

# 彰雲地下水補注區之溶氧與 硝酸鹽氮濃度

陳文福<sup>1</sup> 林文勝<sup>2</sup> 張國強<sup>2</sup> 秦啟文<sup>2</sup> 蔡克敏<sup>1</sup>

## 節 要

文獻指出飲水中過多硝態氮可能引起孕婦流產、藍嬰症、致癌等，國內環保署的飲用水水源水質及地下水污染標準（第一類管制標準）定為 10 mg/l。本區民國 45 年硝態氮平均濃度 0.16 mg/l，除了兩口井外都在 0.5 mg/l 以下。民國 88 年 191 口中已有 22 口超過 0.5 mg/l，此批井分布於濁水溪沖積扇扇頂、八卦山及斗六台地補注區，如二水、田中、新光及坪頂等地，地質特性為未受泥層覆蓋的礫石層，其地下水含有大於 0.5 mg/l 的溶氧，顯示處於氧化的環境，氮定年大於 1TU，顯示為 1953 年後補入的水。

民國 88 年補注區的地下水硝態氮平均濃度為 4.88 mg/l，其中已有一口井（坪頂）超過飲用水源管制值（達 10.4 mg/l）。補注區的土地利用以農田為主（稻田、茶園、果園及菜園），因此很有可能地下水之硝態氮來自農田的化肥，但目前仍無確定證據。監測補注區 34 口井，四次檢測呈穩定增加趨勢（民國 86、88、89、90 年），硝態氮濃度中間值分別為 0.47、1.26、1.56 及 1.82 mg/l，年增加約 0.28 mg/l。未來除繼續監測外，應調查污染源並謀求改善之道。

**關鍵詞：**地下水、硝酸鹽氮、彰化、雲林、濁水溪沖積扇

## 前 言

彰雲地區是臺灣極重要的地下水資源區，地下水年使用量約 26 億噸，占全臺使用量之 40 %（經濟部水資源局，2002），根據水資局水權資料，截至民國 89 年止，彰雲地區共登記有自來水井 291 口，顯示彰雲地區的飲用水仍有極大部分依賴地下水。經濟部中央地質調查所、經濟部水利署主辦的臺灣地區地下水觀測

---

1. 臺糖新營總廠地下水中心  
2. 經濟部水利署

網，於民國 81—86 年在彰化雲林地區建置分層觀測井共 191 口，臺糖地下水中心於民國 88 年起承辦觀測井之水質監測，本文目的即提供彰雲地區觀測井地下水中硝態氮調查監測之初步結果。

文獻指出飲水中過多硝態氮可能引起孕婦流產、藍嬰症（嬰兒缺氧）、致癌等，因此國際衛生組織及國內環保署均對飲水中之硝態氮濃度加以規範，國內環保署的飲用水水源水質及地下水污染標準（第一類管制標準）定為 10 mg/l。

含水層中氧化還原反應通常有微生物參予催化，因反應所提供能量有高低差別，因此有些反應會優先進行，以還原系列為例：溶氧（DO）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, 1995）。一般而言，剛補注入地下的水含有溶氧（DO），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（有機碳、亞鐵離子、硫化物）消耗，溶氧（DO）漸漸降至偵測極限之下，水流越深或越下游（進入拘限水層），還原系列依次進行，地下水質會有帶狀特徵分布（Champ *et al.*, 1979）。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，稱之為 diagenetic sequence（Froelich *et al.*, 1979）。

氧化還原帶的溶氧及硝酸鹽帶通常分布在地下水的源頭區（補注區），含溶氧帶的地下水，溶解鐵（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—硝態氮。雖然扇洲地層的有機質通常很高（2—10 wt %）（Tyson, 1995），但仍發現扇頂補注區的地下水含有溶氧及硝酸鹽。

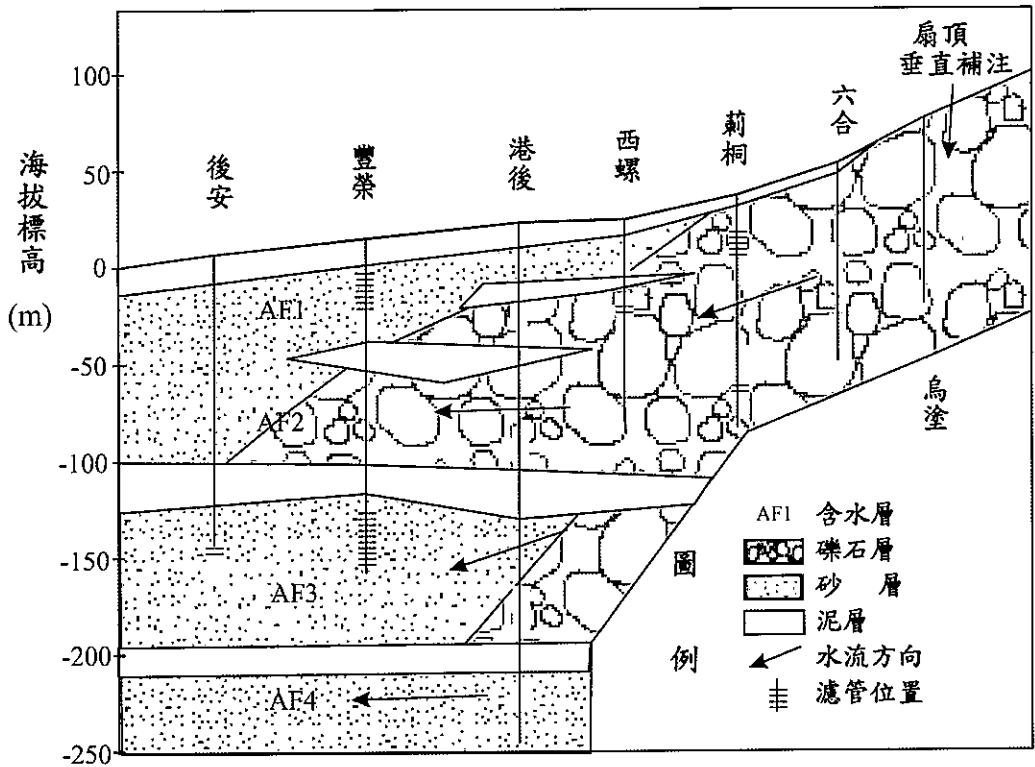
## 水文地質

濁水扇洲東西長約 40 公里，南北寬約 60 公里，主要為濁水溪所沖積而成（圖一）。扇頂標高約 100 公尺，地形成扇狀由東往西漸低，接臺灣海峽。東西向地質剖面概況如圖二（經濟部中央地質調查所，1995），顯示深度約 250 公尺內的地層概況，東側（六合至西螺）以厚層礫石層為主，分層並不明顯，沒有主要的阻水層（泥層），地下水上下流通並無限制，向西、西北、西南方，砂泥層厚度漸厚，層次漸多（九隆至海豐），大致有三層主要的阻水層（泥層），地下水上下流通已受限制。上部 60 m 地層之沉積年代約為全新世至今，以下地層至 300 m 為晚更新世。扇頂的礫石層（厚達 250 m）及扇中扇尾的淺層的含水層（< 20 m 深度），都屬於未拘限含水層（unconfined aquifer）。



本區的觀測井從 1991 年開始建置，至 1997 年全部完成，共有觀測站 85 站，站與站的間隔約 3—5 km，大部分都位於國小校園內，總數為 191 口，最深可達 350 m（嘉義東石）。每站因含水層層次不同，又分設一到五層不同層次的分層觀測井，材質主要為不鏽鋼，口徑為直徑六吋。因為經費及施工用地的限制，觀測井常採兩口共構，例如觀測井（一）觀測井（三）共孔或觀測井（二）觀測井（四）共孔，以一孔置兩觀測井管，不同層次中以皂土及黏土封隔。

本區地下水的流向與地面水相同，扇頂補注區為扇中及扇尾的地下水主要來源，扇頂補注區的地下水都含有超過 1 TU 的氬濃度，表示年代晚於 1953 年（Liu, 1995）。



圖二 東西向水文地質剖面圖（剖面位置見圖一）。

## 分析方法

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、EC、水位、濁度，當抽出三倍井管水後，或 pH 及 EC 值穩定 ( $\text{pH} \pm 0.1$ ， $\text{EC} \pm 5\%$ )，才停止抽水與採樣，並填寫現場採樣記錄表。

地下水中溶氧使用井內測棒電極量測，使用前依飽和空氣、溫度及鹽度校正 (Carritt and Kanwisher, 1959; APHA, 1998)，溶氧電極包含陰陽極，外覆透氧薄膜，當水中溶氧透過薄膜，被陰極消耗，此消耗速率被轉為電流，類比為溶氧濃度。本研究現地水質檢測使用美國 HydroLab 公司測棒，此測棒包含記憶體 (data logger)、4 枚可換式電極 (水溫、導電度、pH、氧化還原電位、及溶氧)、及水流攪動棒。井內停滯水抽離後，將測棒置入井內，下至濾管位置，至少停放 10 分鐘，測棒內定每 5 分鐘收資料一次。

產品說明書指稱靈敏度可達 0.1 mg/l，準確度為 0.2 mg/l，但根據美國地質調查所的經驗 (Radtke *et al.*, 1998)，溶氧電極在微濃度時 (<1 mg/l)，並不準確，該所建議使用 Rhodazine-D 方法 (ASTM, 1984; White *et al.*, 1991)。本研究以電極法為主，若小於 1 mg/l，輔以 Rhodazine-D 試劑法測量微溶氧，檢測範圍可達 10–500  $\mu\text{g/l}$ 。

為了評估溶氧電極的可信度，另外隨機選取 10% 的井數 (約 20 口)，以碘滴定法檢測水中溶氧 (環保署公告方法 NIEA W421.50A)。採樣時需避免氧氣接觸，在出水口以小管分水至採樣瓶，瓶中預先填充氮氣，水滿溢後迅速蓋上瓶蓋。結果顯示兩種方法的測值相當接近，誤差都在 0.5 mg/l 以內，證明電極法在大於 1 mg/l 時應可適用。但在微溶氧部分 (溶氧電極法顯示為 0.1–0.5 mg/l)，以 Rhodazine-D 試劑法測試，取樣 30 口皆無溶氧 (<10  $\mu\text{g/l}$ )，推測是溶氧電極的數據在低於 0.5 mg/l 時並不正確。

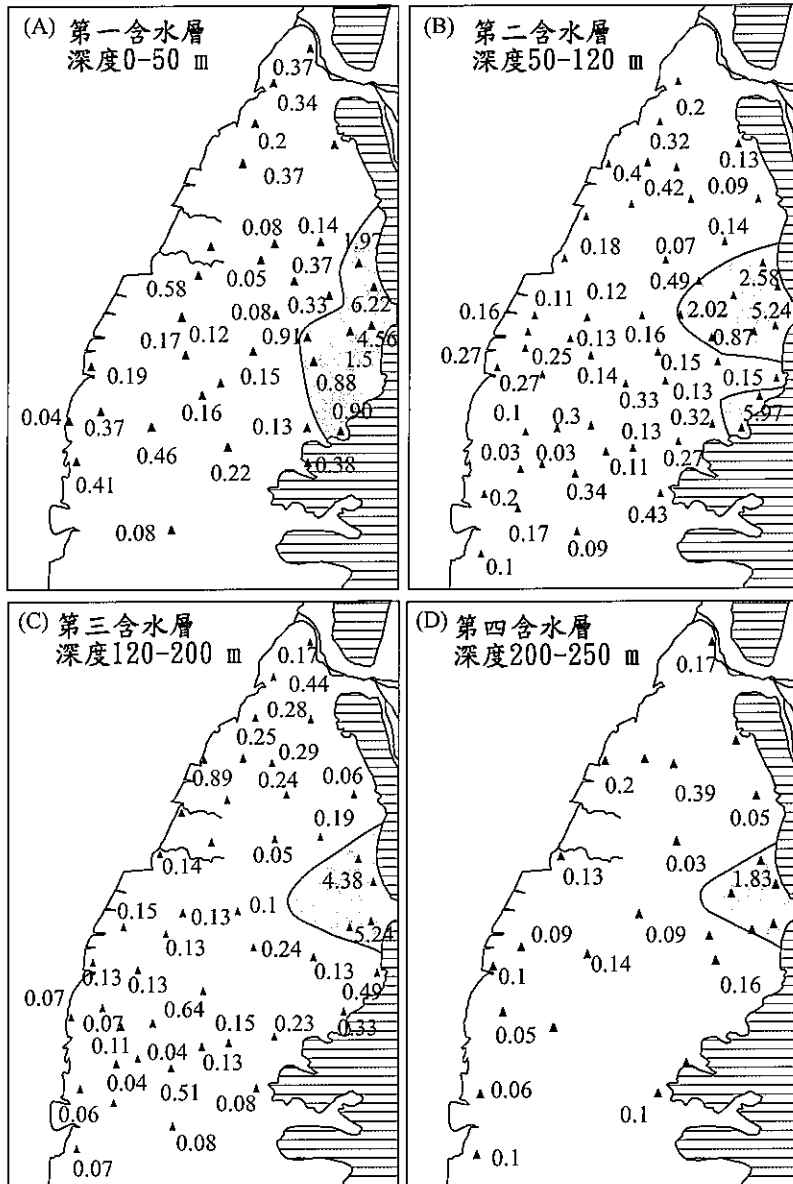
硝酸鹽氮之檢測法為馬錢子鹼比色法 (NIEA W417.50A)，偵測下限為 0.06 mg/l。

## 溶氧濃度分布

在 1999 年 11–12 月 (旱季) 及 2000 年 7–8 月 (雨季) 共檢測兩次，191 口井中，部分觀測井井管彎曲，測棒無法下至濾管，或者量測時測棒沒電、故障、電極薄膜破裂，共有有效樣本 166 口，其中 26 口 (約 16%) 的溶氧大於 0.5

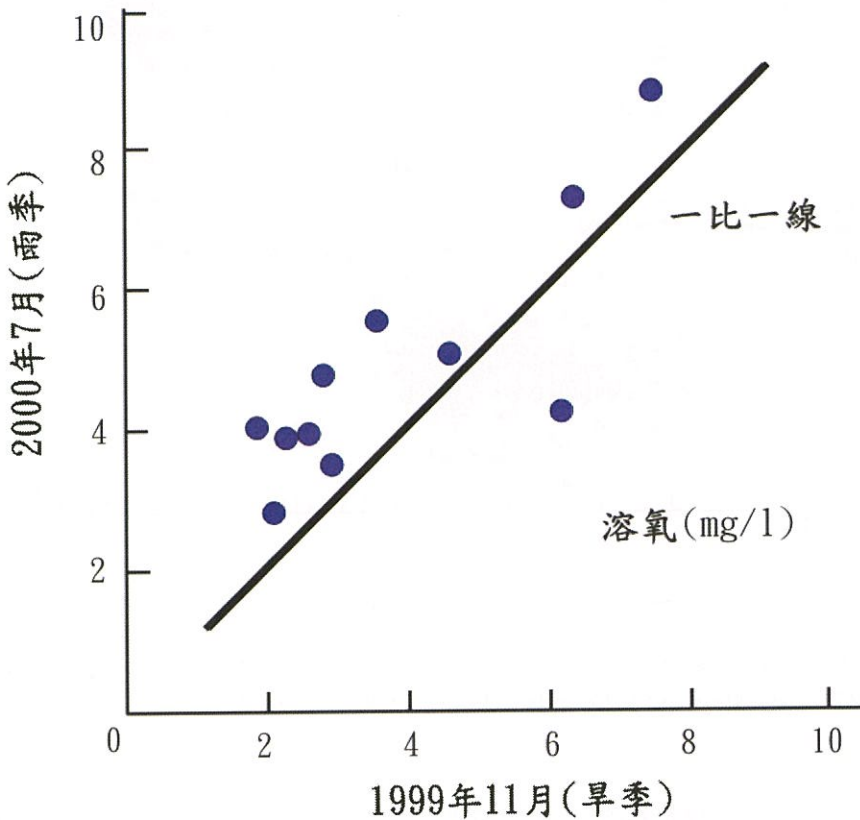
mg/l，140 口的溶氧小於 0.5 mg/l。為了應用上方便，本文將溶氧  $\geq 0.5$  mg/l 視為地下水中“有”溶氧，溶氧  $< 0.5$  mg/l 視為“無氧環境 (anoxic)”。

除了少數的淺井，含有溶氧的地下水，主要分布於扇頂補注區的未拘限含水層 (圖三)。溶氧濃度沿地下水流徑，往下游漸漸變少，至扇中及扇尾的地下水



圖三 各含水層之溶氧濃度 (電極法)，標註灰色部分為溶氧大於 0.5 mg/l，電極法所測小於 0.5 mg/l 數據並不準確，經微溶氧法抽查後，可推測為無溶氧。

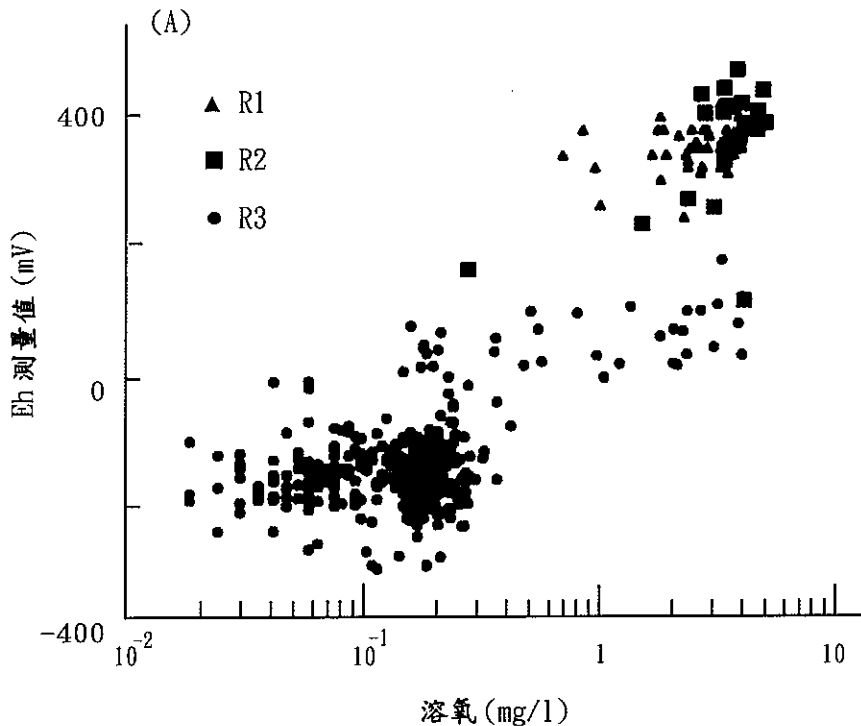
其溶氧都小於 1 mg/l。在扇頂補注區深達 250 m 的田中二號井仍測出大於 1 mg/l 的溶氧。溶氧在扇頂最高達 6.22 mg/l，往下游 5 km 約減至 1–2 mg/l，再往下游 10 km 就降至 1 mg/l 以下。比較早雨季的溶氧濃度，發現雨季的溶氧明顯高於旱季約 0.5–2 mg/l（圖四），可能旱季時缺乏含溶氧的地面水補入，一方面又因地下水中或地層中的耗氧物消耗溶氧，所以旱季時地下水中的溶氧較低。



圖四 雨季地下水中溶氧比旱季高約 0.5–2 mg/l。

溶氧大於 0.5 mg/l 時氧化還原電位約在 0–200 mV 之間，當溶氧小於 0.5 mg/l 時（無溶氧）氧化還原電位大部分為負值，約在 -400–0 mV 之間，本研究之氧化還原電位的測量值（有溶氧時）小於理論值（300–600 mV），也比國外相關研究低（Rose and Long, 1988；Smedley and Edmunds, 2002），本研究區地下水的溶解有機碳（DOC） 0.5–1.5 mg/l，沉積物有機質 0.2–3 wt %，Smedley

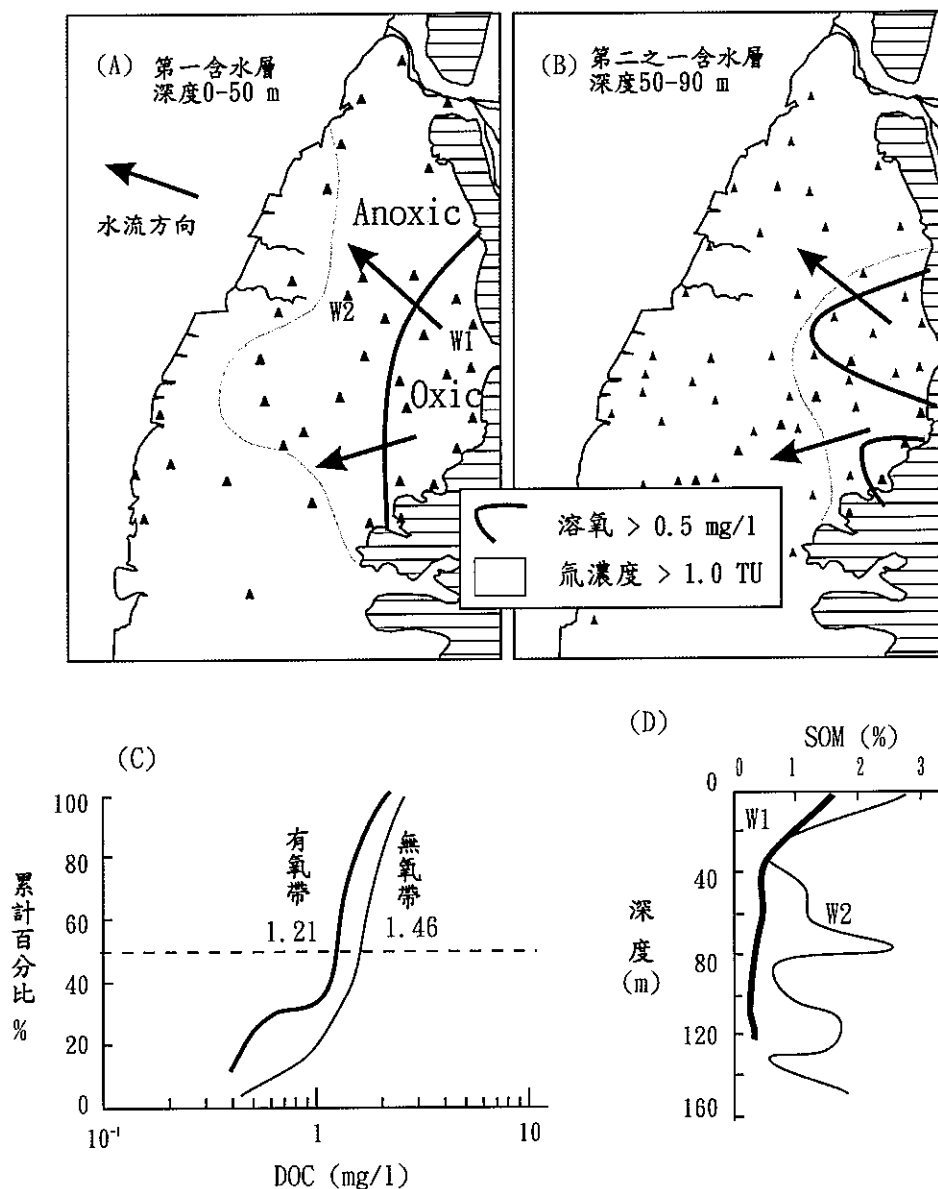
and Edmunds 研究區水中 DOC < 0.15 mg/l，作者推論，可能因為彰雲地區的地下水及地層中的有機物較多，還原能力較強，所以水中測量的氧化還原電位較低（圖五）。



圖五 溶氧及氧化還原電位之關係，數據中 R1 來自 Rose and Long (1988)，R2：Smedley and Edmunds (2002)，R3：本研究。

不同水文地質條件的地下水溶氧消耗速率不一 (Heaton and Vogel, 1980；Winograd and Roberson, 1982；Edmunds *et al.*, 1982)，本區的地下水溶氧消耗率可以從氚定年資料來推測。1953 年後補注之新水 ( $^3\text{H}$  大於 1TU) 以溶氧濃度區分為有氧 (oxic) 和無氧的 (anoxic) 地下水，有溶氧的地下水大都位於扇頂補注區，無氧的新水位於中下游，可見中下游含水層消耗溶氧的速率比較快。有氧的新地下水其 DOC 為 1.21 mg/l (中間值)，微低於無氧的新地下水 DOC 1.46 mg/l (圖六)。但地層中的有機質含量 (SOM: sediments organic matter) 相差較大，扇頂 (二水井) 的地層有機質較少，濃度在 1 wt % 以下，扇中游 (竹塘井) 的地層有機質較多，濃度在 0.5–3 wt % 之間，顯示礫石與砂層有機質較少，

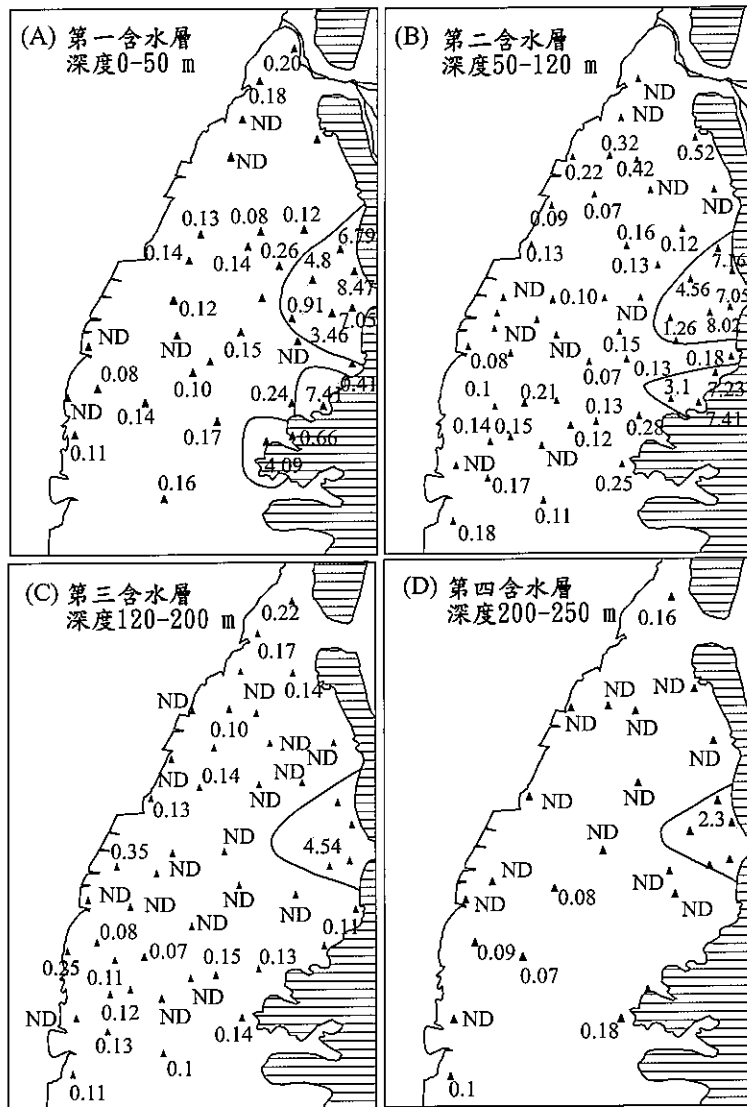
泥層中則較多（臺糖地下水中心，2002）。作者認為在本研究區，消耗水中溶氧的主要因素，主要應是地層中的有機碳，而非水中有機碳（因濃度低）。



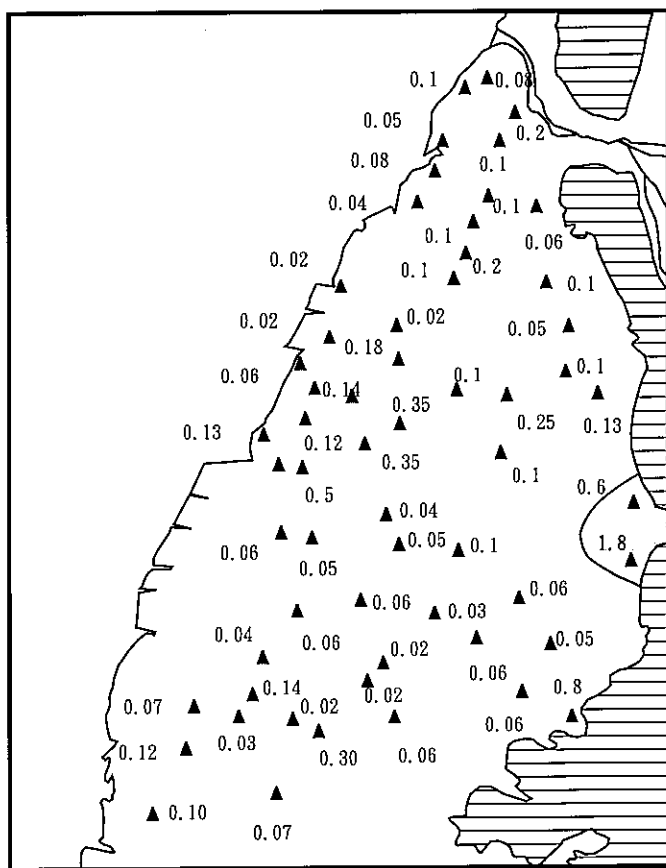
圖六 (A) (B) 溶氧及氬濃度之分布，近年補注之水（氬 > 1 TU）分成有氧（oxic）及無氧（anoxic）；(C) 近年補注地下水溶解有機碳（DOC）濃度之累積曲線，有氧帶之井數 32 口，無氧帶之井數 58 口；(D) 二水井（W1）及竹塘井（W2）岩心之沉積物有機質（SOM）含量，扇頂之岩心（二水井 W1）有機質明顯較少。

### 硝酸鹽氮濃度分布

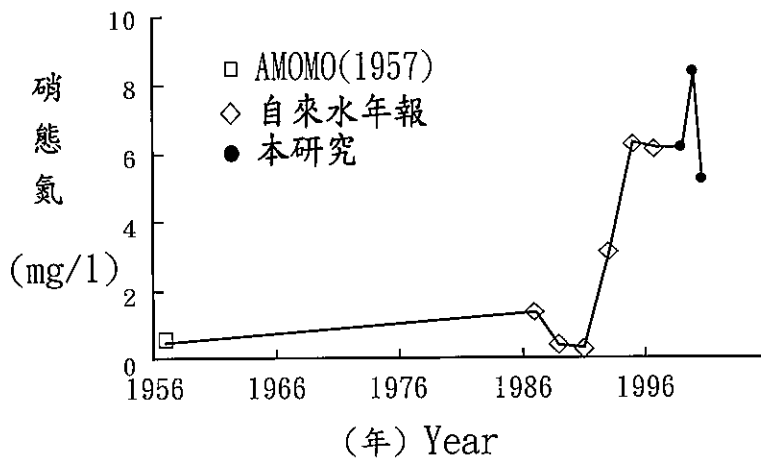
濁水扇洲各分層含水層之硝酸鹽氮濃度分布（圖七），濃度大於 0.5 mg/l 的地下水主要分布在扇頂補注區，比較 1956 年的資料，當時只有兩口含有明顯的硝態氮 (> 0.5 mg/l) (AMOMO, 1957; 圖八)，因此目前地下水中的硝酸鹽應是近年來的污染，臺灣省自來水公司田中水井的監測數據，顯示 1991-1992 年以後井水中硝酸鹽突然快速增加（圖九）。



圖七 各含水層之硝態氮濃度，標註灰色部分為大於 0.5 mg/l。



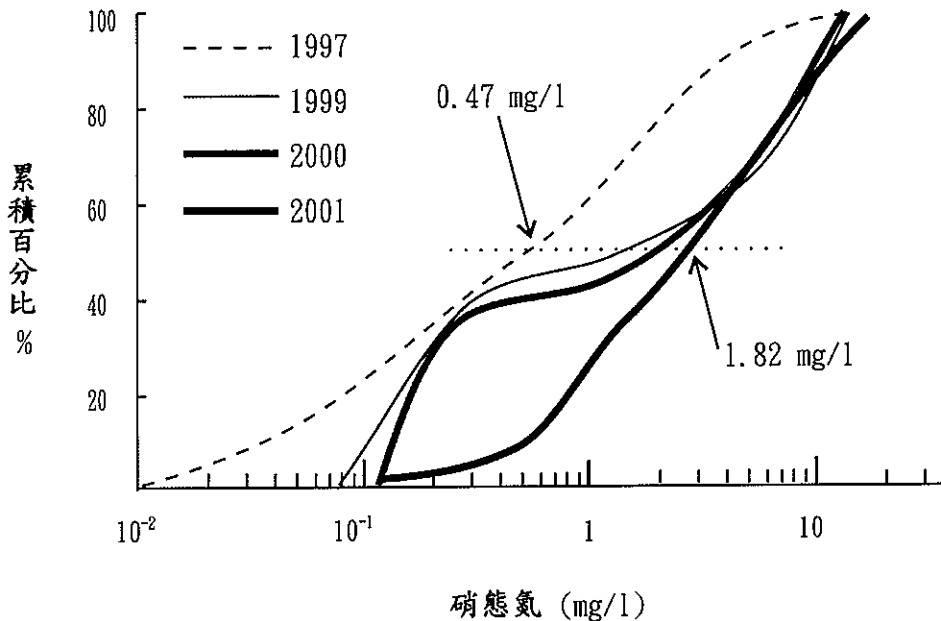
圖八 彰雲地區 1956 年之硝酸鹽氮分布圖 (AMOMO, 1957)。



圖九 田中地區水井歷年硝酸鹽氮監測值。

本研究區的地下水中硝酸鹽，有向下游濃度變少的趨勢，例如由 8.47（二水）、減為 4.8（田中）、最後 0.26 mg/l（田尾），但因地下水同時含有溶氧，不利脫硝作用，研究指出含氧的地下水，硝酸鹽向下游濃度變少，並不是因為脫硝作用，而是因為有硝酸鹽的水流入無硝酸鹽的地層，和地層水混合的結果（Smith-Carrington *et al.*, 1983）。

扇頂區 34 口監測井四年來（1997—2001）的硝態氮濃度監測結果（圖十），地下水中濃度界於 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為：0.47、1.26、1.56、1.82 mg/l，年增加率約為 0.28 mg/l。



圖十 濁水溪扇頂補注區 34 口觀測井 1997—2001 年之硝酸鹽氮濃度統計。

## 結 論

本研究為首度有系統的調查濁水扇洲地下水的溶氧及硝態氮分布，結果發現扇頂補注區之地下水，其溶氧為 1—6.22 mg/l，田中二號井深達 250 m 仍有 1.83 mg/l 的溶氧。而扇之中下游的地下水，可能因地層中有機質的降解作用，其溶氧大多低於 0.5 mg/l（電極法），且其氧化還原電位多為負值，可視為無溶氧的環境。

本區地下水中硝酸鹽濃度，在 1956 以後才升高，和溶氧分布相當一致，含高濃度硝酸鹽（四年統計：0.47—17.8 mg/l）的地下水都分布於扇頂補注區。四年來的監測結果顯示，硝態氮濃度呈穩定增加的趨勢，累積曲線中間值年增率達 0.28 mg/l，應加強農業肥料控制，以防地下水源水質繼續惡化。

## 誌 謝

感謝經濟部水利署提供研究經費，臺大地質科學研究所劉聰桂教授指導，臺糖研究所水質化驗室諸位先生女士及作者任職之臺糖地下水中心諸位工程師及領班之協助，特致謝意。感謝經濟部水利署第四及第五河川局在觀測井現場採樣之配合及協助。

## 參考文獻

- 經濟部水資源局（2002）中華民國 90 年臺灣水文年報。經濟部水資源局，共 250 頁。
- 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。經濟部中央地質調查所，共 102 頁。
- 臺糖地下水中心（2002）臺灣地區地下水觀測網水質監測調查分析。經濟部水資源局，共 267 頁。
- AMOMO (1957) Investigation report on ground water resource of the Choshui fan. Joint Commission on Rural Reconstruction, Taiwan, 206p.
- APHA (1998) Standard methods for the examination of water and waste water. 20th ed., Amer. Publ. Health Assoc., Washington, DC., 413-426.
- ASTM (1984) Power Plant Water Analysis Manual. 1st ed. Amer. Soc. Test Materials, Philadelphia, PA, USA. Chapter 38, 169-171.
- Carritt, D.E. and Kanwisher, J.W. (1959) An electrode system for measuring dissolved oxygen. *Anal. Chem.*, 31, 318-325.
- Champ, D.R., Gulens, J. and Jackson, R.E. (1979) Oxidation-reduction sequences in ground water flow systems. *Can. J. Earth Sci.*, 16, 12-23.
- Edmunds, W.M., Bath, A.H. and Miles, D.L. (1982) Hydrochemical evolution of the East Midlands Triassic sandstone aquifer, England. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 2069-2081.
- Froelich, P.N., Klinkhammer, G.P. and Bender, M.L. (1979) Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1075-1090.

- Heaton, T.H.E. and Vogel, J.C. (1980) Rate of oxygen removal in some South African groundwaters. *Hydrological Sci. Bull.*, 25, 373-377.
- Liu, T.K. (1995) Estimating flow and recharge rates of groundwater in western Taiwan using radiocarbon and tritium. *Radiocarbon*, 37, 2, 531-542.
- Radtke D.B., White A.F., Davis, J.V. and Wilde, F.D. (1998) Dissolved Oxygen. *In*: Wilde, F.D. and Radtke, D.B. (eds), *National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data*, USGS, 35-89.
- Rose, S. and Long, A. (1988) Dissolved oxygen systematics in the Tucson basin aquifer. *Water Resources Research*, 24, 127-136.
- Smedley, P.L. and Edmunds, W.M. (2002) Redox patterns and trace-element behavior in the East Midlands Triassic Sandstone aquifer. U.K., *Ground Water*, 40, 1, 44-58.
- Smith-Carrington, A.K., Bridge, L.R., Robertson, A.S. and Foster, S.D. (1983) The nitrate pollution problem in groundwater supplies from Jurassic Limestones in Central Lincolnshire. *Institute Geological Sciences Report 83-3*, London, UK: Natural Environmental Research Council, 32p.
- Stumm, W. and Morgan, J.J. (1995) *Aquatic Chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*, 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons, New York, 1022p.
- Tyson, R.V. (1995) *Sedimentary Organic Matter*. Chapman & Hall., 615p.
- White, A.F., Peterson, M.L. and Solbau, R.D. (1991) Measurement and interpretation of low levels of dissolved oxygen in ground water. *Ground Water*, 28, 584-590.
- Winograd, I.J. and Robertson, F.N. (1982) Deep oxygenated ground water: anomaly or common occurrence. *Science*, 216, 1227-1230.

# GROUNDWATER DISSOLVED OXYGEN AND NITRATE CONCENTRATIONS IN RECHARGE AREA OF THE CHOSHUI FAN-DELTA

Wen-Fu Chen<sup>1</sup>, Wen-Sen Lin<sup>2</sup>, Kou-Cheun Chang<sup>2</sup>,  
Chi-Ven Chin<sup>2</sup> and Ke-Min Chia<sup>1</sup>

## ABSTRACT

Dissolved oxygen (DO) and nitrate concentrations in groundwater from a total of 191 new monitoring wells, with maximum depth of up to 300 m, in the Choshui fan-delta of Taiwan were recently measured to delineate the regional patterns of both components. The unconfined aquifer of the proximal fan contained 1–7 mg/l of DO. A water sample collected from as deep as 250 m still had relatively very high value of 1.83 mg/l. DO concentrations have clearly decreased down-gradient along flow paths to below the detection limit (0.01 mg/l) in the shallow confined aquifers during the last 40 years, perhaps on account of oxidation of organic matter in the sediments.

A plume of high nitrate-N concentrations (0.5–17 mg/l) originating from the proximal part of the fan-delta has been developing possibly since 1956. This is attributed to agricultural fertilizers and nitrate-N concentration was increasing ca. 0.28 mg/l per year from 1997 to 2001.

**Key words:** groundwater, nitrate, Chang-hua, Yunlin, Choshui fan-delta

---

1. Groundwater Center, Taiwan Sugar Corporation  
2. Water Resource Agency, MOEA