

雲林沿海地區地下水鹽化問題之探討 Analysis of Aquifer Salinization in the Coastal Area of Yun-Lin

國立台灣大學農業工程學研究所
碩士

陳 享 宗

國立台灣大學農業工程學研究所
教授

劉 振 宇

摘 要

本研究探討雲林沿海地區淺層含水層受鹽化之原因，首先藉由地質鑽探資料及近海海底地形分佈判斷沿海水文地質結構，然後分析海水入侵、井管入滲及鹹水魚塭入滲三種鹽化可能，選擇氯離子濃度作為水質鹽化之指標。研究方法包括應用移流-延散方程式計算海水入侵之氯離子濃度及利用入滲之水體體積推求井管入滲、鹹水魚塭入滲造成水體氯離子含量之增加。研究結果顯示，雲林沿海一帶淺層含水層和海水可能連通，於近海地區大量抽水會引起海水入侵，目前雲林沿海口湖地區淺層地下水質鹽化現象，其中海水入侵所造成的比例約 26.7%，井管入滲約 0.7%，鹹水魚塭入滲約 72.6%，故鹹水魚塭入滲為目前雲林沿海地區淺層含水層鹽化的主要原因。

關鍵詞：地下水鹽化，沿海地區，雲林。

ABSTRACT

The objective of the study is to analyze the possible causes of the salinization of the shallow ground water in the coastal area of Yun-Lin. By using the geological drilling data and sea floor topographic distribution, the local hydrogeological setting is first constructed. Three possible causes including sea water intrusion, salt water percolation through wells and infiltration of salty water from fishfarm are then investigated. The chloride concentration is selected as an index of ground water salinization. The sea water intrusion is modeled by the advection - dispersion equation, salt water infiltration from wells and fishfarm are calculated by the amount of water percolated. From constructed local hydrogeological setting it suggested that the shallow aquifer may be interconnected to the sea water and will caused salt water intrusion if large amount groundwater is over

pumped. The percentage of salinization of shallow aquifer at Kou Hu in Yun-Lin coastal area caused by sea water intrusion, well percolation and fishfarm infiltration are 26.7, 0.7 and 72.6%, respectively. The result suggest the vertical infiltration of salt water from fishfarm is the major cause of the shallow ground water salinization in the coastal area of Yun-Lin.

Keywords: Aquifer salinization, Coastal area, Yun-Lin.

一、前言

雲林沿海地區民國六十年後，魚塭面積持續增加，養殖業者長期超抽地下水，導致海水入侵、地下水鹽化、地層下陷、海水倒灌等問題，其中地下水鹽化後不但無法使用，且地層受到鹽化後亦難以恢復，本研究為探討地下水鹽化的主要成因，首先對雲林海岸線一帶的水文地質結構作推估，訂出研究區域的範圍以及地文參數，然後再分別從海水入侵、垂直入滲等方向來切入問題。研究利用一維移流-延散方程式(advection-dispersion equation)計算雲林沿海地區海水及淡水交界面之海水入侵情形，而垂直入滲則分兩方面討論，其一為雲林沿海發生海水倒灌時，倒灌的海水由井管流至地下水層中，探討井管入滲對地下水鹽化程度，其二為探討沿海鹹水魚塭之池水入滲對地下水鹽化之影響。

二、理論與方法

(一) 海水界面之地層剖面推估

雲林沿海地區地下水鹽化嚴重，鹽化原因可能為當地之地層結構所造成，例如含水層於海岸處未尖滅於阻水層中，如果於海岸處大量抽水，可能導致海水入侵之發生，故本研究擬推估沿海之水文地質結構，所用參考資料主要為濁水溪沖積扇之水文地質剖面圖（江崇榮等，1995），配合彰化、雲林、嘉義外海之海底水深圖（成功大學水工試驗所，1992）。含水層及阻水層劃分依據中央地調所之分層原則（江崇榮等，1995），岩性組成於中砂以上視為含水層，以下視為阻水層，而含水層中如岩性為礫石組成

則劃分為礫石層。中央地調所之水文地質剖面圖由上而下分為含水層一、阻水層一、含水層二、阻水層二及含水層三，建立沿海之水文地質結構時主要推估含水層一及含水層二於海岸處是否尖滅於阻水層中，但沿海地層較淺處雖然由中央地調所的分層原則是為阻水層，但卻是沿海地區主要地下水源之一，故本研究仍將沿海地區之淺層地層（約 0 至 30 公尺深）視為淺層含水層，此淺層含水層也為本研究之主要區域。

推估之首要工作需先建立雲林外海之海底坡度，利用海底坡度之變化來推測地表下地層變化，而海底坡度之建立可利用海底水深圖來完成，如圖 1，利用海底坡度變化及水文地質剖面圖配合含水層二邊界（江崇榮等，1995）可推求出海水界面之地層剖面情形。

(二) 海水入侵

本研究將海水中之氯離子視為傳輸之溶質，利用移流-延散方程式計算海岸處氯離子隨

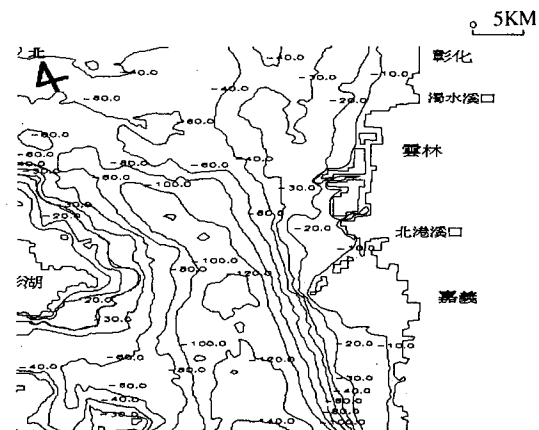


圖 1 彰化、雲林、嘉義海底水深圖
（台南水工試驗所，1992）

時間及空間入侵至地下含水層之濃度變化情形，來瞭解地下水受海水入侵污染之程度。本研究計算前先假設溶質傳輸具有如下之特性：

1. 土粒與溶質間無吸附、溶解、沈澱、離子交換等化學變化
2. 各溶質間無化學變化
3. 溶質無蛻變(decay)現象
4. 土壤為均質性(homogeneous)
5. 濃度之改變不影響流體之物理性質及流況
6. 濃度之改變對於流體密度變化可以忽略
7. 假設為一維流況

則移流-延散方程式可寫成下式 (Hoopes & Harleman , 1967)：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial X} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad \text{..... (1)}$$

其中 D_L (L^2/T)代表縱向延散係數 (coefficient of longitudinal dispersion)，(1)式中 C 為溶質濃度 (M/L^3)， U 為孔隙水流速度(L/T)，縱向延散係數定義如下

$$D_L = D_M + \alpha |U|^{n_1} \quad \text{..... (2)}$$

D_M 為分子擴散係數 (L^2/T) (coefficient of molecular diffusion)， $|U|$ 為孔隙水流速度， n_1 值一般取 1，其中 α 為延散度(dispersivity) (L)，其值 α 估算如下(Neuman , 1990)：

$$\alpha = 0.0175L^{1.46} \quad \text{..... (3)}$$

其中 L 為模擬尺度(L)。邊界依據地層剖面判斷，訂於海底處之海水及淡水交界面，假設初始時間時，淡水含水層中海水濃度為 0，故式(1)初始條件為

$$C(X,0) = 0 \quad X > 0 \quad \text{..... (4)}$$

以及邊界條件

$$\begin{aligned} C(0, t) &= C_0 & t &\geq 0 \\ C(\infty, t) &= 0 & t &\geq 0 \end{aligned} \quad \text{..... (5)}$$

Ogata(1970)將式(1)加入初始條件(4)及邊界條件(5)後，導得如下之解析解

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{X - Ut}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{UX}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{X + Ut}{2\sqrt{D_L t}} \right) \quad \text{..... (6)}$$

其中 C/C_0 為淡水海水濃度比，模擬示意圖如圖 2 所示，由圖 2 可看出不同模擬深度所對應之模擬距離也會不同，故本研究模擬深度取 10 公尺深。

利用(6)式計算海水入侵淺層含水層之濃度值，需要輸入模擬時間 t 、模擬距離 X 、孔隙水流速度 U 及縱向延散係數 D_L 等參數，由於雲林含水層邊界離海岸之距離南北並不相同，南邊距離近而北邊遠，故本研究選取雲林北部麥寮及南部口湖為模擬區域，模擬時間取 5 年、15 年及 25 年，表 1 為模擬所使用之參數。

(三) 垂直入滲

目前雲林沿海地區地下水之鹽分除了可能為海水入侵引起外，也有可能為海水由地表垂直入滲所引起。垂直入滲探討包括井管入滲及鹹水魚塭入滲，原因為沿海地區水井數量眾多且鹹水魚塭面積廣大，所造成之入滲量相當可觀，以下分別說明井管入滲及鹹水魚塭入滲。

表 1 海水入侵移流－延散方程式模擬使用之參數

模擬深度 (m)	模擬距離 (m)		孔隙水流速度 (m/day)		縱向延散係數 $D_L = D_M + \alpha U ^{n_1}$ (m^2/day)	
	麥寮	口湖	麥寮	口湖	麥寮	口湖
10	3333	2500	0.090	0.122	219.1	195.2

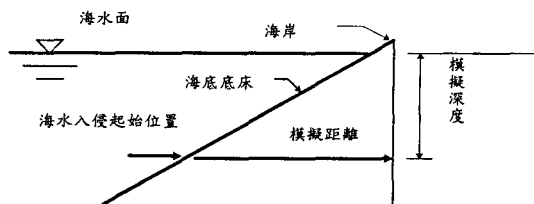


圖 2 海水入侵一維模擬示意圖

1. 井管入滲

陳鴻泉（1997）曾探討井管補注台西、麥寮地區含水層，本研究也採用相同方法來計算海水沿井管之入滲量，所使用之式子如下：

$$Q = K_X \times h_w \times (2\pi r \times h_1 \times S \times N) \dots\dots(7)$$

其中， K_X 為濾水管外地層的水平方向滲透係數，引用台糖抽水試驗求得的滲透係數， K_X 範圍約為 $(1.6 \sim 2.5) \times 10^{-4}$ 公尺/秒， h_w 為水力梯度 (L/L)，根據調查沿海地區海水倒灌所產生的淹水深度大概為 0.5 公尺，而沿海地下水位假設在地下表 5 公尺，含水層厚度為 25 公尺，所以水力梯度為 $5.5 \text{ 公尺} / 25 \text{ 公尺} = 0.22$ ， r (L) 為濾水管半徑，沿海井管大多為 4 吋管， h_1 (L) 為濾水管之濾孔長度，取 10 公尺， S 為濾水管之孔隙率，取 0.3（陳鴻泉，1997）， N 為 30 公尺深井口數。

台灣地區每年六月至十月為颱風季節，每當颱風時期，沿海地勢較低地區之村落，常遭海水淹沒，遭淹沒區域之海水就可能順著井管入滲至地下水中，本研究利用雲林地區的水井數估算每當颱風來時進入地下水層之海水體積，分析井管入滲所造成地下水之鹽化程度。

2. 鹹水魚塭入滲

養殖池水的減少可能因為入滲或蒸發所造成，當高濃度之養殖池水沿著池底入滲至地下含水層時，極易造成淡水水層鹽化。養殖業者每天所補充之養殖用水量大概為池容量之 1/25，而雲林沿海養殖池之池深約為 1 公尺，則每天需補充 4 公分的池水深，這 4 公分之池水補充量扣除因蒸發的損失量，就是入滲至池底之水量，沿海年平均日蒸發量約為 4.10 公釐（農業工程研究中心，1989），如果再加上因為水車曝氣所造成之蒸發量增加，則約略估計每天約有 2 公分左右的入滲量進入地下水中。雲林地區鹹水魚塭面積共 5107 公頃（台灣省農林廳，1995），利用鹹水魚塭每日之入滲水量，再乘以鹹水魚塭面積，就可以求得每日入滲之鹹水體積，通常入滲水量並不會完全進入地下水層中，約只有 15 % 進入淺層地下水中（蔡明華，1993）。

三、結果與討論

（一）海水界面之地層剖面推估

1. 含水層一

本研究劃分含水層和阻水層之岩性是以中砂為界，所以由圖 3 可發現含水層一並沒有延伸至扇尾，但雲林沿海地區之淺層含水層，其滲透性及含水性均較阻水層良好許多。淺層含水層於海岸外延伸不遠即和海相交，於海水交界面處尚未尖滅於阻水層中，呈現開口型態，且南部沿海區域之淺層含水層透水性較北部為佳，與海水的連通性也較北部好。

2. 含水層二

含水層二為濁水溪沖積扇之主要含水層，於海岸處的開口由北到南漸次縮小，例如於雲林北部麥寮處開口約有 50 公尺厚，但是至南部的口湖開口大概僅約 10 公尺。含水層二於海岸處之厚度與海底坡度有密切關係，雲林南部海底坡度明顯大於北部，北岸坡度小，含水層向海延伸遠，含水層於海岸處仍厚，南岸坡度大，含水層向海延伸較短，相對的含水層也較薄。由圖 3 發現，含水層二的厚度由濁水溪沖積扇的扇頂往扇央及扇尾漸漸變薄，若依照此趨勢推估，含水層二均尖滅於阻水層一、二之間，與海底並不相連通。圖 4 為雲林海水界面水文地質三維示意圖，由圖中可看出含水層於海岸外之變化趨勢。

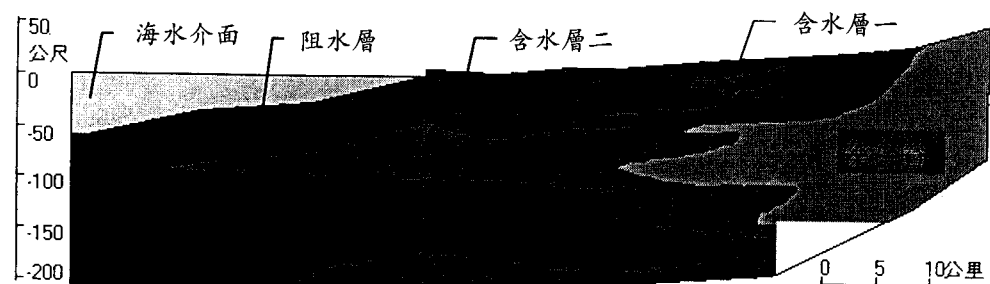
（二）海水入侵

1. 由地層剖面變化探討海水入侵地下含水層之影響

淺層含水層與海連通，且南部透水性較北部好，於海邊大量抽水的話，南部淺層含水層較易引起海水入侵之情況發生。含水層二封閉於阻水層一、二之間，封閉性佳，於海岸處大量抽水的話，含水層二相對於淺層含水層對於海水入侵有較佳之阻絕效果。

2. 移流-延散方程式模擬

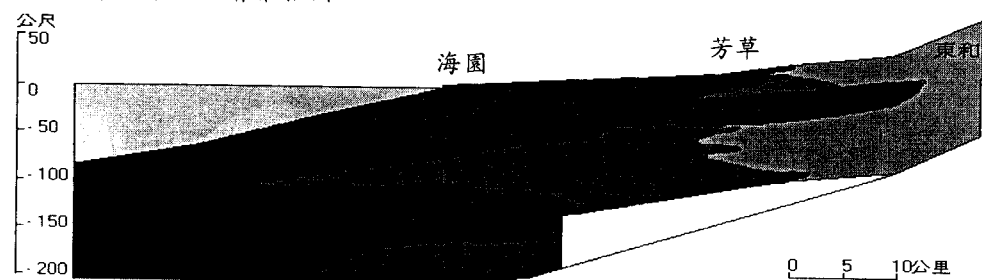
利用移流-延散方程式模擬雲林麥寮、口湖海水入侵情況，將模擬深度 10 公尺之結果繪製成圖，圖 5 為麥寮地下水氯離子濃度在海水入侵



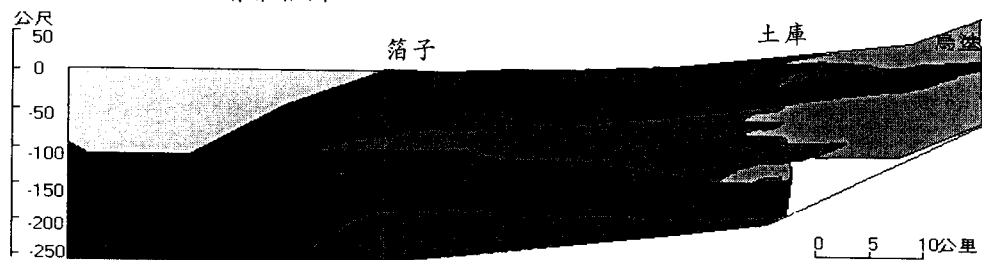
圖例



剖面五海水介面地層推估圖



剖面六海水介面地層推估圖



剖面七海水介面地層推估圖



剖面八海水介面地層推估圖

圖3 雲林海水界面水文地質剖面圖

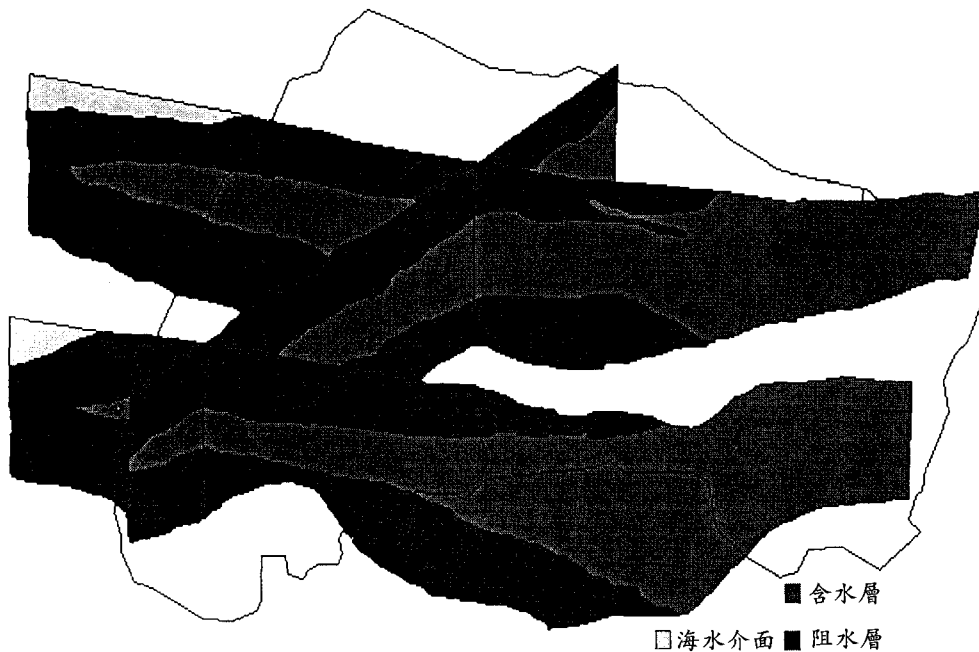


圖 4 雲林海水界面水文地質三維示意圖

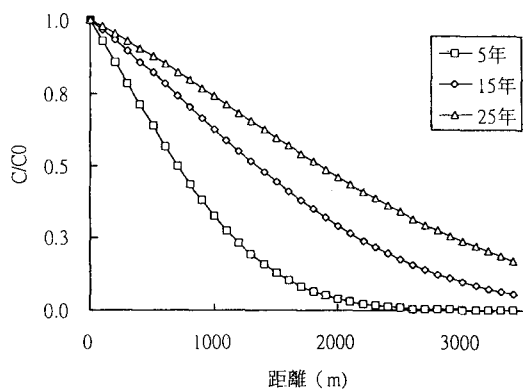


圖 5 麥寮地區深度 10 公尺地下水氯離子之濃度在 5 年、15 年及 25 年空間分佈變化之模擬結果

5 年、15 年及 25 年後空間分佈變化之模擬結果，圖 6 為口湖地下水氯離子濃度在海水入侵 5 年、15 年及 25 年後空間分佈變化之模擬結果。由模擬結果顯示，模擬深度 10 公尺時，麥寮模

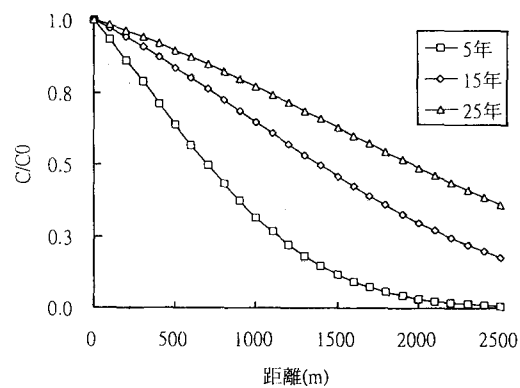


圖 6 口湖地區深度 10 公尺地下水氯離子之濃度在 5 年、15 年及 25 年空間分佈變化之模擬結果

擬值為 3398ppm，口湖為 6851ppm，口湖氯離子濃度較麥寮為高，其原因由海水界面地質剖面結構來分析，口湖海底坡度較麥寮為大，造成孔隙水流速度較麥寮為高所致。

圖 7 為麥寮模擬深度 0 至 30 公尺，每一公尺深度計算一次，共 30 組數據之氯離子濃度，由圖中可看出模擬深度 0 至 15 公尺時，氯離子濃度改變很大，若選取模擬深度為 10 公尺來代表海水入侵氯離子之實際濃度並不恰當，故需考慮整個淺層含水層之氯離子濃度變化情形，以計算實際進入淺層含水層之氯離子總量。圖 8 為麥寮 0 至 30 公尺，每一公尺深度計算一次，共 30 組數據之海水入侵進入淺層含水層之水量體積，將每一深度之氯離子濃度及海水入侵進入淺層含水層之體積相乘取總和後（例如深度 5 公尺之氯離子濃度乘以深度 5 公尺海水入侵之水量），即可獲得進入淺層含水層之氯離子總量。表 2 顯示麥寮、口湖一年由海水入侵進入淺層含水層之水量及氯離子量。

(三) 垂直入滲對地下水鹽化之影響

垂直入滲分為井管入滲及鹹水魚塢入滲。井管入滲量跟井口數目有關，而鹹水魚塢入滲量跟魚塢面積大小有關，分別說明如下。

1. 井管入滲

雲林每年約有四次颱風引起海水倒灌污染地下水，估計每次需 3 天才可以完全排水完畢，以麥寮為例，麥寮 30 公尺深井口數目為 3745 口，每年由井管入滲至地下水中體積為 $0.17 \times$

10^6 立方公尺，每年入滲氯離子量為 32.6×10^8 克，計算步驟如下：

a. 井管入滲量

$$\begin{aligned} Q &= K_x \times h_w \times (2\pi r \times h_1 \times S \times N) \\ &= 18.144 \text{ 公尺/天} \times 5.5 \text{ 公尺} / 25 \text{ 公尺} \times \\ &\quad (2\pi \times 0.0508 \text{ 公尺} \times 10 \text{ 公尺} \times 30\% \times 3745) \\ &= 14,314 \text{ 立方公尺/天} \end{aligned}$$

b. 每年有四次颱風，每次積水三天，則每年井管入滲體積為

$$\begin{aligned} V &= 14,314 \text{ 立方公尺/天} \times 12 \text{ 天} \\ &= 0.17 \times 10^6 \text{ 立方公尺} \end{aligned}$$

c. 每年入滲氯離子量=每年井管入滲體積 × 入滲氯離子濃度

$$\begin{aligned} &= 0.17 \times 10^6 \text{ 立方公尺} \times 19,000 \text{ ppm} \\ &= 32.6 \times 10^8 \text{ 克} \end{aligned}$$

以上為井管入滲計算步驟。表 3 列出麥寮、口湖一年由井管入滲氯離子量，由表 3 中可看出麥寮的井管入滲氯離子量較口湖大。

2. 鹹水魚塢入滲

鹹水魚塢的入滲量每天有約 2 公分左右，以麥寮為例，麥寮鹹水魚塢有 6,111,000 平方公尺，估算一年有 5.02×10^6 立方公尺鹹水進入至地下水中，每年入滲氯離子量為 953.5×10^8 克，詳細計算步驟如下：

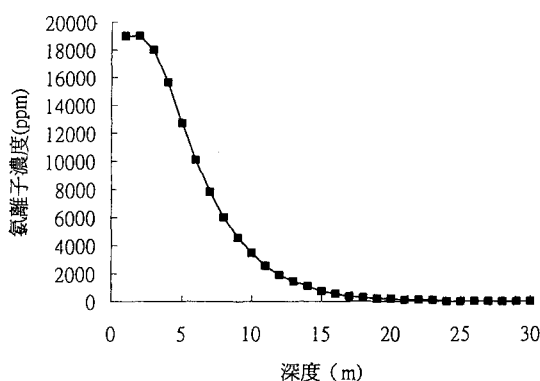


圖 7 移流-延散方程式模擬麥寮地區深度 0 至 30 公尺之地下水氯離子濃度

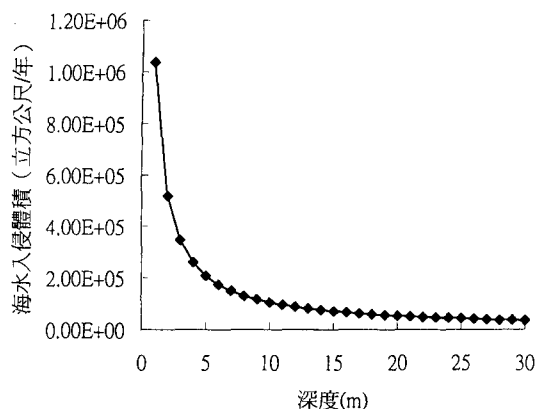


圖 8 0 至 30 公尺由海水入侵進入麥寮地區淺層地下水之水量

a. 鹹水魚塭一年入滲體積(75 %純海水養殖)

$$\begin{aligned} V1 &= 0.02 \text{ 公尺} \times 6,111,000 \text{ 平方公尺} \times \\ &\quad 365 \text{ 天} \times 0.75 \\ &= 33.46 \times 10^6 \text{ 立方公尺} \end{aligned}$$

b. 進入地下水中之體積 (蔡明華, 1993)

$$\begin{aligned} V2 &= V1 \times 15 \% \\ &= 5.02 \times 10^6 \text{ 立方公尺} \end{aligned}$$

c. 每年入滲氯離子量=進入地下水中之體積

(V2)× 入滲氯離子濃度

$$\begin{aligned} &= 5.02 \times 10^6 \text{ 立方公尺} \times 19,000 \text{ ppm} \\ &= 953.5 \times 10^8 \text{ 克} \end{aligned}$$

以上為鹹水魚塭入滲的計算步驟及過程。

表 4 列出麥寮、口湖一年由鹹水魚塭入滲氯離子量，由表 4 中可看出口湖的鹹水魚塭入滲氯離子量較麥寮大。一般灌溉水中如含有鹽分，則鹽分

會在地表土層中聚積 (廖秋榮, 1996)，實際上鹹水魚塭入滲經過土壤時，鹽度可能已經減少，造成淺層含水層鹽化的比例可能並不如原先預期如此高。

(四)海水入侵和垂直入滲對於地下水鹽化之比較

表 5 列出麥寮、口湖一年由海水入侵、井管入滲及鹹水魚塭入滲至淺層地下水之氯離子量及百分比，由於進入地下水中氯離子量多寡為造成地下水鹽化之指標，由表 5 顯示，垂直入滲 (井管入滲、鹹水魚塭入滲) 氯離子量佔總量之 65%以上，所以目前造成地下水質鹽化主要為垂直入滲所引起，垂直入滲氯離子量中鹹水魚塭入滲氯離子量又遠大於井管入滲氯離子量，故鹹水魚塭為目前地下水鹽化的主要因子。

表 2 麥寮、口湖 0 至 30 公尺一年由海水入侵至淺層含水層之水量及氯離子量

麥 寮		口 湖	
海水入侵體積 ($10^6 \text{ m}^3 / \text{year}$)	海水入侵氯離子量 (10^8 g)	海水入侵體積 ($10^6 \text{ m}^3 / \text{year}$)	海水入侵氯離子量 (10^8 g)
4.14	477.6	6.36	821.0

表 3 麥寮、口湖井管入滲氯離子量

地 區	30 公尺深井數	井管入滲水量 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	井管入滲氯離子量 (10^9 g)
麥 寮	3,745	0.17	32.6
口 湖	2,628	0.12	22.9

表 4 麥寮、口湖鹹水魚塭入滲氯離子量

地 區	魚塭面積 (m^2)	鹹水魚塭入滲水量 (10^6 m^3)	鹹水魚塭入滲氯離子量 (10^8 g)
麥 寮	6,111,000	5.02	953.5
口 湖	14,330,000	11.77	2,235.9

表 5 麥寮、口湖一年由海水入侵、井管入滲及鹹水魚塭入滲至淺層地下水之氯離子量及百分比

	麥 寮		口 湖	
	氯離子量 ($\times 10^8 \text{ g}$)	氯離子量/總氯離子量 (%)	氯離子量 ($\times 10^8 \text{ g}$)	氯離子量/總氯離子量 (%)
海水入侵	477.6	32.6	821.2	26.7
井管入滲	32.6	2.3	22.9	0.7
鹹水魚塭入滲	953.5	65.1	2235.9	72.6
總氯離子量	1463.7	100.0	3080.0	100.0

將海水入侵、井管入滲及鹹水魚塭入滲之氯離子量計算結果與現場水質檢測報告作一對照，麥寮實際現場水質之氯離子濃度約 4000ppm（成功大學水工試驗所，1996），而計算結果約 5542ppm，口湖實際現場水質之氯離子濃度約 9000ppm（成功大學水工試驗所，1996），計算結果約 13347ppm，實際現場水質鹽化現象並沒有計算結果如此高，其原因可能為估計海水入侵時，將地表 30 公尺內均視為淺層含水層，但實際為黏土及細砂互層，故此可能為海水入侵量估計過高所致。

四、結 論

1. 海水界面之地層剖面推估結果顯示，淺層含水層未封閉於阻水層中，於沿海地區大量抽水的話，容易發生海水入侵。
2. 海水入侵模擬結果顯示，模擬深度為 10 公尺之麥寮、口湖氯離子濃度模擬值分別為 3398ppm 及 6581ppm，口湖模擬值較麥寮為高，其原因為麥寮、口湖兩地之水文地質結構不同所造成，口湖外海之海底水深變化較麥寮為大，導致移流-延散的移流效應較大，致使口湖氯離子濃度較高。
3. 目前雲林沿海淺層含水層之水質鹽化現象，麥寮、口湖南北並不相同，麥寮由海水入侵、井管入滲及鹹水魚塭入滲所造成的地下水質鹽化比例分別為 32.6%、2.3% 及 65.1%，口湖為 26.7%、0.7% 及 72.6%，故垂直入滲（井管入滲、鹹水魚塭入滲）為目前雲林沿海地區淺層含水層鹽化的主要原因，而鹹水魚塭入滲為鹽化之主要因子。

五、建 議

1. 推估海水界面之地層剖面時，判斷淺層含水層均是由細砂所組成，但實際上並非如此，未來水文地質參數的選用應該輔以實際現場調查數據。
2. 模擬海水入侵牽涉到模擬深度之選擇，日後應以發展二維模式模擬克服此項缺失。
3. 本研究並未探討鹹水魚塭入滲時，土壤的

吸鹽作用，可能高估鹹水魚塭入滲造成淺層地下水鹽化之比例，未來鹹水魚塭入滲宜考慮土壤吸鹽比例。

4. 本研究並未考慮潮汐對海水入侵之影響，故未來研究宜納入潮汐效應。

六、參考文獻

- 台糖公司新營總廠，1992～1994，台灣區地下水觀測網第一期綱要-水文地質鑽探工程施工成果報告，經濟部中央地質調查所
- 台灣省農林廳，1995，台灣漁業年報
- 江崇榮、黃智昭、賴慈華、陳利貞、周素卿，1995，台灣地區地下水觀測網第一期計畫、濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告，經濟部中央地質調查所
- 國立成功大學台南水工試驗所，1992，雲林離島式基礎工業區整體開發規劃調查研究報告第二部份 數值模擬與環境背景資料庫
- 國立成功大學台南水工試驗所，1996，雲林離島式基礎工業區整體開發規劃調查研究報告第一部份 第六冊 地下水位及水質調查
- 陳鴻泉，1997，台西及麥寮地區之水文地質之研究，國立台灣大學碩士論文
- 農業工程研究中心，1989，海水入侵數學模式之建立，集集共同引水計畫可行性規劃（二）水源及用水專題
- 廖秋榮，1996，屏東沿海地區次生鹽分地之研究，國立台灣大學博士論文
- 蔡明華，1993，水田灌溉公益效能剖析研究，農委會
- Hoopes, J. A., and D. R. F. Harleman. 1967. Wastewater recharge and dispersion in porous media. Journal, Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers 93, HY5:51-71
- Neuman, S. P., 1990. Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media. Water Resou. Res., 26(8):1749-1758
- Ogata, A., 1970. Theory of dispersion in a granular medium. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 411- I

收稿日期：民國 86 年 12 月 18 日

接受日期：民國 87 年 1 月 14 日