



EJ095198814235

師大地理研究報告
第 14 期 民國 77 年 3 月
Geographical Research
No.14, March 1988

北港地區地下水水質變化之研究*

Changes of the groundwater quality around the Pei-Kang Area

劉乃綺**
Nae-Chi Liu

Abstract

At Pie-kang area, awing to the overpumping of groundwater, the water level is declined and the water quality is deteriorated. After field observation and study on groundwater quality, the author comes to the following conclusions.

1. For many years, the water level had continued to decline, the lowest one at Kou-Hu was 25 meter below mean sea level. It is due to overpumping of groundwater by a lot of fish pond and agriculture use.
2. The electrical conductivity of most water of deep wells was between 300 to 750 $\mu\text{s}/\text{cm}$, and those the electrical conductivity was more than 750 $\mu\text{s}/\text{cm}$ at the beginning of pumping will descended later on as time went by.

* 本文係由國立臺灣師範大學地理研究所碩士論文(75)濃縮而成；本文之完成，承蒙恩師楊萬全教授悉心教導斧正，前中央地質調查所所長徐鐵良教授和前文大理學院院長鄧天德教授審閱，特此申謝。

** 省立嘉義師範學院助教(Teaching Assistant, Taiwan Provincial Chiayi Teachers College)。

3. By the chemical analysis of water, the ratio of $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$, bar diagram, the ratio of $\text{Cl}^-/(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$, Piper's trilinear diagrams, the rate of SAR and so on, the quality of most water of deep wells was good. The water of poor quality gathered at the area southern Niu-Tiau-Wan drainage channel. It also shows there is no seawater intrusion now.

4. The poor ground water quality in some areas were due to the deterioration of shallow aquifer, which was due to flow backward of seawater. There fore well contruction should avoid shallow aquifer or isolate it.

5. In order to prevent the deterioration of groundwater quality, the better ways are to reduce the pumping amount, prevent flow back of seawater and improve drainage system etc.

(Key words: water level observation, electrical conductivity, bar diagrams, trilinear diagrams, sodium adsorption ratio, seawater intrusion)

一、緒論

(一)研究動機與目的

臺灣地區地下水蘊藏量以濁水溪沖積平原為最豐富¹⁾；雲林地區係屬濁水溪南岸的沖積平原，又是本省重要的農業生產地區；由於農作物灌溉期間地表水不足，未能發揮農業潛力；臺灣省政府為了增加糧食生產，於民國 47 年成立「臺灣省地下水開發委員會」和「地下水工程處」，首先在雲林地區開鑿深井，為本省有計劃大規模開發地下水源的開始²⁾。

十幾年後，大量抽水的結果，造成地下水位不斷降低³⁾，水井出水量銳減；雖然建設廳曾於民國 64 年下令管制北港、四湖、口湖、水林等四鄉鎮地下水的開發⁴⁾，但因沿海地區每遇夏季颱風豪雨，極易發生海水倒灌⁵⁾，導致農作嚴重損失，加以近年來水產養殖業利潤頗佳，故多數土地利用改變，紛紛從事水產養殖；養殖業仰賴地下水甚鉅，使得地下水超抽情況更嚴重。

1) 劉鴻喜，臺灣地下水之研究，臺灣銀行季刊，14 卷 3 期，252 頁，民國 52 年。

2) 行政院國際經濟合作發展委員會、農復會、水資會合作計劃，雲林地區、屏東地區地下水開發資料整理與研究，水資源經濟研究叢刊之五，1-2 頁，民國 56 年。

3) 廖文力，雲林、嘉義地區地下水超抽可能引起之間問題初步研究，水利複利，12 期，38-39 頁，民國 60 年。

4) 臺灣省雲林農田水利會，雲林水利會灌區深井研究報告，1 頁，民國 65 年。

5) 洪星輝，臺灣地下水開發所遭遇問題概述，台糖通訊，74 卷 12 期，21-22 頁，民國 73 年。

目前沿海地區的地下水位最低處已降至海平面下 25 公尺；水質日趨惡化^⑥；因此，國內許多關於此區域的研究，認為北港地區的地下水可能已經產生海水入侵的情形；大多數研究應用地層電阻測試和模型技術，建立數學模式，但尚未獲得明確結論。本論文欲以實地觀測、訪問調查和直接採水樣進行化學分析來達成下列目的：

1. 探討有無海水入侵的真象。
2. 分析地下水質的變化。
3. 明瞭地下水質受污染的狀況。
4. 了解地下水質受污染的原因，並提供防止污染的對策。

(二) 研究地區

雲林地區因地下水超抽所產生的種種問題牽涉到整個濁水溪沖積平原的地下水域 (groundwater basin)，範圍相當遼闊，限於人力、時間，僅以雲林縣北港鎮、四湖鄉、口湖鄉、水林鄉為實查範圍；四個鄉鎮的面積共 249.39 平方公里^⑦。研究區大致在舊虎尾溪以南，北港溪以北，北港鎮以西至海。（圖 1.）

選擇本研究區的理由有二：

1. 北港鎮、四湖鄉、口湖鄉、水林鄉是目前雲林地區地下水開發受管制的四個鄉鎮。
2. 本研究區是目前雲林地區地下水位最低且下降最嚴重的區域，所以國內有關此區域的研究大多認為已經發生海水入侵的現象。

(三) 相關文獻與資料來源

1. 相關文獻：

狹義的水文學重視水循環的速度和水量，不重視水質^⑧，所以從前水質分析往往只是為了研究地層、地下水位、地下水流向、流量的一種方法。

近年來，由於經濟成長，人口增多，造成地下水大量開發，增加地下水質受污染的機會^⑨，使得地下水質變化逐漸受到重視，所以有關地下水質的研究日益蓬勃。

關於海水入侵最早的報告是 1855 年 Braithwaite 所發表，指出倫敦和利物浦 (Liverpool) 產生海水入侵的情況；近幾年，日本、荷蘭、德國、美國的加州、新澤

^⑥ 姚建功，雲林地區地下水海水入侵及水質擴散數學模式之研究，臺大農工研究所水利組碩士論文，1-2 頁，民國 73 年。

^⑦ 北港鎮地政事務所提供的民國 74 年面積資料。

^⑧ 楊萬全，水文學，師大地理研究叢書，第二號，214 頁，民國 71 年。

^⑨ David Keith Todd, *Groundwater Hydrology 2nd ed.*, New York : John Wiley and Son's Inc, p.267, 1980.

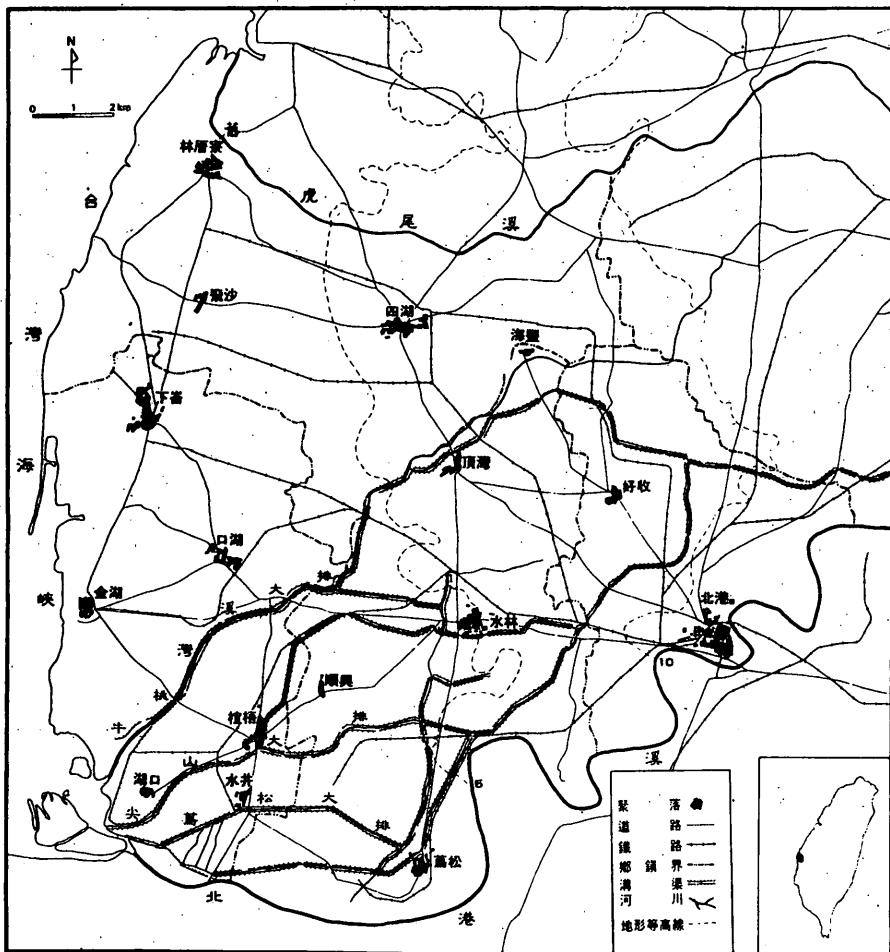


圖 1. 研究區域圖

西州、佛羅里達州等沿海地區也都有海水入侵的事例¹⁰⁾；另外，山本莊毅曾研究銚子半島地下水中含鹽量與海岸距離的關係¹¹⁾；高倉盛安曾研究海岸地區因暴風雨，使海水沿河川倒灌而滲入地下水¹²⁾；其他，由地下水中氯鹽(Cl^-)濃度的長期變化來研究地下水鹽水化過程的實例也不少¹³⁾。

國內有關地下水質方面的文獻亦有數十篇，例如：1976年，楊萬全研究臺北盆

10) 徐萬椿譯，地下水學，徐氏基金會出版，263-264頁，民國57年。

11) 山本莊毅，地下水調查法，古今書院，p.390，1983。

12) 山本莊毅、樋根勇，扇狀地の水循環，古今書院，p.77，1971。

13) 樋根勇編，地下水資源の開発と保全，水利科學研究所，p.247，1973。

地西北部地下水，利用水質分析以明瞭地下水受海水污染的範圍¹⁴⁾；1978年，朱益、方永泰等以電探法探測嘉義海埔地鰲鼓墾區的含水層厚度、分佈與海水污染問題¹⁵⁾；1978年，吳建民曾研究臺灣西南部沿海烏腳病地區地下水地質特性，發現北港、東石、布袋、北門等地區，地下水中砷含量及有機物均高¹⁶⁾；關於海水入侵的研究也相當豐富，譬如：1969年曹以松研究海水入侵沿海地區地下含水層之現象，並提出防治方法¹⁷⁾；蔡振源研究沿海地區海水入侵之數學模式¹⁸⁾；林鐘洋曾應用二維邊界積分方程式於含水層海水入侵¹⁹⁾；沈宗華利用地下水類比模型研究海水入侵²⁰⁾。

本研究區之地下水質因重要性極高，所以相關文獻頗多，最重要的文獻報告有：1963年臺灣省建設廳地下水工程處發表的「大濁水沖積扇地區地下水水源複勘報告」，此時全區域並無海水入侵現象²¹⁾；1973年水利局地下水工程處編擬的「濁水溪南岸雲林地區地下水水源調查報告」，指出水林一帶水質含鹽濃度較高，可能是同生水（connate water）之遺留，而其他地區尚無海水侵入²²⁾；1976年雲林農田水利會發表的「雲林水利會灌區深井研究報告」提到只有少數幾口井的氯鹽含量較高，其餘大部分為淡水，尚無海水入侵的現象²³⁾；1977年經濟部水資源統一規劃委員會的「嘉雲區域地下水調查報告」²⁴⁾中，雲林地區的水質資料來自「雲林水利會灌區深井研究報告」；另外，1981年曹以松、陳京台曾作過雲林地區地下水數學模式之模擬與應用²⁵⁾；1984年姚建功運用數學模式模擬水質擴散，並將水質分析結果用 Piper 的水質圖及 $\text{Cl}^- / \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 比值研判，歸納結論為數學模式必須修改，北港溪一帶氯鹽含量

14) 楊萬全，臺北盆地西北部地下水受海水污染之研究，工程 49 卷 3 期，9-20 頁，民國 65 年。

15) 朱益、方永泰，濱海地區地下水水源探測研究，經濟部 67 年度研究發展專題，民國 67 年。

16) 吳建民，烏腳病地區地下水地質特性之研究，烏腳病之研究報告，第五輯，臺灣省烏腳病防治小組，民國 67 年。

17) 曹以松，海水入侵沿海地區地下含水層之現象及其防治方法，臺灣水利 17 卷 1 期，36-50 頁，民國 58 年。

18) 蔡振源，沿海地區海水入侵之數學模式，臺大農工研究所碩士論文，民國 71 年。

19) 林鐘洋，二維邊界積分方程式（BIEM）應用於含水層海水入侵，臺大農工研究所碩士論文，民國 72 年。

20) 沈宗華，地下水類比模型應用於海水入侵之研究，臺大農工研究所碩士論文，民國 72 年。

21) 臺灣省建設廳地下水工程處，大濁水沖積扇地區地下水水源複勘報告，16 頁，民國 52 年。

22) 水利局地下水工程處編，濁水溪南岸雲林地區地下水水源調查報告，50-51 頁，民國 62 年。

23) 同註 17)，53 頁。

24) 經濟部水資源統一規劃委員會，嘉雲區域地下水調查報告，9 頁，民國 66 年。

25) 曹以松、陳京台，雲林地區地下水數學模式之模擬與應用，臺灣水利 29 卷 4 期，11-56 頁，民國 70 年。

高，推測可能是海水沿北港溪感潮河段入侵，也可能是沖積平原高濃度之古代殘餘海水所引起²⁰⁾；還有1985年王基力利用地層電測，勘測雲林沿海地區海水入侵情形，並配合黑簫（Hale-Shai）類比模型試驗，建立沿海地區海水入侵數學模式²¹⁾，所獲得的結論與姚建功大同小異。

2.資料來源：

本研究所用資料，主要來自實地調查，其中包括水位觀測87處，水溫、電導度測量79處，水質化學分析共三次，第一次於民國74年9月，採31個水樣化驗；第二次於民國74年11月，採24個水樣化驗；第三次在民國75年2月，採26個水樣化驗。氣候資料為台糖公司北港糖廠所屬各氣象站所提供之長期水位資料和地層下陷資料為水利局所提供之抽水量統計，則是水利會北港督導區所提供之地質資料來自中央地質調查所及雲林水利會、北港糖廠的鑿井地層記錄；農業土地利用資料由北港鎮地政事務所提供，並參考民國61年至73年雲林縣統計要覽，鰻魚池面積為口湖鄉鰻魚養殖合作社所提供之以往的水質化驗資料則來自中壢農業工程研究中心；海水倒灌的災情資料為雲林水利會所提供之參閱雲林縣文獻；排水系統資料由水利會及北港鎮公所提供之並依照民國73年版航照圖自行調查修正，另外有關水質化驗過程的資料由水資會水工實驗室所提供之。

（四）研究方法

1.地下水位觀測（water table observation）：

以民國73年版五千分之一比例尺的像片基本圖為底圖，先確定研究區內的水井位置（包括雲林水利會的灌溉井、北港糖廠所屬農場的灌溉井、民用井）。於民國74年7月下旬作第一次水位觀測；民國75年2月中旬作第二次水位觀測；實際測得的觀測井共87口。利用像片基本圖的等高線作等高線間的內插法，求出觀測井位置的地標高²²⁾，並參考雲林水利會的井頂標高資料，然後利用水位計所測得井口至水面之深度換算成地下水位標高。

2.電導度（electrical conductivity）及水溫測量²³⁾：

²⁰⁾ 姚建功，雲林地區地下水海水入侵及水質擴散數學模式之研究，臺大農工研究所水利組碩士論文手稿，111-112頁，民國73年。

²¹⁾ 王基力，雲林地區地下水海水入侵之綜合研究，臺大農工研究所水利組碩士論文，6頁，民國74年。

²²⁾ 張智欽，屏東縣佳冬枋寮地區地層下陷之研究（力力溪沖積扇的水平衡探討），師大地理研究所碩士論文，6-7頁，民國74年。

²³⁾ 同註⁹⁾，215-216頁。

利用兩部電導度計³⁰⁾同時測量溶於水中的無機鹽類含量；實用單位為微姆歐公分 $\mu\text{o}/\text{cm}$ (micromhos- cm, 25 °C)；因電導度隨水溫而變化，一般以 25 °C 時的測值表示³¹⁾，所以測量電導度的同時，亦要量水溫；將不同溫度下的電導度，皆換算成 25 °C 時的電導度。在做水質定量分析前，由電導度的多寡，可預知水中鹽份總量的概值，但無法得知各種成分的含量。電導度及水溫測量，亦分為民國 74 年 7 月與民國 75 年 2 月各一次。

3. 採水樣 (ground water samples) 及化學分析 (chemical analysis) :

(1) 採水作業：以容量一公升的特製塑膠瓶，依照山本莊毅教授所著「地下水調查法」³²⁾一書及 David Keith Tood, Ph. D 所著 “Ground water Hydrology”³³⁾ 一書中的採水步驟，進行採水。

(2) 化驗項目：包括陽離子的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和陰離子的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 。

(3) 化驗方法：依據 APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 15th Edition, 1981 年。一書中的方法進行化學分析。

(4) 化驗單位：委託經濟部水資源委員會水工實驗室化驗。

4. 水質分析結果之研判：

(1) $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 的比值：依海水的標準成分， SO_4^{2-} 與 Cl^- 之重量濃度 (ppm) 比為 0.1396³⁴⁾。

(2) 離子濃度柱狀圖 (bar diagrams)³⁵⁾ 和 $\text{Cl}^-/\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 的比值³⁶⁾：首先將各水樣的陽離子、陰離子重量濃度 (ppm) 都換算成當量濃度 (epm)，再分別繪成柱狀圖；並計算各水樣之 $\text{Cl}^-/\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 比值，即可概知各水樣受海水污染的程度³⁷⁾。

³⁰⁾ 陳建初，水質分析，九大圖書公司，19 頁，民國 70 年。

³¹⁾ 同註¹⁰⁾，174 頁。

³²⁾ 同註¹⁰⁾，pp.371-372。

³³⁾ 同註⁹⁾，pp.290-291。

³⁴⁾ 同註¹⁰⁾，p.370。

³⁵⁾ William C. Walton, Groundwater Resource Evaluation, McGraw-Hill Book Company, New York, pp.442-445, 1970；同註¹⁰⁾ p.16。

³⁶⁾ Revelle, R., Criteria for recognition of sea water in groundwaters Trans. Amer. Geophys. Union. vol.22, pp.539-597, 1941.

³⁷⁾ 同註¹⁰⁾，10 頁。

(3) Piper 的水質圖 (trilinear diagrams or key diagrams)³⁸⁾：分別計算 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等的當量濃度 (epm) 占各該陽離子和、陰離子和的百分比後，點繪於水質圖上³⁹⁾，即可分析水質的結構。

(4) 鈉吸著率 (sodium adsorption ration = SAR)⁴⁰⁾：為水中 Na^+ 和 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的當量濃度比；其計算公式：

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / \sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / 2}$$

灌溉用水若鈉含量過多，會使土壤的物理性變惡劣，產生鈉或鹼害，所以農業上較重視鈉吸著率⁴¹⁾。

(五) 野外觀察與訪問：

實地觀察並訪問當地居民和水利會地下水管理人員，以了解水質污染的可能原因，再搜集相關資料、文獻以作為印證。

二、地理環境概況

(一) 地形與地質

1. 地形：

本區位於濁水溪沖積扇以南，地形上屬雲林、嘉義間海岸平原的一部分，此海岸平原最寬的地方可達 40 公里，最東側平原的高度只有 50 公尺左右⁴²⁾，而本研究區地面標高最高處不足 15 公尺，整個海岸平原向西緩緩傾斜，地勢十分平坦，刻蝕尚淺，為一形成未久的平原⁴³⁾；水系呈東西向，而南北排列，且均由東向西流入臺灣海峽。北港溪於海岸平原形成初期即已存在，而舊虎尾溪發生於海岸平原形成時期之後期⁴⁴⁾，因河道歷經變遷，流路紛歧⁴⁵⁾，有益自由地下水之補給⁴⁶⁾。各河川所搬運的大量

³⁸⁾ Piper, A. M., A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis, ACU, Trans. 25, 1944.

³⁹⁾ 同註³⁸⁾，244 頁。

⁴⁰⁾ Herman Bouwer, Groundwater Hydrology, 虹橋書局翻印, pp.363-365, 1978。

⁴¹⁾ 同註³⁸⁾，220 頁。

⁴²⁾ 王鑫，臺灣的地形景觀，渡假出版公司，59 頁，民國 69 年。

⁴³⁾ 徐鐵良，嘉義之潮汐灘地，臺灣省地質調查所彙刊，第 16 號，18 頁，民國 54 年。

⁴⁴⁾ 同註⁴³⁾，18 頁。

⁴⁵⁾ 張瑞津，濁水溪平原的地勢分析與地形變遷，國立臺灣師範大學地理研究報告，11 期，209 頁，民國 74 年。

⁴⁶⁾ 同註²⁴⁾，2 頁。

泥沙繼續淤積於河口及其兩側的海岸地帶，例如：北港溪每年的總輸沙量為 2.415 百萬公噸⁴⁷⁾，因而平原面亦繼續向西擴張⁴⁸⁾。

2. 地質：

本區的地面地質屬現代沖積層⁴⁹⁾，由更新世及現代沖積物組成⁵⁰⁾；沖積物主要來自北港溪所含之細砂及舊虎尾溪、牛挑灣溪所帶來的沖積物，再加上平原東側丘陵地帶上新世與更新世之砂岩、頁岩的碎屑⁵¹⁾；本區河流之沖積物以砂粒（sand）為主⁵²⁾，舊虎尾溪和牛挑灣溪所含沖積物大都為黃色石英質細砂及微量板岩質細砂⁵³⁾。本區與濁水溪沖積扇，在地形上雖略有差異，惟地下水系統形成之環境上與濁水溪沖積平原的地質、地史關係密切⁵⁴⁾；濁水溪沖積扇，其沖積物組成材料多來自古第三紀岩層，含多量的板岩碎屑，顆粒較粗，在沖積扇以南的海岸平原，砂礫的粒徑則逐漸變小，同時沖積層中的板岩質砂粒含量遞減，而淺黃色之石英質細砂漸增⁵⁵⁾。以地下地質而言，根據中國石油公司臺灣油礦探勘處之鑽井結果，北港附近地面上約 1500 公尺以下的地層屬中生代或古第三紀⁵⁶⁾；此中生代地層的沈積環境可能大部分屬於淺海，少部份屬於河流及河口⁵⁷⁾。海岸平原下的中生代或古第三紀砂岩有時夾有礫岩；北港一帶的砂岩以細粒為主，而水林一帶以粗粒至中粒為主⁵⁸⁾。

依據雲林農田水利會和北港糖廠的灌溉井之鑿井記錄，將地層粒徑由粗而細分為礫石層、砂層、砂土層、黏土層等四種，再繪出地層剖面圖（圖 2.），由圖 2. 可以顯示出研究區的地層結構及分佈情形。本區因屬海岸平原，主要地層結構是砂層、砂土層、及黏土層互層；表層土壤多為細砂、泥質粉砂或黏土，大部分地區表層黏土層並不厚，土壤透水性尚佳；接近西南部黏土層較厚，口湖鄉蚵寮村附近表層黏土層厚度

47) 須洪熙，水文與工程，中國工程師學會，109 頁，民國 73 年。

48) 林朝棨，臺灣地形，臺灣省文獻委員會，357 頁，民國 71 年修訂。

49) 何春蓀，臺灣地質概論，臺灣地質略圖，民國 64 年。

50) 同註 49)，3 頁。

51) 同註 49)，20 頁。

52) 張劭曾，臺灣新生地之開發與土壤問題，臺灣銀行季刊，21 卷 3 期，6 頁，民國 59 年。

53) 同註 49)，22 頁。

54) 同註 10)，6 頁。

55) 同註 49)，19-20 頁。

56) 林朝棨、周瑞燉，臺灣地質，茂昌圖書公司，34-35 頁，民國 67 年。

57) 周瑞燉，臺灣西部嘉義平原中生代岩石之研究，臺灣石油地質，第 7 號，中國石油學會，227 頁，民國 59 年。

58) 同註 50)，92 頁。

約 25 公尺，而黏土層最厚的地區可達 80 公尺；北港附近則以砂層的厚度較厚，約 65 公尺左右；水林一帶出現厚度約 30 公尺的礫石層，好收和頂灣附近也有局部性礫石層。

研究區的地下水可分為兩種，一為位於表土下淺層含水層中的自由水，另一為粗砂層上有黏土層覆蓋而形成之受壓水。所謂「含水層」是指砂層、礫石層等透水性良好，有豐富出水量而且能抽水利用的地層⁵⁰⁾；本區含水層所在的砂層或礫石層呈多層分佈，例如：順興村附近的含水層多達 5 層，因此，區域內所開鑿的深井大多數屬多

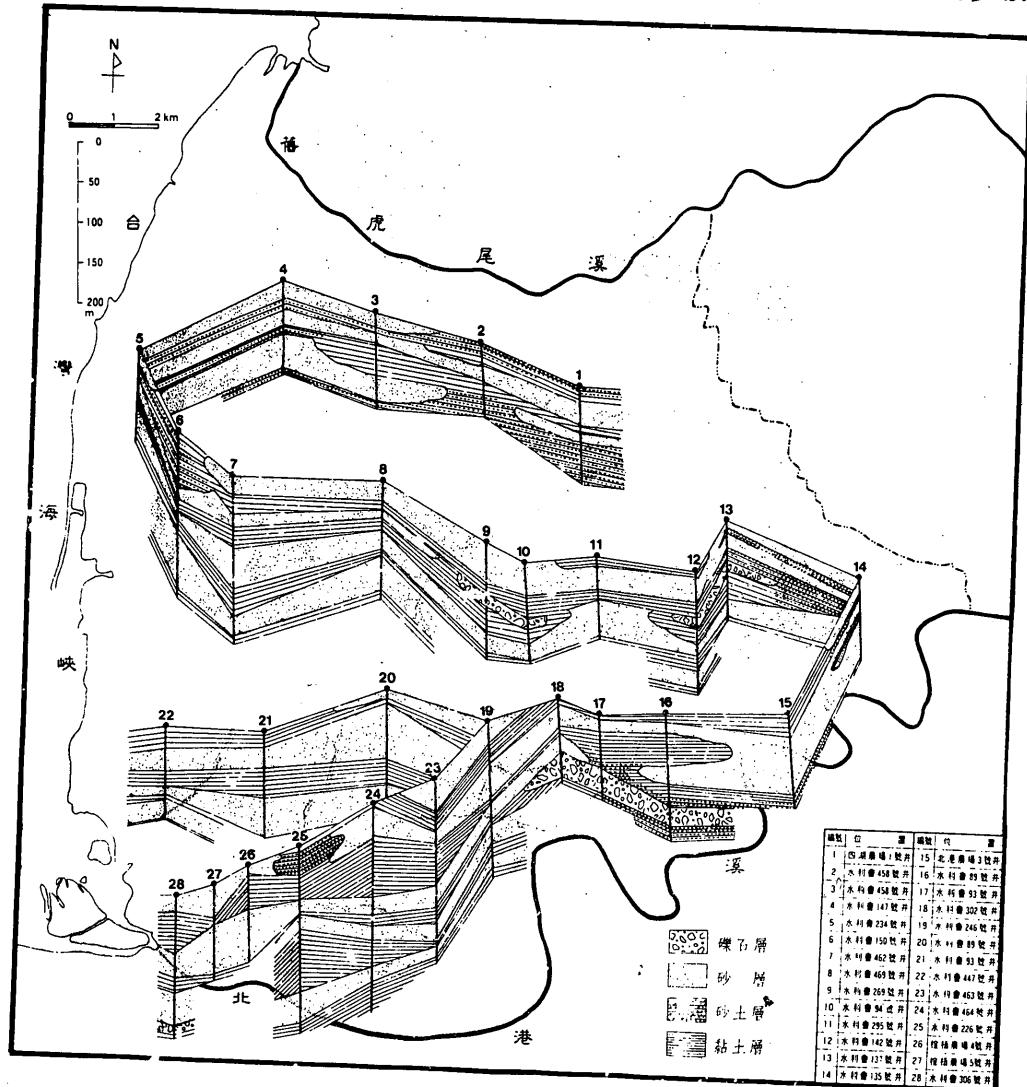


圖 2. 地層剖面圖

50) 同註 40), pp.3-6 ; 同註 8), 71 頁。

層採水，亦即同一井管中安放數節濾水管；而含水層的厚度各處不盡一致，從 10 幾公尺至 60 幾公尺不等，平均厚度約為 30 公尺⁶⁰⁾。

(二)氣候

1. 氣溫：(表 1.)

本區位於臺灣中部北港溪北側沿海 ($23^{\circ}42'N \sim 23^{\circ}30'N$)，西臨臺灣海峽，南接嘉義縣；受地理位置的影響，氣候終年溫和，平均溫達 $22.7^{\circ}C$ ，五月至九月的月均溫高於 $25^{\circ}C$ ；七月為年中最高溫，可達 $28.3^{\circ}C$ ；一月為年中最低溫，月均溫為 $15.7^{\circ}C$ 。

表 1. 植梧各月份平均氣溫 (民國 65 ~ 74 年)

月份	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	平均
氣溫 ($^{\circ}C$)	15.7	16.2	19.7	23.0	25.5	27.2	28.3	27.6	26.9	24.3	20.6	17.2	22.7

資料來源：台糖公司北港糖廠所屬植梧農場氣象站。

2. 降水量：(表 2.)

表 2. 研究區及其附近的降水量 (民國 65 年 ~ 74 年)

月份 測站	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	年	五 九	十 四
北港農場	22.1	49.5	66.3	67.4	197.0	237.4	180.4	283.9	55.4	6.8	17.5	12.6	1196.3	954.1	242.2
番子溝農場	21.5	50.4	73.2	63.4	225.8	239.3	182.3	263.6	59.0	6.9	17.7	13.0	1216.1	970.0	246.1
四湖農場	23.0	53.2	81.6	66.7	244.3	224.6	186.5	241.1	59.2	6.5	16.9	14.3	1217.9	955.7	262.2
下寮農場	21.9	49.5	75.1	65.4	233.8	228.3	183.5	239.6	73.4	5.0	18.5	12.9	1206.8	958.6	248.2
蔡厝農場	20.7	45.8	68.4	68.4	243.5	248.3	167.5	236.8	56.7	5.8	15.7	12.0	1189.6	952.8	236.8
植梧農場	22.4	43.5	61.7	70.0	231.1	236.2	205.4	243.1	58.9	7.4	17.9	13.0	1210.6	974.7	235.9
北港原料區	23.4	47.5	72.3	67.6	210.3	239.5	197.8	295.0	54.7	7.1	15.8	13.1	1244.1	997.3	246.8
水林農場	22.6	43.7	67.3	67.4	224.4	243.3	201.0	252.5	59.1	4.4	15.7	14.2	1215.6	980.3	235.3
鳶松農場	20.8	41.6	63.0	62.7	223.9	266.2	235.3	252.7	55.2	5.6	15.7	7.6	1250.3	1033.3	217.0
植梧原料區	19.8	42.0	56.6	63.5	215.0	231.9	186.6	238.1	59.2	5.3	15.9	12.9	1146.8	930.8	216.0
溪尾農場	26.0	51.1	80.0	70.7	238.8	234.8	200.0	223.6	54.4	7.6	19.2	14.0	1220.2	951.6	268.6
口湖農場	18.2	40	60.2	62.4	231.7	204.1	165.9	225.8	49.7	4.6	15.4	9.9	1087.9	877.2	210.7
大鵝農場	21.0	39.3	62.3	63.7	236.2	217.0	189.6	234.1	47.3	5.0	14.0	11.4	1140.9	924.2	216.7
平均	21.8	45.9	68.3	66.1	227.4	234.7	190.9	248.5	57.1	6.0	16.6	12.4	1195.7	958.6	237.1

資料來源：台糖公司北港糖廠所屬各降水量測站。

本區年平均降水量為 1195.9 公釐 (mm)，較東面平原及山區少，即愈接近沿海，雨量愈少⁶¹⁾。依照柯本 (Koppen) 的氣候分類，本區屬 Cwa 型⁶²⁾，冬季有明顯的乾旱現象，十月至翌年四月的降水量僅佔全年降水量的 19.8%；而五月至九月，因西南氣流及颱風過境帶來大量降水，四個月的降水量佔全年總降水量的 80.2%；可見降雨季節分布極不平均，如此的降雨型態對農作生產非常不利。

3. 氣候水平衡：

欲了解一個地區水平衡的情況，必須先估計出此區的蒸發散量 (evapotranspiration)，雖然目前有許多不同的方法可以計算出蒸發散量。本區因缺乏完整的氣象資料，所以本文採用 1948 年 Thornthwaite 氏所提出的一種比較簡易的方法計算可能蒸發散量 (potential evapotranspiration)，其定義為「完全被植物覆蓋的地面，在充分的水量供應而無流動水的情況，蒸發和蒸散的總量」⁶³⁾。

先用月平均氣溫計算出月熱能指數 (i)，求出未修正的 ET_p ，然後以當地緯度係數修正之。再與各月降雨量比較，計算土壤中的水分變化。本研究使用上述方法，以北港糖廠所屬的植梧農場氣象站資料，並採用 22.5°N 為修正係數，計算出研究區的氣候水平衡 (表 3.)；由表 3. 顯示年可能蒸發散量為 1209 mm；五月至九月各月的

表 3. 植梧地區氣候水平衡 (民國 65~74 年)

	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	年
平均氣溫 (65-74)	15.7	16.2	19.7	23.0	25.5	27.2	28.3	27.6	26.9	24.3	20.6	17.2	22.7
月熱能指數 (i)	5.65	5.93	7.97	10.08	11.78	12.99	13.80	13.28	12.78	10.95	8.53	6.49	120.23
未修正 ET_p (mm)	33	36	61	93	123	141	150	145	139	108	69	42	
$N 22.5^\circ$ 修正係數	0.94	0.895	1.03	1.055	1.14	1.125	1.155	1.115	1.02	0.995	0.92	0.925	
已修正 ET_p (mm)	31	32	63	98	140	159	173	162	142	107	63	39	1209
平均雨量 (65-74) mm	21	43	59	67	223	234	196	241	59	6	17	13	1179
土壤水分 (mm)	0	11	7	0	83	100	100	100	17	0	0	0	
合理蒸發散量 (mm)	21	32	63	74	140	159	173	162	142	23	17	13	1019
不足	10	0	0	24	0	0	0	0	0	84	46	26	190
過剩	0	0	0	0	0	58	23	79	0	0	0	0	160

資料來源：本區氣候測站僅有北港糖廠植梧農場一處，故採用此站資料；雨量資料則採用植梧農場及植梧原料區的平均值。

61) 雲林縣文獻委員會，雲林縣志稿卷三，政事志地政篇，4-5 頁，民國 69 年。

62) 陳國彥，臺灣的柯本氣候機率分類，國立臺灣師範大學地理研究報告，12 期，53 頁，民國 75 年。

63) Jen-Hu Chang, Climate and Agriculture, Aldine Publishing Company Chicago, pp.129-133, 1968；同註²⁸⁾，17 頁。

可能蒸發散量在 140 mm 以上，十二月至翌年二月却在 60 mm 以下。雖然六、七、八三個月的可能蒸發散量最大，在 159 mm 以上，不過因夏季颱風、豪雨帶來大量降水，所以有剩餘水量；一月的可能蒸發散量最小，只有 31 mm，唯因冬季少雨，土壤水分為零，故一月與四月、十月、十一月、十二月同為水量不足的月份；由於本區降雨量少且風速大⁶⁴⁾，造成水量平衡及水量不足的月份多，而水量剩餘的月份少。

(三) 河川水文

研究區由於水源極不穩定，灌溉用水量常呈不足現象，所以雲林水利會劃定為三年輪灌區；本區屬濁幹線給水系統的下游，其灌溉水源及引水方式有河川引水、河川抽水、排水路抽水、深淺井抽水；區域內非但灌溉渠道密佈，且因地勢低平，排水不易，故排水溝渠衆多；因此，研究區的主要河川，除北港溪和舊虎尾溪之外，尚有牛挑灣溪大排、尖山大排、鳶松大排等重要排水系統。

北港溪，全長 81.66 公里⁶⁵⁾，北港測站的流域面積為 598 平方公里，流量以六、七、八月最多，超過 50 CMS，二月最少，在 5 CMS 以下，比流量為 4.21 CMS / 100km²（表 4.）。流量的多寡受降雨量影響，夏季雨量較多，流量也隨之增加，使地面灌溉水源增多，減少抽取地下水的機會⁶⁶⁾，對緩和超抽地下水的情況有所助益；不過，因北港溪屬平原性河川，坡度平緩⁶⁷⁾，河道蜿蜒彎曲，若遇颱風，降雨過多，該溪水位暴漲，則沿岸低窪地區，往往泛濫成災。

舊虎尾溪為發源於虎尾的灌溉渠道，全長約 25.3 公里，集水面積約 49.6 平方公里。舊虎尾溪的流量與集水區雨量、濁幹線之放水關係密切⁶⁸⁾。其流量雖少，但據水

表 4. 北港溪的流量（民國 71 年）

月份 流量 (CMS)	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	平均	比流量 (CMS / 100 km ²)
北港溪—北港 (597.46 km ²)	4.45	2.97	4.40	6.51	38.59	54.77	59.69	66.90	25.93	11.86	18.68	7.11	25.16	4.21

資料來源：水資會，中華民國 71 年臺灣水文年報，民國 72 年。

64) 同註 61)，4-5 頁。

65) 同註 47)，19 頁。

66) 例如：鳶松工作站在北港溪沿岸設有抽水站，作為補助水源，所以其轄區內只有三口水利會的深井。

67) 石再添等，臺灣島諸流域高度、坡度及相對高度的分析研究，地理學研究，4 期，9 頁，民國 69 年。

68) 臺灣省水利局，雲林縣林厝寮地區灌溉管理之研究及改善計劃報告，29-31 頁，民國 65 年。

利局和土資會的調查，舊虎尾溪尚有相當流量可資利用，是林厝寮地區唯一可靠的地
面補助水源⁶⁹⁾，因此沿岸有數處抽水站；不過，該溪也是感潮河川，潮汐影響範圍可
達距溪口約 6 公里的地方，溪水受潮汐影響，與海水相混而無法灌溉，所以必須趁退
潮時定時抽水⁷⁰⁾。

牛挑灣溪大排，自土庫鎮埤腳里至口湖鄉成龍村，全長 19 公里，集水面積約
162.5 平方公里；匯納 13 條大排水路而成，為全省大排水路之冠⁷¹⁾。

尖山大排，從水林鄉土厝村至口湖鄉湖口村長約 13.1 公里，集水面積約 43.9 平
方公里，下游河段是口湖鄉排水問題最嚴重的地區。

薦松大排，自水林鄉松北村至口湖鄉水井村，長約 8.3 公里，集水面積約 21.8
平方公里，坡降為 1 / 5000，渠道大部分為土渠道，質地鬆軟，容易崩潰中毀⁷²⁾。

上述河川（包含排水系統），其終點均流入大海；這些河川皆屬感潮河川（tidal
river），出口水位較高；復因近年來沿海地區地層下陷，更使海潮位昇高，所以每
逢洪水，不僅渲洩不易，且常造成海水倒灌，嚴重影響當地居民生命和財產安全。

（四）農業土地利用

土地利用的類型不同，各種用水的型態也會有所差異。因此，分析民國 61 年至
74 年，14 年間北港、四湖、水林、口湖四鄉鎮的農業土地利用的變遷及現況，從而
概知用水型態的轉變。

四鄉鎮直接生產用地所佔的比率都遠大於非直接生產用地所佔的比率，所以本文
所指的土地利用是直接用於生產的農業土地利用。水田的面積，以水林鄉所佔面積最
大；四鄉鎮近幾年水田面積都有減少的趨勢（圖 3.），主要原因是本區灌溉水量常常
不足，而且近年來稻作價格低⁷³⁾。

以旱田而言，四湖鄉所佔面積最大。民國 67 年左右，因水利會興建的灌溉工程
完成，四湖的旱田面積減少，口湖、水林、北港也稍微縮減，不過，由於最近幾年水
稻利潤不高，部分水田轉作，所以旱田又有略增的趨勢（圖 4.）；而北港鎮旱田的驟
減，可能受都市化影響所致。

69) 同註 68)，29-34 頁。

70) 同註 68)，41 頁。

71) 臺灣省雲林農田水利會，雲林縣四湖鄉、口湖鄉、水林鄉、沿海地區排水系統海水倒灌本會辦理搶
修情形及維護改善計劃報告，1 頁，民國 73 年。

72) 同註 71)，2 頁。

73) 行政院主計處，中華民國 69 年台閩地區農漁業普查報告，第 16 卷，臺灣省雲林縣，124-125 頁，
民國 71 年。

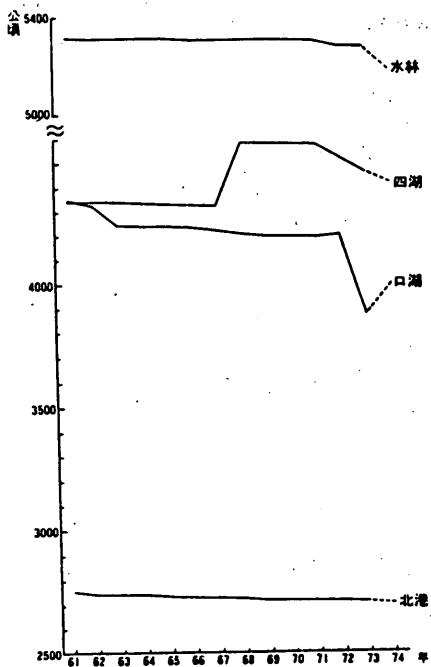


圖 3. 四鄉鎮歷年水田面積比較圖

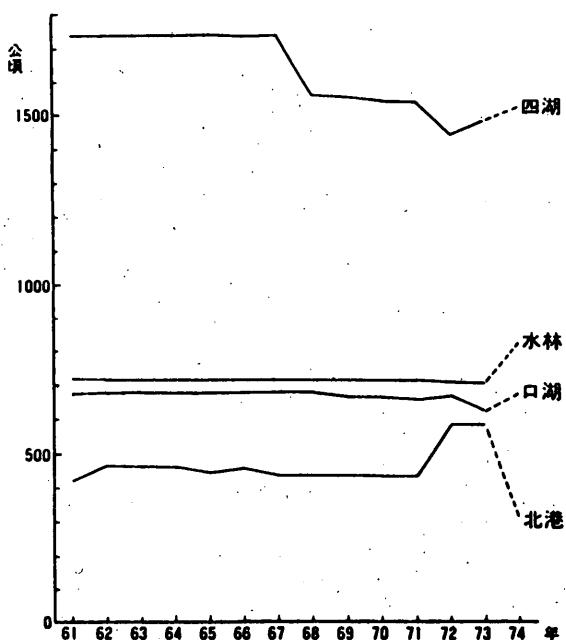


圖 4. 四鄉鎮歷年旱田面積比較圖

養魚池（包括淡水魚塭和鹹水魚塭）目前以口湖鄉所佔面積最大。口湖鄉從民國67年起，魚塭面積顯著增加，水林鄉、四湖鄉也有小幅度增加（圖5.），其原因为：

1. 沿海土壤屬於鹽鹹土（saline and alkaline soils），土壤內含有鹽分，而且冬季東北季風強勁，復因本區居灌溉水利的末端⁷⁴⁾，等諸多因素不利於農作生產，農民紛紛改變土地利用方式。

2. 近年來，國民對食物的消費型態，逐漸增加高蛋白質食物的需求，而減少對稻米等澱粉類糧食的消費，因此水產養殖業的經濟價值甚高⁷⁵⁾。

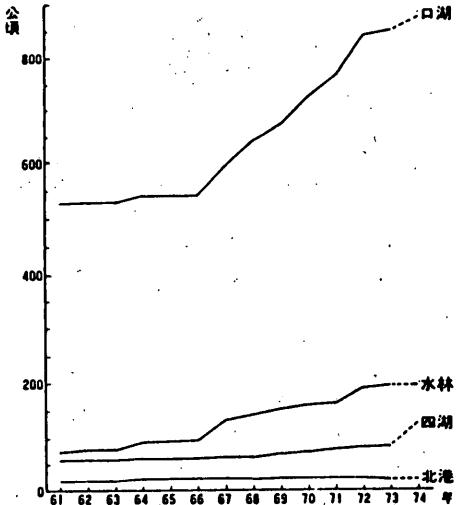


圖 5. 四鄉鎮歷年養魚池面積比較圖

⁷⁴⁾ 王柏山，雲林縣沿海虱目魚養殖業之地理研究，師大地理研究所碩士論文，9頁，民國66年。

⁷⁵⁾ 呂水雄，臺灣稻田轉營淡水養殖漁業可行性經濟分析，臺灣銀行季刊，37卷1期，264頁，民國75年。

所以口湖鄉、水林鄉、四湖鄉魚塭偏佈，北港鎮則因距海較遠，故養魚池較少。淡水魚塭以養殖鰻魚、蛤、蜆、吳郭魚、草魚、鰱魚、鯉魚、土虱魚等為多數，偶有混養虱目魚；鰻魚養殖以口湖鄉最盛，近幾年由於鰻魚養殖業受到日本市場供需失調的影響，養殖面積不再急速增加，但也未見減少（圖6.），目前本區鰻魚池面積共337.28公頃。鹹水魚塭以虱目魚與草蝦、砂蝦混養為主；由口湖鄉下崙村往南約1公里處開始，直達北港溪為止，東西寬約1.5公里的沿海地帶是雲林縣鹹水魚塭分佈最多的地區⁷⁰。

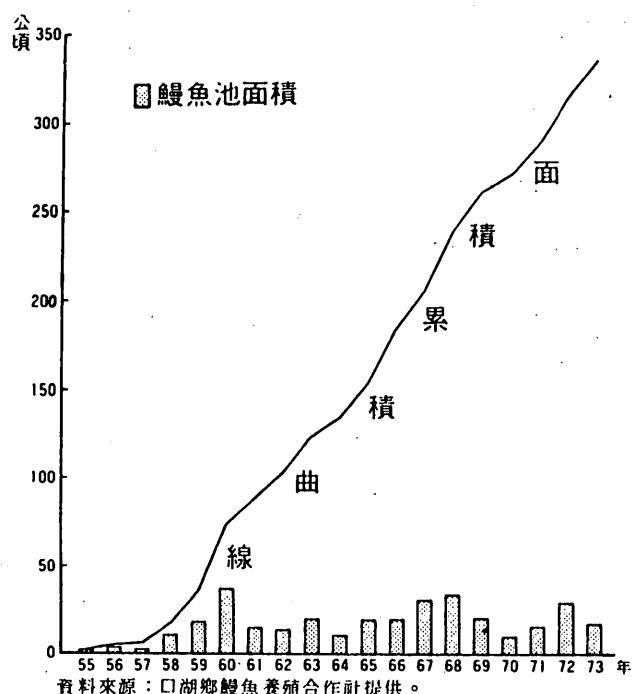


圖6. 歷年鰻魚池面積增加圖（民國55年～73年）

三、地下水位和地下水質的變化

(一) 地下水位的分布與變化

地下水位之觀測是從事地下水調查最基礎的工作⁷¹，依照實測之地下水面標高所繪製的等值線圖，即是地下水位等高線圖（contour map of groundwater level）；在地下水位等高線圖上加上地下水水流線，便成為地下水流網圖⁷²（ground water flow net map）。可表示地下水位的區域分布及地下水的流動方向。

根據民國52年臺灣省建設廳地下水工程處所作的「大濁水沖積扇地區地下水源複勘報告」，當時本研究區地下水位最低處在海平面5公尺以下，並無超抽現象⁷³；至民國61年水利局地下水工程處再進行調查，發現地下水抽水量遠超過補注量，致使地下水位降到海平面10公尺以下，到了民國66年水利局再次勘查時，地下水位已大幅下

⁷⁰ 同註⁷⁴，15頁。

⁷¹ 臺糖公司，水井手冊，7.2頁，民國65年。

⁷² 同註⁹，73頁。

⁷³ 同註²⁰，9頁。

降至海平面 20 公尺以下；目前更降至海平面 25 公尺以下；圖 7. 是水利局塭底村 30 號觀測井，自民國 66 年至 74 年的長期地下水位變動情形，可見地下水位不斷下降的情況，已經相當嚴重。

研究區的地下水位與抽水量、降雨量之關係極為密切（圖 8.）。年中地下水位最低的月份是四月或五月，因為此時農民正種植一期稻作，需引水灌溉，但降雨稀少，所以大量抽取地下水，導致地下水位急遽下降。圖 8. 中的抽水量僅指水利會所屬深井的抽水量⁸⁰⁾；水利會的深井只在六、七月二期稻作耕種期間才抽水灌溉，造成七、八月地下水位再次下降，不過由於夏季雨量豐富，所以水位下降的程度較四、五月緩和。地下水位最高的月份是十二月或一、二月。

由民國 74 年 7 月與民國 75 年 2 月二次地下水位調查結果所繪成的地下水流網圖（圖 9.、圖 10.）顯示，地下水均由本區的東側及北側地區向西南方向流動，並且在口湖鄉形成一個地下水位下降錐，分析其原因，可能與口湖鄉魚塭密佈，大量抽取地下水有關。由圖 9. 和圖 10. 可知地下水補注量並非完全來自東側地區，也受北側舊虎尾溪滲透補注的影響，所以地下水位等高線與地形等高線並不一致；而民國 74 年 7 月的水位等高線間隔較密，水力坡降（hydraulic gradient）較大，可能是夏季多雨，使得補注水量較豐富的緣故。

民國 74 年 7 月地下水位最低的地方是在口湖鄉水利會所屬 232 號井、488 號井附近，因適逢二期稻作灌溉，大量抽水，使得水位降到 -25 公尺以下。民國 75 年 2 月地下水位最低處是在北港糖廠所屬植梧農場的 4 號井、6 號井附近，原因是 75 年 2 月底植梧農場的深井曾抽水灌溉。民國 75 年 2 月，雖然正值乾旱少雨的冬季，但是由於大部份的井都停止抽水，所以最低水位在 -17.5 公尺以下，和民國 74 年 7 月的最低水位比較，有顯著回升，由此可見本區地下水位的變動受抽水量多寡的影響相當大。

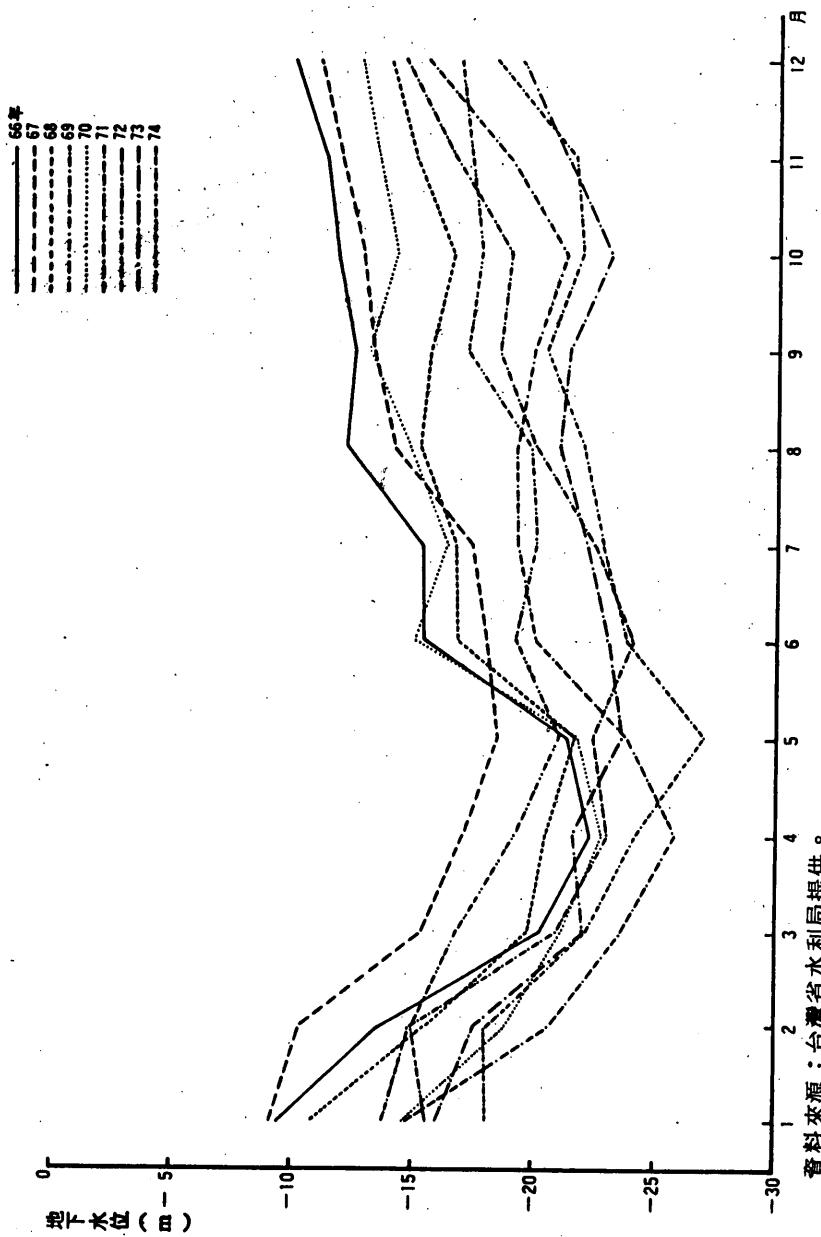
（二）電導度的分布與變化

為了探測本區地下水質的好壞及概知海水是否入侵，利用電導度計測量地下水中溶解固體物的含量，由電導度值的多寡，可知水中鹽分總量的概值。一般將電導度值 $250 \mu\text{mho}/\text{cm}$ (micro-mho/cm) 以下視為低鹽分的水， $500 \mu\text{mho}/\text{cm}$ 以下可作飲用水⁸¹⁾； $250 \sim 750 \mu\text{mho}/\text{cm}$ 之間為中鹽分的水， $1000 \mu\text{mho}/\text{cm}$ 以上的水已經有害身體健康，故不能飲用⁸²⁾； $750 \sim 2250 \mu\text{mho}/\text{cm}$ 之間為高鹽分的水， $2250 \mu\text{mho}/\text{cm}$

⁸⁰⁾ 因非法抽取地下水的現象到處充斥，故無法統計民井的抽水量。

⁸¹⁾ 同註²⁹，36 頁。

⁸²⁾ 徐達蓉，臺中港特定區的水資源問題，師大地理研究所碩士論文，43 頁，民國 71 年。



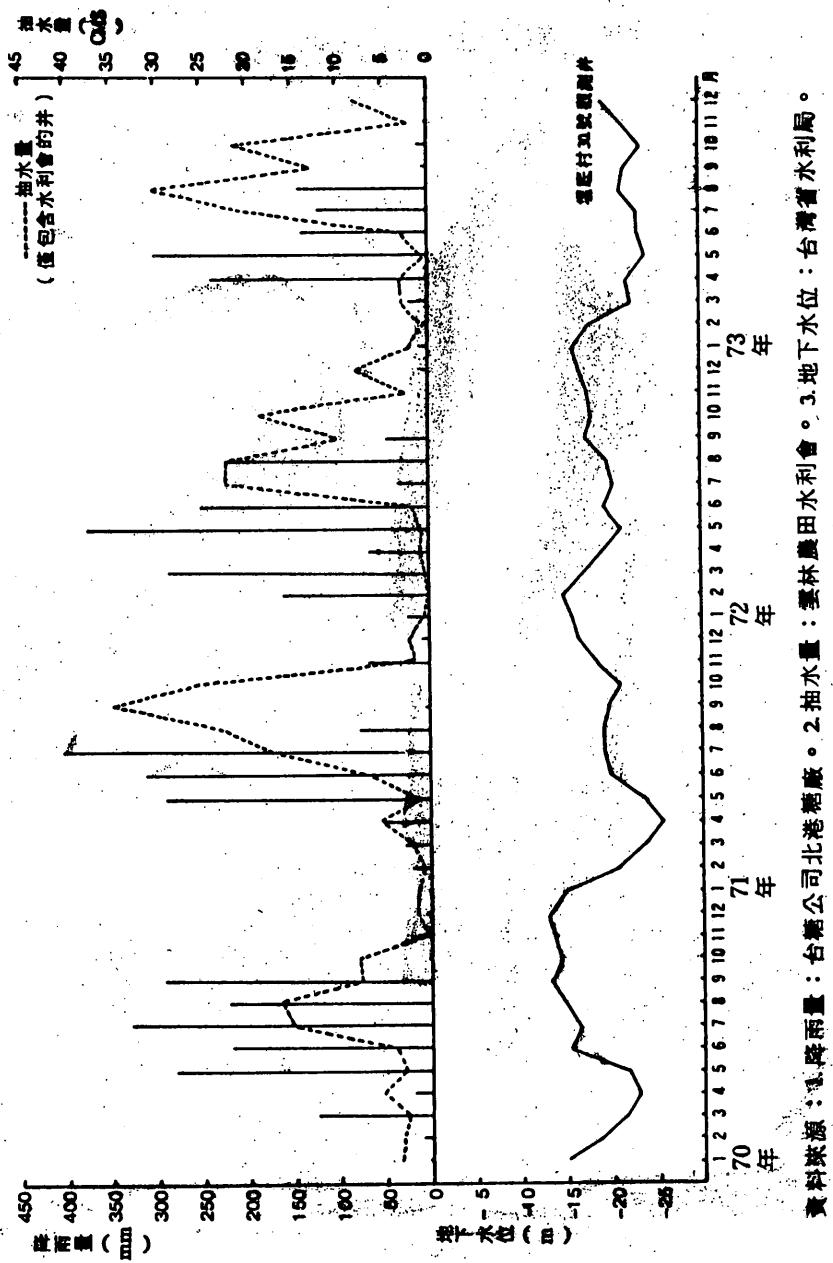


圖 8. 地下水位與抽水量、降雨量之關係圖

資料來源：1. 降雨量：台糖公司北港糖廠。2. 抽水量：雲林農田水利會。3. 地下水位：台灣省水利局。

以上為極高鹽分的水，已不適於灌溉之用⁸³⁾，若勉強用於灌溉，某些極耐鹽作物雖能忍受，但長期灌溉，對土壤可能造成破壞，因此，農業上以不超過 $1000 \mu\text{u} / \text{cm}$ 的灌溉水質較安全⁸⁴⁾。

將民國 74 年 7 月和民國 75 年 2 月所測量的電導度值換算成 25°C 時的電導度值之後，繪成電導度分佈圖（圖11.、圖12.）。在空間分布上，本區大部分深井的電導度都在 $300 \sim 750 \mu\text{u} / \text{cm}$ 之間， $750 \mu\text{u} / \text{cm}$ 以上的井大多集中於牛挑灣溪大排以南

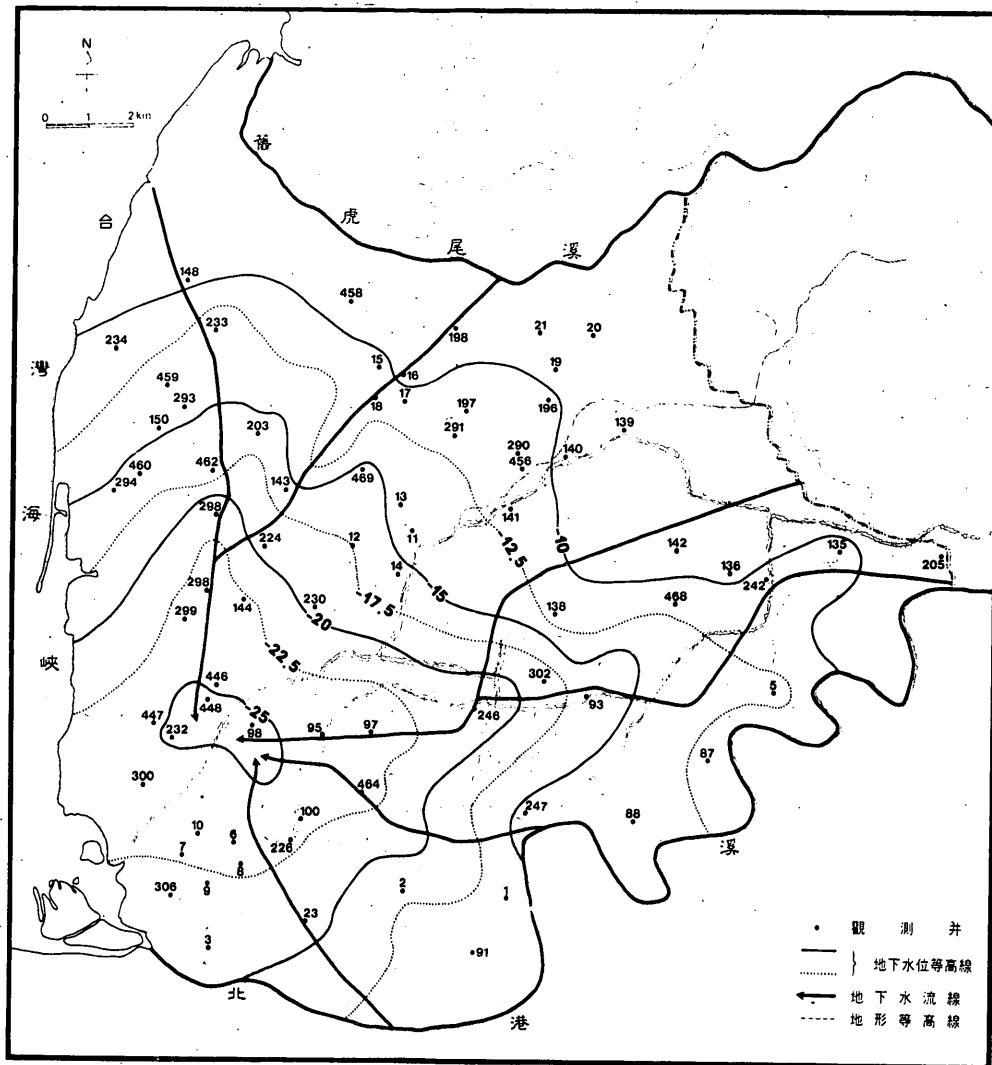


圖 9. 第一次調查之地下水水流網圖（民國 74 年 7-8 月）

⁸³⁾ 同註⁷¹⁾，7.20 頁。

⁸⁴⁾ 同註⁸³⁾，216 頁。

的地區，民國 74 年 7 月調查時，電導度超過 $750 \mu\text{mho}/\text{cm}$ 的井計有水利會所屬 96 號、144 號、448 號、306 號、87 號等五處井；而 $1500 \mu\text{mho}/\text{cm}$ 以上的井則有水利會 89 號井、100 號井以及順興村 81 號民井，這些電導度值較高的井皆有一個共同特徵，即是剛開始啟動抽水時，電導度都很高，但隔一段時間之後，電導度即慢慢下降，例如：植梧附近的水利會 100 號井⁸⁵⁾，抽水開始時電導度約 $9000 \mu\text{mho}/\text{cm}$ ，隔半小時之後下降至 $3500 \mu\text{mho}/\text{cm}$ 左右，再隔半小時即降到 $800 \mu\text{mho}/\text{cm}$ 左右。

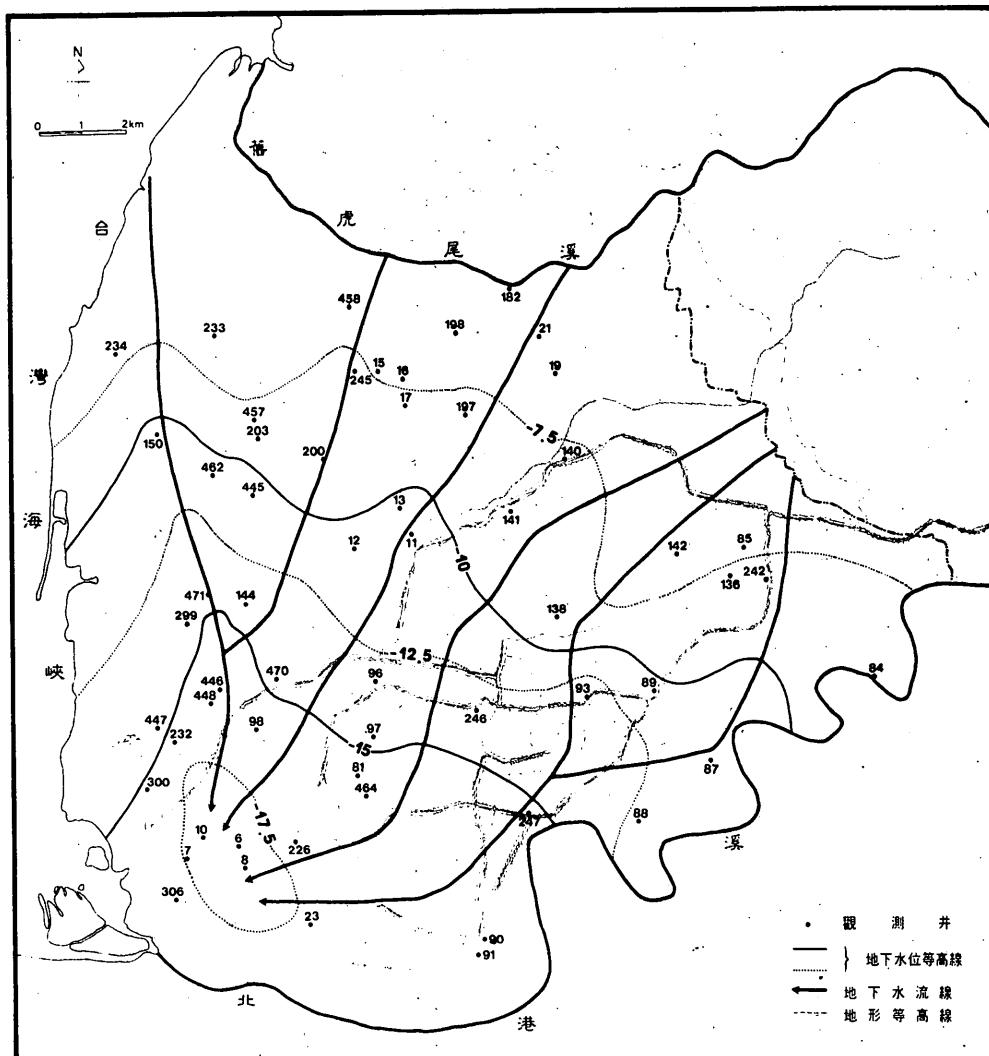


圖 10. 第二次調查之地下水流網圖（民國 75 年 2-3 月）

⁸⁵⁾ 水利會 100 號井於民國 75 年 2 月報廢，原因是井管破裂，井水鹽分太高。

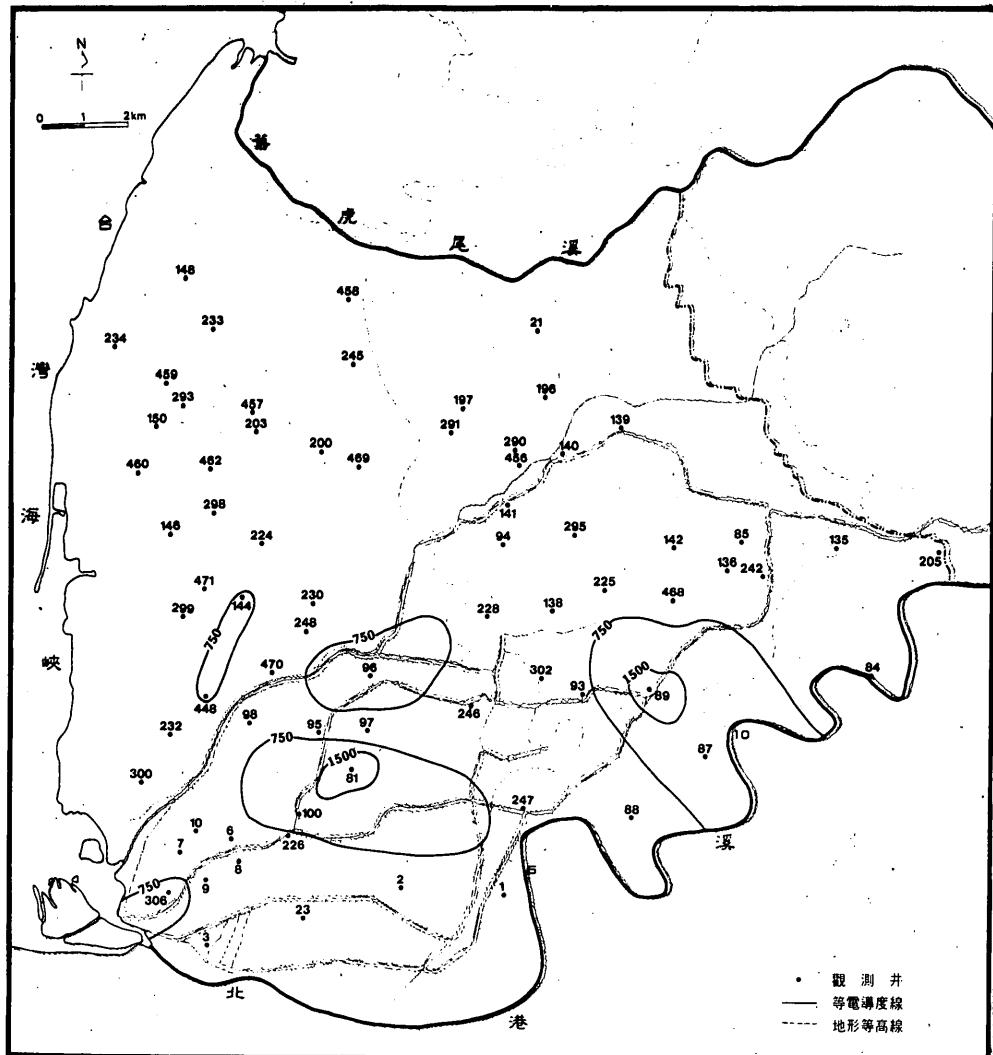


圖 11. 第一次調查之電導度分布圖（民國 74 年 7-8 月）

民國 75 年 2 月第二次調查時⁸⁰⁾，電導度 $750 \mu\text{v}/\text{cm}$ 以上的井計有利會 96 號井、306 號井和 93 號井；超過 $1500 \mu\text{v}/\text{cm}$ 的井則有水利會 89 號井、88 號井、順興村 81 號民井和新塭村 23 號民井；而水利會 448 號井的電導度降至 $600 \mu\text{v}/\text{cm}$ ，分析其原因則是冬季此井附近地區停止抽水，以致地下水位下降錐移動，水位回升，所以電導度降低。水利會 88 號井和新塭村 23 號民井在第一次調查時電導度分別是 $485 \mu\text{v}/\text{cm}$ 、 $582 \mu\text{v}/\text{cm}$ ，而第二次調查時驟增為 $1717 \mu\text{v}/\text{cm}$ 和 $2200 \mu\text{v}/\text{cm}$ ，並且出現與水利會 100 號井相似的情形。

⁸⁰⁾ 水利會 87 號井，第二次調查時，因電源故障，無法抽水，故沒有取水樣分析。

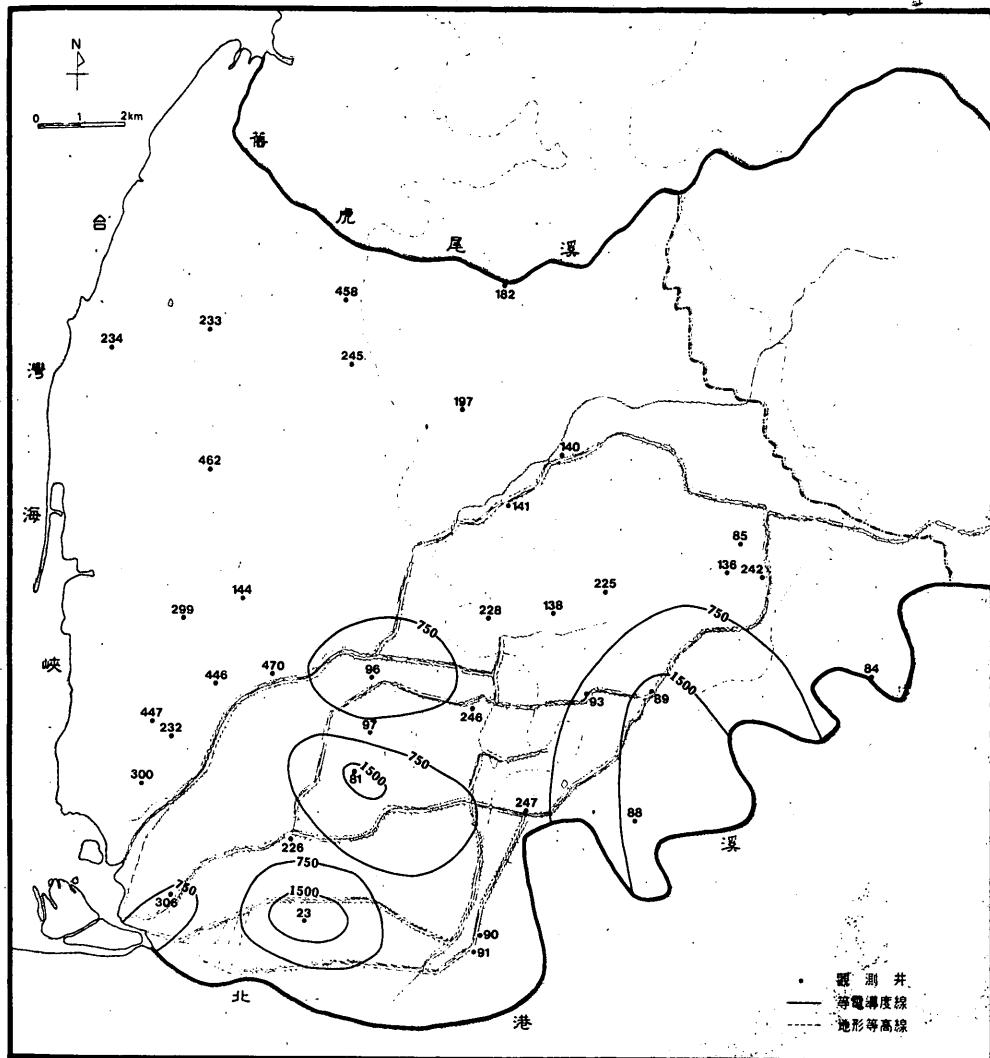


圖 12 第二次調查之電導度分布圖（民國 75 年 2-3 月）

就時間上的差異而言，第二次調查時，除了某些電導度較高的問題井之外，大多數觀測井的電導度普遍降低，主要原因是冬季抽水量減少，地中水分較多；由此可見，大量抽水會導致地下水的電導度增高，水質逐漸惡化。

（三）水質化學分析的結果

地下水中或多或少均有溶解鹽類存在⁸⁷⁾，其鹽類的種類與濃度視地下水之環境、流動及來源而定⁸⁸⁾。為了明瞭研究區地下水的鹽水化程度及分布形態，因此在地下水電導度值較高的地區取井水進行化學分析；同時電導度值較低的地區也抽選幾處井

⁸⁷⁾ 同註 10)，p.368。

⁸⁸⁾ 同註 10)，168 頁。

水化驗以作為比對。

氯鹽 (Cl^-) 是較安定的保存性污染質⁸⁹⁾；一般而言，地下水中只有少量的氯鹽，倘若氯鹽增多則水中其他溶解鹽類也會相對增加⁹⁰⁾，所以由氯之含量可間接判斷地下水受污染的程度。按照海水的標準成分， SO_4^{2-} 與 Cl^- 之重量濃度比為 0.1396⁹¹⁾；由 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 的比值可推知水質是否接近海水⁹²⁾；因此，筆者找出第一次電導度調查時，數值超過 $500 \mu\text{m}/\text{cm}$ 的井號，於民國 74 年 9 月採水樣化驗硫酸鹽 (SO_4^{2-}) 與氯鹽 (Cl^-)，並計出 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 此值（表 5）；再選出 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比值接近 0.1396 的井號以及氯鹽含量較高的井號，於民國 74 年 11 月和民國 75 年 2 月又各探一次水樣⁹³⁾進行化學分析。由於氯鹽 (Cl^-) 常因人類活動而增加，譬如人類的排泄物、醃製品排水等，含有多量的氯鹽⁹⁴⁾，故為了避免由暫時增加的溶解鹽類，導致錯誤研判，因此先化驗水樣中的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等陽離子和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等陰離子的重量濃度（ppm），並各換算成當量濃度（epm）然後採用 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 的比值（表 6）、離子濃度柱狀圖（bar diagrams）、 $\text{Cl}^-/\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 的比值、Piper 的水質圖（trilinear diagrams）等多種方法加以分析探討。

一般正常地下水中主要成分之陽離子或陰離子的當量濃度和，均在 10epm 以下，受污染後會顯著增加，而標準海水為 605epm，當正常地下水受污染後，離子濃度柱狀圖升高（極易辨認⁹⁵⁾，此法為 Collins 於 1923 年所發表。圖 13 中，陽離子和或陰離子和超過 10epm 的井號有順興村 81 號民井、水利會 87 號、89 號、93 號、96 號、100 號、228 號、246 號等七處井，其中 100 號井高達 60epm 以上⁹⁶⁾。圖 14 中，10epm 以上的井則有新塭村 23 號民井、順興村 81 號民井、水利會 88 號井、89 號井、93 號井、96 號井、197 號井。

89) 同註 1)，p.398。

90) 同註 1)，p.390。

91) 同註 1)，p.370。

92) 同註 1)，p.442。

93) 水利會 100 號井因電導度特高，所以在啟動抽水 5 分鐘之後採第一次水樣，經過 30 分鐘再採第二次水樣。

94) 同註 8)，244 頁。

95) 楊萬全，地下水開發對環境的衝擊（臺北盆地的個案研究），國立臺灣師範大學地理研究報告，9 期，108 頁，民國 72 年。

96) 水利會 100 號井，第一次所採水樣的離子濃度和高達 60epm 以上，而第二次所採水樣却降低至 10 epm 以下。

表5. 第一次水質化驗
之 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比
值(民國74年9月)

井 號	$\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$
順興 81	0.02
84	4.00
87	0.60
89	0.24
93	0.07
95	0.38
96	0.04
97	0.13
98	1.31
100-1	0.02
100-2	0.02
136	2.27
142	2.17
144	3.26
197	1.95
200	1.94
228	0.31
234	1.78
242	13.86
246	0.09
247	0.21
296	2.64
302	3.76
306	0.23
448	5.00
456	3.75
467	4.24
460	1.77
462	0.28
469	2.24
470	0.02

表6. 第二次和第三次水質化驗之
 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比值

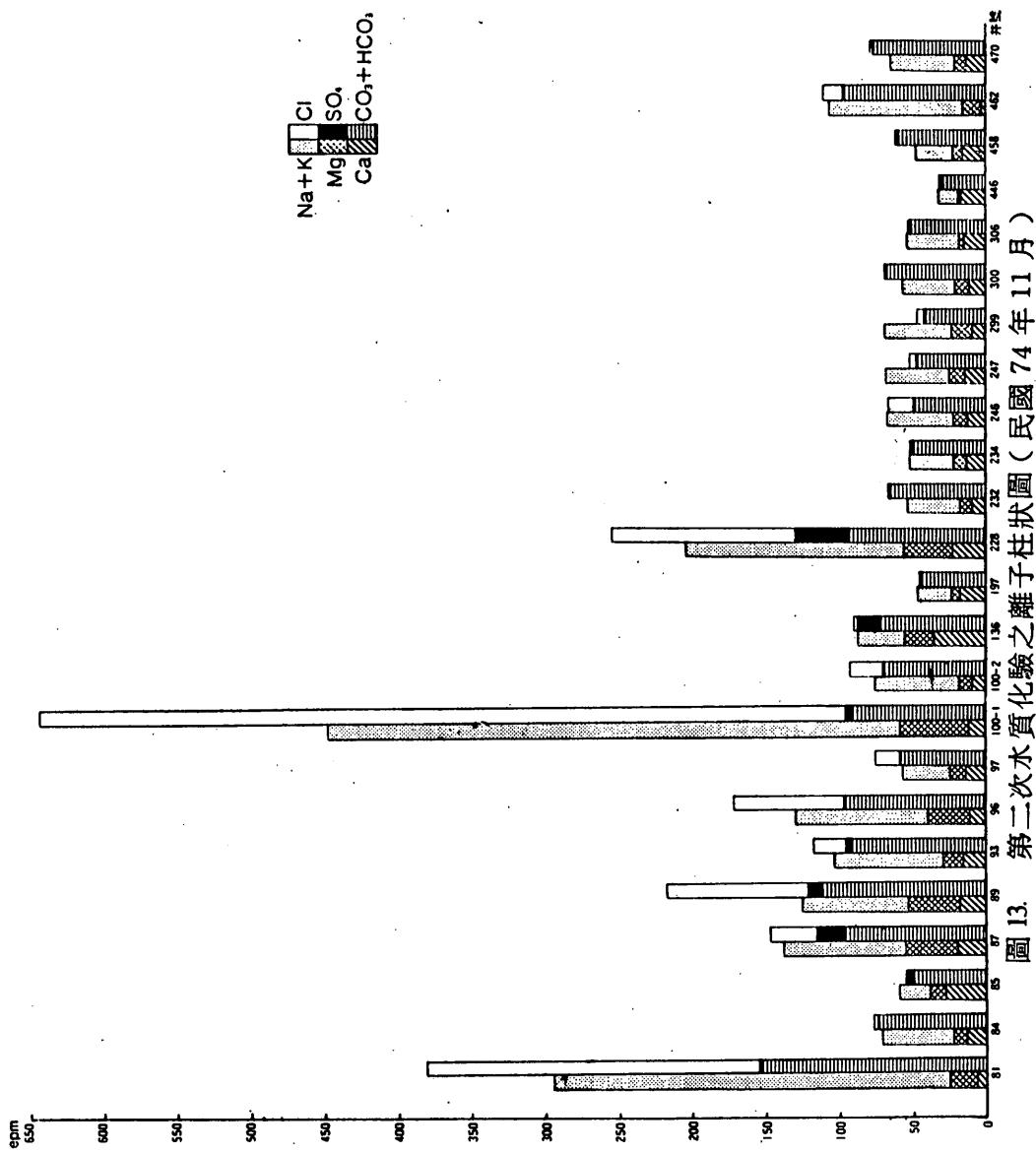
井 號	74.年11.月	75.年 2.月
新塭村 23 號井		0.11
順興村 81 號井	0.02	0.02
水利會 84 號井	0.13	0.29
水利會 85 號井	8.40	2.57
水利會 87 號井	0.85	
水利會 88 號井		0.09
水利會 89 號井	0.13	0.19
水利會 90 號井		0.38
水利會 91 號井		0.08
水利會 93 號井	0.28	0.48
水利會 96 號井	0.004	0.06
水利會 97 號井	0.04	0.02
水利會 100-1 號井	0.01	
水利會 100-2 號井	0.01	
水利會 136 號井	10.66	6.55
水利會 197 號井	0.34	4.23
水利會 228 號井	0.41	0.10
水利會 232 號井	6.67	0.30
水利會 234 號井	0.42	0.23
水利會 246 號井	0.02	0.01
水利會 247 號井	0.05	0.05
水利會 299 號井	0.11	0.10
水利會 300 號井	3.45	0.71
水利會 306 號井	0.32	0.02
水利會 446 號井	1.14	0.94
水利會 447 號井		0.02
水利會 458 號井	0.33	0.71
水利會 462 號井	0.18	0.28
水利會 470 號井	0.32	0.55

表7. 第二次和第三次水質化驗
之 $\text{Cl}^-/\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 比值

井 號	74年11月	75年2月
新塭村 23 號井		5.19
順興村 81 號井	1.40	0.79
水利會 84 號井	0.03	0.01
水利會 85 號井	0.01	0.02
水利會 87 號井	0.32	
水利會 88 號井		1.03
水利會 89 號井	0.85	0.90
水利會 90 號井		0.01
水利會 91 號井		0.55
水利會 93 號井	0.23	0.28
水利會 96 號井	0.79	0.68
水利會 97 號井	0.13	0.30
水利會 100-1 號井	6.08	
水利會 100-2 號井	0.34	
水利會 136 號井	0.30	0.04
水利會 197 號井	0.02	0.10
水利會 288 號井	1.35	0.04
水利會 232 號井	0.0006	0.01
水利會 234 號井	0.01	0.02
水利會 246 號井	0.37	0.34
水利會 247 號井	0.16	0.09
水利會 299 號井	0.06	0.04
水利會 300 號井	0.001	0.01
水利會 306 號井	0.02	0.23
水利會 446 號井	0.004	0.01
水利會 447 號井		0.33
水利會 458 號井	0.01	0.02
水利會 462 號井	0.14	0.02
水利會 470 號井	0.01	0.01

表8. 第二次和第三次水質化驗之 SAR 值

井 號	74年11月	75年2月
新塭村 23 號井		39.77
順興村 81 號井	27.22	16.29
水利會 84 號井	5.83	5.83
水利會 85 號井	3.37	3.35
水利會 87 號井	9.47	
水利會 88 號井		13.91
水利會 89 號井	8.14	15.53
水利會 90 號井		4.82
水利會 91 號井		6.40
水利會 93 號井	8.18	8.19
水利會 96 號井	9.65	9.59
水利會 97 號井	4.28	5.13
水利會 100-1 號井	39.54	
水利會 100-2 號井	6.59	
水利會 136 號井	4.74	5.06
水利會 197 號井	3.33	5.64
水利會 228 號井	19.02	4.15
水利會 232 號井	4.41	4.77
水利會 234 號井	3.95	5.36
水利會 246 號井	5.40	6.38
水利會 247 號井	5.37	5.14
水利會 299 號井	5.43	5.81
水利會 300 號井	4.53	4.71
水利會 306 號井	4.43	7.55
水利會 446 號井	3.02	3.56
水利會 447 號井		5.31
水利會 458 號井	3.51	4.19
水利會 462 號井	9.16	5.09
水利會 470 號井	5.36	5.13



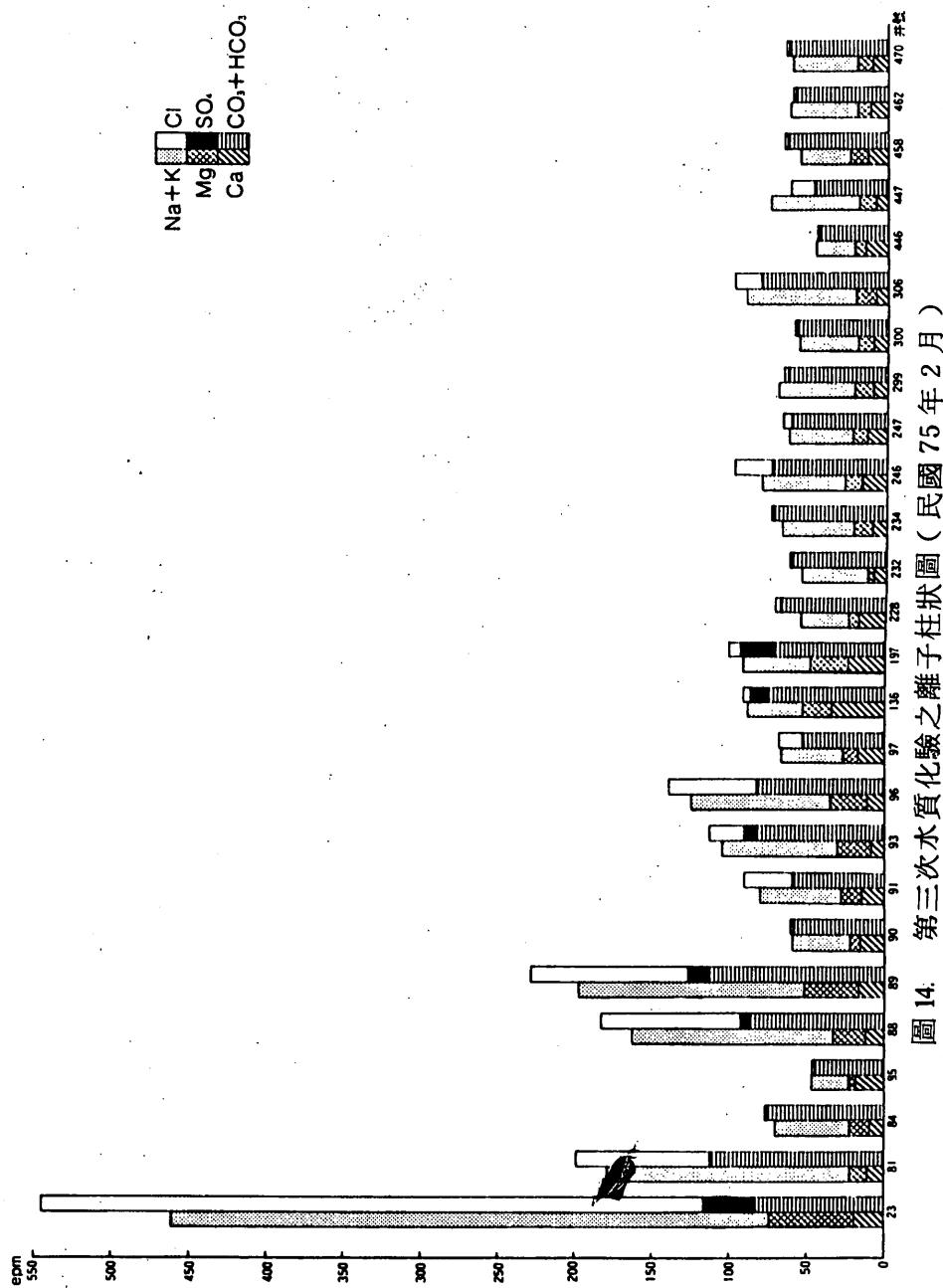


圖 14. 第三次水質化驗之離子柱狀圖（民國 75 年 2 月）

Revelle, R. 在 1941 年便注意到海水中 HCO_3^- 和 Cl^- 的比例是 1 : 190⁹⁷⁾；海水中碳酸離子及亞碳酸離子極少，但在地下水中極為豐富；所以 Revelle 建議採用 chloride-bicarbonate ratio，即 Cl^- 和 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 的 epm 比值，正常地下水其比值約在 2 以下，標準海水約為 234，地下水如受到污染，則 epm 顯著增加，可作為污染的指標⁹⁸⁾。將水樣化驗結果計算後呈現於表 7，由表 7 中可看出 Cl^- 與 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 比值超過 2 以上者只有水利會 100 號井和新塭村 23 號民井。

另一種最常用的水質分析方法是 Piper 於 1944 年發表的水質圖 (trilinear diagrams or key diagrams)，先分別計算 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 的當量濃度 (epm) 占各該陰離子、陽離子和的百分比，然後點繪於水質圖上。

將民國 74 年 11 月及 75 年 2 月所採水樣化學分析之結果，依照 Piper 提出的方法，分別繪成圖 15 和圖 16。

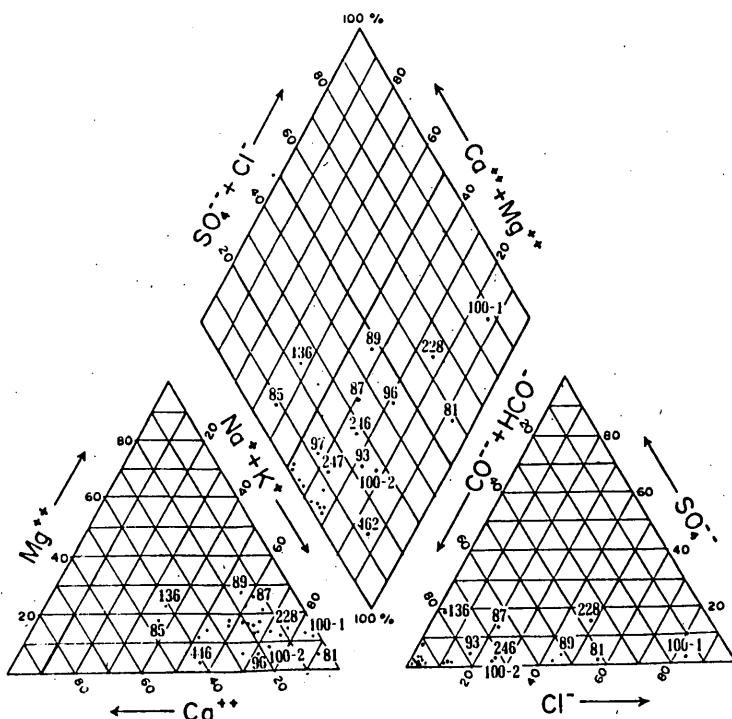


圖 15. 第二次水質化驗之水質圖

97) 同註 13)，p.249。

98) 同註 9)，244 頁。

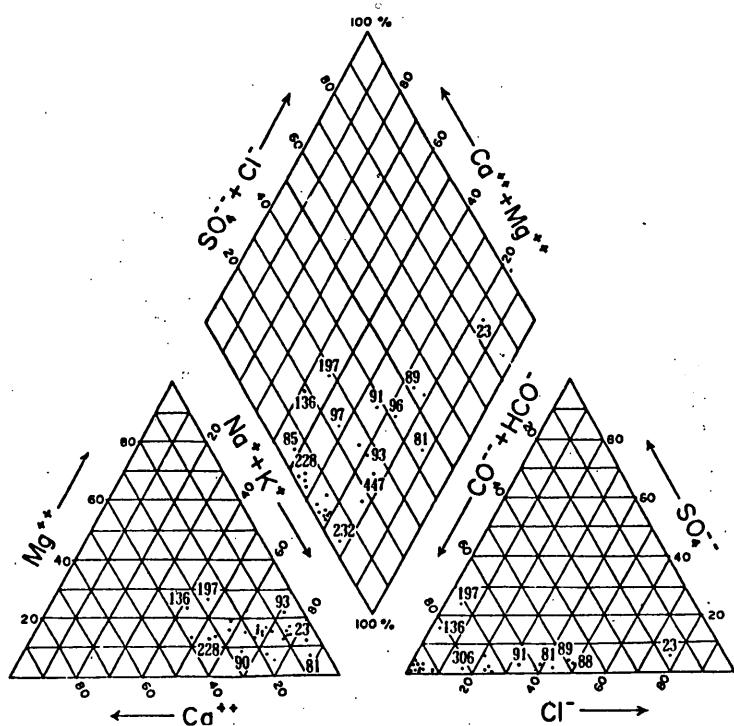


圖 16. 第三次水質化驗之水質圖

鈉濃度對灌溉用水的影響極為重要⁹⁹⁾；所以特別計算本區地下水中的鈉吸著率(sodium adsorption ratio = SAR)。因鈉能使土粒產生絮散作用，在土壤乾旱時呈緊密堅硬，降低通氣作用及滲透性，同時容易龜裂，使作物根系斷裂，反之，土壤濕潤時泥濘鬆軟，不適耕作，並且鈉濃度達相當程度時，作物有中毒的危險，所以灌溉水中鈉之含量愈少愈佳¹⁰⁰⁾。農業上以鈉吸著率表示鹹害(sodium hazard)，依其含量分為四級：10 以下為低鈉水，可引用於所有土壤；10 ~ 18 為中鈉水，最好引用灌溉於粗質地或滲透性快的土壤，若引灌於排水不良、滲透性差而鈣含量低的土壤則有害；18 ~ 26 為高鈉水，引灌於非石膏質土壤可能引起鈉離子積聚而發生毒害，但排水良好、經常淋洗和施用有機物改善土壤物理性的地方勉強可使用；26 以上為極高鈉水，一般情形已不適於灌溉之用¹⁰¹⁾。將水樣化驗的結果，按照鈉吸著率的計算公式： $SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}}$ 算出研究區地下水中的 SAR 值，

⁹⁹⁾ 同註 ⑨, p.300。¹⁰⁰⁾ 同註 ⑨, 51 頁。¹⁰¹⁾ 同註 7), 7.20-7.21 頁。

如表 8。

四、地下水質惡化的因素與現象

(一) 地下水的鹽水化

地下水鹽水化的原因，可概分為原始的和次生的兩種，前者為含水層的地層是海成層，堆積當時的鹽分尚大量保存，於地下水抽取時，因淡水的稀釋而溶出¹⁰²⁾，具有下列現象¹⁰³⁾：

- (1) 氯含量隨深度之加深而增加。
- (2) 鹽水化的進行與上層（淺層）地下水無關。
- (3) 抽水時間愈長，井水氯含量愈高。

鹽水化的次生原因衆多，大致包括：

(1) 原屬淡水含水層，後因地下水超抽，地下水位下降，導致海水入侵，具有高鹽分水自海向內陸成鋸齒狀入侵的分布形態。

(2) 因地層下陷，使海水倒灌滲透（infiltration），且下滲（percolation）而引起鹽水化問題，具有以海水倒灌地區為中心，高鹽分水向四周成放射狀分布的現象¹⁰⁴⁾。

(3) 長期地下水位下降錐附近的無機鹽類聚集¹⁰⁵⁾。

(4) 因工業、農業¹⁰⁶⁾、礦業、都市活動等人文活動所造成的污染；不同類型的污染，其水質變化各具特色¹⁰⁷⁾。

沿海地區或地下水系末端潮汐水可到達的地區，若大量抽水，使地下水位降低到海平面以下，導致海水、潮汐水等滲入內陸含水層而污染地下水資源，此種現象稱為「海水入侵」¹⁰⁸⁾（seawater intrusion），當地下水一旦受海水污染，含水層中所含鹽分急遽增加，終致該含水層之地下水全部淪為無用，水井廢棄，損失之鉅，不可

¹⁰²⁾ 同註 1)， pp.246-247。

¹⁰³⁾ 楊萬全，臺北盆地零公尺地區的問題，國立臺灣師範大學地理研究報告，6期，64頁，民國69年。

¹⁰⁴⁾ 同註 8)， 242 頁。

¹⁰⁵⁾ 臺灣省水利局規劃總隊，濁水溪平原地下水人工補注可行性研究指導工作報告，24頁，民國74年。

¹⁰⁶⁾ 柴崎達雄，地下水盆的管理，東海大學出版會，p.32, 1976。

¹⁰⁷⁾ 山本莊毅，水文學總論，共立出版，pp.93-96, 1976。

¹⁰⁸⁾ 同註 8)， 242 頁；同註 10)， 263 頁。

勝計¹⁰⁹。

(二)海水倒灌的影響

本研究區沿海一帶，地勢低緩，素有排水不良的狀況，因此海水倒灌的現象，由來已久，例如：民國 48 年艾倫颱風所帶來的「八七水災」¹¹⁰，使北港溪堤防潰決，淹沒土地達 471 平方公里，受災非常慘重；又如：民國 60 年 7 月 26 日娜定颱風帶來強風豪雨，沖毀口湖鄉堤防 3.8 公里，致沿海地區發生海水倒灌¹¹¹，等等淹水災害屢見不鮮¹¹²。

雖然水利局曾設置防水閘門、加高堤防、培厚護岸等防患措施，省住都局也曾撥巨款進行填高路基、改善排水、設置抽水站，但是近年來因下列因素，導致海水倒灌情況不僅未獲改善且更加嚴重：

(1)沿海地區地層下陷¹¹³，使得海水潮位高漲時，幾乎與原來堤防高度相等，較為低窪區段即發生溢灌而決堤。

(2)各排水堤岸大多為土堤，堤防高度不足，堤身又是單薄殘缺，極易遭海水沖毀崩潰¹¹⁴。

(3)鹹水養殖業興起，業者為了引入海水供應鹹水魚塭水源，常擅自挖掘堤岸，埋設輸水管，使堤岸鬆動，並且破壞既設的自動防潮閘門¹¹⁵，肇致堤防、閘門等防潮設施失卻機能。

(4)沿海因地勢過低，中、小排水出口全部設置自動水門控制，但因雜草淤積，污泥阻塞，排水功能不暢，尚未排出前潮，水位已提前倒灌，以致低窪之處常積水為患¹¹⁶，不獨豪雨期間如此，平常也是一片水鄉澤國的景象。

¹⁰⁹ 同註¹¹⁷，37 頁。

¹¹⁰ 陳克誠，由水利觀點論臺灣八七水災，臺灣研究叢刊第 91 種「臺灣水災之研究」，83 頁，民國 56 年。

¹¹¹ 雲林縣文獻委員會，雲林縣志稿卷首，大事記，293 頁，民國 68 年。

¹¹² 雲林縣文獻委員會，雲林縣志稿卷四，經濟誌水利篇，2 頁，民國 69 年。

¹¹³ 民國 71 年 9 月水利局設立地層下陷觀測站於口湖鄉大溝村，至今每年約下陷 10 公分，詳細的下陷情形，有待進一步測量、研究。

¹¹⁴ 雲林縣政府，雲林縣口湖鄉海水倒灌災害處理研討會簡報，1 頁，民國 73 年。

¹¹⁵ 臺灣省雲林農田水利會，牛挑灣溪下游和尖山大排海水倒灌造成災害損失及排水閘門管理問題報告，3-4 頁，民國 73 年。

¹¹⁶ 同註¹¹⁷，3 頁。

本區原本地勢低窪，復因上述原因，使海水倒灌問題日漸嚴重，再加上區域內的河川及排水都屬感潮河川，所以每當颱風豪雨來臨，若適值海潮上漲，則潮水欲溯河而上，而洪水却擬順河而下，如此相向逆流的結果，迫使洪水位抬高，勢將引起更大的洪患，使得受災範圍益趨擴大，包括濱海地區及牛挑灣溪大排、尖山大排、蔦松大排等排水系統沿岸；其倒灌的情形是海水隨著漲潮由大排水的出海處倒灌進入中排水，再由中排水倒灌進入小排水，在由大而中至小的倒灌過程中，如堤防較為薄弱的即發生潰堤，高度不足的即發生溢堤¹¹⁷⁾，造成海水泛濫，附近農田、魚塭、房舍或沖毀或淹水，損失慘重。

最近幾年又頻傳海水倒灌事件，例如：民國 73 年 8 月 27 日，因裘恩颱風過境，發生強烈西南氣流，帶來豪雨，造成海水倒灌，農田淹水面積達 255.75 公頃，魚塭流失面積達 14.5 公頃，沿海各排水系統或多或少受損，其中由於尖山大排堤防崩潰而受災的面積最廣，為 64.85 公頃¹¹⁸⁾；各地災情以口湖鄉最嚴重（圖 17），尤其是植梧村新塭村、水井村農牧區，到處浸水，路肩崩毀，道路泥濘難行¹¹⁹⁾；又如民國 74 年 8 月 23 日，尼爾森颱風過境，帶來豪雨，致使口湖鄉植梧中排閘門破損，釀成海水倒灌，植梧附近農田約 50 公頃淹水，道路積水高達 60 公分以上，幸好水利會派員迅速搶修，否則後果不堪設想¹²⁰⁾。植梧因經常發生水患，居民為防止尖山大排的水位提昇由植梧橋的橋面溢出流入村內，因此將橋衍封密，形成當地有趣的景觀。

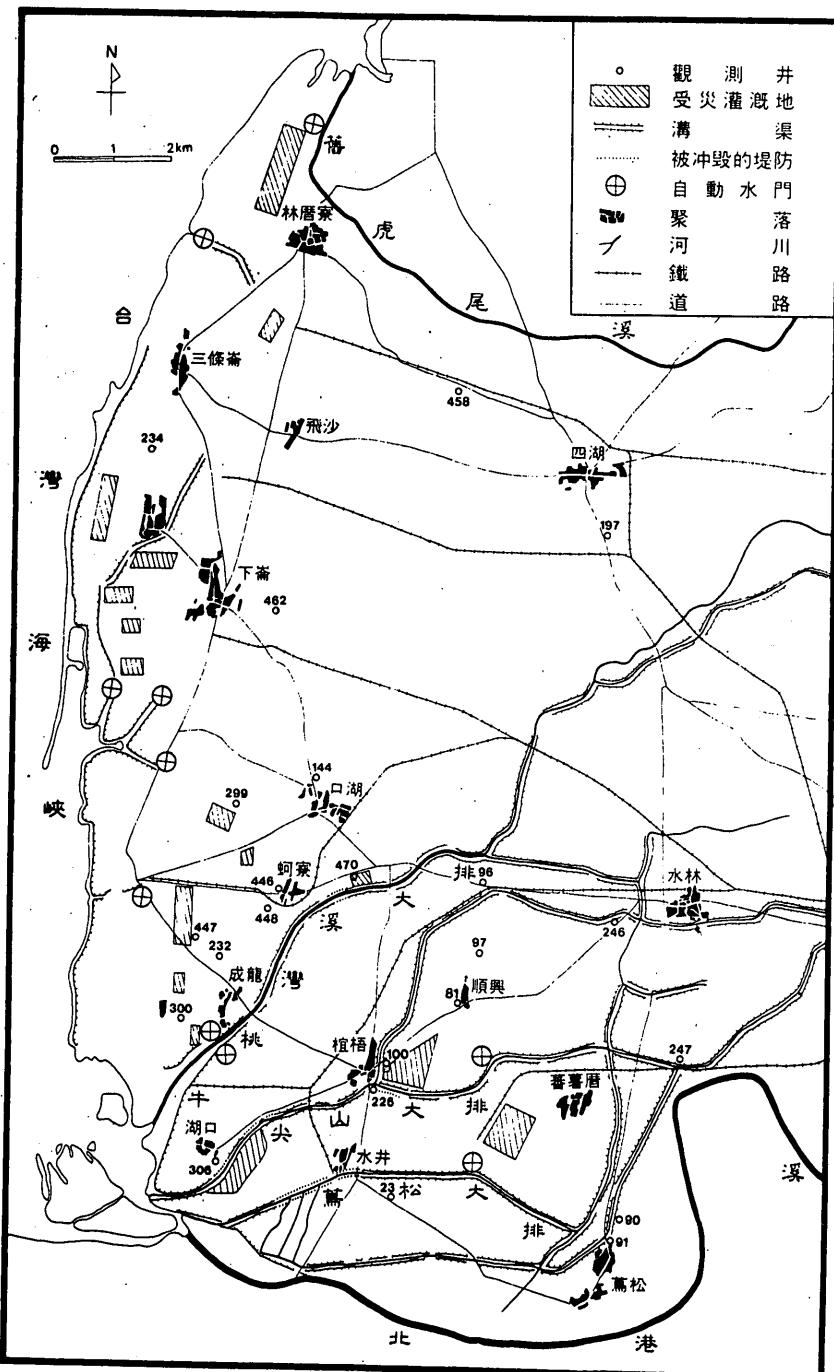
海水倒灌以後，由於排水不良，水流宣洩不易，受災區屢屢積水數日不退，海水滲入地中，污染地下水質；水退之後，農田因聚積鹽分，無法耕種，農民即抽取地下水，淋洗土壤，長期淋洗的結果，不僅造成地下水淺層含水層之水質含鹽量逐漸增加，而且鹽分腐蝕井管，銹蝕抽水機，令水井使用年限縮短。

¹¹⁷⁾ 林高揚，雲林縣口湖鄉海水倒灌情形報告，1 頁，民國 73 年。

¹¹⁸⁾ 同註 73)，6-7 頁。

¹¹⁹⁾ 同註 114)，1 頁。

¹²⁰⁾ 民國 74 年 8 月 25 日，中國時報，第六版。



資料來源：雲林農田水利會提供。

圖 17. 豹恩颱風受災區域圖（民國 73 年 8 月）

(三) 都市排水不良的影響

研究區除了沿海一帶發生排水不良狀況之外，北港鎮附近亦有類似情形，唯肇致原因不同。北港鎮現有的重要區域排水為北港溪及新街大排水幹線；新街大排水，本幹線長約 12 公里，集水面積約 1755 公頃，該排水幹線及其支線府番大排流經北港鎮北面和西面¹²¹⁾，集水面積涵蓋北港鎮及其周圍村里（圖 18）。目前降雨逕流均經由道路側溝匯集後，一部分由既設的下水道幹線流經水門排入北港溪，大部分則注入新街大排；而整個北港鎮的家庭排水，包括洗衣、洗菜、廚廁等日常生活過程中所產生的各種污水，以及鄰近工廠所排放的工業廢水，還有大規模家禽畜養殖場（例如：北港糖廠所屬的北港畜殖場）的排洩物，大多集中排入新街大排，然後由新街大排在溪墘厝附近流入北港溪；因此可知，北港溪與新街大排對北港鎮之排水影響甚鉅；然而，由於排水機能不暢，使得新街大排沿線低窪處，經常積水為患。

排水問題的癥結，簡述如下¹²²⁾：

(1) 排水幹線出口容量不足：目前新街大排水幹線，斷面狹窄，且雜草叢生，容量不足，出口處又受制於北港溪水位較高，水門常須關閉，此為造成積水之主因。

(2) 現有道路側溝因陋就簡，缺乏完善的排水系統：現有的排水系統紊亂，排水容量與排水面積多不能配合，斷面不是過寬，就是太窄。

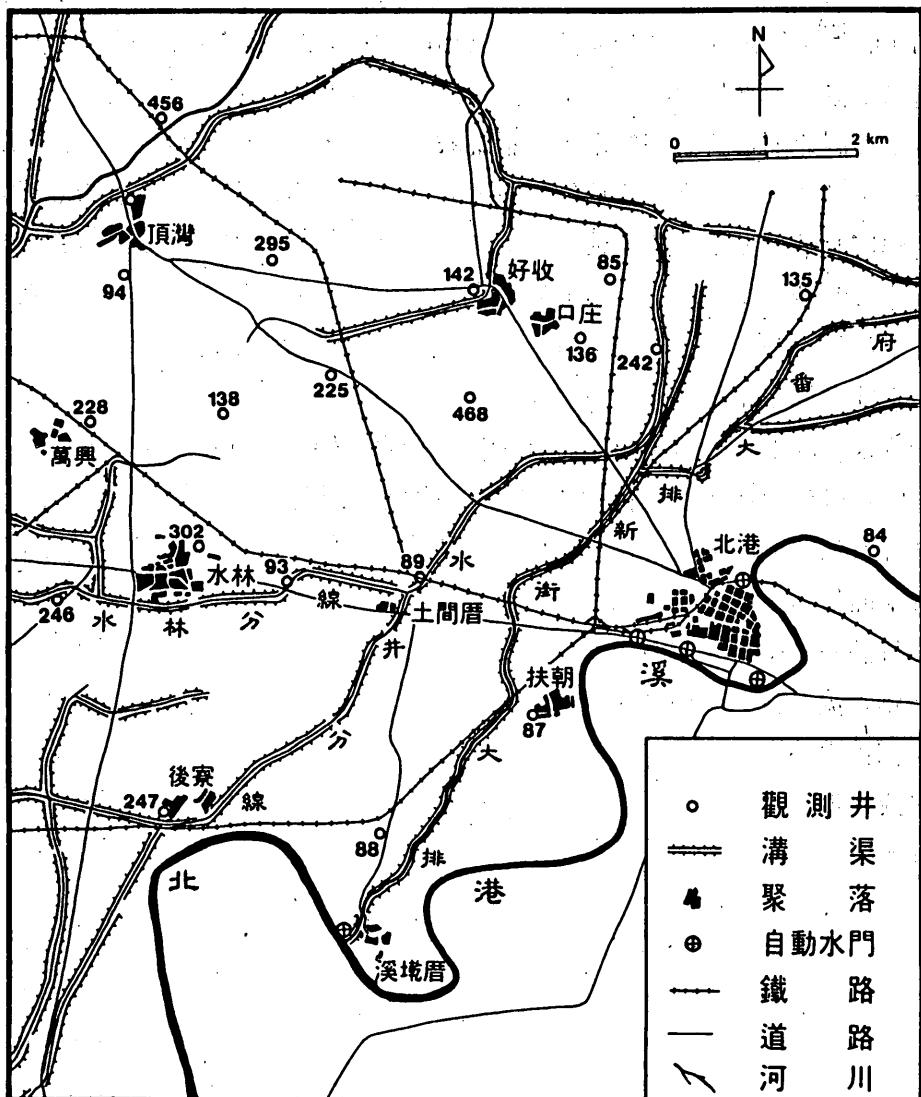
(3) 側溝藏污納垢，淤積阻塞：鎮內道路側溝無幹線接納，又為垃圾污物所堵塞，嚴重妨礙水流，每遇暴雨即泛濫成災。

(4) 都市化使透水面積減少：鎮內原有空地逐漸發展為建築用地，而碎石路亦改為柏油路或水泥路面，以致減少雨水滲透面積，降低地面滲透能力，縮短雨水匯集流出的時間，雨水逕流量因而增加，使現有溝渠容量更感不足，浸水地區隨都市發展，而益形擴大。

由於每逢洪水，北港溪水位暴漲，超過北港鎮的地表面高度，使鎮內之雨水無法宣洩，所以北港溪沿岸設置水門及抽水站多處，以利排水，但是，新街大排出口處的水門，為了防止北港溪之溪水倒灌，所以經常關閉，再加上前述排水斷面不足、且淤塞嚴重、疏於清理等種種排水問題，以致新街大排下游附近的低窪地區，例如：溪墘厝、水埔里、扶朝里等地，每當洪水、豪雨來襲，頓成澤國，且長久積水不退，慢慢滲入地下水中，污染水質；故新街大排水幹線之治理，實為解決北港鄰近地區積水最重要的課題。

¹²¹⁾ 臺灣省住宅及都市發展局，雲林縣北港鎮雨水下水道系統規劃報告，3 頁，民國 73 年。

¹²²⁾ 同註¹²¹⁾，4-5 頁。



資料來源：1.北港鎮公所提供之。

2.參考農林航測隊民國 73 年版五千分之一像片圖。

圖 18. 北港鎮附近的排水及觀測井位置圖

五、地下水質惡化原因之探討與防治對策

(一) 地下水質惡化原因之探討

由電導度的測量，可推知地下水中溶解固體物的多寡。研究區大多數深井的電導度值都在 $750 \mu\text{m}/\text{cm}$ 以下，電導度值超過 $750 \mu\text{m}/\text{cm}$ ，水質屬於高鹽分的井，計有 87 號、88 號、89 號、93 號、96 號、100 號、144 號、306 號、448 號等九處水利會深井及順興村 81 號、新塭村 23 號兩處民井。由於電導度測量只能從概知溶解固體物的多寡，來推測水質的好壞，但無法得知水質中各種成分的確實含量，因此進一步實施水質化學分析，並將分析結果利用多項指標加以研判，以避免錯誤的判斷。

依據 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的比值（表 5、表 6），可得知接近海水標準 0.1396 的井號有新塭村 23 號民井和水利會 84 號井、89 號井、97 號井，但其中水利會 84 號、89 號、97 號三處井的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 值，時而接近 0.1396，時而遠離，故必須再參考其他分析指標；另外，水利會 144 號井和 448 號井，由化驗結果得知，其氯鹽 (Cl^-) 含量並不高，反而硫酸鹽 (SO_4^{2-}) 的含量較高。

我們再由離子濃度柱狀圖（圖 13、圖 14）可看出，本區大部分地下水的陽離子或陰離子之當量濃度和均在 10 epm 以下，屬於正常地下水，而 10 epm 以上的井，則有水利會 87 號井、88 號井、89 號井、93 號井、96 號井、100 號井、197 號井、228 號井、246 號井及順興村 81 號民井、新塭村 23 號民井，其中超過 20 epm ，污染程度較嚴重的是水利會 89 號井、228 號井、順興村 81 號民井、新塭村 23 號民井，而 epm 最高者為水利會 100 號井第一次所採的水樣，高達 64 epm ，但是 100 號井第二次所採的水樣，遽降至 10 epm 以下；上述離子當量濃度和超過 10 epm 的井，儘管其地下水質已受污染，然而比起標準海水的 605 epm 相去甚遠。

根據水質化學分析結果所計算出 Cl^- 和 $(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 之當量濃度比，如表 7，由表 7 看來，比值超過 2 者，唯有水利會 100 號井第一次所採水樣和新塭村 23 號民井的水樣，其比值分別為 6.08 和 5.19，可見其水質已受污染，但尚未達到標準海水的比值。另外，再將水質化驗結果，繪成 Piper 的水質圖（圖 15、圖 16），加以分析；由陰離子三角圖中，可看出大多數水樣集中於左下角，顯示地下水中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的含量較多，僅有水利會 100 號井第一次所採水樣和新塭村 23 號民井的水樣，落在右下角，表示 Cl^- 的含量多；而陽離子三角圖中，大多數水樣集中於右下角，顯示地下水中 Na^+ 和 K^+ 的含量較多；再由菱形圖看來，大部分水樣落在 I 區或 II 區，表示屬於正常淺層自由水或正常深層受壓水，只有水利會 88 號井、89 號井、100

號井、228 號井、順興村 81 號民井、新塭村 23 號民井等 6 處井的水樣，落在Ⅳ區，表示地下水質已被污染。再者，由鈉吸著率（SAR）的分析（表 8），顯示所有水樣中，SAR 值超過 18 者，有水利會 100 號井、228 號井、順興村 81 號民井、新塭村 23 號民井，此等灌溉井的井水屬於高鈉水，已不適合灌溉之用。

將上述幾種分析方法合併探討時，雖然略有出入，但可得知地下水質確實已經受污染的井，包括水利會 87 號井、88 號井、89 號井、96 號井、100 號井、228 號井、順興村 81 號民井、新塭村 23 號民井，當中以水利會 100 號井和順興村 81 號民井、新塭村 23 號民井，受污染的程度最為嚴重。除了本研究的水質分析資料以外，再參閱以往台糖公司和雲林水利會的水質化驗資料，可發現大部分水樣屬於正常淺層自由地下水或深層受壓水，僅有少數水井的地下水質受污染，而且水質時好時壞，變異程度頗大。

由現場實地觀察發現，地下水質受污染的水井，皆有一個共同特徵，即是剛開始啟動抽水 20 分鐘之內，電導度很高，水色呈混濁或紅棕色，抽水一段時間之後，電導度緩緩下降，水色轉清。一般而言，前述問題水井，井體性能普遍不佳，例如：水利會 89 號井、96 號井、228 號井、順興村 81 號民井、新塭村 23 號民井，不僅水質不良，且氣味惡臭，水利會 89 號井並有出砂現象。水利會 100 號井，亦是水質甚差，然而與其相距不到兩百公尺的水利會 226 號井，水質却奇佳，電導度始終在 $400\mu\text{m}/\text{cm}$ 左右，並且出水量也大；於是，筆者查閱鑿井柱狀圖，赫然發現水質不良的問題水井，在地面上 50-70 公尺處皆曾安裝濾水管，而水利會 226 號井，則將 60 公尺以上的含水層封塞，只採地表 113 公尺以下含水層的地下水。

就分佈位置而言，前述水質不良的問題水井，大部分集中於牛挑灣溪大排以南的地區，特別是植梧附近和新街大排水幹線下游一帶；而距離海岸最近的水利會 447 號、300 號、306 號等深井，以及最靠近北港溪沿岸的水利會 90 號井、247 號井，水質化學分析之結果，顯示並沒有海水污染的跡象，反而水質良好。依照海水入侵的理論，倘若發生「海水入侵」的情況，則會出現高鹽分水自海向內陸成鋸齒狀入侵的分布形態，亦即離海愈近，地下水中的含鹽量愈高，並且具有水井抽水時電導度隨抽水時間而增加的現象，因為地下水抽取愈久，海水含量愈多，致使氯鹽濃度愈高，所以一旦遭受海水入侵，要迫退地下水中的鹽分，則需數十年或百年。再者，若為地層中殘留鹽分因大量抽水而稀釋溶出，也會出現抽水時間愈長，井水中氯鹽含量愈高的情形。

無論由現場抽水情況的觀察或電導度的測量，都沒有發現抽水時間愈長，電導度愈高的情形，此外，多次水質化學分析的結果，也未顯現距海岸愈近，氯鹽含量愈高

的分布，況且水利會 87 號井、88 號井、89 號井離海相當遠，潮汐也不可能到達¹²³⁾，因此根據上述分析結果，可推斷本區目前尚未發生海水入侵現象；而部分水井地下水質欠佳的原因，則是淺層含水層中的地下水質受污染；淺層含水層之所以受到污染，應該是由於表層土壤中含鹽量甚高的土壤水下滲灌入井內，或順著井管周圍的礫石圈（或井管裂縫）往下流入含水層所造成；此種情況，台糖公司早已發覺¹²⁴⁾，因此其所屬植梧農場的灌溉井，上層井管周圍皆設有防止鹽水滲透的隔絕措施，所以其井水的水質良好。

肇致本區淺層含水層中地下水質受污染的可能原因，歸納如下：

(1)沿海地區經常發生海水倒灌，淹水泛濫，而口湖鄉又因地下水超抽情況最嚴重，造成地下水位最低，所以鹽分高的水，極易下滲，導致淺層含水層受污染。

(2)由地下水流網圖可知，北港附近地下水的流動，是由東向西南流，故北港鎮鄰近地區的各種污水、排洩物，也向西南方的新街大排下游一帶集中，加上此地區地勢低窪，排水不暢，所以污水、廢水極可能滲漏到地中，污染地下水質。

(3)許多水井（例如：水利會 84 號井、87 號井、89 號井、228 號井）若非位於聚落或畜殖場附近，即正臨大水溝旁，使得淺層含水層受污染的機會大增。

(4)由地層剖面圖可知，本區大部分地區表層黏土不厚，土壤透水性不錯，各種地面水入滲（infiltration）、下滲（percolation）皆易。

(5)淹水、積水地區，農民於水退之後，時常淋洗土壤，淋洗作用，致使鹽分下滲速度增快。

(6)本區內水利會所屬深井，大部分併採多層水源，而且上層井管周圍沒有防止鹽水滲透的設計，因而假使某一含水層受污染，必向其他含水層滲透。

（二）地下水質惡化之防止對策

依據上述的分析，說明了本區淺層含水層受污染為地下水質惡化的主因，所以必須立即採取適當的改善措施，才能防止地下水質繼續惡化。

1. 減少抽取地下水，使地下水位不再下降，並緩和地層下陷

①本區居地下水系末端，水源早已不足，種植水稻用水量較多，應鼓勵農民轉作需水量較少的玉米、高粱等旱作，況且目前國內稻作生產過剩，價格不佳，而高粱

¹²³⁾ 有關北港溪之感潮河段的研究，至今尚未有之，但據實地訪問，潮汐最遠到達水利會 247 號井附近的河段。

¹²⁴⁾ 洪星輝，地下水水資源開發及水井，台糖通訊，48 卷 17、18 期，15-16 頁，民國 60 年。

、玉米等雜作利潤較高¹²⁵⁾。

(2)土壤滲透性良好的耕地，農民以一般畦溝灌溉方法，頗浪費水源¹²⁶⁾，宜推廣噴灑灌溉方式，以節約灌溉用水量¹²⁷⁾。

(3)改進水產養殖技術，輔導養殖用水循環利用，獎勵養殖業者增加水車等打氣設備，以增加池水溶氧量及調節池水溫度，降低換水頻率，以期有效利用有限的水資源，減少抽用地下水¹²⁸⁾。

(4)嚴格取締管制區內非法鑿井，並禁止已有非法水井接電、供電抽水，以緩和地下水過度抽取。

2.防止海水倒灌，減輕淹水災害：

(1)堤防高度不足，堤身薄弱之處，辦理加高、加強工程，並培厚護岸。

(2)牛挑灣溪大排、尖山大排、鳶松大排等大排水出海終點，須設置較堅固的電動制水閘門，沿海低窪地區設置抽水站，並加強管理、維護。

(3)沿海地區宜由政府劃定鹹水養殖區；養殖業者自設引水管道，嚴禁破壞堤防、閘門，以免海水倒灌，導致土壤鹽化情況擴大。

(4)沿海排水系統紊亂，宜作全盤規劃，並疏濬各排水，同時整治北港溪，以改善排水功能。

3.改善新街大排下游地區排水，消弭積水狀況：

(1)排水溝之排水容量與排水面積不能配合者，應作合理調整；新街大排水幹線，斷面狹窄，容量不足，應予以整建，並擴大其斷面，使足以宣洩都市排水。

(2)水溝阻塞現象，須加以清理；新設水溝宜改暗渠或明溝加蓋，使污物不易進入，並勸導民衆不得任意傾倒垃圾於水溝內。

(3)都市污水及家禽畜養殖場排洩物，排出前必須先經過處理¹²⁹⁾，以免堵塞排水，或滲漏到土壤中，污染地下水¹³⁰⁾。

(4)新街大排出口處受制於北港溪洪水位，洪峰到達時，無法藉重力排洩雨水，應規劃抽水站，並另尋重力式排水路出口，以發揮預期之排水功能。

¹²⁵⁾ 民國 75 年 3 月 24 日，聯合報，第三版。

¹²⁶⁾ 同註 88)，2-3 頁。

¹²⁷⁾ 臺灣省水利局，臺灣省水利局 69 年度年報，209 頁，民國 69 年。

¹²⁸⁾ 同註 88)，58 頁。

¹²⁹⁾ 羅光楣，地下水污染防治之策略，地下水保護及污染防治研習會講義，中興大學環境工程學系，139 頁，民國 74 年。

¹³⁰⁾ 陳秋楊，地下水處理措施，地下水保護及污染防治研習會講義，中興大學環境工程學系，3 頁，民國 74 年。

4. 避免開採淺層含水層之地下水：

- ① 應儘量開發深層含水層，而避免採用淺層含水層之地下水。
- ② 在牛挑灣溪大排以南地區鑿井，均應將淺層含水層予以封塞或隔絕，以防上層受污染的水，向下滲漏。
- ③ 水質不良的廢棄井體也必須封堵，以免滲透污染其他含水層。

5. 維護灌溉用水清潔，進而防杜地下水受污染：

- ① 灌溉水路應該與下水道、排水渠道分離，並避免通過聚落；灌溉井也應遠離聚落、工廠、畜養場。
- ② 禁止任何污水、廢水排入灌溉系統；已遭受污染之排水或回歸水不能再引灌農田。

6. 實施地下水人工補注，以促進地下水位回升：

- ① 本研究區宜使用水井補注法，以深井作為補注，補注水源可採用井水、溪水或回歸水，但因用水反覆利用，使水質受污染的機會增加¹³¹⁾。所以無論取自何種水源，均必須將原水沈澱、過濾，並且化驗水質之後，才能進行補注。
- ② 本區東側地下水系的上游地區，可施行水田超量灌溉、補注水塘、補注溝渠等地下水人工補注法，以促進沿海地區地下水位回升，並抑止地層繼續下陷¹³²⁾，但是任何人工補注法，水位回升的速度都很遲緩¹³³⁾，遠不如抽水快速，所以儘量避免抽用地下水，方為上上之策。

7. 加強環境保育觀念的宣導與教育

- ① 本區居民對地下水的知識十分貧乏，大多數人認為地下水取之不盡，用之不竭，所以不僅農田灌溉、魚塭換水大量抽用地下水，甚至連日常洗滌、沖刷豬舍也使用地下水，因此必須加強宣導溝通，令居民了解地下水的特質，減少浪費地下水資源。

- ② 淡水魚塭的大量抽取地下水和鹹水魚塭的破壞堤防、閘門都是促使本區產生地層下陷、海水倒灌、地下水質污染的始作俑者，但養殖業者在不明瞭地下水特性及

¹³¹⁾ 金子良，農業水文學，共立出版，p.234，1978。

¹³²⁾ 同註¹⁰³⁾，3-4 頁。

¹³³⁾ B.J.Knapp, Elements of Geographical Hydrology, London, George Allen and Unwin, p.70, 1979。

養殖優厚利潤的誘惑下，往往漠視破壞環境的惡果，所以進行環境保育工作之前宜加強宣導與教育，使業者了解地下水質污染，不僅會導致魚類死亡，損失無法估計，且將造成嚴重公共災害，喚起業者對預防污染的合作意願，以減少保育政策推行上的阻力。

六、結論與建議

(一) 結論

北港地區，由於長期大量開發地下水，而引起地下水位急遽下降、地層下陷、海水倒灌、地下水質受污染等環境災害。本研究透過實地觀測、訪問調查、直接採水樣進行化學分析以及收集、分析地質、氣候、水文、土地利用等資料，來了解北港地區地下水質受污染的狀況和原因，依據研究結果，歸納結論如下：

- 1.由氣候資料顯示，本區降水量集中於五月至九月（占 80.2%）；一年之中，土壤裡水量剩餘的月份，只有六、七、八三個月，其他月份為水量不足或水量平衡。再由水文資料可知，降雨量多，河川流量也隨之增多，使地面灌溉水源豐富，減少地下水的抽取；反之，降雨量少，則地下水的抽水量增加。
- 2.從地質資料的探討，可看出本區主要的地層結構是砂層、砂土層及黏土層互層；地下水可分為自由水和受壓水兩種，而含水層所在的砂層或礫石層呈多層分布，所以區域內開鑿的深井大部分併採多層水源。
- 3.從地下水位資料的分析，可看出歷年來，水位不斷降低，目前已降至海平面 25 公尺以下，而地下水位的變動受降雨量和抽水量的影響很大，每年四月，正是降雨量稀少的季節，又適值一期稻作耕種期間，農民大量抽取地下水灌溉，造成四、五月的地下水位最低；七、八月二期稻作灌溉期間，因夏季雨量豐沛，地下水抽水量較少，因此水位下降程度較四、五月緩和；十二月或一、二月，因大多數井停止抽水，所以地下水位最高。目前地下水位最低的地方在口湖鄉，可能由於口湖鄉魚塭面積最廣，養殖業者大量抽取地下水所導致。
- 4.依照電導度測量的結果，顯示本區大部份深井的電導度值都在 $300 \sim 750 \mu\text{s}/\text{cm}$ 之間， $750 \mu\text{s}/\text{cm}$ 以上的井大多分布於牛挑灣溪大排以南的地區，這些電導度高的深井，皆有一個共同特徵，即是剛開始啟動抽水時，電導度都很高，抽水一段時間之後，電導度即緩慢下降。就時間上的差異而言，冬季因抽水量減少，地中水分較多，所以除了電導度較高的問題井之外，一般灌溉井的電導度值普遍降低，可見大量抽水會導致地下水的電導度增高，水質惡化。

5. 將水質化驗結果，依照 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比值、離子濃度柱狀圖、 $\text{Cl}^-/\text{CO}_3^{2-}+\text{HCO}_3^-$ 比值、Piper 的水質圖、SAR 值等分析方法，加以研判，得知目前地下水質確實已經受污染的井，包括水利會 87 號井、88 號井、89 號井、96 號井、100 號井、228 號井、順興村 81 號民井、新塭村 23 號民井，當中水利會 100 號井和順興村 81 號民井、新塭村 23 號民井，受污染的程度最嚴重；而其餘大多數深井，水質尚屬良好。就空間分布而言，水質不良的問題水井大部分集中於牛挑灣溪大排以南的地區，特別是植梧附近及新街大排水幹線的下游一帶。

6. 根據現場抽水情況的觀察和電導度的測量以及多次水質化學分析的結果，皆未發現抽水時間愈長，電導度愈高，氯鹽(Cl^-)含量愈多的情況，也未顯現高鹽分水自海向內陸成鋸齒狀入侵的分布形態，與海水入侵的理論不符合，亦非地層中殘留鹽分稀釋溶出的情形，因此可推斷本區目前尚未發生海水入侵的現象；部分地區井水的水質不良，則是淺層含水層中之地下水質受污染的緣故。

7. 沿海地區原本地勢低窪，排水不良，復因(1)地層下陷(2)堤防高度不足或堤身單薄(3)鹹水養殖業者任意破壞堤防、閘門(4)排水系統，雜草、污泥阻塞，使排水功能不暢，肇致每逢颱風、豪雨侵襲，即發生海水倒灌現象，受災區屢屢積水不退，使得海水滲入地下，污染地下水。

8. 北港鎮附近也發生排水不良的狀況，其原因为(1)排水容量不足(2)新街大排水幹線流入北港溪的出口，無法發揮重力排水作用(3)垃圾污物堵塞排水系統(4)都市化使透水面積減少，雨水逕流量增加，因而造成新街大排水幹線下游的低窪地區，經常淹水，致使污水、廢水滲入地下，引起地下水質惡化。

9. 淹水或積水地區，在水退之後，農民往往抽取地下水淋洗土壤，適逢水利會所屬深井之上層井管，大多沒有隔絕鹽水滲透的設計，所以長期的淋洗作用，使得海水、污水、廢水等含鹽分的水，下滲灌進井內，或順著井管周圍的礫石圈，或經由井管裂縫，往下流入淺層含水層中，污染地下水；而大部分深井又屬多層採水，假如某一含水層受污染，極可能滲透其他含水層。

10. 目前本區雖未產生海水入侵的情況，但仍須防患，因為一旦造成海水入侵，後果將不堪設想；防患的方法，雖然有人工補注法、抽水凹谷法、淡水幕法、或作截水牆等多種，然而這些方法的費用均比減少抽水所付出的代價為高，而且效果差，所以與其投下鉅資於防患措施，不如減少抽取地下水，使地下水位回升，並保持地下水位在平均海面以上。

因時間、經費、人力、資料等限制，研究區尚有許多問題無法作深入的研究，例如：地層下陷的情形、安全出水量的估計、降雨量與地下水質之關係、地下水中的有

機物含量、地下水人工補注的實際效果及當地居民對環境的視覺等，都有待日後更進一步深入研究。

(二)建議

綜合研究結果，提出下列六點建議：

1. 長期且大量抽取地下水是導致本區環境災害的主因，所以減少地下水的抽水量是刻不容緩的急務，唯有抽水量減少，地下水位回升，才能使地層下陷、海水倒灌等現象獲得改善，進而減少地下水質受污染的機會，並能防患海水入侵，因此除了嚴格取締非法鑿井及禁止非法水井供電、接電抽水，並且應以改變農作方式，改進水產養殖技術來積極節約地下水源。
2. 在本區重鑿新井時，避免開採淺層含水層中的地下水，並應將淺層含水層予以封塞或隔絕；而廢棄的井體也必須加以封堵，以防止受污染的水滲透。
3. 排水系統與灌溉水路應作全盤規劃，並加強維護和管理，使排水暢通無阻。
4. 由政府劃定鹹水養殖專業區，並集中抽取海水後分送各魚塭，如此既可使養殖業者不再破壞堤防、閘門，又可控制魚塭的開發範圍。
5. 沿海地區應設立地下水質監視觀測井，以加強對地下水的偵測及管理，並應建立正確、完整的水文資料（例如：每次水質化驗的項目和井號必須一致，才能比對），方能及早發現各種地下水問題。
6. 加強環境保育觀念的宣導與教育，使執行單位與當地居民的觀念得以溝通，以期減少推行保育政策的阻力，進而獲得居民的合作及協助。