

多變量地質統計應用於水質指標井網設計

葉明生¹ 單信瑜² 張良正³ 林裕彬⁴

關鍵詞： 井網設計、地質統計、主成份分析。

摘要

因地下水資源管理中之水質與水量並重的考量，地下水質採樣與檢測的費用龐大，且其成本往往遠比地下水位之量測還高，如何建立具代表性之整體地下水質且又低成本之地下水質監測方案，是令人值得關切的重點。

本研究乃藉由整合主成份分析方法與地質統計之多變量地質統計 (multivariate geostatistics)，在考量多尺度及多變量 (多水質項目) 之情況下，進行水質指標井網設計。本研究中以屏東平原作為實際應用之探討，提供既有觀測井作為水質指標井之優先次序，未來可將本研究之水質指標井網分析流程應用於其它研究區域，以節省地下水質監測經費。

ESTABLISHING INDEX WELLS FOR MONITORING GROUNDWATER QUALITY USING MULTIVARIATE GEOSTATISTICS

Ming-Sheng Yeh Hsin-Yu Shan Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University
Hsinchu, Taiwan 30010, R.O.C.

Yu-Pin Lin

Department of Bioenvironmental Systems Engineering
National Taiwan University
Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Key Words: monitoring network design, geostatistics, principal component analysis.

ABSTRACT

The current groundwater monitoring network established and operated by the Water Resources Agency has successfully provided valuable information on the main aquifers in Taiwan. However, the cost of maintaining extensive monitoring of both the levels and quality of groundwater is very high. As a result, developing a cost-effective program for monitoring the quality of groundwater, which involves sampling from only a fraction of the existing monitoring wells, is important. Such a monitoring program can yield sufficient information to determine the quality of ambient water quality in the main aquifers at reduced cost.

¹ 國立交通大學土木工程學系博士班研究生

² 國立交通大學土木工程學系副教授

³ 國立交通大學土木工程學系教授

⁴ 國立臺灣大學生物環境系統工程學系副教授



This work implements the multivariate geostatistical method to select a well network for monitoring groundwater quality indexes under considering multi-variables of multi-scales geostatistical structures. The results of this study are the rank of original groundwater level monitoring wells in the Pingtung plain as groundwater quality index wells. The results of this study indicate that the multivariate geostatistical method is suitable for locating groundwater quality index wells that provide sufficient information at reduced cost. The application of the proposed approach can be extended to other regions.

一、前 言

基於地下水資源管理中之水質與水量並重的考量，於進行含水層水位觀測之同時，尚需對含水層進行各種水質項目的採樣分析，而地下水井網為獲得地下水位及水質資訊之主要工具，並且由觀測井網所得之水位及水質資料，可以提供作為地下水管理之依據。

因此，對於目前已建置之觀測井網而言，觀測井建造只是第一階段，為了取得地下水水質資料之同時，仍須龐大的地下水採樣與檢測費用，且其成本往往遠比地下水位之量測還高，如何建立代表整體地下水質且又低成本之地下水質監測方案，是令人值得關切的重點。

而為達上述目的，必須在既有觀測井網中，選出能代表整體地下水質之井位，也就是水質指標井。所選定之水質指標井必須能即時反應整體區域之水質狀況，以作為地下水管理依據，所以本研究水質指標井之功能，並不以污染預警為主要目的，而是要了解大區域當下之水質狀況及水質之長期變化，以作為水量利用管理之參考資訊。現行一般觀測站網之水質採樣分析項目總共包含約30個水質項目，勢必無法運用所有水質項目來進行水質指標井之選定。

關於地下水觀測井網的設計方法，在過去已有許多的研究，多利用地質統計之克利金法 (Kriging method) 或聯合克利金法 (Co-kriging method) 為理論基礎，大部份均以使整個區域之變異量達到最小為目標，考慮一個或多個地下水文參數間的相關性發展一佈井模式。

克利金推估為一種利用區域性變數理論基礎之方式，首先由 Matheron [1] 於1971年提出。Carrera *et al.* [2] 首先將克利金推估應用在地下水之最佳之井網佈置上，結合分枝與限定法之佈井模式，以此種模式所得之井位，為全域之最佳化，但不具次序性。其後尚有許多針對不同的佈井方式之研究，Rouhani [3] 發展出一降低變異數分析法 (Variance Reduction Analysis)，利用此一方法可計算每一佈井位置造成之降低克利金變異量，之後依各井位造成的降低變異量之大小順序，依序加入佈井區域中。上述之方式，只可稱為較佳 (sub-optimal) 結果，並非真正的最佳井位，因此其後尚有對於最佳化井網規劃之研究，Lin [4] 以 Rouhani [3] 之降低變異數法之理論為基礎發展了一加入最佳化搜尋過程之井網規劃模式，並可同時處理多站的問題，由此種方法所得之佈井位置，將不受限於佈井次序，佈井位置亦不受限於特定位置，且達到統計上更佳的精度。

上述對於井網規劃方式之研究，均使用克利金推估為其理論基礎，然而此種佈井模式，只能針對區域中之單一

參數進行分析，如以單一水質為監測目標，利用克利金法發展之佈井模式所挑選出之觀測井網，必然相當符合監測目標。

聯合克利金推估首先由 Journal and Huijbrechts [5] 提出，其研究中描述了聯合克利金推估利用不同參數間之相關性，以採樣較多之參數來推估採樣少之參數。Benjema *et al.* [6] 利用聯合克利金設計監測 T 值 (Transmissivity) 及 SC 值 (specific capacity) 地下水參數之井網，並與運用單變數克利金方法 (Univariate kriging) 所推估之站網比較兩者之優劣，證明運用聯合克利金方法 (Co-kriging) 所設計之站網為較佳且較為經濟。

聯合克利金法雖然可考慮多個地下水文參數間的相關性，然而在設計考慮多項地下水參數井網時，亦無法量化各項地下水參數間的重要性；也就是其在井網設計目標選定時，亦面臨難以決定各項地下水參數之間之權重，所以利用傳統地質統計方法所發展出之佈井模式，無法兼顧多個地下水質項目。

而對於既有觀測井網進行檢討之研究者有 Gangopadhyay *et al.* [7] 運用多變量分析中之主成份分析 (Principal component analysis, PCA)，在能掌握主要水位資訊之目的下，對既有之觀測井網減少觀測井數目，以節省觀測成本。但在其研究中雖已運用多變量分析中之主成份分析，亦僅直接利用之各站歷年水位資料進行觀測井網之設計，而非針對多項參數之井網設計。美國空軍環境卓越中心 (Air Force Center for Environmental Excellence) 運用地質統計方法研究長期監測 (Long-Term Monitoring, LTM) 井網的佈設，以確保取得對於決策有用的重要資料 (Cameron and Hunter [8])。荷蘭的地下水水質觀測井網 (Pebesma [9]) 在經過數年的運作之後，檢討指標井的數量與監測頻率，利用將總成本視為監測密度的函數進行優選，某一監測密度的成本包括量測的成本和對應的有限知識造成成本，總成本最低的監測密度即為最佳方案。

在國內關於井網設計之研究有徐等 [10] 對於地下水水質監測井網規劃設計之相關觀念；蔡 [11] 以克利金法對屏東平原觀測井之增設提出改善；潘與張 [12] 根據降低變異數分析繼續發展，考慮增設井位置在不同區域有不同權重，探討設井位置之分佈密度對於最佳井位分佈之影響；丁與戴 [13]，利用地質統計搭配井網密度分析軟體，分析出最佳監測井網。上述國內外之研究大部分的文獻都以地質統計作為理論基礎，發展出一套方法挑選出具代表性的觀測井，但卻無法設計出同時考量多個水質項目之觀測井網。



本研究運用之多變量地質統計方法是結合了地質統計之變異元模式 (Multivariate variogram modelling) 與多變量統計之主成份分析 (Principal component analysis)，與傳統克利金法最大不同的地方，在於本研究所選出之觀測井網考量的是地下水質之影響因子，而非地下水水質項目本身。多變量地質統計可以將個具相關性的空間結構，拆解成由各個互不相關的空間尺度結構線性組合而成，之後再針對各個空間尺度結構加以分析，在各個空間尺度結構下，可利用其共區域化矩陣 (coregionalization matrix) 進行主成份分析。在考慮各區域變數於空間相關性的先決條件下找出現象背後的造成原因，推估出影響各區域變數間的因子，及各因子對各區域變數之影響程度，並以此理論為基礎，推展出一套考量多空間尺度及兼顧多項地下水質項目之水質指標井選定模式，最後並以屏東平原作為模式之驗證及應用。

二、多變量地質統計理論

由於在許多相關理論書籍 (Deutsch and Journel [14]；Wackernagel [15]；Goovaerts [16]) 及文獻 (Goovaerts [17]；Wackernagel [18]) 中都已經對多變量地質統計方法有詳細的敘述，以下僅作一摘要說明。

在地質統計中以變異元 (variogram) 來量化資料之相關性，這些資料也包括空間上或時間上之共變異量函數。地質統計中，將這些變異元模式稱之為空間或時間結構 (structure)，並以空間上或時間上各觀測值之相關性定義。取樣值和取樣點距離間的關聯性可以利用變異元來量化。變異元之定義式如下：

$$\gamma(h) = (1/2)Var[Z(x) - Z(x+h)] \quad (1)$$

其中， h 為各配對之取樣點之間距； Var 為變異數； $Z(x)$ 為 x 位置上之區域性變數值； $Z(x+h)$ 為 $x+h$ 位置上之區域性變數值。

變異元則可由下列經驗式求得：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (2)$$

其中， $\gamma(h)$ 為距離 h 之變異元； $n(h)$ 為落於某一間距之任相異兩樣本點的組合配對數 (pairs)，而此處 h 代表落於此間距內所有配對數之平均距離。利用類似式(2)之方法可得出不同的區域性變數間可能存在的空間相關性，以複變異元 (Cross-variogram) 來表示，則其定義如下：

$$\gamma_{\alpha\beta}(h) = \frac{1}{2} E[[Z_\alpha(x_i + h) - Z_\alpha(x_i)][Z_\beta(x_i + h) - Z_\beta(x_i)]] \quad (3)$$

複變異元則可由下列經驗式求得：

$$\gamma_{\alpha\beta}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z_\alpha(x_i + h) - Z_\alpha(x_i)][Z_\beta(x_i + h) - Z_\beta(x_i)] \quad (4)$$

其中， α 、 β 代表不同之區域性變數

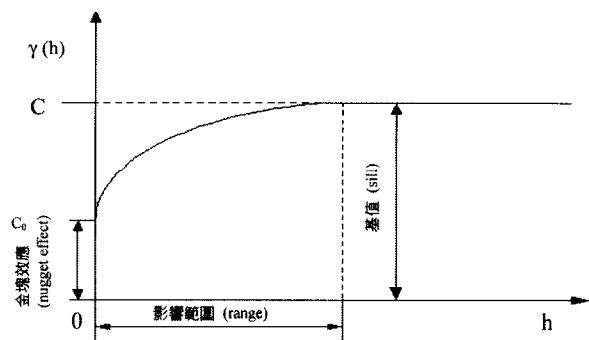


圖 1 變異元分析之示意圖

繼續介紹三個與變異元相關之名詞：

(1) 基值 (sill)

在 h 對 $\gamma(h)$ 關係圖中，如圖 1 所示，當 h 愈遠則 $\gamma(h)$ 漸增且收斂至一定值 C ，則此 C 值稱之為基值。

(2) 影響範圍 (range)

在 h 對 $\gamma(h)$ 關係圖中，基值所對應之分離距離 r ，稱之為影響範圍 (range) 或影響半徑 (radius of influence)。

(3) 金塊效應 (nugget effect)

就式(1)而言， $Z(x)$ 應有 $\gamma(0) = 0$ ，惟在實際應用上，常有當 $h = 0$ 時， $\gamma(0) = C_0 \neq 0$ 的情況發生，此稱為金塊效應。其發生原因可能是 $Z(x)$ 之量測誤差或 $Z(x)$ 在非常小的距離之內即有相當大之變異，而各觀測值所在位置間之距離較大，故無法顯現極小範圍內 $Z(x)$ 之變異狀況。

一般而言，變異元模式以下三種模式為最常見，其分別為：

(1) 指數模式 (Exponential model) :

$$\gamma(h) = C_0 + \text{Sill} [1 - \exp(-3h/\text{Range})] \quad (5)$$

(2) 高斯模式 (Gaussian model) :

$$\gamma(h) = C_0 + \text{Sill} \left[1 - \exp[-(3h/\text{Range})^2] \right] \quad (6)$$

(3) 球型模式 (Spherical model) :

$$\gamma(h) = C_0 + \text{Sill} \left[\frac{3}{2}(h/\text{Range}) - \frac{1}{2}(h/\text{Range})^3 \right] \quad (7)$$

有了式(2)與式(4)之變異元推算公式，即可計算出各間距內之變異元值，再配合變異元模式 (式(5)~式(7)) 之選定及基值、影響範圍及金塊效應之決定，即可套疊出合適之變異元，而此套疊過程可以迴歸法或觀察方式決定。

而具有多重空間尺度一組隨機函數之複變異元 $\gamma_{\alpha\beta}(h)$ ，可由個別空間尺度下的基本複變異元函數 $g^u(h)$ 線性套疊組合而成。複變異元套疊模式之線性組合如下式所示 (Wackernagel [15])：

$$\gamma_{\alpha\beta}(h) = \sum_{u=1}^S \gamma_{\alpha\beta}^u(h) = \sum_{u=1}^S b_{\alpha\beta}^u g^u(h) \quad (8)$$



其中， S 為空間尺度之數量； $b_{\alpha\beta}^u$ 為係數； $g^u(h)$ 為空間尺度 u 之基本複變異元函數。

一組二階定常 (Second-order stationary) 隨機函數 $\{z_i(x); i = 1, \dots, N\}$ 可分解成不同空間尺度的集合 $\{Z_i^u(x); i = 1, \dots, N; u = 1, \dots, S\}$ 。其中， i 代表欲探討的變數種類，而 u 代表不同之空間尺度，共有 S 個空間尺度。

$$Z_i(x) = \sum_{u=1}^S Z_i^u(x) + m_i \quad (9)$$

而每一特定空間尺度下之區域化變數組成成份 (spatial component, $Z_i^u(x)$) 可用一組互相獨立的因子 ($Y_p^u(x)$) 及相對應的轉換係數 (transformation coefficients, a_{ip}^u) 之線性組合所取代，而這些不同尺度的因子之間不具有空間相關性：

$$Z_i^u(x) = \sum_{p=1}^N a_{ip}^u Y_p^u(x) \quad (10)$$

式中， $Y_p^u(x)$ 為某一空間尺度 u 之第 p 個區域化因子得點 (Factor Score)。根據式(9)及式(10)，

$$Z_i(x) = \sum_{u=1}^S \sum_{p=1}^N a_{ip}^u Y_p^u(x) + m_i \quad (11)$$

對於某一空間尺度 u ，假設每個區域化因子具有相同的變異元。此外，因每個區域化因子為互相獨立，故

$$\frac{1}{2} E \left[\left\{ Y_v^u(x) - Y_v^u(x+h) \right\} \left\{ Y_{v'}^u(x) - Y_{v'}^u(x+h) \right\} \right] = \begin{cases} g^u(h) & \text{when } u = u' \text{ and } v = v' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

如欲以 $g^u(h)$ 與 a_{ip}^u 表示相同或不同變數間之變異元，則為

$$\begin{aligned} \gamma_{\alpha\beta}(h) &= \frac{1}{2} E \left\{ [Z_\alpha(x_i) - Z_\alpha(x_i+h)][Z_\beta(x_i) - Z_\beta(x_i+h)] \right\} \\ &= \sum_{u=1}^S \sum_{u'=1}^S \sum_{p=1}^N \sum_{p'=1}^N a_{\alpha p}^u a_{\beta p'}^{u'} \frac{1}{2} E \left[\left\{ Y_p^u(x) - Y_p^u(x+h) \right\} \left\{ Y_{p'}^{u'}(x) - Y_{p'}^{u'}(x+h) \right\} \right] \\ &= \sum_{u=1}^S \sum_{p=1}^N a_{\alpha p}^u a_{\beta p}^u g^u(h) \end{aligned} \quad (13)$$

由式(8)及式(13)可得

$$\gamma_{\alpha\beta}(h) = \sum_{u=1}^S b_{\alpha\beta}^u g^u(h) = \sum_{u=1}^S \sum_{p=1}^N a_{\alpha p}^u a_{\beta p}^u g^u(h) \quad (14)$$

式(14)以矩陣形式表示

$$\Gamma(h) = \sum_{u=1}^S B^u g^u(h) = \sum_{u=1}^S A^u A^{u^T} g^u(h) \quad (15)$$

由式(15)得

$$B^u = A^u A^{u^T} \quad (16)$$

式中， B^u ：為共區域化矩陣 (coregionalization matrix)，為一半正定矩陣。 A^u ：為區域化因子 (regionalized factor) $Y_p^u(x)$ 與區域化變數組成成份 (spatial component) $Z_i^u(x)$ 之間的轉換係數矩陣，亦稱為因子負荷矩陣 (factor loading matrix)。

B^u 及 $g^u(h)$ 可利用複變異元套疊模式分析得出，其複變異元套疊模式之分析流程請參閱下一節說明。而在式(15)之 B^u 得出後，即可利用 PCA 分析可得 A^u (Wackernagel [15])：

$$B^u = A^u A^{u^T} = (Q^u \sqrt{\Lambda^u})(Q^u \sqrt{\Lambda^u})^T \quad (17)$$

其中： Λ^u 為空間尺度 u 之特徵值 (eigenvalues) 對角矩陣，其特徵值分別為 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ ； Q^u 為空間尺度 u 之特徵向量 (eigenvectors) 矩陣；而第 p 因子之貢獻率 (解釋變異量) 為可表示為 $\lambda_N / \sum \lambda$ 。

應用多變量地質統計理論可以針對已有的水質資料進行分析，此分析方式優於傳統的地質統計分析之處，為除了可以分析多個水質參數的空間變異性之外，亦可以分析各水質參數間於不同空間尺度的關聯性之空間變異性。

本研究之目的為建立能兼顧多項地下水質項目之水質指標井網，而欲達成此目的之最大問題即是在多項水質項目中，如何兼顧多項之地下水質，意即如何決定各個水質項目之權重？由於 PCA 能推估各影響因子之貢獻率，而此貢獻率即可作為既有觀測井各影響因子得分之權重，以作為觀測井位排序之依據。

三、分析流程

本研究運用多變量地質統計理論於水質指標井選定之步驟如下 (圖 2)：

1. 轉換地下水水質項目數據為標準化變數 (Standardized Variable)

於進行多變量質統計分析前，由於各水質項目之單位不同，應將選定分析之水質項目之數據進行標準化，其定義為：

$$\tilde{z}_{\alpha i} = \frac{z_{\alpha i} - m_i^*}{s_i} \quad (18)$$

其中， $\tilde{z}_{\alpha i}$ 代表第 α 口井之第 i 個變數 (水質項目) 標準化後之水質資料向量，維度為 $1 \times N$ ； m_i^* 為第 i 個變數 (水質項目) 之平均值； s_i 為第 i 個變數 (水質項目) 之標準偏差。而各觀測井水質資料經由標準化後，即可視為標準化變數，並提供後續分析所需之資料。

2. 變異元分析

本研究以 VARIOWIN2.2 (Pannatier [19]) 作為地下水水質複變異元分析之工具，進行標準化後變數之變異元 (direct-Variogram) 及複變異元 (Cross-Variogram) 套配，其變異元之套配程序請詳閱 Pannatier [19]。由實作過程中之變異元分析，即可檢驗各水質項目是否為定常性。若各水質



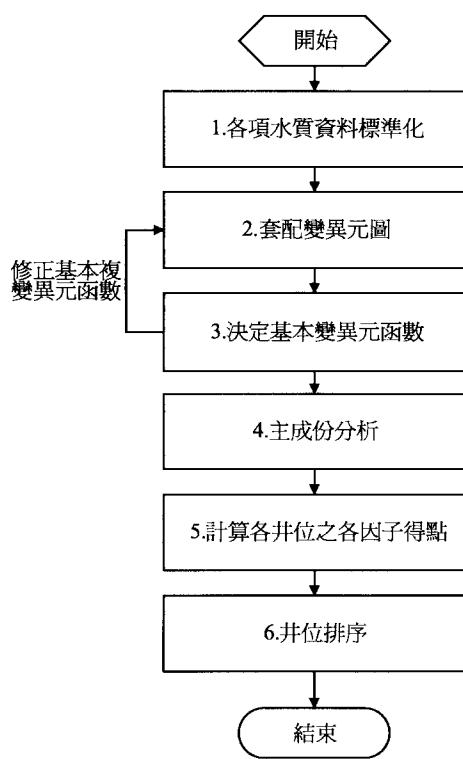


圖 2 多變量地質統計於水質指標井選定之分析流程圖

項目之變異元可套疊成由指數、高斯、或球型模式所組成，即會符合定常性。在 VARIOWIN 之主要分析過程如下：

(1) 計算配對數

首先需決定間距之大小，當決定了間距之大小後，若不同之觀測井配對距離落於某一間距內，即為落於此間距之任相異兩樣本點的組合配對數 (pairs) 之一，接下來即可求得各間距內之配對數。

(2) 計算各間距之平均距離 h 及對應之變異元值

並將落於某間距內所有觀測井配對之距離取平均值，即為此間距之平均距離 h 。參照式(4)，利用步驟 1 各觀測井標準化後之水質資料，即可計算各間距之變異元值。例如圖 3 上之各點，即為經由式(4)計算所得各間距之平均距離 h 之變異元值。

(3) 套疊變異元模式

有了經實際資料代入經驗式計算所得之變異元值，接下來需再決定變異元可能由那些模式組成 (指數、高斯或球型) 以及基值、影響範圍及金塊效應之大小。

當使用者決定變異元模式及基值、影響範圍及金塊效應之值大小後，在 VARIOWIN 軟體能立即以圖形展示其變異元曲線 (如圖 3 之實線)，並計算與經驗式所得變異元值之套疊誤差，供使用者參考。經由反覆之試誤，可決定出最合適之變異元模式及相應之基值、影響範圍及金塊效應之值。

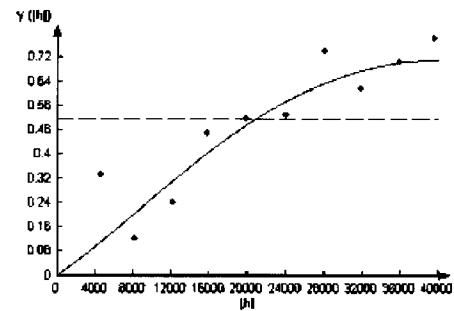


圖 3 含水層二 EC 與 Fe 配對複變異元圖

3. 找出變異元之巢式結構

經由標準化變數之變異元及複變異元套配工作後，即可進一步探討此變異元圖是否可能為不同尺度之各種套配模式所組成，以找出巢式變異圖之不同尺度 (scale) 影響範圍及基本複變異元函數 ($g''(h)$)。

在完成步驟 2 之不同水質項目配對之複變異元套配後，各不同水質項目組成之複變異元之影響範圍及基本複變異元函數 ($g''(h)$) 會不盡相同，而為了定出不同空間尺度之相同之基本複變異元函數 $g''(h)$ ，本研究之複變異元套疊模式分析過程原則上參照 Gooverts [17] 之建議方式，其過程如下：

- (1) 由步驟 2 之複變異元分析結果，區分出不同之影響範圍，並在相近之影響範圍選定基本複變異元函數 ($g''(h)$)，如此即可簡化出少數之影響範圍並決定出不同空間尺度之基本複變異元函數 ($g''(h)$)。

以屏東平原含水層二為例，經由步驟 2 之複變異元分析結果，各複變異元之影響範圍及基本複變異元函數 ($g''(h)$) 雖不盡相同，但多數之複變異元乃由二個空間尺度所組成，而其平均影響範圍分別 28.5 公里及 40 公里。且於小尺度 (28.5 公里) 多數由高斯模式所組成，於大尺度 (40 公里) 多數由球型模式所組成，因此接下來即選定高斯模式 (影響範圍為 28.5 公里) 及球型模式 (影響範圍為 40 公里) 作為基本複變異元函數 ($g''(h)$)。

- (2) 在定出不同之空間尺度 (即影響範圍) 及基本複變異元函數 ($g''(h)$) 條件下，重覆上述步驟 2，以找出各複變異元在不同空間尺度相對應之基值，得出不同變數 (即不同水質項目) 配對之最合適套疊模式，而在套疊模式中，共區域化矩陣 B'' (coregionalization matrix) 需為半正定矩陣。

而上述之步驟 2 及 3，可反覆進行，直到找到適合的基本複變異元函數 ($g''(h)$) 以套配出最好之變異元。

4. 不同尺度之主成份分析

根據各不同變數配對分析所得變異元套疊模式，由各複變異元在不同空間尺度相對應之基值 (Sill) 組合成不同空間尺度之共區域化矩陣 (B'')。並將不同空間尺度之共區域化矩陣視為共變異矩陣，進行不同尺度之主成份分析，以得出不同空間尺度下各影響因子之貢獻率 (proportion) 及負荷量 (factor loading)。



5. 計算觀測井於各空間尺度之因子得點 (Factor Score)

經由步驟 4 所得之因子負荷矩陣 A^u ，即可計算各地下水監測站各因子得點。其表示式如下：

$$Y_p^u(x_\alpha) = \tilde{z}_{\alpha i} A^{u-1} \quad (19)$$

其中， $Y_p^u(x_\alpha)$ 為已設井位點 x_α 於空間尺度 u 之第 p 個主要因子之得點； $\tilde{z}_{\alpha i}$ 代表第 α 口井之第 i 個變數（水質項目）標準化後之水質資料向量，維度為 $1 \times N$ 。

配合各因子之特徵值及貢獻率（即各因子可解釋之變異量），若不考慮貢獻率較低之因子，可只選定部分主要因子進行計算各井之因子得點。

6. 依據因子得點排序井位

在計算各觀測井之各因子得點之後，配合步驟 4 所得之各因子之貢獻率，根據下式計算各井之排序分數。

$$R_\alpha^u = \sum_{p=1}^N \omega_p^u Y_p^u(x_\alpha) \quad (20)$$

其中， R_α^u 為第 α 口井於空間尺度 u 之排序分數； ω_p^u 為於空間尺度 u 第 p 個主要因子之因子得點權重，可用第 p 個主要因子之貢獻率來代表。

而上述各井之排序分數，即可作為水質指標井選定之參考依據，亦即排序分數愈大，則於水質指標井選定之排序愈前面。

式(19)之各井位於空間尺度之因子得點，代表此觀測井位置受不同因子之影響程度。而式(20)之排序分數則為觀測井位置受所有因子之綜合影響程度，所選出水質指標井之意義在於井網之監測考量是地下水質之影響因子，而非地水水質項目本身，而排序分數愈大之井位，代表此觀測井之地下水水質受各主要因子之綜合影響程度愈大。由於多變量地質統計可推估出影響各地下水質的因子，且可以量化各影響因子之間重要性（即各因子之貢獻率），所設計之井網為了可同時考量多個影響因子，需決定各因子之權重（ ω_p ），而在本研究將以較客觀之方式來決定此權重值，也就是依各因子貢獻率值來給定。而本文所提方法為提供既有觀測井作為水質指標井之優先次序，可供決策者依預算決定水質指標井之井數。

四、實例應用與驗證

本研究選定屏東平原含水層一及含水層二作為研究區域，考量觀測井網之任務乃是以掌握長期地下水的整體水質變化為主。因此，選定分析水質項目時，以對於長期水質變化影響最深遠的地質化學相關項目為主，故選定分析變數乃以與水文地質較相關之水質項目來評估觀測井網。選定之水質項目為：EC、TDS、Cl⁻、Na、Ca、Mg、SO₄²⁻、Fe 及 Mn 共 9 項，後續之分析即是以此 9 項水質目視為 9 個變數，並以屏東平原含水層二 34 口及含水層一 41 口觀測井於 2001 年水質數據作為樣本。

4.1 含水層二共區域化矩陣之主成份分析結果

屏東平原含水層二之巢式複變異元主要是由高斯模式及球型模式所組成。屏東平原含水層二可區分為二個空間尺度，其中套疊高斯模式之影響範圍約為 28.5 公里；而套疊球型模式之影響範圍約為 40 公里，如圖 3 為屏東平原含水層二 EC 與 Fe 配對複變異元圖。

1. 含水層二 28.5 公里空間尺度之主成份分析結果

屏東平原含水層二 28.5 公里空間尺度之變異元是由高斯模式所組成，其共區域化矩陣（coregionalization matrix）如表 1 所示。由表 1 所列出之屏東平原含水層二之水質參數共變異矩陣，可以觀察出 EC 與 TDS、Cl⁻、Na、Mg 等 4 個水質參數相關性最高，TDS 亦與 EC、Cl⁻、Na、Mg 這 4 個水質參數有最高之相關性。亦即屏東平原地下水中之 TDS 主要貢獻者為 EC、Cl⁻、Na、Mg 等 4 種離子。

將表 1 之共區域化矩陣，利用 SPSS 統計分析軟體進行主成份分析，其各因子特徵值與貢獻率列於表 2 中。其中可以發現，因子 1 之貢獻率即達到 69.1%，因子 1 至因子 3 合計貢獻率達 87.9% 以上，而其餘之 6 個因子之影響應可忽略。另外，各變數（不同水質項目）的各因子之負荷量如表 3 所示，各因子之特性與成因可依據表 3 中之因子負荷量來分析。進一步利用步驟 1 之標準化後之數據及利用式(19)，可計算各觀測井於各因子得點（如表 4 所示）。

主要因子 1 與 EC、TDS、Cl⁻、Na、Mg 有超過 0.9 之正相關性，由各井位之因子得點觀察可以發現因子 1 得點高者多集中於沿海地區，依序往北延伸。其變因應是鹽化的影響，故因子 1 可視為「海水入侵因子」。

因子 2 的貢獻率約為 11.1%，明顯較因子 1 為低。主要的正相關因子依序為，Fe、Ca、Mn，而與其它 6 項水質呈負相關。屏東沖積平原東側之礫石台地屬於紅棕壤，應富含鐵氧化物。此外，根據王 [20] 之研究指出因屏東平原沖積扇群由細粒礫石、砂、沉泥、黏土沉積組成，質地愈往西南方愈細，沉積物中含有以碳酸鹽存在之碳酸鎂礦物質，因溶解和離子交換使鎂鐵等礦物質溶於地下水中，造成阻水層附近的鐵濃度離子較高。根據本研究之因子 2 的因子得點分佈，顯示有較明顯的往北遞減趨勢，應該是受到高屏溪沖積構造之影響。因此，因子 2 可視為「含水層質地因子」。

與因子 3 正相關的水質參數為 Mn、Na、TDS、EC，前二項相關性最強，其餘均為負相關。因子得點最高者由沿海順著高屏溪往東北側延伸。屏東平原東北側麓山帶，高雄縣東側有廣大面積的泥岩分布，其中老藪溪西岸為上新—更新世地層之六龜礫岩，主要由厚礫岩、粗粒砂岩、砂質頁岩、泥岩組成。泥岩為海相沈積岩化而成，且在岩化的過程中產生類似水泥的水化作用，而以矽酸鈣膠體與鋁酸鈣膠體將砂、沈泥及粘土等顆粒緊密膠結而成，但由於屬海相沈積，故含有硫酸鈉等鹽類，泥岩風化而成的土壤含可溶性鹽成份很高。更由於硫酸鈉極易溶於水，並解離成鈉與硫酸根離子，而硫酸根離子又與泥岩中扮演膠結角色之矽酸鈣膠體反應產生硫酸鈣外，其餘矽酸鈣膠體成分則形成不具膠結性的水合物。因子 3 也可視為屬於「含水層質地因子」。



表 1 含水層二 28.5 公里空間尺度之共區域化矩陣

	EC	TDS	Cl ⁻	Na	Ca	Mg	SO ₄ ²⁻	Fe	Mn
EC	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
TDS	0.36	0.4	-	-	-	-	-	-	-
Cl ⁻	0.36	0.36	0.39	-	-	-	-	-	-
Na	0.36	0.36	0.36	0.41	-	-	-	-	-
Ca	0.261	0.243	0.328	0.224	0.48	-	-	-	-
Mg	0.36	0.36	0.38	0.37	0.328	0.4	-	-	-
SO ₄ ²⁻	0.32	0.32	0.32	0.288	0.238	0.312	0.49	-	-
Fe	0.114	0.185	0.175	0.124	0.203	0.145	0.072	0.42	-
Mn	0.272	0.264	0.264	0.28	0.208	0.272	0.182	0.156	0.46

表 2 含水層二 28.5 公里空間尺度之各因子特徵值與貢獻率

28.5 公里			
因子	特徵值	貢獻率 (%)	累計貢獻率 (%)
因子 1	2.66	69.1	69.1
因子 2	0.427	11.091	80.191
因子 3	0.298	7.734	87.925
因子 4	0.217	5.637	93.562
因子 5	0.155	4.021	97.583
因子 6	0.04382	1.138	98.721
因子 7	0.02849	0.74	99.461
因子 8	0.01169	0.304	99.764
因子 9	0.00907	0.236	100

表 3 含水層二 28.5 公里空間尺度因子之負荷量

	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6	因子 7	因子 8	因子 9
EC	0.934	-0.189	0.067	0.015	-0.102	0.250	0.120	0.029	-0.006
TDS	0.938	-0.059	0.072	0.230	-0.093	0.079	-0.202	-0.007	0.049
Cl ⁻	0.979	-0.005	-0.081	-0.017	-0.103	-0.025	0.017	-0.144	-0.054
Na	0.912	-0.168	0.194	0.077	-0.231	-0.172	0.095	0.014	0.071
Ca	0.740	0.322	-0.423	-0.409	0.016	0.011	-0.008	0.009	0.048
Mg	0.968	-0.059	-0.046	-0.093	-0.145	-0.086	-0.057	0.086	-0.097
SO ₄ ²⁻	0.767	-0.373	-0.284	0.202	0.387	-0.043	0.023	0.009	0.003
Fe	0.457	0.800	-0.029	0.381	0.052	-0.007	0.047	0.016	-0.011
Mn	0.710	0.160	0.570	-0.250	0.288	-0.006	-0.012	-0.005	-0.001

含水層二之前 4 個主要因子中，因子 1、因子 2 及因子 4 都與鐵離子有密切關係，除了和地質因素相關之外，監測到之鐵離子濃度也可能部份是因為井管材料腐蝕之氧化還原作用造成。

2. 含水層二 40 公里空間尺度之主成份分析結果

屏東平原含水層二變異元之另一個空間尺度是由影響範圍為 40 公里球型模式所組成，其共區域化矩陣 (coregionalization matrix) 如表 5 所示。由表 5 所列出之屏

東平原含水層二之 40 公里空間尺度之水質參數共變異矩陣，可以觀察出 Fe 與其它水質參數之相關性較低之外，其它 8 個水質參數之間皆具較高相關性。其各因子特徵值與貢獻率列於表 6 中，其中，因子 1 之貢獻率即高達到 80.39%，因子 1 至因子 2 合計貢獻率達 89.27% 以上，而其餘之 7 個因子之影響應可忽略。另外，各變數 (不同水質項目) 的各因子之負荷量如表 7 所示，各觀測井位之各因子得點則如表 8 所示。



表 4 含水層二 28.5 公里空間尺度各觀測井之因子得點及排序

井名	位置		因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6	因子 7	因子 8	因子 9	排序分數	排序
	X (m)	Y (m)											
石化二	187485	2487965	4.477	-0.896	1.405	0.306	1.730	3.564	4.096	-16.354	25.223	3.270	1
東港二	193156	2485971	2.380	3.514	-1.842	1.130	2.182	4.007	3.213	-4.723	12.122	2.127	2
九曲一	190015	2506507	-0.104	1.865	0.712	1.500	0.699	-0.198	1.561	0.577	-1.157	0.311	3
港東二	195798	2490241	0.039	1.433	0.153	-0.688	0.572	0.455	0.443	0.115	2.619	0.197	4
清溪二	194408	2506330	0.100	0.241	1.212	-2.096	2.128	0.034	-0.574	-0.631	2.791	0.157	5
赤山二	209521	2499542	0.098	-1.640	-0.905	1.282	3.806	-1.472	1.100	0.356	0.505	0.035	6
崎峰二	197199	2480945	0.172	-1.101	-0.527	1.083	0.250	0.547	0.400	-3.686	1.286	0.028	7
中正一	185015	2503504	-0.174	0.644	0.839	-0.176	0.459	0.109	0.248	-0.361	0.425	0.027	8
飼潭二	208707	2486714	-0.265	0.689	1.190	0.503	0.249	-0.002	0.541	-0.490	-1.141	0.023	9
昭明二	188414	2493802	-0.202	0.787	0.825	-0.237	0.215	0.208	0.207	-0.409	0.382	0.010	10
新庄二	195738	2496246	-0.185	0.625	0.349	0.301	0.516	-0.020	0.538	-0.085	0.206	0.010	11
旗山二	197100	2531368	-0.274	0.631	0.308	0.293	-0.129	0.140	0.413	-0.216	0.132	-0.080	12
萬丹二	194540	2501970	-0.130	-0.114	0.268	-0.883	0.917	0.028	-0.304	-0.506	1.810	-0.094	13
西勢二	200397	2502704	-0.239	0.196	-0.187	-0.272	0.040	0.149	0.054	-0.252	1.394	-0.167	14
大湖二	200368	2497500	-0.277	0.048	-0.033	-0.091	0.037	0.083	0.059	-0.422	0.795	-0.190	15
中州一	195993	2528009	-0.266	-0.024	-0.261	-0.024	0.062	0.076	0.094	-0.292	1.047	-0.203	16
大樹二	191135	2510159	-0.447	-0.285	1.034	0.037	-0.256	0.052	-0.190	-1.175	-1.286	-0.276	17
溪埔二	191978	2513893	-0.440	-0.091	0.622	0.220	-0.516	0.154	-0.059	-0.908	-0.880	-0.278	18
新威二	210915	2533502	-0.354	-0.768	0.340	0.536	-0.097	-0.077	0.254	-0.687	-0.186	-0.279	19
九如一	196776	2515370	-0.341	-0.203	-0.031	-0.305	-0.364	0.229	-0.221	-0.704	0.907	-0.291	20
大潭一	197221	2484469	-0.463	-0.067	0.305	0.602	-0.947	0.272	0.168	-0.671	-0.717	-0.307	21
吉洋一	200032	2529333	-0.323	-0.362	-0.590	0.036	-0.159	0.047	0.060	-0.360	1.100	-0.311	22
建興一	204395	2507086	-0.305	-0.210	-0.742	-0.469	-0.439	0.275	-0.181	-0.349	2.080	-0.330	23
高樹二	208068	2525407	-0.327	-0.517	-0.617	0.025	-0.084	0.013	-0.008	-0.413	1.094	-0.332	24
美濃二	205000	2533450	-0.342	-0.372	-0.546	-0.179	-0.374	0.180	-0.117	-0.462	1.316	-0.342	25
繁華一	205264	2511656	-0.337	-0.377	-0.594	-0.196	-0.328	0.154	-0.119	-0.444	1.374	-0.342	26
瑪家二	208976	2511539	-0.368	-0.416	-0.462	0.047	-0.312	0.073	0.000	-0.495	0.752	-0.345	27
彭厝一	201104	2515658	-0.388	-0.350	-0.370	-0.080	-0.519	0.155	-0.114	-0.602	0.795	-0.360	28
萬巒一	207502	2497136	-0.394	-0.287	-0.344	-0.199	-0.641	0.192	-0.198	-0.622	0.980	-0.366	29
新南一	203915	2520763	-0.391	-0.130	-0.379	-0.441	-0.895	0.390	-0.308	-0.590	1.436	-0.371	30
鹽埔二	205622	2517240	-0.417	-0.426	-0.278	0.032	-0.567	0.145	-0.142	-0.672	0.455	-0.378	31
關福一	209883	2518620	-0.438	-0.460	-0.196	0.108	-0.590	0.119	-0.110	-0.719	0.160	-0.388	32
大響二	210206	2481360	-0.479	-0.424	-0.023	0.230	-0.747	0.129	-0.084	-0.825	-0.329	-0.399	33
泰山一	209266	2521392	-0.527	-0.427	0.174	0.340	-0.936	0.156	-0.103	-0.963	-0.844	-0.421	34

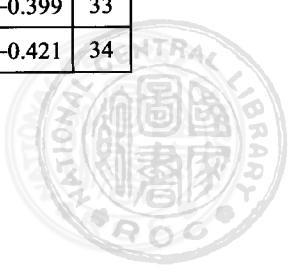


表 5 含水層二 40 公里空間尺度之共區域化矩陣

	EC	TDS	Cl ⁻	Na	Ca	Mg	SO ₄ ²⁻	Fe	Mn
EC	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
TDS	0.9	1.0	-	-	-	-	-	-	-
Cl ⁻	0.9	0.9	1.0	-	-	-	-	-	-
Na	0.9	0.9	0.9	1.0	-	-	-	-	-
Ca	0.9	0.9	0.8	0.8	0.97	-	-	-	-
Mg	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	1.0	-	-	-
SO ₄ ²⁻	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	1.0	-	-
Fe	0.6	0.5	0.5	0.4	0.7	0.5	0.4	1.0	-
Mn	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	1.0

表 6 含水層二 40 公里空間尺度之各因子特徵值與貢獻率

40 公里			
因子	特徵值	貢獻率 (%)	累計貢獻率 (%)
因子 1	7.211	80.394	80.394
因子 2	0.796	8.874	89.267
因子 3	0.27	3.016	92.283
因子 4	0.242	2.694	94.977
因子 5	0.167	1.86	96.837
因子 6	0.1	1.115	97.951
因子 7	0.1	1.115	99.066
因子 8	0.0658	0.734	99.8
因子 9	0.0179	0.2	100

表 7 含水層二 40 公里因子之負荷量

	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6	因子 7	因子 8	因子 9
EC	0.963	0.007	-0.003	-0.138	0.018	0.148	0.081	-0.150	-0.054
TDS	0.954	-0.103	-0.077	-0.129	-0.141	-0.148	-0.081	0.055	-0.076
Cl ⁻	0.941	-0.133	-0.035	-0.022	0.191	-0.182	0.155	-0.031	0.028
Na	0.932	-0.242	-0.109	-0.013	0.032	0.148	0.081	0.175	0.006
Ca	0.930	0.217	-0.073	-0.154	-0.225	0.000	0.000	-0.030	0.086
Mg	0.941	-0.133	-0.035	-0.022	0.191	0.033	-0.237	-0.031	0.028
SO ₄ ²⁻	0.852	-0.236	0.447	0.107	-0.081	0.000	0.000	0.006	0.008
Fe	0.625	0.760	0.127	-0.013	0.106	0.000	0.000	0.070	-0.018
Mn	0.884	0.113	-0.171	0.413	-0.074	0.000	0.000	-0.041	-0.010

由表 7 所示，因子 1 除了與 Fe 有較低之正相關性外，與其它 8 項水有高度之相關性，由各井位之因子得點觀察可以發現因子 1 得點高者多集中於沿海地區，依序往北延伸。此結果與 28.5 公里空間尺度之因子 1 相似，故此因子 1 可視為「海水入侵因子」。

因子 2 的貢獻率約為 8.9%，明顯較因子 1 為低。主要的正相關因子依序 Fe、Ca、Mn，且因子 2 的因子得點分佈，顯示有往北遞減趨勢，其影響原因應與 28.5 公里空間尺度之因子 2 相似。因此因子 2 可視為「含水層質地因子」。

4.2 含水層二水質指標井選定

由表 2 中各因子特徵值與貢獻率作為不同主要因子得點之權重依據，代入式(20)計算在不同空間尺度中各觀測井之排序分數 (如表 4 及表 8 所示)。在決定各觀測井之排序，屏東平原含水層二各觀測井於二個空間尺度之位置及排序如圖 4 及圖 5 所示。由圖 4 及圖 5 可看出，排序在前面之井位多集中在沿海地區、高屏溪下游附近。很明顯的是因為貢獻率較大之因子 1 及因子 2，多位於沿海地區、高屏溪及東港溪附近。

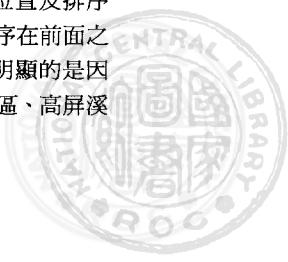
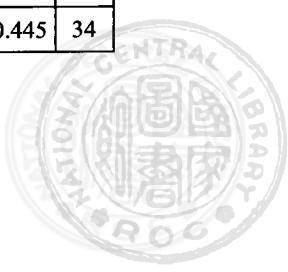


表 8 含水層二 40 公里空間尺度各觀測井之因子得點及排序

井名	位置		因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6	因子 7	因子 8	因子 9	排序分數	排序
	X (m)	Y (m)											
石化二	187485	2487965	4.165	-1.666	-0.799	0.541	-4.849	-1.335	13.116	2.633	-12.852	3.226	1
東港二	193156	2485971	2.291	3.881	2.054	-1.957	-3.101	-2.093	5.362	1.105	0.095	2.183	2
九曲一	190015	2506507	-0.043	2.286	0.500	1.122	1.327	-0.006	0.350	2.345	-3.685	0.252	3
港東二	195798	2490241	0.070	1.513	-0.773	0.597	-1.151	-0.044	0.464	0.030	2.640	0.172	4
赤山二	209521	2499542	0.048	-1.225	4.677	2.042	-1.586	0.046	0.377	0.098	-0.094	0.102	5
清溪二	194408	2506330	0.101	0.127	-1.361	3.279	-2.676	0.032	0.345	-2.150	3.230	0.085	6
崎峰二	197199	2480945	0.136	-1.044	1.578	-0.729	0.007	-1.010	2.052	0.214	-3.479	0.051	7
新庄二	195738	2496246	-0.154	0.797	0.094	0.760	0.014	0.000	0.335	0.578	-0.900	-0.023	8
中正一	185015	2503504	-0.141	0.731	-0.722	1.291	-0.176	0.056	0.377	0.147	-1.121	-0.035	9
昭明二	188414	2493802	-0.163	0.858	-0.958	1.087	-0.077	0.012	0.365	0.157	-0.904	-0.053	10
餉潭二	208707	2486714	-0.219	0.856	-0.597	1.449	0.847	0.078	0.411	0.781	-3.808	-0.060	11
旗山二	197100	2531368	-0.236	0.759	-0.295	0.194	0.306	0.009	0.340	0.690	-1.103	-0.114	12
萬丹二	194540	2501970	-0.124	-0.137	-0.318	1.149	-1.460	-0.041	0.307	-0.917	1.807	-0.118	13
西勢二	200397	2502704	-0.220	0.235	-0.117	-0.133	-0.643	-0.029	0.308	-0.023	1.401	-0.169	14
中州一	195993	2528009	-0.249	0.042	0.221	-0.217	-0.472	-0.036	0.312	0.086	0.766	-0.200	15
大湖二	200368	2497500	-0.256	0.101	-0.049	0.029	-0.359	-0.044	0.324	0.040	0.403	-0.200	16
吉洋一	200032	2529333	-0.312	-0.314	0.500	-0.738	-0.476	-0.017	0.327	0.033	1.176	-0.287	17
建興一	204395	2507086	-0.294	-0.243	-0.017	-1.096	-0.935	-0.028	0.319	-0.301	2.804	-0.299	18
九如一	196776	2515370	-0.322	-0.225	-0.405	-0.267	-0.384	-0.042	0.351	-0.245	0.449	-0.303	19
高樹二	208068	2525407	-0.320	-0.475	0.606	-0.699	-0.552	-0.030	0.320	-0.067	1.166	-0.305	20
新威二	210915	2533502	-0.342	-0.690	0.321	0.249	0.342	0.314	0.540	0.335	-3.178	-0.308	21
繁華一	205264	2511656	-0.326	-0.375	0.210	-0.856	-0.625	-0.032	0.316	-0.177	1.638	-0.319	22
美濃二	205000	2533450	-0.330	-0.371	0.154	-0.849	-0.568	-0.018	0.327	-0.163	1.416	-0.322	23
瑪家二	208976	2511539	-0.354	-0.381	0.329	-0.710	-0.287	-0.016	0.326	0.000	0.690	-0.328	24
溪埔二	191978	2513893	-0.405	-0.049	-0.626	0.287	0.648	-0.027	0.340	0.212	-2.612	-0.329	25
大潭一	197221	2484469	-0.426	0.013	-0.360	-0.495	0.952	0.081	0.398	0.699	-3.077	-0.343	26
大樹二	191135	2510159	-0.413	-0.273	-0.864	0.997	0.614	0.002	0.356	-0.127	-3.233	-0.347	27
彭厝一	201104	2515658	-0.371	-0.348	-0.001	-0.766	-0.250	-0.034	0.328	-0.050	0.705	-0.350	28
萬巒一	207502	2497136	-0.375	-0.310	-0.219	-0.823	-0.299	-0.039	0.317	-0.069	0.941	-0.359	29
新南一	203915	2520763	-0.370	-0.193	-0.598	-1.066	-0.447	-0.027	0.315	-0.207	1.559	-0.364	30
鹽埔二	205622	2517240	-0.399	-0.418	0.005	-0.713	-0.072	-0.042	0.317	-0.001	0.047	-0.375	31
關福一	209883	2518620	-0.418	-0.445	0.002	-0.642	0.082	-0.026	0.322	0.038	-0.379	-0.389	32
大響二	210206	2481360	-0.453	-0.402	-0.145	-0.586	0.407	-0.025	0.333	0.164	-1.191	-0.410	33
泰山一	209266	2521392	-0.497	-0.405	-0.332	-0.529	0.740	-0.024	0.339	0.256	-2.113	-0.445	34



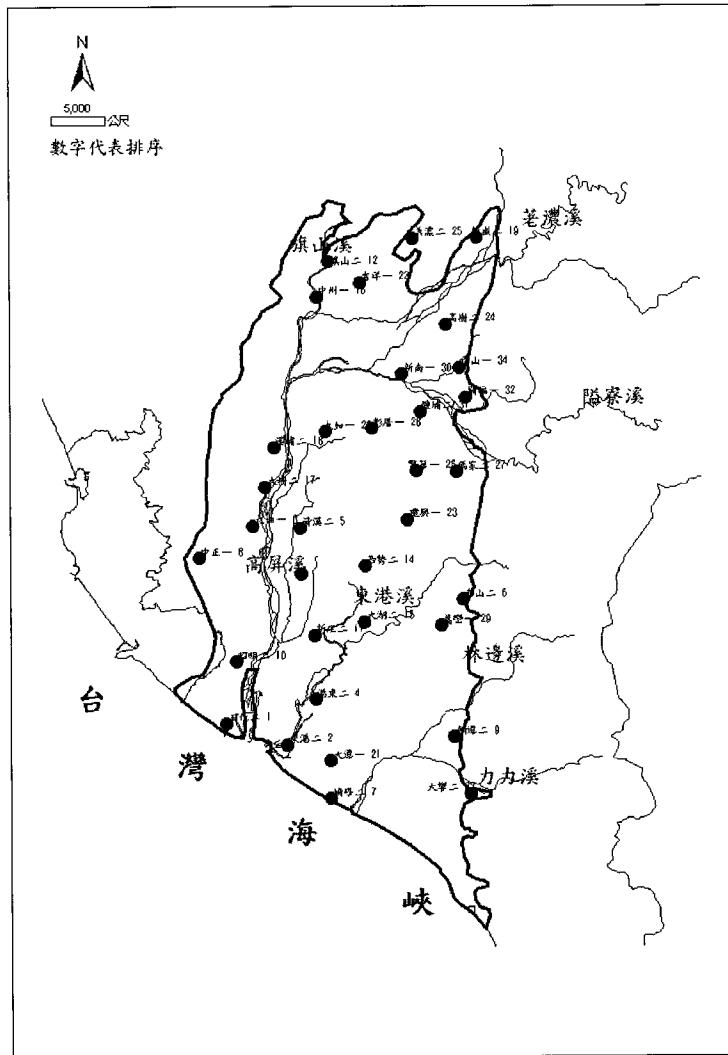


圖 4 含水層二之觀測井於 28.5 公里空間尺度井位排序分佈圖 (34 口)

在決定水質指標井之井數方面，本文所提方法為提供既有觀測井作為水質指標井之優先次序，可供決策者依經費決定水質指標井之井數。另外，各井之排序分數（即代表觀測井位置受所有因子之綜合影響程度）之下降程度，亦可提供決定井數之輔助參考。以含水層二為例，若因經費考量，其含水層指標井數限制在 15~20 口範圍內，則可將各井在 28.5 公里及 40 公里空間尺度之排序分數依序繪製於圖 6 及圖 7 上，由圖 6 及圖 7 可看出，在二個空間尺度第 17 口井之排序分數較前一口井明顯下降，而在 28.5 公里及 40 公里空間尺度前 17 口水質指標井之中，前 16 口為相同井位，其差別只在於第 17 口井位不同，故於 15~20 口範圍內，含水層二較合適之水質指標井井數為 18 口。最後，於含水層二分別於 28.5 公里及 40 公里空間尺度各選定 17 口之水質指標井分佈及排序如圖 8 所示。

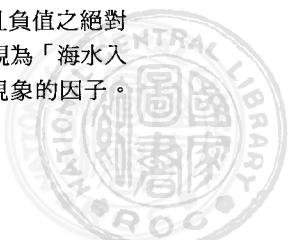
4.3 含水層一主成份分析結果

在進行屏東平原含水層一之分析過程中，於進行步驟 2 ~ 3 變異元分析過程中，發現屏東平原含水層一不同水質項

目配對之變異元，無法以相同之基本複變異元函數進行套疊，例如圖 9 為含水層一之 Fe 與 Mn 變異元套疊，由圖 9 與圖 3 相較之下，可看出含水層一中之 Fe 與 Mn 並無明顯之相關性。故於屏東平原含水層一之分析上，即直接利用標準化後數據進行主成份分析。而非利用變異元分析求出各水質參數的相關性（即共區域化矩陣）進行主成份分析。

屏東平原含水層一各因子特徵值與貢獻率如表 9 所示。由表 9 中可看出，前 2 個之主要因子之累積貢獻率（總變異量）高達 90.5%，因此，其餘之 7 個因子之影響不大。另外，屏東平原含水層一各變數（不同水質項目）的各因子之負荷量如表 10 所示。

因子 1 的貢獻率高達 74.1%，因子 1 與所有的水質參數均呈正相關，其中依序為 TDS、Mg、 SO_4^{2-} 、EC、Na，這 5 項水質參數的因子負荷皆為 0.96 以上，Ca 之因子負荷則為 0.87，且各井位因子得點較高者（如表 11 所示），多在沿海地區，而其餘井位之因子得點皆為負值，且負值之絕對值最大者為沿者高屏溪附近，依此因子 1 可視為「海水入侵因子」，亦即地下水受海水影響而有鹽化現象的因子。



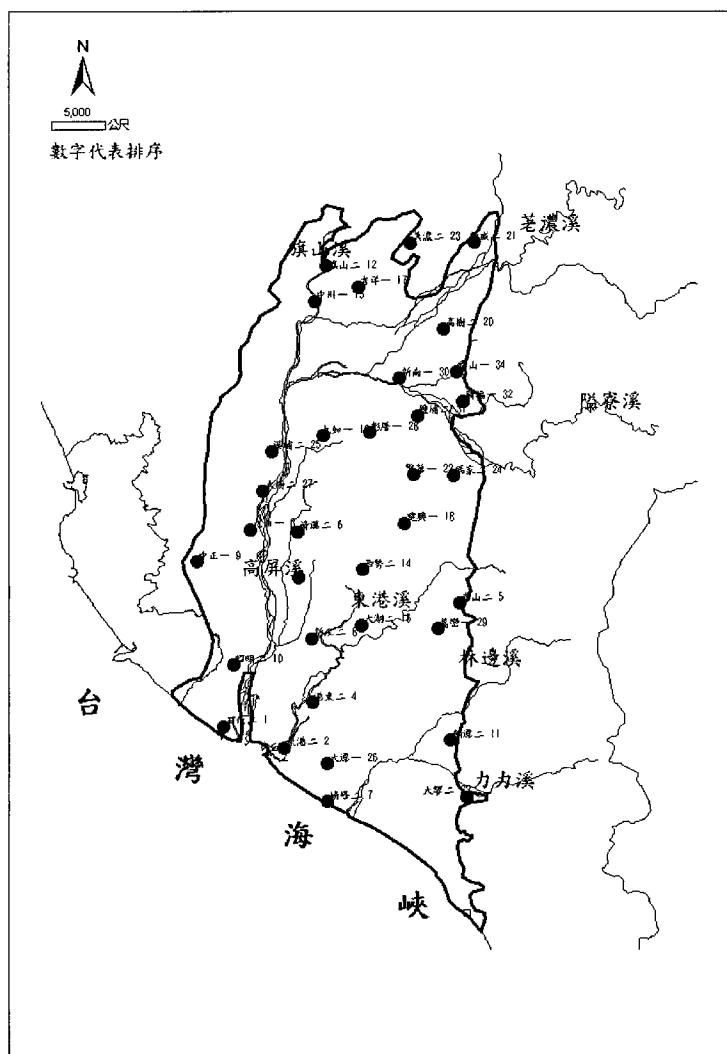


圖 5 含水層二之觀測井於 40 公里空間尺度井位排序分佈圖(34 口)

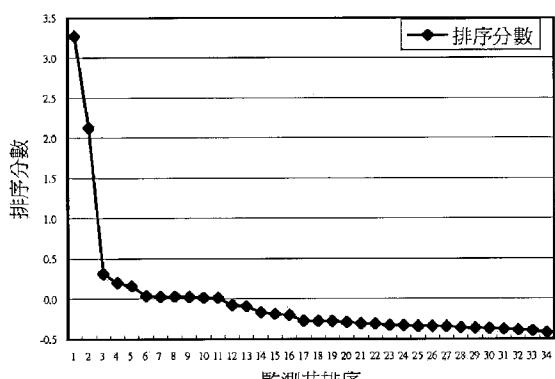


圖 6 含水層二之觀測井於 28.5 公里空間尺度排序分數圖

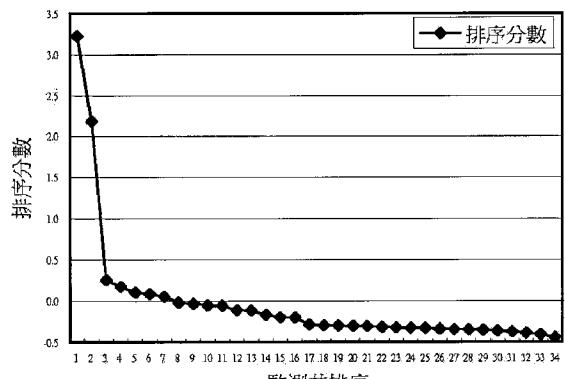


圖 7 含水層二之觀測井於 40 公里空間尺度排序分數圖

而高屏溪沿岸因子得點為負值且其絕對值較大的井位，則可能因高屏溪水與地下水含水層交互作用發達，因此 TDS 與 EC 均不高。

因子 2 的貢獻率為 16.4%，與因子 2 正相關的參數為 Fe、Mn、Ca，其餘因子負荷量均為負值。負值絕對值最大

者依序為 Na、Mg、Cl⁻、TDS、EC、SO₄²⁻。因子 2 得點高者之井位多位於高屏溪下游附近，推論因子二之影響因素與含水層二之因子 2 相似，皆與 Fe、Mn 密切相關，故因子 2 可歸屬於「含水層質地因子」。



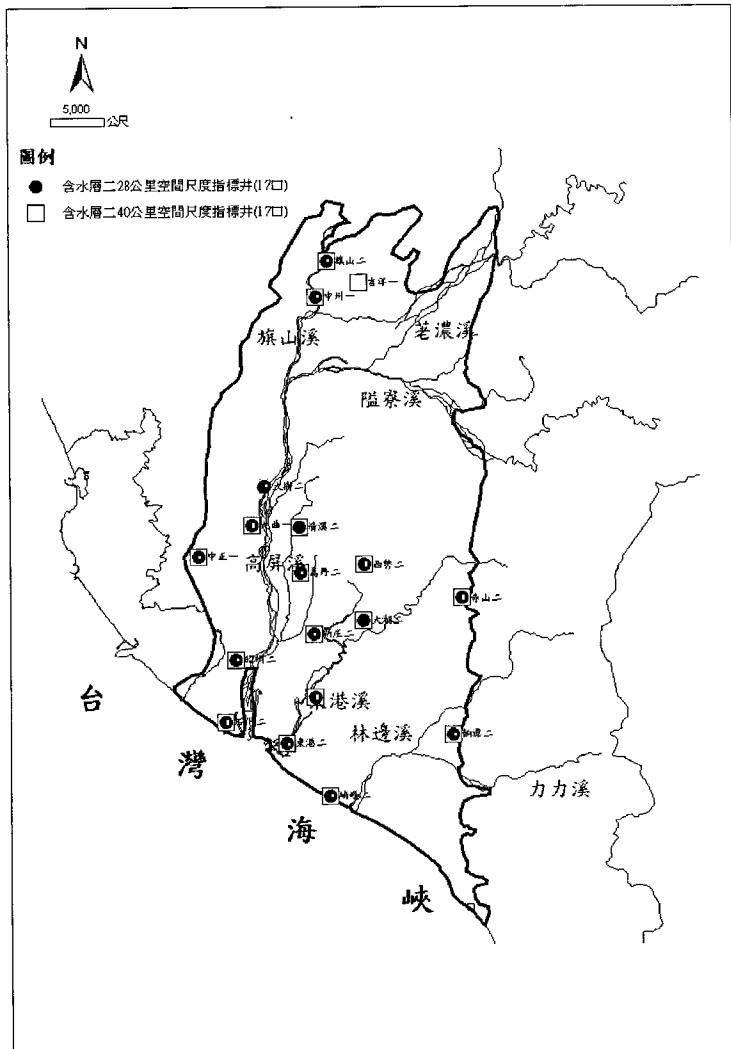


圖 8 含水層二選定之水質指標井位置分佈圖 (共 18 口)

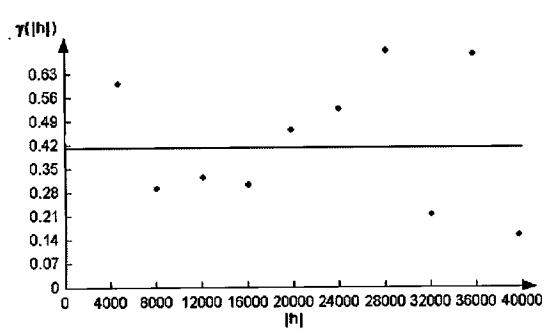


圖 9 含水層一 Fe 與 Mn 配對複變異元圖

4.4 含水層一水質指標井選定

配合表 11 之井位排序結果，屏東平原含水層一所有各觀測井之位置及排序如圖 10 所示。由圖 10 及表 11 可看出，

排序在前面之井位多集中在沿海地區。很明顯的是因為因子 1 及因子 2 得點較高之井位多位於屏東平原南半部。

在決定選定水質指標井之井數方面，若因經費考量，其含水層一指標井數亦限制在 15 ~ 20 口範圍內，將含水層一各井之排序分數依序繪製於圖 11 上，由圖 11 及表 8 可看出，第 17 口井其排序分數較前一口井下降最多，故於 15 ~ 20 口範圍內，含水層二較合適之水質指標井井數為 17 口 (如圖 12 所示)。

五、結論與建議

5.1 結論

本研究乃藉由整合多變量統計之主成份分析方法與地質統計，發展考量多尺度及多變量之水質指標井網設計模式，由此模式所得之指標井網分佈，應當較只以統計方法或只以傳統地質統計方法所得之井網較佳。



本研究並以屏東平原作為實際應用之探討，提供既有觀測井作為水質指標井之優先次序。另外，於本研究之主成份分析中，亦分析影響屏東平原地下水質之主要因子，可斷定影響屏東平原含水層一及含水層二之最主要因子為地下水受海水影響，而有鹽化現象，而此成果將可作為屏東平原地下水量水質管理之參考資訊。

5.2 建議

觀測井之腐蝕狀況應詳加調查，對於損壞與腐蝕嚴重之觀測井應予以處理，以確定採集之水樣可以代表實際之地下水水質。

可將本研究之水質指標井網設計分析流程應用於其它研究區域，以節省水質監測經費。本研究尚可加入克利金方法推估全區之各影響因子分佈，並配合合適之優選工具如遺傳演算法，可以使候選井位不必受限於已設井位，以得出較佳之水質觀測井網。

水質指標井之設置係為了節省水質監測的經費，固然指標井可以提供頗為精確的水質參數推估，但是為求區域水質資料的完整與未來針對指標井做進一步的調整，本研究建議對於被選定為水質指標井以外的水位觀測井，以每3-5年的時間間隔，仍進行一次的水質採樣；並進行多變量地質統計分析，以為指標井數量與位置調整之依據。

表 9 屏東平原含水層一各因子特徵值與貢獻率

因子	特徵值	貢獻率 (%)	累計特徵值	累計貢獻率 (%)
因子 1	6.67	74.111	6.670	74.111
因子 2	1.475	16.384	8.145	90.495
因子 3	0.556	6.18	8.701	96.675
因子 4	0.153	1.701	8.854	98.376
因子 5	0.09936	1.104	8.953	99.480
因子 6	0.0427	0.474	8.996	99.954
因子 7	0.0033	0.03665	8.999	99.991
因子 8	0.0008	0.0090	9.000	100.000
因子 9	0.0000	0.0003	9.000	100.000

表 10 含水層一之因子之負荷量

	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6	因子 7	因子 8	因子 9
EC	0.9560	-0.0850	-0.1540	-0.0350	0.2000	-0.1220	0.0070	0.0060	0.0000
TDS	0.9880	-0.0960	0.0220	0.1010	-0.0450	-0.0180	-0.0240	0.0020	-0.0040
Cl ⁻	0.0984	-0.1090	0.0100	0.1210	-0.0540	-0.0210	-0.0300	-0.0050	0.0030
Na	0.9560	-0.2180	0.0660	-0.0740	0.0860	0.1450	-0.0040	0.0130	0.0010
Ca	0.8700	0.3280	0.1830	-0.2970	-0.1150	-0.0410	-0.0030	0.0000	0.0000
Mg	0.9800	-0.1780	0.0110	-0.0170	0.0610	0.0490	0.0180	-0.0230	-0.0001
SO ₄ ²⁻	0.9730	-0.0740	0.0790	0.1400	-0.1390	-0.0160	0.0380	0.0080	0.0000
Fe	0.1670	0.8950	0.0386	0.1140	0.0980	0.0120	0.0010	0.0000	0.0000
Mn	0.4520	0.6730	-0.0582	0.0090	-0.0350	0.0410	0.0010	0.0000	0.0000

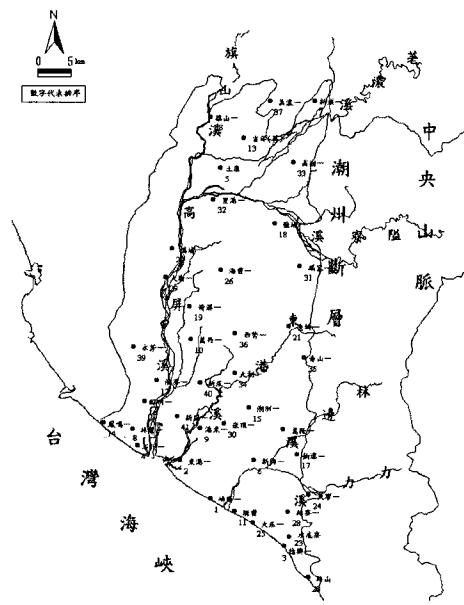


圖 10 含水層一之觀測井位排序分佈圖 (41 口)

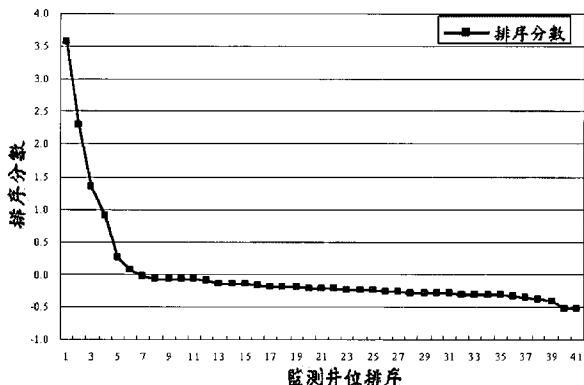


圖 11 含水層一之觀測井排序分數圖

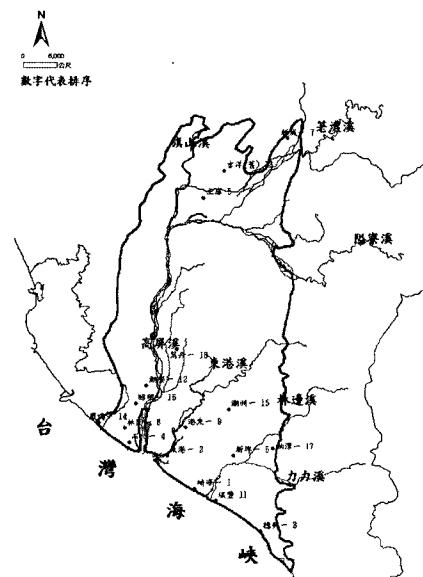


圖 12 含水層一選定之水質指標井位置分佈圖 (17 口)



表 11 含水層一各觀測井之各因子得點及排序 (41 口)

井名	位置		因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6	因子 7	因子 8	因子 9	排序 分數	排序
	X(m)	Y(m)											
崎峰一	197199	2480945	4.966	-0.216	-1.571	1.469	-1.331	2.793	0.190	0.120	-0.084	3.572	1
東港一	193156	2485971	3.157	-0.652	1.896	-1.953	-0.509	-4.202	0.502	1.297	0.677	2.292	2
德興一	207000	2474613	0.863	3.781	1.403	1.135	-0.320	-1.368	-1.942	-3.194	-1.253	1.354	3
石化一	187485	2487965	1.070	-0.828	2.445	0.572	5.373	1.261	0.219	0.002	-0.310	0.884	4
土庫	198425	2524645	-0.165	2.660	-0.808	-1.086	0.710	0.567	0.029	1.952	2.830	0.256	5
新埤一	202895	2485957	-0.282	1.662	0.570	-1.375	-0.269	1.097	-0.090	1.124	0.212	0.077	6
新威一	210915	2533502	-0.125	0.573	-0.113	-1.668	-0.057	0.802	2.862	-2.017	0.197	-0.030	7
林園一	186809	2490130	-0.156	0.631	-0.927	-0.038	0.455	-0.278	-0.306	2.132	-1.759	-0.066	8
港東一	195798	2490241	-0.267	0.954	-0.471	0.044	0.273	0.010	-0.189	0.520	-0.450	-0.067	9
萬丹一	194540	2501970	-0.452	1.359	0.447	1.005	-0.219	0.012	1.699	1.012	0.188	-0.069	10
塭豐	200355	2479195	-0.045	-0.580	1.013	-0.419	-0.240	0.919	-1.764	-1.149	2.003	-0.072	11
潮寮一	190004	2496500	-0.406	0.918	1.006	-0.074	-0.659	0.471	2.719	0.621	-0.895	-0.093	12
吉洋 (舊)	201510	2528640	-0.295	0.650	-0.851	1.128	0.511	-0.587	0.171	0.190	0.338	-0.143	13
鳳鳴一	182982	2490949	-0.277	0.521	-0.822	1.072	0.382	-0.523	0.749	-0.261	-0.609	-0.151	14
潮洲一	202232	2492984	-0.350	0.554	0.156	0.284	-0.170	0.089	0.101	1.004	-1.727	-0.156	15
昭明一	188414	2493802	-0.413	0.526	1.040	-0.851	-0.621	1.191	-1.593	0.649	0.461	-0.172	16
餉潭一	208707	2486714	-0.145	-0.173	-0.777	-0.775	0.252	0.026	-0.832	-0.011	0.404	-0.194	17
鹽埔一	205622	2517240	-0.066	-0.491	-0.741	-1.399	0.165	-0.038	1.501	-1.660	-0.868	-0.197	18
清溪一	194408	2506330	-0.451	0.630	0.174	1.251	-0.088	-0.132	0.229	0.110	1.138	-0.200	19
枋山	210142	2470440	-0.111	-0.413	-0.725	-0.930	0.235	-0.122	0.327	-1.300	-1.174	-0.209	20
老埤一	207504	2503670	-0.100	-0.460	-0.722	-1.351	0.155	0.186	-0.736	-0.485	0.090	-0.215	21
溪埔一	191978	2513893	-0.161	-0.325	-0.570	-0.827	0.091	0.066	-0.258	-0.582	-0.106	-0.221	22
水底寮	207650	2475845	-0.188	-0.379	-0.465	-0.499	0.059	0.099	-0.862	-0.014	-1.207	-0.238	23
大響一	210206	2481360	-0.140	-0.490	-0.753	-0.738	0.170	-0.100	-0.487	-0.167	0.520	-0.242	24
大庄一	202810	2477706	-0.184	-0.424	-0.507	-0.607	0.058	0.057	-1.125	0.438	-0.985	-0.247	25
海豐一	198476	2511130	-0.303	-0.123	-0.353	0.562	0.049	-0.330	-0.164	0.351	0.297	-0.258	26
萬隆一	206802	2490112	-0.176	-0.491	-0.767	-0.253	0.186	-0.288	-0.171	-0.410	0.184	-0.262	27
枋寮一	207476	2479160	-0.203	-0.496	-0.786	0.167	0.183	-0.429	-1.327	1.229	-1.261	-0.278	28
大樹一	191135	2510159	-0.220	-0.561	-0.554	0.326	0.012	-0.510	0.594	0.425	-0.643	-0.286	29
崁頂一	198929	2490845	-0.222	-0.606	-0.304	-0.424	-0.099	0.021	-0.033	-0.736	0.232	-0.291	30
瑪家一	208976	2511539	-0.231	-0.496	-0.784	0.480	0.223	-0.569	-0.228	0.087	0.992	-0.293	31
里港一	197514	2520447	-0.246	-0.511	-0.795	0.703	0.220	-0.636	0.310	-0.615	1.218	-0.304	32
高樹一	208068	2525407	-0.249	-0.571	-0.784	0.848	0.188	-0.770	0.741	-0.461	1.331	-0.313	33
大湖一	200368	2497500	-0.259	-0.566	-0.643	0.583	0.124	-0.520	0.005	-0.573	0.173	-0.315	34
赤山一	209521	2499542	-0.398	-0.525	1.472	-1.263	-1.098	1.339	-0.221	-0.606	0.295	-0.317	35
西勢一	200397	2502704	-0.282	-0.582	-0.753	1.000	0.213	-0.708	-0.168	-0.452	0.960	-0.335	36
美濃一	205000	2533450	-0.383	-0.664	0.475	0.158	-0.481	0.272	-1.341	0.371	-0.770	-0.365	37
旗山一	197100	2531368	-0.378	-0.793	0.280	0.762	-0.442	-0.251	0.131	0.277	-1.363	-0.386	38
永芳一	186942	2500950	-0.432	-1.023	1.726	-0.793	-1.373	0.961	0.207	0.532	-0.540	-0.405	39
新庄一	195738	2496246	-0.593	-1.084	1.229	1.731	-0.942	-0.073	0.025	-0.075	1.199	-0.523	40
新園一	192774	2491800	-0.704	-0.899	2.012	2.044	-1.368	0.196	0.523	0.326	0.066	-0.524	41

