

# 行政院環境保護署

## 「100 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

### 行政院環保署補助「多種同位素與地球化學分析技術 (MEIGA)判釋地下水污染之來源:以頭份工業區含氯 碳氫化合物污染為例」

期末報告

主 辦 單 位：  行政院環境保護署

計 畫 執 行 單 位： 國立臺灣大學／地質科學系所

計 畫 主 持 人： 李紅春 教授

計 畫 執 行 期 間： 100年11月26日起至

101年11月25日止

中 華 民 國 101年10 月 印製

## 中文摘要

利用多種同位素和地球化學方法（Multiple-evidence of isotopic and geochemical approach, MEIGA），研究頭份工業區地表水和地下水的同位素和地球化學特徵，判斷研究區內的地下水來源、混合、補給和運移狀況，結合污染物濃度的水準，以及研究區的地質、水文、工程等背景資料，研判含氯有機物污染源的可能來源。

自 2011 年 11 月計畫執行以來，在頭份工業區採集地表水和地下水 100 個，對這些樣品進行了野外物理化學參數測量、多種元素分析、氫氧碳穩定同位素分析、含氯有機物濃度的測量。通過這些樣品分析，我們目前得到：1. 研究地區天水的穩定同位素組成的曲線，它與全球天水線有所不同。2. 研究地區地下水的穩定同位素組成，顯示多數井位的水樣與地表水連通，判斷該區淺層地下水（小於 100 米）的補給是由大氣降水而來。氧同位素偏重（ $>-6.5\text{‰}$ ）且偏離大氣降水線較遠的樣品，是污染水源的影響。3. 水樣中的 Ca 和 Na 是關鍵元素，它們是控制導電度、硬度，與氯度平衡的主要元素。然而，Ca 和 Na 有著不同的來源，在地表水中有強正相關，而在地下水中無相關。Ca 濃度反映總硬度的變化，同時也與 Mg, Sr, K, Ba 等有較好的正相關。地下水和地表水的化學成分不同，顯示高 Ca 來源是污染源的示蹤。4. 從溶解碳與 DIC  $\delta^{13}\text{C}$  的關係，可以斷定含氯有機物在地下水中有降解。5. 對本研究計畫來說，多種同位素和地球化學方法（Multiple-evidence of isotopic and geochemical approach, MEIGA）應當包括導電度、氯度、TOC、氯乙烯、 $\delta^{18}\text{O}$ ， $\delta\text{D}$ ，DIC  $\delta^{13}\text{C}$ ，Ca，Na，Mg，Sr，K，Ba。6. 研究初步顯示，含氯有機物污染源有兩處：“大坑”處和台氯頭份廠南側偏西處，污染物沿地下水流動方向從東北向西南方向運移。

## Abstract

In this project, we have collected 100 samples including groundwaters and surface waters from Toufen Industrial Technology Area. These 100 samples have been conducted the measurements of H, O and C stable isotopes, elemental concentrations (Na, Ca, Mg, K, Fe, Mn, Al, Ba, Sr, Li, Cu, Zn, Ni, Ga, Ti), chlorinated hydrocarbon including dichloroethane and vinyl chloride, as well as many chemical parameters such as pH, conductivity, DO, hardness, TDS, Chlorinity, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen etc. Throughout the study, we have obtained the following conclusions: (1) We built up the local meteoric water line (LMWL) from  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ , and found that the groundwater supply of the studying area was from rainfall. (2) Some sites with heavy  $\delta^{18}O$  values and apart from the LMWL reflect contamination of chlorinated hydrocarbon. (3) The concentrations of Ca+Na strongly correlate with conductivity, TDS and Chlorine. The Ca variations reflect hardness and strongly correlate with Mg, Sr, K, Ba. High Ca content is the indicator of high vinyl chloride. The chemical compositions of surface water are different from these of the groundwater, which is affected by contaminated water source. (4) The negative relationship between dissolved carbon and its  $\delta^{13}C$  value implies that chlorinated hydrocarbon occurred degradation in the groundwater. (5) For this study, the major parameters for Multiple -evidence of isotopic and geochemical approach (MEIGA) are conductivity, Chlorinity, TOC,  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ , DIC  $\delta^{13}C$ , concentrations of Na, Ca, Mg, K, Ba, Sr and vinyl chloride. (6) Based on our study, we have two contaminated sources: one is located at Well site of K00161, so called “The big dent” and the other is on the southwestern edge of Tai Lu Toufen factory around Well sites K00111 and K00177. The distribution of multiple geochemical parameters suggests that the contaminated chlorinated hydrocarbon migrates with groundwater from the northeast toward the southwest.

## 計畫緣起與目的

隨著工業尤其是化工、冶金等產生“三廢”物質的工業的發展，環境污染始終是個問題。近年來國內外工業活動造成的土壤或地下水污染案例，對國土資源與生活環境形成莫大威脅。環境執法單位除了監測和發現各種污染現象和問題之外，還要判別污染的來源和責任的歸屬。在許多情況中，發現污染問題並不難，難的是如何追蹤與釐清污染的來源。不少污染場址是在過去環保法規尚不健全、執行尚不嚴格的年代已經存在的，原來的廠家早已撤離；有些污染場址存在多個產生污染的源頭；還有一些污染場址的污染源可能來自遠處。所以，不少污染場址被發現之後，卻無法在短期內找出責任歸屬，有些情況甚至需要消費鉅資來尋找污染來源，甚至不少司法判案依據需要科學證據來說明污染來源。

對於來源複雜的污染場址，要判斷污染物來源，是一個綜合的地質、水文和地球化學的研究課題。在進行地下水鑽探工程之前或者同時，地球物理和地球化學分析資料能夠更有效、更合理地明確工程計畫和確定鑽井位置。然而，目前對於地球化學方法在環境污染場址的地下水調查研究中的使用還相當薄弱，所量測的指標相對比較普通，如：pH、導電度、總溶解固體濃度、陰陽離子濃度以及一些重金屬元素的濃度，還很少利用同位素分析技術。因此，本計畫申請目的主要是針對地下水體系，利用**多種同位素和地球化學方法**分析，瞭解地下水的來源、運移狀況、以及污染物在地下水中的變化（如：降解/反應、吸附/脫附、遷移/沉澱），從而判斷污染來源與擴散歷史和規律，幫助確定處理污染的方法和措施。

苗栗縣頭份工業區為以石化業為主之綜合工業區，區內有台灣氯乙烯頭份廠及中石化頭份廠卸苯站地下水污染，卸苯站地下水污染整治工作已經完成，但台灣氯乙烯頭份廠地下水污染整治工作正在進行；位於頭份工業區西側之前國泰塑膠竹南廠地下水中亦檢測出高濃度氯乙烯的污染；而位於中港溪南岸的民井，於民國 92 年間地下水亦發現有高達 42.5mg/kg 的氯乙烯（圖一）。由於工業區建立較早，一些工廠已經遷離，目前無法得到原本的污染物，因此無法得知原本污染

物得同位素特徵。在這種情況下，利用多種同位素和地球化學方法，綜合地質、水文和污染物濃度資料，來調查地下水污染的來源。

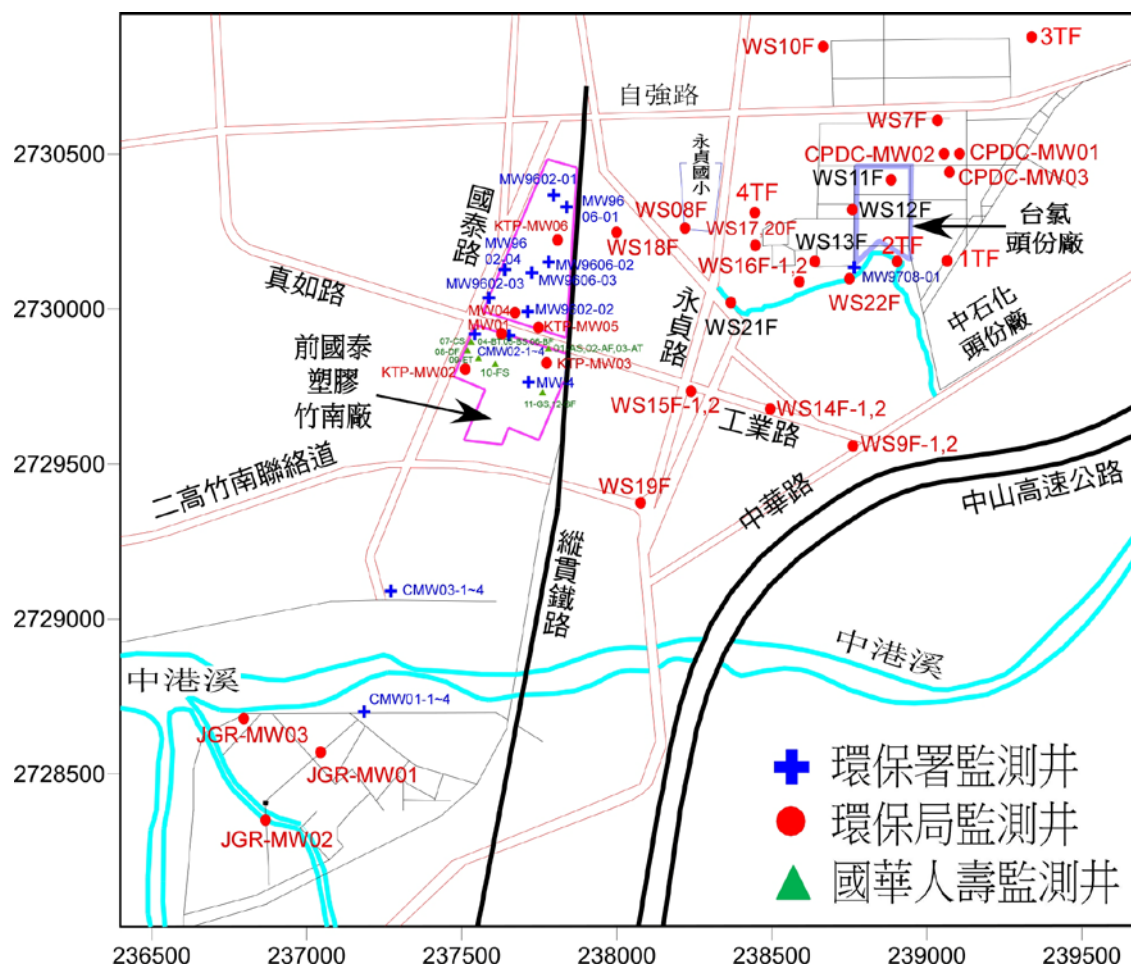


圖 1 苗栗縣頭份工業區示意圖。從目前的地下水調查結果可知，含氯有機物的分佈主要集中在台氯頭份廠、前國泰塑膠頭份廠和中港溪北岸。

計畫目的主要是：

1. 針對頭份工業區、前國泰塑膠廠及中港溪南、北岸之既設監測井（叢）進行地下水採樣，瞭解地下水的同位素和地球化學特性。
2. 對研究區的地表水進行不同季節的採樣，瞭解大氣降水和地表水的同位素和地球化學特性，研判地下水的來源、補給狀況與地表水的關係。
3. 對上述樣品進行同位素和地球化學檢測分析，檢測分析項目包括 pH、溶氧、電導度、二氯乙烷、氯乙烯、 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 、 $\delta^{13}C$ （DIC）、Ca、Mg、Sr、Ba、Na、K、

Li、Fe、Mn、Cu、Zn、Ni。

4. 依據地表水和地下水的同位素和地球化學特徵，判斷研究區內的地下水來源、混合、補給和運移狀況，結合污染物濃度的水準，研判可能污染項目（二氯乙烷、氯乙烯）的可能污染源，建議後續污染調查方向。

5. 將研究區地下水同位素和地球化學分析資料建檔於環保署建置之地下水監測資料管理系統，並藉由本計畫的執行，尋找出一套利用**多種同位素和地球化學方法**(Multiple-evidence of isotopic and geochemical approach, MEIGA)研究地下水污染。撰寫研究報告，發表學術論文，培養大學生和研究生在環境研究中的能力。

6. 配合和參與由環保署主辦之地下水污染相關工作會議，宣導與解釋 MEIGA 的理論與應用，將地學研究方法和大學的先進儀器設備應用於環境研究中。

## 研究方法與過程

### 一、計畫書中的具體指標

針對頭份工業區、前國泰塑膠廠及中港溪南、北岸之既設監測井（叢）進行地下水採樣，瞭解地下水的同位素和地球化學特性。對研究區的地表水進行不同季節的採樣，瞭解大氣降水和地表水的同位素和地球化學特性，研判地下水的來源、補給狀況與地表水的關係。

具體採樣方案和分析數目如下：

1. 在枯水期和豐水期分別對地表水（雨水和溪水）進行各一次採樣，枯水期 5 個樣品（3 個溪水，2 個雨水），豐水期 5 個樣品（3 個溪水，2 個雨水），以瞭解地表水的特徵和隨季節的變化。

2. 根據圖一以及其他已有的資料，選擇研究區內 30 口監測井（淺層井 20 口，深層井 10 口）。每口淺層井在深 20 米以上的淺層水採集一個樣品，對 10 口深層井則在每口井的 20 米以上和 55-85 米之間深處個采一個樣品。在枯水期和豐水期

分別對地表水（雨水和溪水）進行各一次採樣。這樣，在枯水期有 30 個淺層水樣，10 個深層（55-85 米之間）水樣，每期共有 40 個地下水樣品，兩期共 80 個地下水樣品。這樣，我們可以瞭解地下水 3 維空間的同位素和地球化學特徵，以及隨季節的變化。

3. 在 90 個樣品中（10 個地表水、80 個地下水），我們將測量所有樣品的 pH（90 筆）、溶氧（90 筆）、電導度（90 筆）、 $\delta D$ （90 筆）、 $\delta^{18}O$ （90 筆）以及 Ca、Mg、Sr、Ba、Na、K、Li、Fe、Mn、Cu、Zn、Ni（各 90 筆）。只對溪水（6 個）和枯水季節的地下水樣品（40 個）測量二氯乙烷（46 筆）和氯乙烯（46 筆）。只選擇有高濃度的二氯乙烷和氯乙烯的監測井的樣品進行 $\delta^{13}C$ （DIC）分析測量（20 筆包括不同深度）。這樣，在經費和時間有限的條件下，最大限度地得到豐富的同位素和地球化學資料。事實上，也只有本人擁有多個分析儀器，不計成本地測量樣品，才能保證在計畫經費和時間的情況下有這麼多資料的產出。

綜上所述，計畫指標包括：pH、溶氧、電導度、 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  以及 Ca、Mg、Sr、Ba、Na、K、Li、Fe、Mn、Cu、Zn、Ni 各 90 筆；二氯乙烷和氯乙烯各 46 筆； $\delta^{13}C$ （DIC）20 筆。

## 二、完成的指標

本計畫執行期間，進行了兩次系統採樣，第一次是 100 年 11 月 30 日～101 年 1 月 3 日；第二次是 101 年 7 月 5 日。由於第一次的採樣是借助美商傑明公司的計畫，密集而系統地採樣，使我們在有限的資源下，得到了很多樣品和詳細的資料，有了豐富的經驗和成果。第二次採樣是委託環保署認證的澳新科技股份有限公司與本團隊一起採樣，受經費所限，第二次採樣只選擇重點井位取樣。以下顯示兩次採樣過程、樣品列表和分析結果。

2011 年 11-12 月，我們在研究區進行採樣（圖二），共取得 8 個地表水（表一）和 72 個地下水（表二），共 80 個樣品。





中港溪北岸與南岸河水



中港溪南岸電鍍廠排放水與農田水渠水



永貞宮周邊生活排放水和台氣頭份廠內地下井水

圖二 2011 年 12 月 5 號野外採樣照片

表一 2011 年 12 月 5 號地表水樣品列表以及野外測量參數

項次	樣品編號	緯度	經度	海拔 (m)	地點描述	水溫 ℃	pH	導電度 μmho/cm	溶氧 mg/L
73	20111205-1C	24°40'01.75"	120°52'30.33"	3	中港溪北岸鐵路橋下				
74	20111205-2C	24°39'56.56"	120°52'27.03"	3	中港溪南岸鐵路橋下	18.6	7.86	1451	6.98
75	20111205-3C	24°39'55.41"	120°52'26.98"	6	中港溪南岸鐵路橋西側工廠排放口	19	7.7	1089	4.19
76	20111205-4C	24°39'52.58"	120°52'07.22"	3	匯入中港溪南岸小溪下游				
77	20111205-5C	24°39'43.85"	120°52'17.02"	3	匯入中港溪南岸小溪上游	19	8.28	327	5.64
78	20111205-6C	24°40'44.55"	120°53'09.14"	10	永貞宮	19.1	7.64	813	7.01
79	20111205-7C	24°40'37.43"	120°52'38.47"	9	前國泰石化廠大門口雨水	18.1	8.05	8.9	5.91
80	20111205-8C	24°40'40.88"	120°52'20.89"	9	台氣頭份廠內污水溝				



表二 2011 年 11~12 月頭份工業區地下水樣品列表以及野外測量參數

監測井基本資料					第二次地下水採樣水質參數						
項次	監測井井號	TWD97座標		井頂高程 (MSL,m)	井深 (m)	採樣深度 m	水溫 ℃	pH	導電度 μmho/cm	溶氧 mg/L	氧化還原電位 mV
		X	Y								
1	K00046	239065.3	2730154.2	9.9	9.5	9.5	26.8	6.70	689	2.59	45.6
2	K00047	238902.3	2730154.2	10.1	10.1	10.1	22.6	7.03	758	3.89	-6.2
3	K00065	239033.3	2730609.3	12.3	11.9	11.9	24.7	6.99	676	3.58	156.9
4	K00066	238221.3	2730260.2	9.0	5.7	5.6	21.8	6.58	923	3.40	-49.9
5	K00067	238221.3	2730260.2	8.9	16.7	15.6	22.7	6.35	7870	6.07	2.1
6	K00069	238761.3	2729559.2	10.1	13.9	13.8	22.3	6.82	1014	4.47	53.8
7	K00175	238884.3	2730416.2	10.8	9.1	9.1	26.2	6.67	775	2.99	28.4
8	K00176	238760.3	2730320.2	10.9	9.8	9.8	26.3	6.88	715	3.40	-27.3
9	K00092	238631.3	2730113.2	9.4	8.5	8.5	24.1	6.80	6740	1.50	-88
10	K00183	238494.6	2729676.6	7.8	14.8	14.8	24.6	6.78	1005	1.17	45.2
11	K00184	238494.6	2729676.6	7.8	58.2	52.2	24.1	7.03	647	5.17	-79.1
12	K00184	238494.6	2729676.6	7.8	58.2	58.1	24.6	7.02	594	5.15	66.1
13	K00185	238237.3	2729733.9	6.8	15.0	15.0	24.9	6.85	721	0.37	13.8
14	K00186	238237.3	2729733.9	6.8	59.5	52.0	22.7	7.06	606	1.81	-58.3
15	K00186	238237.3	2729733.9	6.8	59.5	56.0	19.5	6.88	352	3.63	99.5
16	K00106	238447.5	2730227.6	7.8	13.3	13.3	22.9	6.19	18300	1.90	4.36
17	K00106	238447.5	2730227.6	7.8	13.3	13.3	24.0	6.42	27100	1.50	24.0
18	K00107	238003.2	2730255.8	6.5	15.5	15.5	23.8	6.35	4720	1.08	111.9
19	K00108	238083.6	2729377.7	6.5	17.6	17.6	23.4	6.57	1085	1.20	-44.6
20	K00109	238448.3	2730228.0	7.8	34.4	34.4	23.2	6.98	5320	2.83	-39.8
21	K00109	238448.3	2730228.0	7.8	34.4	34.4	20.3	6.76	5370	2.20	-81.3
22	K00110	238365.3	2730019.5	7.9	26.1	26.1	22.9	6.95	5450	1.98	-6.2
23	K00111	238751.9	2730099.1	9.3	23.1	23.1	24.3	6.40	11900	3.00	-56
24	K00178	237643.2	2729916.8	6.0	20.0	20.0	24.3	6.76	1815	5.21	-44.7
25	K00179	237781.4	2729829.5	6.1	19.5	19.5	26.6	6.68	1846	4.40	-65.1
26	K00180	237652.3	2729915.2	6.7	30.0	30.0	26.9	7.37	3280	8.01	76.6
27	K00181	237801.4	2730347.5	7.3	15.5	15.5	23.2	6.50	1920	1.90	2
28	K00182	237585.6	2730029.5	5.8	23.5	23.5	23.5	6.80	1080	5.00	-35
29	K00177	238765.7	2730134.3	10.1	23.2	23.2	25.1	6.70	6240	5.05	-77.8
30	K00129	238938.2	2730644.3	11.5	29.5	29.5	24.3	7.40	1102	2.03	-79
31	K00151	237866.6	2729545.3	5.9	81.9	57.9	23.3	7.52	893	1.67	-99.7
32	K00151	237866.6	2729545.3	5.9	81.9	77.9	19.6	7.60	873	3.97	-28.4
33	K00152	237867.9	2729544.9	5.9	22.6	22.6	19.9	6.80	1435	4.15	-2.8
34	K00153	238606.3	2729931.5	7.8	88.2	59.0	22.2	7.29	760	3.43	-95
35	K00153	238606.3	2729931.5	7.8	88.2	82.0	23.0	7.28	790	4.09	-102.3
36	K00154	238603.5	2729932.6	7.8	31.1	31.1	22.9	7.82	725	6.24	25.3
37	K00155	238009.1	2729961.1	6.3	80.9	55.0	23.3	7.00	844	6.15	-154.4
38	K00155	238009.1	2729961.1	6.3	80.9	73.0	21.9	8.04	847	5.70	-107.9
39	K00156	238010.2	2729960.8	6.3	25.3	25.3	21.0	6.69	4210	1.38	-35.7
40	K00157	238003.1	2730261.9	6.5	81.7	62.0	24.1	6.86	5380	2.26	16.4
41	K00157	238003.1	2730261.9	6.5	81.7	78.0	19.9	6.93	5440	2.74	26.6
42	K00158	238247.2	2730244.1	8.0	93.3	59.5	19.8	7.57	3320	2.31	-101.2
43	K00158	238247.2	2730244.1	8.0	93.3	87.0	22.1	7.30	3850	2.31	-157.6
44	K00159	238295.3	2730536.2	8.2	87.8	56.0	18.9	7.96	389	4.04	1539
45	K00159	238295.3	2730536.2	8.2	87.8	86.0	16.9	7.75	1196	5.04	139.3
46	K00160	238296.8	2730536.4	8.3	16.3	16.3	21.6	6.49	705	1.76	188.9
47	K00161	238456.8	2730231.6	7.8	91.9	54.5	24.1	6.63	6190	2.74	15
48	K00161	238456.8	2730231.6	7.8	91.9	84.8	23.2	6.62	6210	1.93	28.9
49	K00161	238456.8	2730231.6	7.8	91.9	54.5	23.9	6.70	5940	1.74	90.6
50	K00161	238456.8	2730231.6	7.8	91.9	84.8	24.0	6.57	6410	1.61	25.8
51	K00162	238936.6	2730113.3	8.9	81.5	44.9	21.8	7.44	884	3.12	-85.7
52	K00162	238936.6	2730113.3	8.9	81.5	76.4	21.8	7.33	871	3.02	-85.8
53	K00163	238936.4	2730114.9	8.7	17.6	16.9	25.3	6.97	1143	3.58	-76.2
54	K00164	238756.8	2730259.7	9.4	90.6	56.0	24.1	7.16	1376	1.24	-57.7
55	K00164	238756.8	2730259.7	9.4	90.6	88.0	23.9	7.35	860	2.16	-93.6
56	K00165	239337.2	2730876.3	13.1	70.6	46.0	23.8	7.85	664	3.75	23.0
57	K00165	239337.2	2730876.3	13.1	70.6	68.0	22.9	7.99	542	3.53	63.6
58	K00166	239338.5	2730877.0	13.0	11.2	11.2	23.1	6.80	758	2.65	21.3
59	K00167	239132.7	2729983.5	9.8	25.1	25.0	28.7	6.63	906	5.71	104.7
60	K00168	239094.1	2729959.9	9.7	16.4	4.0	29.7	4.33	1956	2.21	198.9
61	K00169	238993.0	2729886.6	10.0	15.5	15.0	26.0	6.93	3920	0.95	-105.5
62	K00174	239131.6	2729982.8	9.7	10.5	3.7	28.1	4.31	1058	1.02	238.1
63	W3	237839.3	2730461.2	—	17.7	抽水幫滿	24.3	8.17	957	6.90	-121.2
64	RW-01	237690.0	2729984.0	—	49.4	49.4	22.3	7.04	1579	3.54	-54.5
65	A-01	238413.6	2730314.2	—	99.8	46.2	24.0	7.97	647	2.74	-57.3
66	G-03	238870.9	2730085.0	—	12.9	抽水幫滿	25.4	7.01	1007	3.34	146.3
67	G-05	238734.8	2730070.3	—	16.4	抽水幫滿	23.7	7.15	799	4.11	6.3
68	H-02	238491.5	2729765.0	—	14.6	抽水幫滿	23.2	7.51	1116	4.52	-66.7
69	M1-3	236862.0	2728356.0	—	79.4	抽水幫滿	19.9	7.52	3960	3.56	111.7
70	M1-4	237037.0	2728565.0	—	75.0	35	23.1	7.52	699	1.60	-171.2
71	TF99-1	237266.0	2730652.0	—	26.0	抽水幫滿	23.8	7.32	675	4.09	-42.1
72	TF99-2	236738.0	2730437.0	—	4.7	4.7	22.3	7.07	582	2.70	103.6

備註：地下水採樣日期為100年11月30日～101年1月3日止

備註：地下水採樣日期為100年11月30日～101年1月3日止

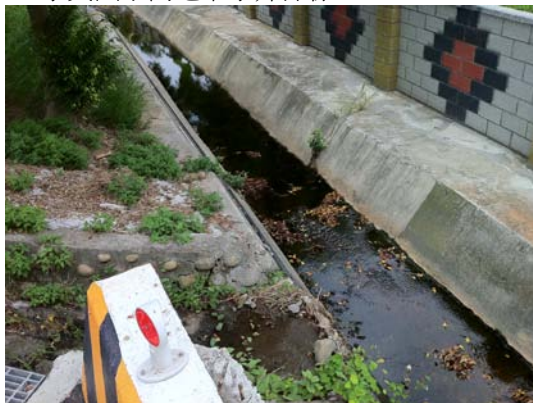
2012 年 7 月 5 日，在研究區進行採樣（圖三），共取得 7 個地表水和 13 個地下水（表三），共 20 個樣品。



永貞國小內地下水井採樣



中港溪鐵路橋下採樣



工業區內排水溝採樣



台氣頭份廠西側大坑附近地下水井採樣

圖三 2012 年 7 月 5 日部分採樣照片

表三 2012 年 7 月 5 日在研究區採樣及野外測量參數列表

監測井基本資料						地下水採樣水質參數							
項次	監測井井號	TWD97座標		井頂高程	井深	井篩區間	水位深度	採樣深度	水溫	pH	導電度	溶氧	氧化還原電位
		X	Y	(MSL, m)	(m)	(m)	(m)	m	℃		μmho/cm	mg/L	mV
81	K00175	238054.5	2730621.1	10.8	9	3.1-9.1	2.8	9	27.2	6.68	669	1.18	75
82	K00176	237931.2	2730525.6	10.9	10	3.8-9.8	3.3	7	26.2	6.76	727	1.11	-44
83	K00092	238631.3	2730113.2	9.4	8	2.5-8.5	2.6	5.4	29.6	6.81	1257	1.27	-106
84	K00110(泥沙)	238365.3	2730019.5	7.9	26	20.14-26.14	2.6	26.1	27.0	6.61	4070	3.16	-53
84	K00110	238365.3	2730019.5	7.9	26	20.14-26.14	2.6	26.1	27.0	6.61	4070	3.16	-53
85	K00111	238751.9	2730099.1	9.3	23	17.09-23.09	2.6	22	25.7	6.32	11330	1.87	-70
86	K00177	238765.7	2730134.3	10.1	23	17.2-23.2	3.3	20.2	24.8	6.57	6470	1.87	-100
87	K00158	238247.2	2730244.1	8.0	93	30.32-93.32	6.0	59.50	27.9	7.00	2452	1.90	-153
88	K00158	238247.2	2730244.1	8.0	93	30.32-93.32	6.0	87	27.1	7.11	5060	2.36	-164
89	K00159	238295.3	2730536.2	8.2	90	36.83-87.83	6.3	86	27.4	7.16	1268	2.14	-113
90	K00161	238456.8	2730231.6	7.8	92	34.94-91.94	2.8	54.5	26.5	6.37	5100	3.89	-135
91	K00161	238456.8	2730231.6	7.8	92	34.94-91.94	2.8	84.8	26.5	6.62	5730	1.94	-130
92	K00164	238756.8	2730259.7	9.4	91	33.61-90.61	3.5	46	27.3	6.06	765	1.70	-113
93	K00164	238756.8	2730259.7	9.4	91	33.61-90.61	3.5	68	25.4	6.91	841	0.92	-152
地表水													
94	20120705-1			永貞宮						3.12	26020	4.93	242
95	20120705-2			田寮社區旁水溝						7.18	592	7.31	-52
96	20120705-3			92井位南側水溝						6.88	535	7.38	-14
97	20120705-4			鐵路橋南側河水(加酸過濾)					30.7	7.39	11870	3.84	76
98	20120705-5			河南岸小溪下游(加酸過濾)					30.7	6.89	8360	5.47	84
99	20120705-6			河南岸小溪上游灣橋下(加酸過濾)					31.0	7.19	6000	5.27	110
100	20120705-7			鐵路橋北側河水(加酸過濾)					31.0	7.60	9180	3.75	77

我們對這 100 個樣品分別進行了元素、氫氧穩定同位素、溶解碳的碳同位素以及含氯有機物濃度分析，結果分別列於表四~表十。

表四 2011 年 12 月地下水樣品的地球化學分析結果

樣品編號	採樣深度 (m)	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	K (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Al (mg/L)	Ba (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	Sr (mg/L)	Li (mg/L)	Ni (mg/L)	Ga (mg/L)	Ti (mg/L)	δD (SMOW, ‰)	δ <sup>18</sup> O (SMOW, ‰)
K00046	4.9	140.25	6.75	1.20	1.15	0.22	0.72	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.02	0.01	-44.63	-7.29
K00047	7.13	158.00	8.90	1.70	2.30	0.07	1.50		0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	0.00	0.01	0.00	-42.39	-6.30
K00065	8.9	112.55	40.75	5.95	2.55	0.03	0.08	0.07	-	-	-	0.15	0.01	-	0.01	0.01	-42.98	-6.49
K00066	4.1	61.30	102.00	24.15	2.95	5.76	0.88	0.00	0.13	0.01	0.00	0.57	0.01	0.00	0.03	0.01	-37.55	-6.20
K00067	12.6	1350.00	347.10	52.90	10.05	10.22	10.85	0.10	0.16	-	0.01	1.14	0.04	-	0.02	-	-39.21	-6.19
K00069	12.3	72.65	67.00	16.20	5.85	0.18	0.93	0.01	0.03	0.01	0.01	0.35	0.02	0.00	0.03	0.02	-40.45	-6.42
K00175	6.38	138.70	15.15	0.45	1.45	0.00	0.12	0.02	0.02	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.02	0.01	-39.83	-6.51
K00176	7	110.10	29.00	2.50	3.30	0.13	0.94	0.01	0.03	0.00	0.00	0.12	0.02	0.00	0.02	0.00	-40.58	-6.52
K00092	5.4	220.00	26.35	4.95	5.20	0.19	0.59	0.01	0.04	0.00	0.00	0.18	0.02	0.00	0.02	0.00	-40.19	-6.44
K00183	10	99.95	72.10	19.10	4.70	0.15	0.50	0.05	0.02	-	-	0.33	0.01	-	0.01	0.01	-41.93	-6.68
K00184	52.23	27.60	82.15	23.05	1.80	0.20	0.35	0.01	0.27	0.00	0.00	0.69	0.03	0.00	0.02	0.00	-38.43	-6.34
K00184	58.23	27.00	83.05	22.65	4.40	0.08	0.30	0.14	0.28	0.00	0.00	0.78	0.02	0.00	0.02	0.01	-38.52	-6.13
K00185	12	65.10	70.90	19.50	5.40	0.67	0.61	0.00	0.03	0.00	0.00	0.31	0.01	0.00	0.02	0.00	-41.16	-6.62
K00186	53.46	35.80	63.90	17.85	1.75	0.14	0.56	0.16	0.24	0.00	0.00	0.51	0.03	0.00	0.02	0.01	-38.42	-6.15
K00186	59.46	22.65	42.70	11.50	5.20	0.05	0.32	0.08	0.12	0.00	0.00	0.35	0.02	0.00	0.02	0.01	-50.48	-7.86
K00106	10	3462.00	178.70	35.83	14.99	3.87	3.22	0.10	0.15	0.02	-	0.85	0.03	-	0.06	0.01	-41.89	-7.10
K00107	12	773.10	217.60	47.90	11.78	1.22	7.12	0.14	0.07	0.02	-	0.85	0.04	-	0.06	0.01	-40.41	-6.39
K00108	14.61	90.13	116.80	24.04	3.41	3.33	1.21	0.06	0.03	0.01	-	0.39	0.01	-	0.01	0.01	-43.55	-7.45
K00109	31	740.30	233.20	39.71	36.30	1.23	2.01	0.11	0.15	0.03	-	1.28	0.13	-	0.06	0.01	-39.75	-6.53
K00110	23	862.50	91.20	16.65	9.15	3.77	3.21	0.02	0.05	0.01	0.01	0.42	0.03	0.00	0.03	0.01	-40.20	-6.30
K00111	22	330.95	1689.50	275.30	19.25	5.66	1.75	-	1.04	0.00	0.00	6.19	0.10	0.00	0.02	0.00	-45.22	-4.64
K00178	17.5	250.75	70.25	14.90	6.10	0.15	1.13	0.01	0.06	0.00	0.00	0.39	0.03	0.00	0.02	0.00	-39.06	-5.92
K00179	16.5	272.50	91.05	19.00	6.80	0.06	1.30	0.02	0.04	0.00	0.00	0.41	0.03	0.00	0.02	0.00	-40.37	-6.29
K00180	27	340.85	239.55	106.80	17.65	0.07	1.27	0.19	0.36	0.00	0.01	0.29	0.06	0.00	0.02	0.00	-33.69	-5.47
K00181	9.5	205.00	130.00	39.70	12.10	0.08	2.01	0.07	0.11	0.00	0.00	0.67	0.03	0.00	0.02	0.00	-39.34	-6.11
K00182	20.5	136.00	51.25	13.75	3.00	0.19	0.69	0.01	0.04	0.00	0.00	0.28	0.03	0.00	0.02	0.00	-38.36	-6.28
K00177	20.2	286.60	916.00	177.90	17.25	0.16	1.25	-	0.39	0.00	0.00	3.62	0.07	0.00	0.02	0.00	-41.85	-5.57
K00129	28	165.00	60.55	18.40	4.15	0.64	0.30	0.02	0.17	0.00	0.03	0.44	0.02	0.00	0.03	0.02	-37.31	-6.01
K00151	57.9	120.05	52.35	13.90	3.65	0.05	0.23	0.01	0.10	0.00	0.00	0.42	0.03	0.00	0.02	0.00	-38.51	-6.45
K00151	77.9	122.60	48.25	13.25	4.75	0.15	0.19	0.05	0.09	0.00	0.00	0.41	0.03	0.00	0.02	0.01	-38.46	-6.63
K00152	22.6	76.91	181.50	29.16	2.87	2.02	1.20	0.07	0.09	0.01	-	0.79	0.02	-	0.01	0.01	-36.28	-6.14
K00153	59	54.20	80.80	22.75	2.70	1.35	0.29	0.02	0.25	0.00	0.00	0.61	0.02	0.00	0.04	0.01	-37.19	-6.05
K00153	82	58.45	78.20	23.00	3.95	0.24	0.27	0.04	0.21	-	-	0.56	0.02	-	0.01	0.01	-37.33	-5.92
K00154	31.1	106.00	42.90	13.80	4.00	0.04	0.13	0.04	0.17	0.00	0.00	0.44	0.02	0.00	0.03	0.02	-39.56	-6.69
K00155	55	131.60	49.45	18.00	3.00	0.03	0.09	0.00	0.10	0.00	0.00	0.61	0.03	0.00	0.02	0.01	-39.26	-6.37
K00155	73	134.85	48.55	17.60	3.00	0.03	0.08	0.00	0.13	0.00	0.00	0.61	0.03	0.00	0.02	0.01	-42.29	-7.73
K00156	25.3	615.00	111.85	20.40	9.90	11.03	3.51	0.00	0.06	0.02	0.00	0.45	0.03	0.00	0.04	0.01	-40.20	-6.10
K00157	62	725.90	413.10	109.00	10.38	3.00	1.69	0.15	0.09	0.00	-	2.82	0.05	-	0.02	0.01	-40.22	-6.52
K00157	78	766.50	439.50	114.50	11.10	3.35	1.48	0.15	0.08	0.01	-	2.59	0.05	-	0.02	0.01	-38.87	-6.08
K00158	59.5	155.70	393.60	138.45	7.05	0.62	2.49	0.00	1.33	0.02	0.00	3.66	0.05	0.00	0.03	0.00	-39.18	-6.30
K00158	87	156.10	390.55	140.30	7.40	1.17	2.66	0.00	1.39	0.01	0.00	0.52	0.04	0.00	0.03	2.80	-38.72	-6.21
K00159	56.3	64.46	26.53	7.12	2.10	0.02	0.05	0.04	0.08	0.02	-	0.19	0.01	-	0.01	0.01	-42.30	-6.93
K00159	86	145.30	95.13	24.86	3.31	0.04	0.25	0.06	0.26	0.02	-	0.61	0.02	-	0.01	0.01	-40.22	-6.52
K00160	15.6	86.59	54.76	12.30	3.36	-	0.07	0.04	0.02	0.01	-	0.27	0.01	-	0.01	0.01	-44.72	-7.16
K00161	54.5	662.50	546.30	96.58	7.95	12.32	3.03	0.17	0.80	0.04	-	2.55	0.05	-	0.06	0.00	-38.17	-6.11
K00161	84.8	631.30	465.80	89.80	8.40	6.51	3.05	0.21	0.67	0.08	-	2.32	0.07	-	0.06	0.01	-37.89	-6.00
K00162	44.9	78.80	109.05	24.65	2.90	1.55	0.33	0.00	0.07	0.00	0.00	0.61	0.02	0.00	0.02	0.01	-36.95	-6.00
K00162	76.4	75.20	106.20	24.60	2.95	2.35	0.27	0.00	0.06	0.00	0.00	0.56	0.02	0.00	0.02	0.01	-37.46	-6.18
K00163	88	170.45	53.80	12.00	6.00	0.29	1.78	0.05	0.04	0.00	0.02	0.31	0.02	0.00	0.02	0.01	-42.98	-6.93
K00164	46	99.25	145.45	38.00	3.60	1.86	1.18	0.07	0.39	-	-	1.04	0.02	-	0.01	0.00	-39.29	-6.45
K00164	68	50.95	106.60	29.70	3.00	1.97	0.26	0.01	0.27	0.00	0.00	0.76	0.01	0.00	0.01	0.00	-39.39	-6.44
K00165	46	61.55	36.95	15.20	3.90	0.10	0.11	0.11	0.12	0.00	0.00	0.43	0.03	0.00	0.03	0.01	-39.41	-6.75
K00165	68	62.00	37.30	14.10	4.30	0.07	0.09	0.09	0.10	0.00	0.01	0.40	0.03	0.00	0.02	0.01	-41.92	-7.07
K00166	10.4	75.95	52.75	13.10	3.20	0.07	0.20	0.12	0.05	0.00	0.00	0.30	0.02	0.00	0.02	0.01	-43.68	-7.08
K00167	25	66.20	66.95	16.95	4.45	0.17	1.06	0.27	0.02	0.00	0.00	0.39	0.02	0.00	0.03	0.01	-44.02	-7.20
K00168	6	161.80	84.55	45.30	7.35	22.61	2.91	14.52	0.00	0.00	1.70	0.53	0.14	0.08	0.12	0.00	-39.42	-6.07
K00169	12	396.00	271.80	78.95	11.15	7.52	5.53	0.00	0.05	0.00	0.00	0.45	0.02	0.00	0.02	0.00	-41.07	-6.68
K00174	6	129.95	26.10	12.95	5.70	44.72	0.98	3.80	0.00	0.00	0.38	0.19	0.07	0.00	0.04	0.00	-43.22	-7.01
W3	11.5	133.70	50.60	15.70	3.20	0.14	0.17	0.01	0.25	0.03	0.00	0.46	0.03	0.00	0.03	0.01	-38.40	-6.72
RW-01	49.3	153.65	112.65	69.75	9.25	1.03	0.72	0.00	0.39	0.02	0.00	1.10	0.03	0.00	0.03	0.01	-39.72	-6.65
A-01	46.22	86.40	19.55	7.15	3.15	0.06	0.08	0.06	0.12	0.00	0.00	0.24	0.03	0.00	0.02	0.01	-37.15	-6.65
G-03	—	178.00	44.16	8.94	3.80	1.28	0.71	0.04	0.03	0.01	-	0.19	0.01	-	0.01	0.01	-42.81	-7.06
G-05	—	105.90	45.90	8.75	2.75	4.21	0.90	0.00	0.04	0.02	0.00	0.20	0.02	0.00	0.03	0.02	-42.28	-7.00
H-02	—	33.45	88.55	21.30	4.85	4.55	1.24	0.00	0.03	0.00	0.00	0.34	0.02	0.00	0.02	0.00	-43.76	-7.23
M1-3	—	230.30	438.50	149.20	5.93	0.08	0.93	0.10	0.31	0.06	-	0.42	0.05	-	0.01	0.00	-39.84	-6.88
M1-4	35	32.70	45.90	28.75	13.70	0.04	2.58	0.00	0.08	0.00	0.00	0.36	0.02	0.00	0.02	0.00	-38.65	-6.63
TF99-1	—	62.80	55.90	18.90	5.10	1.38	1.23	0.04	0.15	-	-	0.50	0.01	-	0.01	0.01	-43.35	-7.15
TF99-2	4.7	43.00	59.85	16.95	6.50	1.37												



表五 2011 年 12 月地下水樣品化學性質和含氯有機物濃度

樣品編號	採樣深度 (m)	總硬度 (mg/L)	總溶解固體 (mg/L)	氯鹽 (mg/L)	氨氮 (mg/L)	硝酸鹽氮 (mg/L)	硫酸鹽 (mg/L)	總有機碳 (mg/L)	氯乙烯 (mg/L)	1,2-二氯乙烯 (mg/L)
K00046	9.5	26.30	416.00	19.10	0.20	<0.01	87.30	1.60	ND	0.00
K00047	10.1	32.00	624.00	19.10	0.26	<0.01	148.00	0.80	ND	0.00
K00065	11.9	113.00	474.00	34.50	<0.05	1.46	97.20	0.60	ND	ND
K00066	5.6	337.00	592.00	89.00	0.71	<0.01	64.50	1.50	ND	0.00
K00067	15.6	ND	6160.00	2530.00	0.27	<0.01	236.00	0.80	0.01	0.02
K00069	13.8	229.00	590.00	36.60	16.70	0.62	207.00	1.00	ND	0.00
K00175	9.1	42.90	492.00	45.70	<0.05	0.17	99.40	1.40	ND	0.00
K00176	9.8	77.50	431.00	41.70	0.07	<0.01	93.60	1.00	0.16	0.03
K00092	8.43	87.40	3820.00	1760.00	0.90	0.03	213.00	1.70	0.01	0.02
K00183	13.8	245.00	608.00	45.70	0.06	0.33	236.00	0.70	ND	0.01
K00184	52.2	327.00	460.00	25.30	0.36	0.05	94.70	0.70	ND	ND
K00184	58.1	—	—	—	—	—	—	—	ND	ND
K00185	15	248.00	564.00	39.50	<0.05	0.03	183.00	0.60	ND	0.01
K00186	52	236.00	406.00	22.80	0.43	<0.01	64.30	1.20	ND	ND
K00186	56	—	—	—	—	—	—	—	ND	ND
K00106	13.3	593.00	10300.00	6400.00	0.30	0.04	254.00	2.60	ND	0.02
K00107	15.5	685.00	3110.00	1580.00	0.36	<0.01	347.00	0.90	0.00	0.03
K00108	17.6	371.00	782.00	72.70	0.06	0.01	266.00	0.80	ND	0.00
K00109	34.4	717.00	3570.00	1380.00	0.25	0.43	177.00	0.60	0.01	0.00
K00110	26.1	294.00	3200.00	1480.00	1.02	0.02	282.00	1.50	ND	0.02
K00111	22.85	5470.00	9440.00	3060.00	0.62	0.03	177.00	27.00	5.86	<0.02*
K00178	20	232.00	1020.00	362.00	0.74	0.12	127.00	1.30	0.00	0.00
K00179	19.475	304.00	1150.00	403.00	0.36	0.01	167.00	1.30	0.00	0.01
K00180	30	928.00	2510.00	951.00	0.84	0.04	77.30	1.20	0.35	0.00
K00181	15.5	484.00	1260.00	355.00	0.10	0.01	253.00	1.70	ND	0.04
K00182	23.1	184.00	672.00	142.00	0.35	0.02	96.90	1.60	0.00	ND
K00177	23.2	575.00	6020.00	2050.00	0.61	0.01	370.00	6.00	1.18	<0.01*
K00129	29.5	216.00	730.00	236.00	0.38	<0.01	60.30	<0.5	0.16	0.00
K00151	57.9	190.00	531.00	66.90	0.32	<0.01	103.00	1.70	ND	ND
K00151	77.9	—	—	—	—	—	—	—	ND	ND
K00152	22.6	571.00	1130.00	224.00	0.10	0.02	192.00	3.20	ND	ND
K00153	59	288.00	536.00	44.70	0.39	0.02	98.40	<0.5	0.02	0.00
K00153	82	—	—	—	—	—	—	—	0.02	0.00
K00154	31.1	159.00	444.00	26.90	0.59	0.01	93.30	0.60	ND	ND
K00155	55	186.00	482.00	116.00	0.70	0.02	44.70	0.90	0.19	ND
K00155	73	—	—	—	—	—	—	—	0.18	ND
K00156	25.3	351.00	2360.00	1170.00	0.87	<0.01	264.00	0.90	0.00	0.02
K00157	62	1360.00	3740.00	1100.00	1.00	<0.01	1170.00	1.20	0.01	0.00
K00157	78	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.00
K00158	59.5	1540.00	2690.00	1070.00	1.84	0.01	29.10	3.30	2.40	0.00
K00158	87	—	—	—	—	—	—	—	3.18	0.00
K00159	56	88.30	256.00	7.90	0.34	0.01	10.20	<0.5	ND	ND
K00159	86	—	—	—	—	—	—	—	0.01	ND
K00160	16.3	171.00	436.00	75.90	0.38	0.95	96.80	0.80	ND	0.00
K00161	54.5	1770.00	3970.00	2520.00	0.48	0.10	103.00	1.90	16.30	2.95
K00161	84.8	—	—	—	—	—	—	—	11.50	2.26
K00162	44.9	357.00	566.00	31.90	0.31	<0.01	146.00	0.90	ND	ND
K00162	76.4	—	—	—	—	—	—	—	ND	ND
K00163	16.89	173.00	724.00	23.60	9.26	<0.01	162.00	8.60	ND	0.00
K00164	56	488.00	1060.00	269.00	0.39	<0.01	111.00	0.90	6.36	2.33
K00164	88	—	—	—	—	—	—	—	1.34	0.48
K00165	46	148.00	414.00	57.80	0.98	0.05	38.80	1.00	ND	ND
K00165	68	—	—	—	—	—	—	—	ND	ND
K00166	11.2	178.00	509.00	29.00	0.06	2.27	157.00	1.40	ND	ND
K00167	25	232.00	536.00	36.70	16.20	<0.01	249.00	3.00	ND	ND
K00168	4	372.00	1800.00	80.50	3.16	0.40	1080.00	3.70	ND	ND
K00169	15	1010.00	2870.00	259.00	129.00	0.02	1650.00	3.70	ND	ND
K00174	3.7	120.00	782.00	43.60	4.53	0.03	430.00	3.60	ND	ND
W3	11.5	187.00	548.00	156.00	0.98	0.01	8.69	0.80	ND	ND
RW-01	49.3	579.00	1210.00	441.00	0.72	0.11	65.30	0.90	0.04	0.00
A-01	46.22	77.50	356.00	48.40	0.95	0.05	19.60	1.40	0.10	0.00
G-03	—	138.00	600.00	24.10	5.61	0.01	263.00	3.30	ND	0.01
G-05	—	149.00	550.00	28.60	0.25	<0.01	185.00	1.10	ND	0.01
H-02	—	310.00	846.00	61.40	<0.05	0.03	330.00	1.00	ND	0.02
M1-3	—	1600.00	2980.00	1260.00	1.65	ND	196.00	0.90	0.13	ND
M1-4	35	225.00	418.00	40.20	1.38	0.01	5.20	3.40	0.00	ND
TF99-1	—	225.00	460.00	51.60	0.54	ND	62.00	0.80	ND	0.00
TF99-2	4.7	219.00	392.00	28.10	<0.05	0.53	75.10	1.70	ND	ND

表六 2011 年 12 月地表水樣品的地球化學分析結果

樣品編號	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Al (mg/L)	K (mg/L)	Na (mg/L)	Ba (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	Sr (mg/L)	Li (mg/L)	Ni (mg/L)	Ga (mg/L)	Ti (mg/L)	δD (SMOW, ‰)	δ <sup>18</sup> O (SMOW, ‰)
20111205-1C	150.35	345.80	0.59	0.59	0.09	110.90	394.80	0.02	-	-	1.96	0.31	-	0.02	0.01	-31.82	-5.35
20111205-2C	51.70	19.85	0.01	0.10	0.04	11.05	82.80	0.02	0.01	0.02	0.35	0.01	-	0.02	0.01	-46.05	-7.45
20111205-3C	24.90	5.15	-	-	0.05	4.55	182.20	-	0.12	-	0.18	0.02	-	0.02	0.01	-45.64	-7.42
20111205-4C	43.15	10.05	0.01	0.06	0.01	4.25	20.40	0.02	0.02	-	0.23	0.03	-	0.02	0.01	-45.05	-7.46
20111205-5C	36.55	7.70	0.02	0.05	0.02	4.80	15.05	0.02	-	-	0.21	-	-	0.02	0.01	-44.21	-7.39
20111205-6C	26.15	6.40	0.04	0.03	0.05	5.40	76.40	0.01	0.00	0.10	0.19	0.01	-	0.02	0.01	-44.35	-7.49
20111205-7C	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	0.02	-	-	0.02	0.01	-56.05	-9.14
20111205-8C	14.15	1.86	2.51	0.07	2.36	2.95	18.25	0.03	0.05	1.24	0.08	0.04	0.04	0.03	0.12	-56.60	-8.93

表七 2012 年 7 月地表水和地下水樣品的元素地球化學分析結果

項次	監測井井號	採樣深度 m	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	K (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Al (mg/L)	Ba (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	Sr (mg/L)	Li (mg/L)	Ni (mg/L)	Ga (mg/L)	Ti (mg/L)
81	K00175	9	136.75	10.45	1.55	4.90	0.009	0.079	0.016	0.019	-	-	0.058	0.007	-	0.009	0.005
82	K00176	7	109.00	26.90	3.00	10.55	2.018	1.152	0.025	0.029	-	-	0.115	0.007	-	0.008	0.004
83	K00092	5.4	198.15	20.90	4.15	30.45	1.357	0.983	0.035	0.028	-	-	0.150	0.008	-	0.007	0.005
84	K00110	26.1	777.00	50.60	9.20	50.85	2.464	1.804	0.332	0.033	0.001	-	0.241	0.020	-	0.008	0.01
85	K00111	22	326.85	1389.00	245.85	40.70	7.451	1.282	0.063	0.471	-	-	5.066	0.060	-	-	-
86	K00177	20.2	987.50	573.00	59.30	97.10	9.591	0.529	0.067	0.062	-	-	1.612	0.132	-	0.009	-
87	K00158	59.50	55.75	37.65	12.00	5.10	0.069	0.122	0.031	0.150	-	-	0.375	0.012	-	0.007	-
88	K00158	87	182.80	446.50	146.35	11.25	1.085	1.916	0.066	1.035	-	-	3.604	0.045	-	-	-
89	K00159	86	112.40	88.20	22.55	14.70	0.120	0.220	0.042	0.247	-	-	0.518	0.016	-	0.007	-
90	K00161	54.5	640.00	364.45	73.10	9.30	4.280	1.868	0.066	0.451	-	-	1.744	0.030	-	0.006	-
91	K00161	84.8	643.50	411.35	78.55	27.45	5.145	2.052	0.065	0.457	-	-	1.824	0.031	-	0.008	-
92	K00164	46	49.30	83.75	18.45	7.55	1.998	0.252	0.039	0.166	-	-	0.428	0.013	-	0.007	-
93	K00164	68	30.55	85.00	21.85	14.50	2.355	0.307	0.039	0.202	-	-	0.484	0.012	-	0.006	-
地表水																	
94	20120705-1	永貞宮	6460.00	125.40	46.90	16.15	1.651	0.271	1.101	0.090	0.016	0.112	4.049	0.017	0.003	0.01	0.007
97	20120705-4	鐵路橋南側河水	2204.50	113.25	247.00	83.45	-	0.119	0.058	0.020	-	-	1.220	0.058	-	-	-
98	20120705-5	河南岸小溪下游	1473.00	90.00	174.60	51.15	0.006	0.070	0.070	0.018	-	-	0.912	0.043	-	-	-
99	20120705-6	河南岸小溪上游灣橋下	1010.00	74.20	128.45	42.00	-	0.091	0.064	0.017	-	-	0.678	0.031	-	-	-
100	20120705-7	鐵路橋北側河水	1610.50	95.35	185.85	53.95	-	0.141	0.059	0.022	-	-	0.976	0.043	-	-	-
備註:採樣日期為2012年7月5日, 使用樣品(加4N硝酸過濾), 總樣品數共18瓶																	
紅字代表RSD> 5%; - 代表濃度低於背景值																	

表八 2012 年 7 月地表水和地下水樣品的氫氧同位素及氯乙烯濃度分析結果

項次	監測井井號	TWD97座標		採樣深度	δD	δ <sup>18</sup> O	氯乙烯濃度*
		X	Y		m	(SMOW, ‰)	(SMOW, ‰)
81	K00175	238054.5	2730621.1	9	-41.89	-6.69	2.96
82	K00176	237931.2	2730525.6	7	-43.26	-6.88	0.428
83	K00092	238631.3	2730113.2	5.4	-41.76	-6.61	0.0104
84	K00110	238365.3	2730019.5	26.1	-38.87	-6.30	0.00134
85	K00111	238751.9	2730099.1	22	-45.17	-4.77	0.706
86	K00177	238765.7	2730134.3	20.2	-39.22	-5.29	4.62
87	K00158	238247.2	2730244.1	59.50	-41.05	-6.73	2.17
88	K00158	238247.2	2730244.1	87	-37.37	-6.06	3.5
89	K00159	238295.3	2730536.2	86	-41.60	-6.65	0.00484
90	K00161	238456.8	2730231.6	54.5	-39.05	-6.34	10.4
91	K00161	238456.8	2730231.6	84.8	-38.11	-6.15	1.98
92	K00164	238756.8	2730259.7	46	-43.30	-6.74	0.00606
93	K00164	238756.8	2730259.7	68	-40.16	-6.36	0.00581
地表水							
94	20120705-1	永貞宮			-26.05	-6.51	0.00312
95	20120705-2	田寮社區旁水溝			-45.60	-7.16	
96	20120705-3	92井位南側水溝			-40.86	-6.39	0.00228
* 備註:採樣日期為2012年7月5日				使用加鹽酸樣品，總樣品數共15瓶			
氯乙烯法規值管制標準為0.02mg/L							

表九 2011 年 12 月地下水和地表水樣品溶解碳含量、碳同位素和有機碳含量

Sample ID	C (mg/L)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, PDB)	Error (‰, PDB)	TOC (mg/L)	氯乙烯 (mg/L)	1,2-二氯乙烯 (mg/L)
A-01	54.4	-14.05	0.80	1.40	0.10	0.00
G-03	80.2	-17.43	0.50	3.30	ND	0.01
G-05	38.1	-13.10	0.88	1.10	ND	0.01
H-02	41.1	-14.91	0.93	1.00	ND	0.02
K00046	52.6	-17.13	0.62	1.60	ND	0.00
K00047	47.1	-15.44	0.82	0.80	ND	0.00
K00065	46.8	-15.74	0.72	0.60	ND	ND
K00066	66.3	-14.30	0.62	1.50	ND	0.00
K00067	34.1	-11.55	0.93	0.80	0.01	0.02
K00069	19.5	-9.37	1.15	1.00	ND	0.00
K00092	52.3	-14.25	1.02	1.70	0.01	0.02
K00092 (再重測)	61.2	-15.20	0.65			
K00106	34.9	-14.81	0.84	2.60	ND	0.02
K00107	46.7	-14.33	0.58	0.90	0.00	0.03
K00108	47.2	-14.76	0.64	0.80	ND	0.00
K00109	44.7	-13.07	0.58	0.60	0.01	0.00
K00110	43.5	-11.75	0.79	1.50	ND	0.02
K00111	53.2	-12.75	0.56	27.00	5.86	<0.02*
K00129	48.1	-12.21	0.56	<0.5	0.16	0.00
K00151-57.9m	65.6	-13.50	0.69	1.70	ND	ND
K00151-77.9m	65.6	-13.54	0.82	—	ND	ND
K00152	60.6	-13.74	0.69	3.20	ND	ND
K00153-59m	64.5	-13.43	0.76	<0.5	0.02	0.00
K00153-82m	61.5	-13.47	0.41	—	0.02	0.00
K00154	64.0	-11.90	0.71	0.60	ND	ND
K00155-55m	59.8	-13.29	0.76	0.90	0.19	ND
K00155-73m	59.5	-14.64	1.13	—	0.18	ND
K00156	39.6	-12.34	0.63	0.90	0.00	0.02
K00157-62m	82.7	-15.64	0.56	1.20	0.01	0.00
K00157-78m	85.5	-15.10	0.52	—	0.01	0.00
K00158-59.5m	59.4	-13.95	0.45	3.30	2.40	0.00
K00158-87m	58.9	-13.20	0.57	—	3.18	0.00
K00159-56.3m	50.9	-10.14	0.70	<0.5	ND	ND
K00159-86m	58.6	-12.66	0.62	—	0.01	ND
K00160	40.0	-12.74	0.88	0.80	ND	0.00
K00161-54.5m	56.1	-12.96	0.75	1.90	16.30	2.95
K00161-84.8m	62.0	-13.85	0.70	—	11.50	2.26
K00162-44.9m	61.8	-15.20	0.54	0.90	ND	ND
K00162-76.4m	72.1	-16.13	0.56	—	ND	ND
K00163	100.1	-17.58	0.39	8.60	ND	0.00
K00164-56m	55.3	-13.98	0.65	0.90	6.36	2.33
K00164-88m	56.1	-13.78	0.63	—	1.34	0.48
K00165-46m	51.9	-13.82	0.81	1.00	ND	ND
K00165-68m	45.6	-12.85	0.68	—	ND	ND
K00166	42.1	-14.08	1.03	1.40	ND	ND
K00167	36.0	-12.38	0.74	3.00	ND	ND
K00168	0.0	—	—	3.70	ND	ND
K00169	9.9	—	—	3.70	ND	ND
K00174	0.0	—	—	3.60	ND	ND
K00175	47.8	-13.79	0.69	1.40	ND	0.00
K00176	43.8	-15.34	1.05	1.00	0.16	0.03
K00177	47.1	-11.50	0.86	6.00	1.18	<0.01*
K00178	44.8	-14.02	0.81	1.30	0.00	0.00
K00179	47.0	-15.51	0.78	1.30	0.00	0.01
K00180	55.9	-13.13	0.86	1.20	0.35	0.00
K00181	50.9	-13.15	0.69	1.70	ND	0.04
K00182	52.8	-13.48	0.58	1.60	0.00	ND
K00183	33.0	-14.22	0.84	0.70	ND	0.01
K00184-52.2m	50.7	-13.36	0.69	0.70	ND	ND
K00184-58.2m	50.0	-13.10	0.56	—	ND	ND
K00185	31.3	-13.51	1.15	0.60	ND	0.01
K00186-53.5m	47.1	-11.45	1.12	1.20	ND	ND
K00186-59.5m	31.2	-12.08	1.02	—	ND	ND
M1-3	36.9	-15.61	0.91	0.90	0.13	ND
M1-4	68.3	-16.04	0.82	3.40	0.00	ND
RW-01	49.2	-14.07	0.81	0.90	0.04	0.00
TF99-1	54.9	-14.57	0.58	0.80	ND	0.00
TF99-2	49.6	-14.00	0.89	1.70	ND	ND
W3	61.9	-12.96	0.52	0.80	ND	ND
20111205-1A	44.5	-12.99	0.61			
20111205-2A	29.7	-11.59	0.80			
20111205-3A	27.8	-17.27	1.01			
20111205-4A	29.0	-13.49	1.49			
20111205-5A	23.2	-11.54	1.21			
20111205-6A	13.2	—	—			
20111205-7A	0.0	—	—			
20111205-8A	0.1	—	—			

表十 2012 年 7 月地下水和地表水樣品溶解碳含量、碳同位素

Sample ID		C (mg/L)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, PDB)	氯乙烯 (mg/L)
K00092		57.98	-19.40	0.0104
K00110		47.04	-16.18	0.0013
K00111		124.47	-33.12	0.7060
K00158-59.5m		48.30	-19.67	2.1700
K00158-87m		49.48	-19.41	3.5000
K00159		47.40	-13.12	0.0048
K00161-54.5m		45.85	-11.95	10.4000
K00161-84.8m		54.90	-19.95	1.9800
K00164-46m		49.09	-14.07	0.0061
K00164-68m		51.23	-13.55	0.0058
K00175		47.17	-18.86	2.9600
K00176		42.93	-16.70	0.4280
K00177		134.35	-17.17	4.6200
20120705-1	永貞宮旁水溝水	4.96	-16.47	0.0031
20120705-2	田寮社區旁水溝水	25.27	-10.39	0.0000
20120705-3	92井位南側水溝水	5.52	-	0.0023

表一~表三列出了兩次採樣共 100 個樣品的詳細資料，並給出各樣品的 pH、溶氧、電導度等，**超出計畫指標（各 90 筆）的任務**。在這些樣品中，包含不同深度、不同季節的地表水和地下水。

在表四、表六和表七中，分別列出了元素含量分析結果，不僅包括了 Ca、Mg、Sr、Ba、Na、K、Li、Fe、Mn、Cu、Zn、Ni，而且還加測了 Al、Ga、Ti，共得到 98 個樣品的元素含量，**超出計畫指標（各 90 筆）的任務**。

在表四、表六和表八中，分別列出了 95 個水樣的氫氧同位素分析結果，**超出計畫指標（各 90 筆）的任務**。

在表五和表八中，分別列出了 92 個樣品的氯乙烯分析結果和 72 個樣品的二氯乙烷，**超出計畫指標（各 46 筆）的任務**。對於 2012 年 7 月的樣品以及地表水樣品沒有進行二氯乙烷分析，因為我們知道只要氯乙烯的結果就可以滿足需求。

在表九和表十中，分別列出了 95 個水樣的 $\delta^{13}\text{C}$ （DIC）分析結果，遠遠**超出計畫指標（各 20 筆）的任務**。



需要指出的是，本計畫乃是執行環保署的第一個有關地下水污染場址的研究計畫，在最初設計時，並未對如此眾多的樣品採集和分析進行經費需求，為了出色地完成計畫任務，我們不惜成本地進行分析研究，以求盡可能地達到完善的研究成果，為今後準確地定出最有效的地球化學指標奠定基礎。

结合同位素数据、元素含量数据以及常规野外测量数据，我们将得到研究地区地表水/地下水的同位素和地球化学特征，地下水的來源、補給、混合和運移状况，结合钻井位置和采样深度以及二氯乙烷和氯乙烯浓度、 $\delta^{13}\text{C}$  值，綜合地質與水文背景，我們將嘗試回答以下問題：

1. 深層監測井地下水中的二氯乙烷和氯乙烯的高濃度是從哪裡來的？是從淺層地下水下滲的呢，還是從深埋在地下的固體污染源來的？
2. 高污染濃度的中心位置與地下水運移的關係？污染物是否隨地下水擴散遷移？如何遷移？
3. 二氯乙烷和氯乙烯的污染可能的來源？與台氯頭份廠、前國泰塑膠等廠家的關係？
4. 二氯乙烷和氯乙烯是否在地下水中有降解或氧化現象？
5. 能否建立一套多種同位素和地球化學方法（Multiple -evidence of isotopic and geochemical approach, MEIGA）來研究地下水污染？哪些指標應該是有效的？

## 主要發現與結論

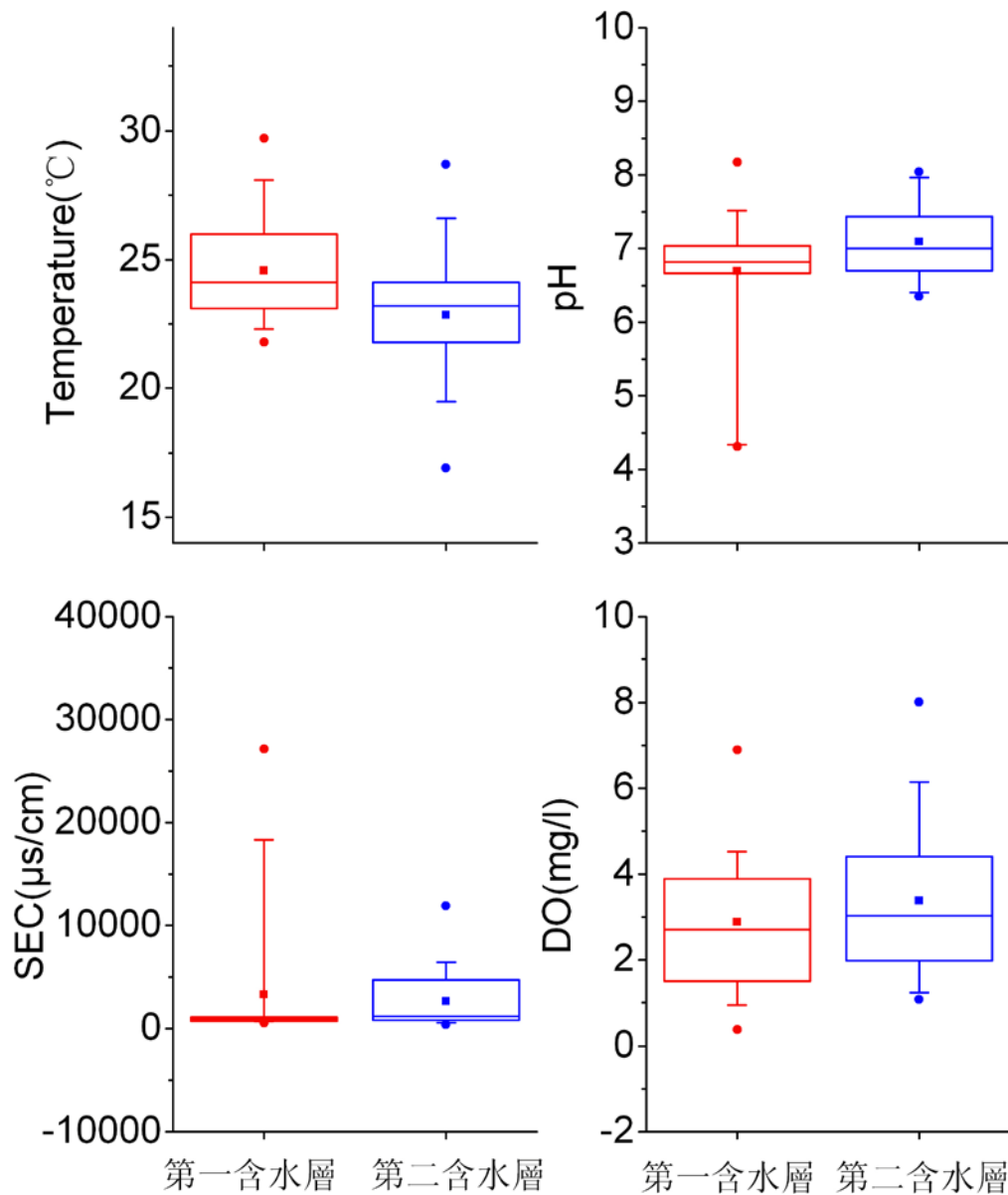
### 一、研究區的地質與水文背景

研究區的出露地層為礫石、粗沙、細沙和粘土構成的具有層狀分佈的全新世鬆散沉積層，厚度約 20~25m。下伏地層為第四紀更新世頭嵙山層砂岩和泥岩。根據地層分佈，含水層具有雙層結構，上層為全新世地層構成的鬆散岩類孔隙水含水層，厚度約為 20m，下層為砂岩和泥岩構成的基岩裂隙水含水層，未見底。以採

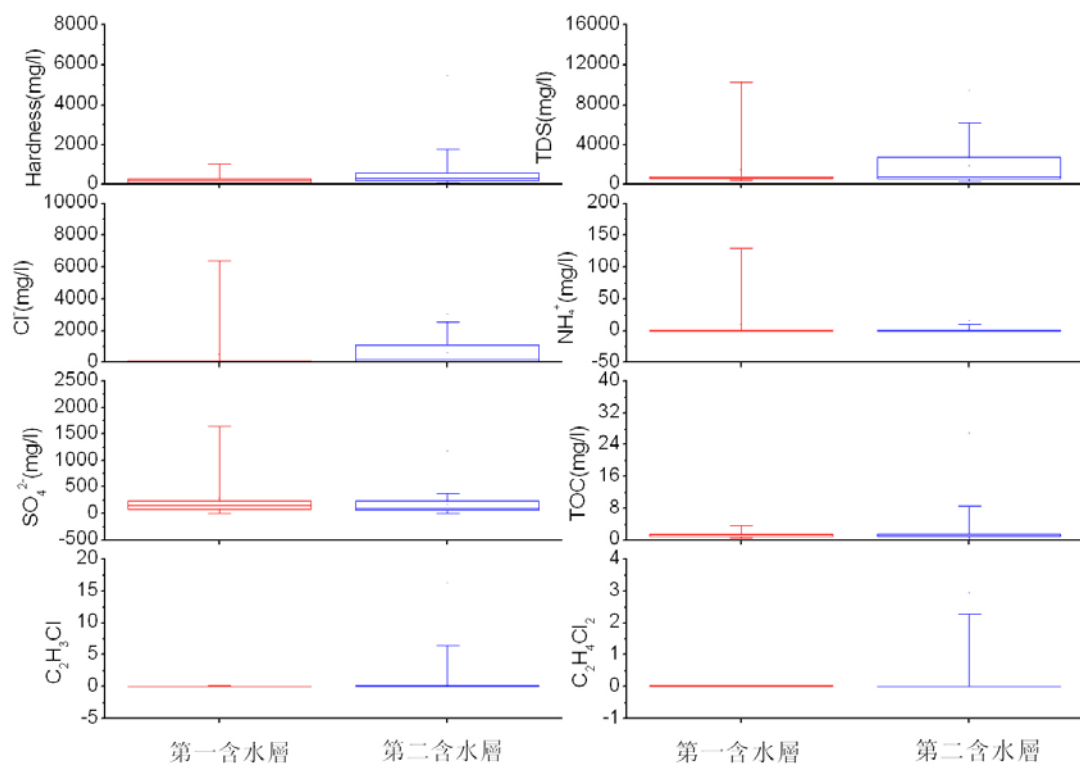
樣深度在 25m 以內的樣品代表第一含水層，採樣深度大於 25m 的樣品代表第二含水層。第一含水層與第二含水層之間未見連續的隔水層分佈，推斷含水層之間水力聯繫密切。

## 二、第一和第二含水層之間水化學的差異

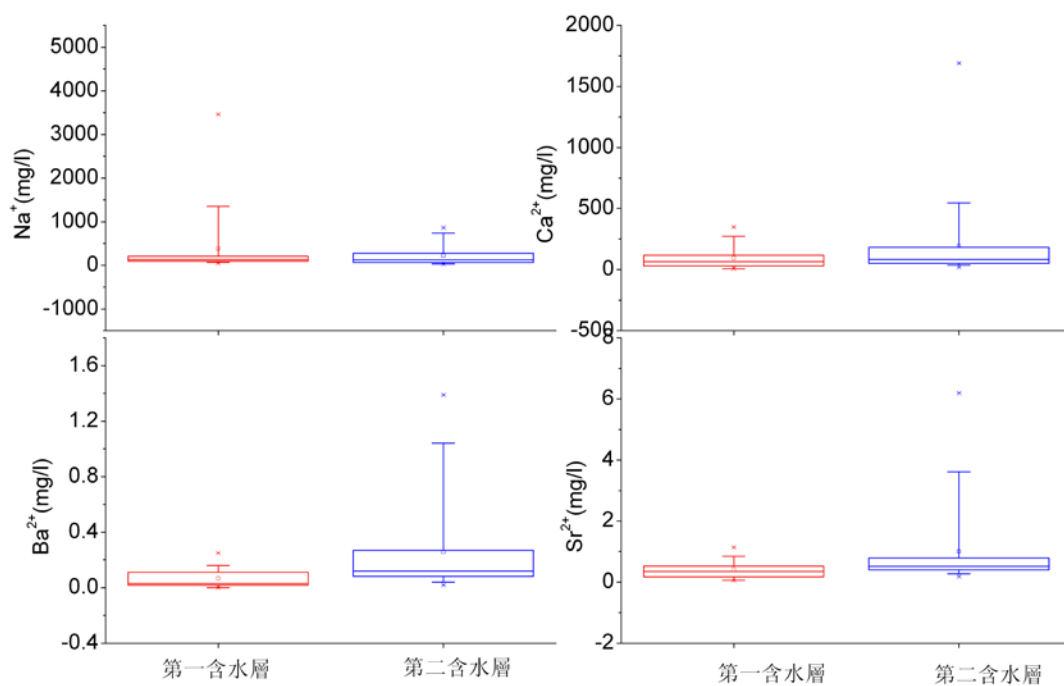
以採樣深度在 25m 以內的樣品代表第一含水層，採樣深度大於 25m 的樣品代表第二含水層。我們將前列表中的各地球化學指標按照不同深度進行平均值、最大值和最小值進行對比，圖四~圖八顯示對比結果。



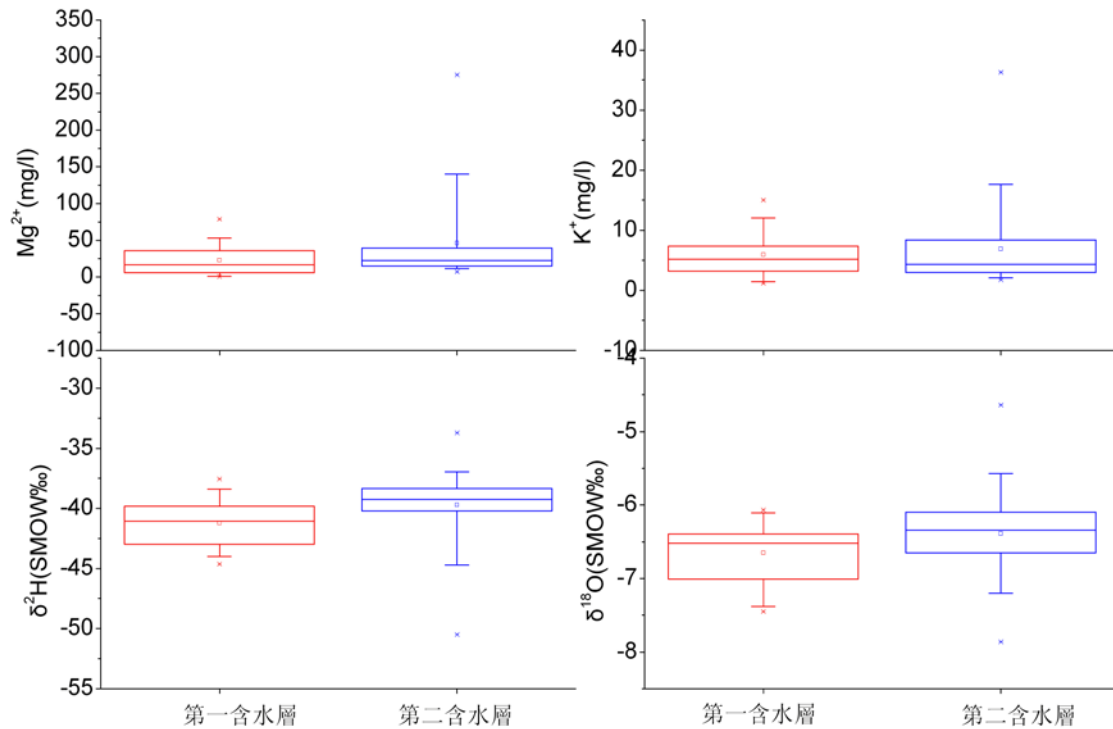
圖四 第一和第二含水層水溫、pH、導電度、溶氧的對比



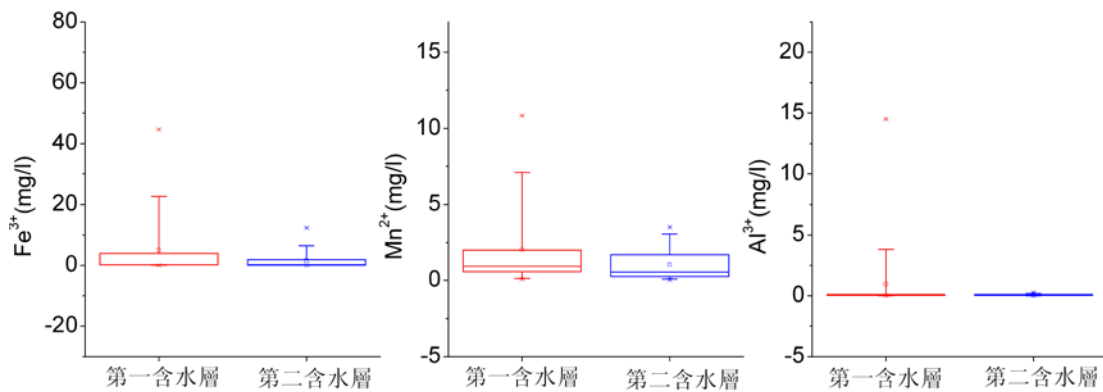
圖五 第一和第二含水層硬度、總溶解固體濃度、氯度、銨根、硫酸根、有機碳、氯乙烯、二氯乙烷含量的對比



圖六 第一和第二含水層 Na、Ca、Ba、Sr 離子濃度的對比



圖七 第一和第二含水層 Mg、K 離子濃度和氫氧同位素值的對比



圖八 第一和第二含水層 Fe、Mn、Al 離子濃度的對比

對比顯示，採樣深度對水化學性質的影響不是很明顯，可以推斷第一和第二含水層之間水力聯繫密切。不過，第一含水層水溫高於第二含水層；第二含水層的 pH 高於第一含水層，且具有較大的變化幅度。這是可以理解的，較深含水層的 pH 會受有機物氧化還原的程度以及無機鹽溶解程度的影響，變化較大。第一含水層的電導率、氯離子、硫酸根、銨離子、鐵離子、錳、鋁、鈉、總溶解固體的最大值和異常值明顯比第二含水層大，而其最小值接近；這說明基岩的溶解對水化學的成分影響小於水源本身的化學成分，**污染源並非來自基岩物質**。第二含水層的

氫和氧穩定同位素、硬度、鈣、鎂、鉀、鋇、鋇離子總體趨勢高於第一含水層。第一含水層的樣品更接近于採樣時的天水，因此其氫氧同位素比值較輕；而與硬度相關的鹼土金屬，鈣、鎂、鉀、鋇離子可能與碳酸鹽岩的溶解有關，但是鈣離子濃度似乎也受污染水源的影響。第二含水層中氯乙烯和 1,2-二氯乙烷的濃度高於第一含水層，這是因為淺層水中的含氯有機物易被氧化分解，也說明含氯有機物深入深層地下水。

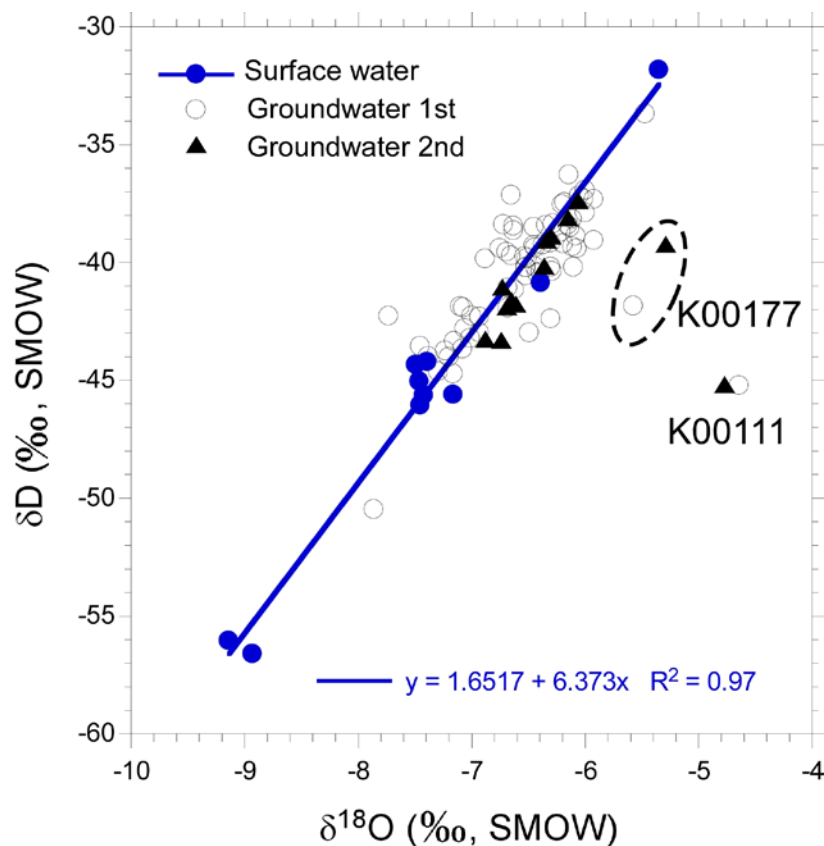
### 三、氫氧穩定同位素

氫、氧同位素的組成因受不同的水循環過程所控制，能夠反應水體的來源、移動和水文過程（如：Li et al., 2007, 2008a）。由於水中同時含有氫和氧，因此兩者在水的蒸發、遷移和凝聚時，產生的同位素分餾有相關性。全球大氣降水線由下列關係： $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$  (Craig, H., 1961; Craig and Gordon, 1965; Dansgaard, 1964)。由於蒸發作用和氣團來源的影響，各地的大氣降水會存在一些差別。對於來自大氣降雨的樣品其氫氧同位素應呈現很強的線性關係，如果大氣降水的蒸發作用和地下水的混合作用很小，則資料降落在大氣降水線附近。降雨量越大，同位素值越輕；海水的氫氧同位素比淡水的重很多。這樣，利用氫氧同位素研究地下水的來源、混合與遷移。

在這個計畫中，我們採集了頭份工業區的地表水、地下水，圖九標注了研究區地下水污染的井位編號與位置。我們對所採的地表水和地下水進行了氫氧同位素分析，得到研究地區天水的穩定同位素組成的曲線，它與全球天水線有所不同（圖十）。大多數地下水樣品的資料都落在頭份工業區大氣降水線的附近，表明本區的地下水來源基本上是有大氣降水補給，顯示多數井位的水樣與地表水連通，判斷該區淺層地下水（小於 100 米）的補給是由大氣降水而來。但是，圖中顯示有幾個點偏離大氣降水線較遠，說明這些樣品的氫、氧同位素受其他來源的水體影響，氧同位素偏重（ $>-6.5\text{‰}$ ）且偏離大氣降水線較遠的樣品，是污染水源的影響。



圖九 頭份工業區監測井位置。紅色圓點表示的井是淺層監測井，深度小於 20 米。藍色圓圈表示的的井是深層監測井，深度大於 50 米。



圖十 頭份工業區地表及地下水樣品氫氧同位素關係。地表水組成的當地天水線有別於全球天水線。井號為 K00111 和 K00177 的地下水樣品遠遠偏離當地天水線，說明這兩個樣品不是大氣降水的來源。圓圈和三角形分別表示 2011 年 11 月（枯水期）和 2012 年 7 月（豐水期）兩次取樣的結果。

值得注意的是，K00111 和 K00177 兩個井位的樣品在兩次採樣中（圖九），均有非常高的導電度，K00111 為 11900 和 11330 ( $\mu\text{mho/cm}$ )，K00177 為 6240 和 6470 ( $\mu\text{mho/cm}$ )，同時，這兩個井位的地下水氯乙烯含量均超標 (5.86 和 1.18 mg/L)。根據氫氧同位素以及物理、化學性質的判斷：(1) 這些水不可能是天然水，也不像是由大氣降水淋濾污染土壤或地層所致。(2) 這兩個井位的地下水的元素含量、導電度和含氯有機物等指標遠高於“大坑”西南方向的井位 K00092 的指標，距離“大坑”西側污染嚴重的井位 K000161 也較遠，而且不是在與井位 K000161 地下水流動的相同方向上。因此，很難說明這兩個井位的地下水污染是從“大坑”而來。這兩個井位靠近台氯頭份廠的排水溝。所以，**這兩個井位的地下水可能有人為注入的污染源，需要徹底查清原因。**

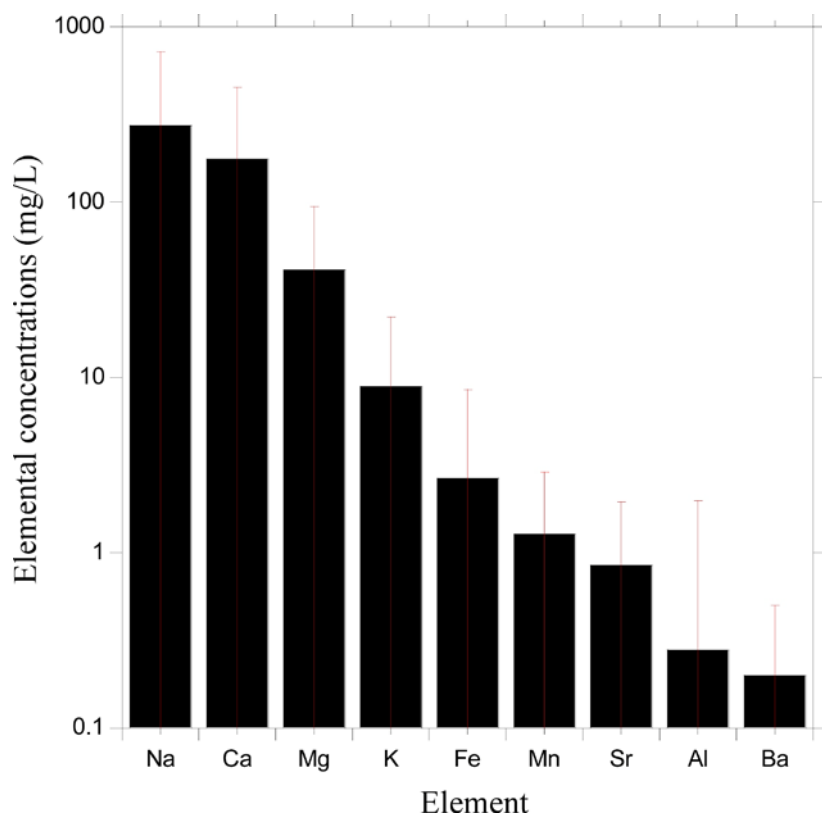
從上述結果看，用氫氧同位素可以判斷水的來源，可以辨識污染水體，也可以污染水源進入地下水的方式。

#### 四、元素地球化學分析

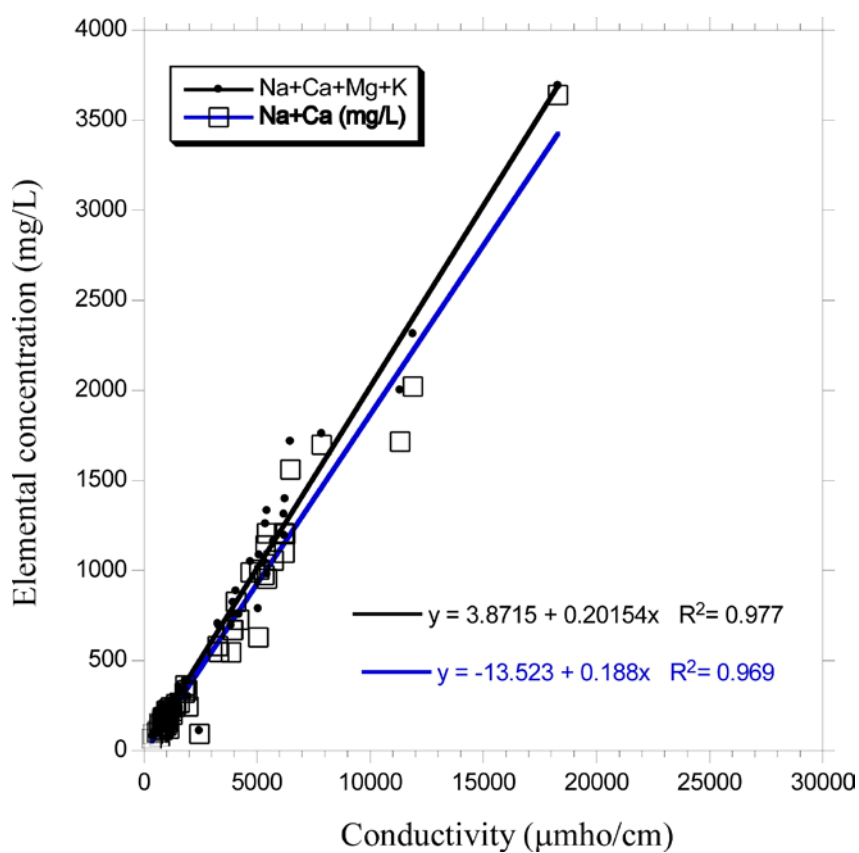
水樣採集時都經過過濾和加酸，在室內用 Perkin-Elmer Optima 8000 DV ICP-OES 電感耦合等離子光譜儀進行元素含量分析，相對誤差一般都小於 2%，個別誤差較大的樣品分析結果是因為含量較低，在表中都進一步標明。表四、表六和表七列出了所分析的元素濃度，Cu，Zn，Li，Ni，Ga，Ti 的濃度都很低，說明除了個別樣品外，沒有重金屬的污染。其他元素的平均濃度大小依次為：Na >Ca>Mg> K> Fe>Mn>Sr>Al>Ba（圖十一）。這些元素的濃度變化較大，例如：Na 的濃度最高可以到達 3000mg/L 以上，這裡是以所有地下水樣品的平均濃度來看。注意圖中濃度的尺規是對數，因此，除了 Na、Ca、Mg 之外，其他元素的含量一般都小於 50mg/L。

圖十二顯示導電度與 Na+Ca+Mg+K 或者 Na+Ca 濃度之和有很強的正相關，這也是符合導電度是受陰陽離子濃度控制原理的，說明地下水中 Na 和 Ca 離子是控制導電度的主要元素，也說明我們的測量資料非常可靠！



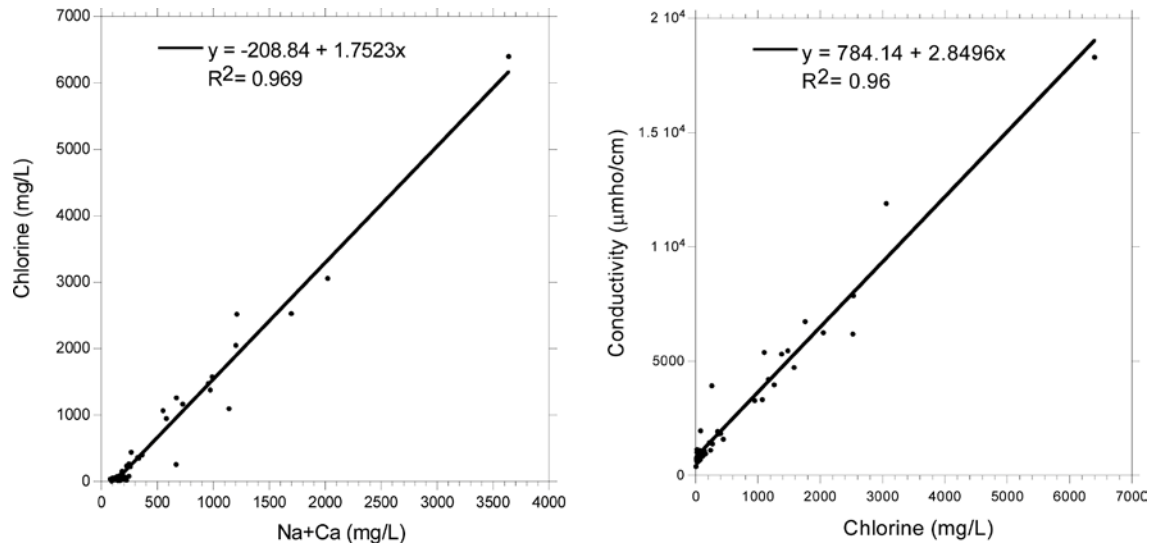


圖十一 頭份工業區地下水樣品的主要元素的平均含量



圖十二 頭份工業區地下水樣品導電度與主要元素成正比關係

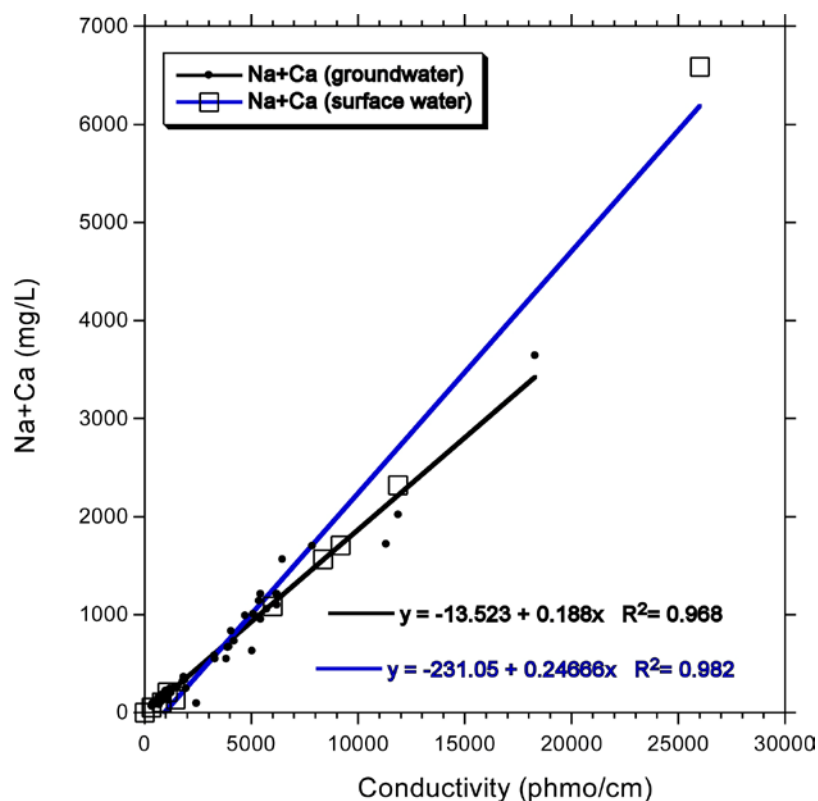
從圖十三看出的氯度分別與導電度和 Na+Ca 之和成很強的正比關係，也可以說明 Na 和 Ca 的主要性，它們的濃度可以說明導電度和氯度的大小，進一步討論污染水體的來源。



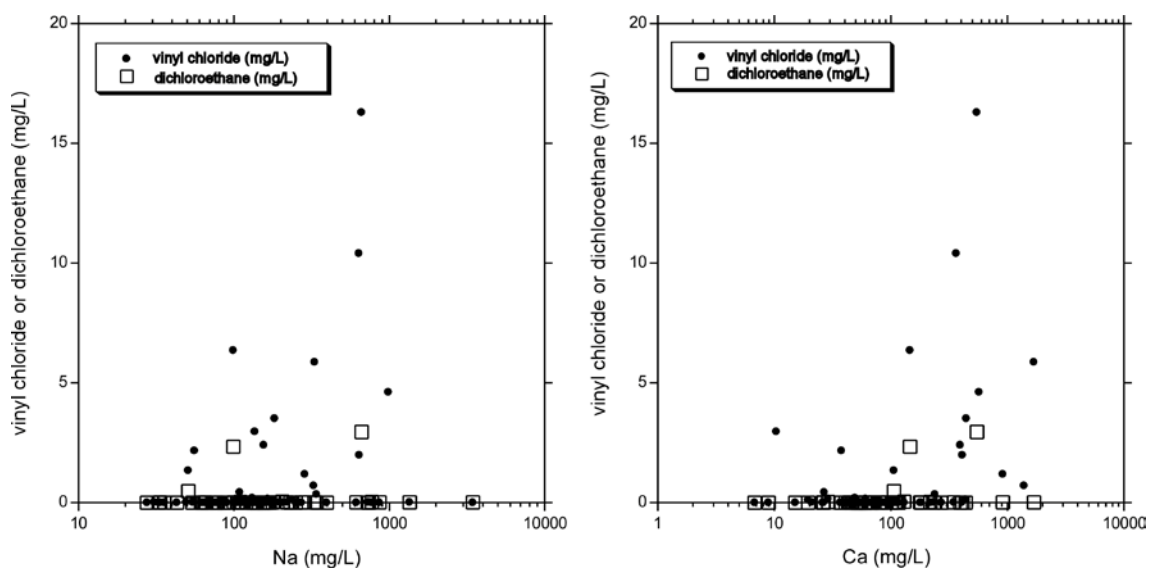
圖十三 頭份工業區地下水樣品氯度與 Na+Ca 之和以及導電度的正比關係

有趣的是，導電度與 Ca 和 Na 之和卻有很強的正相關，而如果將導電度與 Ca 和 Na 分別作圖，相關性變差很多（為節省篇幅，在此不進行插圖）。氯度與 Ca 和 Na 分別作圖，相關性也不高。說明 Ca 和 Na 有著不同的來源，它們共同影響著導電度。

我們將地下水和地表水的導電度與 Na+Ca 分別作圖（圖十四），兩個線性關係非常相近，這說明地下水中的 Na 和 Ca 與地表水的來源相似，基岩的溶解影響很小，證實我們在前面的判斷。實際上，Na 和 Ca 的濃度偏高，可能指示人為排放水或者是工業處理廢水的來源。在圖十五中顯示，凡是含氯有機物濃度較高的樣品，其 Na 和 Ca 濃度都較高，尤其是 Ca 的濃度，這說明 Ca 和 Na 的偏高，可能指示污染物的來源。當然，有很高的 Ca 和 Na 濃度，並不一定代表含氯有機物濃度一定會超標。比如：工業廢水的排放，不一定是含有氯乙烯和二氯乙烷的。



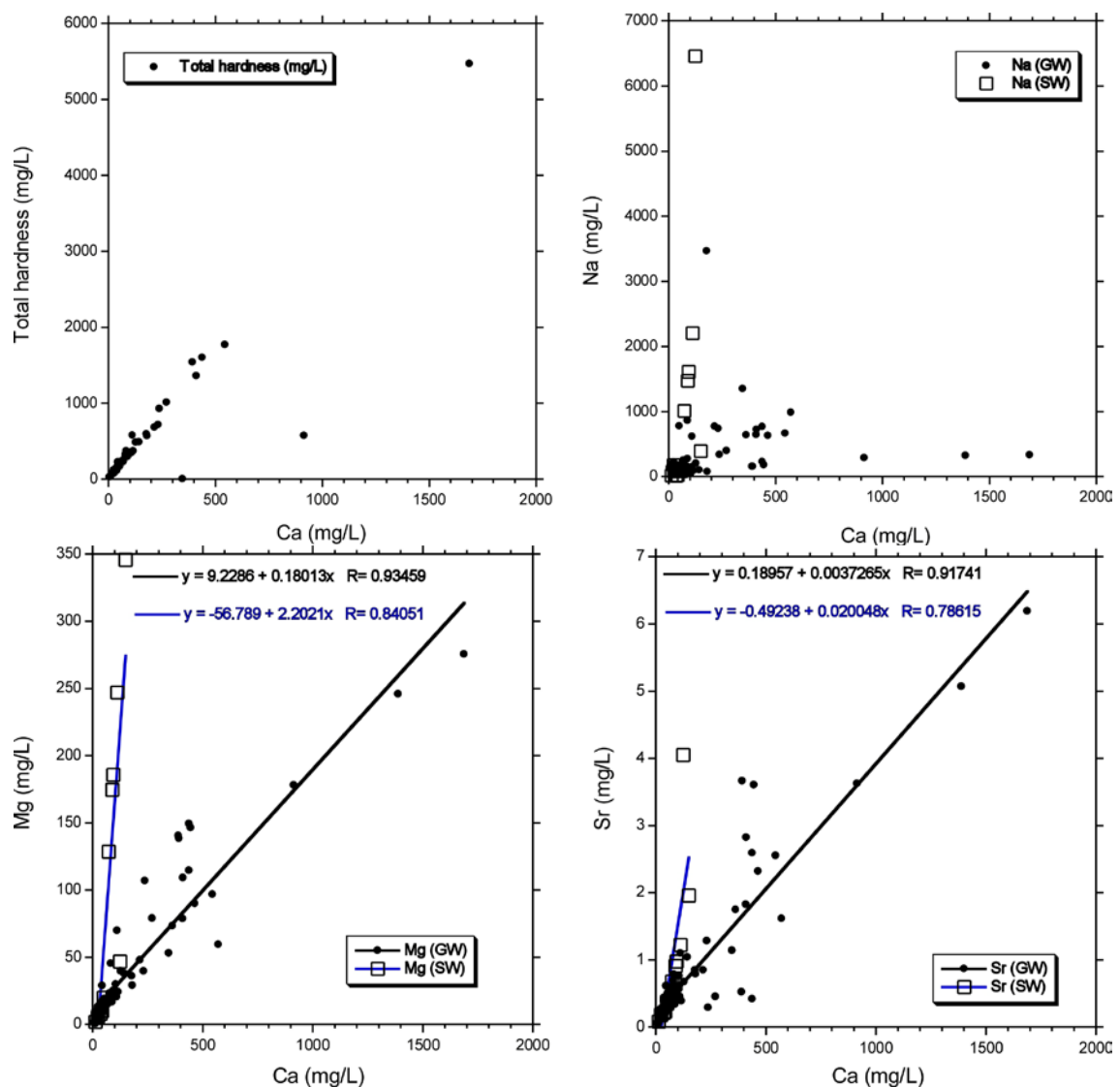
圖十四 頭份工業區地下水和地表水樣品導電度與 Na+Ca 之和成正比關係



圖十五 頭份工業區地下水 Na 和 Ca 的濃度與氯乙烯和二氯乙烷的關係

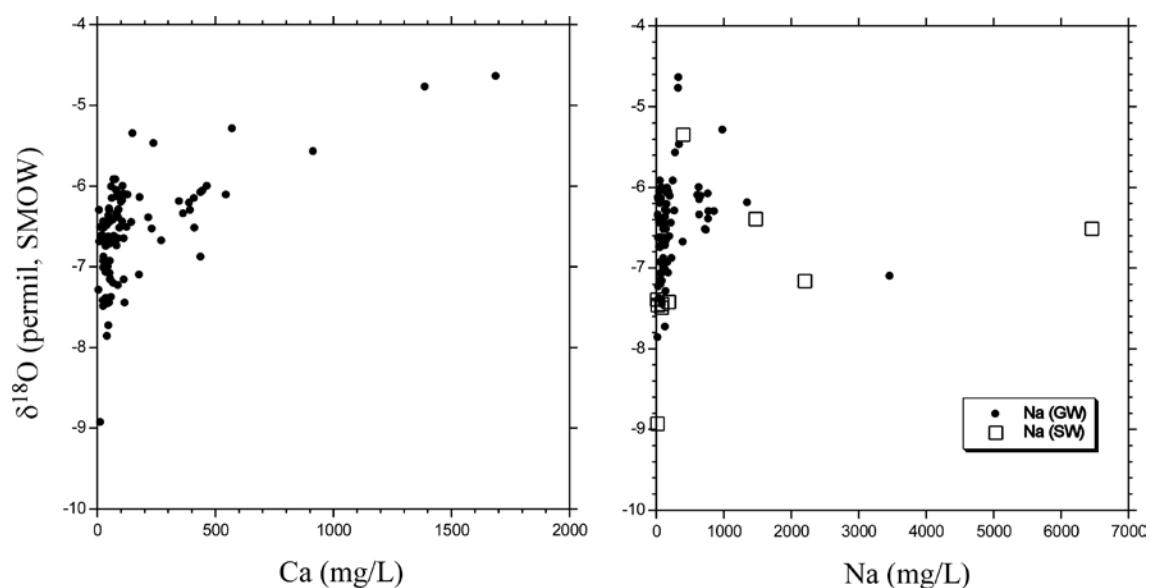
另外，從圖十六中的顯示的相關關係中，我們可以看出，Ca 與硬度有較好的相關性；Mg 和 Sr 與 Ca 有較強的正相關；說明這幾個元素有相同的來源。但是 Ca 與 Na 在地表水中有較強的正相關，但在地下水中卻沒有明顯的相關性。說明地下

水中 Ca 和 Na 的來源不一樣，而且 Ca 與 Na、Ca 與 Mg、Ca 與 Sr 在地下水中的關係和在地表水中的關係都不一樣。這一情況表明，儘管地下水的水源主要是大氣降水，然而，其化學成分卻受到污染水源的影響。初步分析，有兩種可能會造成這種現象：(1) 有含 Ca 量較高的水排放到地下；(2) 在地下埋葬有含 Ca 較高的可溶性固體。由於含氯有機物超標的地下水都含 Ca 較高，又由於所測地表水的含氯有機物一般都不超標，所以，厘清高 Ca 水的來源，對抓住污染物的來源很有幫助。



圖十六 頭份工業區地下水和地表水樣品中 Ca 濃度與其他參數的相關性，GW 代表地下水，SW 代表地表水

當樣品的 Ca 濃度很高時， $\delta^{18}\text{O}$  值也偏重（圖十七），而 Na 濃度則表現不同，Na 含量最高的兩個樣品其  $\delta^{18}\text{O}$  值都不是太重，兩個  $\delta^{18}\text{O}$  值最重的樣品 Na 含量並不高（圖十七）。一般來說，海水中的 Na 含量高， $\delta^{18}\text{O}$  值也很重，兩者應該有正相關。這說明  $\delta^{18}\text{O}$  值偏重的原因不是海水造成的，是污染水體造成的。其他元素濃度與 Ca 濃度的關係有兩種類型，一種是有正比關係，如：Mg，Fe，Mn，Sr，K，Ba，Li 等；另一種是不相關，如：Al，Zn，Cu 等（圖略）。



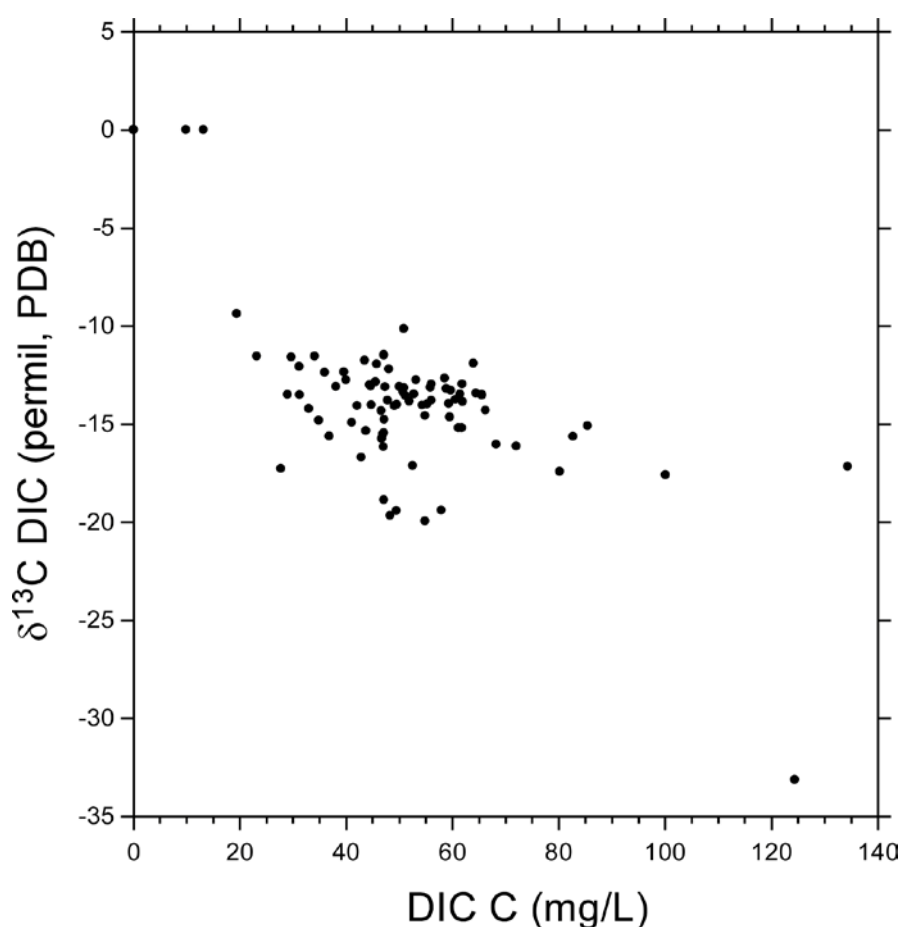
圖十七 地下水樣品中 Ca 和 Na 與  $\delta^{18}\text{O}$  的相關性

綜上所述，水樣中的 Ca 和 Na 是關鍵元素，它們是控制導電度、硬度，與氯度平衡的主要元素。然而，Ca 和 Na 有著不同的來源，在地表水中有強正相關，而在地下水中無相關。地下水和地表水的化學成分不同，顯示高 Ca 來源是污染源的示蹤。Ca 含量高的水樣， $\delta^{18}\text{O}$  值也偏重，是污染水體造成的。

## 五、DIC、TOC 和碳同位素

在本計畫中，我們利用水樣中溶解碳 (DIC) 的碳同位素來研究污染源的性質。DIC 碳同位素的測量，是利用碳的特徵光譜來解讀樣品中  $^{12}\text{C}$  和  $^{13}\text{C}$  的比值。一般來說，無機碳的  $\delta^{13}\text{C}$  值較重，有機碳的  $\delta^{13}\text{C}$  值較輕。當有機碳貢獻較多時，DIC  $\delta^{13}\text{C}$  值將偏輕。通常天然水體中 DIC  $\delta^{13}\text{C}$  值在 -10 至 -15‰ (PDB)，因為天然水體中  $\text{HCO}_3^-$

占主要。從表九和表十中所列的資料分析，我們可以得到以下結論：（1）地表水的 DIC  $\delta^{13}\text{C}$  值較重，因為主要是，有機碳含量較少；（2）兩個有機碳含量很高的樣品（K00111 和 K00177），DIC 的含量也很高，這是兩種不同的測量方法得到的結果。顯示這兩個井位地下水的來源異常，與前述氫氧同位素的結論一致。（3）井位 K00111 的 DIC  $\delta^{13}\text{C}$  值很負，顯示大量的有機碳影響，這也被異常高的 TOC 含量證實，是否為氯乙烯的降解所造成的，還需要進一步研究。雖然樣品的 TOC 與溶解碳之間沒有明顯正相關，但從圖十八所見，溶解碳含量高的樣品，其 DIC  $\delta^{13}\text{C}$  值較輕，這的確說明有機碳的降解造成碳同位素偏輕，當 TOC 降解時，DIC 含量增加，使得水中碳同位素偏輕。總之，以前所認為的台氯頭份廠西南側的“大坑”是污染源，但目前看來“大坑”只是其中一個污染源，在井位 K00161 和 K00111 這兩處是不同的污染源，需要徹底查清。

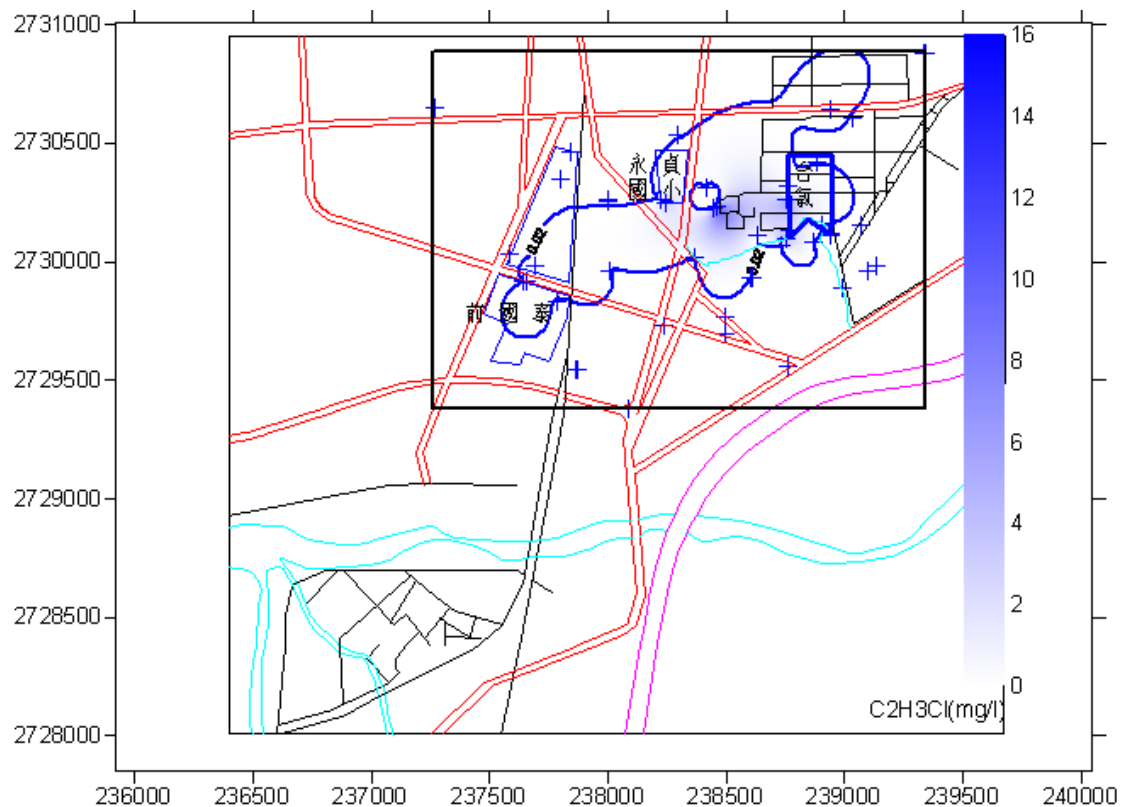


圖十八 地下水樣品中溶解碳與 $\delta^{13}\text{C}$  值的關係

## 六、含氯有機物在地下水中的空間分佈與遷移

首先，在所測樣品中，凡是二氯乙烷超標的樣品，氯乙烯都超標；而一些氯乙烯超標的樣品，二氯乙烷不一定超標。因此，我們只需要分析氯乙烯的污染來源即可。其次，氯乙烯的濃度隨水深沒有規律性變化，可以把兩個含水層視為一體來處理。

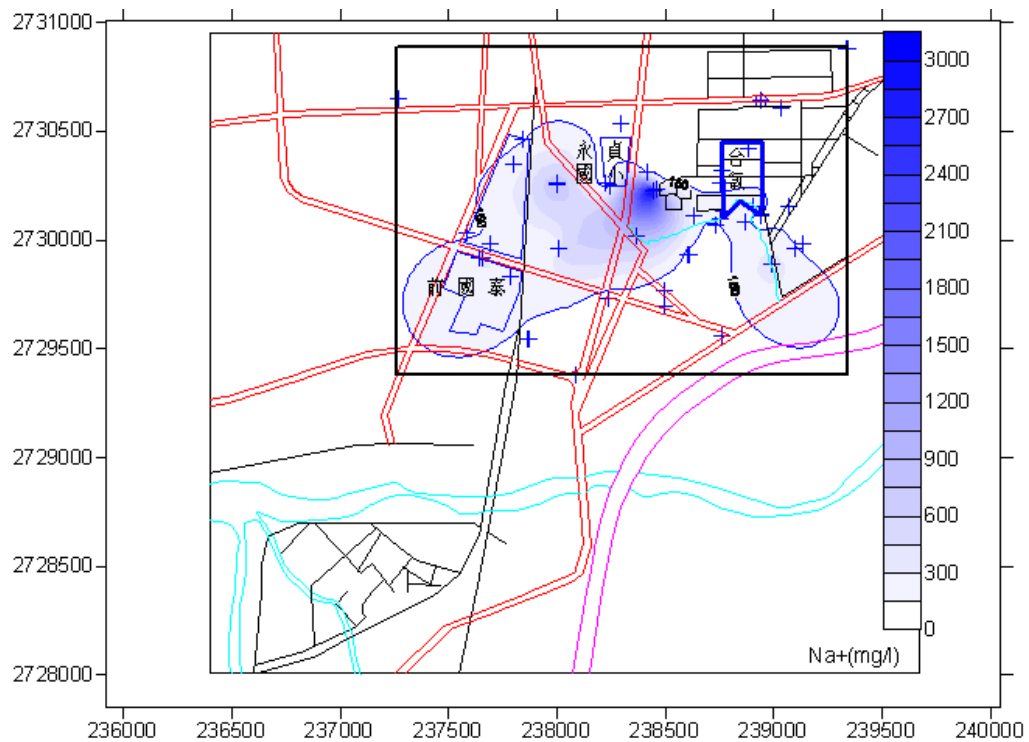
在眾多的地球化學參數中，氯乙烯超標的樣品，Ca、Na、導電度、氯度、TOC 都可能異常偏高， $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  可能異常偏重，DIC 碳含量偏高和 $\delta^{13}C$  偏輕。根據這些資料，我們分析它們的空間分佈。



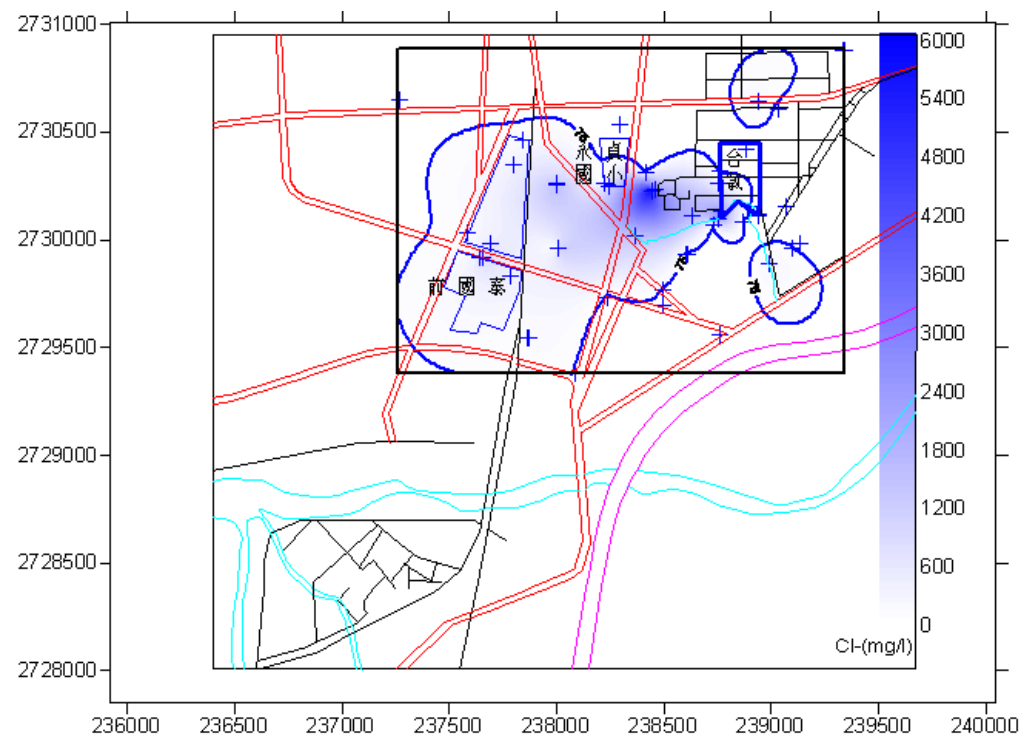
圖十九 含水層中地下水氯乙烯的等值線

氯乙烯的變化範圍 0 至 16.3mg/l，超標率為 23%。地下水中氯乙烯的污染源在台氯西側與永貞國小之間，即俗稱“大坑”的位置，污染物主要向西擴散。然而，在前面已經敘述過，位於台氯頭份廠南側偏西的井位 K00111 和 K00177，各種指標顯示該處的污染應該不是由“大坑”擴散而來，是有另一個污染源。

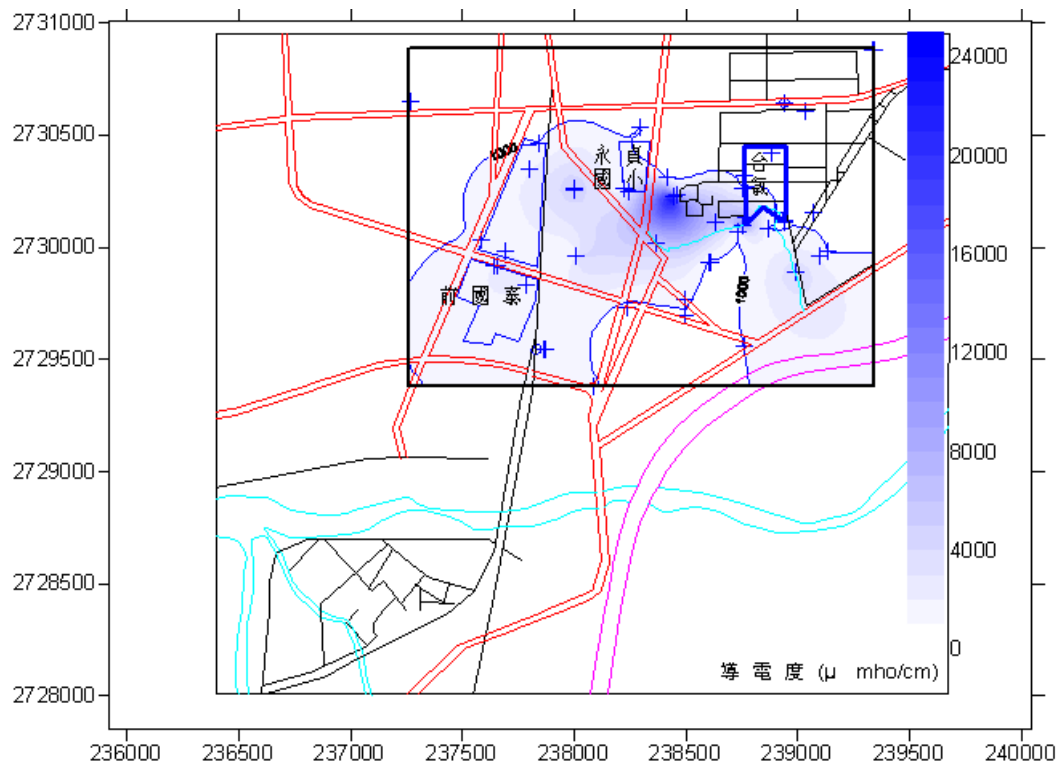




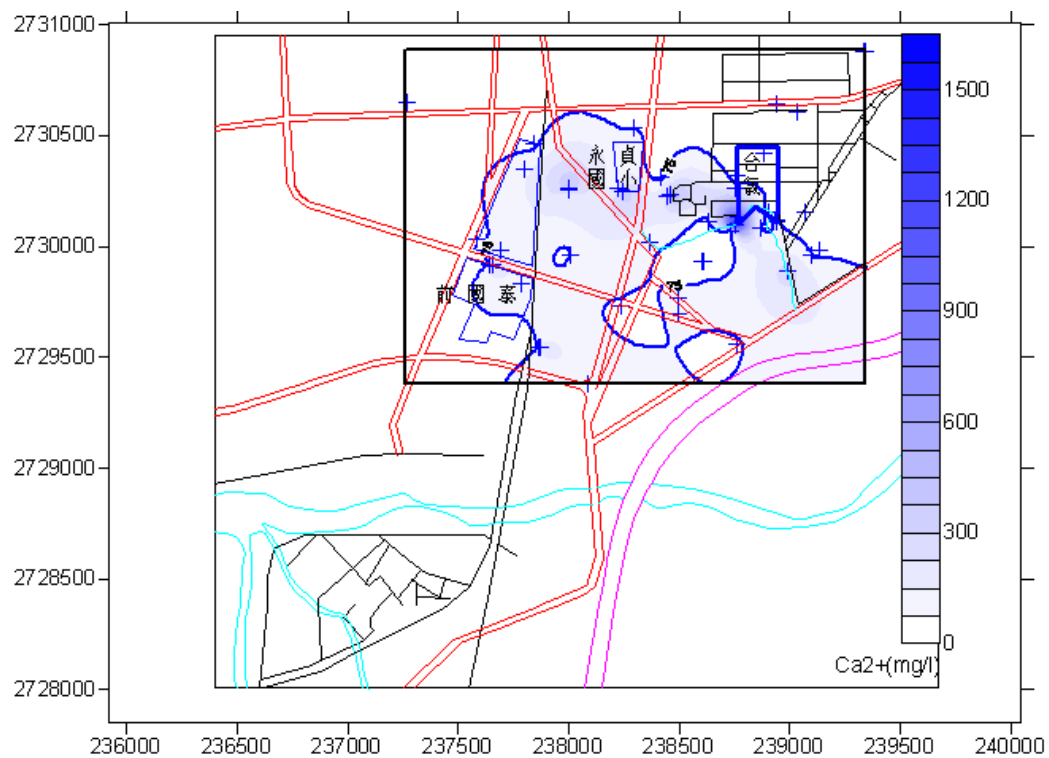
圖二十 含水層中地下水  $\text{Na}^+$  的等值線



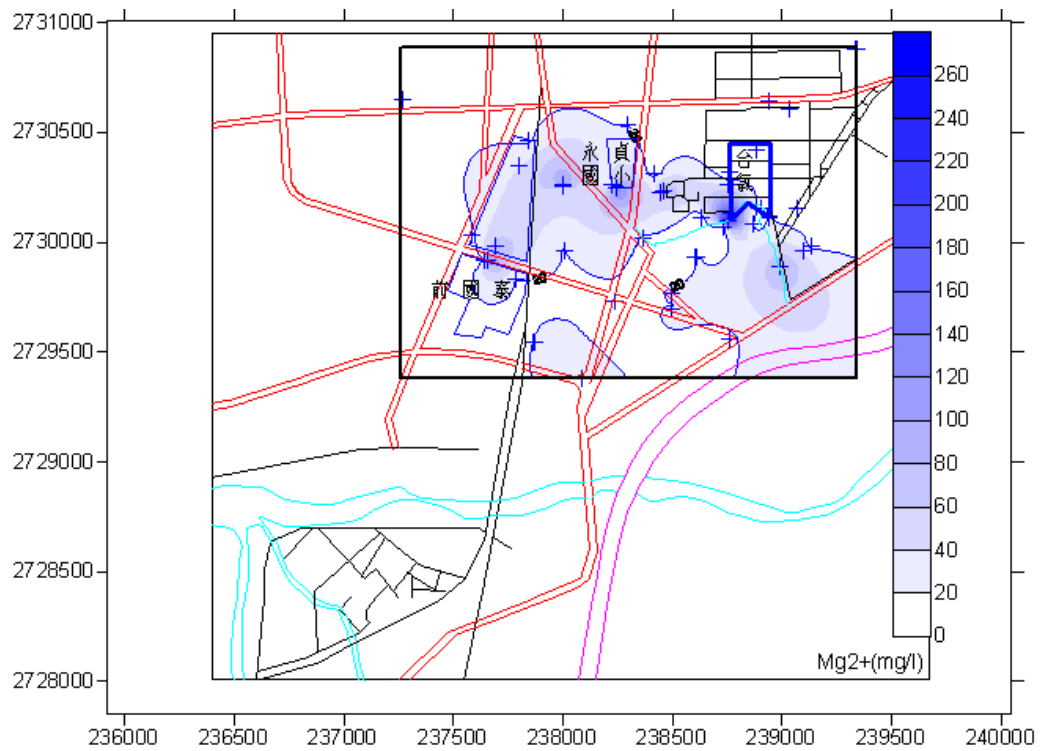
圖二十一 含水層中地下水  $\text{Cl}^-$  的等值線



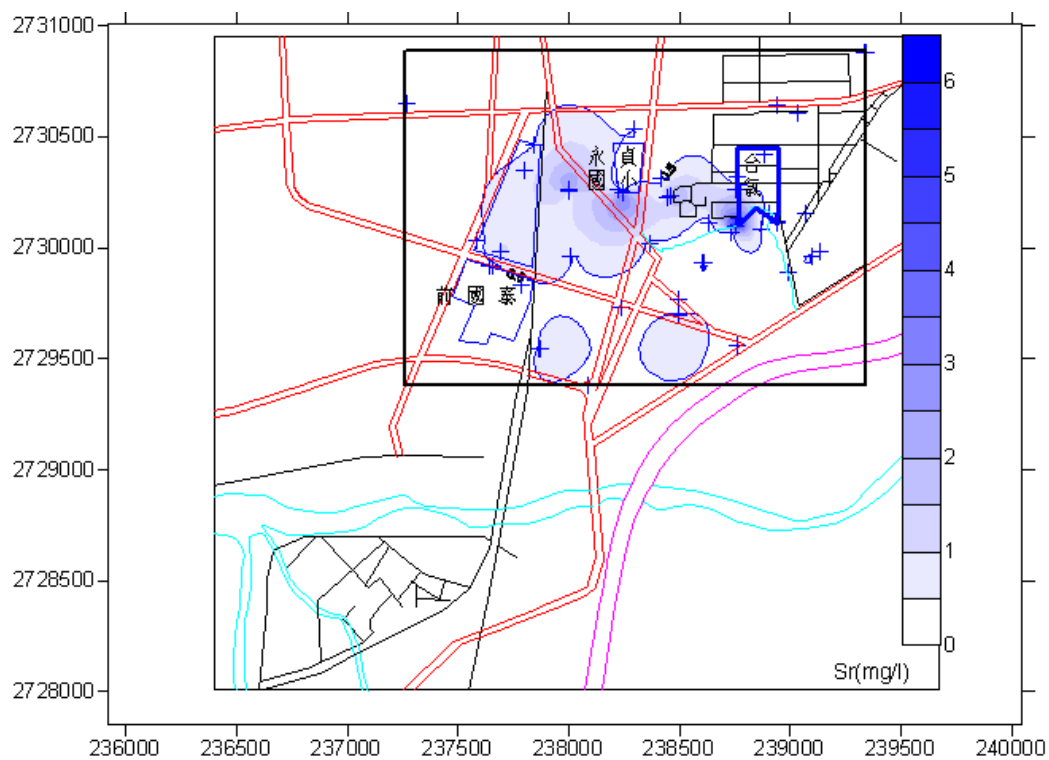
圖二十二 含水層中地下水導電度的等值線



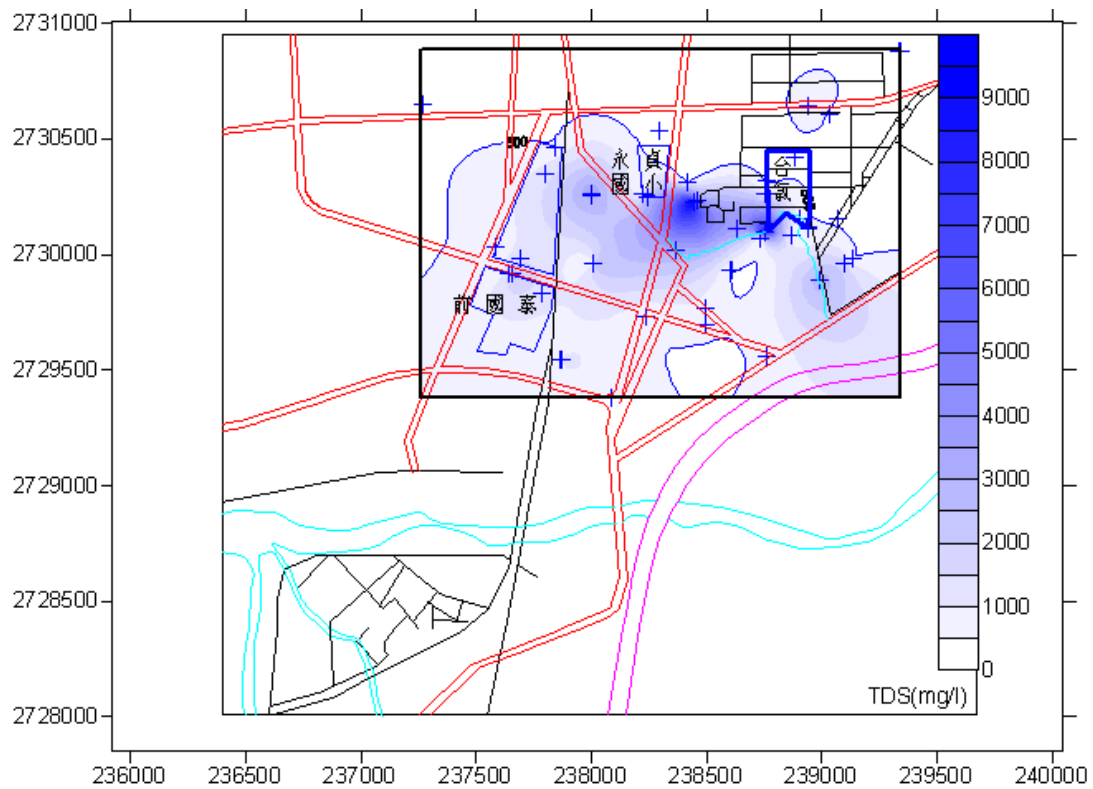
圖二十三 含水層中地下水  $\text{Ca}^{2+}$  的等值線



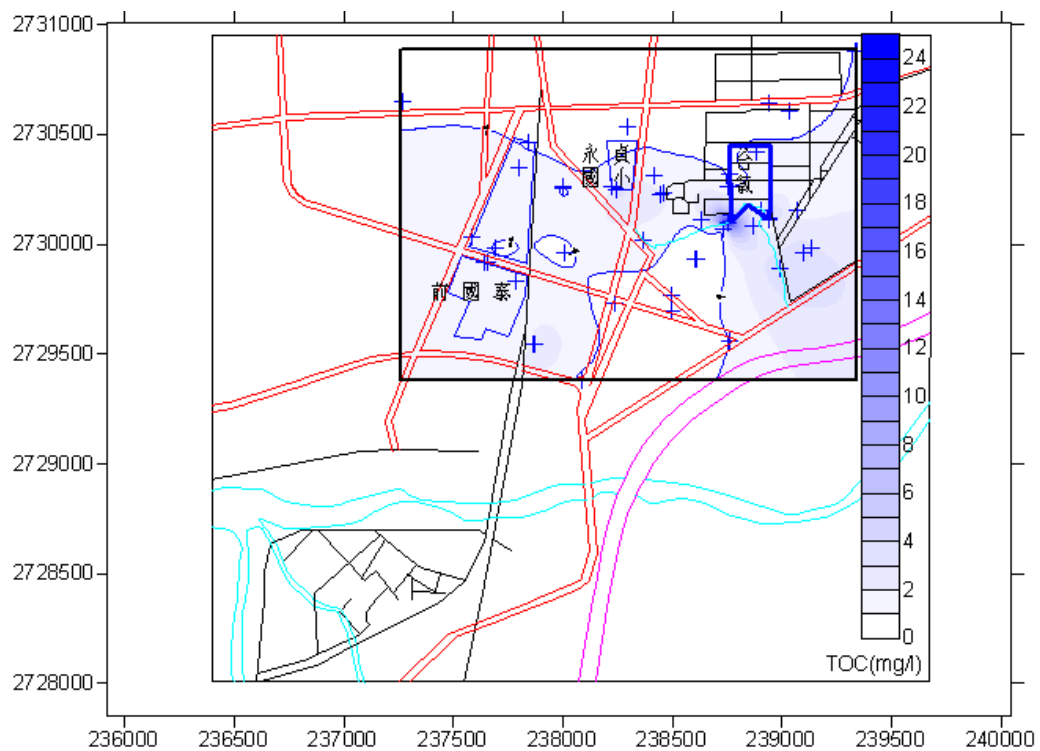
圖二十四 含水層中地下水  $Mg^{2+}$  的等值線



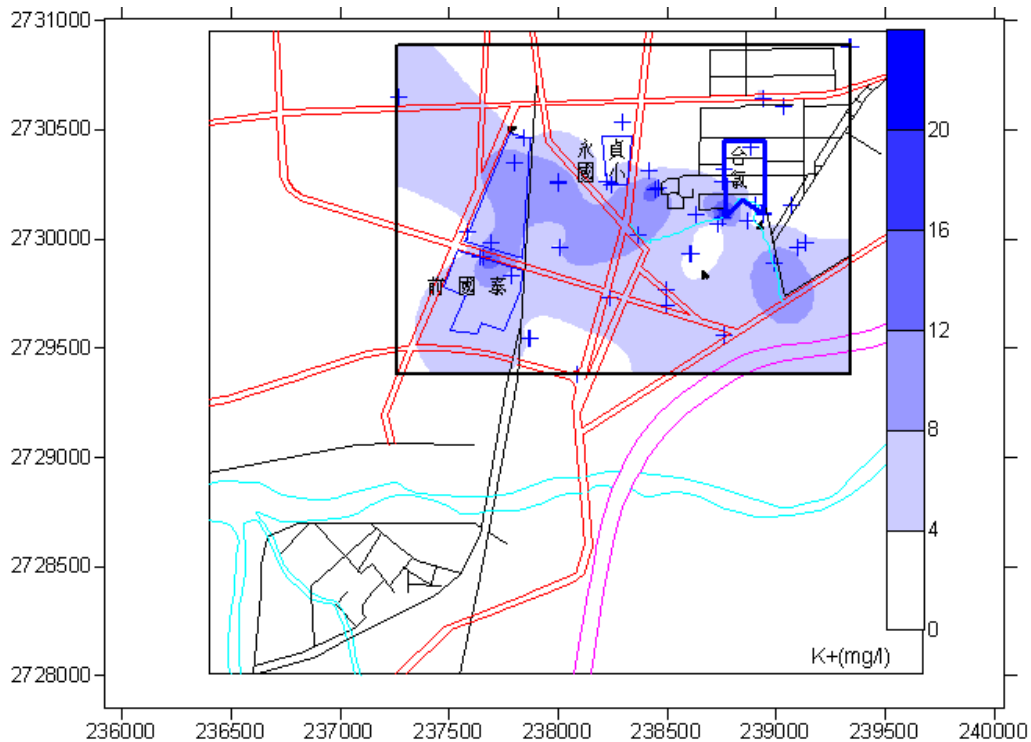
圖二十五 含水層中地下水  $Sr^{2+}$  的等值線



圖二十六 含水層中地下水總溶解固體的等值線



圖二十七 含水層中地下水溶解有機碳的等值線



圖二十八 含水層中地下水  $K^+$  的等值線

從圖二十 ( $Na$ )、圖二十一 ( $Cl$ ) 和圖二十二 (導電度) 可以看出，這三個指標支援“大坑”是污染源來源，由此沿地下水流動方向向西南遷移。

從圖二十三 ( $Ca$ )、圖二十四 ( $Mg$ )、圖二十五 ( $Sr$ )、圖二十六 (總溶解固體 TDS)、圖二十七 (有機碳 TOC) 和圖二十八 ( $K$ ) 的空間分佈來看，這些指標指示有兩個污染源，即：一個是“大坑”，另一個是台氯頭份廠南側偏西，總體仍是向西南方。

另外，從表五和表八的資料可見，污染最嚴重的井位是 K00161，而且淺層和深層水的污染都很嚴重。以井位 K00161 為中心（“大坑”附近），濃度向四周逐漸降低。在井位 K00164 處（位於 K00161 東北方），深部濃度明顯低於淺層濃度，而在井位 K00158 處（位於 K00161 西側），則是深部濃度高於淺層濃度。這與地下水的流動方向有關，在這個區域，地下水的流動方向從東北流向西南（圖九）。這個含氯有機物的污染源可能深入地下至少 20 米深。因此，在井位 K00161 東南和西南側的兩個井位 K00092 和 K00110 都沒有監測到含氯有機物超標，因為它們

的取樣深度較淺（表二）。

我們將氯乙烯濃度與其它地球化學指標作圖，包括水溫、pH、溶氧、氧化還原電位、硫酸根、銨離子、硝酸根、Fe、Mn、Al、Cu、Zn、Li、Ni 等，無論是相關性，還是空間分佈，都不能反映研究區的含氯有機物污染。加之，導電度、氯度、硬度、TDS 之間有很好的正比關係，所以，導電度、氯度、TOC、氯乙烯、 $\delta^{18}\text{O}$ ， $\delta\text{D}$ ，DIC  $\delta^{13}\text{C}$ ，Ca，Na，Mg，Sr，K，Ba 是地下水中探索含氯有機物污染源的必測參數，這些參數構成我們的**多種同位素和地球化學方法**（Multiple -evidence of isotopic and geochemical approach, MEIGA）。其它元素，如：TDS、硬度、Fe、Mn 等可以做為參考指標。

## 總結

對頭份工業區、前國泰塑膠廠及中港溪北岸之既設監測井的地下水以及該區的地表水進行採樣，共取得 100 個地下水和地表水。經過地球化學和氫氧碳同位素的測量，得到：

研究區的大氣降水線，並通過地下水氫氧同位素分析，判斷該區淺層地下水（小於 100 米）的補給是由大氣降水而來。氧同位素偏重（ $>-6.5\text{‰}$ ）且偏離大氣降水線較遠的樣品，是污染水源的影響。

水樣中的 Ca 和 Na 是關鍵元素，它們是控制導電度、硬度，與氯度平衡的主要元素。然而，Ca 和 Na 有著不同的來源，在地表水中有強正相關，而在地下水中無相關。Ca 濃度反映總硬度的變化，同時也與 Mg，Sr，K，Ba 等有較好的正相關。地下水和地表水的化學成分不同，顯示高 Ca 來源是污染源的示蹤。Ca 含量高的水樣， $\delta^{18}\text{O}$  值也偏重，是污染水體造成的。

氯乙烯的空間分佈顯示，濃度最高處在“大坑”附近的井位 K00161，隨地下水向西南方向遷移。Na、Cl、導電度的空間分佈於氯乙烯相似，顯示一個源向西

南遷移；而 Ca、Mg、Sr、K、TOC、TDS 顯示兩個源，大體還是向西南方向遷移。

根據本計畫的初步研究結果，我們將嘗試回答在前面提出的問題：

1. 深層監測井地下水中的二氯乙烷和氯乙烯的高濃度是從哪裡來的？是從淺層地下水下滲的呢，還是從深埋在地下的固體污染源來的？

總體來說，本區的地下水來源是從地表遷移至地下，污染源應該是從淺層地下水下滲的，但是在“大坑”處（K00161）的污染源可能是過去發生後，深埋在地下的。台氯頭份廠南側偏西的污染源（K00111 和 K00171）是淺層污染源。

2. 高污染濃度的中心位置與地下水運移的關係？污染物是否隨地下水擴散遷移？如何遷移？

高污染濃度的中心位置有兩處：“大坑”處和台氯頭份廠南側偏西處，污染物沿地下水流動方向從東北向西南方向運移。

3. 二氯乙烷和氯乙烯的污染可能的來源？與台氯頭份廠、前國泰塑膠等廠家的關係？

污染物來源與前國泰塑膠廠的位置關係不明顯，與過去在“大坑”掩埋有關。在台氯頭份廠南側偏西的污染源（K00111 和 K00171）可能與台氯頭份廠有關。

4. 二氯乙烷和氯乙烯是否在地下水中有降解或氧化現象？

從溶解碳與 DIC  $\delta^{13}\text{C}$  的關係，可以斷定含氯有機物在地下水中有降解。

5. 能否建立一套多種同位素和地球化學方法（Multiple -evidence of isotopic and geochemical approach, MEIGA）來研究地下水污染？哪些指標應該是有效的？

就目前的研究區來說，多種同位素和地球化學方法（Multiple -evidence of isotopic and geochemical approach, MEIGA）應當包括導電度、氯度、TOC、氯



乙烯、 $\delta^{18}\text{O}$ ， $\delta\text{D}$ ，DIC  $\delta^{13}\text{C}$ ，Ca，Na，Mg，Sr，K，Ba。

## 參考文獻

- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric water. *Science* 133, 1702–1703.
- Craig, H., Gordon, L.I., 1965. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: Tongiorgi, E. (Ed.), *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperature*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Spoleto, Italy, pp. 161–182.
- Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* XVI, 436–468.
- Li, Hong-Chun, Xu, X.-M., Ku, T.-L., You, C.-F., Buchheim, H. P., and Peters, R., 2008a. Isotopic and geochemical evidence of paleoclimate changes in Salton Basin, California during the past 20 Kyr: 1.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  records in lake tufa deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 259 (iii-iv): 182-197.
- Li, Hong-Chun, Yuan, D.-X., Ku, T.-L., Wan, N.-J., Ma, Z.-B., Zhang, P.-Z., Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Liu, Z.-H., Zhang, M.-L., Zhu Z.-Y., and Wang, R.-M., 2007. Stable Isotopic Compositions of Waters in the Karst Environments of China: Climatic Implications. *Applied Geochemistry* 22(8): 1748-1763.