

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

禁忌與退火演算法在地下水模擬之應用

Application of Tabu Search and Simulation Annealing to Ground Water Simulation

計畫編號：89-2313-B-002-248

執行期限：88年8月1日至90年7月31日

主持人：童慶斌 台灣大學生物環境系統工程學系

摘要

本研究探討利用啟發式演算法（包括禁忌搜尋法與模擬退火法），與地下水模式(Modflow)結合，建立優選拘限含水層之水力傳導係數與儲水係數最佳分區之分析方法。過去傳統地下水參數在空間分佈，多以克利金法、地質特性分區或由徐昇氏法進行分區；而本研究亦屬於分區方法，但利用啟發式演算法建立地質參數最佳分區。啟發式搜尋法相較於傳統的搜尋法明顯地提高搜尋的效率，同時也增加找到全域最佳解（Global optimum）的機率，尤其是在處理維度較高、參數較複雜的問題。本研究結果證明啟發式演算法可合理應用於地下水參數分區。

Abstract

This research integrated heuristic algorithm, including Tabu Search and Simulated Annealing, and groundwater model, MODFLOW, to establish the analytical method to optimize hydraulic conductivity and specific storage zonation. Traditionally, the spacial distribution of geological parameters could be zoned depending on Kriging, geological characteristics, or Thiessen polygons methods. This research can be grouped into zonation method, but furthermore heuristic algorithm is used

to optimize the zonation. Heuristic algorithm can significantly improve the efficiency to search optimal solutions, and increase the probability of finding the global optimization, especially for high dimensional and complex systems. The results indicate that heuristic algorithm can reasonably be applied to identify zonation of groundwater parameters.

一、前言

台灣四面環海，屬於海島型氣候，受到西南氣流與東北季風之影響，使得整個台灣地區雨量在時間及空間上分佈的非常不均勻，豐、枯水期明顯，南北地區差異也頗大；加上地形高陡，降雨後雨水迅速流入太平洋與台灣海峽，無法有效加以利用，因此在水資源的調配上非常困難。

近十幾年來，台灣地區工商業發展迅速，對於水資源的需求也越來越大，包括工業用水、民生用水等，而水庫的興建在經濟上與社會層面之考量亦不太可行，以致於供給與需求無法達到一個平衡的情況下，地下水資源即變成工業、民生及養殖用水的來源。但是在過去沒有限制的情況下，過度的抽取地下水造成了地層下陷、海水入侵、水質破壞等負面現象，已付出了極大的社會代價，要如何有效並且合理的運用地下水資源，避免超

抽地下水，必須要瞭解有多少地下水可供給使用。然而要瞭解地下水量則必須透過以數值分析方法為核心的地下水模式來模擬地下水位。由過去的研究報告指出，地下水參數(Ks)與抽水率對於模擬地下水位較為敏感(邵長平, 1996、周哲正, 1999)，因此本研究提出一決定最佳地下水參數分區方法。

近年來啟發式演算法，包括禁忌搜尋法(Tabu Search)、模擬退火法(Simulated Annealing)、基因遺傳演算法(Genetic Algorithm)，被應用於各領域之高度非線性問題上，而本研究則利用禁忌搜尋法與模擬退火法應用於優選地下水參數分區，並且結合Modflow 地下水模式來進行模擬，進而達到最佳地下水量之管理。

二、文獻回顧

自過去幾十年來，台灣沿海地區養殖業興盛，私人開挖水井無以計數，由經濟部水資源局(1995)、經濟部水利司(1997)資料顯示出已嚴重超抽地下水，所以有許多專家學者紛紛投入有關地下水量管理方面之研究，評估地下水流況與地下水之抽水量、補注量。在濁水溪沖積扇部分之地下水量所佔總量百分比相當高，已有專家學者做過相關研究，如張良正(1996)、劉志純(1996)、張誠信(1996)、中興工程顧問公司(1997)、Yang and Yeh (1998)等。

由於模擬區域邊界設定方面的問題，與實際邊界有一段差距，加上無法正確得知側向補注，所以不同的設定會產生的結果會有差異，如張良正(1996)在濁水溪沖積扇地區設定其東、南、北邊界為一零流量邊界，西邊為第一層為定水位邊界，下幾層為零流量邊界，補注率及抽水率採率定方式計算。本研究則採用由外圍已知觀測井連線作為模擬邊界，並且以月

為單位給予一定水頭值。

實際地下水參數在空間上分佈情形是不容易掌握，在過去以克利金差分法(李繼尊, 1993)、徐昇氏法(Yang and Yeh, 1998)或是反算問題(Inverse Problem)(Yeh, 1975、Sun, Yang and Yeh, 1998、Jonathan, 1989)來決定。本研究方法以近似徐昇式法之概念，利用內心分區法來決定初始地下水參數分區，再藉由啟發式演算法來優選出最佳地下水參數之分區。所以本研究之目的即是透過優選法決定出一最佳地下水參數分區。

三、研究方法

所謂的啟發式演算法(Heuristic algorithm)與過去傳統的直接搜尋法(Direct search method)或是梯度法(Gradient method)最大的差異在於具有跳脫區域最佳解(Local optimum)的能力，尤其面對高維度之非線性(non-linear)之優化問題時，傳統的疊代搜尋法已沒有能力負荷，所得到的結果往往是區域最佳解，因為其結果與初始解的設定有高度的相關性，而啟發式搜尋法在不同的初始解開始搜尋，經過足夠多的疊代次數後，依然可以找到全域最佳解(Global optimum)，增加了求解的效率與正確性。

禁忌搜尋法是近十幾年所發展出來的一種啟發式演算法，於1977年由Glover 所提出(Glover, 1993、Glover, 1999)，在1986年發表其具體的架構，已經被廣泛應用在各領域之最佳化問題上，例如農場管理(Mayer et al., 1996)、地下水問題(Dougherty, 1991)、地下水參數定義(Zheng and Wang, 1999)、推銷員旅行問題(吳泰熙, 1997)廢水處理、工廠流程等。禁忌搜尋法最主要的精神在於禁忌名單(Tabu list)的定義，包括名單的形式(type)與長度(size)，其可以促使搜尋跳

脫區域最佳解，也可以避免重複搜尋相同的解，另外在搜尋過程中，每一次迭代都只往最佳候選解(candidate solution)移步，提高了搜尋的效率與正確性。

除了禁忌搜尋法外，模擬退火法(Simulated Annealing, SA)與基因遺傳演算法(Genetic Algorithm, GA)也是近來被各界採用的啟發式演算法，在過去亦都被應用在地下水管理問題上以及其它相關研究，並且都有相當好的結果(譚仲哲, 2000、McKinney, 1994、Dougherty, 1991、Pan., 1998、Zheng and Wang, 1996, 1999)。SA於1983年由Kirkpatrick提出，其精神在於利用波茲曼機率函數式來跳脫出區域最佳解；而GA則是依循生物界的法則，『物競天擇、適者生存』，藉由交配、繁殖、突變方式來進行求解。

以上三種演算法面對不同的問題有不同的優劣，而本研究採用禁忌搜尋法與模擬退火法的理由為過去很少研究應用在地下水管理問題上，尤其是地下水參數分區，因此對這兩種搜尋法之應用加以探討。

3.1 禁忌搜尋法(Tabu Search)

禁忌搜尋法為一種具有記憶功能的啟發式搜尋法，不同於過去一般之傳統梯度法(Gradient method)。傳統梯度法只能朝向鄰近較佳候選解(candidate solution)的方向進行，當鄰近候選解沒有比目前解好的情形出現時，搜尋過程則宣告停止，因而所得到的最佳解可能並非是可行解空間中之全域最佳解；而禁忌搜尋法最主要的精神則是利用其記憶之特性，也就是禁忌名單(Tabu list)，在求解線性或非線性問題的過程中，將之前所走過之步驟記錄下來作為往後搜尋所憑藉之依據，避免使搜尋過程落入循環重複地搜尋相同的解，而有機會跳脫出區域最佳解。

禁忌搜尋法在疊代搜尋的同時，

必須對鄰近候選解進行排序的動作，一方面可以選出鄰近最佳候選解進行移步，取代目前最佳解，另一方面如果遇到鄰近候選最佳解與禁忌名單中所記錄之步驟相同時，則採用次佳的鄰近候選解進行移步，依此類推。除了禁忌名單外，尚有一個重要的準則就是破禁準則(Aspiration Criteria)，主要是用來破除禁忌名單中之限制，避免搜尋重複、停滯不前，並可能將搜尋帶入新的區域以求得更佳的解。另外，搜尋何時停止的條件，必須依不同的問題而定義不同的停止準則，例如在一般的線性問題中，當目標函數開始進入預定的收斂精度範圍時，我們即可停止整個搜尋的程序。

本研究將定義禁忌搜尋法中之四個主要的準則，包括了鄰近候選解、禁忌名單、破禁準則、停止準則。鄰近候選解即為自目前解中選取一決策變數移動一單位後所改變之解，其中關鍵在於移步大小之定義，必須對目標函數是敏感的。鄰近解數量則依照決策變數個數而有所不同。禁忌名單之定義是整個搜尋法的重心，定義完善的禁忌名單可以使搜尋的效率提升，也不至於破壞了搜尋法的精神，退化為一般的梯度法。當進行求解搜尋的過程中，某一次移步所造成的目前最佳解比記錄的真正最佳解還要好的話，但是該次鄰近最佳解的位置被記錄在禁忌名單中，則該移步將會被限制住，故必須迫使接受此一鄰近最佳候選解，使得該移步可以作為下一次疊代之初始解位置，即為破禁準則。最後，停止準則的設定因為本研究可行解空間過大，加上最佳解區附近斜率不一定平緩，所以採用最大搜尋次數作為停止準則。

過去有人認為TS不適用於處理高維度的問題(Mayer, 1998)，主要在於禁忌名單的長度，因為當問題維度上升時，其鄰近候選解的數目也將大幅上升，除了每次找尋最佳鄰近候選解

外，還須搜尋所有鄰近候選解，即成為計算效率上的負擔，而其所需的禁忌名單長度也必須大幅的上升。面對高維度問題時，過短的禁忌名單將無法有效的限制搜尋的路徑，也無法跳脫區域最佳解，而過長的的禁忌名單將影響計算的效率，並且降低找到最佳的機會。至於長度為多少才合適一直沒有一個明確的答案。

3.2 模擬退火法(Simulated Annealing)

模擬退火法主要的構想在於模仿固體加熱融化後降溫至結晶的過程。分子不同的結晶狀態代表著不同的可行解(feasible solutions)。在溫度高時，分子的活動能力強，所形成結晶的型態較多，表示在搜尋的過程中其解可能跳出一區域最佳解或跳入一較劣之解區域。隨著溫度的降低，結晶趨於穩定，當到達最低溫度時，結晶為最穩定的狀態，在高溫下融成液態的物體，經過降溫後，在同一溫度下，開始產生不同的定態，最後降到固態最低溫度時，形成最終結晶體。

以搜尋最佳解的角度而言，最穩定態即為最佳的可行解或最接近最佳的可行解(Kirkpatrick, 1984)。根據此構想，以疊代改善法為搜尋解的基本原則，另外加入波茲曼機率分佈函數式(Boltzmann probability distribution)來描述晶體所含能量的觀念來改變晶體的狀態，並根據此發展出其判斷規則與判斷式(Metropolis et al., 1953)，由於是模仿加熱結晶的過程，所以稱為模擬退火(Simulated Annealing)演算法。而波茲曼機率判斷式 $P(E_i) = \exp(-E_i / K_b / T)$ ，其中T代表某一溫度值、 E_i 代表某一溫度值下某一種晶體狀態、 K_b 波茲曼常數以及 $p(E_i)$ 代表在 E_i 晶體狀態下之機率。然而實際應用中 Metropolis et al. (1953)，將 E_i 改為 ΔE_i 表示模擬系統中晶體狀態的改變量(即目前解之目標函數值與鄰近解目標函數值之

差)以及 $K_b=1$ ，即 $P(\Delta E_i) = \exp(-\Delta E_i / K_b / T)$ 並稱為“接受鄰近解為目前解”之接受機率。另外指數機率分佈式中“ ΔE_i ”項，若為求最大值問題時，其前面還要乘上一負號。

在判斷是否接受鄰近解為目前解之應用上，還需要隨機產生一均勻分佈於0~1範圍之機率值D，若 $P \geq D$ 則接受鄰近解為目前解，相反的若 $P < D$ 則拒絕接受。因此模擬退火法具備修正疊代改善法只能求得初始解所在區域最佳解的限制，也就是能跳脫區域最佳解。而其具備此能力的關鍵即在於上述中的判斷規則與判斷式，其中與疊代改善法相同的是採用由目標函數值決定「解」的優劣，但是不同在於當鄰近解劣於目前解時，疊代改善法直接拒絕，並另外選取其他的鄰近解，而模擬退火演算法則以波茲曼機率決定是否接受，使搜尋的過程中有機會接受較劣的鄰近解，如此便具備跳脫區域最佳解的可能性。

若以一個非線性求最小值的問題說明其主要的流程與判斷的原則：首先，從一個可行解 X_0 (初始解或目前解)出發，其目標函數值為 $Z(X_0)$ ，在鄰近解空間內 $N(X_0)$ 亂數找一鄰近解 X_1 ，求得其函數值為 $Z(X_1)$ ，接著將以上求得相關值代入下面判斷式(1)中：

$$P(\Delta Z) = \min[1, \exp((\Delta Z) / T)] \quad (1)$$

$$\Delta Z = Z_0 - Z_1$$

其中T為溫度、 $P(\Delta Z)$ 為“接受鄰近解為目前解”之接受機率，接著隨機產生一均勻分佈於0~1範圍之機率值D，假如 $P(\Delta Z)$ 大於D，其鄰近解 X_1 被接受並取代目前解，否則重新選取一鄰近解。依此規則，如果鄰近解優於目前解，則必定取代目前解。如果鄰近解劣於目前解，由機率決定是否取代目前解。

四、實際問題之方法應用

本研究採用模擬退火法應用在濁水溪沖積扇彰化地區之 2-1 含水層，同時優選地下水參數分區與抽水率，使得地下水參數分區與抽水率同時達到最佳化，即是使不同時期水位校正觀測井之水位誤差最小，圖 4-1 為模擬區域中之一水位校正觀測井水位圖。經由模擬結果得知 SA 優選模式架構在小區域範圍的應用可得合理之結果。

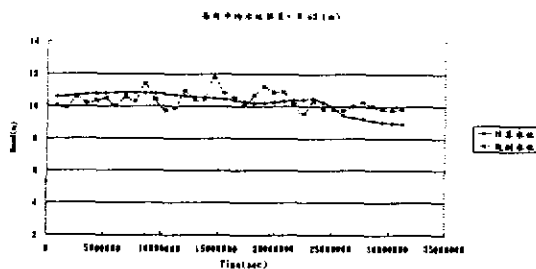


圖 4-1 水位校正觀測井之水位圖

五、設計問題之方法應用

本研究另外設計一簡單模擬區域來模擬一年之地下水位，並且配合禁忌搜尋法來探討優選拘限含水層地下水之地下水參數分區情形，由於在實際區域的模擬，必須所有參數資料，包括抽水分佈與其抽水量、高程、底程、各時期水位等參數要完整並且正確，加上這些資料都屬於空間上的分佈，無法完整的收集，所以可以得到的資料大多是有誤差存在。因此，在自行設計的簡例中可以排除各項參數在模式上的誤差，加上已知一最佳解，進而在針對模擬區域之地下水參數迭代率定的過程中，可以確定此一優化方法在模式上之適用性。

5.1 問題設計

本研究作第一假設已知抽水量，進行地下水參數分區優選以模擬地下水位。第二假設為水力傳導係數(Ks)與比儲水率(Ss)屬於同一分區，同時進行分區調整優選。其中水力傳導係數主要是在反應土壤或是岩石特性，影響因素有溫度、土壤性質等。比儲水

率為(儲水係數*含水層厚度)，儲水係數範圍在 0.005~0.00005，在拘限含水層中，為因水位之增減而使儲水量有變化，所以比儲水率主要受到拘限含水層及水之可壓性影響。兩者之間亦可以假設非相關。

本模式主要利用美國地質調查所(U.S. Geological Survey, U.S.G.S)所發展之 Modflow 來進行地下水數值之模擬。模擬區域為一四方形區域，南、北、西三面皆為隨時間而改變之變流量邊界(亦是變水位邊界)，會有側向流出與流入的情況，而東面假設為完全側向補注區，時間間距採用月為單位，共有 12 時期。在垂直補注方面，由於為一拘限含水層，雖然上下皆為阻水層有些微的淨補注量，但本研究為了將問題簡化，暫時不考慮垂直補注量。抽水分佈與其抽水量假設為已知參數，因此，地下水參數為所要優選探討的變數。

另外，必須將模擬區域予以網格化(離散化)，以便於數值上計算所有網格水位值，網格大小依過去研究報告所提之二平方公里為單位。另外，在實際情況並不曉得模擬區域之地下水水位情況，所以本研究給定五口校正觀測井均勻分佈在模擬區域內，分別藉由這些校正觀測井所觀測到之水位，並透過本研究之優化模式來決定如何變動地下水參數之分區，以達到我們所預設之結果。

5.2 禁忌搜尋法之應用

整個演算流程中包括了四個關鍵之要素，分別為移步、禁忌名單、破禁原則和停止搜尋原則，說明如下：

(0) 初始解

開始搜尋前，先決定一個滿足可行解區之初始解。在決定初始解部分，採用近似徐昇氏法之分區方式，先將整個模擬區域已知相鄰觀測井分別連成許多三角形，接著計算各三角形之內心位置，而將這些內心所連成

的區域當作初始解的分區，靠近邊界之內心向邊界線做垂線。而這些內心位置即當作初始解位置，各分區之網格分別帶入該區觀測井之水力傳導係數(Ks)和比儲水率(Ss)。

(1) 移步

定義為對其所有鄰近解做搜尋，並從其中挑選出一個最好之鄰近解作為下一次疊代之初始解，其中鄰近候選解集合之決定方式為將各決策變數上下變動一單位。鄰近解集合決定方式為將各內心進行上、下、左、右移動網格以決定一新的分區並進行地下水數值模擬求得鄰近解。因為禁忌搜尋法搜尋方式為全部之鄰近解皆搜尋，共有 $5 \times 4 = 20$ 個鄰近解，再由其中優選出一組滿足所有條件之最佳解，作為下一次疊代之初始值。另外在整個演算過程會記錄一真正之最佳解，所以在每次移步時都要做比較，也就是說，欲移步之鄰近最佳解比真正最佳解來的好，此鄰近最佳解便會取代成為真正最佳解。

(2) 禁忌名單

主要之目的用來記錄最近幾次所在之最佳解位置，避免造成在搜尋過程中重複搜尋。而這禁忌名單的長度並沒有特別定義，本研究採 Glover 建議魔術數字 7 作為禁忌名單之長度。名單越長，落入區域最佳解的機率越低，但所需的記憶體空間也相對越大，及可提供的移動空間相對越小，求解效率將會越低。相反的，越短越容易造成循環問題，即很容易落入區域最佳解(Local Optimum)。實際上，其長度還必須視問題尺度大小來做決定。尺度大之問題搜尋可行解區大，落入區域最佳解的機率較小，加上本來就不易重複搜尋，所以其名單長度相對來說可以比較長。相反地，尺度小之問題，其名單定義比較短。本研究採用記錄禁忌名單的形式為 $T_i = (\text{node}, X, Y)$ 其中 i 代表疊代次數，

node 代表移動內心之編號，而 X 和 Y 分別代表其座標。而禁忌名單長度則採用魔術數字 7。

(3) 破禁準則

當進行求解搜尋的過程中，某一次移步所造成的最佳解比記錄的真正最佳解還要好的話，但是該次最佳解的位置記錄在禁忌名單中，則該移步將會被限制住，故將該移步從禁忌名單中刪除，使得該移步可以作為下一次疊代之初始解位置。

(4) 停止搜尋準則

在演算過程中，我們必須要設定一停止搜尋原則，使得過程不會因此而無限制的搜尋下去，一般來說停止準則大致上可分為，一是預設一最大迭代次數，二是當最佳解滿足所要求之精度時，整個演算即宣告結束。由於本研究模式已經預設有一已知最佳解，所以將採用最大迭代次數作為停止準則。

另外，在地下水模擬前必須先判斷網格屬於哪一區，本研究中則設計以下列的方法來決定。即先將每一個分區中的觀測井去判斷觀測井是在該分區中各邊的上方或下方。例如某一觀測井，對所在分區其中一邊函數為 $y = f(x) = ax + b$ ，將觀測井 X, Y 座標代入 $g(x, y) = y - (ax + b)$ 中，若 $g(x, y) \geq 0$ 代表觀測井在該邊之上方則標記為 1，相反的若 $g(x, y) < 0$ 代表在下方則標記為 -1。依此方法記錄各觀測井所在分區的標記，接著再將網格中心的座標代入判斷其符合哪一組的觀測井標記值。相同的方法用在判斷最佳解位置的移步是否有超越該內心所在三角形範圍內，只是觀測井座標改為內心的座標。

5.3 優化模式

本研究之優化模式如下 M_1 所示，以 Modflow 模擬出每一口水位校正觀測井之平均水位差作為目標函數

式，其中 j 為校正觀測井、 t 為時間、 h_c 為計算水位、 h_o 為已知水位、 n 為校正觀測井數。決策參數為地下水參數中之水力傳導係數(K_s)和比儲水率(S_s)，另外應變數為水位值(h)。而限制式為水控制方程式與邊界條件，限制式中之 W 為補注量與抽水量之總淨值， $W = well(r, c) + Recharge(r, c)$ (r, c 分別代表網格列、欄)，由於在本模擬過程中只優選地下水參數對地下水位之影響，所以將抽水量視為定值，在每一個月份分別給予一合理估計值，而垂直補注量忽略不計。

$$Min \quad Z = Min \left[\sum_{j,t} \left(h_{(j,t)}^o - h_{(j,t)}^c \right)^2 / n \right]^{1/2}$$

$$St. \quad K_s \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_s \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$K_s, S_s \geq 0$$

五、結果與討論

5.1 內心初始分區法

採用內心分區法所劃分出之初始分區，進行禁忌搜尋法之迭代搜尋可達到已知最佳分區。模擬結果在第 48 次搜尋至全域最佳解（分區）；另外，在第 17 次疊代產生滿足破禁原則之情況，即是其中某一內心移步至禁忌名單中記錄的位置，但其所劃分出來之分區情形卻比紀錄之最佳解更好，所以必須破除這個禁忌名單，才能往全域最佳解的方向前進。

目標函數圖與各觀測井水位圖如下列圖 5-1、5-2a、5-2b、5-2c、5-2d、5-2e 所示。由目標函數圖可以看出搜尋過程中，會先經過一區域最佳解，繼續向全域最佳解方向移動，表示禁忌搜尋法除了能夠有效率的搜尋外，亦具有跳脫區域最佳解的能力。由水位校正觀測井之水位圖可以看出，搜尋之最佳水位與已知水位相符，滿足本研究優化模式之要求。另外，因本模式只考慮東方之側向補注，由圖看

出越接近扇頂（東方）之觀測井一，二期初水位越受側向補注量之影響，較其他地區之水位來的高，而接近模擬區域邊緣之觀測井一、二、三、四之水位會受到邊界水位因素影響，觀測井五之水位則持續受到補注影響而上升趨勢，顯示本模式假設是合理的。

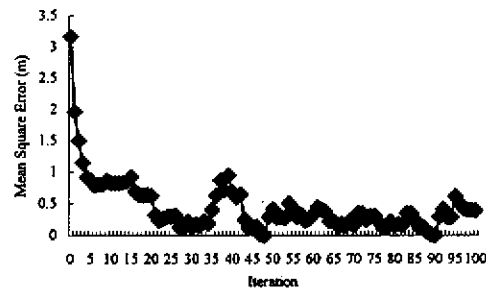


圖 5-1 目標函數圖

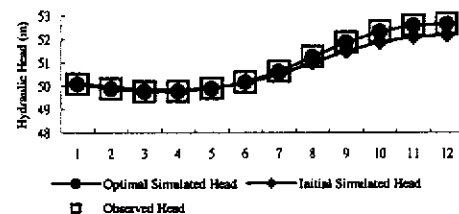


圖 5-2a 第一水位校正觀測井之水位圖

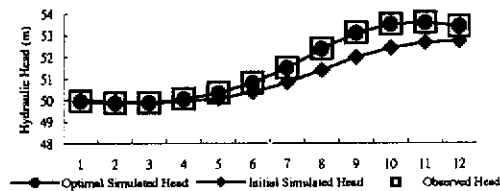


圖 5-2b 第二水位校正觀測井之水位圖

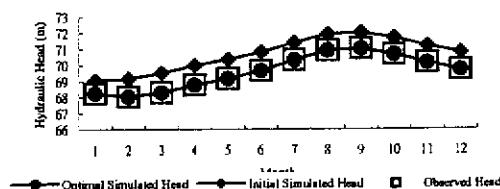


圖 5-2c 第三水位校正觀測井之水位圖

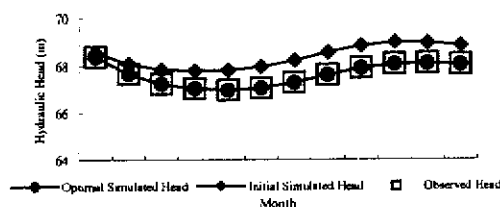


圖 5-2d 第四水位校正觀測井之水位圖

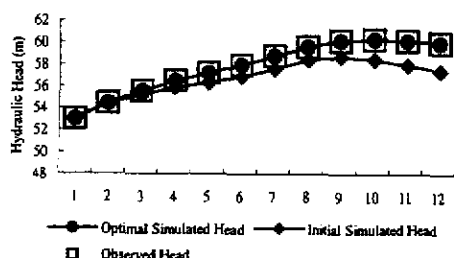


圖 5-2e 第五水位校正觀測井之水位圖

5.2 不同初始分區比較

為了證明禁忌搜尋法能有效地搜尋到全域最佳解，本研究另外任意選取四個不同的初始分區，結果除了第三初始分區外，其他不同的初始解在滿足我們所設定之停止原則內，皆可以有效地搜尋到相同最佳解，如圖 5-3, 5-4, 5-5, 5-6 與表 5-1。因此，說明除了本研究提出之內心分區法外，不論在任何分區下依然可以搜尋到最佳解；另外，內心分區法只是決定一個初始解的方法，並不是一個能夠最快達到最佳解的方法。

表 5-1 不同初始分區比較表

	First	Second	Third	Fourth	Fifth
最大搜尋次數	100	100	100	100	100
最佳解	0	0	1.026	0	0
滿足最佳解次數	48	52	16	16	38
滿足破禁準則次數	17	21	x	15	30

由於第三初始分區在禁忌搜尋法中所設定的條件下（禁忌名單的長度）無法順利找到最佳解，從其目標函數圖中看出，在第 16 次迭代後即掉入約 15 次一週期的循環中。可能原因為內心點受到邊界以及禁忌名單影響，可行解空間被限制在一區域最佳解中無法跳脫出來，因此將禁忌名單由 7 改為 15，則有效地跳脫出區域最佳解，結果如下表 5-2 所示。

本模式經由禁忌搜尋法迭代搜尋後，皆可以得到我們所決定之已知最佳解，顯示此搜尋法在資料充足情況

下，應可以有效利用在小區域之地下水參數分區選定，進而了解地下水位的變化情形。

表 5-2 第三初始分區在不同禁忌名單長度結果比較

tabu list	7	15
最大搜尋次數	200	150
最佳解	1.026	0
滿足最佳解次數	16	93
滿足破禁準則次數	X	93

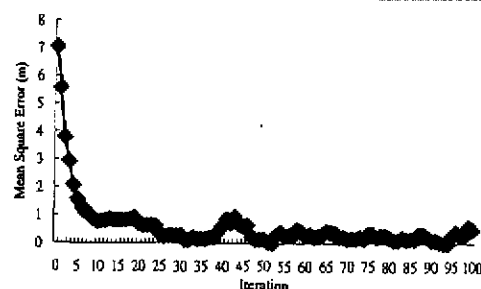


圖 5-3 第二初始分區目標函數圖

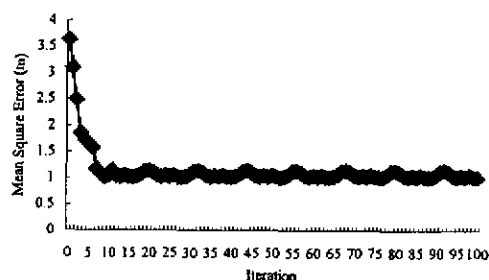


圖 5-4 第三初始分區目標函數圖

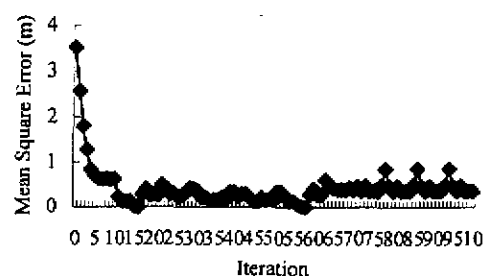


圖 5-5 第四初始分區目標函數圖

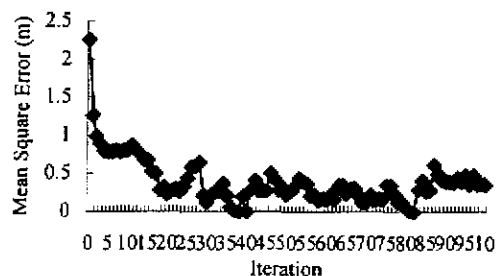


圖 5-6 第五初始分區目標函數圖

5.3 水力傳導係數之敏感度分析

為了確保禁忌搜尋法依然可以應用在不同地質情況下，分別採用 10^{-2} , 10^{-4} , 10^{-5} (表 5-3) 進行敏感度分析，結果如下表 5-4 所示，搜尋收斂情況皆相當良好，也同要找到最佳解。由目標函數圖，初始的目標函數值得知不同 order 對模擬水位有一定程度的影響 Case3 因傳導性不佳，使得其目標函數尺度比其他兩個 Case 來的大。

表 5-3 各分區之水力傳導係數

Zone	水力傳導係數(Ks)			比儲水率(Ss)
	case1	case2	case3	
1	0.0004	0.04	0.00004	0.0007
2	0.0003	0.03	0.00003	0.0005
3	0.0007	0.07	0.00007	0.0001
4	0.0003	0.03	0.00003	0.0003
5	0.0001	0.01	0.00001	0.00002

表 5-4 不同水力傳導係數結果比較

	Case1	Case2	Case3
最大搜尋次數	100	100	100
最佳解	0	0	0
滿足最佳解次數	48	10	14
滿足破禁準則次數	17	X	X

六、建議

由模擬退火法應用於實際問題與禁忌搜尋法應用於設計問題之結果顯示，啟發式搜尋法應可以有效的應用在地下水參數的分區上，但是在實際問題大多數的參數是未知的，且參數的分區更具有不確定性，因此還有改善之必要，可以建議未來繼續研究的方向有：

1. 針對地下水參數分區做更進一步的研究探討。
2. 針對其他參數，如抽水分區與其抽水量等進行優選，以便於排除模式中參數之不確定性。
3. 在決定地下水參數與抽水參數的

分區上可以採用常態機率密度函數之隸屬性概念來決定

4. 比較不同啟發式演算法，如禁忌搜尋法、模擬退火法、基因遺傳演算法等，在本研究上之適用性，並且可以相互結合應用
5. 由於實際上不同地區有不同之邊界條件，因此可以加入邊界條件之選定，即是列為優選參數之一。

七、文獻回顧

1. Dougherty, D. E., Optimal groundwater management 1. Simulated Annealing, 27(10), 2493-2508, 1991
2. Du, D.-Z., and P. M. Pardalos, Handbook of combinatorial optimization Volume3, 1998
3. Glover, F., A user's guide to Tabu Search, Annals of Operations Research 41: 3-28, 1993
4. Glover, F., Tabu Search, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA, 1999
5. Krickpatrick, S., "Optimization by simulated annealing: Quantitative studies", Journal of statistical physics, 34(5/6) : 975-986, 1984.
6. Metropolis, N., A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines", The journal of chemical physics, 21(6) : 1087-1092, 1953
7. McKinney, D. C., and M.-D. Lin, Genetic algorithm solution of groundwater management models, Water Resource Research, 30(6), 1897-1906, 1994
8. Pan, L., L. S. Wu, a hybrid global optimization method for inverse estimation of hydraulic parameters: Annealing-simplex method, Water Resource Research, 34(9), 2261-2269, 1998
9. Sun, N.-Z., S.-L. Yang, and W. W.-G. Yeh, A proposed stepwise regression method for model

- structure identification, Water Resource Research, 1561-1572, 1998
10. Yang, S.-L. and Yeh, W. W.-G. "Formulation and Evaluation of Alternatives for Mitigating Groundwater Overdraft in Taiwan's Coastal Area", Water Resources Bureau, MOEA 1998.
11. Yeh, W. W.-G. "Aquifer Parameter Identification", Journal of Hydraulic Division of American Society of Civil Engineering, 101(HY9): 1197-1209, 1975.
12. Zheng, C., and Wang, P., Parameter structure identification using tabu search and simulated annealing, Advances in Water Resources, 19(4): 215-224, 1996.
13. Zheng, C., and Wang, P., An integrated global and local optimization approach for remediation system design, 35(1), 137-148, 1999
14. 中興工程顧問公司,「濁水溪沖積扇地表地下水聯合運用, 第一階段, 濁水溪沖積扇地下水可開發潛能評估報告」, 1997
15. 江崇榮、田巧玲、張良正、林君怡、葉明生,「濁水溪沖積扇地下水觀測站網評估」, 濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集, 233-236 頁, 1996
16. 李繼尊,「流通係數空間變異模式之研究—雲林北港溪兩岸之變異探討」, 國立台灣大學農業工程研究所碩士論文, 1993
17. 邵長平,「非線性回歸應用於大區域之地下水參數優選」, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文, 1996
18. 吳泰熙, 張欽智,「以禁忌搜尋法則求解推銷員旅行問題」, 大葉學報, 第六卷 第一期, 87-99 頁, 1997
19. 張誠信,「雲林地區地下水流三維數值模擬」, 國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文, 1996
20. 劉志純,「雲林地區抽水行為對地層下陷的影響」, 國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文, 1996
21. 經濟部水資源局,「台灣地區地下水觀測網整體計畫, 81~84 年度成果簡介 (濁水溪沖積扇)」, 1997
22. 經濟部水利司,「區域性地下水觀測站網檢討 (I) -濁水溪沖積扇觀測站井佈置檢討」, 1995
23. 經濟部水利司,「區域性地下水觀測站網檢討 (II) -濁水溪沖積扇觀測站井佈置檢討」, 1995
24. 童慶斌、周哲正,「禁忌搜尋法在地下水參數分區之應用」, 第二屆環境系統分析研討會論文集, 1999
25. 童慶斌、譚仲哲,「應用模擬退火演算法估算集水區平均雨量」, 農業工程學報, 第 46 卷, 第 4 期, 2000.