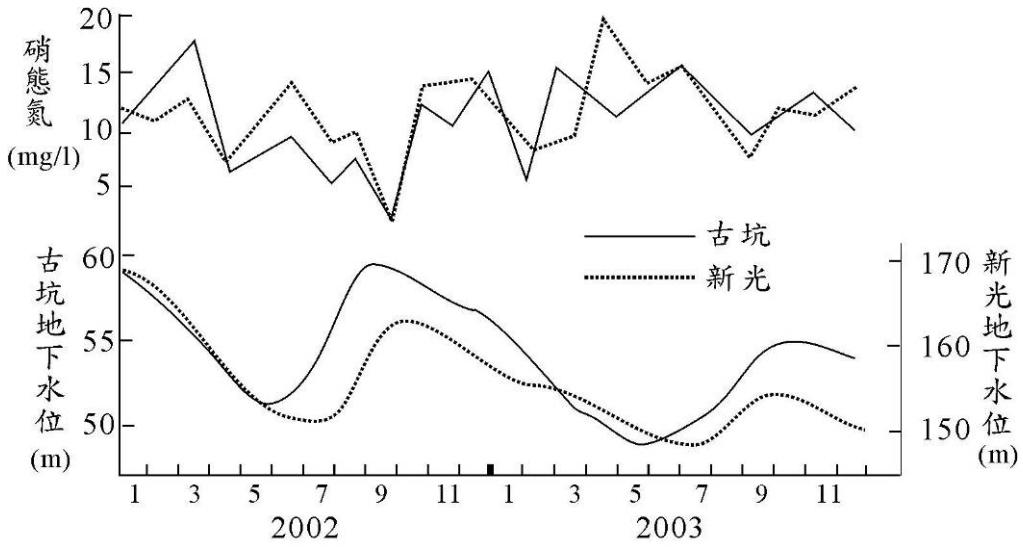


圖 5. 古坑及新光井硝態氮濃度與地下水位

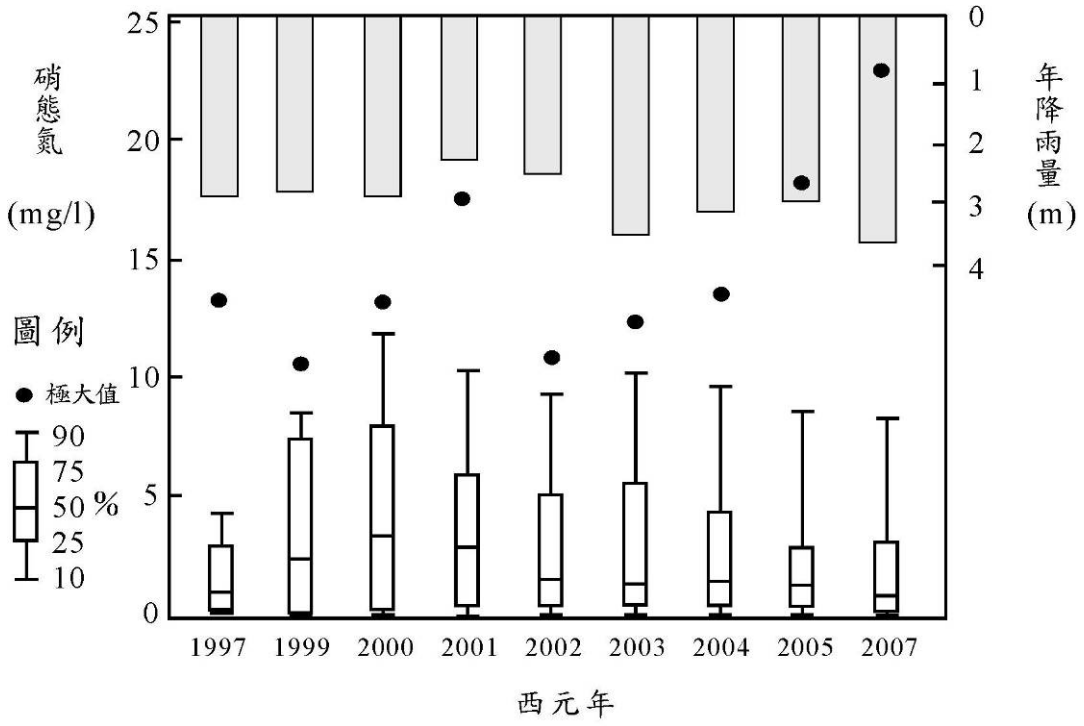


圖 6. 濁水溪補注區 1997-2007 地下水中硝態氮之濃度統計

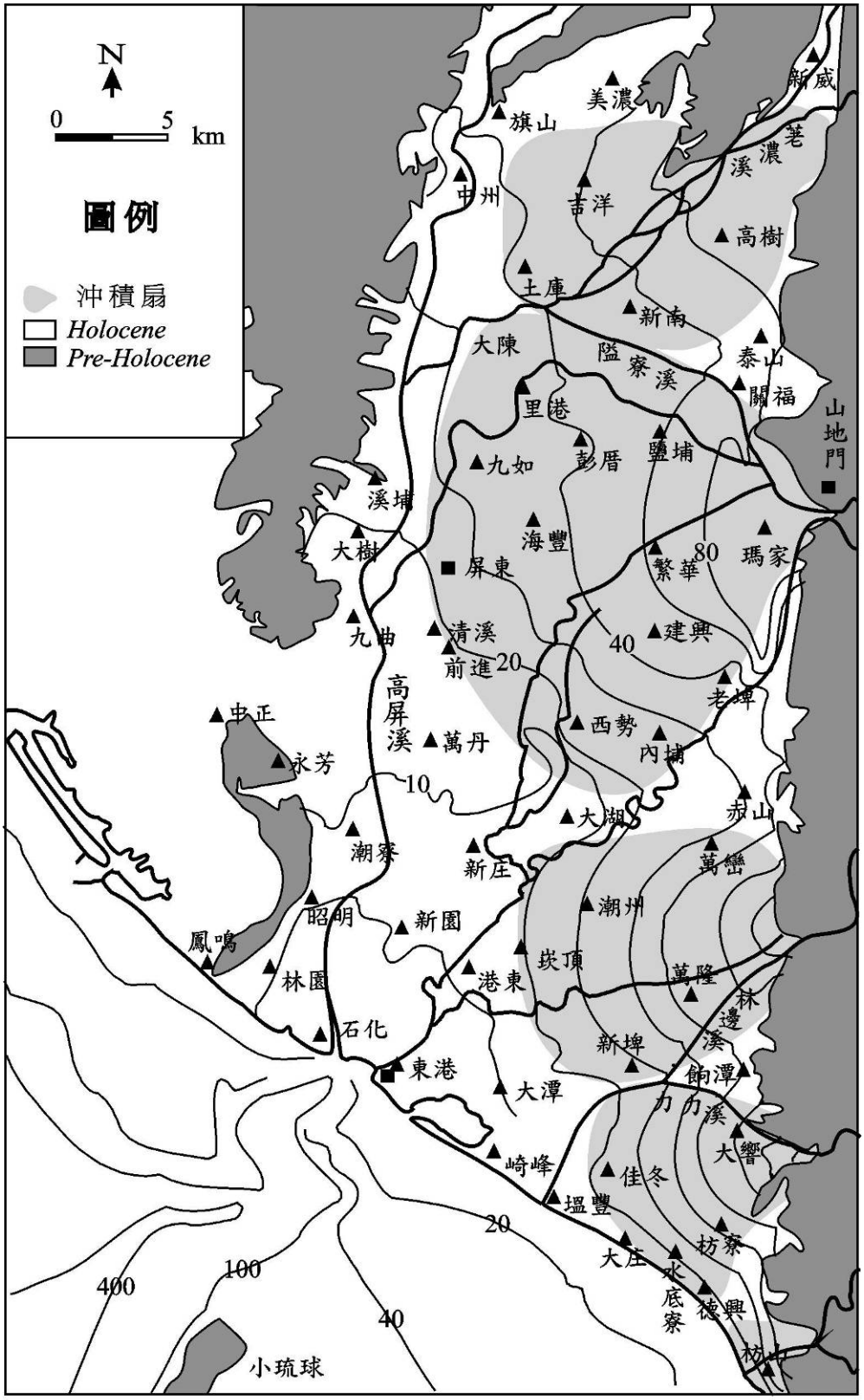


圖 7. 屏東平原之沖積扇分布與地下水觀測井位置

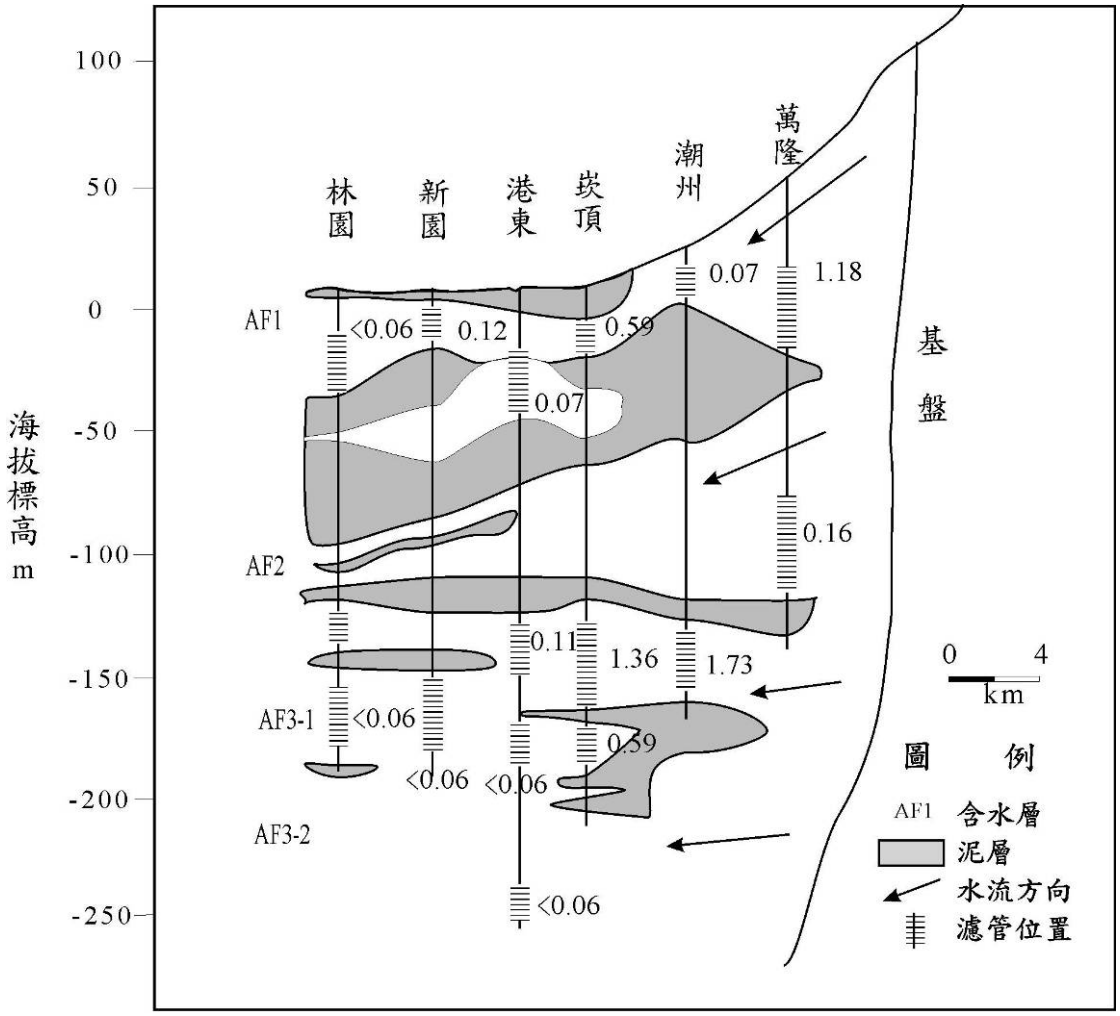


圖 8. 屏東平原地下水之硝態氮濃度（2005 年）分布剖面

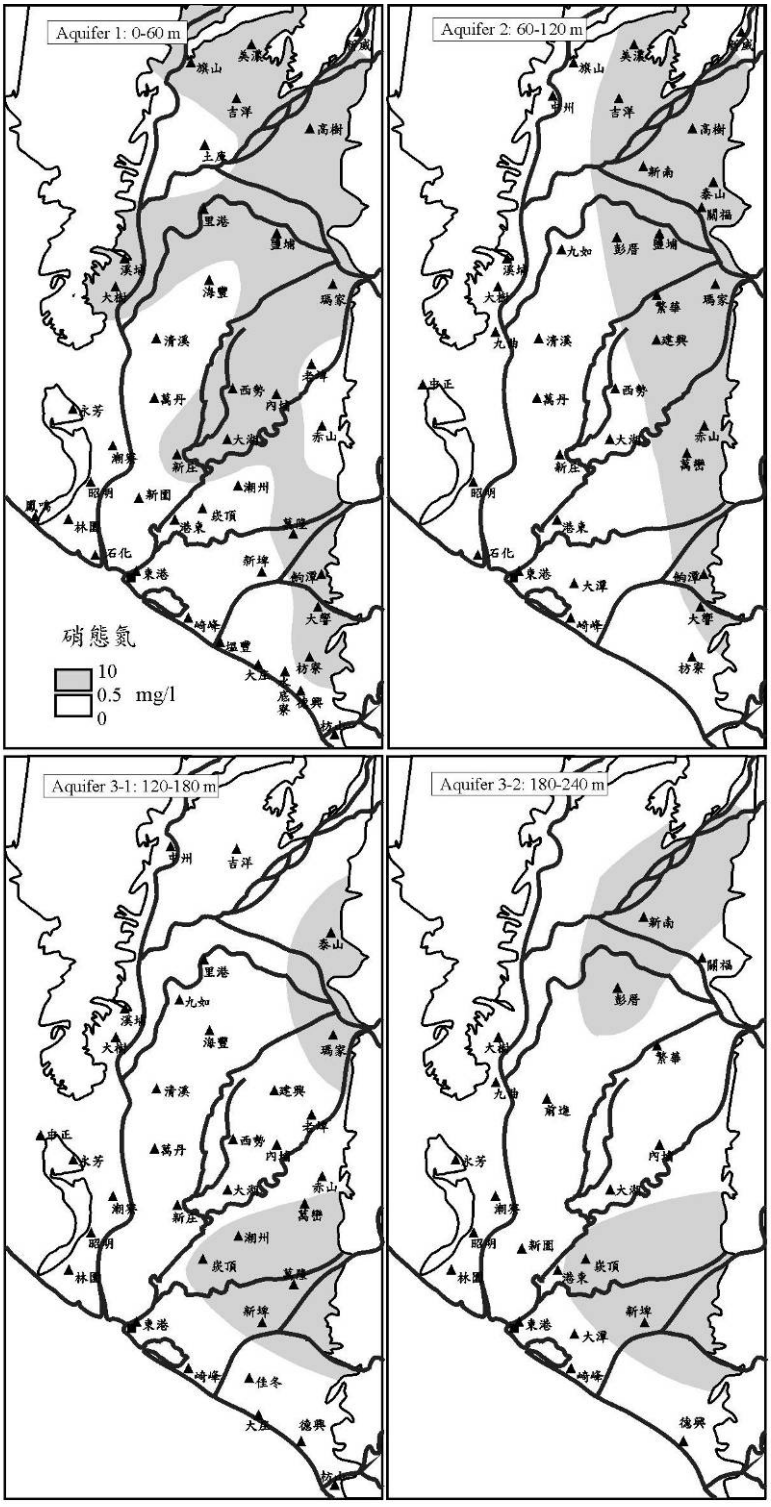


圖 9. 屏東平原地下水硝態氮濃度大於 0.5mg/l 之分布

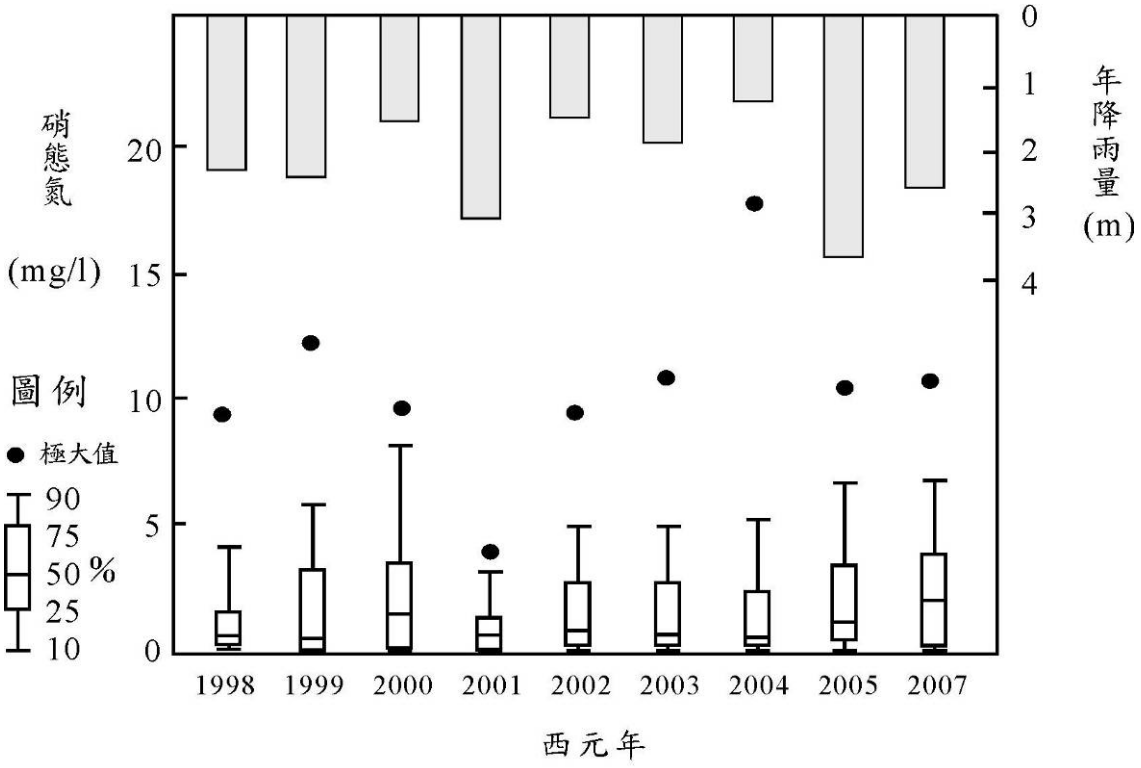


圖 10. 屏東平原 1998-2007 地下水中硝態氮之濃度統計

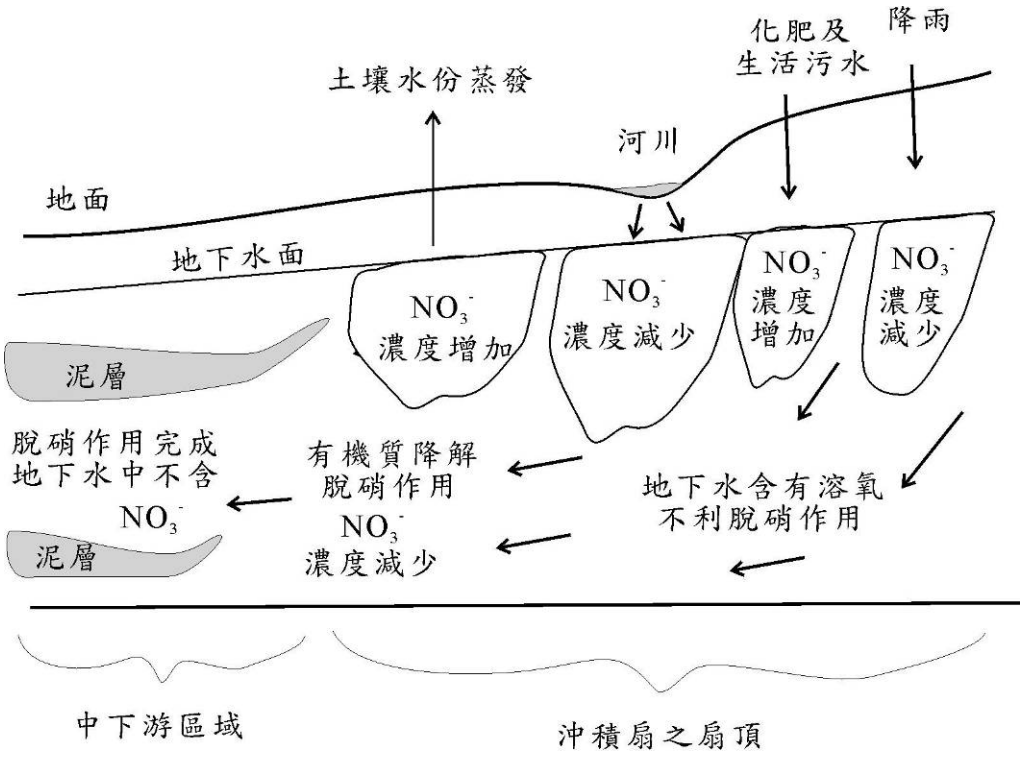


圖 11. 扇頂補注區地下水之硝酸鹽濃度影響因素

表 1. 濁水溪扇頂補注區觀測井之基本資料

井名	濾管起 m	濾管止 m	靜水位 m	X(m)	Y(m)	地表高程(m)
崁腳一	78	102	53.62	202021	2612378	110.11
古坑一	66	102	47.52	204980	2615932	100.67
溫厝一	14	32	7.54	199400	2617408	48.65
溫厝二	78	96	12.74	199400	2617408	48.65
東和一	21	57	14.43	205251	2620504	75.66
石榴一	9	15	7.37	206944	2624360	66.57
坪頂一	144	186	95.77	212545	2628234	297.60
烏塗一	40	94	29.26	208141	2629816	72.31
六合一	24	54	17.21	204584	2629706	56.18
莿桐一	14	32	6.45	197886	2628381	37.62
西螺一	20	38	4.82	194891	2632723	29.49
社寮一	9	18	9.16	220800	2634163	176.07
竹山一	66	96	6.36	217282	2629020	150.95
新光一	78	120	53.10	215584	2638740	222.11
二水一	72	108	39.15	210242	2634428	82.44
柑園一	14	32	9.40	201662	2635696	46.69
溪洲一	4	28	4.56	198371	2639267	34.18
田中一	98	134	11.48	207088	2639188	49.56
田中二	243	266	14.29	207088	2639188	49.56
田尾一	12	30	7.07	201045	2643280	32.55

靜水位指井口下之深度。座標爲二度分帶。

表 2. 濁水溪扇頂補注區之歷年硝態氮濃度（NO_3-N mg/l）

井名	1997	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2007
崁腳一	2.45	0.66	0.38	1.18	0.37	0.72	0.77	1.73	0.54
古坑一	3.15	7.41	12.20	17.80	10.46	12.63	13.70	14.77	
溫厝一	0.18	0.24	0.20	0.23	0.31	0.36	0.15	0.23	0.11
溫厝二	1.14	3.10	2.32	1.82	1.57	2.43	1.69	2.54	2.91
東和一	13.76	0.10	3.57	3.91	0.34	0.23	0.34	0.29	0.10
石榴一	0.08	0.14	0.26	0.05	0.07	0.12	0.10	0.12	0.24
坪頂一	4.47	10.40	9.14	9.77	9.10	9.88	7.10	8.74	
烏塗一	2.12	7.05	6.87	4.01	2.84	0.31	3.90	2.36	
六合一	6.46	3.46	7.99	4.15	5.02	5.82	4.58	8.52	8.67
莿桐一	0.02	0.10	0.13	1.27	0.06	0.03	0.10	0.11	1.92
西螺一	0.74	0.10	0.17	0.57	0.09	0.26	0.10	0.12	0.17
社寮一	0.47	2.13	13.40	14.10	6.74	6.4	9.33	2.36	
竹山一	0.02	7.24	7.05	7.81	3.09	2.29	1.44	2.27	9.77
新光一	1.55	8.99	9.94	10.20	9.77	11.35	14.50	18.59	23.20
二水一	3.65	8.47	12.70	3.32	3.21	1.24	0.10	0.33	
柑園一	1.99	4.80	5.30	0.72	0.59	1.35	2.37	0.59	6.07
溪洲一	0.16	0.26	0.18	0.66	0.14	0.11	0.10	0.10	0.04
田中一	2.36	6.79	5.75	5.96	6.61	10.47	3.29	2.08	7.65
田中二	0.06	7.16	2.95	2.95	2.31	5.18	3.09	5.02	8.02
田尾一	0.10	0.12	0.14	0.10	0.37	0.15	0.10	0.10	0.03

1. 2003-2004 年數據爲每月加總之年平均值。
2. 2007 年數據引自農業工程研究中心（2007）

表 3. 屏東平原扇頂補注區之歷年硝態氮濃度（NO_3-N mg/l）

井名	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2007
萬巒一	9.50	8.41	9.45	2.85	3.92	8.31	9.80	9.89	10.50
建興一	8.41	12.50	9.64	3.69	5.96	10.4	17.30	10.43	
泰山一	9.59	7.48	9.20	2.69	9.47	7.36	10.60	9.77	9.22
溪埔一	8.28	7.82		2.11	7.30	5.67	8.85	8.05	
鹽埔二	7.90	5.98		1.30	2.34	1.37	2.88	3.07	3.30
吉洋		8.41	7.42	2.14	3.80	5.94	5.23	3.93	4.30
彭厝一	3.57		4.12	1.90	2.61	4.82	6.08	5.41	4.58
鹽埔一	5.50	1.87	2.23	1.00	1.50	0.11	1.52	1.64	0.80
旗山一	0.11		3.70	0.37	5.43	7.53	5.63	5.20	0.89
繁華一	2.75		6.82	1.93	4.33	3.25	3.38	5.09	6.43
崁頂一	3.10	0.74	0.39	0.20	ND	ND	0.62	0.59	
內埔一	6.92	4.57	9.23	2.82	1.40	0.75	1.42		1.66
枋寮一	4.46	3.68	5.76	1.19	0.45	2.28	2.93	3.64	4.96
高樹一	1.92	2.39	2.72	1.88	1.61	4.53	2.85	5.57	2.38
新南一	0.27		5.38	1.13	2.18	3.49	4.05	3.55	
瑪家一	ND	2.39	3.05	1.43	1.44	1.80	3.10	4.57	
建興二	2.51	0.38			2.67	3.22	2.67	2.57	
餉潭一	ND		3.56	0.96	1.76	0.48	2.49	3.57	
新庄一	0.33	0.63	0.32	1.11	0.66	ND	1.22	10.48	
高樹二	1.95	1.84		0.89	2.15	1.96	2.96	2.86	1.69
海豐二	8.63	0.84		0.55	0.83	1.04	1.29	1.41	1.68
大樹一	0.25		1.11	1.25	5.85	3.76	1.43	0.89	
大響一	2.84	0.61	4.85	0.30	2.72	0.23	4.30	0.75	
彭厝二	1.48		1.65	0.77	2.39	2.07	2.75	2.75	3.99
大湖一	0.24		0.55	0.94	2.39	2.10	3.15	4.34	
美濃二	0.17	2.82		1.36	1.67	2.63	2.32	2.34	5.40

續表 3. 屏東平原扇頂補注區之歷年硝態氮濃度（NO_3-N mg/l）

井名	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2007
萬隆一	2.71	3.02	2.28	0.59	1.95	1.16	1.39	1.18	
西勢一	0.17	2.62	2.15	0.72	3.22	0.40	2.36	1.43	
瑪家二	1.12	2.59		0.83	2.09	0.16	1.69	1.98	2.57
潮州二	ND	1.55		0.54	1.36	ND	1.94	1.73	1.76
吉洋一	0.30		2.41	0.85	1.09	1.81	1.82	1.61	4.30
新南二	0.30		1.51	0.61	2.65	1.56	1.50	1.41	
泰山二	3.47	1.23		0.44	0.98	0.73	0.85	1.07	1.54
里港一	0.74	1.31	ND	0.67	1.54	1.56	1.78	0.59	2.13
新威一	0.49		0.26			ND	1.34	1.70	7.06
關福一	0.15		1.37	0.67	0.67	1.24	1.28	1.00	
萬隆二	0.36	0.23			ND	2.95	0.26	0.16	
大潭二	0.63	0.36	0.20			0.15	2.08	0.68	
大響二	0.74	0.78		0.36	0.99	0.26	0.56	0.70	
新埤二	0.62	0.62		0.23	ND	ND	0.87	0.75	1.22
瑪家三	0.16	0.91		0.19	ND	ND	0.30	1.27	1.47
繁華二	0.85		0.55	0.23	0.54	0.40	0.66	0.70	0.72
中州一	0.30	0.28				ND	0.80	0.86	

ND 爲小於 0.06 mg/