

# 區域性地下水水質模擬監測井網監測頻率之初步研究

## Preliminary Study on Combination of DRASTIC Model and the Sampling Frequency for Regional Groundwater Quality Monitoring

國立屏東科技大學土木工程系副教授

國立屏東科技大學土木工程系碩士

丁 澈 士

甘 東 富

Cheh-Shyh Ting

Tung-Fu Kan

### 摘 要

本研究係以地下水水流模式為基礎，採用 DRASTIC 地下水污染潛勢評估方法，針對屏東平原地區進行地下水污染潛勢進行評估。並配合 Processing MODFLOW 中 MT3D 模組建置地下水污染物之移流模式，模擬五年內於地下水水質虛擬監測井中濃度分佈趨勢。前述資料取得後，引入 FREQ 程式中分析，並擬定最佳之監測頻率。

一般風險及農業風險分析結果以內埔、美濃、旗山、竹田及萬丹等區域具最高之污染潛勢。崁頂與新埤最低，其中崁頂為兩項分析之重疊區域。地下水水質虛擬監測井之監測頻率，由七口井獲得其最佳之監測取樣頻率為每月一次。

**關鍵詞：**污染潛勢，移流，監測頻率，地下水質。

### ABSTRACT

The study was based on a groundwater flow model. The paper has been estimated the groundwater potential pollution in Pingtung Plain with the DRASTIC model. A transport model with MT3D of Processing Modflow has been created to offer the suitable information. The model has been simulated a solute advective process for five years. The concentration information is found by seven observation wells in it. Then the output data would offer FREQ software to estimate the best sampling frequency for monitoring wells.

In the results of general and agricultural rank estimation, the highest potential pollution was pointed at Neipu, Meinung, Chishan, Chutien, and Wanluan. The lowest were Kanting and Hsipei. Kanting was the overlap of the two estimation results. The best sampling frequency of groundwater quality monitoring wells was one time per month.

**Keywords:** Potential pollution, Advection, Monitoring frequency, Groundwater quality.

## 一、前言

隨日新月異之科技發展，為人類帶來無限的願景，卻也為原來平衡中的環境頻添了諸多的變項，其中尤以環境污染危機所帶來的衝擊為最。以屏東平原為例，近年來因人口增加，經濟快速成長，社會結構急驟變化，生活品質要求提升，各標的用水需求因而激增；但由於經濟、環保生態及永續發展因素，很難及時開發地面水源，以因應逐年增加之用水，導致開發成本較低、水量固定、污染較少且具在地性優勢之地下水資源成為各標的競相開發之目標。然而在缺乏地下水各項基本資料以進行適當規劃及管理的情況下，不當之地下水開發行為使部分沿海地區發生嚴重之地下水水位下陷、地層下陷、海水倒灌、排水不良、土壤鹽化及海水入侵等現象。另外多種點、線、面的污染源亦促使地下水受污染的情況更形複雜，地下水水流系統雖具有較地面水難以侵入的環境，但若一經污染物入侵則較前述兩者更難以整治。故完善的監測體系不僅可提供整治上的參考，可貴之處更在於提供事前預警，以減少地下水水質遭受破壞之機率。本研究著重於此，旨在針對屏東平原大區域進行普遍性之地下水水流系統物理上之污染潛勢分析，並配合地下水污染傳輸模擬以輔資料之不足，藉由前述模擬結果進行地下水水質監測頻率之擬定，以為區域性評估提出一連串方法上之概念。當所有配套完備後，本研究之方法，即可提供長時性之預測，或與復育機制整合達成有效之日後地下水水質品質控制與污染區復育之目的。

## 二、研究環境概況

屏東平原為一陷落凹地，東側為斷層帶，平原區域內地質分布由西向東年代漸為古老，變質程度亦呈由西向東逐漸增加，主要結構經由東北向西南分布，地質顆粒結構直徑逐漸變細，唯平原扇央扇尾部分為原始古河道流經地區，與扇頂大顆粒分布區形成主要補注以及涵蓄水資源之主要地層。

屏東地區為農業大縣，養豬數為全台灣地區

之冠，豬隻排泄物及大量農藥使用，加上林邊、佳冬等沿海地區的漁塭養殖，因集中且大量開發利用，而造成地下水水位下降、地層下陷、海水入侵等環境災害，情況十分嚴重；部分區域亦曾發生油管漏油以及工業污染之情形。

根據環保署資料顯示，屏東沿海地區導電度及氯鹽濃度偏高，地下水顯已發生鹽化現象，其趨勢由沿海下游區域向上遞減。

屏東地區雖然工業不甚發達，工業污染尚無較明顯之大區域影響。另砂石採取及不明廢棄物回填問題亦極其複雜、且影響深重，其對地下水水質以及地下水水流機制的改變，亦提供變異機會。

## 三、分析模式

本研究中主體架構以地下水水流模式 (MODFLOW)、地下水污染潛勢評估模式 (DRASTIC)、地下水污染傳輸模式 (MT3D) 及地下水水質監測頻率擬定模式 (FREQ) 等四模式為主。本研究研究流程如圖 1 所示，首先針對地下水水流模式 Processing MODFLOW-PMWIN (Chiang and Kinzelbach, 2001) 前置處理 (Pre-processor) 所需之地理、地質、水理、水質資料進行基本資料蒐集，並輔以地理資訊系統 (GIS) 進行資料的圖形及屬性整理，其後再針對地下水水流模式進行校正，配合 GIS 所獲得資料與地下水水流模式，進行地下水污染潛勢分析；將分析所得結果與污染觀測值進行比對，遴選出一污染潛勢最大與污染情勢較重之區域進行地下水污染傳輸模式模擬。在研究中，以地下水水流模式 PMWIN 中 MODFLOW 模組進行前置處理作業，並配合地下水污染潛勢評估模式 DRASTIC 相關風險性評估，整合污染源調查資料與地下水污染潛勢評估結果，選定相關污染位址，配合已有之地下水水質監測井監測資料，選取合宜之污染物資料進行地下水污染有限差分模式 MT3D 建構地下水污染流模式，此模式亦為 Processing MODFLOW 中之外接模組，並針對該模擬結果與相關資料，輸入 Zhou (1992) 開發之地下水質取樣頻率分析模式 FREQ，以獲取最佳監測取樣頻率值。

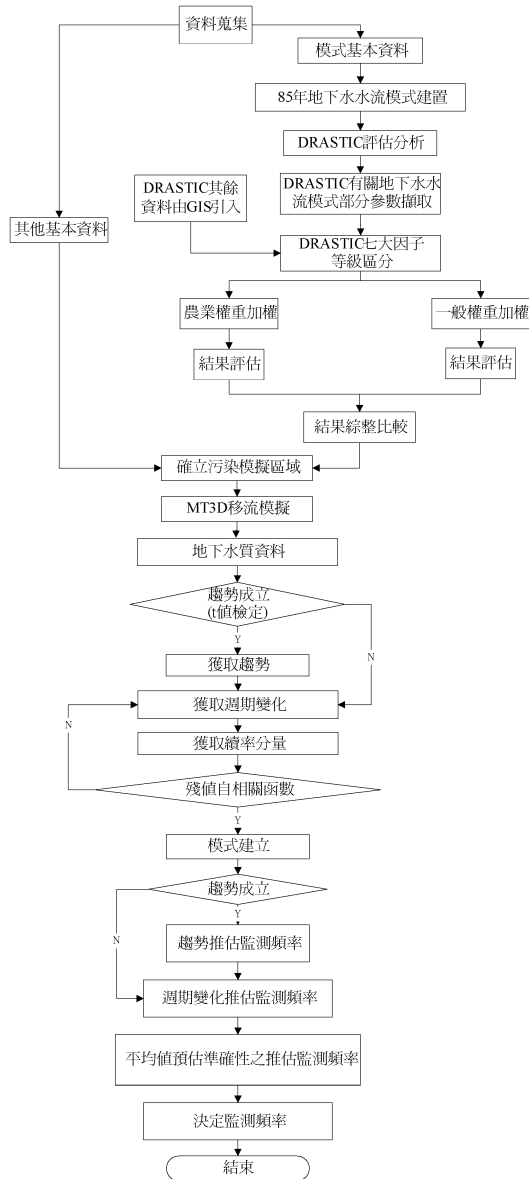


圖 1 研究流程圖

### 3.1 地下水水流模式

地下水污染傳輸模式須立基於地下水水流模式之下方可進行模擬，本研究以民國 85 年（周建名，2001 年）資料所建立之地下水水流模式(MODFOLW)為基本之前置處理模式，模式中有限插分網格方式進行運算，並將相關資料分別以基本之水文地質、水文水理、抽水井及其他相關資料進行建構。本模式之資料主要用以提

表 1 地下水埋深分級表

| 地下水分度分布範圍(公尺) | 分數等級 |
|---------------|------|
| 0~1.5         | 10   |
| 1.5~4.5       | 9    |
| 4.5~9         | 7    |
| 9~15          | 5    |
| 15~22.5       | 3    |
| 22.5~30       | 2    |
| >30           | 1    |

表 2 DRASTIC 權重指數表

| 屬性 | 一般權重 | 農業權重 |
|----|------|------|
| D  | 5    | 5    |
| R  | 4    | 4    |
| A  | 3    | 3    |
| S  | 2    | 5    |
| T  | 1    | 3    |
| I  | 5    | 4    |
| C  | 3    | 2    |

供地下水污染傳輸模式及 DRASTIC 分析使用。

### 3.2 地下水污染潛勢評估模式(DRASTIC)

本研究採用美國 EPA 主導下與美國水井協會配合針對地下水污染潛勢評估所開發之 DRASTIC 模式系統之中，針對地下水流相關地質及水文機制之主要七項因子並將前述因子區分等級給予相對的加權權重與以加總後進行評估(EPA,1989)。其七大因子分別為地下水埋深(Depth to water)、淨補注量(net Recharge)、含水層介質(Aquifer media)、土壤介質(Soil media)、地形坡度 (Topography)、通氣層影響(Impact of vadose zone)、含水層水力傳導特性(Conductivity of the aquifer)七項。其分級情況以表 1 之地下水埋深 D 例舉。最後再以各分數乘以權重指數疊加總評估分數，權重指數如表 2 所示。DRASTIC 系統中，權重之決定除考慮實際問題之外，另包含心理因子在內，需要大規模之相關取樣調查及統計分析，作業階段分為三個步驟：一、提出將來有可能發生之問題，用以決定參數之範圍；二、以五點等級評估法篩選問題決定優先性，以決定各參數之權重；三、評估問題間之相依性，

遴選最有可能針對問題進行處理決定最後 DRASTIC 之參數分布範圍及權重。本研究以進行較具小規模之調查與評估因子釐定，又因研究區域較少具規模之分級分類資料，故採用 US EPA 分析所得之權重值加以評估，本研究引用其中一般權重與農業權重兩種進行屏東平原地下水污染潛勢評估，藉以比較一般性及農業性之相對應結果，其污染潛勢 =  $D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W$ ，式中下標  $R$  為對應因子分數值； $w$  為對應因子之權重值。

### 3.3 地下水污染傳輸模式

地下水污染傳輸模式種類繁多，在本研究係因沿用架構於 Processing MODFLOW 之下之地下水水流模擬模式，故直接採用其架構之下 MT3D 模組進行污染傳輸過程模擬。該模組延續前述地下水水流模式採用有限插分運算原則，針對地下水污染質及其介質間進行三維溶質傳輸模擬，諸如移流傳輸、延散機制、化學反應及溶質之源/匯型式，皆可進行描述。溶質傳輸理論考量甚多，本研究中僅針對污染物之移流與擴散機制進行探討。

本研究旨在建立一套連貫性的評估模式，因此所著重者為地下水污染潛勢分析後之區域性污染區地下水水質監測頻率之規劃，並非污染傳輸的各種機制。故將地下水污染傳輸模式假設為僅具移流作用之機制進行評估。並且因地下水水質觀測井取樣來自於飽和含水層，故模擬主要以飽和含水層之地下水污染傳輸模式進行，對未飽和區域則不包含模擬範疇。並針對該模式進行為期一年之模擬及假設原流況維持不變之情況下，進行為期五年之污染傳移運動模擬。並依據此模擬結果進行虛擬觀測井點之頻率規劃。

於本研究著重在建立一套地下水水質觀測頻率規劃模式，故在污染傳輸模擬中較難取得資料之參數不予以考量，研究中使用 Processing MODFLOW 中 MT3D 模組，僅針對地下水污染傳移部份進行模擬，以獲取在質量守恆之下，地下水飽和水流流態中污染濃度之分佈趨勢，以提供下一階段進行 FREQ 中虛擬觀測井之頻率規劃

之輸入資料值。

### 3.4 地下水水質監測頻率擬定模式

本研究最後將針對上述地下水污染潛勢及地下水水流傳移污染模擬結果，擬定相關之觀測井井位，因蒐集之觀測井井位無法針對短期之地下水污染傳輸模式進行，故採虛擬井位進行觀測，並將觀測結果以 FREQ (Zhou, 1992)軟體進行頻率分析。

#### (1) 模式之建置

在地下水水質監測過程中，地下水污染值於序率過程中主要由趨勢性(trend)、週期性(periodic)與序率性(stochastic)三種型態所構成，而趨勢性依污染物在時間上的變化基本上可劃分為線性區域及階段性趨勢兩種。FREQ 理論上將整體性變化視為上述三者之線性疊加關係，並以統計方法將地下水污染觀測值在統計離出上述三者，以尋求各自所屬之最佳表現形式，最後令其疊加，獲得整體表示式，即為地下水非常定水質模式。

#### (a) 趨勢性

線性性趨勢表示式：

$$T(t) = b_0 + b_1 t \quad t = 1, 2, \dots, n \quad \dots \dots \dots (1)$$

其中，

$$b_1 = \frac{n \sum_{t=1}^n t c(t) - \left[ \sum_{t=1}^n t \right] \left[ \sum_{t=1}^n c(t) \right]}{n \sum_{t=1}^n t^2 - \left[ \sum_{t=1}^n t \right]^2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{t=1}^n c(t) - b_1 \sum_{t=1}^n t / n}{n} \quad \dots \dots \dots (3)$$

階段性趨勢表示式：

$$T(t) = \bar{c}_1 + (\bar{c}_2 - \bar{c}_1)_{t-n_1} \quad t = 1, 2, \dots, n \quad \dots \dots \dots (4)$$

其中  $c_1$ 、 $c_2$  為前、後兩階段之濃度平均值。

$$\bar{c}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{t=1}^{n_1} c(t) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\bar{c}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{t=n_1+1}^{n_1+n_2} c(t) \quad \dots \dots \dots (6)$$

#### (b) 週期性

單一性質的地下水污染物變化，若在無其他條件加入之下，常隨地下水的週期性變化而變化，在時間序列上週期性一為及重要的一項特性與類別，該模式的形式可以調和級數(Harmonic series)表示：

$$p_t = a_0 + \sum_{j=1}^k \left[ a_j \cos(2\pi f_j t) + b_j \sin(2\pi f_j t) \right] \quad \dots\dots\dots(7)$$

其中，  
 $f_1$  為頻率，其值為  $j/n$

$$a_0 = \bar{r}_p = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n r_p \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$a_j = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n r_p \cos(2\pi f_j t), \quad j = 1, 2, \dots, k \quad \dots(9)$$

$$b_j = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n r_p \sin(2\pi f_j t), \quad j = 1, 2, \dots, k \quad \dots(10)$$

(c) 序率性

地下水污染物濃度分布總趨勢將週期性及趨勢性排除以後，所剩餘之獨立隨機變數極為序率分量  $r_s$ ，在序率分量中其平均數亦為零。亦即  $r_s = c(t) - T(t) - p(t)$ 。由獨立隨機變數之序率分量，經自動回歸模式加以定義，則可獲得最終之序率疊加項，其表示式：

$$s(t) = \sum_{j=1}^n \phi_j r_s(t-j) \quad \dots\dots\dots(11)$$

其中，  
 $\phi_j$ ：自相關係數。  
 $r_s(t-j)$ ：獨立隨機變數。

(d) 疊加之整體表示式

趨勢項為線性趨勢者：

$$c(t) = b_0 + b_1 t + \left\{ a_0 + \sum_{j=1}^{n/2} \left[ a_j \cos\left(\frac{2j\pi t}{n}\right) + b_j \sin\left(\frac{2j\pi t}{n}\right) \right] \right\} + \sum_{j=1}^n \phi_j r_s(t-j) \quad \dots\dots\dots(12)$$

趨勢項為階段式趨勢者：

$$c(t) = \bar{c}_1 - (\bar{c}_2 - \bar{c}_1) + \left\{ a_0 + \sum_{j=1}^{n/2} \left[ a_j \cos\left(\frac{2j\pi t}{n}\right) + b_j \sin\left(\frac{2j\pi t}{n}\right) \right] \right\} + \sum_{j=1}^n \phi_j r_s(t-j) \quad \dots\dots\dots(13)$$

上述各項趨勢項中各項因子，在進行頻率推估時極為重要，由於該污染物之濃度變化在時間趨勢上主要由上述三項所構成，故評估頻率時亦將之區分為趨勢頻性頻率評估、週期性頻率評估及平均值準確性頻率評估三者，在三項中取的其中最大之頻率值，及所需觀測時間間隔最短者為整體之監測頻率。

(2) 監測頻率評估

監測頻率之估定以趨勢性、週期性及平均值進行評估評估完成以後選取可以囊括各種評估值之最大頻率監測用頻率。以下針對三種評估理論進行略述。

(a) 趨勢性頻率評估

將每口觀測井之污染觀測值就模式建立時通過  $t$  檢定，符合具線性趨勢或是階段趨勢後，才能被使用已決定趨勢性之變動  $p_w$  值，此值與趨勢之大小有關，推估時間距離越長，趨勢越明顯，變動值也越大，兩者成正比例關係。變動值之表示式為：

$$p_w = f(n_T - t_{\alpha/2}) \quad \dots\dots\dots(14)$$

其中，  
 $f$ ：標準  $t$  分布之累積機率函數。  
 $t_{\alpha/2}$ ：標準  $t$  分布表中  $n-1$  個自由度，信賴區間為  $\alpha/2$  所對應之值。  
 $n_T$ ：趨勢性大小。

而趨勢數則為趨勢大小、定常標準偏差、有效取樣數之函數。即  $n_T(t_r, S_p, n^*)$ 。依趨勢性分類可略分為線性及階段性兩種。其中：

具線性趨勢時

$$n_T = \frac{t_r}{\sqrt{12} S_p / \sqrt{n^*(n^*+1)(n^*-1)}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

具階段趨勢時

$$n_T = \frac{t_r}{2S_p/\sqrt{n^*}} \dots\dots\dots(16)$$

(b) 週期性頻率評估

週期性估求觀測頻率主要依據參數推估之準確度及 Nyquist 頻率進行。在模式建立所選取之重要週期變化後，Nyquist 頻率為選取重要週期項的最小週期之半，否則會造成週期變化的虛像發生。因此，在週期變化中以決定之頻率應大於前者。另外參數之準確性有賴信賴區間半寬值 (the half width of the confidence interval) (Zhou, 1992)加以推估觀測頻率。

$$\text{var}(a_0) = \frac{S_p^2}{n^*} \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{var}(a_j) = \text{var}(b_j) = \frac{2S_p^2}{n^*} \dots\dots\dots(18)$$

信賴區間半寬值為

$$r = \frac{2S_p t_{a/2}}{\sqrt{n^*}} \dots\dots\dots(19)$$

式中  $S_p$ 、 $t_{a/2}$ 、 $n^*$  分別為定常標準偏差、t 分布  $n-1$  個自由度之對應值及有效取樣數。將上述式左右移項之後可令其標準化為第 20 式。當給定一信賴係數  $\alpha$  後，標準半寬值(standard half-width)很明顯可以看出與有效取樣數成反比，由於觀測數越來越大時，有效取樣數有越來越趨於緩和之勢，因此週期性觀測頻率直標準由半寬值從開端至結尾呈現遞減緩和至水平之趨勢，在曲線之轉折點處即可求到滿足之觀測頻率，且該頻率應大於 Nyquist 頻率。

$$\frac{r}{S_p} = \frac{2t_{a/2}}{\sqrt{n^*}} \dots\dots\dots(20)$$

(c) 平均值準確性頻率評估

在尋求平均值準確性推估觀測頻率時，可由平均值之信賴區間半寬值(standard half-width of mean)予以獲取。

$$P_r \left\{ t_{a/2} < \frac{x - \mu}{S_p/\sqrt{n^*}} < t_{1-a/2} \right\} \dots\dots\dots(21)$$

式中， $\mu$  為平均值其表示式為  $x - \frac{t_{a/2}S_p}{\sqrt{n^*}} < \mu < x + \frac{t_{a/2}S_p}{\sqrt{n^*}}$ ，對於平均值之信賴

區間半寬值，簡稱為平均值半寬值。其形式為  $r_j \frac{S_p t_{a/2}}{\sqrt{n^*}}$  其中符號表示方式同上述之週期性頻

率評估；將其標準化為  $\frac{r_j}{S_p} = \frac{2t_{a/2}}{\sqrt{n^*}}$ 。

平均值之標準半寬值亦隨有效取樣數呈現遞減狀態，要尋求觀測頻率一同前述週期性推估一般，載轉折處尋求滿足之觀測頻率。

俟以上三種頻率均已決定之後，以其中最大之頻率值，亦即，觀測時間最短、監測次數最頻繁者，作為後之監測頻率。

## 四、分析結果

針對上述所提及之地下水水流模式 (MODFLOW)、地下水污染潛勢分析模式 (DRASTIC)、地下水水流污染傳輸模式(MT3D)及監測井頻率分析模式(FREQ)結果說明如下。

### 4.1 地下水流模式

為建構 DRASTIC 地下水污染潛勢分析與 MT3D 中污染傳移模式之前置處理作業，故須考慮污染傳輸中有關滲流問題。在原發展之地下水水流模式之基本參數資料下，並依據屏東縣環保局於 1999 年所發表之「屏東縣地下水水質污染調查改善測站設置及監測工作計劃」(屏東縣環保局, 1999)中所引用資料，主要將有效孔隙率依據礫石、礫石夾砂及黏土三種類型，區分為 15%、10%、2%三種孔隙率，配合前所述之屏東平原沖積扇依扇頂、扇央、扇尾之區分法內所具備之土壤特性，直接利用該三種孔隙率引用於屏東平原地下水水流模式水文地質分區並作該參數模擬校正(calibration) (Ting, 1997)。

### 4.2 水污染潛勢模式

針對民國 85 年地下水水流模式之孔隙部分先行進行修正，並與原模式比較後，將其中各值

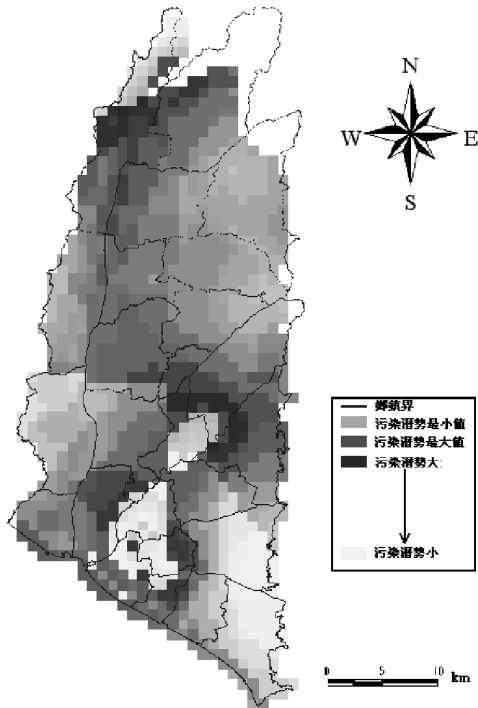


圖 2-1 DRASTIC 一般風險評估結果分佈區間圖

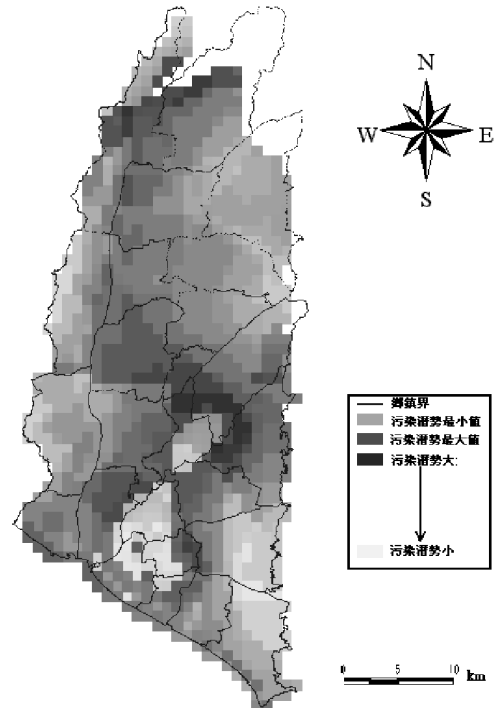


圖 2-2 DRASTIC 農業風險評估結果分佈區間圖

予以評分。水力傳導係數(C)係依民國 85 年模式所校正之資料進行給定，並配合污染傳輸模擬第一層淺層污染趨勢之需求，選定第一層水力傳導係數進行 C 值分級；降雨補注量(R)之選定，係以上述模式中七月淨補注量進行分級。選用七月份淨補注量主要原因為本月之降雨相對於一至六月有明顯變化。本月代表污染物在該降雨量之下，傳輸速度可產生明顯改變且加大污染質傳輸效率；含水層深度(D)係依據七月降雨量所相對之地下水位值與地表高度差異進行分級給定。將上述參數輸入 DRASTIC 評估模式中，配合由 GIS 系統所擷取之土壤特性(S)、坡度特性(T)與通氣層影響性質(I)之圖形及屬性資料，並同前述各項因子在 Processing MODFLOW 內，以其搜尋及面狀輸入功能進行網格大小為  $1\text{km}^2$  為單位之評估因子等級區分與權重給定。

給定結果區間如下表 3 所示，一般風險分級中明顯發現污染潛勢以一個分數分級時，前三大污染潛勢分級落於內埔、美濃、旗山、竹田及萬丹等區域；污染潛勢最小之末三級則分佈於崁

表 3 DRASTIC 分級與分析結果總分區間表

| 項次   | 加權前區間 | 一般風險   | 農業風險    |
|------|-------|--------|---------|
| D    | 0~9   | 0~50   | 0~50    |
| R    | 1~10  | 12~36  | 12~36   |
| A    | 3~10  | 9~30   | 9~30    |
| S    | 4~6   | 6~70   | 15~50   |
| T    | 3~9   | 3~9    | 9~30    |
| I    | 3~10  | 15~50  | 12~40   |
| C    | 1~10  | 3~30   | 2~20    |
| 評估結果 |       | 48~130 | 116~212 |

頂；於農業風險分級中前三大污染潛勢分級與上述一般風險分級相同，污染潛勢最者則分佈於崁頂及新埤兩個鄉鎮內(如圖 2-1, 2-2)。

#### 4.3 地下水污染傳輸模式

為配合上述 DRASTIC 地下水污染潛勢之評估結果作為主要評選項目，再配合前經濟部水資源局於「台灣地區地下水觀測井網整體計劃八十六至八十七年度濁水溪沖積扇及屏東平原觀測站網建立及運作管理報告」(屏東縣環保局, 1999)

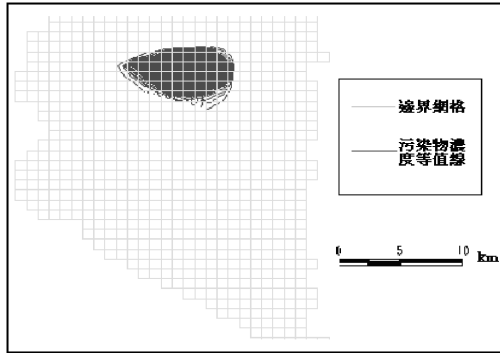


圖 3 污染傳輸模擬結果圖

所紀錄之地下水水質監測資料為依據，彙整有關屏東平原地下水水質調查中飽和總固體溶解度之資料。並將該值由大至小排序取得 DRASTIC 評估結果前三各高分數值之分部區域後，以該區域之污染質濃度進行排序，並取得污染質濃度最高者作為模式模擬之初始點位，選定結果以內埔觀測井為模擬點位，尤其基本資料顯示此處可被評估之代表性，其總固體溶解度為 569 mg/l，DRASTIC 之評估分數在一般風險與農業風險上分別為 128 及 212。模擬模式原則上採用原地下水水流模式所分割之格網大小，其大小為每格  $1000 \times 1000 \text{ m}^2$  之大小，在時間間隔上依據原地下水水流模式，以每月為一個期距進行飽和地下水水流污染傳輸移流模式模擬。本研究中污染傳輸模擬，因資料上之不連續性及地下水污染傳輸相關參數亦無實際資料可得，故僅針對地下水流傳輸移流項進行模擬，以提供長時間之污染傳輸模擬資料，進而為建置地下水水質監測頻率分析之整體評估俾提供基本資料來源。

模擬假設如第 3.3 節所述，假設污染質僅在初始時間進入地下水中，其餘時刻無其他污染質介入，並且為獲得較長時之觀測趨勢，本模式中亦假定民國 85 年地下水水流流況不變下，進行五年之污染傳輸模擬，以取得較長時且在時間特性上較為明顯之數值，但因為資料取得困難而簡化成移流模式，故其污染傳輸趨勢亦將僅反應在地下水水流傳輸面。屏東平原之地下水水流流向一般以東北往西南方向流動，在進行污染傳輸之後可據此一特性，檢驗污染質在傳輸路徑上是否

表 4 虛擬監測井模擬結果表 位：mg/l

| 井號<br>時間<br>(月) | 1        | 2       | 3      | 5      | 6      | 7      |
|-----------------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 1               | 496.1254 | 0.0940  | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 12              | 242.7990 | 40.0525 | 0.2039 | 0.0206 | 0.0140 | 0.0000 |
| 24              | 118.2513 | 63.0711 | 0.5600 | 0.0378 | 0.3551 | 0.0002 |
| 36              | 57.1671  | 61.5804 | 0.6976 | 0.0386 | 1.7270 | 0.0008 |
| 48              | 28.0444  | 49.5401 | 0.6612 | 0.0314 | 4.3493 | 0.0022 |
| 60              | 14.0372  | 36.0674 | 0.5493 | 0.0228 | 7.4861 | 0.0040 |

合理。本研究中因為只考慮到單純的傳輸速度作用，且採用飽和總固體溶解度為模擬污染質，取其具備多種成分之性質進行模擬，在趨勢資料取得上不考量複雜之能量傳導及化學作用，僅以質量平衡方式約束污染傳輸行為。圖 3 為第 5 週期結束之模擬結果。擬質傳輸之流動方向與地下水水流方向一致，且成現向西、南兩個明顯之傳輸方向，質量平衡誤差在 0.00001 以下。另外，在本研究中為取得 FREQ 所須之觀測資料，在此採用 7 口虛擬觀測井之水質資料來作為 FREQ 所分析之資料，其井位分佈圖見圖 4，各監測井之結果如表 4 所示，其中井 1 所在位置為初始污染之輸入點。

#### 4.4 地下水質監測頻率分析

對上述污染傳輸值輸入 FREQ 中進行頻率分析。首先針對地下水水質資料建檔進行輸入，FREQ 內建之 t 檢定資料中進行檢定，以求得是否成立線性或階段性趨勢，其相關理論如第 3.4 節所述。如趨勢成立則經由模式之自動篩選功能將主要之趨勢予以篩選；若否，則進行週期性分析。經篩選之趨勢將作為頻率分析中參數之提供，並提供在整體污染監測資料上進行過濾，以從事後續之週期性及序率性分析。週期性分析係經由傅利葉級數表示式以決定資料中主要之週期，其中處理方式係將污染觀測質中所有週期篩選出，以供選定最符合整體週期趨勢之週期，經由週期決定其表示式，並加以扣除此趨勢後進行序率性評估。在序率性的決定上以其自相關係數達 95% 為標準，選擇序率性，如未達標準，則表



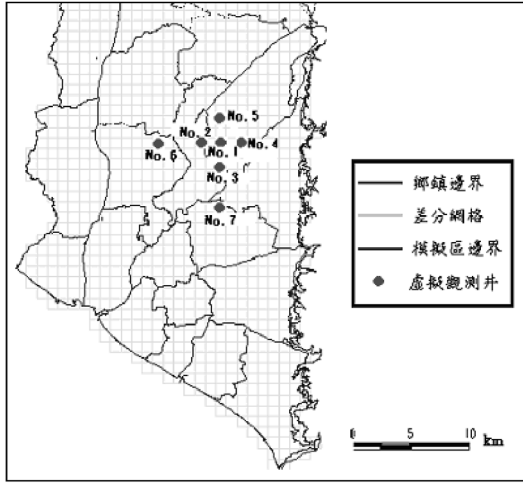


圖 4 虛擬井位配置圖

示是在週期性上未將其特性完全剔除，對後續之序率仍有影響，則在針對上述週期性重新再做評估，如此以達所要求之自相關係數檢定標準即為模式建立完成，最終模式係由趨勢性、週期性及序率性三者疊加而成。所得參數則加入後續之頻率分析功能中，決定趨勢性、週期性及序率性各參數所構成之相對應頻率值，並從中選出最大者以作為單口井之監測頻率。

經由FREQ所決定之各種分佈趨勢之參數經整理後可由表 4 顯示，本研究中所設之虛擬觀測井中井 1、井 2、井 6 及井 7 具有線性趨勢，其餘井則不具備線性趨勢。表中趨勢性參數主要表現出趨勢分佈的大小及趨勢分佈表示式。井 1 因為處於初始濃度輸入區，故有明顯的濃度落差趨勢，也造成標準偏差上較大的離散情形。井 7 則由於位置較遠，為期五年的污染傳輸時間內，污染物受到被稀釋之變化呈現且無法產生較高濃度傳輸，故其值甚小。表 5 中則為週期性分析所得結果，表中階數為將整體觀測時距切割所獲得之切割分隔，亦決定週期趨勢內之頻率大小，並從中選出最具代表性者以作為週期性分析之主要決定週期，藉此建構週期性分析之表示式。表中具附有標準偏差值者，為本研究中所選用之週期。表 6 中顯示，除井 4 以外，其餘均具序率性質，經分析結果皆為 AR(1) 模式。

表 4 趨勢性分析結果表

| 井號  | 趨勢種類 | 趨勢參數                |         | 標準差     |
|-----|------|---------------------|---------|---------|
|     |      | 趨勢表示式               | 趨勢大小    |         |
| 井 1 | 線性   | $331.9531-6.5541 t$ | 393.246 | 51.7949 |
| 井 2 | 線性   | $36.2554+0.3926 t$  | 23.736  | 15.9411 |
| 井 6 | 線性   | $-1.6854+0.1189 t$  | 7.134   | 0.9008  |
| 井 7 | 線性   | $-0.0009+0.0001 t$  | 60.0001 | 0.0005  |

表 5 週期性分析結果表

| 觀測井 | 階數 | 週期     | 週期參數     |        |          |         | 標準差     |
|-----|----|--------|----------|--------|----------|---------|---------|
|     |    |        | MSD(j)   | Pi     | aj       | bj      |         |
| 井 1 | 1  | 60     | 2128.348 | 0.8208 | 64.5916  | -9.1991 |         |
|     | 2  | 30     | 220.2388 | 0.9058 | 19.4631  | 7.8527  |         |
|     | 3  | 20     | 67.4453  | 0.9318 | 9.233    | 7.0458  |         |
|     | 4  | 15     | 40.5048  | 0.9474 | 6.4337   | 6.2942  |         |
|     | 5  | 12     | 30.2     | 0.9591 | 2.3409   | 7.4108  |         |
|     | 6  | 10     | 12.433   | 0.9638 | 0.8658   | 4.9108  | 21.7446 |
| 井 2 | 1  | 60     | 225.9215 | 0.9197 | -21.1637 | 1.9854  |         |
|     | 2  | 30     | 12.0977  | 0.969  | -3.9891  | -2.8779 |         |
|     | 3  | 12     | 2.4703   | 0.979  | -1.0018  | -1.9842 |         |
|     | 4  | 20     | 2.3026   | 0.9884 | -1.2835  | -1.7199 |         |
|     | 5  | 6.6667 | 0.701    | 0.9912 | 0.4649   | -1.089  |         |
|     | 6  | 15     | 0.6838   | 0.994  | -0.3876  | -1.1033 | 0.867   |
| 井 3 | 1  | 30     | 5.3182   | 0.1899 | 1.011    | 3.1007  |         |
|     | 2  | 60     | 4.055    | 0.3346 | 2.8385   | -0.2301 |         |
|     | 3  | 15     | 3.7745   | 0.4694 | -2.351   | 1.4219  |         |
|     | 4  | 20     | 2.8851   | 0.5724 | -0.9508  | 2.2059  |         |
|     | 5  | 12     | 2.7101   | 0.6692 | -2.2295  | -0.6704 | 4.8073  |
| 井 5 | 1  | 60     | 0.0001   | 0.4694 | -0.0123  | 0.0014  |         |
|     | 2  | 12     | 0        | 0.7319 | -0.0088  | -0.003  |         |
|     | 3  | 15     | 0        | 0.8331 | 0.0033   | 0.0047  |         |
|     | 4  | 6.6667 | 0        | 0.8717 | -0.0035  | -0.0005 | 0.0052  |
| 井 6 | 1  | 60     | 0.7257   | 0.925  | 1.1988   | 0.1191  |         |
|     | 2  | 30     | 0.0226   | 0.9538 | 0.2124   | 0.007   |         |
|     | 3  | 12     | 0.0144   | 0.9722 | 0.1464   | -0.086  |         |
|     | 4  | 15     | 0.0109   | 0.9861 | 0.1299   | 0.0705  | 0.2446  |
| 井 7 | 1  | 60     | 0        | 0.9535 | 0.0007   | 0.0001  | 0.0001  |

表 6 序率性分析結果表

| 井號  | AR(P) | 自相關係數  | 標準差     |
|-----|-------|--------|---------|
| 井 1 | 1     | 0.7348 | 5.3979  |
| 井 2 | 1     | 1.1403 | 1.3613  |
| 井 3 | 1     | 0.6953 | 3.4421  |
| 井 5 | 1     | 0.5371 | 0.0036  |
| 井 6 | 1     | 0.818  | 0.15    |
| 井 7 | 1     | 0.8143 | 0.00004 |

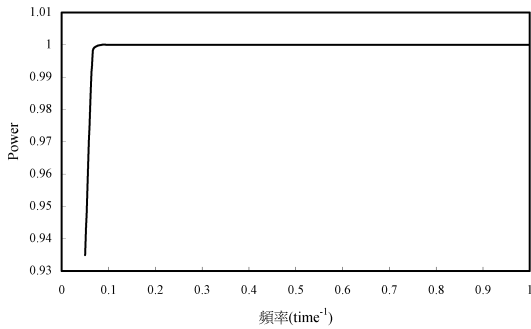


圖 5 井 7 線性趨勢頻率分佈曲線圖

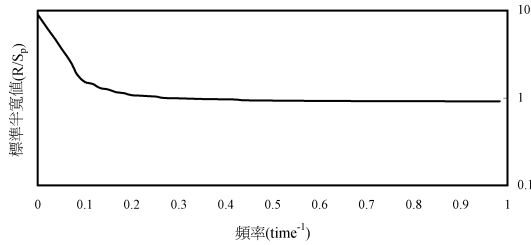


圖 6 井 7 週期性頻率分佈曲線圖

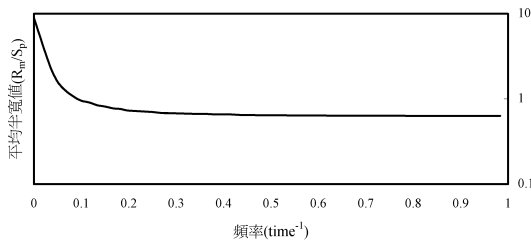


圖 7 井 7 序率性頻率分佈曲線圖

經由上述分析結果只要將表 4 至表 6 中所列參數組成第 3.4 節經由三種性質所形成之方程式，即為本研究中用來表示單井趨勢之疊加方程式。將前述疊加式重新進行檢定進而分析參數即可求得頻率值。依據 3.4 節所述之模式頻率評估方式及上述資料可繪製成 Power-頻率曲線分佈圖、週期性標準半寬值-頻率曲線分佈圖及序率性標準半寬值-頻率曲線分佈圖，從上述圖形中期週期為無因次項，主要依據參與評估之資料長度與大小而定，在本研究中以月為基本單位。在此因篇幅關係故僅以井 7 分析之圖 5 至圖 7 為例，圖 5 代表趨勢性之週期分佈曲線，在圖中顯示 power 值在頻率為 0.08 之後皆為 100%，若本研究中設定取樣頻率為 0.5 與 1，即兩個月月

表 7 頻率決定表

| 型態          | 各井之頻率值 |      |      |      |      |      |      |
|-------------|--------|------|------|------|------|------|------|
|             | 井號     | 1    | 2    | 3    | 5    | 6    | 7    |
| 趨勢性 power 值 | 次/月    | 1    | 1    | ***  | ***  | 1    | 1    |
|             | 次/2 月  | 1    | 0.95 | ***  | ***  | 1    | 1    |
| 週期性標準半寬值    | 次/月    | 0.95 | 1    | 1    | 0.91 | 0.91 | 0.97 |
|             | 次/2 月  | 0.98 | 1    | 1    | 0.95 | 0.95 | 0.99 |
| 序率性標準半寬值    | 次/月    | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.71 | 0.7  | 0.8  |
|             | 次/2 月  | 0.87 | 0.85 | 0.87 | 0.75 | 0.75 | 0.82 |
| 最終頻率        |        | 1    | 1    | 1    | 1/2  | 1    | 1    |

\*\*\* 為不具備該趨勢性質者

取樣與每個月取樣一次之頻率，則在要求上可符合需求；圖 6 所示為週期性之頻率分佈曲線，週期性之頻率曲線在上述取樣頻率時維持 0.95 以上，且該曲線在頻率為 0.4 之後即呈現取樣頻率不再增加之趨勢，此圖中反應最佳頻率值落於每三個月一次，但因為 0.5 至 1 之頻率曲線表現出較穩定之趨勢，故最佳頻率可取為每兩個月一次，但考慮週期性效應，故最佳取樣頻率值須較擬定值高出一倍，因此最佳頻率為每月一次；圖 7 之分析方法與上述週期性分析方式一樣，最佳取樣頻率亦落於 0.5 至 1 之間，取每兩個月一次。上述井 7 於趨勢性、週期性及序率性取樣頻率上分別為 0.5、1 及 0.5，依據第三章所述之頻率決定方式取最高頻率值，故井 7 整體之頻率應為每月觀測一次。其餘各口觀測井之頻率決定詳如表 7 所示。

## 五、結論與建議

本研究經由以上概化及方法建立起一套由地下水水流模式、污染潛勢分析、地下水污染模擬至監測井監測頻率分析架構，為區域性評估提出一系列方法。嘗試以此一研究目標，為現今地下水開發利用率趨高之屏東平原地區，進行事前評估制度早期發現地下水污染潛在性質，並能獲得最優之地下水質監測位置及取樣頻率模式，進而可降低污染危害之程度，確保地下水源品質，本論文研究結論與建議列述如後。

## 5.1 結論

- (1) DRASTIC 地下水污染潛勢分析，依據美國 EPA 之分級分數與權重資料，採取一般風險指數及農業風險指數進行分析。以一個分數分級前三大高分在兩種評估裏皆分佈於內埔、美濃、旗山、竹田及萬丹等鄉鎮區域；污染潛勢最低的三個分數，在一般風險中分佈於崁頂鄉，農業風險評估結果中則位於崁頂與新埤兩個鄉之中。
- (2) 根據 DRASTIC 風險分級與污染質監測資料，選定以內埔地區作為污染模擬之初始位置，其總固體溶解度值為 569mg/l，DRASTIC 之評估分數在一般風險與農業風險上之值為 128 及 212。模擬結果污染質分佈情形在水流梯度上明顯具有東、南兩個變化方向。並依據污染傳遞趨勢即分佈面積，選定七口虛擬觀測井，進行頻率分析。虛擬觀測井中，井 1、井 2、井 6、井 7 具有趨勢性、週期性及序率性；井 3 及井 5 僅具週期性及序率性；井 4 因地下水位變化，無法產生污染移流傳輸上之濃度變化與傳遞。
- (3) 經頻率分析後繪出之頻率分佈曲線，以每月觀測一次及每兩個月觀測一次進行頻率篩選，得具備趨勢性之各井以每月觀測一次為最佳；在週期性及序率性評定上則以每兩個月一次為最佳。依據頻率選取原則其結果為，單口井最佳頻率決定必須選取三種性質評估所得之最大頻率值。因此，本研究中虛擬監測井之最佳取樣頻率為每月一次。

## 5.2 建議

- (1) 研究中地下水水流模式經數學概化所得，故無法細膩地將地下水污染潛勢予以清晰表現，僅能針對模式中參數進行分析。前述原因，亦可能導致污染潛勢分析模式中無法歸納出較細之分區。如能獲得更完備與精度較高之資料，可增加分析之適用性與精確性。

- (2) 頻率選取方式，應以趨勢性頻率、週期性頻率與序率性頻率中最大者為單口井選擇依據。若所涉及之井數甚多，且各井之最佳取樣頻率值不一致，則建議以取樣之目的不同劃分取樣井之頻率，例如著重週期性者，可將其獨立抽離進行觀測；若為行政上之便利性與統一性，在經費許可時，可以各井觀測頻率間之最小公因數作為井群間觀測頻率之擬定方式。
- (3) 研究中因資料上不連續及無法取得有關污染模擬相關資料，將模式簡化至移流項，無法針對其他污染傳輸行為作更進一步之探討。在研究中僅能做為頻率分析上之資料給定。如能針對 DRASTIC 所分析之高污染潛勢區及高污染區域進行長期之監測，則模式之分析結果數據在實務應用上，可提供較大貢獻。
- (4) 有關 DRASTIC 污潛勢評估部分，於本研究中採用美國 EPA 之相關等級劃分與權重值，基本理由系考量資料蒐集與是否已經獲得長期運用之面向。若能針對地下水污染潛勢中各項因子，加以建立符合本土性質之風險分級與指標設定，則可獲得更合理與更適用之評估結果。
- (5) 本研究旨在進行屏東平原地區地下水污染潛勢評估，並藉由評估結果與污染監測值釐定高風險區域，僅選擇以內埔作為監測頻率分析之地區，建構起整套由污染潛勢評估至頻率分析之整合程序。研究中獲得，或可依據地下水污染潛勢與污染現況作為分級之概念，將污染風險區劃分成數個不同等級之區域進行污染物之監控與處置，並可依此擬定不同之處理目標與處理方式，以配合實際需要上之運用。惟本研究旨不在此，故僅在此以建議方式提出。
- (6) 本研究係屬於初步研究，未來若能獲得更多資料，可進行更詳細之劃分與評估，並結合現行污染區復育方法，進而建立由監測至復育整治，至管理上更完整之整體配套措施。

## 致 謝

本研究承蒙國科會計畫編號 NSC90-2313-B-020-025 補助，特此致謝。

## 參考文獻

1. 丁澈士、戴維良、甘東富，1999，2000，2001，「整合地理資訊系統與地下水易污染性之評估方法應用於地下水質監測井網之設計-屏東平原個案研究(I,II,III)，國科會專題研究計畫成果報告。
2. 周建名，「屏東平原地下水人工湖補注之可行性研究」，國立屏東科技大學土木工程系碩士班，碩士論文，屏東(2001)。
3. 徐年盛、張國能，「DRASTIC 地下水污染潛能評估系統之介紹」，台灣水利，第 37 期，第 56-67 頁(1989)。
4. 屏東縣環保局，台灣省地下水水質監測站屏東縣設置實施計劃，屏東縣(1999)
5. 經濟部，「台灣地區地下水觀測井網整體計劃八十六至八十七年度濁水溪沖積扇及屏東平原觀測站網建立及運作管理報告」，台北(1998)。
6. Aller, Linda, Bennett, T., Lehr, J.H. and Petty, R., DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground water Pollution potential Using Hydrogeologic Settings, U.S. EPA. (1985).
7. Chiang, Wen-Hsing and Kinzelbach Wolfgang, 3D\_groundwater Modeling with PMWN, Springer-verlag Berling Heidelberg, Germany (2001).
8. Harbaugh, A.W. and McDonald M.G., User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model, USGS open file Report 96-485. (1996).
9. Ting, C.S., Groundwater Resources Evaluation and Management for Pingtung Plain, Taiwan, PhD thesis, Free University Amsterdam, The Netherlands, ISBN: 90-9008794-X. (1997).
10. Zheng, C., MT3D Version Dod\_1.5, a modular three-dimensional transport mode, The Hydrogeology Group, University of Alabama. (1996).
11. Zhou, Yangxiao, Sampling Frequency for Monitoring Shallow Groundwater Levels in the Central Yellow River Plain, Proceedings of International workshop on Groundwater and Environment, Beijing. (1992).

收稿日期：民國 93 年 9 月 9 日

修正日期：民國 94 年 4 月 13 日

接受日期：民國 94 年 4 月 21 日