

# 行政院環境保護署

## 「99 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

### 嘉南平原曾文溪流域含水層與地下水間之水-岩反應

#### 系統

#### 期末報告

**EPA-99-GA103-03-A236-15**

主 辦 單 位 :



行政院環境保護署

受 託 單 位 :

國立中正大學地球與環境科學系

印 製 年 月 :

100/12/21

計 畫 執 行 人 員 :

呂學諭、李元希

計 畫 執 行 期 間 :

99/12/29 – 100/12/28

中 華 民 國 100年12月

計畫名稱：嘉南平原曾文溪流域含水層與地下水間之水-岩反應系統

計畫編號：EPA-99-GA103-03-A236-15

計畫執行單位：國立中正大學地球與環境科學系

計畫主持人(包括協同主持人)：呂學諭、李元希

計畫期程：99 年 12 月 29 日起 100 年 12 月 28 日止

計畫經費：新台幣 96 萬元整

## 摘要

台灣大量利用地下水做為飲用水之水源，但這些地下水中 Fe、Mn 以及許多重金屬離子含量常有過高的趨勢，除人為污染的來源外，重金屬元素多源自於天然地下水與圍岩之間的水-岩反應。常久以來，泥質沉積物被認為是這些污染物的主要供應者，因此，由土壤釋出重金屬元素的研究相形重要。本研究藉天然示蹤劑的概念做為探討這些議題的手段，並以曾文溪流域做為研究地區。地下水質分析結果顯示，此區地下水以末次冰期為界限，分為淺層含水層及深層含水層，淺層含水層因潟湖環境具有較高的鹽度，但 As 與重金屬含量均低，深層含水層則因陸相沉積環境具有較低的鹽度，但 As 與重金屬含量均高。藉由 BCR 溶出試驗之分析結果，主要元素、Mn 與 Sr 在可交換相中含量較高，可能代表在 pH 值大於 8 且略微氧化的環境；Fe、As 與其他重金屬元素以鐵錳氧化物形態存在；在有機物相中富集的元素僅有 Th 與 Li。分層結果顯示，As 在深層含水層中的平均含量約為淺層的 1.7 倍，但其他重金屬元素則約略相等或反序，此與地下水質的分布有明顯差異。由稀土族元素的分析結果顯示，地下水含 As 量高者，幾乎沒有 Ce 負異常的現象。Ce 負異常指示水體曾發生過強烈的氧化反應，顯示地下水體的 As 含量與氧化作用的發生有直接的關係。

Groundwater is one of the major sources for supplying daily usage water of residents. However, the contaminants, such as Fe, Mn and heavy metals, are still a major issue in the coming years. These pollutants are generally recognized as being released by natural soils due to the water-rock interaction. In this study, a concept of natural tracer will be utilized to establish the water chemical model. Some ultra-trace metal elements, such as rare earth elements, are very suitable to be the natural tracers. The hydrochemistry of groundwater demonstrates that the shallow groundwater is salty but arsenic and heavy metals is depleted. On the contrary, the deep groundwater is enriched with arsenic and heavy metals.

The results of BCR (European Community Bureau of Reference) sequential extraction procedure show that most of heavy metals are extracted from the phase of Fe-Mn oxides while Li and Th are enriched in the phase of organic matter. Alkali and calc-alkali elements are mainly extracted from exchangeable phase in shallow aquifer. They represent the quality of pore water. It is worth to notice that the heavy metals of the BCR extracted solutions from sediments do not have the corresponding distribution in spite of As. However, arsenic in deep aquifer is almost twice the concentration in shallow aquifer. This implies that the enrichment of arsenic in sediments is not the only factor to cause high arsenic in groundwater. Some other chemical reactions are significantly involved in the water-rock interaction system. The results of rare earth elements demonstrate an interesting fact that the groundwater samples with top three arsenic concentrations do not have considerable Ce negative anomaly. On the contrary, the groundwaters with bottom three arsenic concentrations show strong Ce negative anomaly. In general, Ce negative anomaly is an excellent indicator of oxidation in aquatic system, which means that the oxidation reaction is responsible to result in minimum arsenic concentration in groundwater.

## 前 言

台灣地區廣泛地運用地下水做為飲用水之水源，尤其彰化、雲林地區之比例最高，長久以來，台灣地區地下水中 Fe、Mn、As 以及許多重金屬離子含量有過高的趨勢，在飲用水源水質的規範下，地下水質令人擔憂。然而，這些污染物，除人為污染的來源外，許多係源自於天然地下水與圍岩之間的水-岩反應，這些反應受控於酸鹼、氧化還原反應與土壤礦物化學成分。常久以來，泥質沉積物被認為是這些污染物的主要供應者，因此，有關土壤中重金屬元素釋出水體的研究相形重要。本研究將藉天然示蹤劑的概念做為探討這些議題的手段，儘量分析萃取液中可偵測的金屬元素，歸納出與重金屬具相關性的成分，藉此推估其主要來源。

## 研究方法

本研究的主要目標在進行土壤溶出試驗的分析，分析標的包含主要陽離子（如 Na、K、Ca、Mg 等）、次要陽子離（如 Fe、Mn、Sr 等）、微

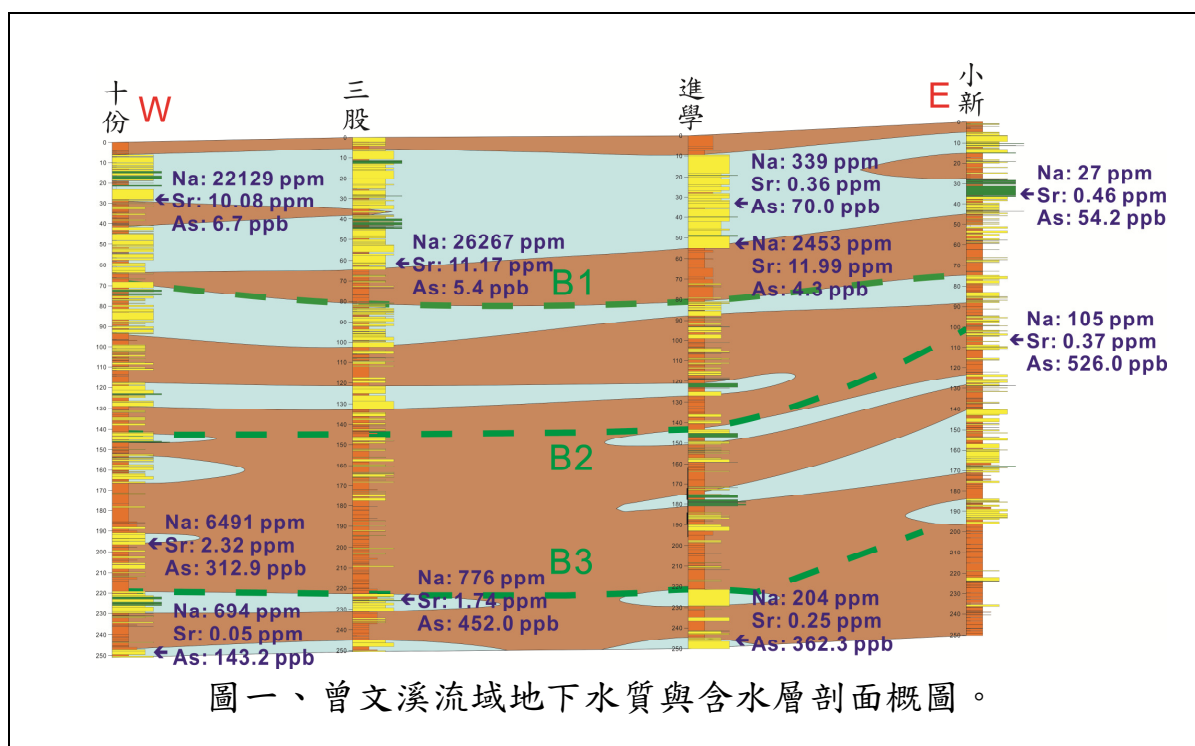
量元素（如 Li、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Ba、Pb、U 與稀土族元素等）。由於欲評估這些陽離子為天然示蹤劑的可能性，因此溶出試驗所選擇的溶劑必需不含這些成分，本研究選定 BCR 做為溶出試驗程序。BCR 將土壤分為四個相：可交換與碳酸鹽相、鐵錳氧化物相、有機物相、剩餘相。剩餘相不可能在地下水系統中被釋出，在本研究不做分析。本研究以離子層析儀進行地下水陰離子的分析工作，地下水與土壤萃取液的陽離子則以感應耦合電漿質譜儀分析之。

## 結 果

曾文溪流域地下水水質深受沉積環境的影響（圖一）。

**淺層地下水：**七千年以來的曾文溪流域被海水淹沒，也因此造成區域內深度 150m 以上（上游區域 100m）之淺層地下水鹽度偏高，上游區域因較長時間的補注作用，未有過高的鹽度。

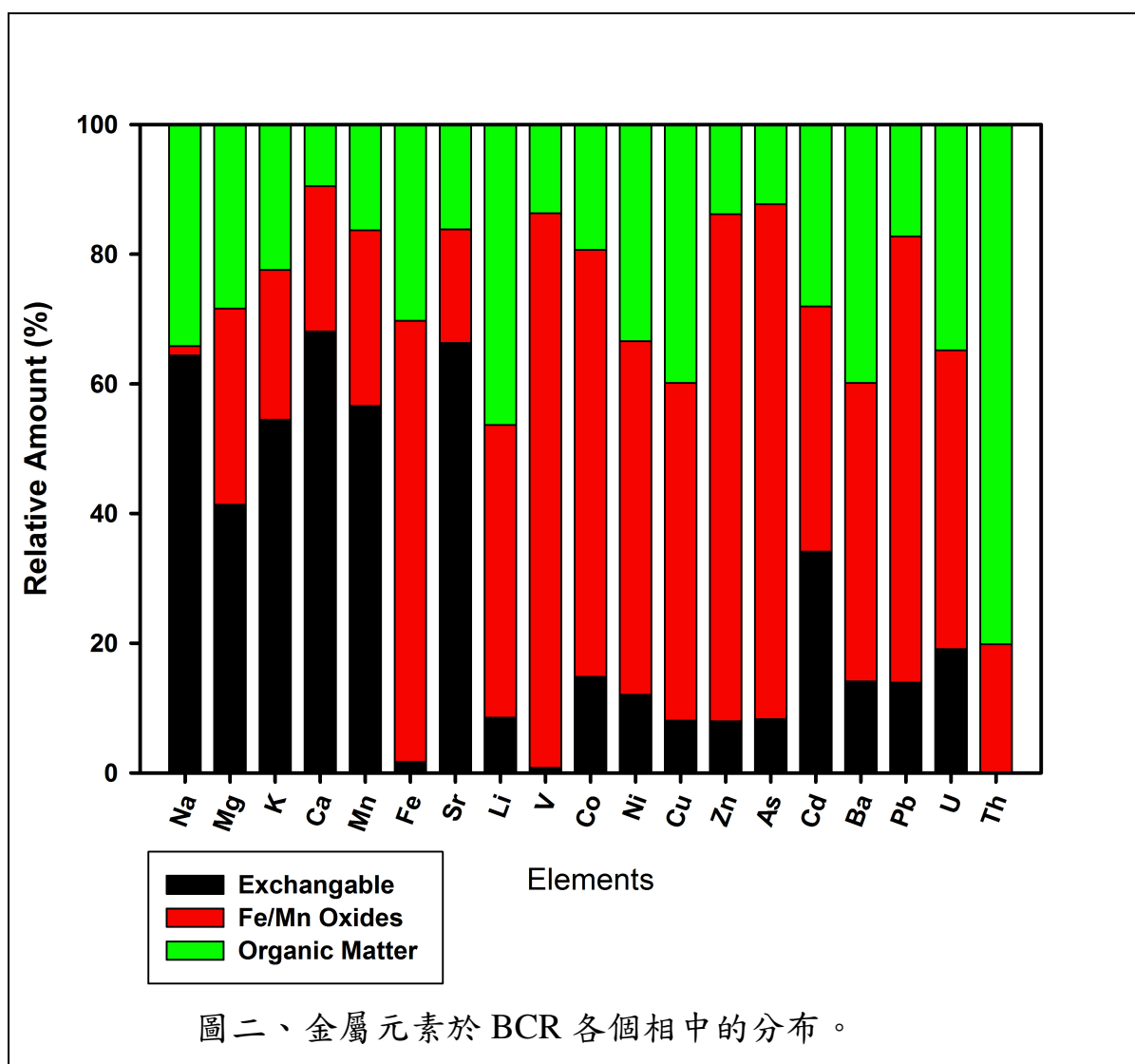
**深層地下水：**七千年以前研究區域處於陸相環境，地下水鹽度低，含有較高的 As 與重金屬含量。



**BCR 分析結果：**圖二顯示各元素於 BCR 三個相中的平均分布。主要元素、Mn 與 Sr 在可交換相中含量較高，可能代表在 pH 值大於 8 且略微氧化的環境中，Mn 相對於 Fe 較易以碳酸鹽的形式存在；Fe 與其他重金屬元



素以鐵錳氧化物形態存在，其中 As 與 Zn 有接近八成的比例；在有機物相中富集的元素僅有 Th 與 Li，但 Li 在鐵錳氧化物中也有約略相等的含量。

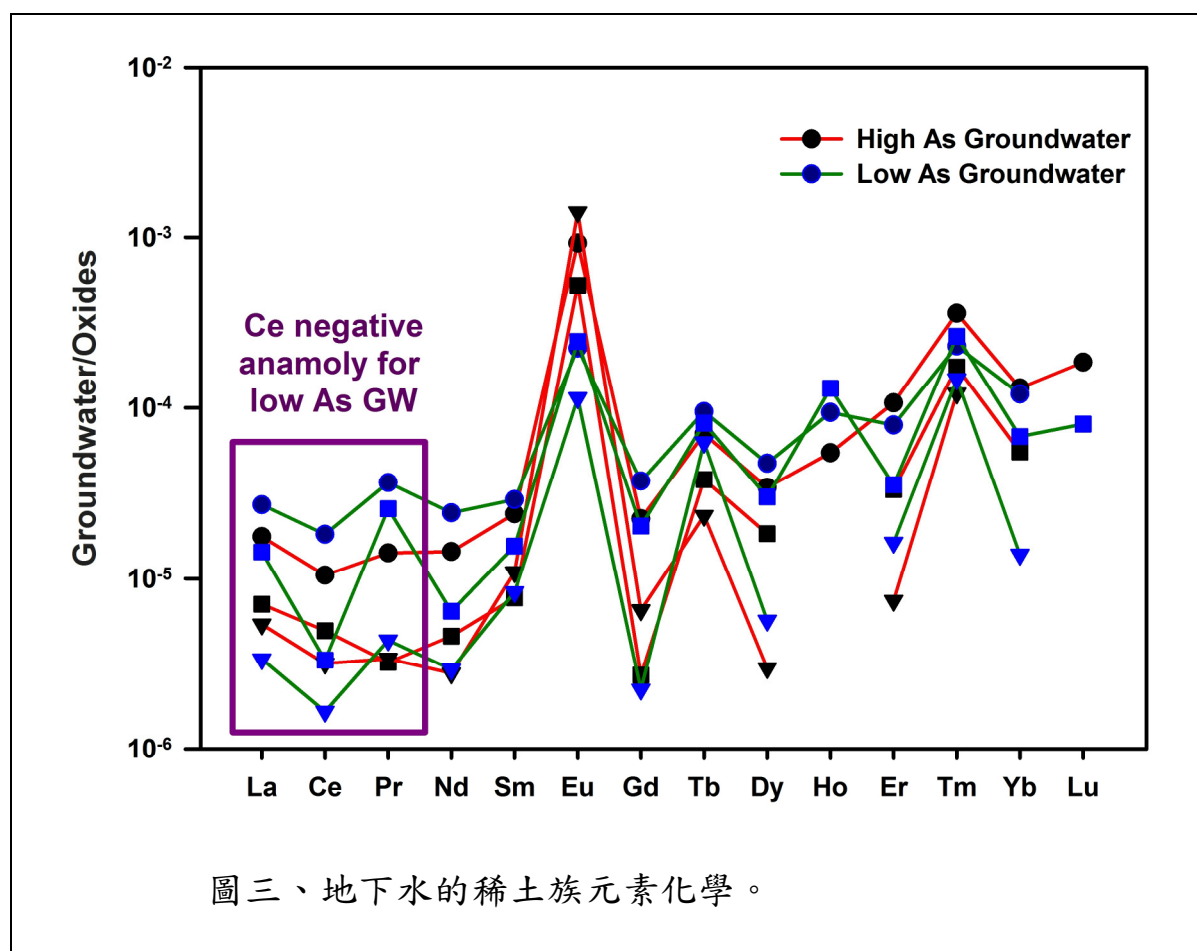


圖二、金屬元素於 BCR 各個相中的分布。

**分層結果：** IA 與 IIA 族元素富含於淺層含水層的可交換相中，與地下水的分布一致；重金屬元素在鐵錳氧化物中富集，As 在深層含水層中的平均含量約為淺層的 1.7 倍、V 為 1.5 倍，但其他重金屬元素則約略相等或反序，此與地下水質的分布有明顯差異。若觀察個別土壤樣本的分析結果，深層的 As 確實普遍偏高，更有幾個特定樣本有突出的 As 含量，在淺層含水層中則未有任何突出樣本出現。據此推論，除了含水層的含量以外，尚有其他化學反應影響。

**稀土元素化學：** REE 來源單一、對特定化學反應具趨勢性的變化，為良好的天然示蹤劑。將區域內含有 As 濃度最高與最低各三個地下水樣本，

分別對區域內 REE 含量最高的含水層樣本進行正規畫，可得圖三。圖中顯示含 As 低的地下水樣本均具有明顯的 Ce 負異常，而含 As 量高者，幾乎沒有 Ce 負異常的現象。Ce 負異常指示水體曾發生過強烈的氧化反應，顯示地下水體的 As 含量與氧化作用的發生有直接的關係。

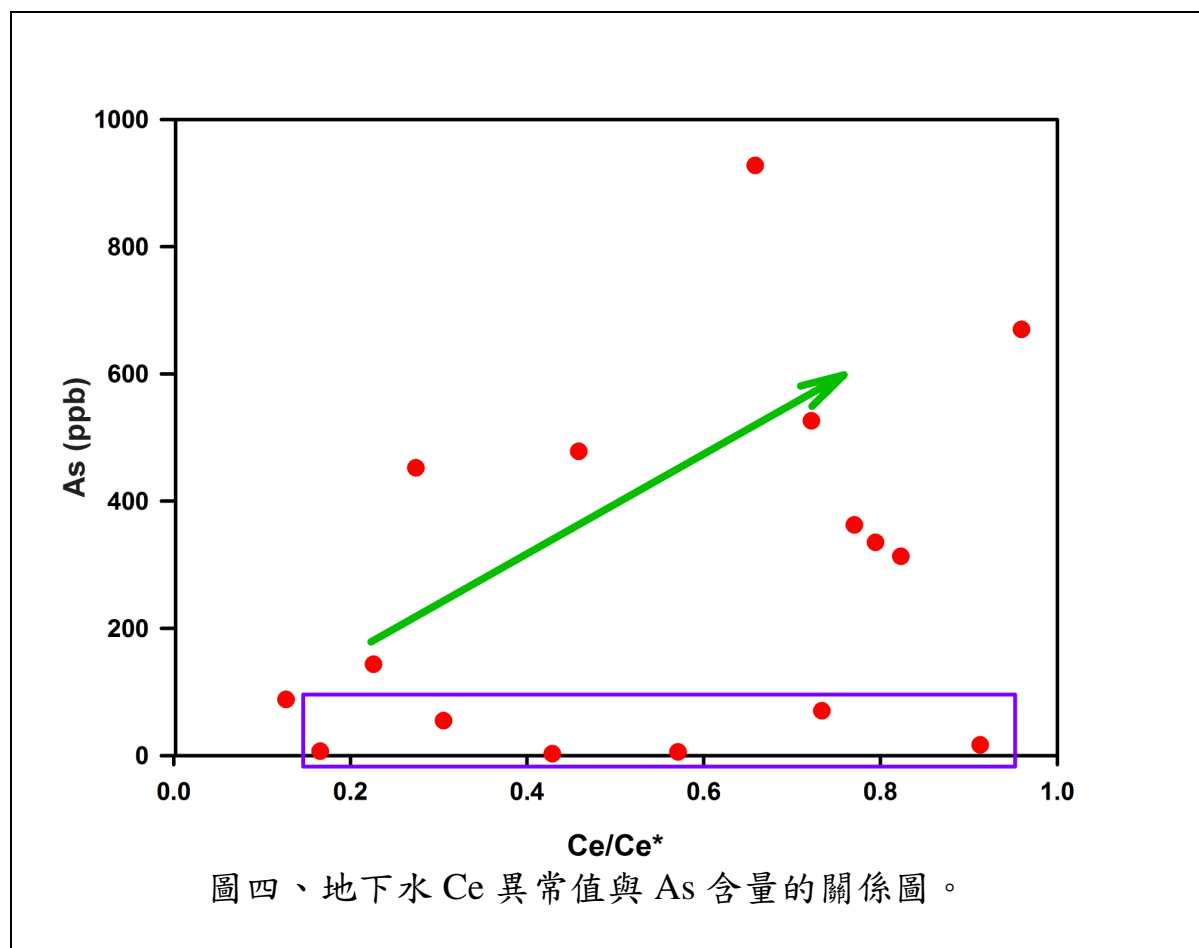


另外，可透過 Ce 負異常值與 As 的關係圖做更進一步的討論（圖四）。低 Ce 異常值的水樣（高氧化水體），可肯定水體發生過氧化反應，因此無高 As 含量的樣本出現；若觀察高 Ce 異常值高（低氧化水體）卻僅有低 As 含量的地下水樣本（圖 4-11 中藍框內的樣本），均是採自淺層含水層中，因此推論此類水樣可雖未經氧化反應，但因淺層含水層土壤 As 含量較低，無法提供足夠量的 As 進入水體。然而，這個現象仍不能排除是被高 Ce 異常值來源覆蓋掉原本低 Ce 異常值特徵的可能性，即地下水 As 含量的高低，同時受含水層土壤來源濃度與後續化學反應同時影響。

## 結 論

曾文溪流域地下水質與含水層化學性質均受過去幾萬年來沉積環境的

影響，然而除 As 以外，其他重金屬元素在含水層中未如地下水質有同步偏高的趨勢，推測 As 及重金屬元素的溶出或流布過程仍受其他化學反應影響，由 REE 的分析結果顯示，As 含量低下的地下水均曾發生過強烈的氧化反應。



## 建議事項

由此研究結果獲知：地下水重金屬含量偏高無法單由土壤之重金屬含量分布達成，雖由稀土族元素獲知氧化反應對地下水重金屬有決定性的角色，若未來能透過其他微量元素或同位素的研究，或可更能精確的掌握水—岩反應對重金屬元素的影響。

# 目次

<b>第一章 計畫緣起與目的</b>	<b>1-1</b>
<b>第二章 工作內容與執行進度</b>	<b>2-1</b>
2.1 工作內容	2-1
2.1.1 實驗方法的評估	2-1
2.1.2 研究目標區域	2-2
2.1.3 地下水採樣	2-4
2.1.4 土壤採樣	2-5
2.1.5 地下水樣本分析工作	2-7
2.2 完成工作項目	2-7
<b>第三章 研究方法與過程</b>	<b>3-1</b>
3.1 採樣與前處理	3-1
3.1.1 地下水	3-1
3.1.2 土壤	3-2
3.2 溶出試驗	3-2
3.3 儀器分析	3-4
3.3.1 ICP-MS 主要陽離子及次要陽離子分析	3-4
3.3.2 ICP-MS 微量陽離子分析	3-5
3.3.3 離子層析儀（IC）分析水中陰離子	3-5
3.3.4 ICP-MS 稀土族元素分析	3-6
<b>第四章 執行成果</b>	<b>4-1</b>
4.1 地下水採樣與分析結果	4-1
4.1.1 地下水一般水質	4-1
4.1.2 地下水分層水質	4-3
4.1.3 As 的空間分布	4-8
4.2 含水層土壤分析結果	4-8

4.2.1 溶出試驗綜合分析結果-----	4-8
4.2.2 去離子溶出相與 BCR 可交換相比較-----	4-10
4.2.3 BCR 各相態間的比較-----	4-11
4.3 含水層分層分析結果-----	4-14
4.3.1 BCR 可交換相比較-----	4-14
4.3.2 BCR 鐵錳氧化物相比較-----	4-15
4.3.3 BCR 有機物相比較-----	4-16
4.4 稀土族元素化學-----	4-17
4.4.1 含水層土壤稀土族元素-----	4-17
4.4.2 地下水稀土族元素-----	4-20
<b>第五章 結論與建議-----</b>	<b>5-1</b>
<b>參考文獻-----</b>	<b>6-1</b>
<b>附錄-----</b>	<b>7-1</b>
審查意見及答覆說明表（期中報告初稿）-----	7-1
審查意見及答覆說明表（期末報告初稿）-----	7-3
審查意見及答覆說明表（期末報告複審）-----	7-5
附表 1 曾文溪流域地下水水質分析結果-----	7-8
附表 2 曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果-----	7-12
附表 3 曾文溪流域可交換相分析結果-----	7-21
附表 4 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果-----	7-33
附表 5 曾文溪流域有機物相分析結果-----	7-45
附表 6 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果-----	7-57
附表 7 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果-----	7-70

# 圖目次

圖 2-1	1 萬 5 千年以前至 3 萬年間曾文溪流域概況 -----	2-2
圖 2-2	1 萬 5 千年以後曾文溪流域概況-----	2-3
圖 2-3	3000 千年前曾文溪流域概況 -----	2-4
圖 2-4	300 年前至現在曾文溪流域概況-----	2-5
圖 2-5	地下水樣本採樣點-----	2-6
圖 2-6	含水層土壤樣本採樣井位-----	2-6
圖 4-1	曾文溪流域地下水水質菱狀圖-----	4-2
圖 4-2	地下水質叢集分析結果-----	4-3
圖 4-3	曾文溪流域地下水文與水質概圖-----	4-4
圖 4-4	Fe 與 Mn 在 CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O 系統中的相圖 -----	4-7
圖 4-5	各元素在 BCR 三個相態中的平均比例圖 -----	4-12
圖 4-6	Mn 在碳酸鹽系統中的相圖-----	4-13
圖 4-7	含水層土壤 BCR 鐵錳氧化物相稀土族元素剖面形態 -----	4-18
圖 4-8	含水層土壤 BCR 有機物相稀土族元素剖面形態 -----	4-19
圖 4-9	地下水稀土元素對土壤鐵錳氧化相平均濃度正規化分布形態 -----	4-21
圖 4-10	地下水稀土元素對土壤有機物相平均濃度正規化分布形態-----	4-22
圖 4-11	Ce 負異常值與地下水中 As 含量的關係圖 -----	4-24

# 表目次

表 2-1	BCR 萃取程序所使用之溶劑與萃取時間-----	2-2
表 4-1	地下水分層水質比較表-----	4-4
表 4-2	四種萃取方法的平均含量比較表-----	4-9
表 4-3	BCR 可交換相與去離子溶出相之濃度比值-----	4-10
表 4-4	含水層土壤樣本萃取結果分層平均統計-----	4-15
表 4-5	地下水與含水層土壤鐵錳氧化物相〔深層／淺層〕比值比較表-----	4-16
附表 1	曾文溪流域地下水水質分析結果-----	7-8
附表 2	曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果-----	7-12
附表 3	曾文溪流域可交換相分析結果-----	7-21
附表 4	曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果-----	7-33
附表 5	曾文溪流域有機物相分析結果-----	7-45
附表 6	曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果-----	7-57
附表 7	曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果-----	7-70

## 第一章 計畫緣起與目的

台灣地區廣泛地運用地下水做為飲用水之水源，尤其彰化、雲林地區之比例最高，然而長久以來，台灣地區地下水中鐵(Fe)、錳(Mn)、砷(As)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)及許多重金屬離子之含量均有過高的趨勢，在飲用水源水質的規範下，地下水質令人擔憂。然而，這些污染物，除人為污染的來源外，許多係源自於天然地下水與土壤（或圍岩）之間的水－岩反應（water-rock interaction），這些反應主要受控於酸鹼反應、氧化還原反應（含生物作用）與土壤礦物化學成分。常久以來，泥質沉積物被認為是這些污染物的主要供應者，因此，過去已有許多關於土壤污染物（尤其是重金屬元素）釋出水體的研究（e.g. Doelsch et al., 2008；Bacon et al., 2005；Zimmerman and Weindorf, 2010）。然而，到現今為止，仍存在一些不易克服的困難，包括土壤砂泥比值效應、水－岩反應時間效應等（詳如以下之詳細說明），在本研究中將試圖深入解決這些議題；除此之外，本研究將藉微量元素天然示蹤劑的概念做為探討這些議題的重要手段，因此會分析萃取液中「所有」所偵測的金屬元素（並非僅針對性地分析污染物），以歸納出與污染物具相關性的成分，藉此可更精確地推估污染物的來源。這類的研究，可廣泛地應用於地表水、地下水天然污染源的判釋，在本研究中，將以嘉南平原土壤與地下水之間之水－岩反應（water-rock interaction）為主要研究標的。

選取嘉南平原地下水分區為研究標的是因此區為砷的主要污染區域，過去已有相當完整的研究成果可供參考、對比、驗證本研究的結果（e.g. Nath et al., 2008; Lee et al., 2008; Wang et al., 2007）。除此之外，嘉南平原地下水的鹽度高，一般認為是海水混染所造成。然而，由沉積歷史來看，嘉南平原長久以來一直處於潟湖（lagoon）的環境，直至數百年以前，此區域（曾文溪流域含上游地區）才開始脫離被海水覆蓋的環境（雖然更早以前就開始在上游扇頂區接受淡水補注），意即現在地下水中的鹽度（以下稱為海水訊號）可能是殘留於含水層內的古



海水或是新近才入侵的海水；再者，殘留於含水層內的古海水亦分為兩種：(1)孔隙內的古海水；(2)被黏土礦物吸附、透過離子交換（ion exchange）或分子擴散（molecular diffusion）進入地下水體的陽離子；這些不同來源、透過不同機制進入地下水體的海水訊號可能在主要成分上有相似的組成（鈉、鉀含量高等），但對微量元素而言，則可能有可茲區別的反應（詳見後續說明）。再者，嘉南平原為土壤泥質含量最高的地下水區，水－岩反應所造成的效應也可能最大。綜合以上，本研究選擇嘉南平原為初始研究區。

由於地下水的流速緩慢，台灣地區的地下水年代經常在數百到數千年之間，深層地下水甚或可達數萬年之久，因此地下水質係代表水體入滲以後一段長時期地下水與整個含水層（aquifer）水－岩反應的總合結果，並非僅受採樣井土壤的影響，亦即在進行地下水質與土壤性質相關性研究時，必須考量地下水在整個流線上的可能反應，在本研究中，將針對一個地下水流線的完整剖面進行分析，以期能正確地推估含水層土壤對地下水質的影響。

過去研究的分析項目，多數集中在飲用水水源水質標準的項目、主要成分（如鈉、鉀、鈣、鎂、矽等）及針對性的污染物（如鐵、錳、砷、鎘、汞等）上，較少分析土壤內的其他微量元素。然而，上述的分析項目許多為土壤中的主要成分（如鐵、錳等），這些成分的來源變異性極大，不易推測其真正的來源相。相反地，土壤與水體內的微量元素來源單一，相對主要成分而言，更易判定其來源礦物相，其功能類似天然的示蹤劑，若能取得微量元素與標的污染物的相關性，則更易判釋污染物的主要來源。在過去的研究中，許多同位素（如碳同位素、氧同位素、氫同位素與銩同位素等）與稀土族元素均可做為優良的天然示蹤劑，本研究將以稀土族元素做為主要的天然示蹤劑。稀土族元素包括 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb 與 Lu，這些元素均易形成三價陽離子且具有接近的離子半徑，因此，稀土族元素的化學性質與週期表中鄰近的元素（如 Ba、Hf）有相當大的差異。除此之外，稀土族內元素因隨著原子序的增加逐漸填滿

4f 的電子軌域，以致離子半徑由 La 到 Lu 有逐漸減小的趨勢，進而造成其化學性質隨原子序有些微的變化，雖然相鄰的元素間的化學分化程度（fractionation）不大，但當將所有稀土族元素做圖時，會呈現具有固定趨勢的系列變化，此即所謂的鑷系收縮現象（lanthanide contraction）（Johannesson and Lyons, 2000）。

除了反應原岩稀土族元素分布以外，水中稀土族元素強烈受吸附作用（sorption）與表面錯合作用（surface complexation）影響，這些作用對較重的 REEs（HREE）與較輕的 REEs（LREE）的效應有不同的趨勢，因此能將 LREE 與 HREE 的含量分離，一般而言，HREE 較易與水中的有機物或無機配體形成錯合物而進入水體系統（具較強烈的表面錯合作用），相反地，LREE 則較易被沉積物中的黏土礦物吸附而留在固態相中（具較強烈的吸附作用）。綜合而言，稀土元素最大的優勢在於利用族內被某些特定化學反應所造成的分化趨勢，而非依賴任何相單一成分的絕對濃度做為天然示蹤劑。本研究將充分利用此一特性進行天然示蹤劑的研究。

雖然稀土族元素在天然環境中的來源單一，可做為天然示蹤劑。然而，在天然材料中的含量極低，能被連續階段萃取步驟淋溶的部分可能更低，而且階段萃取所得的樣本量多在 50ml 以下，幾乎無法再進行濃縮程序。因此，當此狀況之下，本研究將視情況選取濃度相度較高，且具有統計意義的微量元素做為天然示蹤劑。

## 第一章 計畫緣起與目的

## 第二章 工作內容

### 2.1 工作內容

本計畫期中之前的工作內容主要包括幾個重要的項目，包括：實驗方法的評估、研究目標區域環境資料蒐集、地下水採樣、土壤採樣、部分地下水樣分析、部分土壤樣本分析及初步資料分析等工作，茲分別敘述如下。

#### 2.1.1 實驗方法的評估

本研究的資料蒐集工作包括兩個主要部分：實驗方法與研究目標區域。對實驗方法而言，評估各種常見的土壤金屬元素萃取方法，並選擇適當的標準方法應用於本研究中。被評估的標準方法包括 Tessier et al. (1979)、Community Bureau of Reference (BCR) Procedure (Ure et al., 1993)、Short Extraction Procedure (Maiz et al., 2000)、Geological Society of Canada (GCS) Procedure (Doelsch et al., 2008) 及一些為縮短萃取時間的修正程序 (modified procedures)。這些萃取程序均已經過嚴謹的實驗，並發表於重要的國際期刊上，對土壤重金屬的溶出具有一定的效果。因此選擇萃取方法的著眼點便落在使用溶劑的種類上。

本研究的主要目標在進行土壤溶出試驗的分析，分析標的除了重金屬元素外，尚包括微量的陽離子（如稀土族元素等）、主要陽離子等（如鈉、鉀、鈣、鎂、鋁、矽等）。由於微量的陽離子來源較為單一，在適當的條件下，可做為天然示蹤劑；另外，對萃取實驗而言，主要陽離子可能代表土壤內石英（矽）、長石（鈉、鉀、鈣、鎂）與黏土礦物（鐵、錳）的溶出成分。因此，在要分析這些金屬元素的情況下，溶出試驗所使用的溶劑必需不含這些成分。對 Tessier 程序而言，使用了含鎂、鈉的溶劑；對 Maiz 程序而言，使用了含鈣的溶劑；對 GCS 程序而言，使用了含鈉的溶劑；BCR 程序則使用不含任何金屬元素的溶劑。因此本研究選定 BCR 做為溶出試驗程序。

BCR 溶出試驗程序將土壤溶出分為四個相，分別為吸附及離子交

換（含碳酸鹽）相、鐵錳氧化物相、有機物相、剩餘土壤相（residual），使用溶濟與萃取時間如表 2-1。相較於其他程序，BCR 無法將離子交換相與碳酸鹽相分開，為此溶出方法較大的缺憾。

表 2-1、BCR 萃取程序所使用之溶劑與萃取時間。

Phase	Time (hr)	T (°C)	Reagent
Freshing	504	22	deionized water
Exchangable and Adsorbed	16	22	acetic acid
Fe-Mn Oxides	16	22	hydroxylammonium chloride
Organic matter	1	85	hydrogen peroxide
	2	22	ammonium acetate,
Residual	digestion procedures（本研究不進行此程序）		

### 2.1.2 研究目標區域

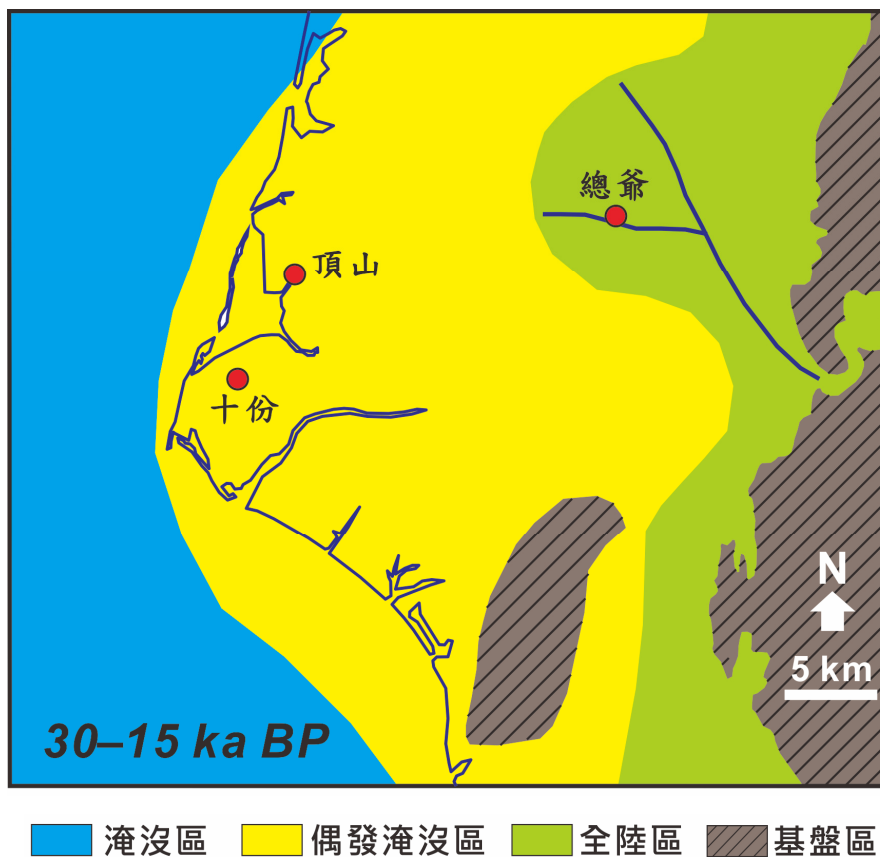


圖 2-1、1 萬 5 千年以前至 3 萬年間曾文河流域概況。

根據經濟部中央地質調查所鑽探資料，現在曾文河流域的中下游區域在 3 萬至 1 萬 5 千年間，係處於陸相的地形（圖 2-1），在這段時

間內，曾文溪流域所堆積的沉積物較海水淹沒時期要粗，且可能含有鹽度較低的孔隙水，這些陸相沉積的土壤，在流域西邊海岸區域，出現在 120-150 公尺深的岩心記錄中，愈往東則分有愈淺，至上游區域則出現在 100 公尺深的位置，總厚度約略在 10-30 公尺之間。一般而言，這層陸相沉積，是嘉南平原中地下水資源最豐富的含水層，不但鹽度低，含水層的導水性質也高於其他含水層，但卻具有偏高的砷含量。

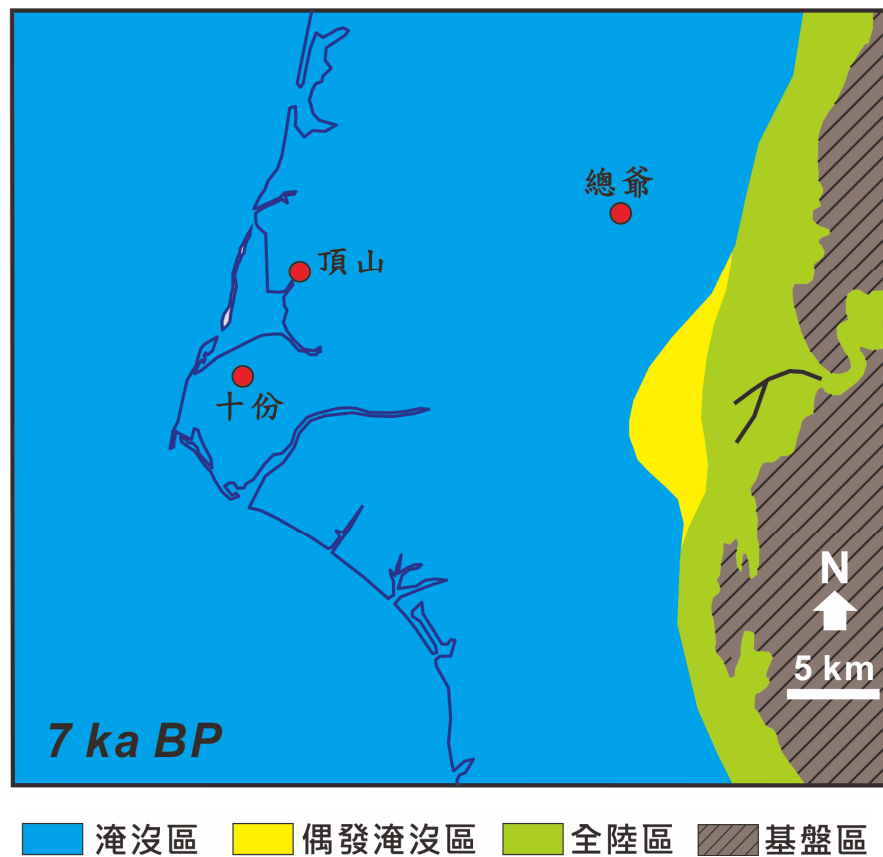


圖 2-2、1 萬 5 千年以後曾文溪流域概況。

自 1 萬 5 千年之後，曾文溪流域因海水面上升與盆地的沉降作用，開始處於海水淹沒的瀉湖狀態（圖 2-2）。因此，在這段時間內，曾文溪流域所沉積的沉積物以泥（黏土礦物）為主，土壤孔隙間亦含水高鹽度的海水，甚至因瀉湖的環境，產生高蒸發率的鹵水，依現在的地下水質資料顯示，這些鹵水的氯含量可達一般海水（19000ppm）的數倍。這樣的瀉湖讓曾文溪流域的含水層無法接受陸地地表水的補注。

到了 7000 年以前，由於曾文溪帶來大量的沉積物，流域上游漸次露出海水面之上（圖 2-3），上游含水層開始有機會接受地表天水的補注。一直到 300 年前，整個區域才出露地表（圖 2-4），發育成現在曾文溪流域的狀態。然而，因瀉湖環境下沉積的土壤具有極低的水力傳導係數，僅數千年的時間，無法有效地將土壤孔隙中的海水沖提排出，因而造成現在曾文溪流域含水層中高鹽度的地下水。1 萬 5 千年來在瀉湖環境下所形成的含水層，在流域西部海岸地區，出現在 120 公尺以上的岩心記錄中，愈往東出現的深度愈淺，厚度也愈薄，總厚度約在 100-150 公尺，相較於 1 萬 5 千年以前的陸相沉積含水層要厚的多，但地下水資源的質與量均不佳。

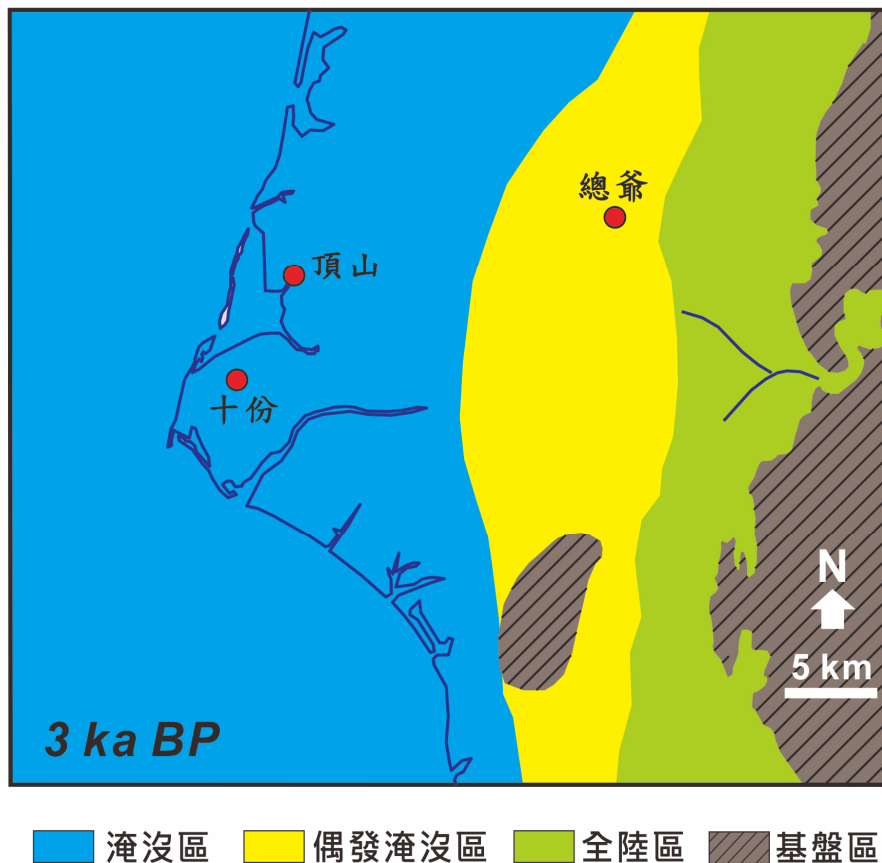


圖 2-3、3000 千年前曾文溪流域概況。

### 2.1.3 地下水採樣

本研究將採取經濟部水利署地下水監測井之分層地下水樣本。位於曾文溪流域附近水利署之地下水分層監測井包括：重溪、柳營、下

營、港尾、頂山、官田、總爺、大文、十份、三股、進學、善化、小新、南科、南興、安慶、台南、安平與新市等 19 站。配合水利署採樣做業，於本計畫執行期間可採集的樣本，且位於曾文溪流域核心區域者包括：頂山（2 層含水層）、進學（4 層含水層）、三股（2 層含水層）、十份（3 層含水層）、大文（2 層含水層）、與紀安（1 層含水層）等六站（圖 2-5），採取這六站之分層水樣共 14 個水樣。

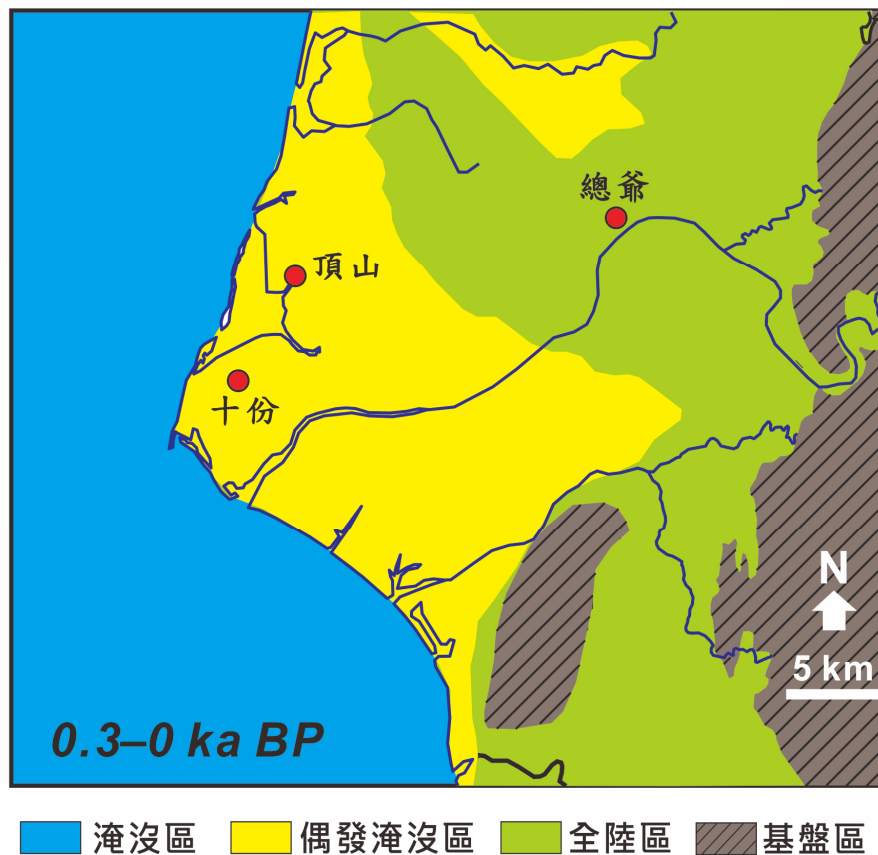


圖 2-4、300 年前至現在曾文溪流域概況。

#### 2.1.4 土壤採樣

本研究將採取經濟部中央地質調查所之地質鑽探井土壤樣本。位於曾文溪流域附近經濟部中央地質調查所之地質鑽探井包括：重溪、柳營、下營、港尾、頂山、官田、總爺、大文、十份、三股、進學、善化、小新、南科、南興、安慶、台南、安平與新市等 19 站。配合與本計畫執行期間可採取的地下水樣本，且位於曾文溪流域核心區域者



包括：十份、頂山與總爺（圖 2-6）。

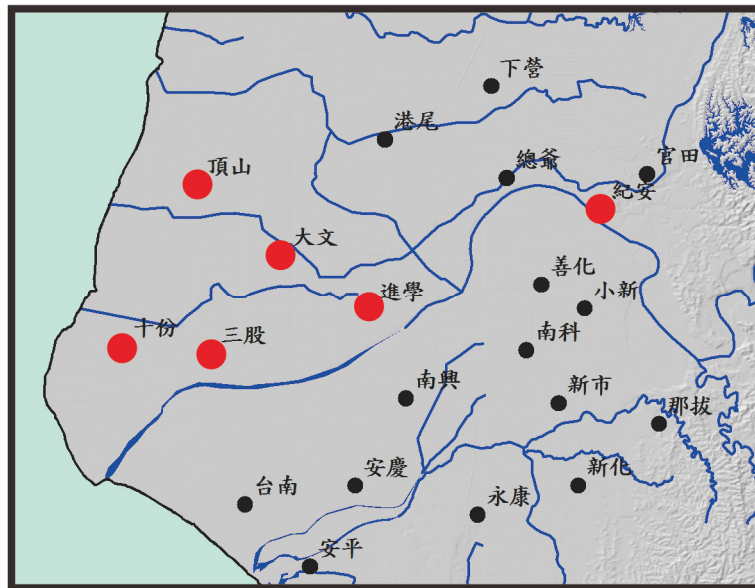


圖 2-5、地下水樣本採樣點（小圓黑點為鄰近站位、大圓紅點為採樣站位）。

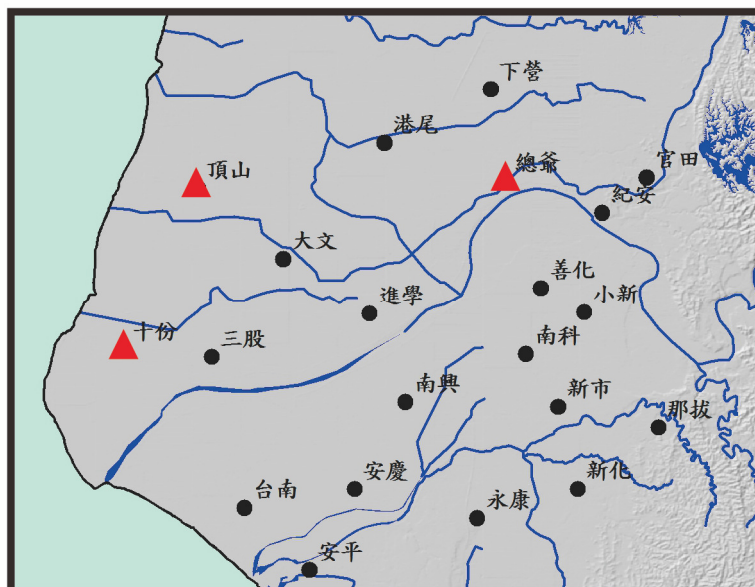


圖 2-6、含水層土壤樣本採樣井位（小圓點為鄰近井位、三角紅點為採樣井位）。

### 2.1.5 地下水樣本分析工作

地下水為綜合含水層內各種水化學反應的綜合結果。由於地下水於含水層中的滯留時間( *retention* )極長，尤其是就嘉南平原的含水層，水力傳導係數多數在約在  $10^{-6}$  m/s 以下，若假設地下水頭梯度與地形面近似約在 1/100 以下，就曾文溪中、下游長約 20 公里估算，地下水在含水層中的滯留時間在 6000 年以上，因此，地下水體的水質所代表的，並非侷限水樣採最位置之土壤與水體的水－岩反應，而是綜合整個流線水－岩反應的結果。因此，為能判釋地下水化學性質與水－岩反應之間的關係，地下水的採樣點應儘量落在同一條地下水流線上，透過水化學演化的概念，或可解析兩者間之關係。

如前所述，本研究附現場的基本水質外（包括溫度、酸鹼度、電導度、氧化還原電位），將分析地下水中各種主要陰、陽離子及四極柱感應耦合電漿質譜儀所能分析的所有元素，透過水化學與礦物岩石化學的交叉分析，希望能勾勒曾文溪流域水－岩反應與水化學特性間的關係。

## 2.2 完成工作項目

計畫執行實際工作內容包括下列項目：

1. 完成研究目標區域與實驗方法的資料蒐集工作。
2. 完成實驗方法可行性分析工作（包括空白樣本背景分析）。
3. 完成地下水與土壤之採樣工作。
4. 完成地下水水化學之分析工作，包括紀安、大文、頂山、三股、十份及進學等地下水分層水樣樣本。
5. 完成含水層土壤樣本的 **BCR** 萃取工作。
6. 完成土壤萃取液主要元素、次要元素、微量元素、稀土族元素之分析工作。
7. 完成實驗數據綜合判釋解析工作
8. 完成製作研討會海報。
9. 完成印製期末報告。



## 第三章 研究方法與過程

研究方法將依採樣與前處理、溶出試驗、儀器分析與資料分析等四個部分詳述如下：

### 3.1 採樣與前處理

如前所述，地球化學方法應用在水文地質的研究上，除了水－岩反應（water-rock interaction）的影響外，亦受吸附作用、表面錯合作用等機制的影響。因此，本研究分析標的鎖定在水體於地下水文系統內曾發生過的所有化學反應，主要包括地下水與土壤兩大類。

#### 3.1.1 地下水

本研究選擇水利署之地下水監測井進行採樣工作，這些監測井均有定期檢測其功能，所採水體較具代表性。水體採樣依中華民國環境保護署公告的「監測井地下水採樣方法」(NIEA W103.53B)(環境保護署，2005)進行採樣工作，在樣本採取之前，先用抽水機抽取至少兩倍井管的地下水，讓含水層內的地層水能進入井管內，避免所取水樣不具代表性。水樣採取時，利用水質檢測儀器監測溫度、電導度及酸鹼度，待能連續獲得五次相同數據時始進行採樣工作。利用兩個 PE 容器採取兩瓶水樣，其中一瓶用於現場水質檢測，本研究使用 Horiba 的酸鹼度計、氧化還原電位計和電導度計進行量測水樣的溫度、電導度、酸鹼度及氧化還原電位。上述之儀器與電極在使用前皆需先進行校準工作（calibration），尤其是酸鹼度計，每隔一段時間需要更換玻璃電極棒內的電解液，以確保電極不被氧化並維持儀器資料準確性。

另一瓶水樣則在現場利用 MilliQ 0.45 $\mu$ m 水溶液型過濾頭進行過濾，過濾後的水樣用兩瓶在實驗室內酸洗過的 PE 瓶盛裝，其中一瓶供離子層析儀分析陰離子，另一瓶則以 1/50 (v/v)的比例加入 Merck 60% Ultrapure 超純硝酸進行酸化，以供感應耦合電漿質譜儀分析陽離子之

用。為避免未加酸的樣本產生沉澱、吸附作用，未加酸的樣本會在當日送回實驗室立即進行陰離子的量測工作。酸化之樣本送回實驗室後置於 4°C 的冷藏櫃中存放，並在 2 週內完成陽離子分析工作。

### 3.1.2 土壤

將利用經濟部中央地質調查所在「台灣地區地下水觀測網計畫」中所鑽取的岩芯來進行採樣工作，預計以兩種方式進行採樣工作：(1)規則性中密度採樣，約每 4 公尺採取一個樣本，即至少一個 4 公尺的岩心箱採取一個樣本；(2)利用專業的判釋，遇岩性或粒度變化的層位即採取一個樣本。預計採樣點為官田、總爺、港尾、頂山、三股、十份等六站，每站岩心約 300 公尺，採取樣本的厚度約 5 公分、土壤樣本量 30-50 公克，採樣前需先將岩芯表層刮除，以除去可能的污染源

所得之樣本即攜回實驗室中，先利用烘箱於 105°C 的溫度下烘烤 8 小時，以去除水份。接著使用磨粉機讓土壤樣本能充分混合，以避免不均質所產生的誤差。量取 1g 的樣本進行多階段連續萃取程序。

### 3.2 溶出試驗

本計畫將採用標準的 BCR 多階段連續萃取程序進行金屬元素的淋溶，程序如下：

1. 利用微量天秤量取 1.0 g 的樣本置於酸洗過的 50ml 離心管。
2. 備製 0.11 mol/L 的醋酸。取 40ml 加入樣本離心管中，在室溫下，將離心管固定在震盪器上，使樣本與溶劑充分混合。萃取時間為 16 小時。
3. 使用可變角度式離心機將樣本與溶劑充分分離。將溶劑小心倒出，再用 0.45  $\mu\text{m}$  過濾頭過濾後置於離心管中儲存。此部分為吸附及離子交換（含碳酸鹽）相。
4. 於樣本離心管加入 40ml 去離子水，利用震盪器使樣本與溶劑能充分混合。使用離心機將樣本與去離子水充分分離，將去離子小心倒出、丟棄。

5. 備製 0.5 mol/L 鹽酸羥胺，並用 Merck 60% Ultrapure 超純硝酸將溶劑酸鹼值調整至 2。取 40ml 加入樣本離心管中，在室溫下，將離心管固定於震盪器上，使樣本與溶劑充分混合。萃取時間為 16 小時。
6. 使用可變角度式離心機將樣本與溶劑充分分離。將溶劑小心倒出，再用 0.45  $\mu\text{m}$  過濾頭過濾後置於離心管中儲存。此部分為鐵、錳氧化相。
7. 於樣本離心管加入 40ml 去離子水，利用震盪器使樣本與溶劑能充分混合。使用離心機將樣本與去離子水充分分離，將去離子小心倒出、丟棄。
8. 於樣本離心管加入 10ml Merck 8.8 mol/L Suprapure 超純雙氧水，在室溫下反應 1 小時，再置入 85°C 的水浴槽中 1 小時；打開試管蓋，在 85°C 的水浴槽中蒸乾雙氧水，直到剩餘量小於 3ml。
9. 於樣本離心管再加入一次 10ml Merck 8.8 mol/L Suprapure 超純雙氧水，置入 85°C 的水浴槽中 1 小時；打開試管蓋，在 85°C 的水浴槽中蒸乾雙氧水，直到剩餘量小於 1ml。
10. 最後，於樣本離心管加入 50ml 1mol/L 的乙酸銨，在室溫下萃取 16 hrs。
11. 使用可變角度式離心機將樣本與溶劑充分分離。將溶劑小心倒出，再用 0.45  $\mu\text{m}$  過濾頭過濾後置於離心管中儲存。此部分溶液為有機物相。

另外，本研究的研究區域在曾文溪流域，本區在過去數萬年間長久處於沿海瀉湖的環境，稱為台江內海，一直到數百年前才成為純陸相環境。據此，此區域之土壤與地下水仍含大量鹽類，然而，BCR 萃取程序無法分辨吸附／可交換相與碳酸鹽相，因此本研究於 BCR 程序進行之前，先以去離子水浸泡樣本 3 週，希望至少能將吸附相分離出來（Fujikawa et al., 2000）。

### 3.3 儀器分析

如前所述，本研究的地球化學分析工作包括：主要成分（major component）、次要成分（minor component）、微量成分（trace component，包括稀土元素等），茲分別敘述如下：

#### 3.3.1 ICP-MS 主要陽離子及次要陽離子分析

本研究將利用 ICP-MS 進行水樣主要、次要陽離子之分析工作，主要陽離子包括 Ca、K、Na、Mg、Fe、Si、Zn 等，次要陽離子包括 Cu、Ti、Co、Ni、Mn、Cd、Pb 等，分析儀器為 Agilent 7500cx，配合 Micromist 霧化器。一般而言，多數陽離子之偵測極限可至 ppt 等級。本研究所使用的 Agilent 7500cx 配備氦氣八極柱反應室（He gas ORS），可大幅降低多原子的干擾訊號，一般需要利用冷電漿來分析的 Na、K 元素，均可利用 He ORS 來分析。另外，天然水體中的主要陽離子含量均在數十至數百 ppm 左右，這類的濃度易對質譜儀偵測器造成損害，為避免此一狀況，本研究將採兩種方式進行主要陽離子的分析工作：

- a. 樣本稀釋前處理：理論上應利用微量滴管配合定量瓶操作以體積為基礎的稀釋，但定量瓶的稀釋工作非常耗時、費力，本研究將改以重量為基礎的稀釋法來進行，這樣的稀釋步驟是因水樣的密度均在 1.01 以下，所得誤差應在 1% 以下。先將 PP 瓶滅菌、酸洗，置於小數點 4 位的微量天秤上並歸零；吸取少量的水樣置入 PP 瓶後記錄水樣重量；加入 1% HNO<sub>3</sub> 去離子水至規劃稀釋倍率附近後記錄水樣重量；由兩個重量比例即可求得稀釋倍率。
- b. 使用 High Matrix Interface（HMI）：Agilent 針對高基質樣本的分析困難，發展了一套內建在 Interface Chamber 的稀釋設備，這套設備可在樣本離子化後加入大量氦氣來進行自動化的稀釋工作，透過此配備可直接分析海水樣本。在本研究中將應用此配備來進行主要陽離子的分析，並將其結果與前述方法對照，以達驗證的目的。

在開始分析樣品前和最後樣品分析完畢後，須使用調機溶液進行調機作業、使用查核溶液進行檢量線查核。分析時，每分析 10 個樣品再以檢量線查核溶液和檢量線空白溶液進行檢量線查核。檢量線查核分析之相對誤差值應在 10 % 以內，當發現檢量線查核結果不符時，受影響樣品應利用重新製作之檢量線再次進行分析。每個元素之檢量線空白值必須小於方法偵測極限（Method Detection Limit；MDL）的 2 倍。每 10 個樣品執行一個查核樣品分析，回收率設定在 90-110% 範圍內。每 10 個樣品至少執行一個重複樣品分析，相對差異百分比設定在 10 % 以內。每 10 個樣品執行一個添加標準品分析，回收率應在 90-110 % 範圍內。

### 3.3.2 ICP-MS 微量陽離子分析

本研究將依美國環境保護署（EPA）針對水樣分析工作所訂定的 EPA 200.8 標準方法及環保署水中金屬及微量元素檢測方法－感應耦合電漿質譜法（W313.52B）來進行，市面上已有許多針對該標準方法所準備的標準品，不需另行配置，可大幅節省實驗時間。分析項目與所使用的同位素如表 5。由於這些微量元素在天然水體中含量極低，若開啟 He ORS 會造成訊號過低、訊號不穩定的狀況，因此在分析微量陽離子時均將 He ORS 關閉。本研究進行的微量陽離子分析將以 1 ppt 為目標，在此濃度以下者，均列為 nd.。關於分析品質管制工作如前節所述，在此不再贅述。

### 3.3.3 離子層析儀（IC）分析水中陰離子

本研究將利用 IC 進行水樣主要、次要陰離子的分析工作，分析儀器為 Dionex ICS-90，一般而言，IC 可量測的陰離子包括鹵鹽（氟、氯、溴等，在特殊的設定下亦可量測碘）、硝酸鹽、磷酸鹽及硫酸鹽等，其偵測極限約為 0.5 ppm 左右。本研究將依環境保護署 94 年 8 月 15 日公告之「水中陰離子檢測方法－離子層析法」（NIEA W415.52B）分析  $\text{F}^-$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{ClO}_2^-$ 、 $\text{ClO}_3^-$  及  $\text{BrO}_3^-$ 。



等各項陰離子（環境保護署，2005）。由於鹵鹽、硝酸鹽中的各種價態會因各種水質條件而改變，因此其分析結果僅供參考，本研究中會將之轉化為特定價態並取其總合作為代表濃度。

分析時，每十個樣品執行一個空白樣品分析；每十個樣品至少應執行一個查核樣品分析，回收率設定在 90-110 %之間；每十個樣品執行一個重複樣品分析，相對差異百分比設定在小於 15 %；每十個樣品執行一個添加樣品分析，回收率設定在 90-110 %之間。

#### 3.3.4 ICP-MS 稀土族元素分析

稀土元素族的分析需經過濃縮的過程（Johannesson et al., 1997; Johannesson et al., 1999）。取用交換樹脂置入酸洗過的 PolyPrep 管柱，開始用 1ml/min 的流速讓水樣通過管柱，將通過水樣的管柱置於架上，先用 40 ml 的 1.5M 硝酸洗去被吸附的鹽類，再利用 8M 的硝酸將稀土元素沖提出管柱，並用鐵弗龍容器盛接，將之靜置到全乾為止，最後放入 5 ml 的 >1% 硝酸，所得的溶液即為濃縮稀土元素 100 倍的樣本。此樣本後續將依美國環境保護署訂定的標準方法 EPA 200.8 進行，市面上已有許多針對該標準方法所準備的標準品，不需另行配置，可大幅節省實驗時間。然而，多階段連續萃取程序所得的水樣均在 50ml 以下，依此程序，僅能濃縮約 10 倍，若稀土族元素含量低於 0.1 ppt，則仍無法被檢出。

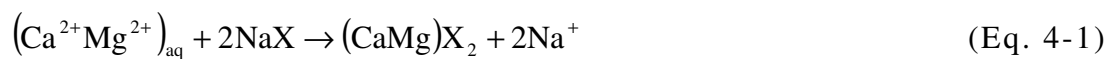
## 第四章 執行成果

### 4.1 地下水採樣與分析結果

#### 4.1.1 地下水一般水質

地下水樣分析結果如附表 1。大致而言，所有的地下水樣本都未能檢出磷酸鹽（Phosphate），而硝酸鹽（Nitrate）含量均低於 1ppm，唯獨進學 2，具有接近 10ppm 的硝酸鹽含量；然而，進學 2 是重金屬含量最低的地下水樣本，因此推論進學 2 可能受到較強的氧化反應，致使易形成氧化物的重金屬元素離開水體，而水中的氨氮也同時氧化為硝態氮。綜合以上，曾文溪流域的地下水體受地表污染的程度輕微。

為觀察地下水質的大致趨勢，可繪製 Piper 水質菱狀圖（如圖 4-1）。如水質菱狀圖顯示，深層地下水樣本落在菱狀圖最下方，呈現標準的淡水沖提海相沉積物的型態，其可能的化學反應為以鈣、鎂為主的淡水與含高濃度鈉離子的沉積物之間的離子交換：



式中， $(\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+})_{\text{aq}}$  代表以鈣、鎂為主的淡水；X 代表富含黏土礦物的沉積物；可吸附各種陽離子；NaX 代表原始吸附大量鈉離子的海相沉積物；整個離子交換反應造成鈉離子被水中的鈣、鎂離子取代形成  $(\text{CaMg})\text{X}_2$ ，並釋放  $\text{Na}^+$  進入水中，造成富含鈉、但不含氯、以碳酸鹽為主的地下水水質。由於深層地下水可能有較厚的泥層阻隔上覆瀉湖的海水入滲，因此，曾文溪流域深層地下水（200 公尺以上深度的含水層）具有較小的電導度值（附表 1）。

反之，較淺層含水層的地下水由於 1 萬 5 千年左右的瀉湖覆蓋、海水入滲，使其接近海水的水化學特性，尤其是最上層的非受壓含水層，具有極高的電導度值，甚至部分地下水的氯含量遠超過海水（19000 ppm），最高可達 22500 ppm。對比現在地表的土地利用，這些區域並

未有主要的鹽田；因此，這些高鹽度的鹵水，可能是處於高蒸發狀態的瀉湖入滲含水層所造成。

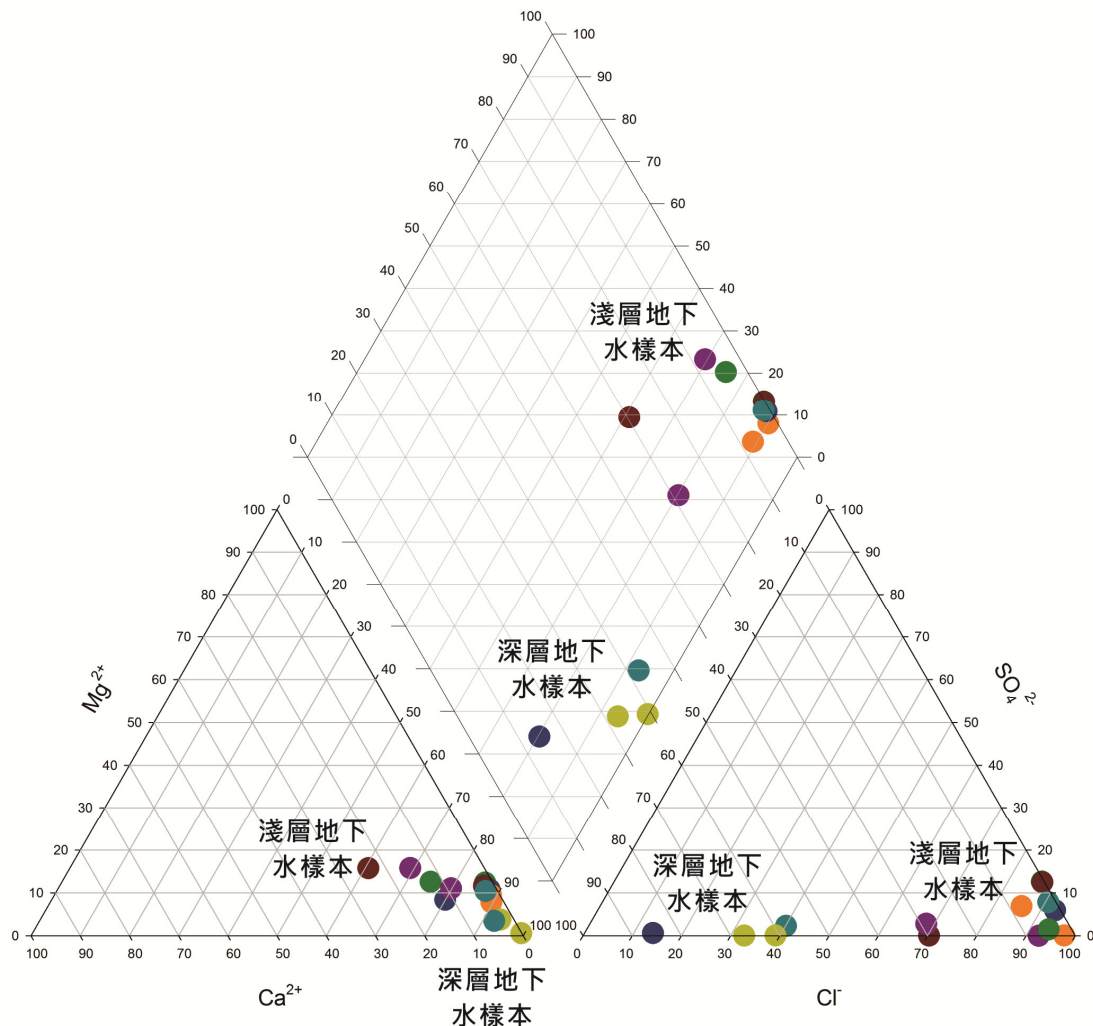


圖 4-1 曾文溪流域地下水水質菱狀圖。

另外，透過叢集分析方法（Cluster Analysis）也可約略了解地下水質的特性，結果如圖 4-2。在圖中右側的叢集，除了十份 3 為深度 278 公尺的深井以外，其它地下水樣均採自淺於 150 公尺的深度，屬於淺層含水層；而左側的叢集除了大文 2 屬於淺層含水層外，其餘地下水樣均採自深層含水層。此一結果大致顯示地下水水質的確受控於含水層深度，而此一深度為 18,000 年前末次冰期與現代沉積物的界限，這個現象與印度、孟加拉觀察到的結果一致。

選擇十份－三股－進學－小新的含水層對比剖面做為代表，可大致觀察曾文溪流域含水層與地下水質分層概況（圖 4-3），圖中末次冰期的深度係由中央地質調查所碳 14 定年的結果獲得。再者，由 Na、As、Sr 的分布，可大致確定淺層地下水具有海水來源，而深層地下水具有較高的重金屬含量。

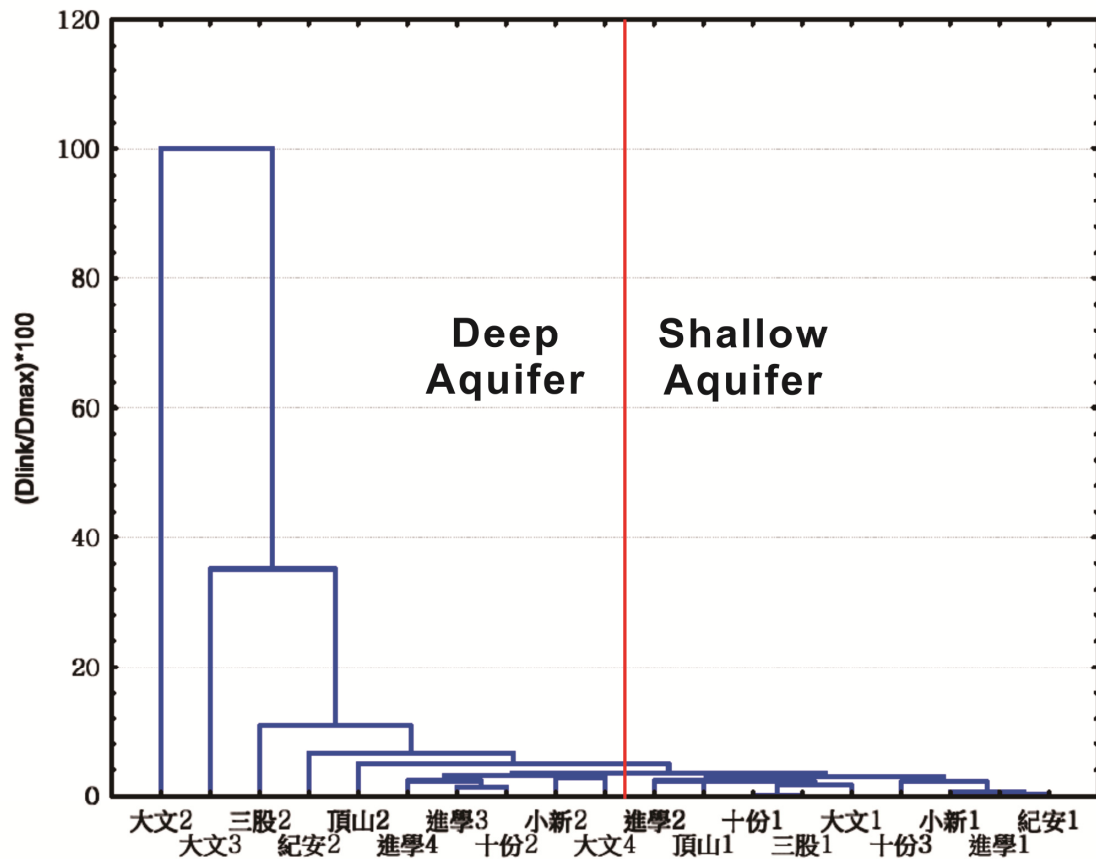


圖 4-2、地下水質叢集分析結果。

#### 4.1.2 地下水分層水質

由水質菱狀圖的初步觀察，深層與淺層地下水水質存在著極大的差異，因此分別就兩種水體進行比較，比較結果如表 4-1。大致而言，淺、深層地下水的基本水質，包括 pH、水溫、氧化還原電位（ORP）、溶氧量（DO）等，並無太大的差異；水體為中性偏鹼的酸鹼度，氧化還原電位顯示高還原性的-250mV，就此結果而言，至少對現在的水體，深、淺層地下水應該具有類似的酸鹼反應與氧化還原反應，含水層的

化學性質可能是控制地下水質的主因。然而，地下水通常具有較長滯留時間，現在的地下水質亦是長時間化學反應後累加的結果，因此由基本水質所觀察到的現象，尚有討論的空間。

表 4-1、地下水分層水質比較表。

水質項目	T (°C)	pH	EC (μS/cm)	ORP (mV)	DO (mg/L)	Alkalinity (ppm)	F (ppm)
淺層	27.81	7.18	4841.67	-263.86	0.56	286.36	0.45
深層	28.52	7.26	3643.67	-221.56	0.94	384.98	0.22
深/淺	-	-	-	-	-	1.34	0.49
水質項目	Cl (ppm)	Br (ppm)	NO <sub>3</sub> (ppm)	PO <sub>4</sub> (ppm)	SO <sub>4</sub> (ppm)	Na (ppm)	Mg (ppm)
淺層	16749.23	12.61	1.74	0.00	2364.44	13418.33	867.52
深層	902.35	0.45	0.16	0.00	62.30	1079.01	64.24
深/淺	0.05	0.04	0.09	-	0.03	0.08	0.07
水質項目	K (ppm)	Ca (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Sr (ppm)	Li (ppm)	Be (ppt)
淺層	303.43	277.82	0.67	0.22	7.25	4486.67	0.68
深層	22.68	57.57	0.06	0.84	0.65	6220.00	4.54
深/淺	0.07	0.21	0.09	3.92	0.09	1.39	6.70
水質項目	V (ppt)	Cr (ppt)	Co (ppt)	Ni (ppt)	Cu (ppt)	Zn (ppt)	As (ppt)
淺層	2613.17	34.90	240.82	1821.71	159679.56	1856.64	34031.22
深層	2949.34	211.26	381.60	2248.66	8515.33	44009.89	467344.44
深/淺	1.13	6.05	1.58	1.23	0.05	23.70	13.73
水質項目	Rb (ppt)	Cd (ppt)	Ba (ppt)	Th (ppt)	Pb (ppt)	U (ppt)	-
淺層	18361.10	1.18	1220441.11	0.22	162.11	10.59	-
深層	4717.33	1.30	158347.78	67.32	104.77	3.55	-
深/淺	0.26	1.10	0.13	307.56	0.65	0.34	-

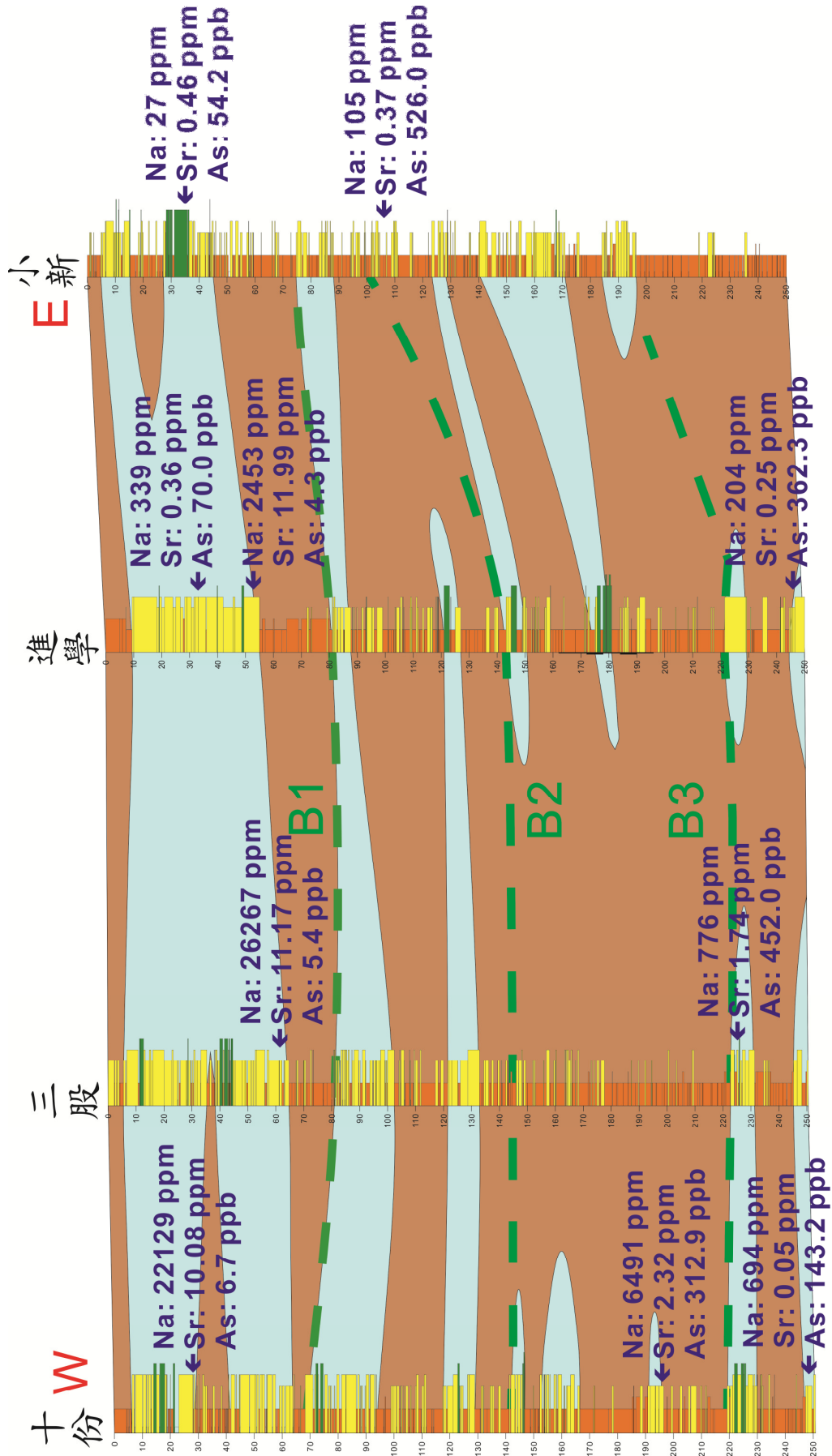


圖4-3、曾文溪流域地下水文與水質概圖。

## 淺層地下水

淺層地下水代表末次冰期以來所沉積的含水層，在曾文溪流域下游為深度 150 公尺以上之含水層，在上游則為深度 100 公尺以上的含水層。淺層含水層因在海水淹沒期間沉積（圖 2-2、圖 2-3），因高蒸發率之故，孔隙水的含鹽量極高；再者，因海相地層的組成以泥為主，是故此含水層之水力傳導係數偏低，因此淡水的補注不足以沖提鹽度高的孔隙水，是故如表中顯示，淺層含水層之鹼金屬與鹼土金屬族元素（Na、K、Ca、Mg、Sr），含量都很高，平均 Na 含量高達 13000ppm，超過現生海水的濃度（10500ppm），這些陽離子深／淺地下水比值約在 0.07 左右，而 Ca 則有較高的比值（0.21），可能與離子交換或碳酸鹽礦物有關；與海水相關的陰離子，如 F、Cl、Br、SO<sub>4</sub> 等，深／淺地下水比值均在 0.05 左右（除了 F 以外），比鹼金屬與鹼土金屬族元素略低，應是陰離子無離子交換的機制所致。

## 深層地下水

表 4-1 顯示曾文溪流域重金屬元素於深層含水層中富集，Fe 在深／淺含水層中的比值為 3.92、Cr 有 6.05、As 為 13.7，而 Zn 可達 23.7，其餘多數的重金屬元素，如 V、Co、Ni、Cd 等的比值略大於 1.0；Pb、U、Mn、Cu 四者，則有小於 1.0 的分布，尤其是 Mn 與 Cu，其比值低至 0.1 以下。一般而言，Cu 在海水中的濃度在 0.030-0.4 ppb 的範圍內，但曾文溪流域淺層含水層的 Cu 含量高達 160ppb，顯然並非如鹼金屬與鹼土金屬元素受控於海水源孔隙水，而是另有原因，但原因為何仍待查明；深層地下水則有天然水體一般性的 Cu 含量（8.5 ppb）。除了 Cu 以外，Mn 亦有在淺層含水層富集的現象，深／淺地下水 Mn 比值僅有 0.09，此與化學相近、來源類似的 Fe，有完全不同的分布，造成此現象的原因可能有二：

- （1）含水層 Fe 與 Mn 的分布所致。若淺層含水層含相對較高的 Mn 及相對較低的 Fe 含量，則可能造成淺層地下水 Mn 高、Fe 低的現象。

但由後續含水層樣本的分析結果可被排除此原因的可能性。

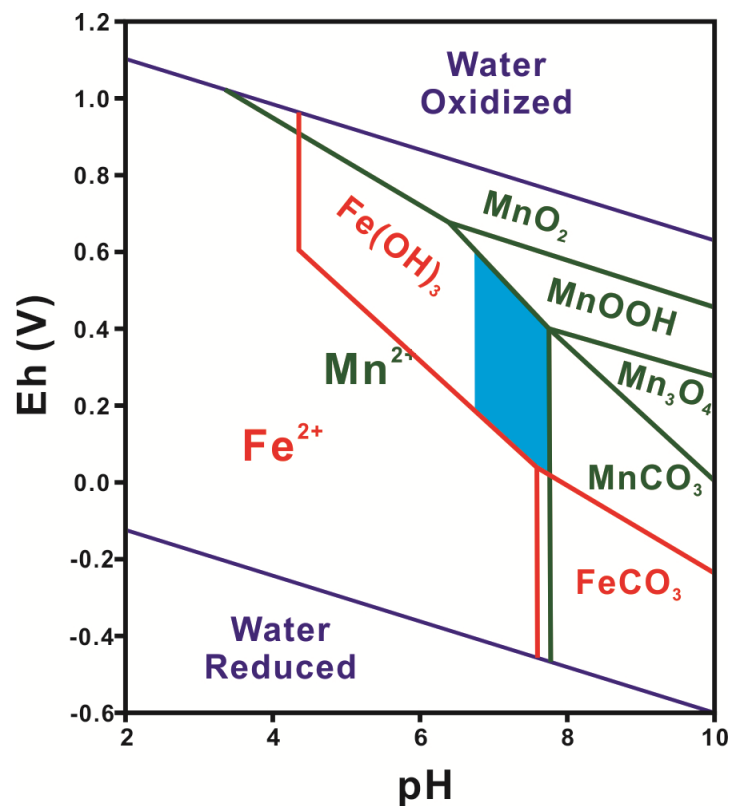


圖 4-4、Fe 與 Mn 在  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  系統中的相圖。圖中紅線為 Fe 的相圖、綠線為 Mn 的相圖、淺藍色區域代表造成 Fe 低 ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )、Mn 高 ( $\text{Mn}^{2+}$ ) 的可能穩定區域。

(2) 淺層含水層的酸鹼、氧化還原條件使 Mn 有較高的溶解度但 Fe 有較低的溶解度。假設地下水為偏鹼性的酸鹼值，比較 Fe 與 Mn 在碳酸鹽系統中的相圖（圖 4-4），在略微氧化的化學環境下（如圖 4-4 中淺藍色的區域），Mn 仍然維持在還原二價 Mn 的相態，在此狀態下，Mn 具有較高的溶解度；相反地，在相同的化學環境下，Fe 則已進入氧化三價 Fe 的相態，而  $\text{Fe}^{3+}$  具有非常低的溶解度。大致而言，Mn 高、Fe 低的現象，與地表水的情況相仿，但地表水的 Fe、Mn 含量遠低於地下水的濃度。雖然本研究在淺層含水層中量測到的平均氧化還原電位為  $-263\text{mV}$ （甚至低於深層  $-221\text{mV}$  的平均氧化還原電位），但由 Mn 高、Fe 低的現象，可推



論淺層地下水體應曾受過氧化反應的作用。這個推論，在後續稀土元素的研究中，亦可獲得印證。

#### 4.1.3 As 的空間分布

大致而言，曾文溪流域地下水 As 含量分為三個範圍：

- (1) 低濃度：含量在 1-10 ppb 的範圍內，大致分布在曾文溪下游區域的淺層含水層內。
- (2) 中濃度：含量在 10-100 ppb 的範圍內，但多數為>50 ppb，大致分布在曾文溪中、上游區域的淺層含水層內。
- (3) 高濃度：含量在 300-1000 ppb 的範圍內，此濃度的地下水體分布在整個曾文溪流域的深層含水層內。

### 4.2 含水層土壤分析結果

#### 4.2.1 溶出試驗綜合分析結果

如前所述，本研究由位於曾文溪流域下游的十份、頂山與上游的總爺採取土壤樣本進行 BCR 溶出試驗，附表 2、附表 3、附表 4 與附表 5 分別為去離子水溶出相、可交換相（含碳酸鹽相）、鐵錳氧化物相與有機物相之萃取結果。表 4-2 為所有樣本在四種萃取方法的平均含量。

#### 去離子水溶出相

利用去離子水在室溫下浸泡含水層土壤樣本兩週，可綜合評估浸泡天然水體時可能的溶出物質，依學理推做，去離子水溶出相可能包括易被離子交換的元素及部分易溶的碳酸鹽類礦物。主要元素（包括 Ca、Mg、Na、K 等元素）與富集於海水中的元素（如 Sr、Li、Ba 等）均具有較大的離子半徑，相較於重金屬元素而言，應較易在此萃取步驟中被溶出，觀察表 4-2 中這些元素的萃取結果，多數有 ppm 的含量。重金屬元素則因有較小的離子半徑，較不易透過離子交換被置換出來，這些元素的萃取結果大致在百 ppb 的範圍。

表 4-2、四種萃取方法的平均含量比較表。

元素	單位	去離子水溶出相	可交換相	鐵錳氧化物相	有機物相
Na	ppm	1016.47	962.56	21.24	511.31
Mg	ppm	101.19	507.81	372.34	348.70
K	ppm	88.57	152.26	64.60	62.72
Ca	ppm	430.13	5383.15	1767.65	753.39
Mn	ppm	4.14	137.92	66.15	39.77
Fe	ppm	20.35	90.74	3588.74	1598.08
Sr	ppm	3.84	18.59	4.92	4.53
Li	ppb	417.97	190.42	1010.26	1037.56
Be	ppb	16.24	51.07	139.78	47.04
V	ppb	237.56	29.49	3245.25	520.38
Co	ppb	223.78	465.96	2069.81	608.30
Ni	ppb	392.98	579.33	2624.59	1607.93
Cu	ppb	178.83	455.21	2947.73	2257.06
Zn	ppb	46.95	1057.38	10415.18	1844.70
As	ppb	141.35	80.83	774.50	119.97
Ba	ppb	341.09	2557.00	8357.93	7228.73
Pb	ppb	24.70	1814.07	8956.45	2245.14
U	ppb	1.80	26.62	64.35	48.60
Th	ppb	8.63	0.01	176.12	711.89

### BCR 可交換相

在 BCR 的可交換相中，除可交換相外，尚包含碳酸鹽類礦物，因此除了大離子半徑的 Na、Mg、K、Ca、Sr 具有 ppm 的溶出量外，易形成碳酸鹽礦物的 Ba、Zn、Pb 亦有 ppm 的含量；其餘重金屬元素大約在百 ppb 的數量級。再者，Fe 與 Mn 在此相中亦有百 ppm 的數量級，顯見此二元素有相當程度以碳酸鹽礦物的形態存在土壤中，尤其是 Mn，在可交換相中高達 138ppm，應是造成地下水中高 Mn 含量的主要原因。

### BCR 鐵錳氧化物相

由 BCR 鐵錳氧化物相中萃取結果顯示（表 4-2），此項的主要萃取

元素為 Fe 與其他重金屬元素（包括 V、Co、Ni、Cu、Zn、Pb 等元素），這些元素都有 ppm 等級的含量被萃取出來，尤其是 Zn，更高達 10ppm，為含量最高的溶出元素。另外，As 雖無 ppm 的數量級，但亦有 775ppb 的含量。主要元素部分雖仍有 ppm 的含量，但相較 BCR 可交換相已大幅降低。

### BCR 有機物相

BCR 程序以過氧化氫將土壤中的有機物破壞，再透過乙酸銨將金屬元素溶出，溶出之金屬元素濃度如表 4-2。在此相中，大離子半徑的鹼金屬、鹼土金屬族元素仍有百 ppm 的濃度，重金屬元素則多數有 ppm 的含量，V、Co、As 僅有百 ppb 的濃度。另外值得注意的是，Th 在有機物相中有高達 710ppb 的含量。

#### 4.2.2 去離子溶出相與 BCR 可交換相比較

比較金屬元素在去離子水溶出相與 BCR 可交換相萃取結果的相對濃度（表 4-3），可大致分為三類：

表 4-3、BCR 可交換相與去離子溶出相之濃度比值。

元素	Na	Mg	K	Ca	Mn	Fe	Sr
BCR/Deionized	0.947	5.018	1.719	12.515	33.294	4.460	4.843
元素	Li	Be	V	Co	Ni	Cu	Zn
BCR/Deionized	0.456	3.144	0.124	2.082	1.474	2.546	22.522
元素	As	Ba	Pb	U	Th	-	-
BCR/Deionized	0.572	7.497	73.430	14.793	0.001	-	-

### 在可交換相中富集的元素

包括 Mg、Ca、Mn、Fe、Sr、Co、Cu、Zn、Ba、Pb、U 等，由於 BCR 程序可溶出更多的碳酸鹽礦物，因此推測這些元素有碳酸鹽的來源。其中比例較高的有 Mn、Zn、Pb、U，其比值均在 10 倍以上。

### 在兩個相態中約略相等的元素

Na、K、Cr 與 Ni 等四種元素在兩種萃取法中約略相等，代表這些元素主要以吸附的形態存在，而 Na、K 兩個大離子半徑的元素均屬此類可證實此推論。

### 在去離子水溶出相中富集的元素

As、V 與 Th 三者呈現去離子水溶出相對富集的情況。BCR 可交換相係利用稀醋酸進行淋溶，在低酸鹼值的化學環境下，應有助於金屬元素的脫附作用與碳酸鹽礦物的溶解；而去離子水的酸鹼值接近 7.0，浸泡期間因碳酸鹽礦物的溶解，推測會使去離子水的酸鹼值逐漸升高，因此將不利於金屬元素的脫附作用，亦不易與碳酸鹽礦物反應；在此情況下，理應在去離子溶出相中得到較高的濃度，然而 As、V 與 Th 卻有相反的行為。其中 Th 因在 BCR 可交換相中含量極低（0.01ppb），可能是醋酸的背景訊號太強，致使 BCR 可交換相的樣本未能檢出 Th 的存在，進而造成 Th 在去離子水溶出相中富集的假象；然而，As 與 V 在兩種萃取方法中均有足夠的濃度（見表 4-2），可排除實驗誤差的可能性。兩種淋溶方法的化學條件最大的差異在酸鹼值，去離子水溶出實驗為弱鹼性、BCR 可交換相為弱酸性，因此推論在去離子水溶出相中富集的元素可能是易溶於鹼性溶液的腐植物質所造成，但以現有的資料，無法確認此推論的正確性，但至少可確認碳酸鹽對 As 與 V 的貢獻不大。

#### 4.2.3 BCR 各相態間的比較

依據表 4-2 的結果，可繪製各元素在 BCR 三個相態中的平均比例圖，如圖 4-5。以下就在三個相裡的相對含量進行討論：

### 在可交換相中富集的元素

圖中顯示 Na、Mg、K、Ca、Sr 與 Mn 在可交換相中含量較高。

Na、Mg、K 與 Ca 在可交換相中富集並不令人意外，Sr 與 Mn 應是碳酸鹽類礦物提供了重要的來源；由圖 4-6 可觀察到 Mn 在碳酸系統中，無論是氧化或還原環境，只要酸鹼值在 8 左右，即可以  $\text{MnCO}_3$  穩定存在，然而，Fe 則必須在還原環境下 ( $E_h < 0 \text{ V}$ ) 才以溶解度較高的  $\text{FeCO}_3$  狀態存在，否則將以溶解度極低的  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  或  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的相態存在（圖 4-4）。因此，在可交換相中高比例的 Mn 可能代表含水層曾經經歷 pH 值大於 8 且略微氧化的環境，此推論與地下水的呈現的結果吻合。另外，Sr 亦是容易形成碳酸鹽礦物的元素，除了可能形成純粹由 Sr 所組成的菱錒礦（Strontianite）外，Sr 亦可廣泛地取代方解石（Calcite）中的 Ca，因此在 BCR 可交換相中富集不令人意外。

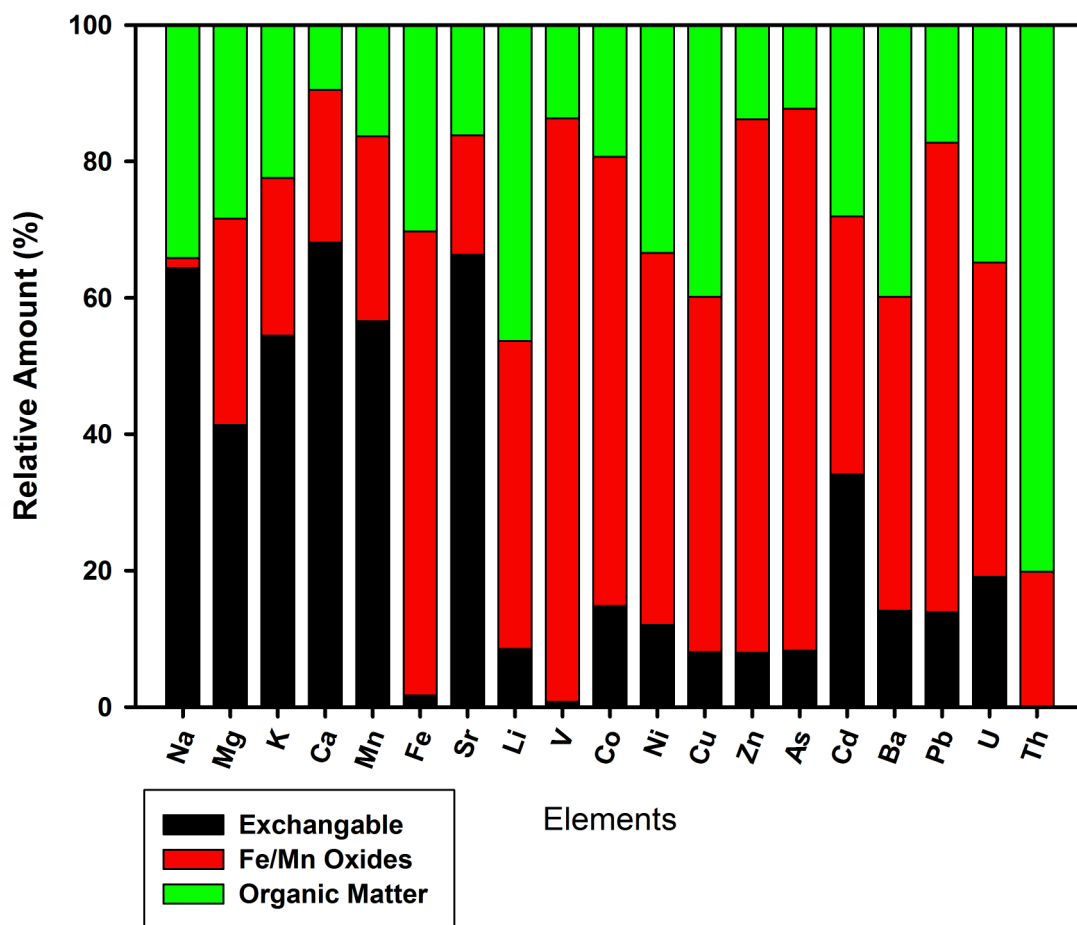


圖 4-5、各元素在 BCR 三個相態中的平均比例圖。

### 在鐵錳氧化物相中富集的元素

Ba、Fe 與其他重金屬元素（包含 V、Co、Ni、Cu、Zn、As、Pb、U 等）主要以鐵錳氧化物形態存在（圖 4-5），其中比例最高者為 V，高達 85%，其次為 As 與 Zn，各有 79% 與 78% 的比例，其他重金屬元素比例多在 60% 左右，最低者為 U，比例為 46%。就絕對濃度而言，V、Co、Ni、Cu 大約在 2-3ppm 左右、Pb 有 9ppm、As 僅有 774ppb、Zn 可達 10ppm，最高的 Fe 有 3588ppm，的確可能是造成地下水 As 與重金屬元素偏高的主要原因，此結果亦與過去的研究吻合。

但若考慮元素間的相對量，重金屬元素在鐵錳氧化相中的相對濃度與地下水有著極大的差別。地下水中重金屬元素的平均含量以 As 最高（表 4-1），可達 467ppb，但次高的 Zn 平均僅及 44ppb，其餘重金屬平均含量均在 10ppb 以下，顯與鐵錳氧化物的分布不符。因此，若鐵錳礦物是提供重金屬元素的主要來源，應還有其他重要的化學反應控制最終地下水重金屬含量，才能造成兩者分布不吻合的現象。

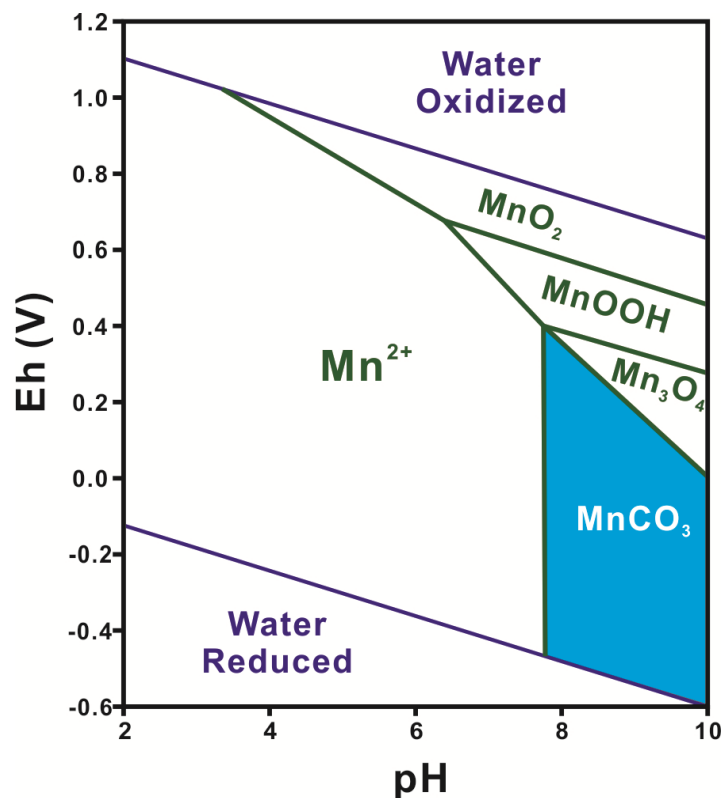


圖 4-6、Mn 在碳酸鹽系統中的相圖。

### 在有機物相中富集的元素

在有機物相中富集的元素僅有 Th 與 Li，但 Li 在鐵錳氧化物中也有約略相等的含量。然而就絕對濃度而言，Th 的含量僅 711ppb（表 4-2），重要性不高，但其他重金屬元素雖在有機物相中含量低於鐵錳氧化物相，但絕對濃度仍有造成地下水重金屬污染的潛能。重金屬元素中，除 Fe 有 1598ppm 以外，濃度超過 1ppm 者包括：Pb、Cu、Zn 與 Ni，其中 Pb 高達 2.2ppm，Ni 亦有 1.6ppm 的濃度；其他重金屬僅有百 ppb 等級的濃度，As 則為 120ppb。因此，As 與其他重金屬的相對含量也如鐵錳氧化物相一樣，都是相對較低的比例，亦與地下水的重金屬濃度分布不同。

### 4.3 含水層分層分析結果

依據地下水質分析結果之判釋，地下水中 As 與重金屬的含量確有分層上的差異，因此亦將土壤萃取分析結果依淺、深層含水層的方式分別統計、平均、比較，結果如表 4-4。

#### 4.3.1 BCR 可交換相比較

大致而言，Na、Mg、K、Ca 均依循地下水質的趨勢，在淺層含水層具有較高的濃度，而且可交換相是這些元素最富集的相態，因此推論 Na、Mg、K、Ca 的主要來源，除孔隙水的影響外，含水層土壤中的可交換相亦非常重要；Ba 在深層含水層中含量較高；對多數重金屬元素而言（包括 Co、Ni、Cu、Zn、U、Th），淺、深層含水層在可交換相中的含量並無太大的差異；Fe、Mn 在淺層則有較高的含量，若與地下水 Mn 的分布情況對比，Mn 的趨勢亦是在淺層地下水中較高，再加上可交換相是 Mn 最富集的相態，因此推論地下水中的 Mn 含量可能受控於 BCR 的可交換相。

表 4-4、含水層土壤樣本萃取結果分層平均統計。

元素	單位	可交換相 淺層	可交換相 深層	鐵錳相 淺層	鐵錳相 深層	有機相 淺層	有機相 深層
Na	ppm	2083.02	351.39	25.31	11.93	399.22	589.75
Mg	ppm	731.57	385.76	510.18	297.16	450.70	454.09
K	ppm	211.84	115.14	75.84	58.47	88.92	90.82
Ca	ppm	6602.62	4717.99	1852.96	1721.12	617.79	872.42
Mn	ppm	190.34	109.33	66.50	65.95	30.73	44.70
Fe	ppm	128.57	70.11	3254.27	3771.18	1207.11	1811.34
Sr	ppm	23.58	15.87	4.77	4.70	3.58	5.06
Li	ppb	176.22	198.16	1370.80	813.60	1044.30	1033.89
Be	ppb	27.58	63.88	145.18	136.84	38.62	51.63
V	ppb	6.64	33.91	2489.38	3657.55	543.11	413.38
Co	ppb	556.13	416.77	2552.60	1806.47	521.13	655.85
Ni	ppb	595.74	570.38	3011.11	2413.76	1678.68	1569.34
Cu	ppb	484.45	439.25	2826.67	3013.77	1675.25	2574.40
Zn	ppb	1098.32	1035.04	10981.56	10106.24	1328.71	1958.45
As	ppb	47.73	98.89	540.18	902.32	115.80	122.25
Ba	ppb	1153.22	3322.69	3728.91	10882.85	4414.07	7011.58
Pb	ppb	3605.62	836.85	10403.78	8167.01	2134.62	2305.42
U	ppb	26.33	26.77	54.96	69.48	32.53	57.37
Th	ppb	0.01	0.01	209.58	157.88	557.81	795.94

#### 4.3.2 BCR 鐵錳氧化物相比較

如前所述，除了 Mn 以外，多數的重金屬元素均在鐵錳氧化物相中富集，相信是決定地下水重金屬含量的重要因素。相反地，其他元素（包括 Na、K、Ca、Mg、Sr、Th 等元素）在此相態中的含量較低，且在淺、深層的含量比值接近，與地下水的分布不同，對地下水的影響較小。

為方便比較，將地下水與含水層土壤鐵錳氧化物相淺、深層的比值整合成表 4-5。表中顯示重金屬元素（包括 Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Pb、U）在含水層的分層比較中，並未有明顯深層含量高、淺層含量低的趨勢，這些元素在含水層土壤深層／淺層的含量比值介於 0.7-1.2 之間；然而，有明顯深層含量高於淺的元素包括 As 與 V，其比值分別為 1.67 與 1.47。相反地，地下水的分層水質呈現明顯的深層高、淺層低



的分布，排除含量偏低的 Th，Zn 具有最高的比值，高達 23.7，其次是 As，比值為 13.7，Fe 有 3.9 的比值，其他重金屬元素比值多數分布在 1.1-1.6 之間，而 Cu 則意外地在淺層地下水中富集，比值僅有 0.05。兩相比較之下，多數的重金屬元素在深層地下水中有較高的濃度，但未在鐵錳氧化物相中有相對應的比值分布，因此推測除含水層土壤的供給外，應有其他重要的化學反應參與水－岩反應系統。

表 4-5、地下水與含水層土壤鐵錳氧化物相〔深層／淺層〕比值比較表。  
值大於 1.0 表示在深層含量較高。

元素	Na	Mg	K	Ca	Mn	Fe
含水層	0.471	0.582	0.771	0.929	0.992	1.159
地下水	0.080	0.074	0.075	0.207	0.092	3.919
元素	Sr	Li	Be	V	Co	Ni
含水層	0.985	0.594	0.943	1.469	0.708	0.802
地下水	0.089	1.386	6.704	1.129	1.585	1.234
元素	Cu	Zn	As	Ba	Pb	U
含水層	1.066	0.920	1.670	2.919	0.785	1.264
地下水	0.053	23.704	13.733	0.130	0.646	0.335
元素	Th	-	-	-	-	-
含水層	0.753	-	-	-	-	-
地下水	307.563	-	-	-	-	-

#### 4.3.3 BCR 有機物相比較

雖然 Na、K、Ca、Mg 等元素在有機物相裡所佔比例較低，但多數重金屬元素仍有 ppm 的含量，僅 Co、V、As 的含量較低，仍有其潛能做為重金屬元素來源的提供者。然而就深層／淺層含水層土壤的含量比值，呈現多數重金屬在深層含水層富集的現象，包括 Fe、Co、Cu、Zn、Pb、Th，只是富集的程度偏低，程度最高的是 Cu，只是 Cu 卻強烈富集於淺層地下水中。

#### 4.4 稀土族元素化學 (REE Chemistry)

稀土族元素在地殼含量低，來源單一、對特定化學反應具有趨勢性的變化，更重要的是，稀土族內元素因隨著原子序的增加逐漸填滿 4f 的電子軌域，以致離子半徑由 La 到 Lu 有逐漸減小的趨勢，進而造成其化學性質隨原子序有些微的變化，雖然相鄰的元素間的化學分化程度不大，但當將所有稀土族元素做圖時，會呈現具有固定趨勢的系列變化，此即所謂的鐳系收縮現象；這些都是成為良好天然示蹤劑的條件。

##### 4.4.1 含水層土壤稀土族元素

由於去離子水溶出相與 BCR 可交換相的稀土族元素濃度低於儀器的偵測極限，因此僅就具有高濃度稀土元素的鐵錳氧化物與有機物相進行討論，其分析結果分別如附表 6 與附表 7。大致而言，不同稀土族元素的濃度有很大的差別，由本研究的結果顯示，含量最高的元素為輕稀土的 Ce、最低者為重稀土的 Lu。再者，在鐵錳氧化物相的稀土族元素濃度大約在 1ppb-100ppb 之間，較之有機物相要高 10 倍，在去離子水溶出相與可交換相中，幾乎未能被檢出（方法偵測極限約在 0.5-1.0 ppt）；然而，在地下水中雖非所有的稀土族元素均能被檢出，但多數元素的濃度在 1ppt 以上，顯見曾文溪流域地下水中的稀土族元素應來自於鐵錳氧化物相或有機物相，即這兩相的物質在水－岩反應系統中有重要的角色。

一般而言，判釋樣本稀土族元素通常透過與源區的比較，具體的作法是將樣本稀土族元素濃度對源區進行正規化，當源區稀土族元素含量不明時，可藉用類似來源的平均含量進行正規化。例如：在基性至中性火成岩（包括玄武岩與安山岩）集水區，用可代表地函平均成份的隕石（Chondrite）成份進行正規化；在沉積岩與花崗岩集水區，用可代表上部大陸地殼平均成份（Upper Continental Crust；UCC）的北美頁岩（North American Shale Composite；NASC）平均成分來代替。曾文溪流域地下含水層主要為泥質砂岩所構成，因此在此利用 NASC

來進行正規化。由於本研究所分析的標本量龐大，因此僅選擇部份的標本。具有高濃度稀土元素的鐵錳氧化物與有機物相的正規化結果分別如圖 4-7 與圖 4-8。

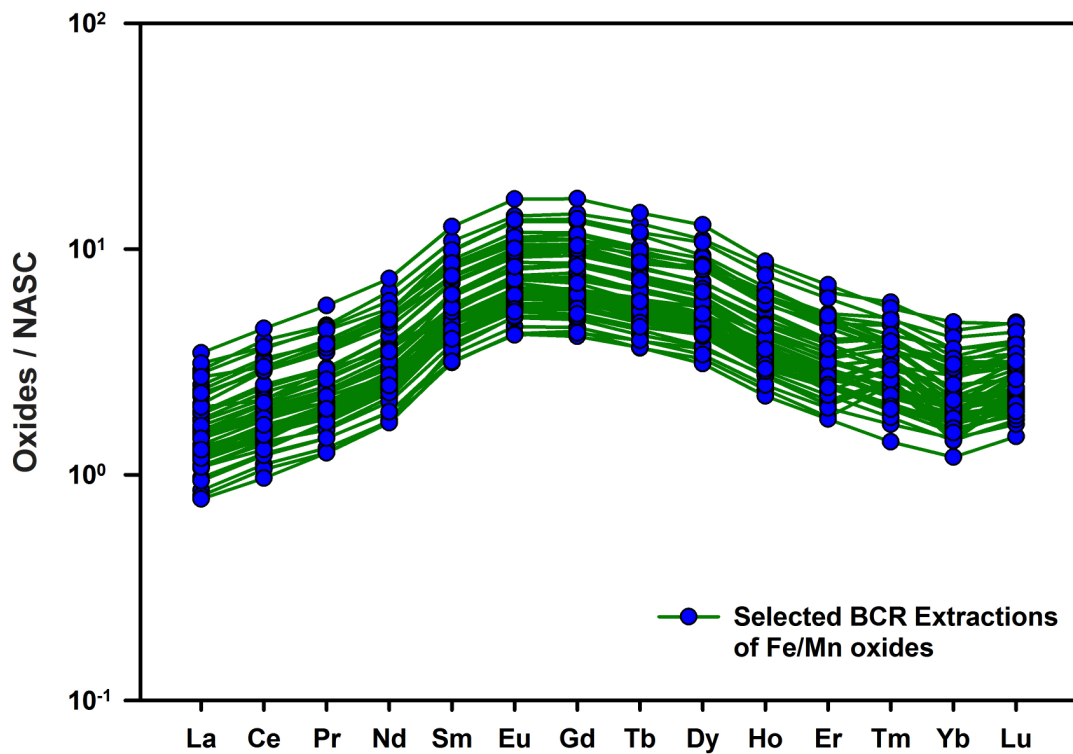


圖 4-7、含水層土壤 BCR 鐵錳氧化物相稀土族元素剖面形態。

大致而言，鐵錳氧化物與有機物相的稀土元素的剖面形態呈現共同的類似特徵：

- (1) 呈現中稀土元素 (Middle Rare Earth Element; MREE) 富集的現象，包括 Sm、Eu、Gd、Tb。
- (2) 無 Eu 正、負異常的現象 (Eu Positive and Negative Anomaly)。由於 Eu 是稀土族元素中，唯一可能具 +2 電價的元素，因此在地質材料中，易富集於長石類的礦物內。若有 Eu 正異常，代表有長石被溶入系統之中；相反地，若有 Eu 負異常，則可解釋為長石類礦物

被移除於系統之外。

- (3) 無明顯的 Ce 負異現象 (Ce Negative Anomaly)。由於 Ce 是稀土族元素中，唯一可能具+4 電價的元素，因此是稀土族元素中最易形成氧化物的元素 ( $\text{CeO}_2$ )。當系統的 Ce 有負異常現象，代表系統曾受氧化作用影響。
- (4) 在正規化的剖面形態中，重稀土元素 (Lu) 高於輕稀土元素 (La)。意即，相較於上部大陸地殼的平均成份，本研究中的重稀土元素較之低稀土元素要富集於樣本之中。一般而言，重稀土元素較易被黏土礦物吸附，因此在土壤中常見到重稀土元素富集的現象。

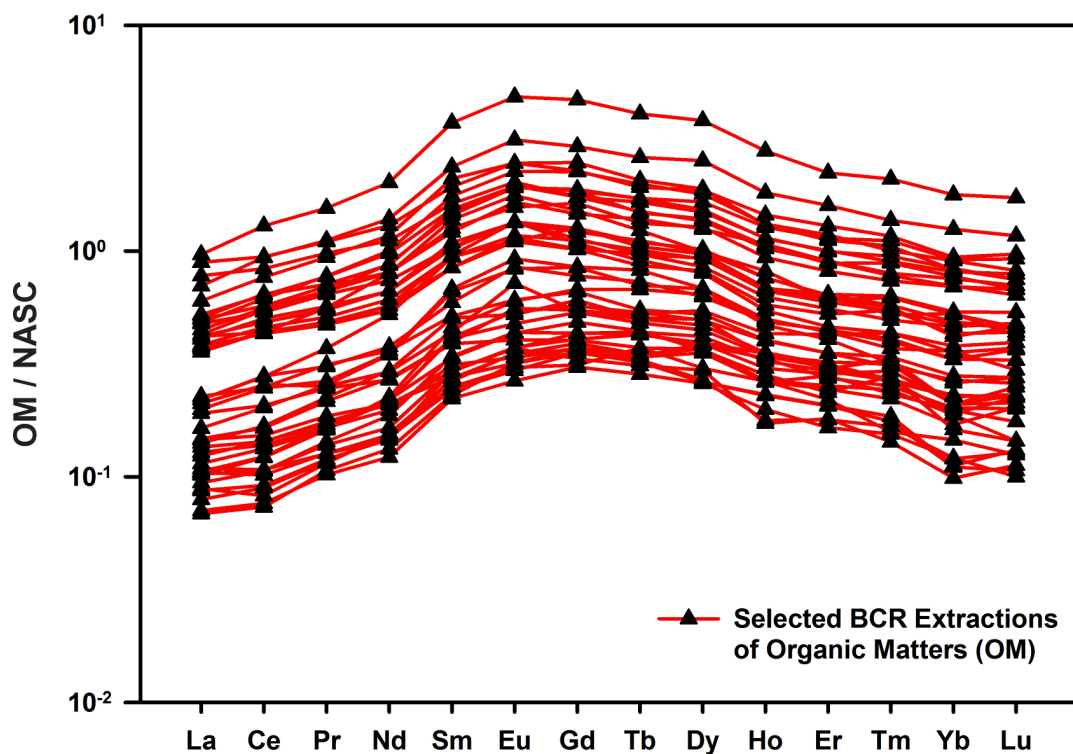


圖 4-8、含水層土壤 BCR 有機物相稀土族元素剖面形態。

綜合以上特徵，指示著含水層土壤在進行 BCR 程序的過程中，並無長石被溶入、亦無長石被結晶。值的注意的是，中稀土元素的富集

現象，通常代表稀土元素源自於有機物的事實，這個結論也可由有機物相的稀土元素分有形態獲得印證；然而，對鐵錳氧化相亦具有中稀土富集現象，則可能證明土壤中的鐵錳氧化相在初始形成的過程是由有機物膠體吸附 Fe、Mn 及其他重金屬與稀土族元素開始，最終才慢慢轉變為鐵錳氧化物，Davranche et al. (2011) 在法國西部的濕地土壤研究中亦觀察到類似的現象。再者，這個推論亦可解釋為何鐵錳氧化相的稀土元素未有 Ce 負異常的現象。

然而，鐵錳氧化相的稀土族元素分有形態與有機物相仍有一個有資區別的差異存在，那就是輕稀土元素（包含 La、Ce、Pr、Nd、Sm）的富集趨勢。大致而言，有機物相的富集趨勢較之鐵錳氧化相要強，即在正規化的形態中（圖 4-7、圖 4-8），La 到 Sm 的斜率較陡。如前所述，若有機物的吸附作用會讓中稀土元素富集，鐵錳氧化物在形成後期的吸附作用可能會讓中稀土元素富集的情況減緩，造成斜率較低的輕稀土元素的分布形態。

#### 4.4.2 地下水稀土族元素

一般而言，地下水在含水層中的滯留時間相對較長，水－岩反應的結果，讓地下水中的稀土元素多源自於土壤；然而，由上述討論可知，本研究區內的稀土元素主要來源可能為土壤中的鐵錳氧化相或有機物相，在未確定實際來源之前，先將地下水稀土元素分別對兩者的平均值進行正規化，正規化結果分別為圖 4-9（鐵錳氧化相）與圖 4-10（有機物相）。

比較兩個正規化的結果，並不太大的差異，但有幾個值得注意的現象：

- (1) 地下水具有強烈的 Eu 正異常現象。如前所述，這代表有足夠量的長石類礦物被溶入地下水中，應該是地下水體與含水層土壤間水－岩反應的結果。在此必須說明前述含水層土壤中稀土的富集作用與在地下水 Eu 的正異常現象的形成機制有極大的差異，中稀土

富集作用是有機物對中稀土元素（包括 Sm、Eu、Gd 等）廣泛地有選擇性的吸附作用；而 Eu 的正異常是因+2 價的 Eu 在長石被溶解時被釋出，在圖 4-9 與圖 4-10 的形態屬於 Eu 正異常而非中稀土富集。

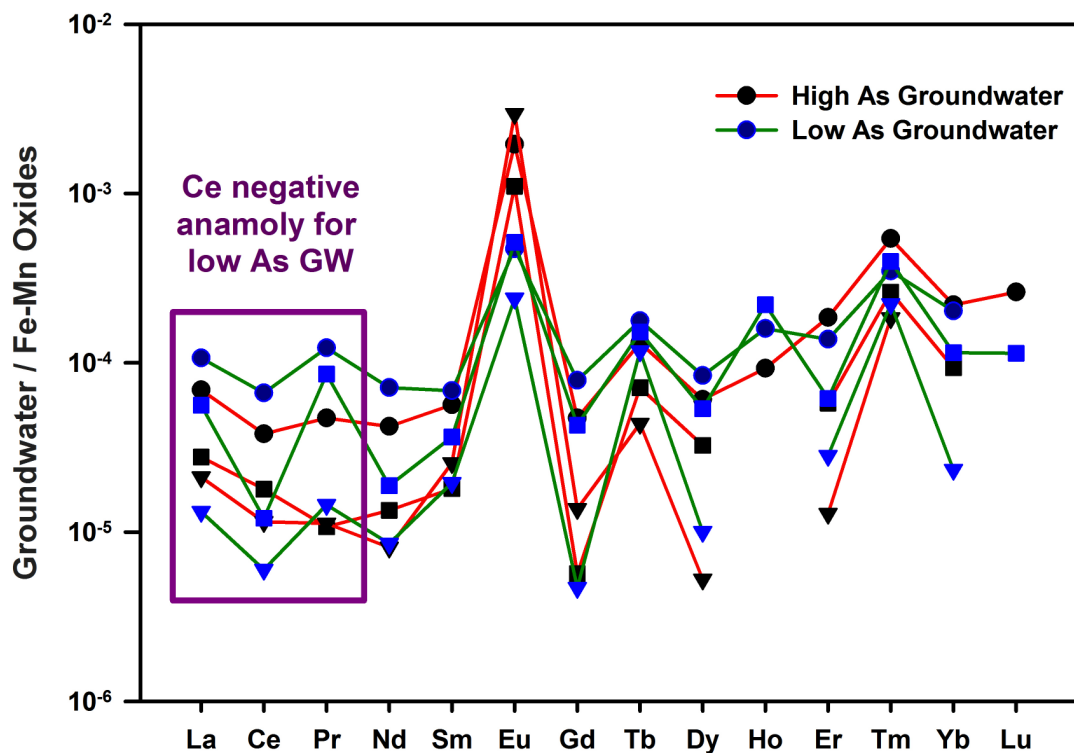


圖 4-9、地下水稀土元素對土壤鐵錳氧化相平均濃度正規化分布形態。

- (2) 除去上下的轉折，單看 La 與 Sm 的相對量，輕稀土元素的相對濃度大致朝中稀土的方向降低，而重稀土則由 Gd 漸次朝 Lu 的方向提高。即整體的分布為中稀土相對較低的形態。此分布形態與土壤有較大的差異，應是後續化學反應所造成。
- (3) 在某些地下水體中具有強烈的 Ce 負異常分布，但並非所有地下水都是如此。對此現象值得做更進一步的討論。

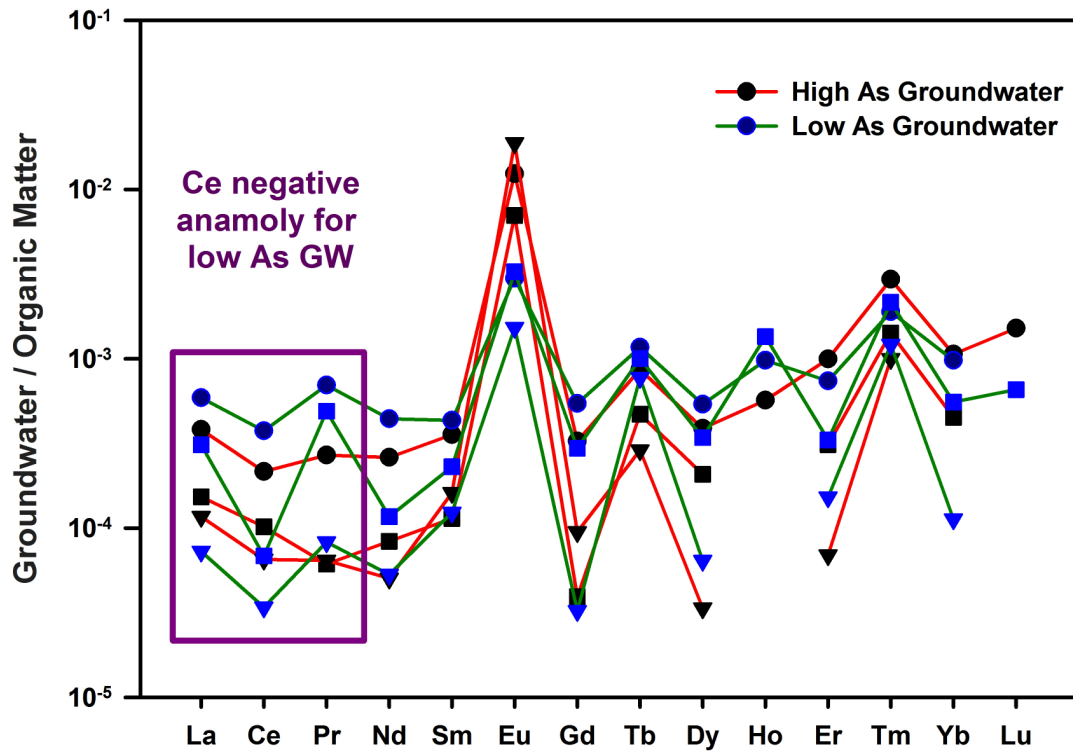


圖 4-10、地下水稀土元素對土壤有機物相平均濃度正規化分布形態。

如前所述，Ce 負異常是氧化反應的重要指標，在地下水樣本中觀察到 Ce 負異常，亦是如此。這個指標的最大好處在於能指示地下水體是否「曾經」有氧化反應的歷史。由現地的水質記錄（如氧化還原電位或溶氧量），只能說明地下水體「現在」處於何種狀態，但並不能保證地下水體長久以來是否一直處於相同的氧化還原條件。但對 Ce 負異常值而言，只要地下水體曾發生過氧化反應，除非有含量更高的稀土元素被混入，否則地下水體內 Ce 負異常被記錄下來的可能性極高，進而指示水體的氧化歷史。

若觀察 As 含量最高與最低各三個地下水樣本的稀土元素分布形態（如圖 4-9 或圖 4-10），可發現 As 含量最高的三個樣本均不具有明顯的 Ce 負異常（圖 4-9 中的紅線樣本），而 As 含量最低的三個樣本均有強烈 Ce 負異常的特性（圖 4-9 中的綠線樣本）；這樣的關聯性，可推測曾文溪流域內的地下水，As 含量偏低的樣本，可能是因地下水體

氧化作用造成 As 以氧化物的形態離開水體，抑或地下水體曾有相當的時間在氧化環境下，造成含 As 礦物無法被溶入地下水之中。

針對 Ce 負異常的程度，通常可以利用 Ce 與 Ce 相鄰元素平均含量（La 與 Pr）的比值來量化。公式如下：

$$\text{Ce Anomaly} = \frac{\text{Ce}_N}{\text{Ce}_N^*} = \frac{\text{Ce}_N}{0.5 \times (\text{La}_N + \text{Pr}_N)} \quad (\text{Eq. 4-2})$$

式中的下標 N 代表正規化後的相對濃度。依此公式，可計算所有地下水樣本的 Ce 負異常程度，此值愈小代表負異常程度會大、愈接近 1.0 代表無負異常、大於 1.0 則反之代表正異常。透過與 As 濃度的關聯性，可用來討論氧化反應如何影響地下水中的 As 含量。作圖的結果如圖 4-11。

由於 Ce 負異常的量化指標無法線性地代表化學上的氧化程度，因此圖 4-11 並未呈現良好的線性關係。然而，圖 4-11 仍可觀察到不同行為的兩群地下水體：

- (1) Ce 負異常值與 As 呈正相關。當 Ce 負異常值愈大，代表水體氧化程度愈低，As 的濃度愈高。此群地下水樣如圖中綠線趨勢，雖然沒有良好的線性關係，但仍可判定兩個間有直接的關聯。
- (2) As 含量低但無相對應 Ce 負異常值的地下水體，此群地下水如圖中藍框樣本。這些地下水體雖有部份含量接近 1.0 的 Ce 負異常值，但確無相對的高 As 含量。意即，雖地下水體未發生過強烈的氧化作用，但 As 被溶入水體的量仍十分有限。
- (3) 並無低 Ce 異常值而高 As 的樣本出現。



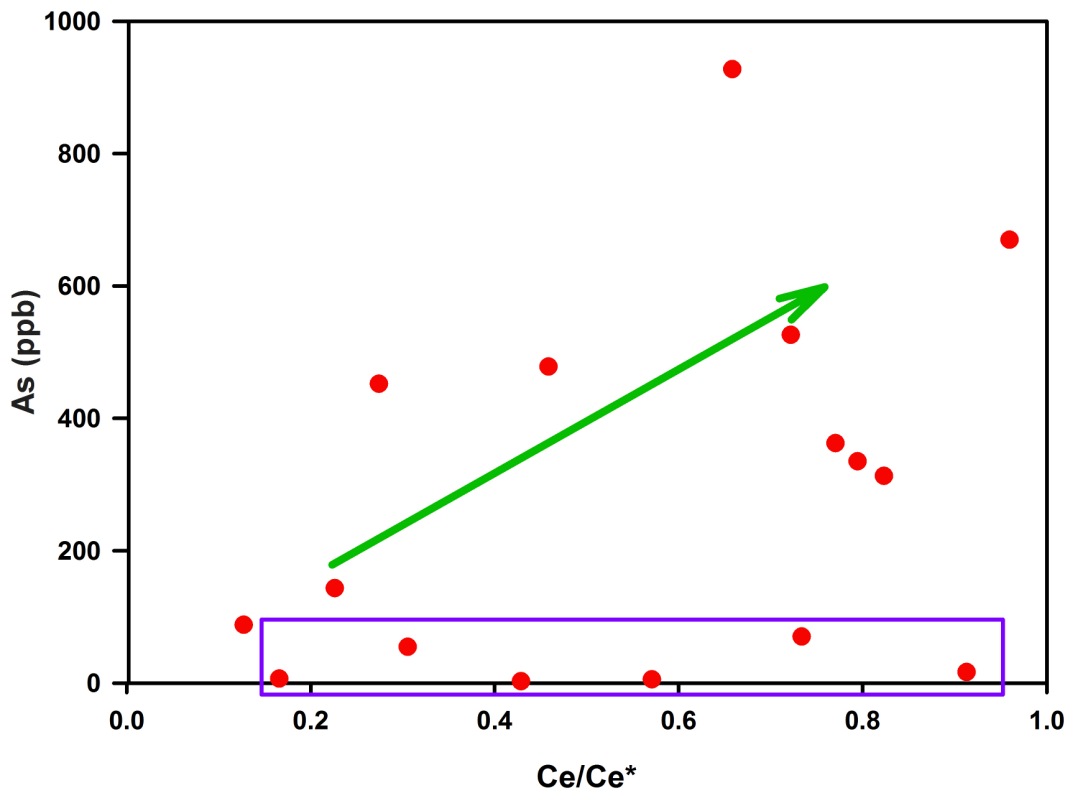


圖 4-11、Ce 負異常值與地下水中 As 含量的關係圖。

綜合上述三點觀察，可推論低 Ce 異常值的水樣（高氧化水體），可肯定水體發生過氧化反應，因此無高 As 含量的樣本出現；若觀察高 Ce 異常值高（低氧化水體）卻僅有低 As 含量的地下水樣本（圖 4-11 中藍框內的樣本），均是採自淺層含水層中，因此推論此類水樣可雖未經氧化反應，但因淺層含水層土壤 As 含量較低，無法提供足夠量的 As 進入水體。然而，這個現象仍不能排除是被高 Ce 異常值來源覆蓋掉原本低 Ce 異常值特徵的可能性，即地下水 As 含量的高低，同時受含水層土壤來源濃度與後續化學反應同時影響。

## 第五章 結論與建議

### 5.1 實驗結果結論

地下水的滯留時間相對較長，尤其對導水性質較弱的曾文溪流域而言，滯留時間長達數千年，因此地下水質代表長時間水岩反應的結果，對此可透過大量土壤樣本的平均成份含量來推估水體成份的可能來源；再者，透過各種相關成份與污染物的相對含量，亦可更深一步了解水體在滯留期間發生過的化學反應。

地下水質分析結果顯示，曾文溪流域區地下水以末次冰期為界限，分為淺層含水層及深層含水層，淺層含水層因潟湖環境具有較高的鹽度，但 As 與重金屬含量均低，深層含水層則因陸相沉積環境具有較低的鹽度，但 As 與重金屬含量均高。藉由 BCR 溶出試驗之分析結果，主要元素、Mn 與 Sr 在可交換相中含量較高，可能代表在 pH 值大於 8 且略微氧化的環境；Fe、As 與其他重金屬元素以鐵錳氧化物形態含量最高；在有機物相中富集的元素僅有 Th 與 Li，但 Fe、As 及其他重金屬元素，在此形態中的含量亦可能造成水體污染。依據由地下水質分層結果，亦可將含水層土壤分為淺、深層含水層，As 在深層含水層中的平均含量約為淺層的 1.7 倍，但其他重金屬元素的含量則未見類似的分布，多數與淺層含水層約略相等甚至有反序現象，此與地下水質的分布有明顯差異，代表除了來源的因素外，後續的化學反應亦是不可忽略的機制。由稀土族元素的分析結果顯示，地下水含 As 量高者，幾乎沒有 Ce 負異常的現象。Ce 負異常指示水體曾發生過強烈的氧化反應，顯示地下水體的 As 含量與氧化作用的發生有直接的關係。

地下水與含水層土壤中的微量元素或同位素，具有來源單一的重要特性，只要能充分掌握與其相關的化學反應，就能有效地追蹤地下水與含水層土壤之間的水－岩反應系統，未來應有空間持續對其他微量元素與同位素進行更進一步的研究。

連續淋溶實驗萃取土壤在不同環境下可能被溶出的化學成份，以

重金屬成份而言，還原環境是鐵錳氧化物相與有機物相共同的條件，雖是如此，連續淋溶實驗主要在酸性的化學環境中進行，而天然的地下水體主要以鹼性為主，這可能是 As 與 V 在去離子水淋溶相中濃度高於 BCR 離子交換相的原因。

## 5.2 結論衍伸與建議

本計畫雖然確立氧化反應的確在曾文溪流域的地下水體中發生過，但仍有許多議題值得做更進一步的研究，茲分別敘述如下：

### 1. As 與 V 在去離子水淋溶相中富集的原因與影響

雖然 As 與 V 在去離子水淋溶相中的濃度大約在幾十到幾百 ppb 的數量級，遠遠不及鐵錳氧化相與有機物相的含量，但考量溶出機制的反應速率與地下水的滯留時間，單純的去離水的可淋溶相亦可能是地下水體 As 濃度偏高的主因。未來值得更進一步確認是否真是腐植物質在鹼性環境下被淋溶造成此一現象，真若如此，則酸鹼反應在曾文溪流域的 As 污染的角色需重新被檢視。

### 2. 氧化反應的機制

雖然曾文溪流域地下水體的氧化還原電位均在強還原的狀態，但由 Fe、Mn 的相對含量與稀土元素 Ce 的負異常，仍可推論這些水體確曾發生過氧化反應有關，且 As 含量與其相關。然而，發生氧化反應的機制不但受控於水體中有機物、溶氧、硝酸鹽、鐵、錳、硫酸鹽等成份的含量影響，亦會被沉積物中的鐵錳氧化物引發，各個成份間的氧化、還原潛勢均相互牽制影響，是個極為複雜的系統。此一複雜的系統，可利用水化學模擬進行水體在各種成份下可能引發的氧化、還原反應的評估。另外，評估人為因素對 As 含量的影響亦是重要的議題，或可利用實驗室的試驗與評估來進行，其結果亦可與水化學模擬結果相互驗證。總之，我們會持續解讀這個計畫所得到的實驗結果，並將問題的癥結一一釐清。

### 3. 天然示蹤劑在重金屬污染議題中之應用

本研究利用感應耦合電漿質譜儀分析多數的金屬元素及稀土族元素，由元素間的相對含量亦可對重金屬的來源與化學環境的判釋有決定性的助益，未來可廣泛地應用在所有的地下水體，或更進一步利用同位素來進行天然示蹤劑的研究，如 **Sr** 同位素、**Pb** 同位素、**Sr/Nd** 比值等等，應可獲致各豐碩的成果。

## 參考文獻

- Bacon, J.R., Hewitt, I.J., Cooper, P. (2005) Reproducibility of the BCR sequential extraction procedure in a long-term study of the association of heavy metals with soil components in an upland catchment in Scotland. *Science of the Total Environment* 337:191–205.
- Cohen, D. and Ward, C.R., 1991, SEDNORM- A program to calculate a normative mineralogy for sedimentary rocks based on chemical analyses. *Computers and Geosciences*, 17, 1235-1253.
- Davranche, M., Grybos, M., Gruau, G., Pédrot, M., Dia, A. and Marsac, R. (2011) Rare earth element patterns: A tool for identifying trace metal sources during wetland soil reduction. *Chemical Geology* 284, p.127–137.
- Doelsch, E., Moussard, G. and Saint Macary, H. (2008) Fractionation of tropical soilborne heavy metals—comparison of two sequential extraction procedures. *Geoderma*, v. 143(1-2), p. 168–179.
- Fujikawa, Y., Fukuui, M. and Kudo, A. (2000) Vertical distributions of trace metals in natural soil horizons from Japan. Part 1. effect of soil types. *Water, Air, and Soil Pollution* 124: 1–21.
- Galán, E., Gómez Ariza J.L., González, I., Fernández, J. C., Morales, C.E. and Giráldez, I. (1999) Utilidad de las técnicas de extracción secuencial en la mejora de la caracterización mineralógica por DRX de suelos y sedimentos con altos contenidos de óxidos de hierro,” in *Libro de Conferencias y Resúmenes de la XV Reunión Científica de la Sociedad Española de Arcillas* 15: 68–69.
- Johannesson, K. H. and Lyons, W. B. (2000) Rare earth elements in groundwater in: P. Cook and A. Herczeg (eds.) *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*: 85-492. Dordrecht: Kluwer.
- Johannesson, K.H., Farnham, I.M., Guo, C. and Stetzenbach, K.J. (1999) Rare earth element fractionation and concentration variations along a groundwater flow path within a shallow, basin-fill aquifer, southern Nevada, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 2697-2708.
- Johannesson, K.H., Stetzenbach, K.J. and Hodge, V.F. (1997) Rare earth elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61,3605-3618.
- Lee, J. J., Liu, C. W., Jang C. S. and Liang, C. P. (2008) Zonal management of multi-purpose use of water from arsenic-affected aquifers by using a multi-variable indicator kriging approach, *Journal of Hydrology* 359: 260-273.
- Lu, H. Y., Peng, T.R. and Liou, T.S. (2008) Identification of the origin of salinization in

- groundwater using multivariate statistical analysis and geochemical modeling: A Case study of Kaohsiung, Southwest Taiwan. *Environmental Geology*, 55, p.339-352.
- Maiz, I., Arambarri, I., Garcia, R. and Millán, E. (2000) Evaluation of heavy metal availability in polluted soils by two sequential extraction procedures using factor analysis. *Environmental Pollution*, v. 110(1), p. 3–9.
- Merodio, J.C., Spalletti, L.A. and Bertone, L.M., 1992, A fortran program for the calculation of normative composition of clay minerals and politic rocks. 18, 47-61.
- Paktunc, A.D., 1998, MODAN: an interactive computer program for estimating mineral quantities based on bulk composition. 24, 425-431.
- Tessier, A., Campbell, P. G. C. and Blsson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, v. 51(7), p. 844–851.
- Ure, A.M., Quevauviller, P. H., Muntau, H. and Griepink, B. (1993) Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the commission of the European communities. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, v. 51, p. 135–151.
- 中華民國行政院環境保護署，2004，河川、湖泊及水庫水質採樣通則，  
<http://www.niea.gov.tw/niea/WATER/W10451C.htm>。
- 中華民國行政院環境保護署，2005，監測井地下水採樣方法，  
<http://www.niea.gov.tw/niea/WATER/W10451C.htm>。
- 中華民國行政院環境保護署，2005，水中陰離子檢測方法－離子層析法，  
<http://www.niea.gov.tw/niea/WATER/W41552B.htm>。
- 中華民國行政院環境保護署，2005，水中陰離子檢測方法－離子層析法，  
<http://www.niea.gov.tw/niea/WATER/W313.52B.htm>。

附表 1 曾文溪流域地下水水質分析結果

標本	紀安 1	紀安 2	大文 1	大文 2	大文 3	大文 4
T (°C)	26.90	27.30	na	na	28.40	29.20
pH	6.84	6.79	na	na	6.84	7.49
EC (mS/cm)	967	552	na	na	11930	657
ORP (mV)	-121	-131	na	na	-163	-189
DO (mg/L)	nd	0.01	na	na	nd	nd
Alkalinity(ppm)	210.45	268.40	210.45	347.70	280.60	427.00
F (ppm)	0.16	0.19	na	na	nd	0.14
Cl (ppm)	7.56	370.13	na	na	7422.30	121.40
Br (ppm)	na	0.26	na	na	5.15	0.40
NO <sub>3</sub> (ppm)	na	nd	na	na	0.40	nd
PO <sub>4</sub> (ppm)	na	nd	na	na	nd	nd
SO <sub>4</sub> (ppm)	na	0.05	na	na	6.49	0.03
Na (ppm)	25.57	246.00	13070.00	16353.00	6667.50	289.10
Mg (ppm)	39.68	34.09	660.75	717.00	309.00	6.23
K (ppm)	4.90	3.49	289.75	311.10	115.71	4.91
Ca (ppm)	125.90	84.16	351.75	349.20	171.88	7.60
Mn (ppm)	0.17	0.08	0.45	nd	0.09	0.06
Fe (ppm)	0.09	0.01	nd	1.47	nd	0.31
Sr (ppm)	0.84	0.71	7.78	10.23	4.18	0.14
Li (ppt)	3677	6837	5656	2648	5708	4312
Be (ppt)	1	2	1	1	0	5
V (ppt)	254	861	5340	3890	4410	1605
Cr (ppt)	nd	42.94	nd	nd	102.30	184.90
Co (ppt)	232	403	392	211	600	305
Ni (ppt)	1849	1221	1378	873	8521	588
Cu (ppt)	nd	732	148400	183300	65700	3182
Zn (ppt)	12880	340200	2246	39	7967	3765
As (ppt)	54710	477900	16410	58340	88000	669600
Se (ppt)	822	3624	44120	37310	40740	1574
Cd (ppt)	nd	nd	0.39	1.26	nd	5.64
Ba (ppt)	107000	158400	108700	7771000	2538000	54510
Pb (ppt)	9.67	54.88	43.43	20.43	12.19	78.57
U (ppt)	29.56	0.79	19.54	0.21	8.11	3.36

附表 1（續） 曾文溪流域地下水水質分析結果

標本	頂山 1	頂山 2	三股 1	三股 2	十份 1	十份 2
T (°C)	28.20	29.50	27.40	28.20	28.00	28.70
pH	8.75	7.42	7.03	6.68	7.05	7.47
EC (mS/cm)	over	1115		8010		16510
ORP (mV)	-376	-253	-417	-267	-206	-371
DO (mg/L)	1.34	2.06	0.64	0.70	0.72	2.44
Alkalinity(ppm)	234.85	292.80	439.20	237.90	161.65	646.60
F (ppm)	nd	0.09	nd	nd	0.19	0.18
Cl (ppm)	29347.17	118.69	22532.86	1737.42	22063.02	4356.97
Br (ppm)	23.34	0.59	14.13	1.13	19.56	0.64
NO <sub>3</sub> (ppm)	nd	0.71	nd	nd	0.50	0.25
PO <sub>4</sub> (ppm)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
SO <sub>4</sub> (ppm)	5759.93	9.27	1942.26	nd	4271.01	474.88
Na (ppm)	33459.48	525.80	26266.80	775.53	22129.20	6491.10
Mg (ppm)	2586.73	10.44	1721.16	94.69	1603.80	371.91
K (ppm)	854.12	3.69	558.60	15.12	515.57	148.17
Ca (ppm)	544.04	21.05	384.43	149.37	504.63	120.01
Mn (ppm)	2.23	0.03	nd	0.12	1.05	nd
Fe (ppm)	nd	0.19	nd	4.83	nd	nd
Sr (ppm)	9.03	0.22	11.17	1.74	10.08	2.32
Li (ppt)	2226	5844	3380	10140	3670	4506
Be (ppt)	0	5	1	0	0	6
V (ppt)	1536	1570	1950	1233	2021	6196
Cr (ppt)	nd	364.50	68.46	91.31	nd	358.20
Co (ppt)	91	467	100	454	144	482
Ni (ppt)	589	4805	413	3169	635	1513
Cu (ppt)	330400	2502	209900	8796	210900	53520
Zn (ppt)	nd	10890	nd	9804	444	1790
As (ppt)	2756	927300	5431	452000	6740	312900
Se (ppt)	19140	1215	23730	13070	26160	31030
Cd (ppt)	0.39	nd	nd	nd	3.02	1.26
Ba (ppt)	55050	64230	46540	734300	51780	68500
Pb (ppt)	4.72	66.82	nd	107.80	3.75	31.40
U (ppt)	nd	2.96	4.01	1.19	29.72	3.16



附表 1（續） 曾文溪流域地下水水質分析結果

標本	十份 3	進學 1	進學 2	進學 3	進學 4	小新 1
T (°C)	29.30	27.90	27.70	29.50	27.70	27.10
pH	8.45	7.09	6.63	7.19	7.10	6.86
EC (mS/cm)	2460	1917	over	1084	1853	678
ORP (mV)	-66	-286	-277	-260	-326	-122
DO (mg/L)	2.01	0.79	0.43	0.65	0.60	nd
Alkalinity(ppm)	713.70	30.50	533.75	384.30	152.50	338.55
F (ppm)	0.59	0.72	1.78	0.26	0.32	na
Cl (ppm)	267.10	360.69	18769.31	36.57	210.48	na
Br (ppm)	0.19	0.21	13.30	0.29	0.10	na
NO <sub>3</sub> (ppm)	nd	0.03	9.52	0.28	0.02	na
PO <sub>4</sub> (ppm)	nd	nd	nd	nd	nd	na
SO <sub>4</sub> (ppm)	0.40	7.71	2199.23	2.17	11.62	na
Na (ppm)	693.60	338.85	2453.11	203.60	381.40	27.02
Mg (ppm)	2.18	31.82	157.12	11.41	28.20	20.30
K (ppm)	13.76	33.93	48.41	3.72	7.38	3.71
Ca (ppm)	0.92	52.43	61.92	26.31	38.69	80.12
Mn (ppm)	0.03	0.13	1.99	0.19	0.01	0.12
Fe (ppm)	0.62	0.01	nd	0.01	nd	0.46
Sr (ppm)	0.05	0.36	11.99	0.25	0.02	0.46
Li (ppt)	3729	10670	2682	6807	7423	3740
Be (ppt)	19	2	0	2	1	0
V (ppt)	12440	1245	2439	785	951	688
Cr (ppt)	295.70	143.30	nd	72.05	477.70	nd
Co (ppt)	523	155	352	199	419	123
Ni (ppt)	1482	1388	1452	1153	5516	1146
Cu (ppt)	5400	1116	287400	1238	1268	nd
Zn (ppt)	nd	2167	3914	nd	29640	nd
As (ppt)	143200	70050	4334	362300	334900	54220
Se (ppt)	2826	3511	25020	749	2566	764
Cd (ppt)	nd	1.26	2.14	4.77	nd	2.14
Ba (ppt)	13240	104100	166100	58550	176600	142700
Pb (ppt)	492.10	1254.00	nd	47.12	59.64	120.50
U (ppt)	11.54	2.52	21.73	5.19	3.76	9.45

附表 1（續） 曾文溪流域地下水水質分析結果

標本	小新 2
T (°C)	27.30
pH	6.79
EC (mS/cm)	552
ORP (mV)	-131
DO (mg/L)	0.01
Alkalinity(ppm)	341.60
F (ppm)	0.03
Cl (ppm)	nd
Br (ppm)	na
NO <sub>3</sub> (ppm)	na
PO <sub>4</sub> (ppm)	na
SO <sub>4</sub> (ppm)	na
Na (ppm)	105.00
Mg (ppm)	19.05
K (ppm)	3.89
Ca (ppm)	70.00
Mn (ppm)	0.05
Fe (ppm)	1.63
Sr (ppm)	0.37
Li (ppt)	6382
Be (ppt)	1
V (ppt)	904
Cr (ppt)	14.04
Co (ppt)	183
Ni (ppt)	791
Cu (ppt)	nd
Zn (ppt)	nd
As (ppt)	526000
Se (ppt)	868
Cd (ppt)	nd
Ba (ppt)	96800
Pb (ppt)	4.62
U (ppt)	0.01

附表 2 曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果

標本	SF11.5	SF15.5	SF19.5	SF23.5	SF27.5	SF31.5
Na (ppm)	3962.40	3586.00	2147.60	2855.30	63.18	6276.00
Mg (ppm)	198.72	189.68	81.06	126.14	55.61	448.56
K (ppm)	247.08	174.60	110.67	151.69	28.30	299.25
Ca (ppm)	643.08	386.56	272.09	321.16	209.04	537.95
Mn (ppb)	240	224	49	119	60	476
Fe (ppb)	468	132	133	140	354	70
Sr (ppb)	3156	2368	1813	2352	774	4585
Li (ppt)	602800	426200	480400	363200	212200	318600
Be (ppt)	920	266	241	316	266	266
V (ppt)	166300	152140	177740	155540	91140	133460
Cr (ppt)	37140	14638	19556	14688	21760	15266
Co (ppt)	4714	3550	3128	1901	3308	4408
Ni (ppt)	23220	12556	16072	10380	10212	15402
Cu (ppt)	263400	166920	228800	140300	95280	219800
Zn (ppt)	nd	47700	nd	59460	nd	33460
As (ppt)	133280	128020	127440	121500	57040	82180
Se (ppt)	119700	91160	54220	66860	12440	181500
Cd (ppt)	nd	nd	nd	nd	nd	32
Ba (ppt)	219200	63780	230600	228400	30460	460400
Pb (ppt)	6756	1582	9130	1005	2622	1263
U (ppt)	3556	306	467	229	309	493

附表 2（續） 曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果

標本	SF191.5	SF195.5	SF195.8	SF199.5	SF261.5	SF263.5
Na (ppm)	199.29	226.87	449.75	219.94	252.48	315.04
Mg (ppm)	41.29	27.06	434.00	11.03	21.94	33.90
K (ppm)	22.51	17.13	13.01	18.22	31.30	45.62
Ca (ppm)	115.15	231.56	2455.60	197.40	190.24	178.96
Mn (ppb)	4571	168	47236	224	40	8
Fe (ppb)	161	588	1708	728	912	552
Sr (ppb)	658	749	5621	511	592	680
Li (ppt)	257400	112780	3350000	108800	122100	173520
Be (ppt)	1046	341	339600	341	417	417
V (ppt)	12808	46740	9174	106700	591600	45580
Cr (ppt)	13058	16358	317800	17476	15472	17540
Co (ppt)	122660	5232	8218000	9696	2694	5560
Ni (ppt)	225600	15402	12140000	18192	18750	11718
Cu (ppt)	80540	112220	345400	169980	167660	173640
Zn (ppt)	nd	28220	nd	20200	nd	nd
As (ppt)	20960	114960	298400	196560	447200	45480
Se (ppt)	17682	11724	38420	20140	22300	13314
Cd (ppt)	7606	nd	123440	nd	nd	nd
Ba (ppt)	219000	59520	1054400	65780	25500	20320
Pb (ppt)	1565	4434	1585	4342	3994	10272
U (ppt)	80	1118	1087	764	1801	388

附表 2（續） 曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果

標本	SF267.5	SF269.5	SF271.5	TS31.5	TS35.5	TS39.5
Na (ppm)	600.57	318.08	232.68	4533.00	4467.00	4362.00
Mg (ppm)	32.52	29.30	22.69	253.20	171.10	223.20
K (ppm)	110.97	54.98	34.90	263.60	325.80	261.90
Ca (ppm)	262.71	159.11	134.61	349.60	312.50	637.60
Mn (ppb)	171	21	91	290	500	970
Fe (ppb)	4527	896	1813	1600	1630	460
Sr (ppb)	765	371	336	11290	9220	15120
Li (ppt)	164340	139840	122360	328200	283800	370000
Be (ppt)	895	316	316	417	115	140
V (ppt)	61880	43120	106920	138040	97780	103160
Cr (ppt)	28400	14290	14226	37080	32080	16190
Co (ppt)	32740	2598	11982	3032	3170	3276
Ni (ppt)	48900	10044	9990	18416	13338	15794
Cu (ppt)	187360	104040	99820	240800	194240	152720
Zn (ppt)	nd	54520	1109	7922	58060	72220
As (ppt)	158180	47940	66500	85300	64560	64960
Se (ppt)	22060	11804	17682	159100	94740	91560
Cd (ppt)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ba (ppt)	29320	14898	11690	370600	102400	64000
Pb (ppt)	15750	3404	10270	2946	1478	1166
U (ppt)	1319	363	418	485	478	1039

附表 2（續） 曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果

標本	TS42.6	TS44.4	TS201.5	TS203.5	TS207.5	TS209.5
Na (ppm)	1686.60	4857.00	352.30	155.34	136.40	728.64
Mg (ppm)	88.52	344.43	45.73	28.70	18.50	517.86
K (ppm)	121.68	305.10	103.90	30.55	25.54	144.72
Ca (ppm)	324.09	2333.70	39.79	331.56	201.60	1716.30
Mn (ppb)	477	2430	1030	594	650	66384
Fe (ppb)	3780	162	349100	15849	28930	11394
Sr (ppb)	7452	32598	390	4563	2610	43065
Li (ppt)	300800	345000	1794800	154640	132080	1846000
Be (ppt)	845	266	176840	417	1525	72120
V (ppt)	142440	57540	4222000	22740	61140	5854
Cr (ppt)	20420	16834	2422000	48980	40800	37140
Co (ppt)	2578	7750	396600	5148	7052	1313600
Ni (ppt)	11942	49740	1102000	16964	23220	2884000
Cu (ppt)	65300	122940	1296000	38600	67300	86560
Zn (ppt)	55160	47460	nd	11898	nd	nd
As (ppt)	75040	44620	2110000	32440	83820	72680
Se (ppt)	38420	83860	173400	17842	16412	70520
Cd (ppt)	nd	32	2248	nd	nd	22900
Ba (ppt)	47700	511000	3464000	79480	78300	900600
Pb (ppt)	2218	1126	357400	5564	13308	18466
U (ppt)	702	1105	16048	977	559	574

附表 2（續） 曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果

標本	TS211.5	TS215.5	TS219.5	TS223.5	ZY26.7	ZY27.5
Na (ppm)	275.58	219.24	549.71	297.85	115.71	3320.80
Mg (ppm)	94.32	30.86	68.12	21.15	476.84	174.37
K (ppm)	55.96	29.27	63.07	34.24	206.85	165.06
Ca (ppm)	459.09	23.71	617.75	414.61	1867.60	254.59
Mn (ppb)	69948	2148	203	889	3164	35
Fe (ppb)	6813	332280	910	721	336	252
Sr (ppb)	10620	360	1869	1043	7875	2016
Li (ppt)	239600	864000	232600	134960	573800	264400
Be (ppt)	2960	83440	291	165	165	215
V (ppt)	9246	1342000	11700	56540	6204	102300
Cr (ppt)	56460	1072800	20680	14612	17026	15768
Co (ppt)	276600	312800	15156	11410	14182	1859
Ni (ppt)	467000	886600	27740	21760	77200	7032
Cu (ppt)	108880	1345800	166380	151720	136260	160880
Zn (ppt)	nd	nd	nd	33560	38200	5560
As (ppt)	43380	275600	26560	57840	16688	52580
Se (ppt)	38740	173000	24680	21100	29200	88380
Cd (ppt)	3962	318	nd	nd	nd	nd
Ba (ppt)	1132800	1703400	232000	162300	600800	149900
Pb (ppt)	3816	305200	4544	2554	1263	1186
U (ppt)	437	3996	1887	1189	4390	107

附表 2（續） 曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果

標本	ZY30.7	ZY31.8	ZY34.7	ZY38.7	ZY42.7	ZY98.7
Na (ppm)	85.89	155.12	74.16	88.34	86.80	1036.20
Mg (ppm)	166.39	17.76	53.32	139.51	50.11	49.28
K (ppm)	85.33	21.25	29.05	136.57	53.94	134.10
Ca (ppm)	351.96	200.20	249.16	310.87	307.23	242.22
Mn (ppb)	35	63	92	56	245	84
Fe (ppb)	63	665	220	28	70	5616
Sr (ppb)	1743	917	1356	1715	1435	1110
Li (ppt)	292400	201600	300000	239600	274400	185360
Be (ppt)	140	291	316	64	316	2004
V (ppt)	7226	226400	117080	8620	24000	57280
Cr (ppt)	25780	14534	16140	27060	13406	30160
Co (ppt)	2492	2398	3202	3106	1552	11738
Ni (ppt)	13058	8482	9710	9096	7590	35660
Cu (ppt)	25900	16066	16656	28520	8864	243200
Zn (ppt)	76000	nd	66660	53840	77060	10760
As (ppt)	13084	394600	161800	7634	22080	95860
Se (ppt)	31180	9580	12996	23240	12042	68360
Cd (ppt)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ba (ppt)	57540	66920	109920	69220	112820	182740
Pb (ppt)	760	3178	2842	653	579	6376
U (ppt)	602	490	919	577	160	896



附表 2（續） 曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果

標本	ZY99.3	ZY103.5	ZY104.5	ZY107.5	ZY165.3	ZY168.5
Na (ppm)	222.80	213.51	285.45	277.44	186.99	198.66
Mg (ppm)	12.14	7.79	7.78	24.55	21.72	17.81
K (ppm)	32.69	21.39	24.74	13.82	28.22	30.70
Ca (ppm)	87.44	36.96	15.10	32.63	342.60	413.94
Mn (ppb)	496	519	440	2160	240	144
Fe (ppb)	11040	17139	21850	89640	420	228
Sr (ppb)	416	159	120	324	1200	1146
Li (ppt)	122920	163820	286800	634400	193580	163360
Be (ppt)	2734	9330	13836	87240	190	190
V (ppt)	64080	247800	369200	1008200	30340	13974
Cr (ppt)	52880	160540	251000	1047400	13712	19056
Co (ppt)	17728	39400	112680	251600	2334	2746
Ni (ppt)	44040	99440	334200	784800	10212	10380
Cu (ppt)	49020	124620	200200	649000	28780	25680
Zn (ppt)	nd	nd	nd	nd	76120	32040
As (ppt)	38880	169400	207200	207800	29960	22700
Se (ppt)	16968	26980	37300	52880	15298	14902
Cd (ppt)	nd	nd	675	1033	nd	nd
Ba (ppt)	141000	142280	316000	1764600	58340	74440
Pb (ppt)	11606	27220	49600	206200	1424	1602
U (ppt)	324	935	1936	9046	1569	931

附表 2（續） 曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果

標本	ZY171.8	ZY173.7	ZY177.6	ZY179.7	ZY181.5	ZY185.6
Na (ppm)	80.99	203.28	100.20	208.76	99.36	135.44
Mg (ppm)	4.15	13.29	9.88	68.28	9.42	4.09
K (ppm)	23.83	45.48	32.82	85.40	37.88	18.64
Ca (ppm)	25.14	222.32	188.80	884.40	34.19	10.27
Mn (ppb)	644	70	72	748	1068	220
Fe (ppb)	64463	1540	1156	248	49968	4984
Sr (ppb)	168	1071	848	3332	294	100
Li (ppt)	341400	521200	344800	250000	739800	425200
Be (ppt)	5906	492	694	241	12578	5276
V (ppt)	144400	159520	262400	10436	572600	381400
Cr (ppt)	82360	56760	35140	19042	233600	80860
Co (ppt)	22000	2894	3074	9602	86980	20680
Ni (ppt)	69000	10380	9542	40300	224200	52800
Cu (ppt)	151020	44100	46440	152020	167180	109880
Zn (ppt)	Nd	54560	50120	69940	nd	nd
As (ppt)	68080	31760	171520	42820	284000	19040
Se (ppt)	39600	35400	27140	106340	65260	68680
Cd (ppt)	68	nd	nd	nd	175	nd
Ba (ppt)	126140	118660	160380	218600	421400	173500
Pb (ppt)	49000	2470	2642	1089	56880	31100
U (ppt)	507	660	528	18000	533	391

附表 2（續） 曾文溪流域土壤去離子水溶出相分析結果

標本	ZY186.6	ZY189.4	ZY193.5
Na (ppm)	129.72	91.56	116.76
Mg (ppm)	64.44	83.93	24.74
K (ppm)	80.92	46.78	36.01
Ca (ppm)	561.20	982.10	258.79
Mn (ppb)	344	nd	119
Fe (ppb)	236	nd	777
Sr (ppb)	1860	nd	1022
Li (ppt)	275800	347000	193800
Be (ppt)	241	140	291
V (ppt)	16706	7958	106460
Cr (ppt)	22080	16614	15626
Co (ppt)	3826	4534	1658
Ni (ppt)	23220	28580	8258
Cu (ppt)	79740	31880	31840
Zn (ppt)	80120	80360	59200
As (ppt)	24760	15568	28840
Se (ppt)	143920	16570	14028
Cd (ppt)	Nd	nd	nd
Ba (ppt)	255600	381000	111980
Pb (ppt)	1059	871	2584
U (ppt)	2450	1963	1686

附表 3 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	SF11.5	SF15.5	SF19.5	SF23.5	SF27.5	SF31.5
Na (ppm)	2626	2733	2128	3061	3102	5488
Mg (ppm)	648	620	503	543	659	1170
K (ppm)	211	213	159	188	211	366
Ca (ppm)	5838	5702	7046	6395	6573	7424
Mn (ppm)	139.73	142.64	212.32	180.32	146.77	222.88
Fe (ppm)	211.68	134.54	70.34	65.76	210.08	523.60
Sr (ppm)	18.64	19.02	26.35	24.98	22.72	28.60
Li (ppb)	191.0	172.7	179.6	126.3	130.1	148.9
Be (ppb)	24.5	16.0	27.8	25.8	19.3	31.0
V (ppb)	12.7	17.3	11.7	12.6	12.2	16.9
Cr (ppb)	55.1	57.4	59.7	48.5	59.8	65.6
Co (ppb)	446.4	233.4	369.5	260.1	299.4	704.4
Ni (ppb)	470.0	288.4	464.4	393.4	368.4	857.2
Cu (ppb)	347.5	160.1	208.8	235.9	378.4	966.4
Zn (ppb)	1229.2	534.8	604.0	513.6	923.2	1720.4
As (ppb)	45.9	69.2	76.0	70.4	26.7	30.5
Se (ppb)	26.2	32.1	22.7	28.0	31.9	63.0
Cd (ppb)	21.0	22.4	37.7	89.4	50.4	71.0
Ba (ppb)	574.0	286.6	1265.6	1147.2	559.2	1942.0
Pb (ppb)	4832.0	2823.6	12316.0	9860.0	2716.0	3259.2
U (ppb)	19.3	17.8	17.1	14.0	15.7	27.7

附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	SF191.5	SF195.5	SF195.8	SF199.5	SF247.5	SF251.5
Na (ppm)	217	258	465	379	282	343
Mg (ppm)	107	273	489	245	181	355
K (ppm)	36	39	17	63	55	63
Ca (ppm)	329	1486	2162	2659	9080	5232
Mn (ppm)	18.35	121.68	61.07	162.40	170.92	107.84
Fe (ppm)	67.37	52.19	233.60	107.20	56.40	168.84
Sr (ppm)	2.52	5.91	5.79	10.02	24.40	20.04
Li (ppb)	130.8	105.0	662.4	161.8	72.0	200.8
Be (ppb)	60.2	27.2	244.7	55.8	17.0	37.1
V (ppb)	32.4	7.1	453.6	34.4	25.0	6.6
Cr (ppb)	78.7	102.7	255.2	207.3	145.2	362.9
Co (ppb)	568.8	533.2	2933.6	502.4	141.2	422.5
Ni (ppb)	516.0	494.0	4224.0	533.2	183.7	596.8
Cu (ppb)	467.6	400.0	714.4	853.6	250.6	534.0
Zn (ppb)	1830.8	908.0	5368.0	2110.0	409.2	1892.4
As (ppb)	59.7	41.4	442.4	131.8	599.9	321.8
Se (ppb)	4.1	3.9	14.2	10.3	453.2	130.1
Cd (ppb)	45.6	10.9	81.1	17.2	11.4	10.1
Ba (ppb)	2234.4	1972.0	1312.0	4092.0	771.0	607.2
Pb (ppb)	1840.0	399.4	60.9	1420.0	162.1	116.1
U (ppb)	20.3	19.3	21.5	18.9	39.5	32.2

附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	SF255.5	SF257.5	SF258.5	SF261.5	SF263.5	SF267.5
Na (ppm)	497	432	1167	419	333	688
Mg (ppm)	610	443	757	385	434	692
K (ppm)	132	90	214	91	90	205
Ca (ppm)	5816	5880	6728	13088	5413	6470
Mn (ppm)	146.24	123.92	203.32	205.12	110.56	164.16
Fe (ppm)	166.00	129.60	264.52	41.41	159.60	156.19
Sr (ppm)	21.56	20.72	23.12	56.54	17.52	18.21
Li (ppb)	256.9	174.8	353.2	74.1	146.5	158.2
Be (ppb)	69.6	29.7	70.3	16.3	21.2	30.4
V (ppb)	nd	nd	nd	5.9	5.5	7.0
Cr (ppb)	158.4	38.7	171.0	65.4	74.6	85.2
Co (ppb)	722.9	481.1	947.4	355.4	284.5	640.8
Ni (ppb)	1122.7	747.0	1400.4	441.6	438.4	953.2
Cu (ppb)	723.8	610.2	1796.4	171.0	333.8	853.2
Zn (ppb)	2184.0	1500.0	3598.8	1015.6	950.8	1637.6
As (ppb)	238.9	159.7	177.4	60.2	33.4	79.1
Se (ppb)	13.9	104.9	57.9	15.1	8.9	11.4
Cd (ppb)	27.4	31.4	23.4	8.2	12.6	21.2
Ba (ppb)	815.4	789.7	1515.6	1972.8	917.6	1382.4
Pb (ppb)	97.1	202.9	83.5	237.8	139.1	195.3
U (ppb)	56.8	31.8	71.3	29.3	30.1	25.8

附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	SF269.5	SF271.5	SF2875	SF291.5	SF295.5	SF297.5
Na (ppm)	357	219	1058	377	553	192
Mg (ppm)	713	274	613	403	526	237
K (ppm)	121	61	187	74	97	32
Ca (ppm)	7742	3803	5880	5784	7456	9324
Mn (ppm)	179.52	128.96	179.00	111.60	140.96	215.40
Fe (ppm)	118.03	137.12	198.68	197.92	240.36	58.96
Sr (ppm)	22.24	14.14	19.04	16.80	21.72	29.88
Li (ppb)	91.4	82.4	315.1	155.4	160.4	84.9
Be (ppb)	24.4	18.9	69.9	29.7	43.8	18.4
V (ppb)	0.5	2.4	nd	nd	nd	nd
Cr (ppb)	65.9	74.2	271.4	361.7	139.2	288.8
Co (ppb)	410.0	138.8	805.6	287.6	468.0	163.2
Ni (ppb)	425.6	195.7	1292.4	625.3	738.0	175.9
Cu (ppb)	408.8	327.2	1630.8	610.7	710.3	126.6
Zn (ppb)	739.2	1418.0	3102.0	1652.4	2138.4	232.2
As (ppb)	13.8	11.8	160.6	55.1	87.3	62.0
Se (ppb)	10.4	10.0	127.0	92.4	83.0	23.4
Cd (ppb)	6.9	7.8	28.7	16.8	15.4	10.1
Ba (ppb)	1064.8	542.8	1237.2	637.9	659.9	819.2
Pb (ppb)	135.3	462.4	80.8	284.3	145.9	525.6
U (ppb)	17.2	11.2	56.2	33.2	32.4	32.6

附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	SF299.5	TS31.5	TS35.5	TS39.5	TS42.6	TS44.4
Na (ppm)	666	4020	4516	3840	1508	3620
Mg (ppm)	776	735	1326	811	478	867
K (ppm)	120	232	459	301	124	319
Ca (ppm)	7044	5708	7928	6112	5320	8056
Mn (ppm)	209.92	151.60	268.52	203.44	154.84	328.24
Fe (ppm)	388.64	110.64	304.68	167.00	80.96	85.88
Sr (ppm)	24.20	21.24	25.64	22.52	20.36	28.36
Li (ppb)	210.0	150.4	328.0	321.8	245.0	186.7
Be (ppb)	66.7	27.3	49.2	40.5	24.5	44.3
V (ppb)	nd	nd	14.4	nd	nd	nd
Cr (ppb)	368.5	299.2	98.1	395.8	499.3	415.8
Co (ppb)	818.3	539.2	1378.4	1242.0	722.2	1620.0
Ni (ppb)	1483.2	442.3	1328.8	922.9	609.1	1488.0
Cu (ppb)	1417.2	560.5	923.2	1140.5	493.9	1476.0
Zn (ppb)	3312.0	1126.7	2124.4	2185.2	956.8	2736.0
As (ppb)	84.9	37.6	30.6	43.6	44.0	29.8
Se (ppb)	nd	62.4	41.1	77.5	72.9	55.5
Cd (ppb)	34.0	79.0	55.2	103.2	115.3	98.3
Ba (ppb)	724.0	857.8	1392.0	701.2	743.3	951.6
Pb (ppb)	94.4	1323.6	375.0	1354.8	1232.4	898.8
U (ppb)	66.0	27.9	27.2	62.1	39.3	42.6



附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	TS201.5	TS203.5	TS207.5	TS209.5	TS211.5	TS215.5
Na (ppm)	915	179	119	755	216	542
Mg (ppm)	278	688	237	736	155	214
K (ppm)	449	63	nd	216	16	159
Ca (ppm)	1212	9365	3109	2176	772	762
Mn (ppm)	6.71	146.14	70.36	24.38	31.80	9.10
Fe (ppm)	47.42	47.18	48.92	73.17	65.00	120.80
Sr (ppm)	12.01	29.06	10.88	14.19	4.56	8.41
Li (ppb)	212.9	93.7	105.7	739.6	234.0	153.2
Be (ppb)	129.5	24.2	34.2	280.8	134.2	125.8
V (ppb)	23.9	0.5	nd	36.5	nd	5.7
Cr (ppb)	55.9	81.1	440.0	156.4	452.2	117.0
Co (ppb)	132.4	193.7	204.6	908.0	629.9	98.6
Ni (ppb)	315.6	341.7	261.7	1821.2	799.0	186.6
Cu (ppb)	391.1	306.0	468.2	536.0	1097.0	865.2
Zn (ppb)	556.8	486.0	825.8	1536.8	1077.2	608.8
As (ppb)	227.8	45.4	38.0	179.9	231.1	46.8
Se (ppb)	62.8	14.0	19.4	28.3	54.3	39.1
Cd (ppb)	33.2	14.9	20.8	23.4	30.5	6.0
Ba (ppb)	7032.0	2350.0	1974.0	1033.2	3399.6	8676.0
Pb (ppb)	1163.2	66.8	202.8	1492.8	574.1	3042.4
U (ppb)	16.7	35.4	25.1	43.1	45.8	18.0

附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	TS219.5	TS223.5	ZY10.7	ZY26.0	ZY26.7	ZY27.5
Na (ppm)	619	317	81	41	174	88
Mg (ppm)	724	214	470	212	1424	491
K (ppm)	199	73	37	47	384	65
Ca (ppm)	6419	7595	6884	1249	5874	7082
Mn (ppm)	210.40	126.93	114.92	28.20	292.96	194.88
Fe (ppm)	69.41	191.68	19.96	10.44	13.76	90.18
Sr (ppm)	19.60	22.93	18.16	6.76	22.29	26.08
Li (ppb)	127.3	62.8	115.9	321.2	340.4	91.8
Be (ppb)	38.7	15.0	30.8	73.8	50.0	16.6
V (ppb)	2.5	11.3	nd	nd	2.3	5.2
Cr (ppb)	72.3	95.8	220.8	250.9	99.6	88.2
Co (ppb)	464.4	137.3	428.5	191.6	700.8	209.5
Ni (ppb)	518.0	248.8	376.7	409.1	1242.8	293.7
Cu (ppb)	383.7	405.2	305.8	338.0	598.0	174.1
Zn (ppb)	1050.4	742.0	403.8	nd	1783.6	426.8
As (ppb)	53.6	39.3	36.2	69.6	55.0	33.1
Se (ppb)	12.1	13.8	nd	nd	12.9	13.2
Cd (ppb)	27.5	8.6	40.7	10.1	25.1	15.7
Ba (ppb)	2242.4	2365.6	4645.2	6896.4	1800.0	951.6
Pb (ppb)	103.9	277.1	137.8	127.0	79.3	271.4
U (ppb)	47.8	17.5	20.8	7.2	31.0	18.0

附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	ZY30.7	ZY31.8	ZY34.7	ZY38.7	ZY42.7	ZY59.7
Na (ppm)	102	176	96	107	109	3017
Mg (ppm)	895	327	366	917	390	1094
K (ppm)	155	41	66	226	92	350
Ca (ppm)	7157	5634	5155	8458	7386	8420
Mn (ppm)	197.28	144.99	133.81	179.36	131.52	246.76
Fe (ppm)	25.18	37.79	42.62	73.09	66.51	141.64
Sr (ppm)	24.13	20.18	19.60	29.28	24.46	26.20
Li (ppb)	151.3	69.9	103.9	142.7	91.4	338.2
Be (ppb)	28.2	12.6	20.9	24.2	13.6	62.5
V (ppb)	nd	8.3	4.5	nd	1.6	nd
Cr (ppb)	4.0	nd	nd	2.5	nd	344.0
Co (ppb)	447.6	161.4	188.0	335.4	152.8	890.0
Ni (ppb)	498.8	182.7	240.2	443.6	188.6	945.2
Cu (ppb)	291.7	119.4	156.1	351.5	138.1	534.0
Zn (ppb)	744.4	336.6	688.4	869.6	266.2	1855.2
As (ppb)	30.7	107.4	75.1	17.6	35.9	62.4
Se (ppb)	19.1	14.7	11.9	18.4	15.6	64.2
Cd (ppb)	25.9	22.6	62.6	21.1	7.1	120.4
Ba (ppb)	1227.2	1228.0	1234.8	1615.6	2280.4	3254.4
Pb (ppb)	239.9	4576.0	17648.0	278.8	816.4	346.7
U (ppb)	30.2	6.6	18.5	39.2	19.9	61.3

附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	ZY62.7	ZY65.0	ZY66.0	ZY66.7	ZY70.7	ZY74.2
Na (ppm)	3276	37	98	1406	2445	1513
Mg (ppm)	1108	293	690	752	894	2167
K (ppm)	441	18	73	232	202	17
Ca (ppm)	7668	5796	8304	7168	7856	668
Mn (ppm)	278.24	76.04	129.44	205.44	303.48	208.40
Fe (ppm)	291.96	17.04	12.60	78.00	297.32	105.56
Sr (ppm)	31.04	15.92	20.12	20.88	26.72	0.28
Li (ppb)	630.5	165.8	313.2	232.0	240.1	4810.8
Be (ppb)	79.8	37.8	60.7	50.5	55.5	420.1
V (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	738.6
Cr (ppb)	306.1	261.8	474.0	188.3	379.1	926.0
Co (ppb)	1177.8	135.6	557.2	310.0	1027.4	6406.8
Ni (ppb)	1572.0	113.8	354.6	389.6	1490.4	11252.4
Cu (ppb)	964.6	19.9	254.3	416.8	1491.6	1306.8
Zn (ppb)	2858.4	nd	193.8	616.6	2985.6	27024.0
As (ppb)	108.6	36.6	75.6	29.0	35.8	2469.6
Se (ppb)	67.3	42.2	10.8	35.9	26.5	48.5
Cd (ppb)	30.0	28.7	53.9	192.0	221.3	196.1
Ba (ppb)	5052.0	4196.4	4497.6	3843.6	1855.2	36.4
Pb (ppb)	32.0	346.6	484.9	810.5	259.8	nd
U (ppb)	51.6	18.2	30.3	38.8	45.3	337.4

附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	ZY98.7	ZY99.3	ZY103.5	ZY104.5	ZY107.5	ZY165.3
Na (ppm)	1234	242	253	370	445	221
Mg (ppm)	595	73	77	121	208	352
K (ppm)	313	61	58	73	81	67
Ca (ppm)	2414	534	463	507	906	5486
Mn (ppm)	124.40	32.05	43.14	22.78	50.96	130.26
Fe (ppm)	34.85	93.76	51.87	52.06	19.77	45.17
Sr (ppm)	11.99	3.46	2.10	2.69	6.60	17.84
Li (ppb)	273.2	60.2	48.2	74.2	200.4	113.9
Be (ppb)	88.4	60.3	71.3	101.3	137.3	23.6
V (ppb)	19.7	4.5	95.4	170.1	1.1	1.3
Cr (ppb)	15.5	58.7	85.1	30.0	33.1	nd
Co (ppb)	372.5	287.8	282.4	1274.8	177.9	325.5
Ni (ppb)	952.4	286.2	137.7	853.2	283.8	340.7
Cu (ppb)	836.8	380.2	512.0	549.6	249.8	347.9
Zn (ppb)	2451.2	751.6	647.6	1024.0	294.7	1125.6
As (ppb)	217.7	19.4	68.1	224.8	157.5	26.2
Se (ppb)	28.0	5.3	4.7	9.4	6.8	8.7
Cd (ppb)	26.2	11.0	25.7	66.8	19.7	29.7
Ba (ppb)	2564.4	4684.0	2807.6	2468.8	13564.0	1507.6
Pb (ppb)	166.9	361.1	762.8	2164.4	827.6	554.4
U (ppb)	24.8	21.9	27.8	19.9	23.8	31.1

附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	ZY168.5	ZY171.8	ZY173.7	ZY177.6	ZY179.7	ZY181.5
Na (ppm)	248	109	296	134	267	131
Mg (ppm)	264	82	1427	394	329	122
K (ppm)	64	87	199	94	214	117
Ca (ppm)	9381	799	21312	4058	5488	948
Mn (ppm)	161.92	11.52	324.12	99.92	305.76	39.18
Fe (ppm)	53.62	12.96	13.60	10.79	30.32	2.70
Sr (ppm)	24.54	4.39	55.60	12.86	16.03	6.09
Li (ppb)	91.9	259.0	261.0	218.5	270.4	474.8
Be (ppb)	21.2	39.3	29.5	48.2	51.5	24.7
V (ppb)	nd	27.7	8.0	19.4	6.7	55.4
Cr (ppb)	nd	nd	15.9	nd	2.8	nd
Co (ppb)	193.6	59.5	87.8	73.8	270.7	33.0
Ni (ppb)	272.1	156.0	230.5	166.3	369.3	123.2
Cu (ppb)	267.3	120.4	222.1	212.1	355.0	98.2
Zn (ppb)	874.8	122.0	336.2	246.6	570.8	68.9
As (ppb)	20.4	98.2	51.8	163.0	47.6	281.4
Se (ppb)	13.3	14.9	32.0	11.6	36.6	17.3
Cd (ppb)	58.4	11.4	43.8	37.6	31.3	22.7
Ba (ppb)	1964.4	2957.2	6004.0	4744.0	2279.6	5228.0
Pb (ppb)	2608.8	1360.8	2374.8	1647.6	258.8	627.6
U (ppb)	30.4	5.1	19.6	8.6	99.2	3.8

附表 3（續） 曾文溪流域可交換相分析結果

標本	ZY185.6	ZY186.6	ZY189.4	ZY193.5
Na (ppm)	178	183	123	168
Mg (ppm)	102	704	622	400
K (ppm)	80	192	100	102
Ca (ppm)	698	7453	12430	8253
Mn (ppm)	14.65	181.92	155.47	132.16
Fe (ppm)	16.66	25.49	63.54	50.14
Sr (ppm)	4.49	21.33	35.25	23.81
Li (ppb)	248.9	353.8	135.4	113.4
Be (ppb)	56.0	34.8	21.3	17.8
V (ppb)	1.9	72.1	0.0	6.5
Cr (ppb)	14.5	nd	12.6	22.5
Co (ppb)	565.2	90.4	371.8	150.4
Ni (ppb)	1090.0	204.9	427.6	214.3
Cu (ppb)	607.6	117.5	368.6	268.1
Zn (ppb)	1338.0	197.4	815.6	429.6
As (ppb)	49.2	55.0	27.3	20.0
Se (ppb)	61.5	31.6	17.8	13.3
Cd (ppb)	25.5	3.8	29.7	17.1
Ba (ppb)	2892.0	5576.0	2427.6	3416.0
Pb (ppb)	142.0	670.8	293.8	980.8
U (ppb)	44.5	5.5	41.0	33.6

附表 4 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	SF11.5	SF15.5	SF19.5	SF23.5	SF27.5	SF31.5
Na (ppm)	38.34	9.24	12.06	29.44	33.86	35.62
Mg (ppm)	440.64	441.00	350.40	393.60	584.64	710.08
K (ppm)	60.99	30.72	29.04	36.93	55.62	100.80
Ca (ppm)	1472	1355	1466	1433	1742	1873
Mn (ppm)	36	45	44	39	45	52
Fe (ppm)	2504	2187	1600	1808	3198	3933
Sr (ppb)	3040	2784	4000	3712	3750	3648
Li (ppb)	1384	1326	1315	1170	1444	1350
Be (ppb)	104	106	114	123	133	128
V (ppb)	1687	1851	1917	1832	2383	2812
Cr (ppb)	923	936	688	757	1186	1310
Co (ppb)	1769	1992	2242	2136	2302	2657
Ni (ppb)	2534	2372	3204	3025	3003	3431
Cu (ppb)	1103	657	1449	1392	1743	3674
Zn (ppb)	8400	8488	7808	8004	9456	10544
As (ppb)	567	628	764	744	440	411
Se (ppb)	321	379	396	375	415	396
Rb (ppb)	639	616	464	512	730	875
Cd (ppb)	2	3	9	14	10	13
Ba (ppb)	1709	926	1594	1406	2780	4124
Pb (ppb)	9432	6020	11408	8520	9436	13672
U (ppb)	41	42	52	49	38	45
Th (ppb)	455	250	179	175	250	166



附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	SF191.5	SF195.5	SF195.8	SF199.5	SF261.5	SF263.5
Na (ppm)	nd	11.10	27.39	34.89	37.47	15.87
Mg (ppm)	128.25	186.24	194.43	200.73	461.76	510.72
K (ppm)	15.27	14.10	23.13	47.64	9.06	37.06
Ca (ppm)	716	843	1134	884	10941	1377
Mn (ppm)	8	52	6	56	255	40
Fe (ppm)	2423	3766	4397	4506	4345	3962
Sr (ppb)	448	1024	2592	1184	41548	2144
Li (ppb)	624	764	1091	843	360	1376
Be (ppb)	64	102	162	100	85	128
V (ppb)	2794	2992	11696	4360	6412	4360
Cr (ppb)	1800	1967	2038	2380	1147	1998
Co (ppb)	1651	2496	1228	3335	1565	2882
Ni (ppb)	2350	2776	3250	3622	1992	3108
Cu (ppb)	1446	1673	2654	3086	2668	2149
Zn (ppb)	9700	10076	9080	13052	13156	12976
As (ppb)	826	916	6992	1148	1199	725
Se (ppb)	306	304	651	354	518	445
Rb (ppb)	695	629	560	721	400	906
Cd (ppb)	13	3	33	7	18	7
Ba (ppb)	3215	2579	12728	4096	5492	3006
Pb (ppb)	5816	4416	2471	7124	11040	5996
U (ppb)	38	41	67	36	48	59
Th (ppb)	129	119	74	72	175	237

附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	SF267.5	SF269.5	SF271.5	TS15.5	TS18.5	TS20.8
Na (ppm)	39.04	20.54	11.39	88.97	46.22	57.95
Mg (ppm)	555.84	629.12	349.76	651.42	535.48	624.14
K (ppm)	79.68	62.02	33.70	161.55	119.53	144.78
Ca (ppm)	1827	2002	1316	1435	1637	1616
Mn (ppm)	82	39	35	90	75	87
Fe (ppm)	5709	5008	3438	6833	6915	6879
Sr (ppb)	3360	3200	2790	5324	6556	6578
Li (ppb)	1715	1086	640	2934	2498	2714
Be (ppb)	164	127	82	256	223	242
V (ppb)	4304	3168	3523	4640	4332	4912
Cr (ppb)	2419	1712	1218	2434	1874	2270
Co (ppb)	4128	2070	1751	4396	3999	3855
Ni (ppb)	4808	2876	2136	4852	5612	4984
Cu (ppb)	4932	3135	2254	5296	9104	7304
Zn (ppb)	17192	12552	11720	18584	18856	18880
As (ppb)	1825	513	516	785	1093	1193
Se (ppb)	613	514	346	826	588	659
Rb (ppb)	1332	1006	511	2213	1405	1708
Cd (ppb)	15	3	2	9	1	36
Ba (ppb)	3482	2875	1713	7688	3341	8440
Pb (ppb)	7848	4904	6604	11584	17284	17568
U (ppb)	61	44	20	115	103	94
Th (ppb)	341	434	252	377	210	154

附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	TS23.5	TS27.5	TS31.5	TS35.5	TS39.5	TS42.6
Na (ppm)	15.96	45.82	38.58	80.13	26.78	22.56
Mg (ppm)	358.56	539.28	504.60	677.76	560.64	460.48
K (ppm)	32.26	107.78	80.73	175.94	98.18	63.55
Ca (ppm)	1019	1371	2035	1827	1754	1628
Mn (ppm)	31	57	52	67	70	61
Fe (ppm)	2114	4757	3621	6477	4314	3120
Sr (ppb)	2640	4440	5310	5152	5160	4950
Li (ppb)	1548	2713	1420	2099	2080	1517
Be (ppb)	117	201	134	270	209	126
V (ppb)	1978	4872	2118	4684	3749	3107
Cr (ppb)	886	1946	1061	2760	1392	924
Co (ppb)	2826	3706	2284	3828	3508	2698
Ni (ppb)	3286	4276	2624	4600	3630	2940
Cu (ppb)	1316	4600	2420	6620	3929	1918
Zn (ppb)	9788	16704	10432	18228	13392	10300
As (ppb)	820	1271	342	790	627	594
Se (ppb)	370	642	384	807	503	398
Rb (ppb)	576	1446	790	2064	1340	811
Cd (ppb)	nd	5	3	20	10	15
Ba (ppb)	1027	2364	3204	5220	2500	1701
Pb (ppb)	5896	15780	13252	9680	15016	10000
U (ppb)	33	60	40	82	63	50
Th (ppb)	150	105	116	123	67	47

附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	TS44.4	TS47.5	TS52.5	TS53.5	TS55.5	TS59.5
Na (ppm)	37.79	12.34	22.99	24.67	62.38	42.70
Mg (ppm)	465.60	343.44	382.32	400.08	679.44	603.60
K (ppm)	125.18	26.23	49.18	57.14	168.77	102.22
Ca (ppm)	1912	879	944	938	1509	2602
Mn (ppm)	84	35	43	42	101	65
Fe (ppm)	4509	2592	3343	3566	7757	6890
Sr (ppb)	6912	2592	3024	3000	5136	6432
Li (ppb)	1996	1628	2064	2052	3757	2648
Be (ppb)	241	95	131	135	314	208
V (ppb)	2320	2332	3465	3632	6484	6256
Cr (ppb)	1163	914	1321	1336	2688	2384
Co (ppb)	3810	2531	3010	2900	6416	3889
Ni (ppb)	4196	3057	3570	3250	7180	4604
Cu (ppb)	6916	969	2252	2375	9728	7200
Zn (ppb)	17316	9224	12016	11748	23824	18544
As (ppb)	715	1037	1049	1039	2310	1251
Se (ppb)	647	342	427	420	639	598
Rb (ppb)	1385	592	904	964	1778	1608
Cd (ppb)	20	nd	7	nd	7	6
Ba (ppb)	11336	1088	1311	1180	2582	1392
Pb (ppb)	20652	5740	10320	7636	27100	14948
U (ppb)	52	35	50	54	76	72
Th (ppb)	58	128	102	85	74	119

附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	TS191.5	TS195.5	TS196.5	TS198.5	TS199.5	TS201.5
Na (ppm)	0.65	24.55	nd	nd	nd	20.57
Mg (ppm)	87.62	160.34	175.27	54.31	67.22	297.84
K (ppm)	4.15	48.02	24.00	23.71	13.18	120.43
Ca (ppm)	355	735	712	494	415	1677
Mn (ppm)	37	29	26	4	4	11
Fe (ppm)	4702	5078	3770	3482	4366	7725
Sr (ppb)	192	1392	840	1224	nd	10496
Li (ppb)	765	956	880	194	323	646
Be (ppb)	166	121	91	126	73	317
V (ppb)	4624	3156	3156	7688	4668	6656
Cr (ppb)	2592	1879	1959	2616	2291	2408
Co (ppb)	1381	2510	2736	673	1340	1089
Ni (ppb)	1846	2667	2973	1069	1865	2156
Cu (ppb)	2314	2200	1830	3065	2106	8716
Zn (ppb)	10144	11300	11728	4840	10332	15408
As (ppb)	1418	673	926	1820	729	2382
Se (ppb)	390	320	264	828	284	738
Rb (ppb)	565	674	665	1562	647	2970
Cd (ppb)	nd	nd	nd	1	3	72
Ba (ppb)	5364	5320	3478	27312	3147	25416
Pb (ppb)	7164	5724	6236	10164	8904	18004
U (ppb)	12	29	28	129	19	210
Th (ppb)	88	118	101	63	85	33

附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	TS203.5	TS207.5	TS209.5	TS211.5	TS215.5	TS219.5
Na (ppm)	13.92	nd	9.18	7.50	2.59	15.97
Mg (ppm)	571.20	208.38	597.90	97.20	236.06	477.12
K (ppm)	37.25	30.34	191.58	26.91	116.48	66.94
Ca (ppm)	1983	1187	2347	912	1297	1836
Mn (ppm)	81	36	35	28	22	81
Fe (ppm)	4752	4434	7743	2962	7754	5120
Sr (ppb)	4440	2550	9630	2910	4608	4160
Li (ppb)	998	780	1208	434	536	1324
Be (ppb)	151	100	256	109	258	189
V (ppb)	3680	2583	7460	3352	5628	3638
Cr (ppb)	2656	1709	4284	1587	3802	2344
Co (ppb)	2848	1744	2742	1558	848	2648
Ni (ppb)	3510	2060	3927	1672	2304	3650
Cu (ppb)	3186	2152	3638	2127	7948	3506
Zn (ppb)	13760	10944	16036	7976	11088	16212
As (ppb)	918	577	1640	1455	1054	668
Se (ppb)	585	345	719	430	851	696
Rb (ppb)	1059	728	3024	822	930	1363
Cd (ppb)	7	nd	30	0	6	16
Ba (ppb)	4668	4552	22328	18580	20956	7060
Pb (ppb)	4832	6112	13656	7516	12140	7164
U (ppb)	71	34	117	62	58	100
Th (ppb)	115	85	103	45	76	355

附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	TS223.5	TS227.5	TS230.5	TS231.5	TS233.5	ZY26.7
Na (ppm)	18.94	nd	32.09	2.98	3.77	15.78
Mg (ppm)	245.25	156.91	630.72	424.56	276.96	784.32
K (ppm)	76.61	8.30	123.26	20.33	18.84	207.65
Ca (ppm)	1836	1697	1657	2070	1567	2385
Mn (ppm)	36	43	129	71	44	202
Fe (ppm)	3328	3166	8695	4399	3876	6998
Sr (ppb)	3296	4392	5112	7176	4368	6400
Li (ppb)	533	1025	2947	794	667	1650
Be (ppb)	48	68	251	97	102	222
V (ppb)	2145	1996	5636	3975	4800	4696
Cr (ppb)	1549	1459	3106	971	788	3197
Co (ppb)	1602	2444	4592	2576	1992	4648
Ni (ppb)	2186	2690	5272	2874	2291	4860
Cu (ppb)	1697	1152	6856	1642	1960	7116
Zn (ppb)	9456	9108	23472	10992	9244	21964
As (ppb)	526	324	933	254	351	509
Se (ppb)	314	306	776	362	331	874
Rb (ppb)	561	560	2400	410	387	1919
Cd (ppb)	3	nd	23	nd	nd	21
Ba (ppb)	2933	3303	6768	2368	2377	7936
Pb (ppb)	4100	4612	12100	7248	11144	8160
U (ppb)	49	47	89	31	20	104
Th (ppb)	214	159	193	172	148	122

附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	ZY27.5	ZY30.7	ZY31.8	ZY34.7	ZY38.7	ZY42.7
Na (ppm)	11.46	42.43	nd	nd	16.73	4.82
Mg (ppm)	536.70	618.96	219.24	222.84	748.08	463.68
K (ppm)	34.77	112.39	12.50	16.61	99.58	23.95
Ca (ppm)	1715	2355	2221	1716	2875	1589
Mn (ppm)	51	123	57	39	105	24
Fe (ppm)	3039	3910	812	1070	4015	1461
Sr (ppb)	3810	6336	6192	4608	7416	2736
Li (ppb)	801	1445	462	663	1632	921
Be (ppb)	106	220	48	78	197	54
V (ppb)	2453	2436	1011	1351	3021	1379
Cr (ppb)	919	1273	158	298	1598	676
Co (ppb)	2090	2828	1389	1358	3172	1235
Ni (ppb)	2734	2792	1718	1758	3274	1502
Cu (ppb)	1405	3066	1297	1077	4084	1014
Zn (ppb)	9572	11576	4428	6400	15168	6192
As (ppb)	457	321	626	502	281	405
Se (ppb)	384	690	331	308	877	387
Rb (ppb)	572	1651	299	442	1975	610
Cd (ppb)	8	15	8	44	11	nd
Ba (ppb)	2032	5464	1886	3803	6452	3048
Pb (ppb)	4480	8632	6520	19912	8232	4244
U (ppb)	34	75	24	36	112	48
Th (ppb)	190	307	174	108	746	240



附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	ZY98.7	ZY99.3	ZY103.5	ZY104.5	ZY107.5	ZY165.3
Na (ppm)	39.43	nd	46.03	1.54	2.62	3.54
Mg (ppm)	534.48	50.38	26.62	81.50	110.22	271.70
K (ppm)	177.43	25.08	45.91	21.55	39.62	28.78
Ca (ppm)	1549	433	456	665	784	1191
Mn (ppm)	278	34	13	21	144	47
Fe (ppm)	8458	3238	1499	1592	3791	2686
Sr (ppb)	7224	nd	1056	nd	2530	2134
Li (ppb)	2006	157	56	184	194	1042
Be (ppb)	299	46	70	92	367	96
V (ppb)	5668	2235	2009	3395	3997	2014
Cr (ppb)	2916	908	1231	919	1720	1146
Co (ppb)	4944	649	413	1992	740	1882
Ni (ppb)	5912	616	233	1925	982	2076
Cu (ppb)	7860	1163	1256	2263	3016	2007
Zn (ppb)	23804	2842	1515	4796	3978	10488
As (ppb)	795	157	461	807	532	308
Se (ppb)	872	280	303	459	962	357
Rb (ppb)	3096	646	716	1466	2174	722
Cd (ppb)	17	nd	0	30	23	9
Ba (ppb)	26488	5036	6376	11552	38848	4808
Pb (ppb)	10340	3496	4504	11616	9712	6140
U (ppb)	74	36	58	68	198	43
Th (ppb)	196	95	143	72	34	182

附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	ZY168.5	ZY171.8	ZY173.7	ZY177.6	ZY179.7	ZY181.5
Na (ppm)	nd	nd	nd	0.50	nd	nd
Mg (ppm)	222.42	139.01	364.80	129.89	231.07	148.82
K (ppm)	12.14	40.80	62.33	61.06	97.01	91.94
Ca (ppm)	2660	1023	2923	1115	2274	1082
Mn (ppm)	73	22	100	33	234	62
Fe (ppm)	2600	1151	702	804	4898	451
Sr (ppb)	6336	3384	7728	2520	5952	3336
Li (ppb)	506	545	648	483	988	408
Be (ppb)	44	59	109	83	279	90
V (ppb)	1011	1181	2623	1630	3316	1982
Cr (ppb)	596	267	349	338	1343	276
Co (ppb)	1359	478	764	521	1854	411
Ni (ppb)	1340	706	982	763	1944	665
Cu (ppb)	1324	1782	3260	2075	3220	2536
Zn (ppb)	7168	3676	4960	4132	11664	4076
As (ppb)	237	201	264	242	246	276
Se (ppb)	286	415	711	470	573	628
Rb (ppb)	462	354	562	793	862	496
Cd (ppb)	23	4	12	12	27	25
Ba (ppb)	4400	10436	14760	9752	18544	26892
Pb (ppb)	10624	9052	14456	8092	10476	11356
U (ppb)	40	27	64	36	253	26
Th (ppb)	189	68	207	97	82	59

附表 4（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相分析結果

標本	ZY185.6	ZY186.6	ZY189.4	ZY193.5
Na (ppm)	nd	0.67	4.31	8.79
Mg (ppm)	175.13	367.92	586.32	418.04
K (ppm)	44.64	94.75	45.39	53.00
Ca (ppm)	1044	1598	2040	1847
Mn (ppm)	9	114	56	32
Fe (ppm)	554	4670	3094	2890
Sr (ppb)	1776	3584	3752	3528
Li (ppb)	521	2260	1090	802
Be (ppb)	60	228	81	69
V (ppb)	1173	5048	2591	2077
Cr (ppb)	395	2178	1303	1176
Co (ppb)	459	4144	1593	1225
Ni (ppb)	820	8872	1952	1484
Cu (ppb)	953	6172	1886	1714
Zn (ppb)	3794	20988	8280	6960
As (ppb)	189	502	484	196
Se (ppb)	858	795	488	378
Rb (ppb)	764	1908	861	679
Cd (ppb)	nd	1106	9	nd
Ba (ppb)	11032	14140	5872	4520
Pb (ppb)	4320	13004	6340	6240
U (ppb)	27	102	75	52
Th (ppb)	102	283	301	242

附表 5 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	SF11.5	SF15.5	SF19.5	SF23.5	SF27.5	SF31.5
Na (ppm)	35.41	29.44	31.77	27.40	36.41	53.32
Mg (ppm)	282.72	284.04	294.78	296.46	311.46	397.02
K (ppm)	62.88	54.97	64.98	47.04	62.40	91.08
Ca (ppm)	95.82	64.44	58.06	56.75	58.93	57.31
Mn (ppm)	20.76	21.48	22.08	20.84	23.56	28.04
Fe (ppm)	401.2	335.2	302.8	243.2	508.0	915.2
Sr (ppb)	520	520	640	480	560	880
Li (ppb)	828	797	794	767	778	1180
Be (ppb)	15	16	27	17	33	36
V (ppb)	949	867	741	917	747	48
Cr (ppb)	nd	nd	1717	12892	3816	12044
Co (ppb)	347	395	362	907	409	505
Ni (ppb)	2282	1248	1286	1774	1352	1650
Cu (ppb)	95	177	177	2195	99	464
Zn (ppb)	1038	924	1327	1427	942	1429
As (ppb)	222	108	105	202	36	64
Se (ppb)	92	59	39	45	14	nd
Rb (ppb)	189	159	157	132	193	290
Cd (ppb)	34	55	9	60	43	51
Ba (ppb)	1321	nd	33	nd	214	408
Pb (ppb)	3225	1289	2014	1034	946	1688
U (ppb)	23	18	29	23	16	24
Th (ppb)	107	147	225	243	211	408

附表 5（續） 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	SF191.5	SF195.5	SF195.8	SF199.5	SF261.5	SF263.5
Na (ppm)	21.11	23.54	144.36	25.76	32.52	56.40
Mg (ppm)	172.68	179.46	356.16	193.98	289.98	309.96
K (ppm)	45.52	39.66	71.28	42.72	50.57	62.70
Ca (ppm)	47.62	46.81	98.70	48.55	420.18	43.13
Mn (ppm)	18.36	14.40	20.36	23.16	36.16	26.64
Fe (ppm)	422.4	319.8	1810.8	484.4	615.2	651.2
Sr (ppb)	520	280	5160	720	2160	520
Li (ppb)	765	684	1842	824	645	929
Be (ppb)	17	28	78	22	19	38
V (ppb)	514	531	2065	658	712	715
Cr (ppb)	nd	11308	9628	8276	7164	13464
Co (ppb)	659	595	708	581	650	480
Ni (ppb)	1336	1504	1820	2029	1336	1402
Cu (ppb)	113	64	2860	241	160	27
Zn (ppb)	1358	1006	2326	2828	1596	1299
As (ppb)	25	61	318	73	77	61
Se (ppb)	70	nd	129	39	5	30
Rb (ppb)	138	114	265	128	131	212
Cd (ppb)	64	30	26	60	43	9
Ba (ppb)	nd	nd	137	504	nd	nd
Pb (ppb)	1004	547	254	1625	1626	527
U (ppb)	16	14	156	18	19	14
Th (ppb)	274	210	544	272	269	263

附表 5（續） 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	SF267.5	SF269.5	SF271.5	TS15.5	TS20.8	TS23.5
Na (ppm)	52.91	36.20	24.50	877.88	925.82	938.52
Mg (ppm)	388.98	304.92	219.00	97.27	98.26	73.30
K (ppm)	90.60	77.16	50.02	1205.30	1264.80	1305.72
Ca (ppm)	68.10	52.55	59.92	23.73	27.06	19.15
Mn (ppm)	34.52	25.60	19.20	749.02	919.70	387.00
Fe (ppm)	1372.4	992.4	380.8	7.4	8.5	9.5
Sr (ppb)	800	720	360	2687	2294	989
Li (ppb)	1366	1086	667	111	81	37
Be (ppb)	44	23	20	1301	399	833
V (ppb)	86	710	397	2359	2616	786
Cr (ppb)	12556	16604	17352	1063	856	394
Co (ppb)	602	530	356	2843	2485	1431
Ni (ppb)	1924	1708	1269	5243	5851	5303
Cu (ppb)	454	175	111	5760	7089	4266
Zn (ppb)	1921	1830	1176	254	319	248
As (ppb)	179	46	45	56	97	26
Se (ppb)	30	2	78	739	626	288
Rb (ppb)	395	369	150	23	34	12
Cd (ppb)	64	13	39	17068	16568	17374
Ba (ppb)	202	104	nd	nd	nd	nd
Pb (ppb)	870	687	1134	63	65	22
U (ppb)	31	14	11	2249	2133	246
Th (ppb)	591	370	292	nd	nd	nd

附表 5（續） 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	TS27.5	TS31.5	TS35.5	TS39.5	TS42.6	TS44.4
Na (ppm)	839.80	36.91	70.92	51.38	30.16	53.17
Mg (ppm)	63.85	281.64	569.58	400.50	288.42	403.98
K (ppm)	1135.60	72.60	120.00	85.26	58.19	107.76
Ca (ppm)	19.86	72.96	128.10	84.42	66.30	58.00
Mn (ppm)	767.38	21.60	39.92	32.32	20.08	29.80
Fe (ppm)	6.9	654.0	1873.2	1006.0	526.0	1217.2
Sr (ppb)	1869	560	1520	800	520	1040
Li (ppb)	63	896	2279	1801	1060	1790
Be (ppb)	464	20	55	45	26	58
V (ppb)	612	666	91	5	918	nd
Cr (ppb)	626	15728	23784	22192	22244	21836
Co (ppb)	1751	382	748	554	441	640
Ni (ppb)	5277	2146	2734	2054	1473	2079
Cu (ppb)	4774	207	716	420	120	628
Zn (ppb)	330	1450	2364	1339	907	1776
As (ppb)	40	46	73	60	59	36
Se (ppb)	479	45	67	16	nd	118
Rb (ppb)	51	258	670	416	223	515
Cd (ppb)	15759	26	43	22	39	39
Ba (ppb)	nd	148	292	nd	77	1288
Pb (ppb)	38	1228	1994	1016	750	1997
U (ppb)	781	17	51	44	28	34
Th (ppb)	nd	283	943	636	330	730

附表 5（續） 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	TS47.5	TS52.5	TS53.5	TS55.5	TS59.5	TS191.5
Na (ppm)	867.96	897.48	977.50	891.48	913.24	927.00
Mg (ppm)	52.78	63.97	165.34	102.31	93.26	53.68
K (ppm)	1184.40	1270.44	1302.54	1505.52	3502.00	1361.52
Ca (ppm)	17.10	18.22	18.43	20.43	21.22	25.09
Mn (ppm)	323.06	462.96	551.14	757.86	1227.74	402.12
Fe (ppm)	7.6	7.7	7.8	7.9	11.3	7.1
Sr (ppb)	953	953	751	1260	1010	345
Li (ppb)	53	34	35	60	46	26
Be (ppb)	738	639	188	nd	nd	78
V (ppb)	1086	nd	nd	nd	nd	nd
Cr (ppb)	389	357	318	420	472	328
Co (ppb)	1173	1414	810	1483	1346	559
Ni (ppb)	4874	3740	2972	3275	3107	2930
Cu (ppb)	3208	1748	5991	1203	1802	615
Zn (ppb)	241	180	154	169	166	123
As (ppb)	15	nd	nd	nd	nd	nd
Se (ppb)	296	285	303	300	316	175
Rb (ppb)	nd	nd	11	nd	nd	18
Cd (ppb)	16150	12967	10452	9914	9724	11347
Ba (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Pb (ppb)	26	25	25	37	29	10
U (ppb)	517	825	52	773	743	448
Th (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	nd



附表 5（續） 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	TS195.5	TS196.5	TS198.5	TS199.5	TS201.5	TS203.5
Na (ppm)	910.86	871.76	921.06	956.76	85.20	32.02
Mg (ppm)	68.75	60.55	75.58	74.60	499.80	347.28
K (ppm)	1254.60	1272.96	2407.20	1439.90	623.40	76.62
Ca (ppm)	16.69	18.43	15.33	14.59	148.32	63.06
Mn (ppm)	488.58	452.54	761.26	507.28	58.24	31.40
Fe (ppm)	7.1	8.5	9.2	8.5	3380.0	895.2
Sr (ppb)	363	259	714	181	2760	880
Li (ppb)	30	27	28	26	2888	1122
Be (ppb)	221	15	nd	nd	145	36
V (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	1212
Cr (ppb)	417	351	424	369	32544	24824
Co (ppb)	608	617	803	629	1598	698
Ni (ppb)	2743	2351	3241	2448	3745	2462
Cu (ppb)	777	269	1284	178	4324	173
Zn (ppb)	81	41	74	44	7216	1583
As (ppb)	nd	nd	nd	nd	66	49
Se (ppb)	168	137	293	150	11	33
Rb (ppb)	nd	nd	nd	6	2449	369
Cd (ppb)	10509	9299	10390	9571	13	89
Ba (ppb)	nd	nd	nd	nd	3170	376
Pb (ppb)	13	12	32	13	2569	1232
U (ppb)	605	434	582	415	337	26
Th (ppb)	nd	nd	nd	nd	1404	426

附表 5（續） 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	TS207.5	TS209.5	TS211.5	TS215.5	TS219.5	TS223.5
Na (ppm)	27.53	51.88	33.52	1045.20	1110.00	1139.60
Mg (ppm)	220.74	768.00	280.20	464.80	416.80	602.80
K (ppm)	53.10	119.10	47.95	123.12	60.92	89.52
Ca (ppm)	38.29	170.34	58.72	1567.60	1689.60	1292.00
Mn (ppm)	21.32	47.60	39.32	24.88	21.24	33.80
Fe (ppm)	681.6	2200.8	961.6	610.4	506.8	612.8
Sr (ppb)	520	5600	1080	8920	8440	10320
Li (ppb)	723	4216	1299	414	370	382
Be (ppb)	22	122	42	29	17	57
V (ppb)	255	nd	56	129	nd	45
Cr (ppb)	26484	27128	29616	851	nd	nd
Co (ppb)	623	1501	988	435	398	475
Ni (ppb)	1532	3657	1832	730	1100	659
Cu (ppb)	160	2201	451	5260	3791	3446
Zn (ppb)	1575	4968	2200	2095	3032	4954
As (ppb)	47	9	21	223	250	57
Se (ppb)	14	11	2	nd	nd	nd
Rb (ppb)	190	1050	203	218	218	541
Cd (ppb)	60	13	18	nd	33	13
Ba (ppb)	154	12688	311	15128	18468	17296
Pb (ppb)	1036	3087	931	2901	3860	1566
U (ppb)	13	152	29	61	43	33
Th (ppb)	359	1106	605	698	886	1507

附表 5（續） 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	TS225.8	TS227.5	TS230.5	TS231.5	TS233.5	ZY26.7
Na (ppm)	1005.04	4086.80	894.88	841.16	827.22	942.80
Mg (ppm)	137.05	1315.80	94.28	56.68	46.55	582.40
K (ppm)	4471.00	1091.40	1303.22	1213.12	1200.88	102.76
Ca (ppm)	38.32	17.37	34.75	21.45	22.41	1463.20
Mn (ppm)	621.86	399.50	1382.44	453.56	488.58	42.92
Fe (ppm)	14.1	8.1	9.7	8.7	10.1	903.2
Sr (ppb)	49	199	1466	266	352	8480
Li (ppb)	20	15	71	38	37	590
Be (ppb)	nd	37	nd	33	107	41
V (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	410
Cr (ppb)	390	283	592	315	278	nd
Co (ppb)	474	1137	1423	672	675	378
Ni (ppb)	2487	2968	3025	2766	3026	1981
Cu (ppb)	8	3454	1791	834	679	4308
Zn (ppb)	414	63	106	59	79	11
As (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	104
Se (ppb)	170	889	468	154	171	nd
Rb (ppb)	17	34	11	28	6	277
Cd (ppb)	9486	9670	10047	9676	11132	13
Ba (ppb)	0	0	0	0	0	12780
Pb (ppb)	31	16	37	13	15	4211
U (ppb)	192	nd	1200	409	nd	37
Th (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	413

附表 5（續） 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	ZY27.5	ZY30.7	ZY31.8	ZY34.7	ZY38.7	ZY42.7
Na (ppm)	903.20	878.80	1037.20	1055.60	1002.80	909.20
Mg (ppm)	510.80	724.00	456.00	535.60	952.00	541.20
K (ppm)	126.12	140.36	115.24	135.04	104.64	49.20
Ca (ppm)	1492.80	1418.40	1528.80	1497.20	1593.20	1325.60
Mn (ppm)	33.84	45.36	26.76	31.44	60.08	32.20
Fe (ppm)	810.4	3297.2	1001.6	1445.2	4336.0	1952.4
Sr (ppb)	11320	7680	6280	7160	8360	7040
Li (ppb)	375	1792	400	554	1740	374
Be (ppb)	34	72	35	46	74	46
V (ppb)	212	1143	133	274	1316	337
Cr (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Co (ppb)	415	811	304	490	872	420
Ni (ppb)	1214	2029	708	1462	2103	641
Cu (ppb)	3368	3921	3277	3386	3739	2856
Zn (ppb)	85	2365	45	4448	1966	73
As (ppb)	135	239	168	173	132	120
Se (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Rb (ppb)	198	564	230	260	542	197
Cd (ppb)	20	20	33	0	nd	nd
Ba (ppb)	12332	11016	9876	10172	10392	9104
Pb (ppb)	1815	4168	2338	2795	4268	1647
U (ppb)	45	47	26	50	49	22
Th (ppb)	1166	1210	490	700	1312	485

附表 5（續） 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	ZY98.7	ZY99.3	ZY103.5	ZY104.5	ZY107.5	ZY165.3
Na (ppm)	1006.00	965.60	938.80	1017.20	959.60	1005.60
Mg (ppm)	925.20	355.92	297.84	393.56	372.48	524.40
K (ppm)	155.08	63.92	48.36	55.52	57.48	99.40
Ca (ppm)	1421.60	1363.60	1303.60	1439.60	1330.80	1529.60
Mn (ppm)	89.04	47.00	34.36	24.48	150.96	33.32
Fe (ppm)	6220.0	2596.0	1675.2	1730.4	3409.6	2385.2
Sr (ppb)	8560	6440	6160	6320	6840	6560
Li (ppb)	1813	217	126	283	602	647
Be (ppb)	101	19	47	37	82	31
V (ppb)	472	258	nd	259	nd	368
Cr (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Co (ppb)	1073	475	404	774	544	496
Ni (ppb)	2434	578	251	1586	1149	1519
Cu (ppb)	4580	2867	3062	3299	3149	11016
Zn (ppb)	4092	nd	nd	214	91	4472
As (ppb)	248	89	124	206	78	338
Se (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Rb (ppb)	866	172	225	268	358	273
Cd (ppb)	27	nd	7	20	20	13
Ba (ppb)	11968	8984	10352	10600	10828	10528
Pb (ppb)	4776	2035	1788	2318	3730	3711
U (ppb)	67	16	22	37	127	41
Th (ppb)	1966	625	937	990	1430	775

附表 5（續） 曾文溪流域有機物相分析結果

標本	ZY168.5	ZY171.8	ZY173.7	ZY177.6	ZY179.7	ZY181.5
Na (ppm)	947.20	955.60	910.40	912.40	962.40	1015.20
Mg (ppm)	533.60	523.20	759.60	522.40	700.00	557.60
K (ppm)	66.56	72.84	65.28	53.12	108.76	115.52
Ca (ppm)	1450.40	1436.40	1532.00	1276.40	1566.40	1457.20
Mn (ppm)	38.56	44.32	73.28	43.40	167.08	65.96
Fe (ppm)	2536.0	1316.8	1595.2	1251.6	6288.0	1067.2
Sr (ppb)	6880	6800	7680	6920	8960	7400
Li (ppb)	624	761	1468	898	2210	941
Be (ppb)	54	51	85	58	133	54
V (ppb)	533	267	670	568	214	632
Cr (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Co (ppb)	652	396	716	526	1189	488
Ni (ppb)	1292	1086	2178	1404	1855	952
Cu (ppb)	3910	2897	3201	3386	4100	2851
Zn (ppb)	3011	142	630	414	4784	399
As (ppb)	221	53	57	68	122	41
Se (ppb)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Rb (ppb)	247	186	264	282	377	207
Cd (ppb)	0	nd	7	20	13	7
Ba (ppb)	10216	9492	10156	10968	11060	9468
Pb (ppb)	2998	2317	3309	2190	5840	2358
U (ppb)	44	28	38	32	269	33
Th (ppb)	759	699	1269	725	1746	669

附表 5（續） 曾文溪流域有機物化相分析結果

標本	ZY185.6	ZY186.6	ZY189.4	ZY193.5
Na (ppm)	968.40	988.40	966.40	1000.40
Mg (ppm)	558.00	716.40	659.20	570.00
K (ppm)	71.80	97.12	68.72	73.56
Ca (ppm)	1422.00	1433.60	1454.00	1459.20
Mn (ppm)	38.64	52.68	40.40	35.28
Fe (ppm)	1289.2	3723.2	3564.4	2227.6
Sr (ppb)	7520	7680	8520	7880
Li (ppb)	472	1490	906	442
Be (ppb)	27	78	47	39
V (ppb)	267	318	448	281
Cr (ppb)	nd	nd	nd	nd
Co (ppb)	293	726	610	403
Ni (ppb)	905	1866	1237	1452
Cu (ppb)	2836	3592	3322	2876
Zn (ppb)	nd	1603	779	1036
As (ppb)	80	245	353	103
Se (ppb)	nd	nd	nd	nd
Rb (ppb)	234	433	329	203
Cd (ppb)	13	7	nd	nd
Ba (ppb)	9652	9592	9860	9120
Pb (ppb)	2772	3217	2420	4844
U (ppb)	26	51	45	29
Th (ppb)	695	1478	920	510

附表 6 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	SF11.5	SF15.5	SF19.5	SF23.5	SF27.5	SF31.5
La (ppb)	1508	1423	1318	1462	1627	1804
Ce (ppb)	4086	3891	3485	3875	4464	4970
Pr (ppb)	551	513	458	503	595	643
Nd (ppb)	2727	2505	2282	2466	2961	3270
Sm (ppb)	826	762	748	785	905	995
Eu (ppb)	210	200	201	210	235	260
Gd (ppb)	927	841	886	912	1005	1145
Tb (ppb)	136	124	127	135	155	165
Dy (ppb)	652	592	616	654	728	799
Ho (ppb)	106	103	105	112	122	138
Er (ppb)	241	217	234	240	279	300
Tm (ppb)	43	38	38	43	43	48
Yb (ppb)	157	143	162	166	182	203
Lu (ppb)	34	31	33	35	36	40



附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	SF11.5	SF15.5	SF19.5	SF23.5	SF27.5	SF31.5
La (ppb)	1508	1423	1318	1462	1627	1804
Ce (ppb)	4086	3891	3485	3875	4464	4970
Pr (ppb)	551	513	458	503	595	643
Nd (ppb)	2727	2505	2282	2466	2961	3270
Sm (ppb)	826	762	748	785	905	995
Eu (ppb)	210	200	201	210	235	260
Gd (ppb)	927	841	886	912	1005	1145
Tb (ppb)	136	124	127	135	155	165
Dy (ppb)	652	592	616	654	728	799
Ho (ppb)	106	103	105	112	122	138
Er (ppb)	241	217	234	240	279	300
Tm (ppb)	43	38	38	43	43	48
Yb (ppb)	157	143	162	166	182	203
Lu (ppb)	34	31	33	35	36	40

附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	SF191.5	SF195.5	SF195.8	SF199.5	SF261.5	SF263.5
La (ppb)	1022	1164	2115	1311	1874	1505
Ce (ppb)	2841	3177	5930	3578	4804	4134
Pr (ppb)	373	413	794	448	590	541
Nd (ppb)	1792	1956	3920	2185	2860	2631
Sm (ppb)	565	613	1105	680	838	793
Eu (ppb)	148	159	286	175	238	201
Gd (ppb)	657	683	1281	739	1006	882
Tb (ppb)	93	100	190	106	153	131
Dy (ppb)	457	507	916	516	773	637
Ho (ppb)	76	88	155	87	131	109
Er (ppb)	166	196	354	187	308	240
Tm (ppb)	33	34	53	35	52	43
Yb (ppb)	124	142	250	130	235	167
Lu (ppb)	28	30	45	28	45	34

附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	SF267.5	SF269.5	SF271.5	TS15.5	TS18.5	TS20.8
La (ppb)	2222	1885	968	2321	1622	1856
Ce (ppb)	6192	5219	2701	6508	4472	5300
Pr (ppb)	831	700	354	924	629	708
Nd (ppb)	4246	3475	1812	4520	3075	3430
Sm (ppb)	1270	997	647	1377	1008	1115
Eu (ppb)	323	260	177	359	265	283
Gd (ppb)	1425	1146	762	1542	1154	1236
Tb (ppb)	209	171	112	223	168	181
Dy (ppb)	1003	818	520	1078	804	859
Ho (ppb)	164	139	87	169	129	137
Er (ppb)	356	319	187	393	299	316
Tm (ppb)	53	49	34	44	36	38
Yb (ppb)	234	207	130	253	200	219
Lu (ppb)	41	38	29	36	33	34

附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	TS23.5	TS27.5	TS31.5	TS35.5	TS39.5	TS42.6
La (ppb)	1058	1467	1388	2660	1465	936
Ce (ppb)	3049	4096	3699	7606	4132	2471
Pr (ppb)	403	580	534	988	568	355
Nd (ppb)	1982	2879	2639	5066	2767	1766
Sm (ppb)	643	941	836	1507	881	571
Eu (ppb)	160	251	213	380	236	148
Gd (ppb)	730	1073	946	1672	1010	623
Tb (ppb)	107	152	133	252	147	94
Dy (ppb)	498	728	623	1180	698	434
Ho (ppb)	80	115	99	194	112	71
Er (ppb)	177	257	228	429	254	162
Tm (ppb)	22	29	26	61	29	18
Yb (ppb)	121	177	148	274	162	105
Lu (ppb)	22	28	25	48	25	19

附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	TS44.4	TS47.5	TS52.5	TS53.5	TS55.5	TS59.5
La (ppb)	1278	1025	1160	1244	1600	1635
Ce (ppb)	3626	2718	3200	3440	4504	4576
Pr (ppb)	546	387	448	473	608	634
Nd (ppb)	2818	1887	2232	2337	3019	3076
Sm (ppb)	1014	612	711	736	1031	996
Eu (ppb)	268	158	184	190	280	259
Gd (ppb)	1192	709	821	826	1184	1128
Tb (ppb)	168	106	118	121	174	169
Dy (ppb)	778	496	564	571	821	810
Ho (ppb)	119	78	90	92	131	133
Er (ppb)	264	177	205	210	299	312
Tm (ppb)	30	21	25	26	36	37
Yb (ppb)	177	122	142	142	219	220
Lu (ppb)	28	20	24	24	35	35

附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	TS191.5	TS195.5	TS196.5	TS198.5	TS199.5	TS201.5
La (ppb)	782	1068	991	3184	735	2072
Ce (ppb)	2071	2767	2610	7948	2185	5544
Pr (ppb)	302	380	352	1084	274	766
Nd (ppb)	1521	1776	1696	4920	1317	3700
Sm (ppb)	524	533	505	1366	414	1147
Eu (ppb)	141	137	127	342	112	308
Gd (ppb)	621	600	550	1476	494	1314
Tb (ppb)	96	91	81	212	77	182
Dy (ppb)	461	437	400	1018	376	862
Ho (ppb)	76	76	64	165	64	136
Er (ppb)	182	178	157	393	147	300
Tm (ppb)	23	21	18	45	17	35
Yb (ppb)	122	113	100	265	105	194
Lu (ppb)	23	22	19	40	18	31

附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	TS203.5	TS207.5	TS209.5	TS211.5	TS215.5	TS219.5
La (ppb)	1776	1127	2992	1551	2468	2281
Ce (ppb)	4772	3115	8391	3968	7360	6406
Pr (ppb)	658	412	1078	545	1008	842
Nd (ppb)	3089	1974	5247	2548	5459	4278
Sm (ppb)	890	571	1466	741	1759	1292
Eu (ppb)	217	146	366	197	465	333
Gd (ppb)	960	645	1598	862	2005	1479
Tb (ppb)	138	101	241	121	295	214
Dy (ppb)	688	476	1208	582	1308	991
Ho (ppb)	117	80	208	95	217	169
Er (ppb)	270	182	476	224	462	365
Tm (ppb)	32	22	65	27	61	54
Yb (ppb)	175	128	317	147	293	244
Lu (ppb)	28	21	50	25	50	44

附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	TS223.5	TS227.5	TS230.5	TS231.5	TS233.5	ZY26.7
La (ppb)	1586	1086	2444	897	906	3491
Ce (ppb)	4112	2785	6928	2514	2575	10083
Pr (ppb)	524	389	988	338	341	1300
Nd (ppb)	2493	1809	4760	1704	1663	6739
Sm (ppb)	727	518	1512	602	580	1947
Eu (ppb)	194	135	372	165	165	492
Gd (ppb)	821	574	1703	703	692	2175
Tb (ppb)	121	87	247	105	102	332
Dy (ppb)	630	412	1173	486	477	1540
Ho (ppb)	108	69	187	78	77	267
Er (ppb)	238	156	428	181	174	591
Tm (ppb)	42	18	51	22	21	76
Yb (ppb)	169	104	284	128	135	383
Lu (ppb)	34	18	42	23	23	61



附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	ZY27.5	ZY30.7	ZY31.8	ZY34.7	ZY38.7	ZY42.7
La (ppb)	1508	2841	1860	1474	4152	1575
Ce (ppb)	4143	8100	4664	3798	11356	4156
Pr (ppb)	548	1119	660	535	1592	578
Nd (ppb)	2738	5468	3270	2567	7676	2715
Sm (ppb)	851	1612	1113	830	2259	738
Eu (ppb)	226	417	289	225	584	189
Gd (ppb)	995	1790	1322	975	2535	818
Tb (ppb)	148	260	195	144	370	123
Dy (ppb)	714	1271	933	697	1787	599
Ho (ppb)	125	199	148	116	282	100
Er (ppb)	278	444	349	271	637	226
Tm (ppb)	43	50	40	31	72	25
Yb (ppb)	194	278	242	184	417	150
Lu (ppb)	36	41	38	30	60	25

附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	ZY98.7	ZY99.3	ZY103.5	ZY104.5	ZY107.5	ZY165.3
La (ppb)	3374	2725	2393	3739	8092	1750
Ce (ppb)	9236	7356	5480	9408	20100	4596
Pr (ppb)	1274	990	830	1242	2486	650
Nd (ppb)	6116	4700	3735	5648	10528	3080
Sm (ppb)	1776	1346	967	1518	2494	888
Eu (ppb)	473	342	249	387	579	225
Gd (ppb)	2062	1521	996	1683	2511	966
Tb (ppb)	303	221	140	234	324	145
Dy (ppb)	1494	1133	673	1134	1480	692
Ho (ppb)	244	193	107	181	234	115
Er (ppb)	556	454	244	428	540	264
Tm (ppb)	64	55	31	49	63	30
Yb (ppb)	357	318	171	287	346	164
Lu (ppb)	55	48	28	44	50	26

附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	ZY168.5	ZY171.8	ZY173.7	ZY177.6	ZY179.7	ZY181.5
La (ppb)	1894	1296	2752	1418	1868	1728
Ce (ppb)	4704	3311	7404	3827	4912	5048
Pr (ppb)	659	484	1034	565	653	671
Nd (ppb)	3114	2398	4912	2669	3066	3310
Sm (ppb)	842	784	1555	849	948	988
Eu (ppb)	225	195	396	219	258	258
Gd (ppb)	952	902	1762	950	1108	1070
Tb (ppb)	145	126	250	135	166	150
Dy (ppb)	708	574	1193	650	808	721
Ho (ppb)	117	92	184	104	129	115
Er (ppb)	272	207	411	234	290	250
Tm (ppb)	32	24	47	27	35	30
Yb (ppb)	175	125	261	151	188	156
Lu (ppb)	30	22	39	27	31	26

附表 6（續） 曾文溪流域鐵錳氧化相稀土族元素分析結果

標本	ZY185.6	ZY186.6	ZY189.4	ZY193.5
La (ppb)	3248	1975	1734	1545
Ce (ppb)	7680	5320	4544	4248
Pr (ppb)	1074	750	631	554
Nd (ppb)	5040	3648	2864	2577
Sm (ppb)	1365	1132	786	718
Eu (ppb)	353	293	190	185
Gd (ppb)	1572	1274	826	782
Tb (ppb)	224	186	121	115
Dy (ppb)	1169	902	588	584
Ho (ppb)	199	146	98	94
Er (ppb)	466	331	230	223
Tm (ppb)	51	38	26	26
Yb (ppb)	271	220	141	135
Lu (ppb)	41	34	23	24

附表 7 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	SF11.5	SF15.5	SF19.5	SF23.5	SF27.5	SF31.5
La (ppb)	106	82	125	130	104	137
Ce (ppb)	211	188	260	275	234	341
Pr (ppb)	33	30	36	36	34	46
Nd (ppb)	162	138	151	160	152	225
Sm (ppb)	48	41	53	45	49	74
Eu (ppb)	12	11	13	11	12	17
Gd (ppb)	55	57	62	47	59	81
Tb (ppb)	9	9	11	10	9	12
Dy (ppb)	54	49	55	51	52	62
Ho (ppb)	10	8	11	8	9	11
Er (ppb)	26	26	28	22	23	30
Tm (ppb)	4	3	4	3	3	4
Yb (ppb)	19	17	18	15	17	18
Lu (ppb)	3	2	3	3	2	3

附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	SF11.5	SF15.5	SF19.5	SF23.5	SF27.5	SF31.5
La (ppb)	106	82	125	130	104	137
Ce (ppb)	211	188	260	275	234	341
Pr (ppb)	33	30	36	36	34	46
Nd (ppb)	162	138	151	160	152	225
Sm (ppb)	48	41	53	45	49	74
Eu (ppb)	12	11	13	11	12	17
Gd (ppb)	55	57	62	47	59	81
Tb (ppb)	9	9	11	10	9	12
Dy (ppb)	54	49	55	51	52	62
Ho (ppb)	10	8	11	8	9	11
Er (ppb)	26	26	28	22	23	30
Tm (ppb)	4	3	4	3	3	4
Yb (ppb)	19	17	18	15	17	18
Lu (ppb)	3	2	3	3	2	3

附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	SF191.5	SF195.5	SF195.8	SF199.5	SF261.5	SF263.5
La (ppb)	229	154	503	162	197	95
Ce (ppb)	529	354	1115	366	518	229
Pr (ppb)	70	47	159	50	72	33
Nd (ppb)	279	205	829	217	361	156
Sm (ppb)	70	56	248	53	119	44
Eu (ppb)	14	12	62	13	29	10
Gd (ppb)	61	56	230	51	129	54
Tb (ppb)	10	8	32	8	18	8
Dy (ppb)	42	38	139	42	95	37
Ho (ppb)	8	6	26	6	15	7
Er (ppb)	20	16	56	17	37	19
Tm (ppb)	2	2	8	2	4	2
Yb (ppb)	13	11	46	9	23	10
Lu (ppb)	2	1	6	1	4	1

附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	SF267.5	SF269.5	SF271.5	TS15.5	TS20.8	TS23.5
La (ppb)	169	127	85	800	751	360
Ce (ppb)	430	314	195	99	89	34
Pr (ppb)	64	47	29	476	421	155
Nd (ppb)	307	228	127	133	121	49
Sm (ppb)	91	61	40	40	34	17
Eu (ppb)	18	15	9	145	124	48
Gd (ppb)	92	73	47	23	19	7
Tb (ppb)	13	11	7	127	104	44
Dy (ppb)	70	51	36	20	18	8
Ho (ppb)	11	9	6	58	48	23
Er (ppb)	28	22	15	7	6	3
Tm (ppb)	3	4	2	40	33	17
Yb (ppb)	20	14	11	7	6	4
Lu (ppb)	3	2	2	812	783	251



附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	TS27.5	TS31.5	TS35.5	TS39.5	TS42.6	TS44.4
La (ppb)	629	113	264	148	123	122
Ce (ppb)	75	271	711	368	274	311
Pr (ppb)	345	41	105	48	39	46
Nd (ppb)	107	194	544	224	171	234
Sm (ppb)	33	62	169	75	53	82
Eu (ppb)	116	15	39	19	13	21
Gd (ppb)	18	66	192	87	66	103
Tb (ppb)	93	11	27	14	11	17
Dy (ppb)	17	58	136	69	54	90
Ho (ppb)	45	10	22	13	11	16
Er (ppb)	6	27	57	32	25	41
Tm (ppb)	29	4	7	4	3	5
Yb (ppb)	6	17	37	24	18	29
Lu (ppb)	699	3	6	3	3	4

附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	TS47.5	TS52.5	TS53.5	TS55.5	TS59.5	TS191.5
La (ppb)	383	410	429	573	641	846
Ce (ppb)	41	46	48	64	74	97
Pr (ppb)	183	199	210	277	350	432
Nd (ppb)	52	61	67	92	101	110
Sm (ppb)	20	22	21	27	30	31
Eu (ppb)	55	64	65	93	105	97
Gd (ppb)	9	9	10	15	16	14
Tb (ppb)	46	57	56	90	78	69
Dy (ppb)	9	10	10	16	15	12
Ho (ppb)	23	26	30	41	37	29
Er (ppb)	3	3	4	5	4	3
Tm (ppb)	16	15	18	29	27	18
Yb (ppb)	4	4	4	6	5	5
Lu (ppb)	336	338	415	678	789	291

附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	TS195.5	TS196.5	TS198.5	TS199.5	TS201.5	TS203.5
La (ppb)	592	656	762	931	721	177
Ce (ppb)	68	75	84	109	1958	421
Pr (ppb)	280	330	365	432	267	61
Nd (ppb)	73	80	100	100	1220	283
Sm (ppb)	23	24	28	25	377	71
Eu (ppb)	71	81	84	77	86	20
Gd (ppb)	10	11	13	10	375	83
Tb (ppb)	50	60	70	51	53	13
Dy (ppb)	9	10	13	9	263	66
Ho (ppb)	24	28	36	23	42	11
Er (ppb)	2	3	4	3	103	29
Tm (ppb)	17	20	26	14	14	4
Yb (ppb)	4	4	5	3	73	20
Lu (ppb)	282	278	931	328	10	3

附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	TS207.5	TS209.5	TS211.5	TS215.5	TS219.5	TS223.5
La (ppb)	175	627	273	140	145	210
Ce (ppb)	389	1629	637	617	427	1150
Pr (ppb)	53	218	89	62	91	136
Nd (ppb)	219	1015	376	577	302	325
Sm (ppb)	50	276	93	149	99	221
Eu (ppb)	11	68	21	35	45	39
Gd (ppb)	54	281	100	81	165	115
Tb (ppb)	8	38	14	24	22	24
Dy (ppb)	37	194	74	110	73	49
Ho (ppb)	7	34	13	5	25	18
Er (ppb)	19	81	32	69	26	27
Tm (ppb)	2	12	4	5	4	11
Yb (ppb)	10	68	25	35	53	40
Lu (ppb)	2	9	4	7	6	4

附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	TS225.8	TS227.5	TS230.5	TS231.5	TS233.5	ZY26.7
La (ppb)	1083	418	848	372	358	285
Ce (ppb)	138	49	108	44	42	564
Pr (ppb)	645	216	537	217	211	148
Nd (ppb)	172	55	162	80	76	400
Sm (ppb)	50	20	45	25	25	90
Eu (ppb)	186	58	167	90	85	70
Gd (ppb)	28	9	25	13	12	136
Tb (ppb)	135	41	124	63	56	29
Dy (ppb)	25	7	22	11	9	104
Ho (ppb)	58	19	57	25	24	21
Er (ppb)	7	2	7	3	3	64
Tm (ppb)	35	12	40	18	15	7
Yb (ppb)	6	3	7	3	4	35
Lu (ppb)	493	211	684	283	250	9

附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	ZY27.5	ZY30.7	ZY31.8	ZY34.7	ZY38.7	ZY42.7
La (ppb)	213	577	239	452	513	264
Ce (ppb)	822	1572	633	1101	1397	714
Pr (ppb)	165	220	75	134	187	87
Nd (ppb)	517	1046	364	595	914	392
Sm (ppb)	191	315	122	172	260	106
Eu (ppb)	49	79	32	47	67	30
Gd (ppb)	118	341	129	192	285	118
Tb (ppb)	21	51	21	28	44	19
Dy (ppb)	149	251	96	142	214	88
Ho (ppb)	20	42	16	24	36	16
Er (ppb)	105	109	40	58	92	41
Tm (ppb)	10	13	5	7	12	5
Yb (ppb)	35	80	32	46	71	29
Lu (ppb)	7	10	4	5	10	5

附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	ZY98.7	ZY99.3	ZY103.5	ZY104.5	ZY107.5	ZY165.3
La (ppb)	841	253	572	489	1351	460
Ce (ppb)	2398	653	1370	1288	3859	1174
Pr (ppb)	316	72	183	161	476	145
Nd (ppb)	1443	304	769	692	2170	635
Sm (ppb)	425	78	187	185	636	170
Eu (ppb)	109	25	47	47	163	41
Gd (ppb)	441	82	164	172	718	169
Tb (ppb)	66	14	23	25	107	26
Dy (ppb)	352	76	112	119	536	129
Ho (ppb)	58	14	17	20	88	21
Er (ppb)	147	39	42	51	225	55
Tm (ppb)	18	6	6	7	29	7
Yb (ppb)	110	33	31	41	166	42
Lu (ppb)	15	5	5	6	23	6

附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	ZY168.5	ZY171.8	ZY173.7	ZY177.6	ZY179.7	ZY181.5
La (ppb)	503	932	605	428	1158	597
Ce (ppb)	1237	2138	1651	1120	3306	1461
Pr (ppb)	156	278	201	137	440	198
Nd (ppb)	692	1154	904	595	2093	837
Sm (ppb)	196	292	267	152	665	219
Eu (ppb)	47	71	68	40	170	58
Gd (ppb)	185	264	280	156	712	222
Tb (ppb)	28	38	44	25	104	35
Dy (ppb)	138	190	231	130	530	175
Ho (ppb)	24	33	41	22	89	34
Er (ppb)	59	83	105	59	204	83
Tm (ppb)	8	10	15	8	27	11
Yb (ppb)	43	61	81	47	156	66
Lu (ppb)	6	8	12	7	22	9



附表 7（續） 曾文溪流域有機物相稀土族元素分析結果

標本	ZY185.6	ZY186.6	ZY189.4	ZY193.5
La (ppb)	1069	623	538	442
Ce (ppb)	2412	1629	1429	1110
Pr (ppb)	312	203	189	134
Nd (ppb)	1350	902	832	568
Sm (ppb)	346	269	227	152
Eu (ppb)	86	69	55	39
Gd (ppb)	344	264	248	154
Tb (ppb)	49	42	34	22
Dy (ppb)	260	208	178	114
Ho (ppb)	46	37	30	18
Er (ppb)	119	91	75	48
Tm (ppb)	15	13	10	7
Yb (ppb)	83	73	61	38
Lu (ppb)	12	10	9	6