

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

台西及麥寮地區水文地質特性
及地下水位變化之研究

Hydrogeologic Characteristics and Variation of
Ground Water Level at Taihsi and Mailiao

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 89 - 2625 - Z - 002 - 018

執行期間：88年8月1日至89年7月31日

整合型計畫：計畫總主持人：林美聆

計畫主持人：賈儀平

處理方式： 可立即對外提供參考

一年後可對外提供參考

兩年後可對外提供參考

(必要時，本會得展延發表時限)

執行單位：國立台灣大學地質學系

中華民國 89 年 9 月 1 日

摘要

台西鄉及麥寮鄉長期大量抽取地下水，導致深處受壓含水層的水位下降多達 20 至 25 公尺，造成區域性的地層下陷災害。本計畫蒐集整理並分析台西及麥寮地區歷年之水文、地質及地層下陷檢測資料，並進行地質調查、井測試驗、地下水位分析、岩心紀錄比對，並依據長期監測資料進行數值模擬等研究，以了解本區之水文地質概況及區域性地層下陷趨勢，並進行現場地質調查、井測試驗、地下水位分析、岩心紀錄比對、數值模擬等研究，進一步分析本區地層及地下水位分佈狀況，繼而分析影響地下水位變化的主要因素，並嘗試以數值模擬方法，估算水文地質參數，以探討本區地下水的補注機制。研究結果指出 81 年 5 月以後三年期間在觀測範圍內之下陷量預測結果與實際觀測結果甚為接近，此項工作成果初步證實本區地層下陷預測之可行性，並確認在下陷區進行水文地質調查及分層地層下陷監測之必要性。由監測結果得知本區深度 200 公尺以內之地層下陷已漸趨緩，但 200 至 300 公尺深處之地層下陷日益嚴重。電測記錄分析顯示濱海地區淺層地下水已有鹽化之現象。而各年平均地下水位變化量與地層下陷的空間分布也有密切關係，地下水位下降幅度較大的地區，地層下陷亦較為嚴重，近年的資料分析顯示快速的地層下陷漸由濱海地區移往內陸地區。當地下水位不再持續下降，地層壓密漸趨平緩時，地下水位的回升將導致地層的回漲。此外，本研究發現在暴雨停抽期間，地下水位可於數日內迅速回升，模擬分析結果指出，垂直方向的地下水下滲已取代側向補注，成為濱海地區區域含水層主要的補注來源。模式推估垂直補注量約佔總補注量之 75% 至 81%。由於沿海地區海水倒灌及眾多鹹水魚塢的排水，已造成淺處地下水逐漸鹽化，隨著本區深井的開發，這些鹹水或其它污水可能經由井孔下滲至深層區域含水層，預期將造成深層含水層的水質也逐漸惡化。

關鍵字：地下水、水文地質、補注、地層下陷、回漲

Abstract

The water level of regional confined aquifer at Taihsi and Mailiao has declined 20 to 25 m due to the overdraft of ground water since 1970s, causing serious land subsidence in the area. This research collected and analyzed geologic, hydrologic, settlement data, and conducted geologic investigation, well logging, water level analysis, stratigraphic correlation and numerical analysis to establish a conceptual hydrogeologic model. Results of this study indicate that settlement in the shallow depths has eased gradually and the current settlement occurs primarily in the depths from 200m to 300m. In recent years the rapid settlement shifted from the coastal area to the inland area. The resistivity logs indicate that ground water in the shallow depths had become saline. It is also noted that formation swelling occurs as a result of the rise of ground water level at a place where settlement has eased gradually.

Besides, during heavy rainfalls, ground water levels in the coastal area are found to rise rapidly. The results of numerical simulation indicate that the vertical recharge is likely to be greater than the lateral recharge. According to the numerical analysis of two cases, the vertical recharge is about 75% to 81% of the total recharge in the study area. As more deep wells are being developed in the area it is anticipated that salt water would infiltrate downward through wells and contaminate ground water in the deep aquifer. The study results were integrated with well logging data, core data and water level data to build up a more practical hydrogeologic framework, and to provide the basis for the predictive modeling of land subsidence.

Key Words: groundwater, hydrogeology, recharge, land subsidence

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目 錄.....	III
圖 目.....	V
表 目.....	V
第一章 前言.....	1
1.1 研究目的.....	1
1.2 研究方法.....	1
第二章 研究區域概況.....	3
2.1 地形及地質.....	3
2.2 土地利用.....	3
2.3 氣候.....	3
第三章 井測記錄校正與分析.....	5
3.1 井測記錄.....	5
3.1.1 孔徑校正.....	5
3.1.2 地層特性與地下水鹽化.....	5
3.2 井間對比.....	8
第四章 地層下陷及地下水位分析.....	12
4.1 地層下陷歷程.....	12
4.2 年平均水位差與地層下陷分佈.....	13
4.3 地下水位變化.....	14
4.3.1 長期地下水位變化.....	14
4.3.2 近期分層地下水位變化.....	17
第五章 地下水位與補注模式.....	19
5.1 暴雨與海水倒灌之地下水位變化.....	19
5.2 地下水補注之數學模型.....	22
5.2.1 模擬時間.....	22
5.2.2 數學模式.....	22

5.2.3	數值模型.....	23
5.2.4	邊界條件.....	25
5.2.5	初始水位設定.....	25
5.2.6	水文地質參數.....	25
5.3	模擬結果分析.....	26
5.3.1	原設定水文地質參數分析.....	26
5.3.2	區域阻水層之垂直水力傳導係數.....	26
第六章	討論.....	31
6.1	地層下陷趨勢.....	31
6.2	地下水鹽化.....	31
6.3	垂直補注量.....	31
6.4	海水倒灌與垂直補注.....	32
第七章	結論.....	33
參考文獻	34

圖 目

圖 2.1	台西及麥寮地區地理位置.....	4
圖 3.1	豐安國小站井測記錄及地層柱狀圖.....	7
圖 3.2	新興國小站井測記錄及地層柱狀圖.....	9
圖 3.3	海園站井測記錄及地層柱狀圖.....	10
圖 3.4	海園站、新興國小站與豐安國小站井測資料對比圖.....	11
圖 4.1	雲林地區民國 83 年 10 月至 85 年 10 月累積下陷量圖.....	15
圖 4.2	雲林地區民國 84 至 85 年年平均地下水位差等量圖.....	15
圖 4.3	雲林地區民國 85 年 10 月至 87 年 2 月累積下陷量圖.....	16
圖 4.4	雲林地區民國 85 至 86 年年平均地下水位差等量圖.....	16
圖 4.5	蚊港站長年地下水位變化.....	17
圖 4.6	海豐站地下水位與雨量關係圖.....	18
圖 5.1	烏塗站 85/7/29 至 85/8/13 地下水位變化.....	20
圖 5.2	海園站 85/7/29 至 85/8/13 地下水位變化.....	20
圖 5.3	雲林地區各觀測站民國 85 年 8 月 1 日地下水位回升量.....	21
圖 5.4	海園站民國 84 年 6 月 6 日至 6 月 21 日水位歷線圖.....	21
圖 5.5	模擬區域位置圖.....	22
圖 5.6	三維數值模擬網格圖 (a) 水平方向 (b) 垂直剖面.....	24
圖 5.7	三維數值模型垂直剖面各層物性設定.....	24
圖 5.8	試驗 2-1、2-2 海豐站模擬水位與觀測水位之比較.....	28
圖 5.9	淺層地下水經由地層及井管垂直補注深部地下水.....	29

表 目

表 4.1	雲林地區分層觀測結果比較.....	12
表 4.2	雲林地區分層下陷資料與水準點之比較.....	13
表 5.1	數值模型水力傳導係數與比儲水率設定值.....	26
表 5.2	試驗 2-1、2-2 模擬之區域阻水層垂直水力傳導係數.....	27
表 5.3	試驗 2-1、2-2 模擬之區域阻水層水平與垂直補注量.....	30

第一章 前言

地層下陷是台灣地區開發地下水資源普遍遭遇的問題。民國40及50年代，台北盆地曾因大量抽取地下水，而造成嚴重的地層下陷，自民國57年政府嚴格管制抽取地下水，一直到65年以後地下水位回升，下陷才逐漸緩和。近年來包括宜蘭、彰化、雲林、嘉義及屏東等縣的沿海地區，則因養殖業的快速成長，大量抽取地下水，而造成地層逐年下陷 (Young, 1988; Wu, 1992; 沈向白等, 1992)。地層下陷已引發各種災害，包括海水倒灌、土壤及地下水鹽化、建築物沈陷或棄置、管線及公路破裂、排水設施及海堤喪失功能、海岸地區國土逐漸消失等，不但是對許多人民生命財產的安全造成嚴重威脅，而且在國土資源保育及土地利用的經濟考慮等層面上，也都有相當不利的影響。

有鑒於地層下陷災害頻傳，人民生命財產及公共設施損失重大，且下陷範圍仍在各地持續擴大當中。民國83年之全國水利會議將地層下陷防治及增加地下水補注等列為重要工作項目，由國科會環境與發展委員會所推動之天然災害防治五年中程計畫中，經產官學界研商後，地層下陷與地下水補注問題，列為環發會任務導向之整合型應用研究主題之一。台西及麥寮之濱海地區乃是我國未來工業發展之重鎮，但是近二十年來本區超抽地下水，使得深處區域受壓含水層的水位比民國65年以前下降多達20至25公尺，並導致區域性的地層下陷。鑑於本區地層下陷日益嚴重，且下陷範圍有逐年擴大之趨勢，不僅下陷災害頻傳，並且威脅到附近工業區的發展，所以本計畫選定台西及麥寮之濱海地區進行為期五年的地層下陷及地下水補注研究。

1.1 研究目的

本研究之目的主要是將台西及麥寮地區所觀測及調查之岩心、井測、地下水位及地層下陷資料加以整理、分析、研判，從而建立一個較為正確而且完整之地層下陷區水文地質模型，以作為數值模擬分析地層下陷趨勢之基本依據。此外，利用當地詳細的分層水位觀測資料，配合數值模型研究本區地下水系統，探討當地地下水位在雨後大幅回升的原因及地下水補注的機制。

1.2 研究方法

本研究利用地下水分層觀測網的岩心、井測記錄的資料，加以分

析及整理，並進行初步的地層對比；再配合分層地層下陷資料、分層地下水位資料，建立此區初步的水文地質架構。並蒐集水利處歷年水準點檢測記錄、水利規劃試驗與工研院能資所分層下陷觀測結果等，經由各單位資料之相互比對確認，建立台西麥寮地區完整的地層下陷歷程。再將地下地質特性與地層下陷結果互相比對，以了解主要發生下陷深度之地層特性。

此外，將地下水位資料與潮汐、降雨、養殖面積及地層下陷的資料一併整理分析，進行短期及長期地下水位變化的研究，並探討影響地下水位的因素及地下水流系統過去與現今的演變情形，以及利用工業局及水利司裝設分層下陷觀測井時進行電阻、自然電位、自然伽瑪、密度、井徑、中子等井測，將井測所得相關的資料，配合現有台西麥寮地質資料及台西分層下陷觀測井的地質材料性質，進一步了解本區之地質特性及地層層序。此外，分析當地地下水位歷線資料，進而於雲林縣濱海地區建立一個三維數值模型，以數值模擬試驗分析，估算阻水層垂直方向之水力傳導係數，並評估垂向與側向補注量，以了解沿海地區地下水位於暴雨停抽期間迅速回升期間之地下水補注機制。並且以台糖於台西麥寮地區進行之試水試驗所得到之水力參數，輸入至ABAQUS分析軟體中，利用概念模型研究側向補注對於水位回升之影響，並與實際水位觀測結果對比，藉以了解當地地下水補注來源。

第二章 研究區域概況

台西及麥寮地區位於濁水溪沖積扇的扇尾地區，西臨台灣海峽，北以濁水溪與彰化縣為界，南隔舊虎尾溪與四湖鄉相望，行政區劃分上屬於雲林縣西北沿海地區鄉鎮（圖 2.1）。

2.1 地形及地質

濁水溪沖積扇大多為地勢低緩的沖積平原，以鼻子頭隘口為扇頂（林朝榮，1957），向西坡度漸緩；濁水溪的輸砂量為全省河川之冠（水資會，1989），進入平原地區後，河流能量減低，攜帶沈積物能力降低，所沈積的礫石層厚度由東側高區向西及西南沿海遞減，泥質及砂質地層則相對增厚（楊萬全，1989）。

雲林地區大部分區域屬於全新世以來未固結之沖積層所覆蓋（何春蓀，1986），未固結沈積物相當深厚，根據鑽探及井測資料，推測其下界為上新世與中新世地層間之不整合面，沈積物的厚度則由北港地區向北及向東分別增厚。其沈積環境以舊河道、潟湖、沼澤及外海沙洲為主（Sun, 1970）。

2.2 土地利用

雲林地區為台灣極為重要的農業縣份之一，在土地利用方面，農業用地所佔的比例最高。濁水溪扇頂地區多為林地、果園、旱田及農場，下游之平原則多稻田農地，主要市鎮大多集中在交通要道兩旁。在民國 60 年代沿海地區養殖漁業興起（水利局，1990），由於收益甚高，造成養殖面積逐年擴增。近年來政府在雲林縣西海岸的海埔新生地已開闢成六輕工業區，未來將影響雲林地區的經濟結構。

2.3 氣候

本區地處北迴歸線附近，屬於亞熱帶氣候，年平均溫度約 23°C，月平均溫度以七月份最高，可達 30°C 以上，而元月份最低約為 16°C。夏季受梅雨、西南季風以及以及颱風的影響（亢玉瑾，1968），冬季則受東北季風影響，屬於夏雨冬乾的氣候；降雨集中於每年的五月至九月，約佔全年降雨量的 80%，十月至來年四月為乾季，降雨量僅及全年之 20%。在蒸發量方面則因地形、季節不同而有差異，以沿海地區最大，平原地區較小，年平均蒸發量分別為 1496.5 公釐及 1262.9 公釐。由此可知本區屬於夏雨冬乾、乾濕分明的氣候形態，不利於水資源的運用與調配。

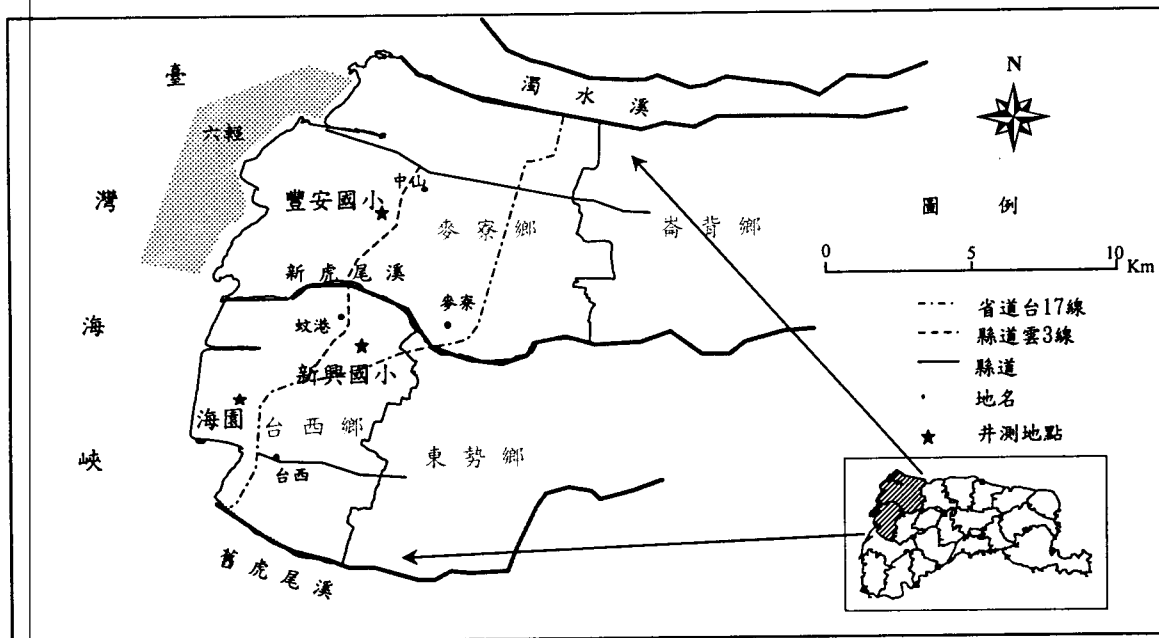


圖2.1 台西及麥寮地區地理位置

第三章 井測記錄校正與分析

3.1 井測記錄

本研究所分析的三口井測記錄，分別為民國 85 年間經濟部水利司於豐安國小及新興國小設立的兩口分層式地層下陷監測井，以及工業局於海園地區的一口觀測井。井測試驗是在鑿井過程告一段落尚未下套管之前，適時地將各種不同性質的探測儀放入井孔中，連續性地進行地層特性的量測，井測項目包括電阻率井測、自然伽瑪井測、孔徑井測，以及放射性井測的密度井測和中子井測。

3.1.1 孔徑校正

由許多井測資料顯示，各項井測記錄與孔徑大小之間存在著規律的變化，因而造成分析上的困擾（林輝山，1998）。因此在合理的情況下進行井測記錄的修正是有其必要性，本研究引用林輝山（1998）的研究成果進行孔徑影響因素的修正，各項井測孔徑校正係數分別是，自然伽瑪井測-1.57、中子井測-3.05、電阻率電測因孔徑尺吋小於 10 吋故不進行校正；另外在密度井測方面，本研究參照前人研究，得出密度井測孔徑校正值為豐安國小站 82.2、海園站 79.3 及新興國小站 74.3，並以 8 吋為各站之參考孔徑。

3.1.2 地層特性與地下水鹽化

在各項井測記錄中以自然伽瑪井測、中子井測、電阻率電測及密度井測的資料較佳，因此在分析判釋地層特性的過程中，以這四項井測資料為主，其他項井測資料及原始岩心記錄為輔。

依井測記錄反映之地層物理性質，來修正簡化原始岩心記錄，進而劃分出四類地層特性，即礫石層、砂層、砂泥互層以及泥層。礫石層及砂層主要是指在井測記錄中具有電阻率電測及中子井測偵測值較高、自然伽瑪井測及密度井測偵測值較低的地層，相當於泥質含量較少、孔隙率較低、以及密度較大的砂礫岩層，若原始岩心記錄中有出現礫石且與井測記錄相符的地層，就劃定為礫石層；泥層是指井測記錄所反映的地物特性與礫石層及砂層的特性恰好相反，且原始岩心記錄為粘土質的地層；砂泥互層的特性則是指在短距離內，泥層及砂層的特性頻繁交錯出現，不易區分成泥層或砂層。

為利於辨識各井測之間關係，將各項井測記錄以陰影的方式處理，

再將相對應的井測記錄排列在一起，如圖 3.1 所示，井測記錄大致呈現雙凹雙凸的現象，以深度 92~102 公尺的雙凸現象為例，其井測記錄顯示為自然伽瑪值及密度偵測值較低、中子井測值及電阻率值較高的特性，屬於含泥量較低、密度較大、孔隙率較小及電阻率較高的砂礫岩層，輔以原始岩心記錄，可進一步劃分為砂層及礫石層。至於井測記錄曲線呈雙凹的現象，即指含泥量的地層，茲以各站結果逐一說明：

(一) 豐安國小站

位於麥寮鄉豐安國小內，距水利局後安站分層地下水位觀測井約 400 公尺處，鑿井方式為衝鑽法，並以鹽分高的地面水夾雜泥屑作為泥漿水，鑽鑿深度為 300 公尺，井測施測深度為 268 公尺。

在井測記錄及地層特性方面，大致呈現雙凹雙凸的現象（圖 3.1）。砂層的分佈範圍主要介於深度 20~41 公尺、60~72 公尺、76~85 公尺、91~100 公尺、170~185 公尺、199~226 公尺及 232~248 公尺，而礫石層僅出現在 100~102 公尺及 118~120 公尺。至於泥質則主要出現在深度 41~60 公尺、102~118 公尺、138~170 公尺、185~199 公尺之間。整體而言，在深度 60 公尺以內的地層主要屬於泥層及砂泥互層為主，60~120 公尺的地層以較厚的砂層夾泥層為主，120~170 公尺的地層為砂泥互層，170~250 公尺的地層亦是砂泥互層為主，但是砂層的厚度較大，出現的頻率也較高。此外，在深度 35 公尺以內的地層，其電阻率電測記錄相對其他井測記錄呈異常低的電阻值，初步推測是因淺層的地下水受到鹽化所致。

(二) 新興國小站

位於台西鄉新興國小內，距水利局和豐站分層地下水位觀測井約 200 公尺，鑿井方式為衝鑽法，並以自來水夾雜泥屑作為泥漿水，鑽鑿深度為 300 公尺，而井測施測深度為 240 公尺。

圖 3.2 顯示，以陰影方式呈現的各項井測記錄亦有雙凹雙凸的現象，砂層的分佈範圍主要集中在深度 55~70 公尺、121~135 公尺及 195~221 公尺，而礫石層則出現在 91~104 公尺及 165~182 公尺之間；泥層集中在深度 10~26 公尺、43~55 公尺、70~90 公尺、135~163 公尺及 182~194 公尺。整體而言，本站在深度 55 公尺以內的地層大都屬於較薄的砂層、泥層以及砂泥互層為主，55~135 公尺之間存在數個透水性較佳的砂礫岩層，135~165 公尺為砂泥互層，165~230 公尺之間則有兩個較厚的砂層及礫石層。

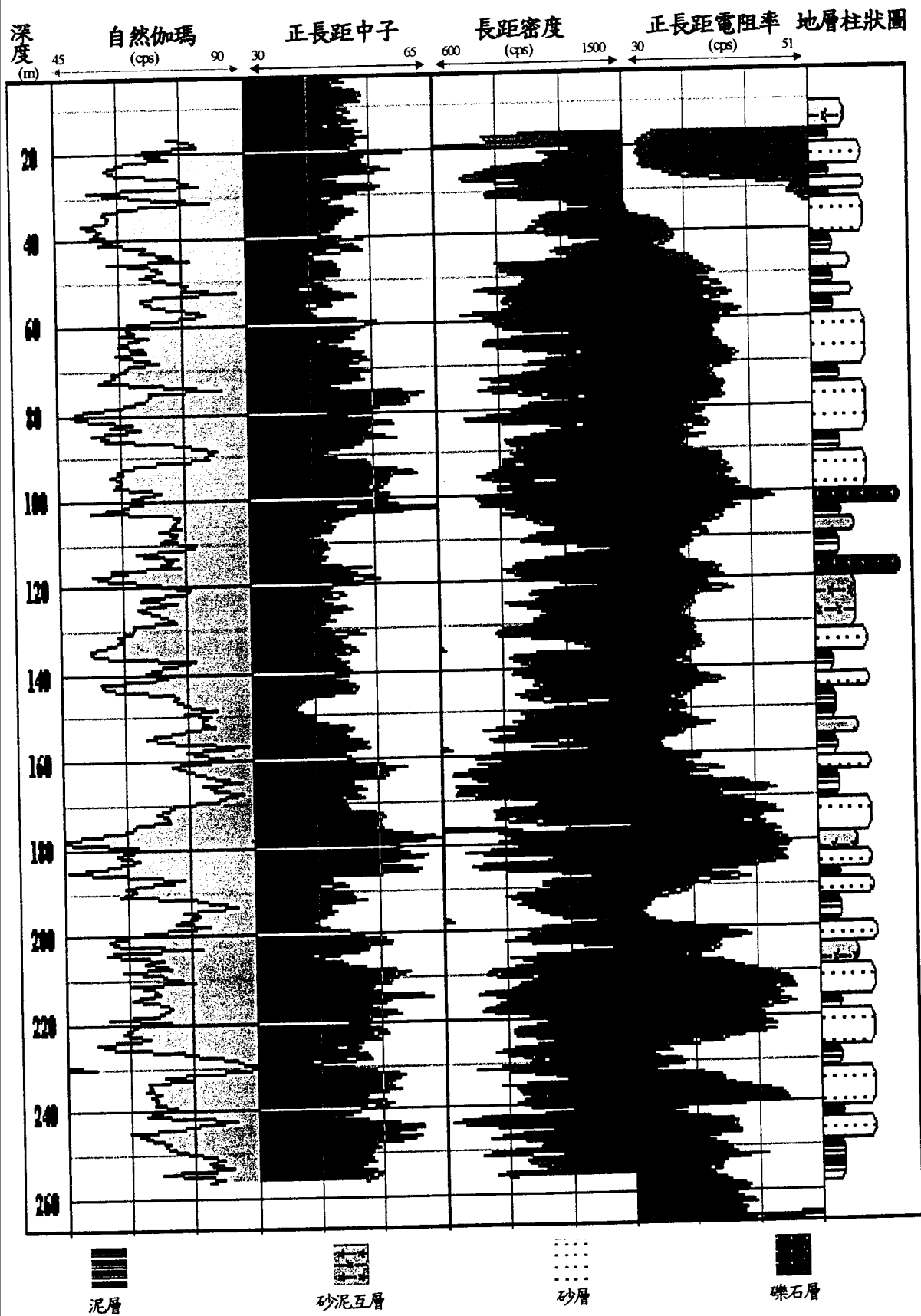


圖3.1 豐安國小站井測記錄及地層柱狀圖

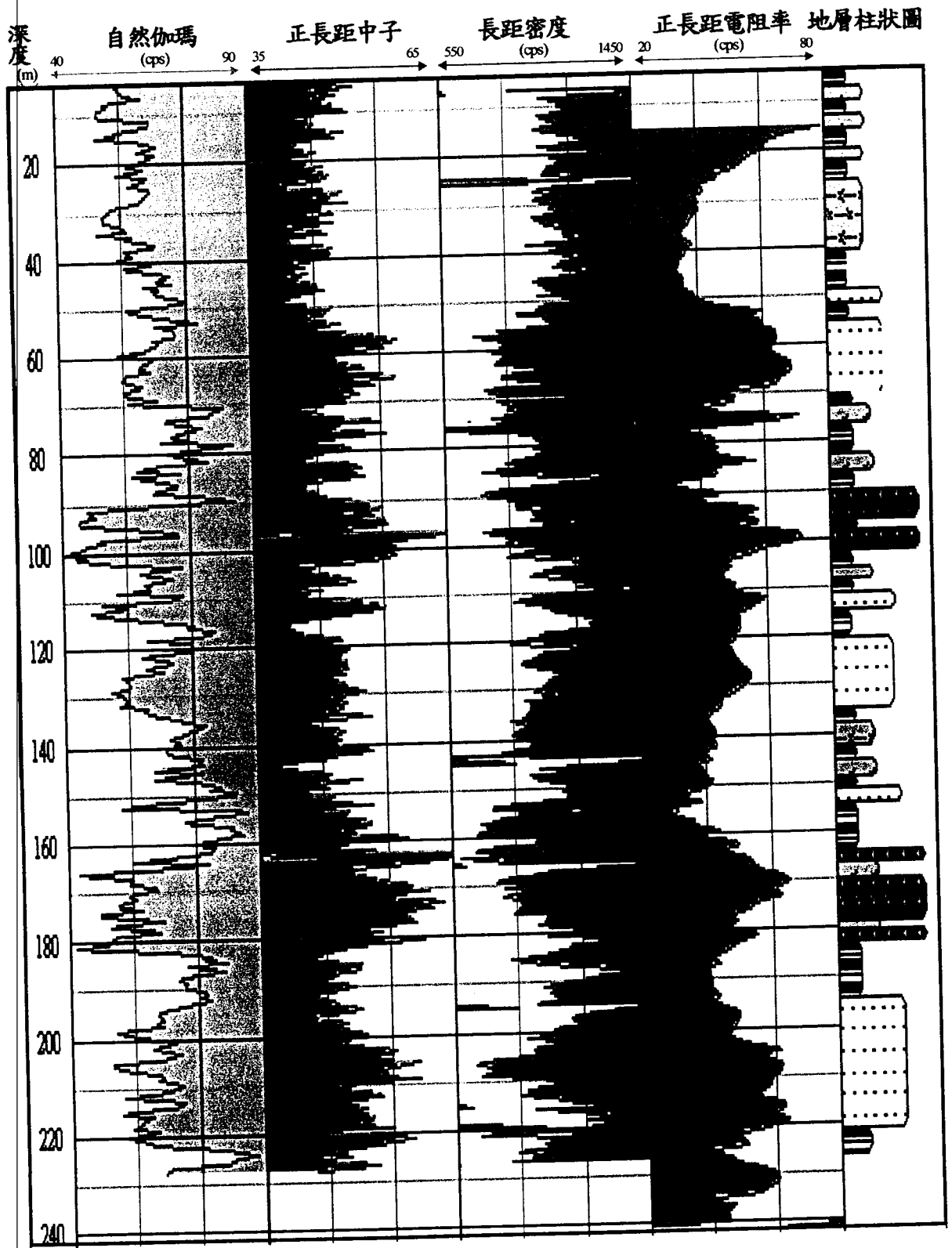
(三) 海園站

位於台西鄉五條港以西之新興區海埔新生地上，離海岸堤防僅有 50 公尺，與水利局海園站分層地下水位觀測井相距約 600 公尺，鑿井方式為衝鑽法，並以鹽分高的地面水夾雜泥屑作為泥漿水，鑽鑿深度為 300 公尺深，井測施測深度為 248 公尺。

圖 3.3 顯示，以陰影方式呈現的各項井測記錄亦出現雙凹雙凸的現象，砂層主要分佈深度 9~20 公尺、57~71 公尺、148~171 公尺、189~211 及 216~222 公尺；礫石層僅出現在 94~99 公尺；泥層則集中在 22~38 公尺、51~57 公尺、111~118 公尺、134~148 公尺、178~189 公尺及 222~239 公尺。整體而言，在深度 57 公尺內以泥層及砂泥互層為主，57~99 公尺為砂礫層夾薄泥層，99~148 公尺屬於砂泥互層，148~240 公尺則是厚砂層夾薄泥層。在電阻率電測記錄中，本站的電阻率值特別的低，電阻率值的分佈情況大致是由地表淺處向深處遞增，至 200 公尺以下電阻率值才沒有出現遞增的現象，推測是因該地區地下水受到鹽化影響所致。

3.2 井間對比

整體而言，單以岩性記錄進行對比是有困難的，反而是以井測記錄對比較能呈現各站井間地層類似的關係（圖 3.4），大致上，在台西麥寮地區深度 260 公尺內，具有相同地層特性且延展性良好的砂礫層及泥層各有 5 層。砂礫層主要份佈在深度 28~42 公尺（S1）；55~73 公尺（S2）；90~103 公尺（S3）；150~188 公尺（S4）及 191~225 公尺（S5），其中在 90~103 公尺（S3）之間各站皆有礫石層的出現。至於連續較佳的泥層則集中在 43~56 公尺（C1）、108~128 公尺（C2）、142~170 公尺（C3）、178~188 公尺（C4）及 210~233 公尺（C5）。整體而言，在深度 60 公尺內屬於砂泥互層，60~110 公尺以砂礫層為主，110~160 公尺亦屬於砂泥互層，160~240 公尺則是厚砂礫層夾薄泥層的特性。



泥層

圖3.2

新興國小站井測記錄

地層柱狀圖

礫石層

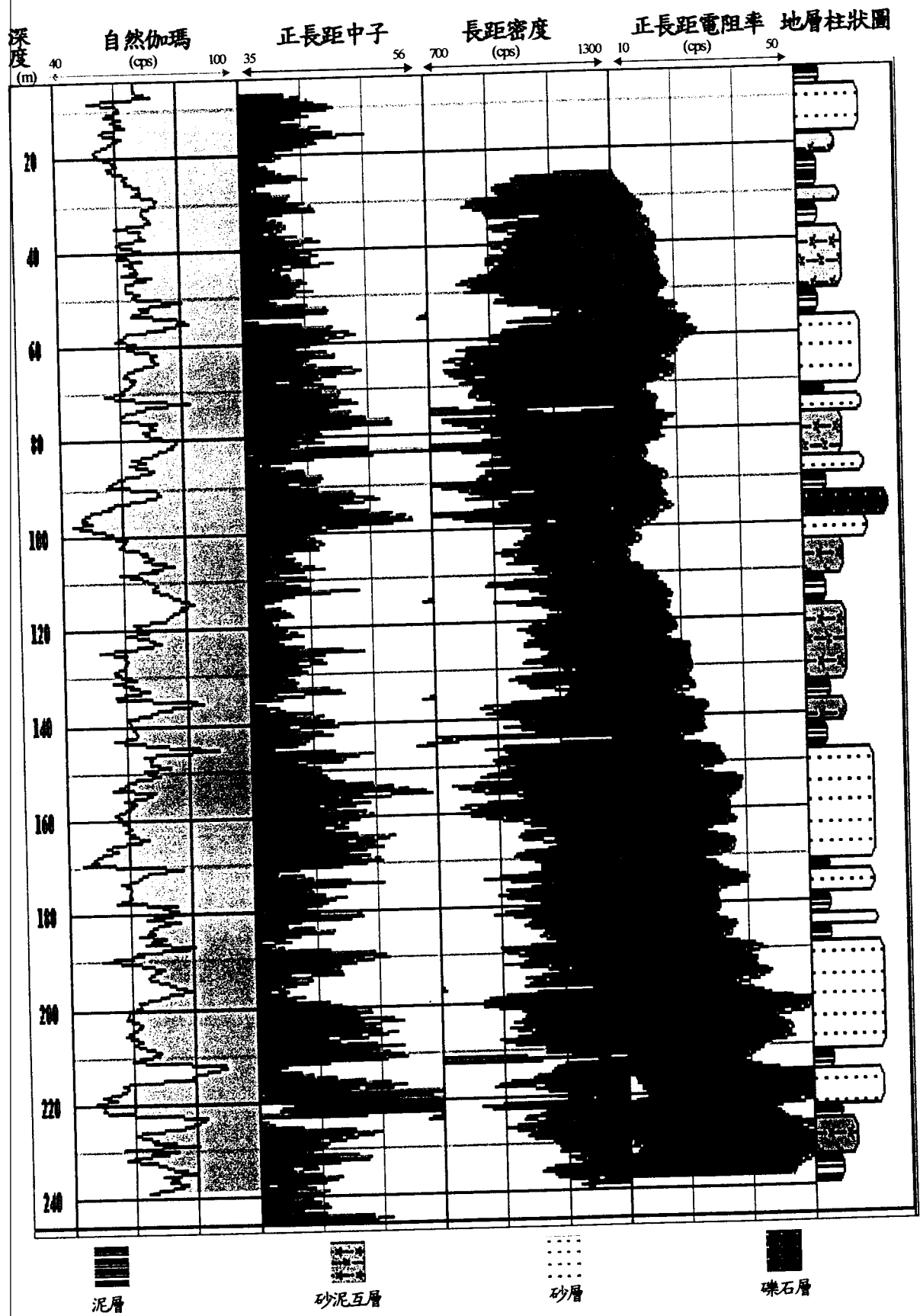


圖3.3 海園站井測記錄及地層柱狀圖

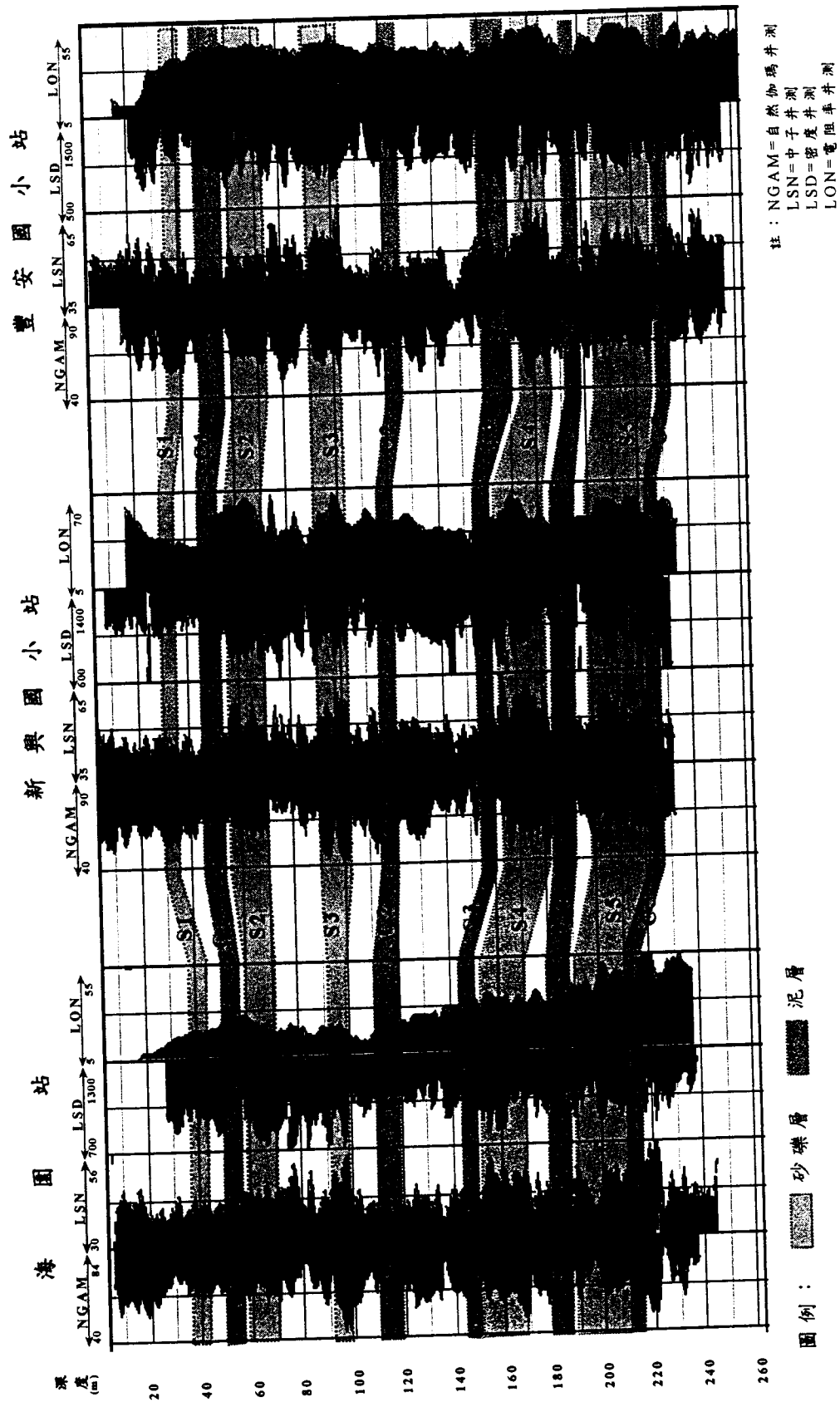


圖3.4 海園站、新興國小站與豐安國小站井測資料對比圖

第四章 地層下陷及地下水位分析

藉由蒐集整理本區水準點檢測及地層下陷監測井之資料，經各資料相互核對確認後，建立雲林地區完整的地層下陷歷程，並探討雲林沿海區域含水層年平均地下水位變化與地層下陷空間分佈的關係。

4.1 地層下陷歷程

自民國 60 年代末期，北港溪河口北岸一帶開始發生地層下陷，於沿海地帶造成許多惡果。為長期監測雲林地區地層下陷，水利局於民國 78 年在台西設置第一口分層地層下陷觀測井，之後工研院水利司與水資源局亦於雲林地區地層下陷嚴重地點陸續設立分層地層下陷觀測井。迄民國 87 年雲林沿海地區共設置了十一口地層下陷監測井（工研院，1998），八口分層地層觀測井及三個鋼索式監測井。

台西鄉及麥寮鄉共有五口分層式觀測井，其中包括台西站以及近年新增設兩口井深三百公尺的豐安國小站及新興國小站；口湖鄉的觀測井設在建陽國小；四湖鄉兩口觀測井則設在金湖國小及宜梧國中。近三年分層觀測資料顯示（表 4.1），井深三百公尺的豐安國小及新興國小兩站所監測到的下陷量最大，年平均下陷量超過 3 公分，主要發生地層下陷的深度介於 160~300 公尺，約佔總下陷量的 50%；崙豐國小站、建陽國小站及金湖國小站的年下陷量約 2.5 公分，下陷深度主要集中在 100~200 公尺；而海豐分校站及台西站的年下陷量最少，皆在 2 公分以下，地層主要發生下陷深度亦在 100~200 公尺間。

表 4.1 雲林地區分層觀測結果比較(民國 85~88)

觀測井	地點 (鄉)	深度 (m)	日期 (yy/mm)	累積下陷量 (cm)	年下陷量 (cm/yr)	主要下陷深度 (百分比)
豐安國小	麥寮	300	85/9~88/5	8.54	3.20	163~301(47%)
海豐分校	麥寮	200	85/5~88/5	5.8	1.93	91~202(72%)
新興國小	台西	300	85/9~88/5	10.3	3.85	187~292(58%)
崙豐國小	台西	200	85/5~88/5	7.4	2.47	97~201(73%)
台西站	台西	200	85/5~87/3	2.3	1.25	112~173 (74%)
建陽國小	四湖	200	85/5~88/5	7.75	2.58	96~202(54%)
金湖國小	口湖	200	85/5~88/5	7.75	2.58	98~203(51%)

由各分層觀測井與地表水準檢測的所觀測到的結果進行比對發現(表 4.2)，在台西麥寮地區，井深 300 公尺的新興國小站及豐安國小站皆在分層觀測範圍內，佔總下陷量 90% 以上，而其他兩口 200 公尺分層觀測結果與水準點檢測結果有一段差距，海豐分校站約有 55% 下陷量在分層觀測範圍外，崙豐國小站則是 37%，顯示台西麥寮區地層下陷主要發生在 300 公尺以內；西南部之口湖與四湖鄉之觀測結果較相近，建陽國小站約 78% 的下陷量在分層觀測範圍內，金湖國小站分層觀測量總下陷量 94%，推測口湖四湖地區地層下陷的深度仍以 200 公尺以內深度為主。

表 4.2 雲林地區分層下陷資料與水準之比較(民國 85.10~87.2)

觀測井	井深 (m)	地表水準檢測		分層觀測範圍內		分層觀測範圍外	
		下陷量(cm)	百分比	下陷量(cm)	百分比	下陷量(cm)	百分比
豐安國小	300	8.12	90%	7.3	90%	0.82	10%
海豐分校	200	5.96	45%	2.7	45%	3.26	55%
新興國小	300	6.25	94%	5.9	94%	0.35	6%
崙豐國小	200	7.28	63%	4.6	63%	2.68	37%
建陽國小	200	4.24	78%	3.3	78%	0.94	22%
金湖國小	200	3.25	94%	3.05	94%	0.2	6%

4.2 年平均水位差與地層下陷分佈

由雲彰地區年平均地下水位變化情況發現，區域性年平均地下水位的變化與該區地層下陷的空間分佈有密切的關係。在雲林地區，民國 83 年 10 月至 85 年 10 月之累積下陷量圖顯示(圖 4.1)，地層下陷量較大的地區位於西北部的台西鄉、麥寮鄉以及西南部的水林鄉，其中麥寮及水林兩地之下陷情況較嚴重，累積下陷量皆超過 14 公分，民國 84 至 85 年雲林地區年平均地下水位差之等量圖亦顯示(圖 4.2)，台西鄉、麥寮鄉及水林鄉三地之地下水位下降量較大，其中西北部之麥寮鄉及西南部之水林鄉兩地之地下水位下降幅度高達 140 公分。

圖 4.3 指出 85 年 10 月至 87 年 2 月間，雲林地區地層下陷的趨勢已漸緩和，兩個主要下陷中心分別位於西部的台西地區及中北部的麥寮崙背地區，其中以中北部之下陷範圍較大，民國 85 至 86 年年平均地下水位差等量圖顯示(圖 4.4)，地下水位有回升的現象，水位回升

較慢的地區發生在台西地區及中北部的麥寮崙背地區，其空間分佈上與地層下陷等量圖相近，顯示區域性年平均地下水位的變化可以概括地反映出地層下陷區的分佈狀況。

4.3 地下水位變化

4.3.1 長期地下水位變化

由於近二十年來濁水溪沖積扇用水需求持續增加，而地表水源供應不足，故地下水抽取量迅速增加。由於濁水溪沖積扇地區舊有之水井為混層觀測井，且年代久遠，水位觀測記錄上常有疏漏及錯誤，但經過評估及修正後，仍可作為長期水位變化趨勢的參考資料。

以此區內之蚊港站為例，其水位於民國 57 年至 65 年之間並沒有太大的變化，大致維持在高程 4 至 7 公尺左右，但於民國七十年代開始，水位即急劇下降，至民國 80 年，水位已降至海平面下 20 公尺左右（圖 4.5），而此時期恰好為養殖漁業發達的時期，故養殖漁業抽水對地下水位有著相當大的影響；但民國 80 年以後，水位下降已有趨緩甚至持續回升的現象，推測在此舊有觀測井深度內之抽水已漸趨和緩，抽水行為已漸漸移往更深層的含水層，或是由於地下水垂直補注量隨井數而增加，使得地下水補注量與抽水量達到平衡，造成水位不再持續下降，值得進一步之分析探討。

綜觀以上所述，濁水溪沖積扇地區地下水位在逐年下降中，由民國 57 年開始記錄至 89 年為止，主要下降時期集中在民國 65 至 85 年，此期間全區平均下降了 10 公尺左右，且下降幅度有自東邊高區向海邊增加的趨勢。以往下降幅度較大之雲林沿海地區，部份水位已有持平甚至緩慢回升之現象，而彰化地區卻仍在持續下降中，推測地下水超抽現象已由雲林地區逐漸北延至彰化沿海地區，而配合地層下陷資料（水利處，1999），彰化大城鄉西港一帶，正為目前地層下陷最嚴重的地區，故由超抽地下水所引起之地層下陷、地下水鹽化等問題，亟需注意。

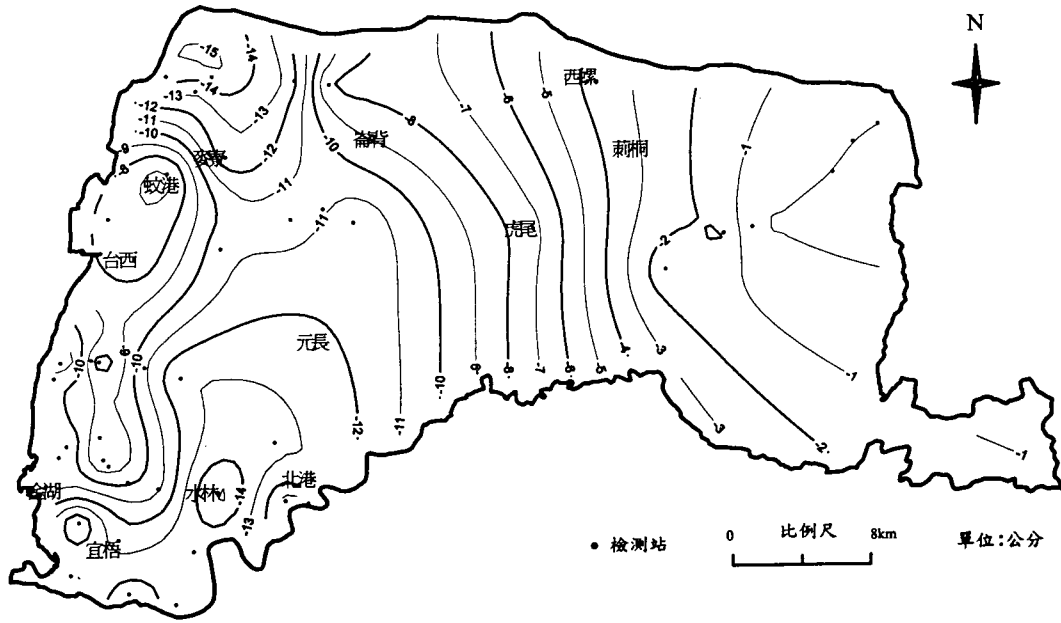


圖4.1 雲林地區民國83年10月至85年10月累積下陷量圖
 (資料來源：工研院，1998)

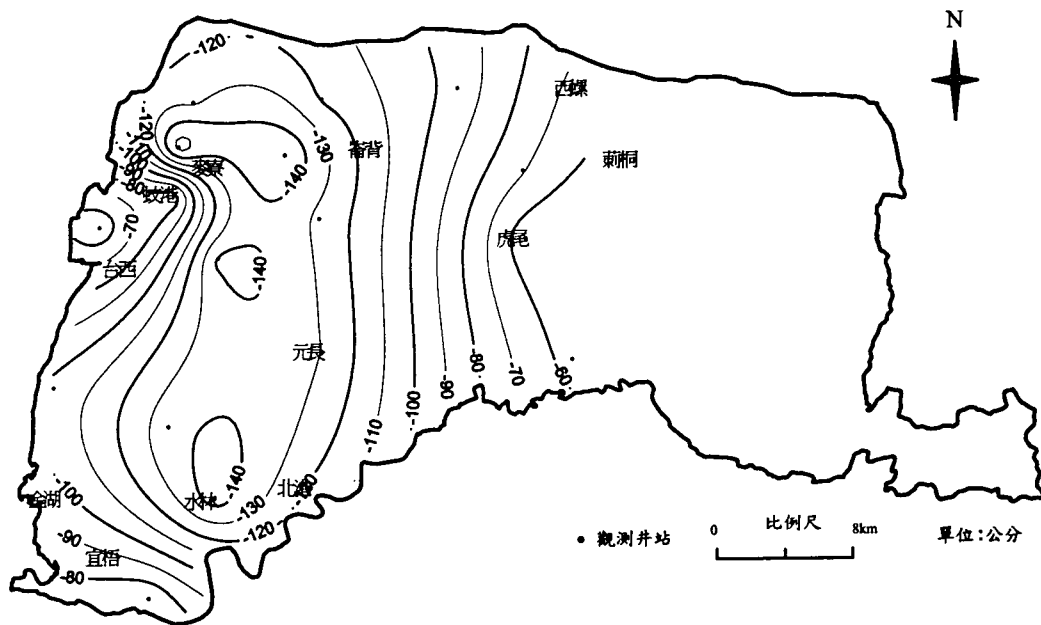


圖4.2 雲林地區民國84至85年年平均地下水位差等量圖

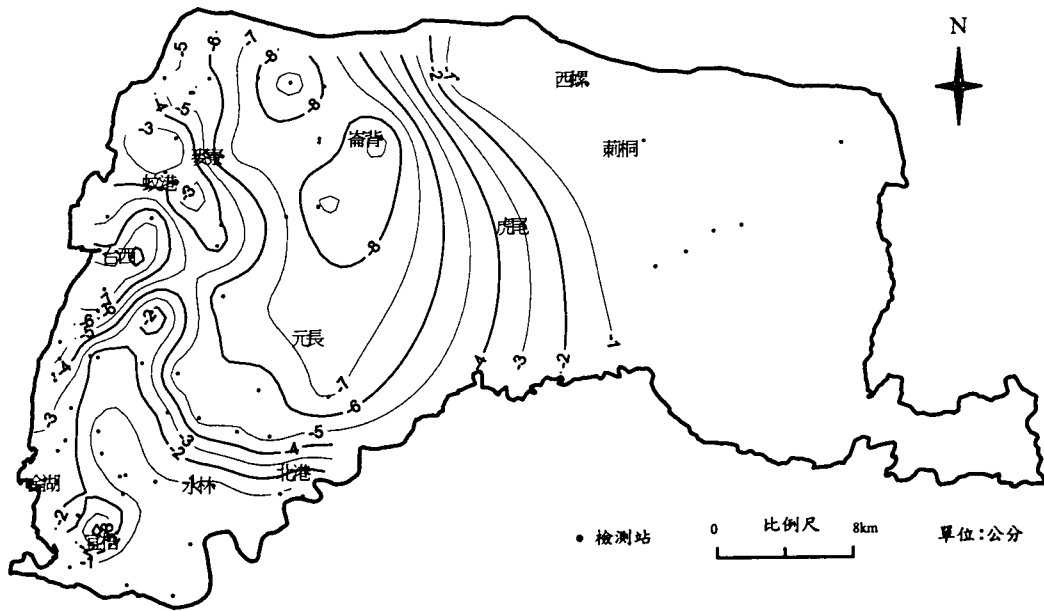


圖4.3 雲林地區民國85年10月至87年2月累積下陷量圖
 (資料來源：工研院，1998)

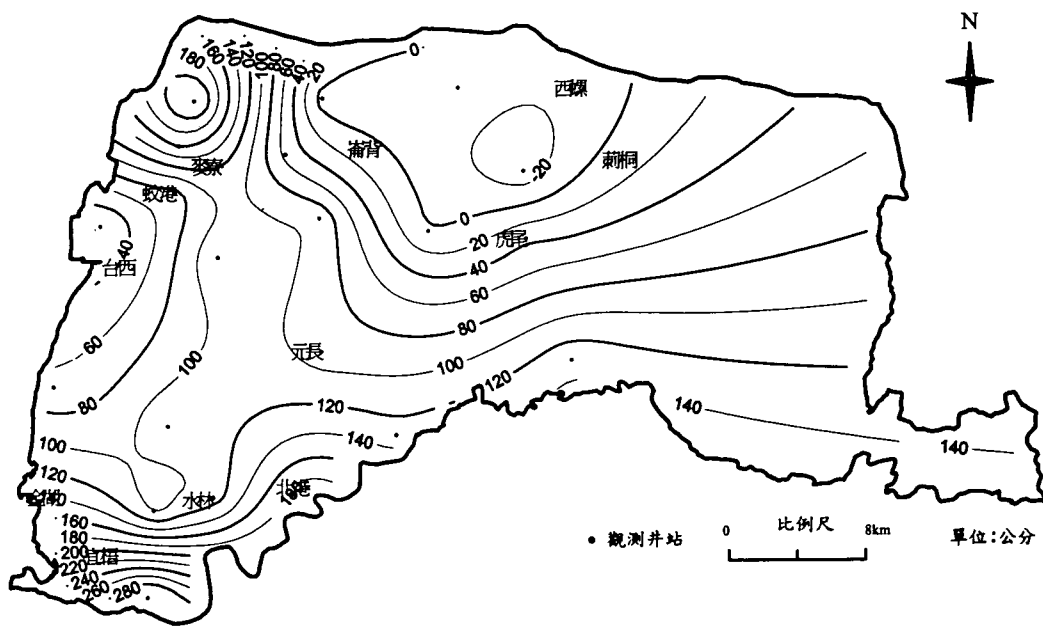


圖4.4 雲林地區民國85至86年年平均地下水位差等量圖

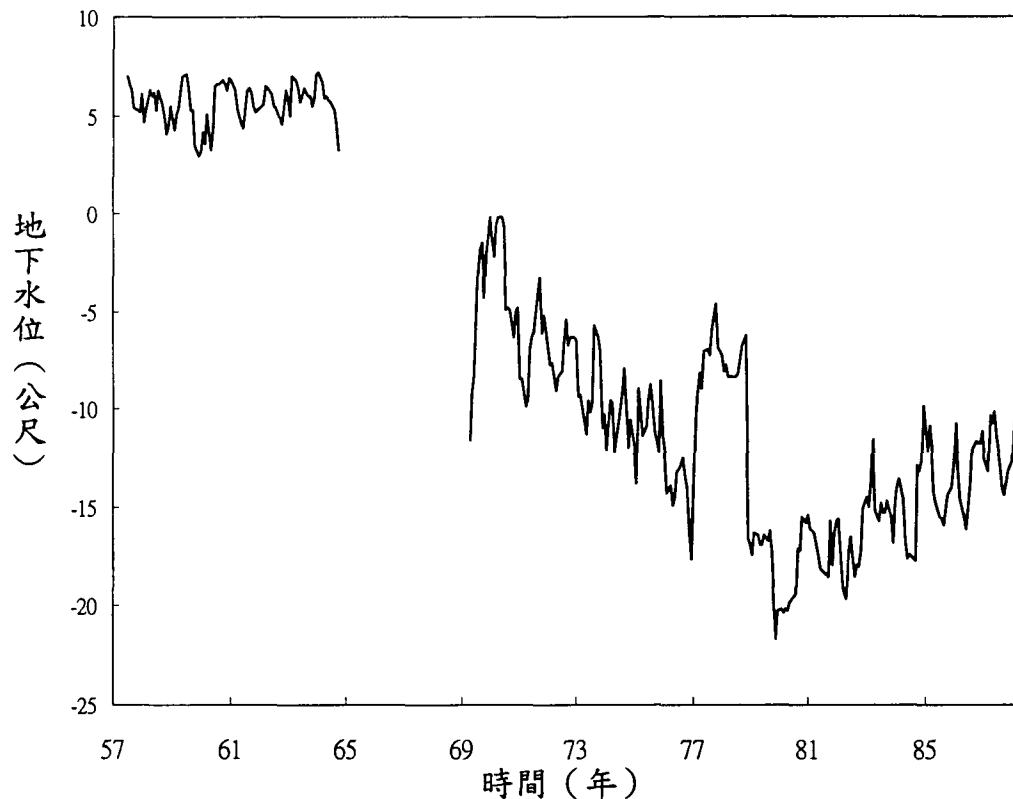


圖 4.5 蚊港站長年地下水位變化

4.3.2 近期分層地下水位變化

此節以地下水觀測網計畫所得到之分層地下水位資料來進行分析。由於濁水溪沖積扇之井測與岩心紀錄顯示，於深度 50 至 70 公尺處，其上下地層特性有所不同（盧詩丁，1995；黃智昭，1996），故地下水位分析亦由此深度為分界，分別進行淺層地下水位及區域含水層地下水位變化探討。

由岩心及井測資料顯示，濁水溪沖積扇地區自地表至地表下 50-70 公尺範圍內的地層，大致以含泥質的砂泥互層及粉砂層分布為主，除地下水面外，尚含有數個局部性含水層（盧詩丁，1995；黃智昭，1996），但因泥層阻隔效應，使得淺部地下水位隨深度增加而降低。淺層局部含水層為泥質含量較高之砂泥互層，出水量本就不豐，再加上水質多已遭受污染，故淺層地下水位並非本區主要之取水層，水位較為穩定。

深度 60 至 200 公尺的區域含水層為本區主要之抽水層，故水位波動受抽水影響甚大。岩心記錄顯示為多層砂層與泥層的交錯分布，故於不同的深度放置了不同的濾水管以觀測其分層地下水位之變化情形。以海豐站為例，其濾水管深度為 52-70 公尺及 164-175 公尺，可以看出其水位不僅趨勢非常一致，且地下水位高程亦非常接近（圖

形。以海豐站為例，其濾水管深度為 52-70 公尺及 164-175 公尺，可以看出其水位不僅趨勢非常一致，且地下水位高程亦非常接近（圖 4.6），推測由於深部區域的泥層延續性不佳，阻隔效果有限，或是沿海地區因養殖業盛行，抽水井眾多，鑿穿砂泥互層造成此含水層水力連通，則有待進一步之探討。

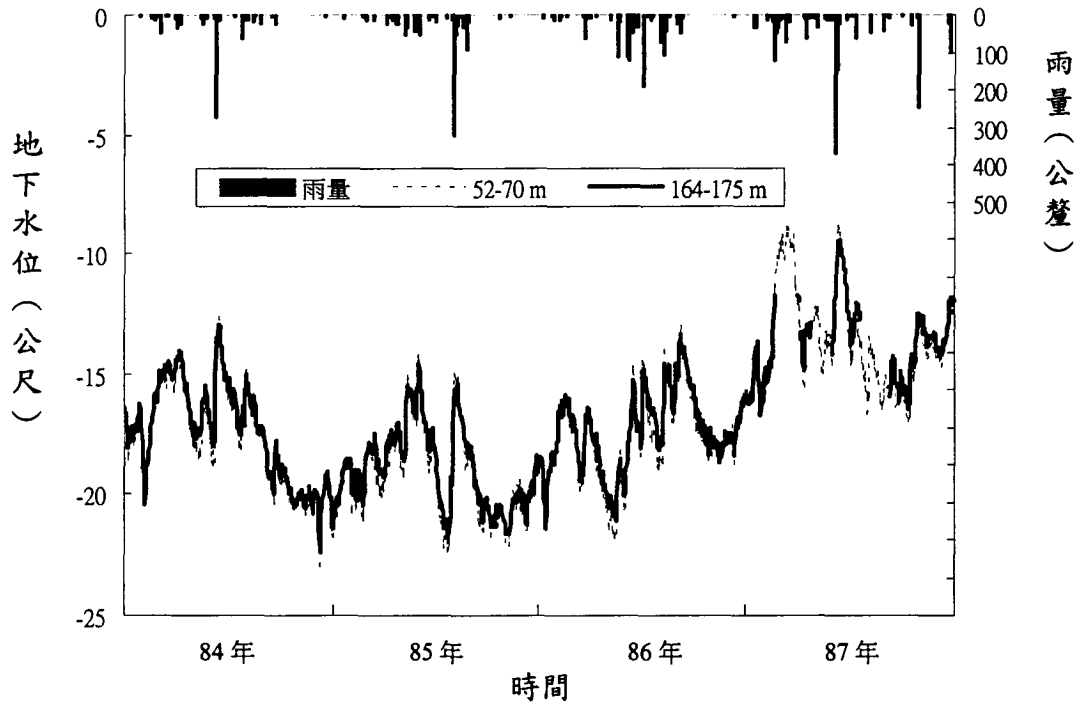


圖 4.6 海豐站地下水位與雨量關係圖

第五章 地下水位與補注模式

5.1 暴雨與海水倒灌之地下水位變化

許多地下水觀測井站於暴雨停抽期間出現地下水位迅速回升的現象。賀伯颱風於民國 85 年 7 月 29 日至 8 月 3 日所帶來之降雨量共 518 公釐，尤以 7 月 31 日與 8 月 1 日之降雨量即占 90 % 左右。地下水位資料指出，由於大量降雨補注及停抽地下水所致，幾乎所有井站皆在此時期大量回升。分析濁水溪沖積扇地區各地於賀伯颱風前後時期之地下水位回升情形，可進一步探討地下水補注之機制。

雲林東部之烏塗站（圖 5.1），其地下水位於 7 月 29 日至 8 月 3 日期間僅上升 0.7 公尺。而海園站（圖 5.2）深度 68-98 公尺之地下水位於 7 月 30 日起迅速回升，至 8 月 8 日達到最高，約上升了 4 公尺，深部水位亦同，約上升了 4 公尺。若分析各站逐時地下水位資料，以 8 月 1 日幾乎完全沒有受到抽水影響的回升水量，將其分層並由東至西作一排列比較（圖 5.3），可發現於雲林沿海地區之井站，如後安、海豐等站，水位有異常高之回升量，較東部於同時期之回升量明顯高出許多。此現象指示了沿海地區之地下水位回升，除了來自上游之側向補注外，當地似有管道使淺層地下水直接垂直下滲補注至深層地下水層，致區域含水層之地下水位能於短時間內即大量回升，其詳細的機制及過程，值得作進一步之分析探討。

此外，民國 84 年 6 月 7 日至 6 月 12 日在濁水溪沖積扇濱海地區共降下 424 公釐之雨量，雖然皆因暴雨停抽使得地下水位迅速回升，但分析其逐時地下水位資料，可看出其水位回升情形與 85 年賀伯颱風來襲時略有不同。我們以 84 年 6 月的海園站為例（圖 5.4），可以看出在 6 月暴雨停抽時，淺層與深層地下水位皆迅速回升，且延續多達十日之久，進一步蒐證得知，當時海園站附近發生了海水倒灌之現象，是否因此提供管道致地表海水直接灌入深層地下水層，以致區域含水層水位回升迅速且延時較久，則須進而探討其補注模式。

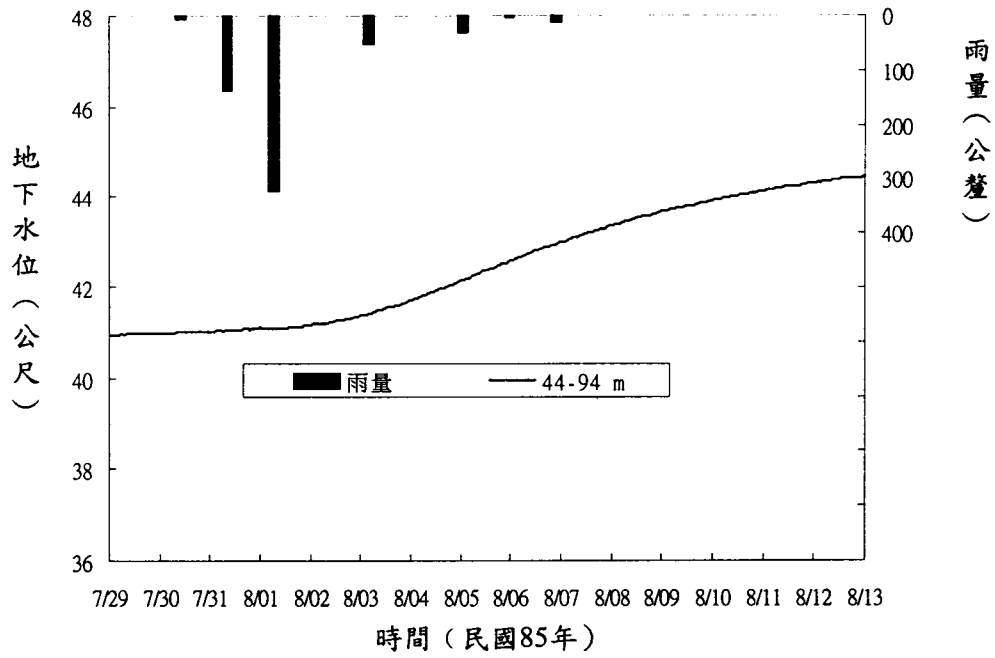


圖 5.1 烏塗站 85/7/29 至 85/8/13 地下水水位變化

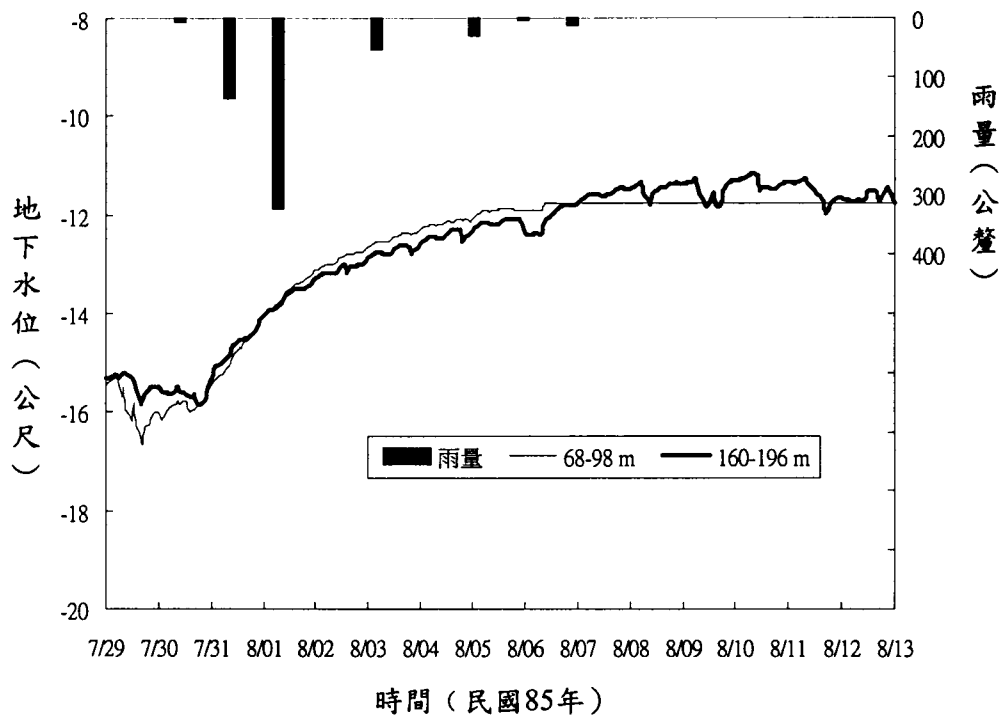


圖 5.2 海園站 85/7/29 至 85/8/13 地下水水位變化

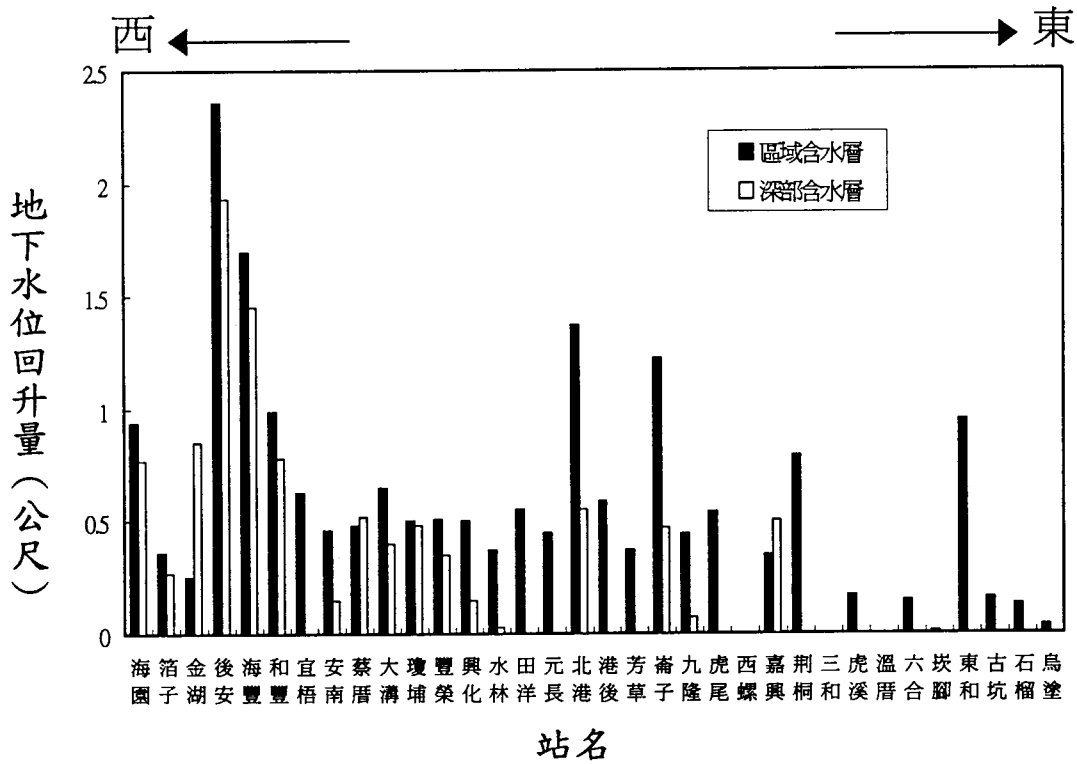


圖 5.3 雲林地區各觀測站民國 85 年 8 月 1 日地下水水位回升量

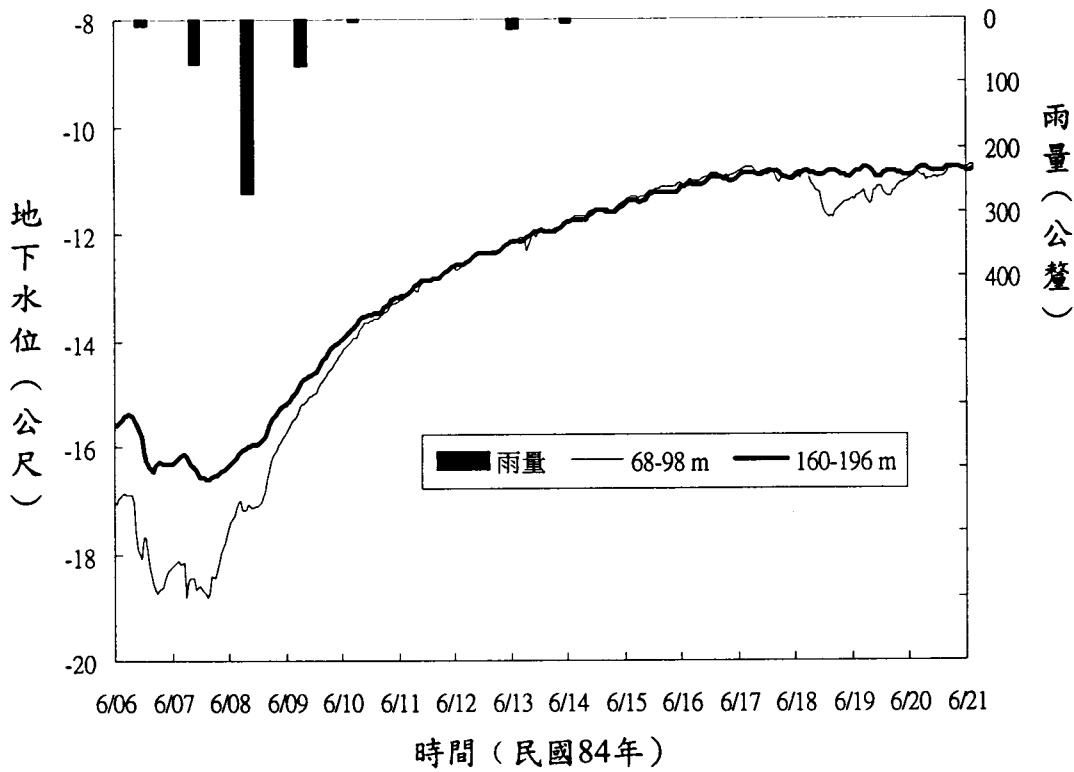


圖 5.4 海園站民國 84 年 6 月 6 日至 6 月 21 日水位歷線圖

5.2 地下水補注之數值模型

為研究補注機制，本研究選擇雲林縣台西鄉、麥寮鄉及東勢鄉之一部份，以垂直地下水流的方向，劃定一長 7800 公尺，寬 4800 公尺之區域，進行三維數值模擬（圖 5.5）。而區域中包括和豐、海豐及興化三個水位觀測站。

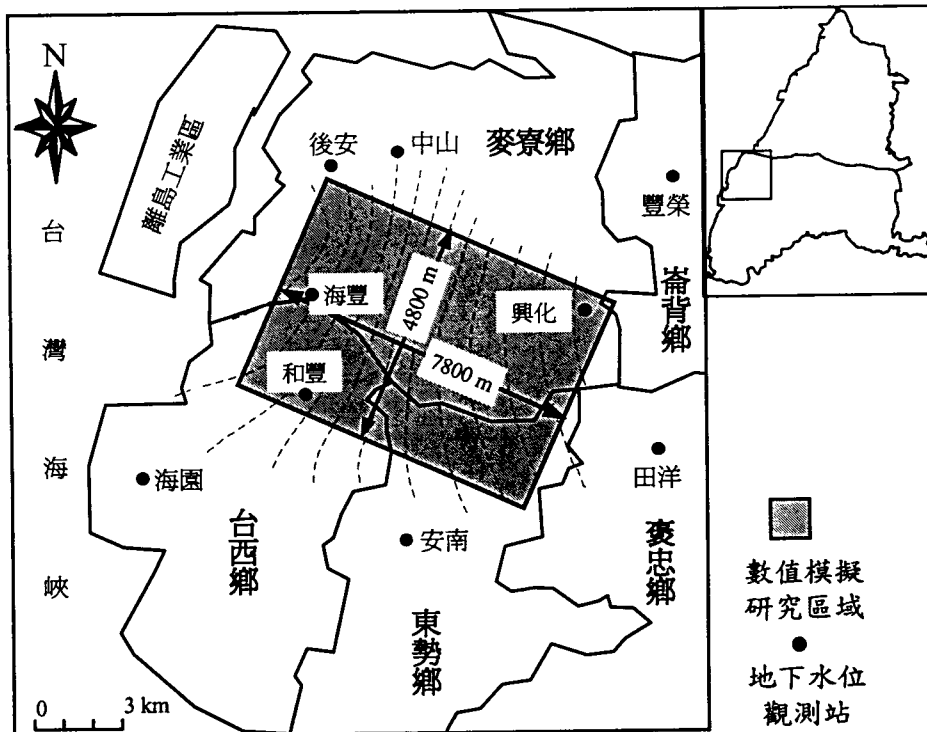


圖 5.5 模擬區域位置圖

5.2.1 模擬時間

本研究分別選擇民國 85 年 8 月 1 日 0 時至同年 8 月 2 日 0 時共 24 小時，及 84 年 6 月 9 日 12 時至 84 年 6 月 10 日 12 時共 24 小時兩個不同的時段為模擬時間。在地下水模擬中，不確定的變數相當多，例如水文地質參數、水文地質分層等，常常需要簡化及假設，而未知的抽水量也是很大的影響因素之一。為了能盡量降低不確定之因子，故選擇兩次暴雨時為主要的模擬時段，假設其完全不受抽水影響。而這兩次補注機制不甚相同，故分別模擬以互相比對分析，探討補注模式之差異。

5.2.2 數學模式

模擬所用之數學模式為地下水流統御方程式。地下水流統御方程式是將達西定律帶入質量守恆方程式後得到，在含水層方面，由於砂層之水力傳導係數為均向，故可表示為：

$$K\nabla^2h=Ss\frac{\partial h}{\partial t}$$

其中 K 為水力傳導係數， h 為水位， Ss 為比儲水率， t 為時間。而泥層之水力傳導係數具有異向性，在水平方向與垂直方向不同，故可表示為：

$$K_h\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) + K_v \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = Ss \frac{\partial h}{\partial t}$$

其中 K_h 為水平方向之水力傳導係數， K_v 為垂直方向之水力傳導係數， h 為水位， Ss 為比儲水率， t 為時間。

5.2.3 數值模型

數值模擬係採用有限元素法來進行分析。有限元素法是將連續的物理區間，分成有限個元素，再以不連續的函數逼近連續的物理量，用此函數求得模型上每一節點的值，以求得整個模型的近似解。而 ABAQUS 為一有限元素分析軟體(Hibbit et al.,1996a；1996b；1996c)，包含了各種不同的分析元素，地下水統御方程式與其中的熱傳導方程式類同，故可利用其熱傳導元素來模擬區域性的地下水流概況。

本研究選用 ABAQUS 三維熱傳導元素，每元素由八個節點組成。於模型的水平方向上，以長 600 公尺、寬 400 公尺之長方形切割網格，共有 13 乘 12（共 156 個）個元素。而垂直方向上則以每 15 公尺切割一層，自地表下 15 公尺至 210 公尺分為 13 層，唯有 0 至 15 公尺之分層再細分為 0 至 5 公尺、5 至 15 公尺兩部份，共 15 層（圖 5.6）。故整個三維數值模型，共有 2548 個節點，2184 個元素。而模型中有興化、和豐及海豐三個水位觀測站，其水位記錄可供以對比模擬之正確性。

決定網格分割後，須決定數值模型中各層之物理性質。主要根據前人於此地區井測、岩心之記錄及分析，進一步確定模型中各分層之設定。陳鴻泉（1997）利用井測資料之連續性，對比岩心及井測記錄，進一步探討雲林台西麥寮地區水文地質特性與水文地質架構模式。結果顯示由地表至深 55 公尺之間，地層密度較低，屬泥質含量較高的地層，而深度 60 至 105 公尺左右則出現砂質含量較高甚至礫石層的地層。其中深度 90 至 110 公尺為粗砂層或礫石層，110 公尺至 120-136 公尺之間主要為泥層，165 至 225 公尺又出現兩個較厚之砂層。實際上之地層是非常複雜的，但由於進行模擬時需將概念模型予以適當的簡化，由上述資料及前人對本區水文地質架構之分析研究，可將其簡化而得到本區水文地質模型之分層情形（圖 5.7）：地表下 0 至 60 公尺為區域

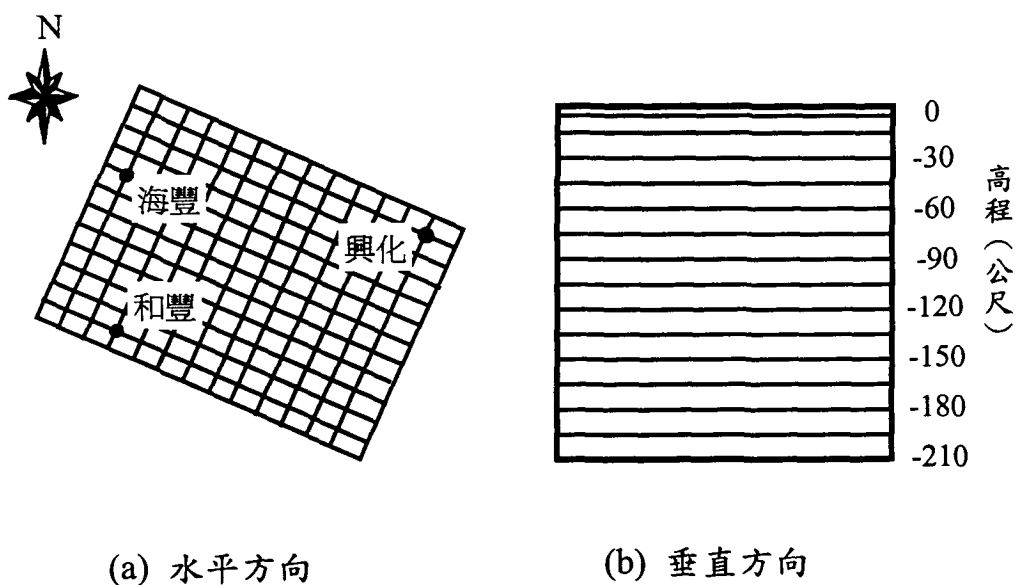


圖 5.6 三維數值模擬網格圖 (a) 水平方向 (b) 垂直剖面

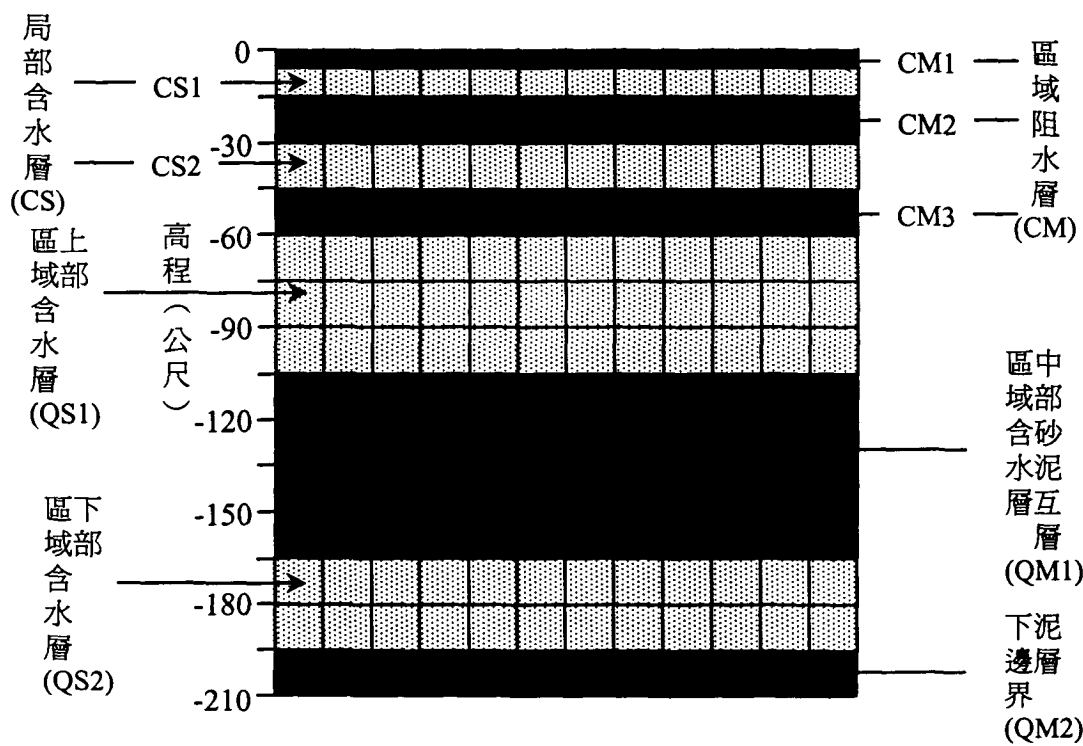


圖 5.7 三維數值模型垂直剖面各層物性設定

阻水層，其中 0 至 5 公尺(簡稱為 CM1)、15 至 30 公尺(CM2)及 45 至 60 公尺(CM3)為透水性差的泥層，而 5 至 15 公尺(CS1)、30 至 45 公尺(CS2)透水性較佳，為區域阻水層中之局部含水層，代表連續性不佳的帶狀或鏡狀之薄層砂層。而深度 60 至 195 公尺為一深厚之區域含水層，其中 60 至 105 公尺(QS1)、165 至 195 公尺(QS2)分別為區域含水層上部與下部，而 105 至 165 公尺(QM2)以砂泥互層為主，透水性不佳。在最底部 195 至 210 公尺則設定為不透水之泥層。

5.2.4 邊界條件

在模擬地下水流時，模型需給予適當之邊界條件帶入以求解。在區域阻水層中之局部砂層(CS1、CS2)因為不互相連通，故其東南西北側的邊界皆設定為不透水邊界。而在區域含水層中，其上部(QS1)與下部(QS2)之東南西北側的邊界則逐時計算其側向補注量，作為定流量邊界。模型中所有的阻水層之東南西北側皆設為不透水邊界。而模型上部邊界為地下水面，研究地區之地下水面約位於地表下 2 至 3 公尺，而地表高程約為 4 至 5 公尺，故將地下水面值設為 2 公尺之定水頭邊界。模型的下部邊界因為泥層，故設為不透水邊界。

5.2.5 初始水位設定

初始水位為模擬開始時，模型中各地的地下水位值。研究地區之地下水面約位於地表下 2 至 3 公尺，而地表高程約為 4 至 5 公尺，故將地下水面值設為 2 公尺。而區域阻水層中的局部含水層，因模型中缺乏淺層觀測井，故利用模型外的豐榮、田洋及海園三站淺層水位內插而得 30 至 45 公尺(CS2)處之水位，而 5 至 15 公尺(CS1)處之水位，則由 30 至 45 公尺之水位與地表水位值內插而得，雖然淺層局部砂層應不互相連通，此僅提供初始水位之參考。至於區域含水層上部(QS1)與下部(QS2)的初始水位則由興化、和豐、海豐、後安、中山、安南、田洋、海園、九隆等分層觀測井之相當層位的地下水位值內插而得。而模型中所有泥層之初始水位皆由其上下砂層(或與地表)水位內插而得。

5.2.6 水文地質參數

在本數值模擬中需要用到的參數為水力傳導係數(K)與比儲水率(Ss)。根據台糖於民國 81 年至 84 年在本區所做之抽水試驗與試水試驗，可以得到各個含水層之導水係數與儲水係數，而水力傳導係數為導水係數除以含水層之厚度，比儲水率則為儲水係數除以含水層之厚度。故以其結果平均用以設定該層之參數。淺處之局部含水層並未做抽水試驗，無法得其儲水係數，故比儲水率設為區域含水層上部與下

部之平均值。泥層由於出水量低，無法做抽水試驗與試水試驗，故其水力傳導係數與比儲水率須自行設定。由上述條件，可得到以下之設定（表 5.1）：

表 5.1 數值模型水力傳導係數與比儲水率設定值

深度範圍	分層代號	水力傳導係數 (m/sec)		比儲水率 (1/m)
		水平方向	垂直方向	
0-5 m	CM1	2.00×10^{-7}	2.00×10^{-8}	5.31×10^{-4}
5-15 m	CS1	4.80×10^{-4}	4.80×10^{-4}	5.31×10^{-5}
15-30 m	CM2	2.00×10^{-7}	2.00×10^{-8}	5.31×10^{-4}
30-45 m	CS2	4.80×10^{-4}	4.80×10^{-4}	5.31×10^{-5}
45-60 m	CM3	2.00×10^{-7}	2.00×10^{-8}	5.31×10^{-4}
60-105 m	QS1	2.86×10^{-4}	2.86×10^{-4}	1.17×10^{-5}
105-165 m	QM1	2.00×10^{-7}	2.00×10^{-8}	5.31×10^{-4}
165-195 m	QS2	2.54×10^{-4}	2.54×10^{-4}	9.44×10^{-5}
195-210 m	QM2	2.00×10^{-7}	2.00×10^{-8}	5.31×10^{-4}

5.3 模擬結果分析

5.3.1 原設定水文地質參數分析

首先利用台糖在本區所作的抽水試驗及試水試驗得到之水文地質參數，及假設之阻水層之水文地質參數（表 5.1），再配合邊界的水力坡降所得到之流量進行模擬，由模擬結果指出，此項水文地質參數無法使地下水位回升到觀測水位。

5.3.2 區域阻水層之垂直水力傳導係數

濁水溪沖積扇濱海地區養殖漁業盛行，深井數目眾多，而其裝置於不同深度之濾水管，可能提供淺層地下水垂直下滲的通道補注深層區域含水層。劉文煜(1998)於雲林沿海建立三維數值模型，其參數敏感度分析結果，則以區域阻水層(CM)之垂直水力傳導係數(Kv)對區域含水層地下水位之敏感度最高。由前人所作之研究發現，調整區域阻水層之垂直水力傳導係數(Kv)為使區域含水層地下水位合理上升之最大因素。為探討淺層地下水經由井管補注區域含水層之機制，故於試

驗二中即以調整區域阻水層之垂直水力傳導係數的方式，來探討淺層地下水補注區域含水層之機制。

首先以台糖所作之抽水試驗及試水試驗得到之參數，配合調整區域阻水層之垂直水力傳導係數，以求模擬之水位回升趨勢與真實情況接近。其中模擬時間為民國 85 年的為試驗 2-1，模擬時間為民國 84 年的為試驗 2-2。由於在觀測水位中，不論是試驗 2-1 或試驗 2-2，皆以西邊之海豐站水位回升量最高，和豐站次之，東邊之興化站最低，故調整所得之垂直水力傳導係數亦將由東向西逐漸增加，以期能符合觀測水位回升量趨勢。這亦與西邊水井較多，東邊水井較少之事實相符。所以在試驗中將區域阻水層分成六個區段分別進行調整，其中分區六為最東邊，分區一為最西邊。本試驗以試誤法進行，多次調整六個區段之垂直水力傳導係數，以求達到模擬水位與觀測水位回升形態一致。

先比較模擬水位與觀測水位之間的關係。以最西邊之海豐站為例（圖 5.8），試驗 2-1（模擬時間為 85 年）在模擬開始的時候其水位上升的較快，而觀測水位較慢，直到後段其回升速率變大，而模擬水位回升速率變小，才使得兩者於最後重合。由於模擬假設在這段時間內完全沒有抽水，但由海豐站觀測水位的微小波動可知，由模擬時段內還是有部份抽水，使得模擬結果與觀測水位之回升趨勢不甚一致。而試驗 2-2（模擬時間為 84 年）之模擬結果較為吻合，除了後段可能因抽水而使模擬水位之回升量大於觀測水位之回升量外，回升趨勢大致相同。而其餘兩站模擬水位與觀測水位亦大致一致。最後結果顯示，不論試驗 2-1 或試驗 2-2，模型中第一區阻水層之垂直水力傳導係數皆較第二至第六區大上許多（表 5.2）。由此可知，由於西部濱海地區深井數目眾多，淺處地下水經由井管直接補注深層區域含水層，可能是西部濱海地區在暴雨停抽期間，水位大幅回升的主因（圖 5.9）。

表 5.2 試驗 2-1、2-2 模擬之區域阻水層垂直水力傳導係數

試驗 2-1 (模擬時間：85 年)	分區	一	二	三	四	五	六
	垂直水力傳導係數 (區域阻水層 :m/sec)	1.30E-06	5.50E-07	4.50E-07	3.50E-07	2.50E-07	1.90E-07
試驗 2-2 (模擬時間：84 年)	分區	一	二	三	四	五	六
	垂直水力傳導係數 (區域阻水層 :m/sec)	2.00E-06	1.00E-06	7.90E-07	5.80E-07	3.70E-07	1.50E-07

(其中分區一為最西邊，分區六為最東邊)

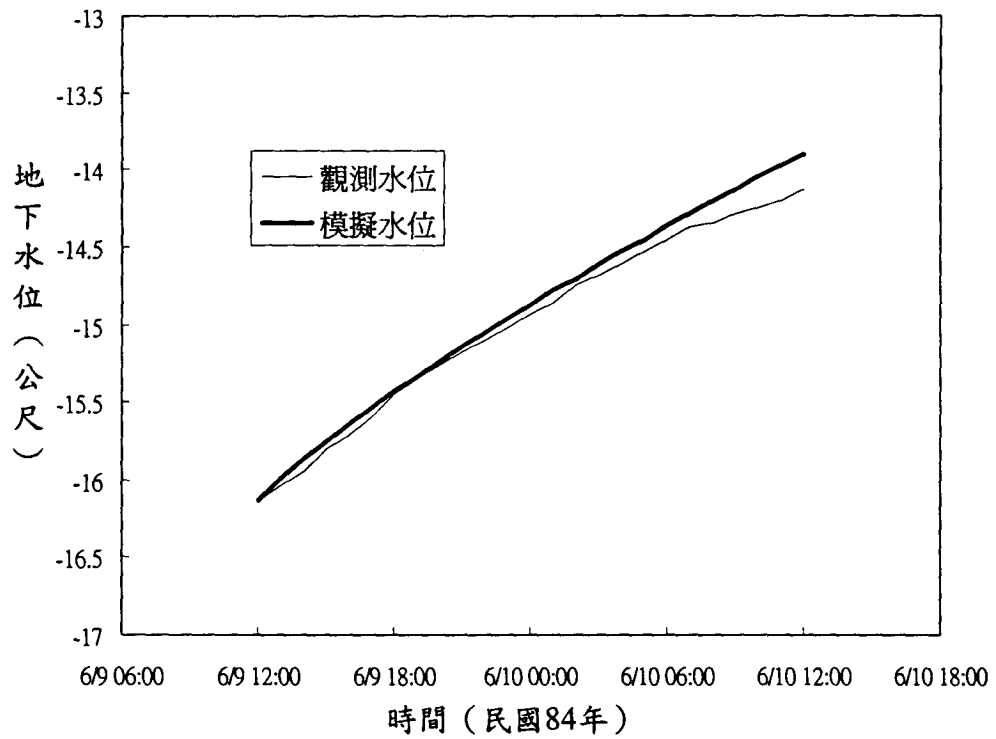
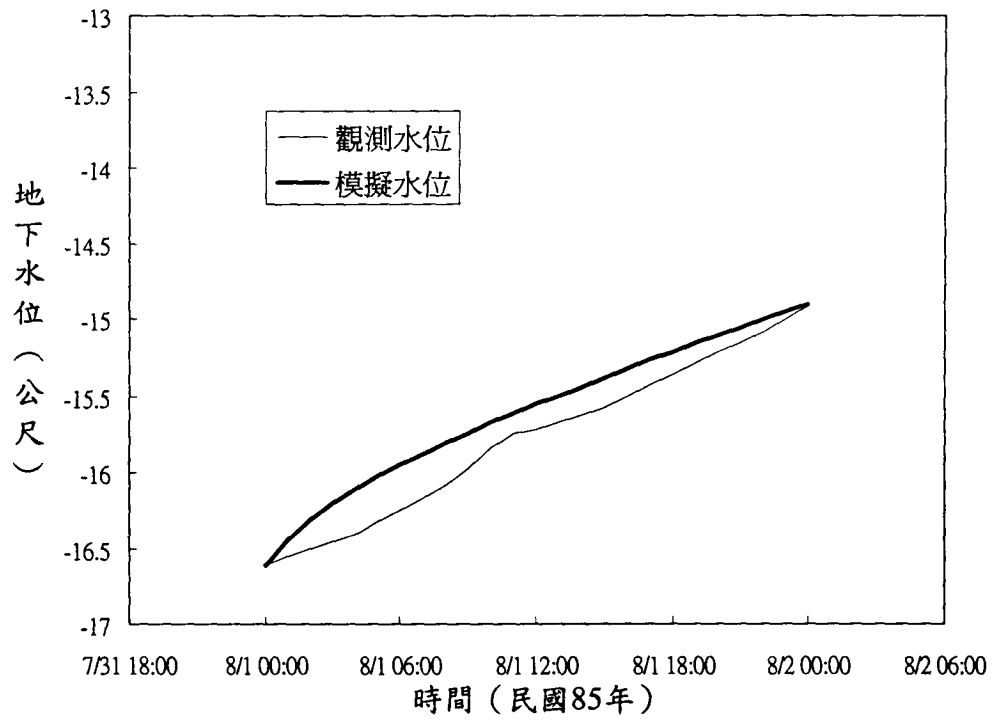


圖 5.8 試驗 2-1、2-2 海豐站模擬水位與觀測水位之比較

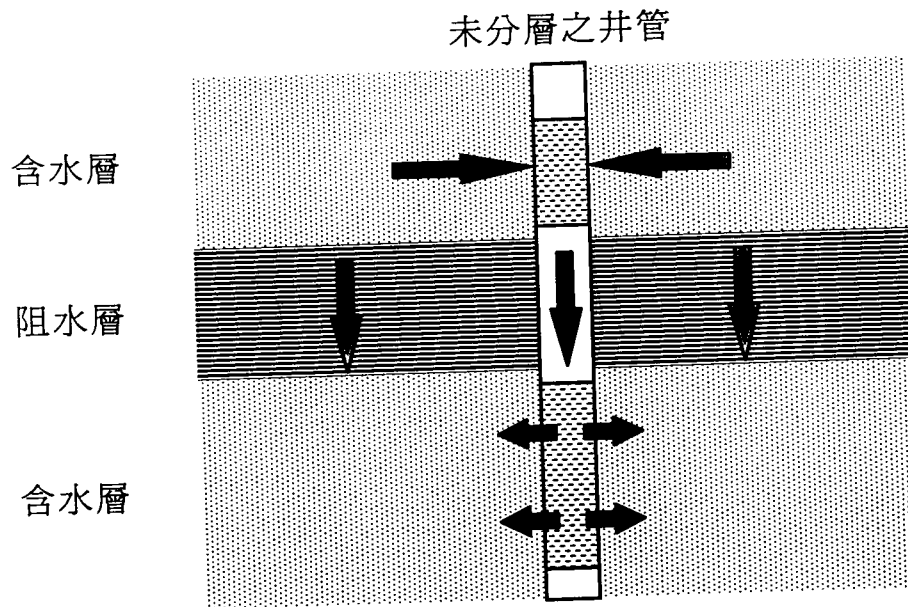


圖 5.9 淺層地下水經由地層及井管垂直補注深部地下水

分析此時之補注量，試驗 2-1 由模型水平方向（即東、南、西、北側）所補注之水量約為 $3,850 \text{ m}^3/\text{day}$ ，而垂直方向（即上、下側）所補注之水量約為 $11,500 \text{ m}^3/\text{day}$ ，垂直補注量占總補注量約 75 %；而試驗 2-2 平方向之補注量約為 $3,340 \text{ m}^3/\text{day}$ ，而垂直向補注約為 $13,800 \text{ m}^3/\text{day}$ ，垂直補注量占總補注量約 81 %（表 5.3）。此補注量為整層含水層之平均估算結果。但西邊之垂直水力傳導係數為東邊之 8 至 12 倍，由此情形看來，位於西邊濱海地帶之垂直補注量應較東邊大上許多。值得注意的是，試驗 2-2 所得到之區域阻水層垂直水力傳導係數，相較於試驗 2-1 所得到的結果，於西邊差異較大，在垂直補注量方面，兩年模擬之結果，試驗 2-2 為試驗 2-1 的 1.2 倍。推測因民國 84 年 6 月暴雨時沿海發生海水倒灌，地表淹水高度達 2、3 公尺以上，使得此時補注機制不僅包括一般暴雨停抽時淺層地下水經井管補注區域含水層，由於海邊可能有未封口或廢棄的水井，故尚包括地表海水順井管直接注入，加入此補注機制將使垂直補注量較一般暴雨停抽時更為可觀。

由模擬結果指出，模擬水位雖與觀測水位有些許差距，但大致的回升趨勢與回升量仍為符合，表示暴雨停抽期間，沿海地區區域含水層之地下水回升量有 75 % 是由垂直補注所提供，特別是再加上海水倒灌情形，其垂直補注量更可達到 81 %。

表 5.3 試驗 2-1、2-2 模擬之區域阻水層水平與垂直補注量

試驗2-1 (模擬時間：85年)	水平向補注量 (m ³ /day)	垂直向補注量 (m ³ /day)	垂直補注所占百分比
	3,850	11,500	75%
試驗2-2 (模擬時間：84年)	水平向補注量 (m ³ /day)	垂直向補注量 (m ³ /day)	垂直補注所占百分比
	3,340	13,800	81%

第六章 討論

6.1 地層下陷趨勢

近年雲彰地區的下陷情形不僅發生在沿海地區，內陸地區的下陷情況日益嚴重，在彰化二林地區年下陷量就高達 10 公分，且下陷趨勢未見緩和；而雲林地區的崙背鄉、褒忠鄉及東勢鄉等內陸鄉鎮的年下陷量皆逐年增加且下陷速率大於濱海地區，由此可知內陸的下陷中心已逐漸形成，顯見造成下陷的原因已不單純是沿海養殖漁業抽取地下水的問題。由年平均地下水位的變化情況而言，雲林內陸地區的地下水位降幅明顯偏高，因此推測地層下陷仍與抽取地下水有關，至於造成內陸地區地下水位下降的原因，尚須進一步調查。

6.2 地下水鹽化

由井測記錄指出，其中兩站的電阻率電測記錄在淺部地層中皆出現異常的低值，進一步分析電阻率的影響因素包括地層岩性、孔隙率、孔徑變化、地下水的鹽度及總固體溶解濃度等，經比對其他井測記錄後，排除地層岩性、孔隙率等因素，以地下水的鹽度影響最有可能，推測當地淺層地下水的鹽度較高，因此電阻率電測所偵測到的地層電阻也較低。豐安國小站的地下水鹽化現象發生在深度 35 公尺以內，推測是因淺層阻水層的阻隔效果才降低深層鹽化問題，而海園站的地下水鹽化現象則呈隨深度漸變的情況，淺部地層地下水鹽化的現象較為嚴重。造成淺層地下水鹽化的主要原因推測是鹹水魚塢入滲及海水倒灌。

6.3 垂直補注量

模擬結果指出，研究區域於暴雨停抽期間，淺層含水層之垂直補注為區域含水層水位大幅回升之主因。民國 85 年賀伯颱風期間，8 月 1 日 0 時至 24 時期間內的垂直補注量約為 11,500 m³，占總補注量之 75 %。而民國 84 年 6 月豪雨引發海水倒灌時期，淺部含水層與倒灌海水之垂直補注造成區域含水層水位回升更加迅速，其中 6 月 9 日 12 時至 6 月 10 日 12 時共 24 小時內的垂直補注量達到 13,800 m³，占總補注量之 81 %。Rushton (1986) 估計印度 Gujarat 地區一平方公里的範圍，其一天的垂直補注量即可達 3,000 立方公尺，占總補注量之 97 %。此例所在區域僅有少數抽水井大量抽取地下水，造成垂直水力坡降增加，故地下水順地層垂直補注深部含水層，與雲林沿海地區水井密集之情況不同。雲林沿海地區為數眾多且未分層的水井，可能提供管道使淺部地下水快速垂直補注深層含水層，其補注量也應十分可觀。

6.4 海水倒灌與垂直補注

濁水溪沖積扇沿海地區因大量超抽地下水，60 至 200 公尺區域含水層之地下水位大幅下降，已低於淺層水位，故地下水可經由地層或井管由淺部垂直下滲補注至深部，但於暴雨停抽時其水位即出現回升迅速的現象。推測海水倒灌時，不僅淺部地下水經地層或井管垂直補注深部，倒灌之海水也可能順著廢棄、腐蝕或未作好封口的水井直接灌入區域含水層（陳享宗，1997），因此其垂直補注速率甚高，使得深、淺層地下水位皆出現迅速回升的現象，且延時甚長。而在地下水質方面，由於沿海地區眾多鹹水魚塢的排水，入滲淺處含水層，再經由井管補注深處區域含水層，可能導致區域含水層逐漸鹽化，特別是海水倒灌時期，大量海水入滲淺層含水層，再經由井管與地層直接垂直下滲至深層含水層，其長期造成的地下水鹽化問題可能更為嚴重。

第七章 結論

1. 利用多項井測方式在現地測勘地層特性，分析及對比結果指出本區地層和緩，且連續性頗佳，明顯地改進了過去根據土樣建立地層柱狀圖之間難以對比，以致誤導本區地層架構之缺陷。
2. 分層地層下陷觀測記錄及地表水準檢測結果綜合分析指出，地表下 52 公尺以內幾乎已無地層下陷，深度 200 公尺之內的地層下陷亦趨緩和，而 200 至 300 公尺之間的下陷則日益嚴重，顯見地層下陷往深處發展的趨勢。建議水利主管單位及早謀求解決之道。
3. 本區主要發生壓密的地層，其泥質含量相對較高；此外，由電阻率電測結果指出豐安國小站深度約 35 公尺以內可能已有地下水鹽化的現象，而海園地區則發生在地表至 200 公尺之間，地下水鹽化呈往下遞減的現象。
4. 分層地層下陷觀測範圍內之觀測下陷量與模擬預測結果甚為接近，證實地層下陷預測之可行性，並確認在下陷區進行水文地質調查及分層地層下陷監測之必要性。
5. 淺層地下水經由井管垂直補注深處區域含水層，可能是濱海地區在暴雨時停抽地下水期間，水位大幅回升的主因。利用暴雨時地下水停抽期間之地下水位記錄所進行之模式推估，得知民國 85 年賀伯颱風期間，垂直補注量約佔總補注量之 75%；而民國 84 年沿海發生海水倒灌期間，垂直補注量更達到總補注量之 81%。
6. 濱海地區的垂直補注量可能逐漸增加，預期將使倒灌的海水及淺層含水層中高鹽度的地下水，經由井管而逐漸污染較深處的區域含水層，宜及早謀求對策。
7. 近年來雲林地層下陷最快的地區已由濱海地區移至中西部內陸地區，反映出農業抽水影響日增。

參考文獻

- Hilchie, D. W., Mills, W. R., Dennis, C. L. and Givens, W. W. (1968) Some Aspects of Pulsed Neutron Logging: SPWLA Ninth Annual Logging Symposium, p. 46~69.
- Lin, L. H., Lin, H. R., Ke, A. H. W. and Chou, T. H. (1992) Petroleum Potential of the Pre-Miocene Formations in the Chianan Plain, Taiwan: Petroleum Geology of Taiwan, 27, p. 177~197.
- McGhee, B. F., McGuire, J. A., and Vacca, H. L. (1974) Examples of Dual Spacing Thermal Neutron Decay Time Logs in Texas Coast Oil and Gas Reservoirs: Proc. SPWLA Fifteenth Annual Logging Symposium, p. 242~273.
- Schlumberger (1989a) Log Interpretation Principles/Applications: Schlumberger Educational Services.
- Schlumberger (1989b) Cased Hole Log Interpretation Principles/Applications: Schlumberger Educational Services.
- Serra, O. (1984) Fundamentals of Well-log Interpretation: ELSEVIER, p.89~203.
- Shlemon, R. J. (1995) Groundwater rise and hydrocollapse: technical and political implications of "Special Geologic Report Zones" in Riverside County, California, USA. IAHS/AISH Pub. No. 234, p.481~492.
- 工研院能資究所 (1992) 雲林縣口湖地區及屏東縣林邊地區地盤下陷之調查研究一期末報告, 經濟部, 第 1~107 頁。
- 工研院能資所 (1998) 台灣地區之地層下陷監測調查研究-宜蘭、彰化、雲林、嘉義、屏東地區, 經濟部水資源局, 第 3.1-1~3.1-65 頁。
- 工研院能資所 (1998) 地層下陷區水準點檢測-雲林縣沿海地區, 經濟部水資源局, 第 22~36 頁。
- 亢玉瑾 (1968) 台灣降水特性之分析, 台灣大學理學院地理學系研究報告, 第 5 期, 第 25~47 頁。
- 水利局 (1997) 濁水溪沖積扇地下水水文初步分析, 經濟部, 第 15~24 頁
- 水利局規劃總隊 (1986) 雲林沿海地區地層下陷檢測報告, 台灣省水利局, 第 1~15 頁。
- 水利局規劃總隊 (1990) 濁水溪平原地下水位及地層下陷分層觀測研究, 台灣省水利局, 第 1~54 頁。
- 水利局規劃總隊 (1993) 彰化、雲林沿海地區地層下陷檢測, 台灣省水利局, 第 1~33 頁。

- 水利局規劃總隊 (1995) 雲林沿海地區地層下陷檢測計畫，台灣省水利局，第 1~55 頁。
- 王鑫 (1990) 彰濱海岸侵蝕與堆積研究，台灣大學理學院地理學系研究報告，第 14 期，第 109~123 頁。
- 台灣省水利局 (1985) 集集共同引水計畫可行性規劃，二、水源專題報告，4. 水源調蓄運用規劃研究，第 1~224 頁。
- 江崇榮、賴典章、黃智昭、賴慈華、陳利貞 (1996) 濁水溪沖積扇之水文地質與地下水系統概念模型，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，第 127-143 頁。
- 江鴻 (1956) 台灣有驚人的地下水等待著我們去開發，台灣水利，第 4 期，第 3 卷，第 4 頁。
- 何春蓀 (1955) 台灣之地質與地下水資源，台灣水利，第 3 期，第 1 卷，第 10~18 頁。
- 何春蓀 (1986) 台灣地質概論台灣地質圖說明書，經濟部中央地質調查所，共 163 頁。
- 林輝山 (1998) 未固結沉積物中井測記錄之孔徑校正及岩性分析，台灣大學地質學研究所碩士論文，共 82 頁。
- 柳志錫、歐陽湘 (1993) 雲林沿海地區之地盤下陷問題：營建知訊，第 135 期，第 5~21 頁。
- 張若磐、余進利、劉振宇及李慶祥 (1995) 地電阻測勘法應用於海水入侵之調查：地下水資源及水質保護研討會論文專輯，第 441~451 頁。
- 張瑞津 (1985) 濁水溪平原的地勢分析與地形變遷，師大地理學研究報告，第 11 期，第 199~228 頁。
- 曹以松、江漢全 (1993) 濁水溪沖積扇地下水質調查研究，經濟部水資源統一規劃委員會，共 69 頁。
- 曹以松、陳京台 (1981) 雲林地區地下水數學模式之模擬與應用，台灣水利，第 29 期，第 4 卷，第 11~56 頁。
- 楊萬全 (1989) 濁水溪平原的水文地質研究，師大地理學研究報告，第 13 期，第 57~87 頁。
- 經濟部水資源統一規劃委員會 (1957) 濁水溪流域開發初步規劃報告，共 232 頁。
- 經濟部水資源統一規劃委員會 (1989) 中華民國台灣水文概況，共 25 頁。
- 經濟部水資源統一規劃委員會 (1992) 台灣地區地下水資源，共 45 頁。

- 賈儀平，陳鴻泉（1997）台西及麥寮地區地層下陷之研究，第二屆地下水資源及水質保護研討會論文集，第 275~289 頁。
- 賈儀平、王原賢、洪榮聰（1993）雲林縣臺西地區地盤下陷之模式分析，營建知訊，第 132 期，第 22~34 頁。
- 賈儀平、劉振宇（1994）台灣地區地下水觀測網第一期計劃，水文地質調查研究及建檔八十二年度報告，水文地質特性研究與水文地質圖編製，經濟部中央地質調查所，共 117 頁。
- 賈儀平、劉振宇、洪榮聰（1994）雲林地區水文地質架構及地下水流概念模型之探討：地下水資源及水質保護研討會論文專輯，第 99~117 頁。
- 盧詩丁（1995）雲林地區水文地質特性及其演變：台灣大學地質學研究所碩士論文，共 77 頁。