

臨海離島式工業區地下水鹽化現象研析

Assessment of groundwater Salinization on Offshore Industrial Park in Taiwan

國立成功大學資源工程學系
博士候選人

梁蜀昀*

Shu-Yun Liang

國立成功大學水工試驗所
助理研究員

周晏勤

Yen-Chin Chou

國立成功大學水工試驗所
組長

吳育生

Yu-Sheng Wu

國立成功大學資源工程學系
教授

李振誥

Cheng-Haw Lee

美商傑明工程顧問(股)
台灣分公司

黃俊穎

Jun-Ying Huang

摘 要

本研究藉由水質濃度關係式運算與三維數值模式 GMS-Modflow&MT3DMS 模擬離島式基礎工業區地下水層水質鹽化之流佈情境，探討該區之鹽化指標變化特性。此研究區域屬於全新世之新三角洲沖積層，其地層組成主要以黏土、粉砂、砂和礫石為主；水位高程約為 0.15~1.96 m，各監測井之相對水位高程相差不大，流場與海邊邊界具相關性。由模式運算結果得知地下水流速約為 2.7×10^{-7} cm/sec，場區北方與中央位置之水位較高，地下水流多由中間位置往四週海邊方向流動，符合島嶼型地下水位凸透鏡狀分佈。該區域地下水無側向補注，主要地下水來源為降雨，在無抽用地下水促使海水入侵之情形下，其歷年地下水水質之鹽化指標測值顯示，雖海淡水介面溶質交換會影響鹽化指標降低之速率，離海較遠之地下水淡化速率較快；較靠近海邊之地下水淡化速率較慢，但無論是臨近海邊或遠離海邊之地下水，至今約經過 10 多年之降雨淋洗，地下水均淡化至接近淡水，氯離子濃度約為 3000 mg/L。

關鍵詞：鹽化指標，濃度關係式運算，數值模擬。

*通訊作者，國立成功大學資源工程學系博士候選人，32069 中壢市中園路 57 巷 10 號，n4896114@mail.ncku.edu.tw

ABSTRACT

The salinization process was investigated with hydrogeochemical tools to evaluate the new Delta Holocene alluvium, and the zone components are based on the formation of clay, silt, sand and gravel-based. Water level elevation vary between 0.15~1.96 m. The results of the research show that, the groundwater flow rate of approximately 2.7×10^{-7} cm/sec, water level high block locate at the north and central location field area, by the middle of the groundwater flow direction to flow around the beach, in line with the island-type-like distribution of groundwater lens.

The purpose of this study was to assess aquifer salinization in the coastal area of the Offshore Industrial Park in Taiwan by using GMS- Modflow & MT3DMS simulation and Calculated salinization concentration. When fresh water was recharged into the shallow aquifers, the ascended groundwater levels reduced chlorine concentrations and remedied aquifer salinization. The results showed that although the sea and fresh water interface solute exchange will impact to reduce the rate of salinization indicators from groundwater desalination of sea far faster rate than close to the sea shore groundwater desalination slower rate; whether it is close to the sea or away from the beach groundwater around after 10 years of rainfall leaching, are dilute to near fresh water, the chloride ion concentration of about 3,000 mg/L.

Keywords: Numerical simulation, Salinization indicators, Concentration in a well changes at a rate equation.

一、前言

台灣石化工業自中油第一套輕油裂解廠於1968年啟動開始，發展至今已四十年，其在各產業發展的時代皆扮演舉足輕重的角色，該產業在台灣之產值約1.32兆台幣，產能佔全球第9位(經濟部工業局，2010)。有鑒於國際間石油腦之需求高，近年來台灣政府與企業陸續提出於沿岸地區填海造地擴增石化廠之政策規劃，但石化產業除帶來高經濟效益外，隨之而來的高汙染與工安問題亦備受爭議，因此相關政策執行之可行度評估，多以設置年期相近之麥寮六輕離島式工業區(以下簡稱本研究區)為重要的審視標的。

石化產業除空氣、地面水汙染事件時有所聞外，其大型地下儲油槽及加油站管線設備，易因老舊未汰舊換新，且受到鹽份腐蝕等因素之影響，導致漏油汙染土壤地下水造成石化工業之害，此亦被視為最複雜且最棘手之環境汙染議題

(吳欣蓉，2004)。為協助妥善管理與預防儲油槽、管線鏽腐情形發生，本研究針對該場址可能造成地基、儲槽、管線損壞之鹽化現象進行研討，期能藉以避免鹽份腐蝕導致建築物使用年限縮短、輸送管線破損，進而造成有毒物質滲漏、汙染地下水之情形發生。

本研究區係汲取海砂填海造陸之新生地，恐有鹽份釋出造成工廠管線或儲槽破損之虞，因此本文即以此研究區之地下水水質鹽化指標(導電度、總溶解固體量、氯鹽及硫酸鹽)長期監測資料進行運算，另選擇氯鹽做為指標代表物質進行數值模擬，探討鹽化指標隨時間及空間之變化特性。

二、材料與方法

2.1 研究區域地理概況

本研究區屬於厚層、鬆散未膠結之現代河川沖積層，沖積物來源主要經由濁水溪及虎尾溪兩

條河川夾帶中央山脈及其麓山地帶之沖蝕物沖積而成(郭紘志, 2004), 其沖積層厚度介於 240~400 m 間, 岩盤深度則由新興區西南端的 240 m 深逐漸增加至麥寮區東北端的 400 m 深, 岩盤面平均傾角約為 0.41 度。沖積層可概分為兩層, 其界線範圍為由南端的地表下 110 m 漸深至北端的地表下 200 m, 上層主要以泥層及泥質砂層為主, 間夾少部份沖積礫石層; 下層則以砂層、含礫砂層及沖積礫石層為主, 間夾少許泥層(中興工程顧問社, 1992)。

此區域原為海平面以下之潮間帶, 為使其成為可用之土地, 首先以打 PC 樁或輕拋石方式圍堤, 而後採用大型水力抽砂及陸運填砂方式建造南北長約 8 km, 自海岸線向外海延伸 4 km, 總開發面積約為 2,603 HA 之開放型海埔新生地。填築造地設計高程為 EL.+4 m, 填築土層厚度最小約為 4 m, 最大則約達 16 m。建廠過程採用預壓密工法(PL)加速廠區浚砂層及原地層之壓密沉陷; 抽砂造地後惟恐日後可能會因地震或其他等震動因素而產生液化問題, 此區域陸續進行大型地改動作-動力夯實工法(改良厚度 7~13 m)、部份廠區搭配擠壓砂樁、覆土預壓工法、或礫石樁工法(改良厚度 13~20 m)提高其強度。其碼頭均採用棧橋式與鋼板樁護岸。全區灘地除已開發完成之海埔地外, 其餘均為平緩的潮間帶, 該區域直接受潮水風浪沖擊, 低潮線以上無顯著之地形變化。地面自然坡度以東西向為主, 其坡勢自現有海岸線起以 1/2000 坡度緩緩向海趨降, 至低潮線後改以 1/250 之較陡坡度入海。灘地之南北向坡勢, 自濁水溪出口起, 沿著海岸線向舊虎尾溪口緩降, 自然坡度約為 1/5000(台灣塑膠工業股份有限公司, 1999)。

廠區內設置有煉原油 2,500,000 ton 的煉油廠、年產乙烯 293,500 ton 輕油裂解廠及其相關石化工廠、重機械廠、汽電廠及麥寮工業港等, 並利用隔離水道、綠林與內陸隔離(台塑六輕營建部, 2010)。

2.2 研究區域水文地質條件

此研究區域之地層主要為深灰色砂質沉

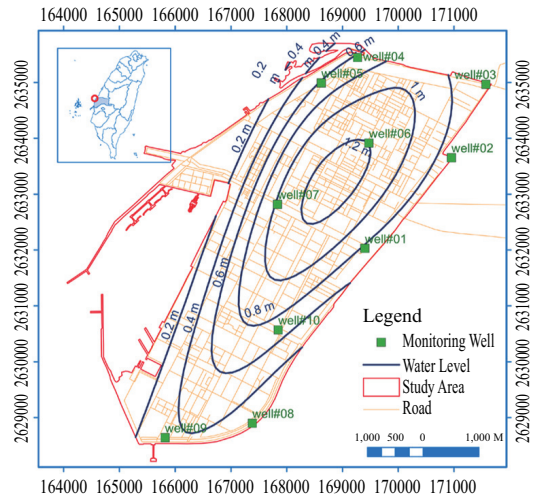


圖 1 研究區域環評井地理位置圖

泥、沉泥質細砂及褐色或暗黃色沉泥質黏土構成之互層、夾層, 之間或有少數低塑性黏土與級配不良之細砂層, 顯示土層沉積複雜、多變且無規則性。各種土層之厚度不一, 互層、夾層厚度從數 cm 至數 m 皆有, 少見厚層土壤, 反應沉積過程之變化。土層可概略區分為四至六層, 一般而言, 地表淺層土壤以沉泥質細砂居多, 至不同深度再出現沉泥或黏土層, 形成一層沉泥質細砂、一層黏土或沉泥交互層疊而成之情形(行政院環境保護署, 2009)。

自本研究區闢建階段起, 即配合我國環境影響評估法之規定, 於區內設有淺層地下水監測井, 進行地下水水文及水質之監測, 其地理位置與監測井點位如圖 1 所示。

一般而論, 除人為抽水或注入外, 降雨是影響地下水位變化之重要因素, 且其影響是非線性的。由監測結果可知, 本研究區淺層地下水之補注來源主要為降雨入滲, 因此降雨荷重成為影響地下水位變化之主因, 側向補注之影響相當微小; 而本研究區之監測井水位均高於平均海平面, 可確定本區尚無海水入侵之潛勢; 且各監測井間之相對水位大致上呈現穩定關係, 表示整體而言本區之區域性地下水流場穩定。

本區為孤島式地形, 其地下水分佈型態依 Ghyben (1889)及 Herzberg (1901)各自發現之理論

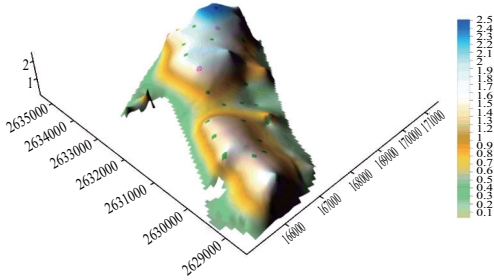


圖 2 研究區域水位高程立體圖

指出，海洋小島及海岸沙洲，如由均質且透水性良好的砂、熔岩、珊瑚、石灰岩等組成，通常其下為凸鏡狀體積的淡水懸浮於海水之上，故其水流由中央向四周流動，如靜水壓達到平衡，淡水體積形狀應符合阿基米德原理，本研究將水位高程繪製成立體圖(圖 2)，亦即清楚觀察出此現象。圖中顯示本區之地下水概略呈現凸透鏡體，水流由中央往四周流。

2.3 地下水流速與水質濃度運算

由於水平方向之地下水難直接目視與量測，傳統之調查方法多採間接利用監測井之設置或示蹤劑試驗，求得水平方向上之地下水流速。

Freeze & Cherry (1979)指出，蘇聯(USSR)於 1940 年代研究利用稀釋試驗(borehole dilution)估算地層中地下水流速之方法，其於單井注入已知濃度之示蹤劑，其後量測井中示蹤劑濃度隨時間變化，從而推知其關係式如式 1，又井中與地層中地下水流速間的關係式如式 2。

$$C_t^* = C_0 e^{-v^* A t / W} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$v^* = v \alpha n \quad \dots\dots\dots (2)$$

其中 C_t^* 為 t 時間的濃度， C_0 為初始濃度， v^* 為井中地下水流速， t 為經過時間， A 為水流經過井中之垂直剖面面積， W 為井中水體積， α 為井中與地層中地下水流速之調整因子， n 為地層之孔隙率。

本文以此運算式推求地下水流速與鹽化濃度之相互關係。

2.4 數值模式應用

GMS 是一針對數值模式所發展之綜合性圖形介面環境軟體，其由美國楊百翰大學(Brigham Young University)與美國陸軍水道工程試驗站(U.S. Army Engineer Water Ways Experiment Station)所共同合作發展。這套軟體介面結合地理資訊系統(Geographical Information System, GIS)及地下水數值模式(MODFLOW、MODPATH、FEMWATER...等)，提供了數種執行方程式的前置作業整合介面(Brigham Young University, 1992)。

在三維地下水流場的模擬上，GMS 軟體介面可支援有限差分法之 MODFLOW 三維度之地下水水流模擬模式，不論是穩態(steady)抑或是非穩態(unsteady)、拘限含水層(confined aquifer)或是非拘限含水層(unconfined aquifer)、甚至拘限含水層與非拘限含水層混合而成的多層地下水含水層系統，皆可以 MODFLOW 進行模擬(丁繼紅等人，2002)。

MODFLOW 依據每一格網元素(cell)之水文地質特性設定為均質、非均質以及等向性、非等向性等類型之含水層，以數個模組(modules)所組合而成之模組群(packages)，進行各種水文地質條件下水流模式模擬。其數值法求解方法採用迭代運算技巧，為強制隱式法(strongly implicit procedure, SIP)、片式連續鬆弛法(slice-successive over relaxation, SSOR)及預置共軛梯度法 II (preconditioned conjugate-gradient 2, PCG2)。以下是 MODFLOW 所求解的非侷限含水層偏微分方程式(Pollock *et al.*, 1989)：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_{xx} \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_{yy} \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_{zz} \frac{\partial h^2}{\partial z} \right) - w = S_y \frac{\partial h^2}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

- 其中， K_{xx} ：沿 X 軸的水力傳導係數
- K_{yy} ：沿 Y 軸的水力傳導係數
- K_{zz} ：沿 Z 軸的水力傳導係數
- W ：單位體積下的體積通量
- S_y ：比出水率

在三維度地下水污染傳輸模擬方面，GMS

軟體介面提供支援 MT3DMS、RT3D、SEAM3D 及 LEWASTE(已整合在 FEMWATER 模式內)供使用者自由選擇。為達成本研究之目的，吾採用 MODFLOW 計算地下水流場，搭配 MT3DMS 模式計算污染物傳輸擴散之現象。此流場與污染物傳輸分開計算的方式是基於污染物對於流場之影響可以忽略的假設。此假設可適用於大部分的污染物傳輸，並且可以簡化計算的複雜性。

MT3DMS 針對多維度空間之孔隙介質，利用平流、延散(擴散)及化學反應機制進行地下水之污染傳輸模擬。在二維空間下，均勻流場之溶質傳輸控制方程可表示如下(Wiest *et al.*, 1995)：

$$\left[D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right] - \left[v_x \frac{\partial C}{\partial x} \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \dots\dots\dots(4)$$

其中，C：濃度，

D_x 、 D_y ：x、y 方向上之水動力延散係數

v_x ：x 方向上之平均滲流速度

t：時間

模式模擬運算流程：第一階段為利用地下水流模式追蹤標的物位置與注入流量，所需輸入資料包括地質鑽探資料、水文地質參數資料、地下水水位監測、初始與邊界條件、標的物位置及標的物注入流量。輸入完畢，進行 MODFLOW 數值模式之模擬，並將模擬結果與地下水水位監測資料比對及據以校正標的物位置與注入流量，以達地下水模擬水位與監測水位相符，即完成第一階段之追蹤。第二階段是根據初始條件、邊界條件、水文地質參數、標的物排放時間及標的物注入濃度，進行 MT3DMS 數值模式模擬，並將模擬結果與地下水水質監測資料比對及校正，以達地下水模擬水質與監測水質相符，即完成第二階段之追蹤。

三、數值模式建構

因氯離子不為植物與細菌所攝取；不被土壤表面吸附；氯鹽溶解度大，不易沉澱析出，是地下水中最穩定的離子(Verschuere K., 1998)，因此本研究僅選定鹽化指標之一的氯離子進行傳輸模擬，藉以了解研究區域之鹽化情形。

本研究根據現場地質鑽探結果與 2010~2012 年間之地下水位及氯離子濃度檢測結果，以 GMS-Modflow&MT3DMS 模擬氯離子於本場址地下水系統中之流佈情形，探討相關參數與條件改變對於本研究區域氯離子分佈之影響。

模式建構首先利用地質參數進行地層分層模型建立，瞭解此區域之地下環境分布情形，而後再輸入水文地質參數模擬地下水流場。本研究首先查明研究區之地質與地下水系統空間分佈與結構特徵，並針對其鑽探資料不均採用虛擬鑽孔方法補充鑽孔資料，通過合併相似含水岩體組合、忽略透鏡體的方法概化地層結構。

3.1 地質分層

地質分佈模型之依據為麥寮六輕石化工業區建廠大地工程綜合評估顧問工作報告(1999 年)與雲林離島式基礎工業區開發歷程(2006 年)之內容。由彙整之廠區內歷次土壤岩心鑽探資料，將地層質性分為粉質細砂(SM1)、粉質黏土(ML/CL1)、粉質細砂(SM2)、粉質黏土(ML/CL2)，由於地質特性關係著地下水模式之含水層與實際狀況之反應，故先將場區數十口地質鑽井資料(地質分佈及其深度)輸入 GMS-Borehole Module 進行插值運算，Borehole 係利用鑽孔數據建立三維地質之模組，其可對鑽探資料進行管理，並利用這些資料數據自動或手動生成水文地質體與三維有限單元網格，並利用樣品數據作出等值面和等值線，以建立水文地質結構模型。由該模組建立的水文地質結構模型，依據鑽孔資料進行內差計算，確定鑽孔之間的地層展佈情形，真實準確地反映水文地質結構，其內插方法包括：Inverse distance weighted 和 Natural neighbor 兩種(McDonald *et al.*, 1988)，可根據不同的地質條件採取適當的方法進行插值計算，繪製三維水文地質岩心剖面圖，此剖面圖可作為模式建立時，研判各含水層厚度高程及地表高程之依據，提升數值模擬之準確性。Borehole 數據輸入完畢後，再以 2D-Scatter point 進行插值運算，生成該地層之高程數據，再由 SOILD 依據佈點建立一符合全區地質分佈狀況之三維地質概念

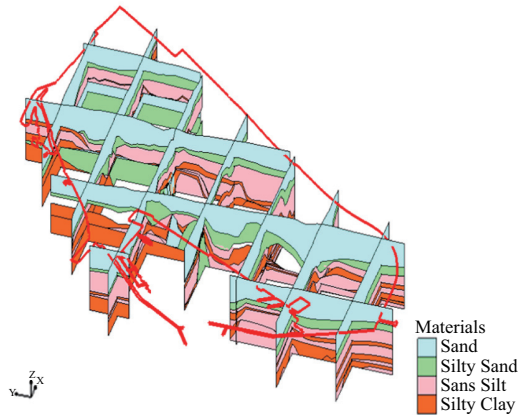


圖 3 研究區域三維地質岩心剖面

模型(圖 3)，此地質模型之岩層屬性為粉質細砂(SM1)、粉質黏土(ML/CL1)、粉質細砂(SM2)、粉質黏土(ML/CL2)。其土樣之深度分佈狀況，粉質細砂較集中存在之高程為 EL. 0 至-7 m 及 EL.-19 至-23 m，粉質黏土等較集中出現之高程則為 EL.-7 至-19 m 及 EL.-33 至-40 m。

3.2 邊界與網格參數設定

根據中興工程顧問社(1992 年)所進行之近海地區鑽探資料得知，本研究區之多層結構(尤其是淺部黏土層)，在近海地區仍有延伸，一般而言，邊界的選定須同時考慮到模擬區域之地下水頭分佈、模擬的尺度、數值運算收斂速度、邊界效應以及圍堤造地、建港方式等因素(Mortensen *et al.*, 2000)。由於六輕廠區為四面環海之島嶼地形，地下水邊界均與海岸條件相

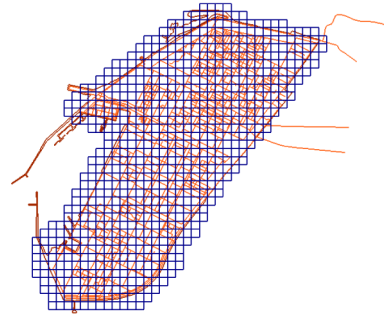


圖 4 模擬區域網格

關，為避免邊界效應，本研究設定模式西部第一層地層以海岸線作為定水頭邊界，此位置估計約於海岸線外 200 m 處，因考量其碼頭為棧橋式設計(台灣塑膠工業股份有限公司, 1999)，其通常亦設定為定水頭邊界，因此在此不另作設定；場址北方之水道淤沙嚴重，由此判斷濁水溪與地下水位等高線近乎垂直相交關係，因此將其定為零流量邊界；場址東部與南部潮位線以下定義為定水頭邊界；砂質粉土以下土層為不透水層即定為零流量邊界。

其網格切割如圖 4 所示，水平向網格大約以 200 × 200 m 之大小進行切割；垂直向之高度為 50 m，其以約 4.2 m 之網格大小進行切割，劃分為 12 層，總模擬網格數為 16,872 個。地質參數設定則依據相關文獻彙整於表 1。

3.3 地下水水位分析

賈儀平等人(1991)表示，台灣西部地區在地表下大約 200 m，從上而下可區分為三個水文地

表 1 水文地質參數

Materials	Color	K_h (m/s)	K_v (m/s)	Horiz. Anisotropy	Vert. anisotropy (K_h/K_v)	S_s (1/m)	S_y	Long. Disp.	Effective Porosity
SM1		1.00E-05	1.00E-06	1	4	1.00E-04	2.00E-01	20	2.5E-01
ML/CL1		1.00E-07	1.00E-08	1	8	1.00E-04	6.00E-03	10	2.0E-01
SM2		1.00E-06	1.00E-07	1	6	1.00E-04	6.00E-03	5	2.0E-01
ML/CL2		1.00E-08	1.00E-09	1	8	1.00E-04	6.00E-03	3	1.01E-01

淡水大學水資源管理與政策研究中心，2007

表 2 溶質傳輸參數

Materials	α_L (m)	α_T (m)	α_V (m)	D (m ² /s)	K _d (m ³ /kg)	Bulk density (kg/m ³)
SM1	4.6	1.518	0.23	1.00E-09	2.80E-06	1,600
ML/CL1	4.6	1.518	0.23	1.00E-09	2.80E-06	1,600
SM2	4.6	1.518	0.23	1.00E-09	2.80E-06	1,600
ML/CL2	4.6	1.518	0.23	1.00E-09	2.80E-06	1,600

Nowosielski, B. E., 1998

質單位：自由含水層、拘限層、拘限含水層。區域地下水流向主要是由東部地勢高區往西流入海，本研究則依循前人研究已知大區域流場之流向(吳育生，2011)，再以模式推估中尺度(離島式工業區全區)之流場方向，為此須先進行離島式工業區之旱澇季之水位變化分析，其目的在於了解工業區地下水水位變化趨勢(上升或下降)、變化幅度(標準差)、感潮與否…等。

本研究彙整廠區 10 口環評監測井(見圖 1) 2010~2011 年之地下水水位監測資料。水位監測資料對應該地區雨量站所測得之日累積雨量，推論其地下水水位變化主要受降雨量影響。該區水位高程分別為旱季約 0.2~1.9 m；澇季約 0.3~2.4 m，其水位變化明顯受到降雨量之影響；另經由模式運算可知其地下水流速約為 2.7×10^{-7} cm/sec。

3.4 鹽分溶質傳輸模擬

水流模型建置完成後，得地下水位與流速分佈，導入溶質傳輸模式(MT3DMS)中，以求得鹽分濃度在時間和空間上之分佈。於此鹽化數值模擬僅討論淺層含水層，本研究假設含水層為均質均向，不受潮汐影響，且不考慮海淡水之差異，使其在含水層中流動具一致性，並以氯離子濃度作為水質鹽化之指標，經由數值模擬，可得 0 年、7 年、14 年之濃度分佈圖。

創建溶質傳輸模式首先需輸入相關參數(見表 2)，其分別為軸向延散度(α_L)：4.6 m；側向延散度(α_T)：1.518 m；垂向延散度(α_V)：0.23 m；擴散係數(D)： 1×10^{-9} m²/sec；土壤-水吸附係數(K_d)： 2.8×10^{-6} m³/kg；總體密度：1,600 kg/m³

(Verschuere *et al.*, 1998)。

四、分析與討論

4.1 地下水流速與水質濃度運算結果

本區自 83 年汲取海砂填海造陸時，即設置 10 口環評監測井進行電導度、氯鹽、總溶解固體物、硫酸鹽之地下水水質監測，圖 5~圖 8 即為 83~101 年鹽化指標監測濃度歷線圖。83 年填海造陸之初，因地下水仍為海水，致使導電度(~110,000 μ mhos/cm)、總溶解固體物(~8,000 mg/L)、氯鹽(~28,000 mg/L)、硫酸鹽(~5,000 mg/L)之濃度皆甚高，數年後海砂中結晶之高濃度鹽份，經降雨淋溶進入地下水，此時所測得之鹽化指標測值仍超過海水濃度(海水導電度約為 45,000~55,000 mho/cm、TDS 約為 35,000 mg/L、氯鹽約為 19,000 mg/L、硫酸鹽約為 2,700 mg/L)。土壤中之鹽分一般隨著旱季隨水分蒸發而累積與汛期，降雨入滲淋洗與脫鹽的過程交替發生。降雨入滲土壤發生淋洗作用，需要可溶解土壤中鹽分的相當降雨量，使鹽分向土壤下層或水道運移，則可使鹽分平衡，不發生鹽分累積情形(Lu *et al.*, 2008)；本研究區域之早期平均日降雨量約為 114 mm；汛期之平均日降雨量則約為 463 mm，大量降雨使鹽份隨著降水由中央向四周之方向流動，約經過十多年後，地下水中之鹽分漸被淡化。

若將孤島地形的地下水鹽份濃度淡化機制視為大規模、天然的稀釋試驗，利用雙井地下水流速與示蹤劑濃度之關係，可繪出濃度的變化趨勢線。本研究分別選擇位於內陸，受潮汐與水位變化影響不大之監測井 1，與鄰近海邊之監測井 2 進行水流流速與濃度變化預測。

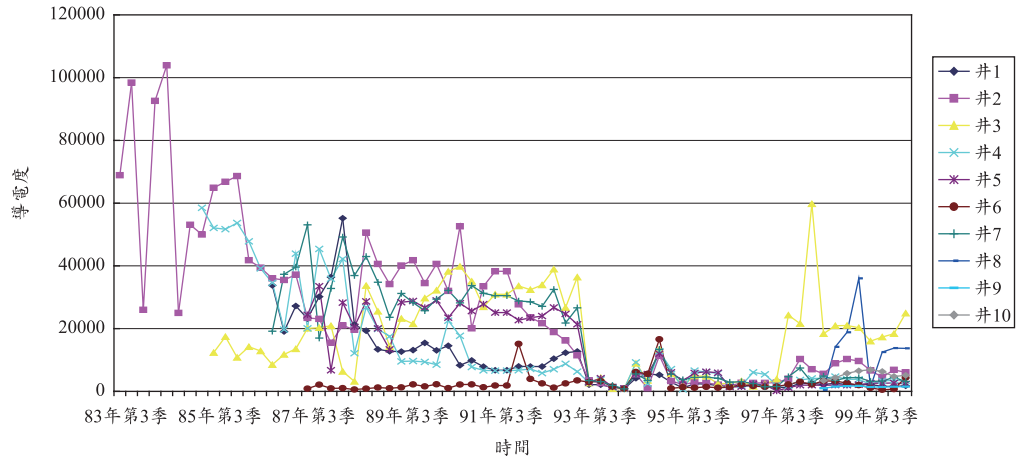


圖 5 導電度歷線圖

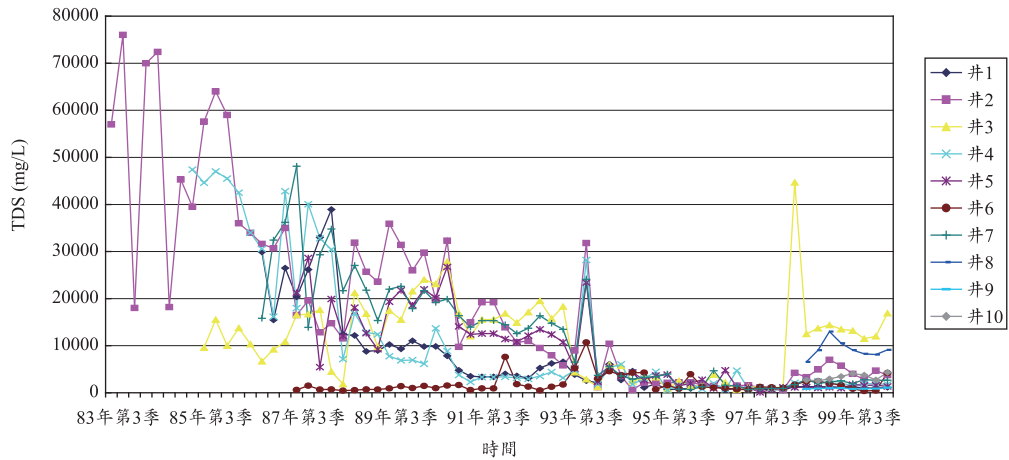


圖 6 總溶解固體濃度歷線圖

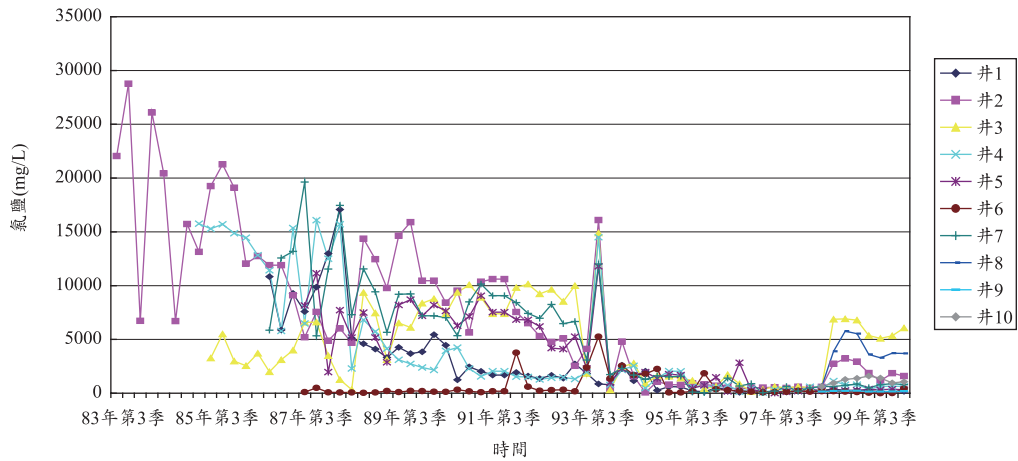


圖 7 氯鹽濃度歷線圖

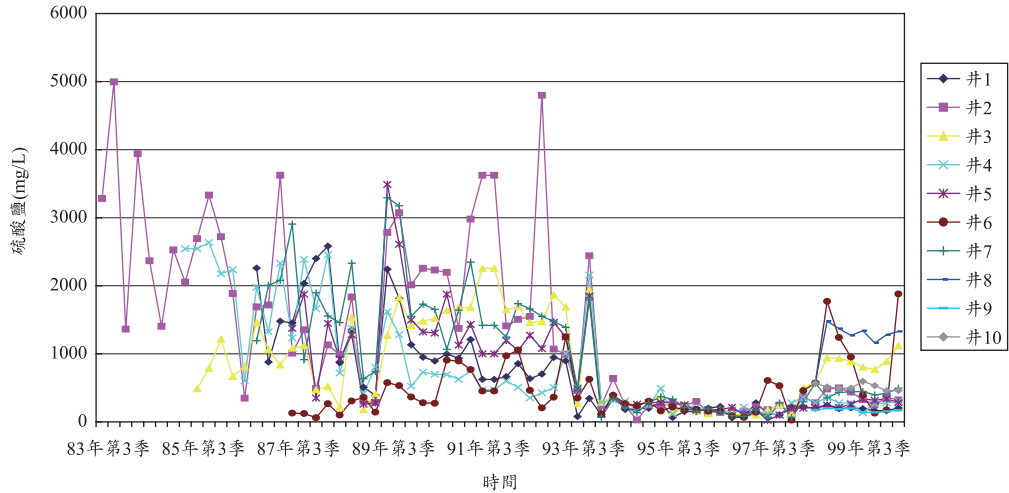


圖 8 硫酸鹽濃度歷線

計算設定本區海砂之水力傳導係數 k 值約為 10^{-4} cm/sec (31.5360 m/year)；地層中地下水流速約為 0.0671 m/year；另擇定兩口井進行運算，其面積 A 約為 0.4470 m^2 ； W 約為 0.1760 m^3 ，流速調整因子依據吳育生(2007)指出 α 約介於 3~10 間，本研究將其設定為 6.5；孔隙率 n 約為 0.25，將上述參數帶入計算式(2)(3)得到之結果，繪製成圖 9~圖 10 之擬合線圖，由圖可知填海造陸之初，海砂中之結晶鹽份經降雨淋溶進地下水，因此在初期的濃度變化較不穩定；藉由擬合線可知距海較遠之環評井 1 (約 200 m) 淡化速率較快，約 14 年左右，其水中氯離子濃度已淡化至接近淡水；反之，環評井 2 因緊臨海邊(約不到 5m)，易因補灌海水受海淡水介面溶質交換之影響，淡化速度

較緩，由擬合線推估其仍需約 20 年左右的時間才可使該井周圍之地下水脫鹽致平衡。

4.2 數值模擬

為驗證關係式運算結果之推論，本單元透過場址特徵調查資料及歷年監測資料，瞭解場址的地質特性、水文地質參數、初始條件、邊界條件等特性後，由多種地下水污染擴散模式中，選擇符合本計畫需求之 GMS 地下水軟體介面系統模組，藉由其優秀的可視化功能，進行現地 3D 結構環境模擬，準確刻畫地層的空間結構，在水流模型 (MODFLOW) 基礎上建立溶質模型 (MT3DMS)，藉以判斷水文、地層、氯離子移動狀態。

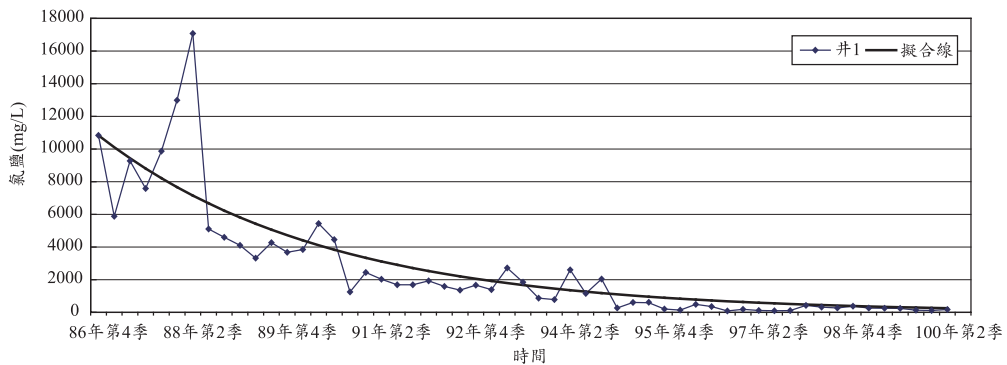


圖 9 井 1 之氯鹽濃度擬合線圖

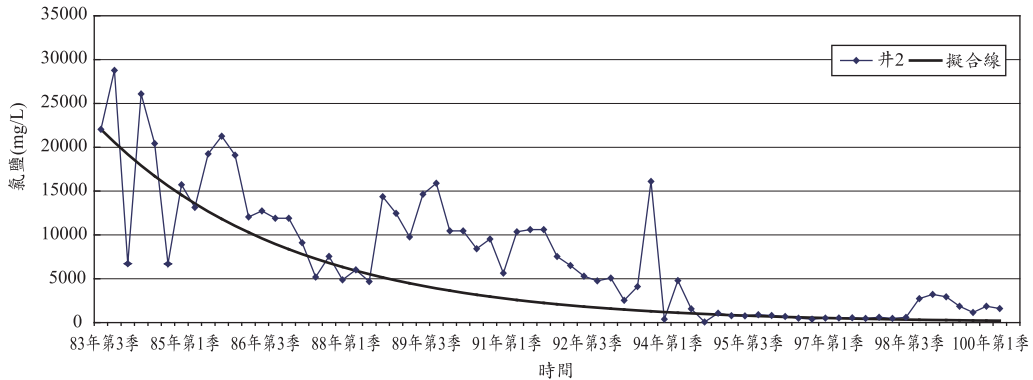


圖 10 井 2 之氯鹽濃度擬合線圖

任何模式在進行預測之前，必須經過驗證與率定，而本研究區之水文地質觀測數據多有缺漏，尚無法進行全盤之率定、驗證模式工作，為此，本模式作如下一致性假設：內陸與近海地區之地下水屬於同一系統，模式在內陸地區之正確性來自對整個系統之正確性，因此除了水位數值以率定方式進行擬合外，其地質參數或其他相關資料，皆選擇具有參考價值之雲林地區模式研究資料進行模擬，以求模式運算結果與實測結果相符。

4.2.1 流場水位設定

模式水位資料係輸入 2010 年之地下水水位監測資料進行運算，為提升概念模型之準確度，本研究以 2011 年水位監測資料進行率定。

率定屬逆分析法，透過逐一參數調整，使得地下水模擬水位更貼合實際觀測水位，其誤差值小於容許範圍時($R^2 > 90\%$)，方屬水位率定完成。根據地下水水位動態變化過程擬合觀之，此模式之水位監測值與模擬值誤差百分比(R^2)為 0.9444(見圖 11)，其可知模型計算值與實測值具有相同的變化趨勢。

4.2.2 氯離子於含水層中之變化情形

對照陳忠偉(2001)指出總溶解固體物(TDS)及氯離子與碳酸離子比值(Cl/HCO_3)作為鹽化現象之區分依據，其差異不大，故採用任一種標準可視研究需求而定。本研究考量氯離子為地下水中最穩定的離子，可作為瞭解地下水鹽化問題之指標，因此擇其作為校正與驗證觀測資料。

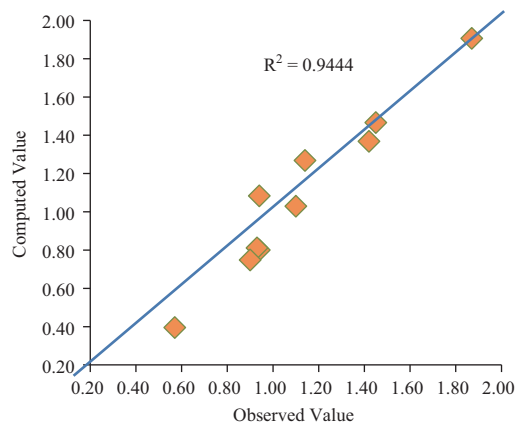


圖 11 水位監測值與模擬值之誤差百分比

傳輸模式之起始條件是以該場址初完成填土之時間為起始點，假設當時含水層充滿海水，氯離子(Cl^-)初始濃度設定為 19000 mg/L(Van der Kamp, 1972)，模擬其經 20 年左右之地下水水位及氯離子濃度改變情形。

模式模擬後須針對各項參數進行驗證，以確定其合理性，由圖 12~圖 14 可看出，氯離子濃度分佈趨勢在含水層一與實際觀測值吻合。自填土使用 0~7 年間，氯離子濃度由 19,000 mg/L 降至 9,000~13,000 mg/L；約經 14 年的時間，場址內含水層中氯離子濃度隨時間逐漸降低，約為 3,000~9,000 mg/L，推論場內海水淡化原因是由於此區地層屬於厚層、鬆散未膠結之全新世沖積層，其特性為砂礫疏鬆、孔隙率大，降雨後水流傳輸快速，在此過程中氯離子被快速帶離；另外南北區

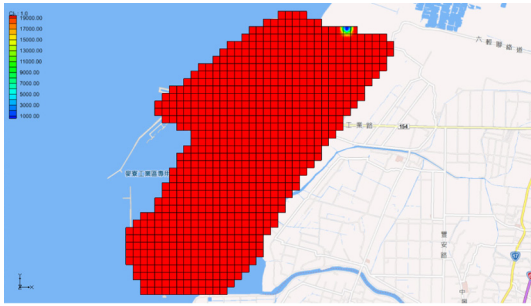


圖 12 填海造地後第 0 年氯離子流佈情形

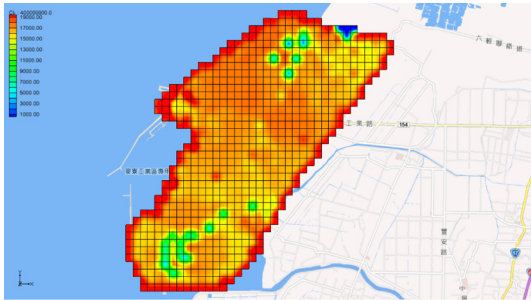


圖 13 填海造地後第 7 年氯離子流佈情形

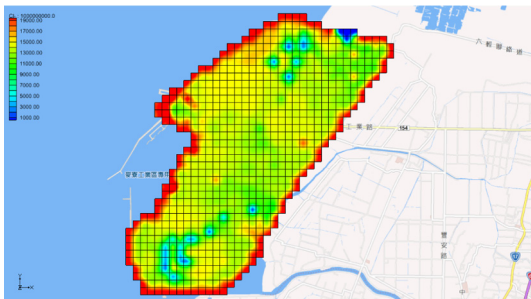


圖 14 填海造地後第 14 年氯離子流佈情形

域有局部地方，海水淡化速度明顯較快、氯離子濃度較周圍低，此區域為地表高程較高之高水頭區域，其受降雨與重力之影響較遠。

五、結論

1. 利用流速與地下水中氯鹽濃度關係式運算得到之擬合線，可推估各點位海水淡化所需之時間，如：離海較遠的環評井 1 於 14 年左右可達淡水上限；鄰近海邊的環評井 2 則需約 20

年左右的時間方可該區域之地下水含氯量達淡水標準。

2. 依據離島式工業區歷年地下水水質之鹽化指標監測結果顯示，本研究區之地下水原含鹽分較高(約 28,000 mg/L)，因長期降雨淋洗已逐年稀釋淡化至 9,000~13,000 mg/L，其淡化速率受平流(Advection)機制與海淡水介面之溶質交換作用影響，距海岸較近的點位淡化速率較慢。
3. 若欲避免鹽化情形發生，僅要確保地下水位高於海水位面，即可減少海水隨著潮汐進入廠區地層之機會。由於廠內地下水中之氯離子濃度尚未達淡水上限(200 mg/L)，若愈快速降低地下水中氯離子濃度，建議可將已經回收處理之工業廢水補注於地層下，以利快速稀釋。

六、參考文獻

1. D.W. Pollock, "Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey Modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model", U.S. Geological Survey Open-File report 89-381, 1989.
2. De Wiest, Roger, J. M., "Geohydrology", John Wiley, New York, pp .366, 1965.
3. M.G. McDonald, A.W. Harbaugh, A modular, "Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological survey", Book 6, 1988.
4. Mortensen, A. P.; K. H. Jensen; T. O. Sonnenborg; E. Arvin, "Laboratory and numerical investigations of air sparging using MTBE as a tracer", Ground Water Monitoring and Remediation, Vol.20, No.4, pp87-95, 2000.
5. Nowosielski, B. E., "Experimental Study of Octanol - Water Partition Coefficients for 2,4,6 - trichlorophenol and pentachlorophenol: Derivation of an Empirical Model of Chlorophenol Partitioning Behavior", Applied Geochemistry, Vol.13, No.7, pp893-904, 1998.

6. R. Therrien, E. Sudicky, "Three-Dimensional analysis of variably saturated flow and solute transport in discretely fractured porous media", *Journal of Contaminant Hydrology* 23,1-44, 1995.
7. Van der Kamp, G., "Tidal Fluctuations in a confined aquifer extending under the sea", 24th International Geological Congress, Section 11, pp. 101-106, 1972.
8. Verschueren, K., "Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals", 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1998.
9. Y.H. Lu, T.R. Peng, and T.S. Liou, "Identification of the origin of salinization in groundwater using multivariate statistical analysis and geochemical modeling: A Case study of Kaohsiung", Southwest Taiwan, *Environ Geol*, DOI: 10.1007/s00254-007-0979-0, 2008.
10. 丁繼紅、周德亮、馬生忠, 「國外地下水模擬軟體的發展現狀與趨勢」, 勘查科學技術, (1)37-42, 2002。
11. 中興工程顧問社, 「雲林離島式基礎工業區開發計畫抽砂造地規劃造地區域地質鑽探報告(1)海上鑽探」, 經濟部工業局, 1992。
12. 台塑六輕營建部, 「六輕基地五期環評報告」, 台塑公司, 2010。
13. 台灣塑膠工業股份有限公司, 「麥寮六輕石化工業區建廠大地工程綜合評估顧問工作」, 1999。
14. 行政院環境保護署, 「六輕四期擴建計畫環境影響調查報告書」, 2009。
15. 吳育生、余進利、李振誥, 「以感潮地下水水位推估橋線含水層海側等效邊界」, 台灣水利, 第 53 卷, 第 3 期, 第 17-24 頁, 2005。
16. 吳育生、鄭佳元、周晏勤、王倩卉、黃慶淵, 「離島式新生地地下水水質鹽化指標變化特性初探」, 第一屆兩岸/第五屆資源工程研討會, 第 17-24 頁, 2011。
17. 吳欣蓉, 「土壤及地下水污染整治技術手冊: 評估調查及監測」, 經濟部工業局, 2004。
18. 郭紘志, 「打擊式 PC 基樁極限垂直承载力之可靠度研究-以麥寮六輕廠區為例」, 國立台灣科技大學營建工程系碩士論文, 2004。
19. 陳忠偉, 「濁水溪沖積扇合適水位與海水入侵之研究」, 國立成功大學資源工程學系碩士論文, 2001。
20. 陳崇希, 「地下水動力學原理-地下水溶質運移理論及模型」, 地質出版社, 1986。
21. 賈儀平、劉振宇, 「水文地質特性研究及水文地質圖編製」, 經濟部中央地質調查所, 1991。
22. 經濟部工業局, 「石化產業年鑑」, 經濟部工業局, 2010。

收稿日期：民國 102 年 3 月 13 日

修正日期：民國 102 年 8 月 8 日

接受日期：民國 102 年 8 月 14 日