

# 應用模擬退火演算法估算集水區平均雨量

## Application of Simulated Annealing to Estimate Watershed Average Rainfall

國立台灣大學農業工程學系  
助理教授

童慶斌  
Ching-Pin Tung

國立台灣大學農業工程學系  
大四專題研究生

譚仲哲  
Chung-Che Tan

### 摘要

本研究中提出以模擬退火法配合集水區污染負荷模式(the GWLF Model)中之流量模擬模式，在模擬流量誤差最小之目標下，決定雨量站最佳控制面積權重。集水區平均雨量常用徐昇氏法或平均權重法等來計算，本研究提出應用模擬退火演算法(Simulated Annealing Algorithm, SA)來優選集水區雨量站控制面積權重，以計算平均雨量。模擬退火法擁有跳脫區域最佳解的能力，增加找到全域最佳解之機率。本研究方法應用於大甲溪上游德基水庫集水區以及曾文溪上游曾文水庫集水區，其結果顯示本研究方法較徐昇氏法及平均權重法為優。另外本研究也以模擬退火法與迭代改善法(Iterative Improvement)、亂數選取法(Random-Searching Method)做搜尋效能上之比較，而結果顯示以模擬退火法之效能為最佳。本研究方法應用於平均雨量之推求，未來可以此啟發性方法配合其它不同之評估模式，處理其它優化問題。

**關鍵詞：**優化，模擬，水資源，水文。

### ABSTRACT

Simulated annealing algorithm with the streamflow component of the GWLF model were used to determine the optimal weighting of rain gauges, which has the objective function to minimize the difference between observed and simulated monthly flows. Watershed areal precipitation is usually calculated by the Thiessen method, average weighting method, etc.. This study applied simulated annealing algorithm (SA) to optimize weightings of rain gauges to calculate average rainfall. Simulated Annealing has ability to escape from the local optimum, and increase the probability to find global optimum. The method was applied to the Ta-Chia and Tseng-Wen creek watersheds.

Results indicate that the method proposed in this study can result in better streamflow prediction than Thiesson method and average weighting method. Besides, using SA has better effectiveness than iterative improvement and random-searching method. In conclusion, this study applied Simulated Annealing to estimate areal precipitation and yield better streamflow predictions, and the same framework can be applied to optimize other problems with linking SA to other evaluation models.

**Keywords:** Optimization, Simulation, Water resources, Hydrology.

## 一、前言

台灣是一狹長型的小島，東西向總寬約為一百四十餘公里，但卻有著三千多公尺高的中央山脈聳立其中，坡度的起伏相當的大，這樣特殊的地理環境，造就了台灣河川既短且急的特色，也發生了涵養水源上的難題，山坡地的開發，河谷的過度開採，使得原本流速急湍的河溪，變得更加難以掌握與控制有限的水資源，降雨大多都直接奔流入海。台灣年平均降雨量高達 2,550mm，為全球平均降雨量的 2.5 倍，但是全年降雨量卻分配不均，大約 75% 的降雨集中在 5 月~10 月，造成了水資源調配與運用上之困難，處於這工商業發達的時代，水資源充分供給更是一項不可或缺的要害，所以，如何合理評估一場降雨事件發生後，有多少雨量會轉變成可運用的流量，進而有效地管理珍貴的水資源，使之不至於浪費流入大海，儼然已成爲一重要的課題。

如何以現有的雨量測站估計最符合現況的集水區平均雨量，使流量模擬模式能較準確地預測流量；傳統上，區域平均雨量可以等雨量分佈線、徐昇氏法等來計算，但其求出之平均雨量並不能夠確保河川流量的模擬合理。本研究希望利用啟發式之優化方法，藉由歷史的氣象與水文資料，進而檢定出各雨量站最佳的控制面積權重，得到更合理的集水區平均雨量，而如何優選出最合理的權重則是一非線性的優化問題，所以本研究目的在應用模擬退火法(Simulated Annealing Algorithm, SA)，以模擬流量最接近觀測流量之目標下，決定雨量站之最佳控制面積。

模擬退火法最早是在 1953 年由 Metropolis

等人所提出來的，當時並不是用於處理優化的問題，而是提供計算機處理有限空間最大放置問題（two-dimensional rigid-sphere system），一直到了 1983 年才由 Kirkpatrick 於科學期刊(Science) 上將它應用在解大尺度組合優選的問題上；此方法與遺傳演算法(Genetic Algorithms, GA)、禁忌演算法(Tabu Search Algorithms, TS)被稱爲具有啟發性的優化方法，並被陸續地應用在不同領域之優化問題上，例如平行計算(Fox et al., 1986)、推銷員旅行問題(Malek et al., 1989)、地下水管理(Dougherty, 1991)、農場管理(Mayer et al., 1996)等。國內亦有相關之應用研究，如周哲正(2000)將其應用於決定地下水參數之最佳分區方式，但應用在計算集水區平均雨量上，本研究尚屬首見。

## 二、研究分析流程

集水區區域雨量是未知，一般可藉由集水區內雨量站計算平均雨量，而傳統計算方法以等雨量分佈線、徐昇氏法等來計算面積權重值，求出平均雨量，但此平均雨量並不能夠確保河川流量之模擬最接近觀測流量。平均雨量之計算亦可以試誤法調整雨量站權重，使流量模擬更準確，然而試誤法是較無效率之搜尋方法，本研究採取模擬退火法(Simulated Annealing)進行啟發性搜尋以改善效率。而流量模擬則採用 The Generalized Watershed Loading Function (GWLf) Model (Haith and Shoemaker, 1987)中之流量模式，應用推估集水區內各雨量測站在模擬流量最佳下之最佳控制面積權重，以求得合理之平均雨量。

以模擬退火法來優選集水區雨量站之最佳

控制面積權重，進而計算平均雨量，一旦有了平均雨量的資料，即可透過河川流量模擬模式模擬流量，再將其模擬流量與實際流量紀錄做比較，評斷控制面積權重之優劣，作為是否繼續改善權重之依據。經過反覆操作，直至模擬出的流量與實際流量最接近，則此一權重即為集水區雨量站控制面積之最佳權重。其優化模式如下：

$$\text{目標函數：} \quad \text{Min} \quad Z_0 = \sum_{y=1}^k \sum_{m=1}^{12} |SF_{o,y,m} - SF_{e,y,m}|$$

$$\text{限制式：} \quad \sum_{i=1}^n W_i = 1$$

$$\bar{R}_t = \sum_{i=1}^n W_i \times R_{i,t} \quad \forall t$$

$$SF_{e,y,m} = F(\bar{R}_t, T_t) \quad \forall y, \quad \forall m$$

$$\forall \text{Variable} \geq 0$$

$n$  為測站數、 $\bar{R}_t$  為  $t$  日之平均雨量(cm)、 $T_t$  為日均溫(°C)、 $R_{i,t}$  為測站  $i$  在  $t$  日之雨量(cm)、 $W_i$  為測站的權重、 $SF_{o,y,m}$  為第  $y$  年  $m$  月之實際流量紀錄、 $SF_{e,y,m}$  為將  $\bar{R}_t$  與  $T_t$  輸入流量模擬模式所求出第  $y$  年  $m$  月之月流量。其中函數  $F()$  代表 GWLF 模式。

在整個模擬過程一開始，必須先決定一初始權重進行模擬，本研究採取  $n$  個雨量站平均權重來作為初始權重  $W_o = (1/n, 1/n, \dots, 1/n)$ ，以此控制面積權重配合雨量資料計算出集水區內的平均降雨量  $R_t$ ，再將平均降雨量還有氣溫、日照時數等資料代入 The GWLF Model 河川流量模擬模式，得到河川各月之模擬流量  $SF_{e,y,m}$ ，將其與河川實際流量紀錄  $SF_{o,y,m}$  做比較，計算目標函數  $Z_0 = \sum_{y=1}^k \sum_{m=1}^{12} |SF_{o,y,m} - SF_{e,y,m}|$ （絕對值以避免產生負值結果），從鄰近解空間中隨機調整找出一新權重  $W' = (w_1, w_2, w_3, \dots)$ ，再利用流量模擬模式模擬流量  $SF'_{e,y,m}$ ，將其與河川實際流量紀錄  $SF_{o,y,m}$  做比較，計算目標函數  $Z' = \sum_{y=1}^k \sum_{m=1}^{12} |SF_{o,y,m} - SF'_{e,y,m}|$ ，利用模擬退火法

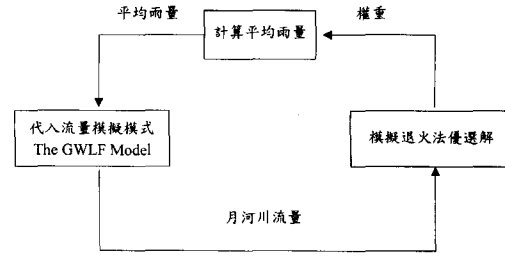


圖 1 模式應用流程圖

決定是否由  $W'$  取代  $W_o$  為目前解，或維持  $W_o$  為目前解；再由目前解從其鄰近解空間中隨機調整找出一新權重，重複上述步驟直至達到模擬退火法規定之停止條件，再由被紀錄的控制面積權重中尋找出集水區雨量站之最佳控制面積權重，即為所需之最佳解。其應用流程如圖 1。

### 三、研究方法

#### 3.1 模擬退火法(Simulated Annealing)

本研究採用模擬退火法應用於集水區平均雨量之計算，有關於其方法之理論基礎詳述，則可以參見 Optimization by Simulated Annealing (Kirkpatrick, 1983), Statistical Cooling: A general approach to combinatorial optimization problems (Aarts, 1985)等參考文獻。

##### 3.1.1 模擬退火法步驟

模擬退火法是模擬物理特性的一種優選演算法，此法的特性在於能增加跳脫區域最佳解(Local Optimum)之機會而提高找到全域最佳解(Global Optimum)的機率。模擬退火法的物理意義為模擬固體在高溫狀態下融化，而在逐漸降溫冷卻的過程中，此物體慢慢重新結晶成最穩定的晶體狀態，分子每一個不同的結晶狀態代表著一個可行解，當溫度愈高時，分子活動力愈強，結晶型態也就愈多樣化，其所對應的可行解區域也就愈大，代表著搜尋到全域最佳解的機率也愈高，容易跳脫出初始解所在之區域最佳解，隨著溫度的下降，結晶不斷地變化，也就是解不斷地變動，利用溫度的高低來決定解的變動機率，當溫度愈來愈低，分子的結晶狀態也愈趨於穩定，

當到達最終溫度時，結晶為最穩定的狀態；以搜尋最佳解的角度而言，最穩定狀態即為最佳的可行解或最接近最佳的可行解(Kirkpatrick, 1984)。

就優化問題來說，每一個決策變數都有其對應的值，便稱為一個『解』，而在滿足所有限制式條件下的解即為『可行解』，所有可行解形成的集合稱為『可行解空間』，在優化求解的過程中，第一個要素為『初始解』，一般來說，初始解的選取都是由已知的規則或是方法訂定，從可行解中選取其一做為搜尋的起點，此解即為初始解；第二個要素為『鄰近解』，從一個目前解按照既定的範圍或原則出發前往下一個目前解的過程中，每一個有可能成為下一階段目前解的解則稱為『鄰近解』，所有鄰近解的集合稱為『鄰近解空間』(neighborhood)，而『鄰近解的定義』即為決定鄰近解的原則，在所有尋找解的過程中，都需要依照此原則來決定鄰近解。在由鄰近解集中找尋改善目標之方向進行移步，移步後又有一新的鄰近解集合，如此重複至滿足搜尋停止原則以決定最佳解。模擬退火法要素即包括初始解、鄰近解、移步原則、及停止原則分別描述如下，而模擬退火法的演算流程，則可以見圖 2，此流程圖為求最小值問題， $T_f$  為最終溫度， $r$  為降溫梯度， $L_{max}$  為最大搜尋次數， $M$  為搜尋次數， $S$  為目前解， $S'$  為鄰近解， $P$  為 0~1 之間的亂數， $D$  為  $Exp\left(\frac{s-s'}{T}\right)$ 。

#### 初始解

在所有可行解空間中，任意選取一個可行解為初始解，一般來說可設由某種特定方法所解出之可行解為初始解，以本研究來說，是以各雨量站之平均權重組合做為初始解。

#### 鄰近解

在決定一初始解之後，在可行解空間中，從初始解可移動到的下一個所有解之集合，稱為鄰近解，依此定義，本研究採用調整其中一個雨量站之權重，再將每一雨量站之權重除以總權重，如此可以保持調整後權重和保持為 1。而每調整一雨量站後之各站權重值即為一個鄰近解，所有的鄰近解集成鄰近解空間。例如：假設現在有

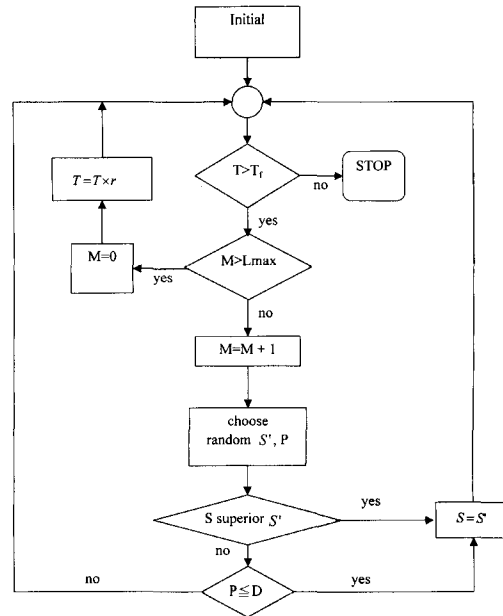


圖 2 模擬退火法演算流程圖

三個測站 (A, B, C)，一個目前解之三測站的權重分別為(0.34, 0.33, 0.33)，調整(提升)一單位 0.1 之 A 權重，再將每個測站之權重除以總權重，則三測站的權重分別變為(0.4, 0.3, 0.3)，調整過後的權重所產生之新解即為初始解的鄰近解之一。而這三個權重，每個權重都可以上下調整一單位，如此一個目前解就有 6 個鄰近解。這 6 個鄰近解就組成該目前解的鄰近解空間。

#### 移步原則

由目前解出發，在既定的範圍下，隨機變動其解的狀態，移動到新的可行解，其變動的規則及過程，也稱為解的『移步原則』，這一項基本元素也是模擬退火法最重要的核心，使模擬退火法能夠有機會跳離區域最佳解；其方法是以亂數從鄰近解空間中選取一個解，再由機率式來判斷是否接受此可行解為下一階段的目前解，在求最小值問題時，其機率式如下：

$$D = \text{Min}\left[1, \exp\left(\frac{\Delta Z}{T}\right)\right] \dots\dots\dots(1)$$

$D$  為模式中的判斷門檻值； $\Delta Z = (Z - Z')$ ； $T$  為

系統中目前階段的溫度參數值。以本研究為例，以一組雨量站權重為目前解代入流量模擬模式，得到一河川模擬流量  $SF_{c,y,m}$ ，與實際流量  $SF_{o,y,m}$  做比較，計算目標函數  $Z = \sum_{y=1}^k \sum_{m=1}^{12} |SF_{o,y,m} - SF_{c,y,m}|$ ，再依規則找尋鄰近解代入模式得一新目標函數  $Z' = \sum_{y=1}^k \sum_{m=1}^{12} |SF_{o,y,m} - SF'_{e,y,m}|$ ，代入判斷式(1)可得一  $D$  值，再以亂數選取一個介於 1~0 之間的數  $P$  與  $D$  做比較，若  $D \geq P$ ，則鄰近解取代成為目前解，若  $D < P$ ，則重新尋找一鄰近解，直到取代目前解為止，再進入下一階段的搜尋，由判斷式發現，當  $Z' < Z$ ，也就是  $Z'$  優於  $Z$  時， $D$  將會被選為 1，且大於等於  $P$ ，其解必定會移至鄰近解；當  $Z' > Z$  時，表示鄰近解  $Z'$  較劣，此時  $D$  會介於 0-1 之間，較劣的鄰近解將有機會被採用；當解有機會往較劣解移動時，就有可能跳脫區域最佳解，而往較劣解移動的機率，將受到當時系統溫度還有目前解與鄰近解之間差值的影響，所以當開始時溫度較高，不斷的搜尋不同區域的解，接著溫度慢慢降低，其解便會收斂在其中一個區域最佳解中。此方法克服了其它最佳化解演算法，可能因初始解的選定，而只能找出區域性最佳解的缺點，並且藉由記錄與比較其搜尋過程中所找到的解，進而有機會得到全區域的最佳解。

### 停止原則

搜尋何時停止，主要是依照模擬退火法中最終溫度的設定來決定，就物理上的意義來說，物體結晶過程中，溫度一直不斷地下降，到達結晶溫度時，物體便以最穩定之結晶狀態析出，也就是說當搜尋達到最終溫度所找到的解將會是最佳解，本研究也採用此停止原則，不過為了避免在搜尋過程中曾經找到全域最佳解而最後並不是收斂在此區域中，本研究將搜尋到的解比較並且紀錄較優解。

#### 3.1.2 參數

參數包括起始溫度( $T_i$ )、最終溫度( $T_f$ )、每次降溫的速度( $r$ )與每一溫度階段的最大搜尋次數

( $L_{max}$ )；當每一個溫度階段完成最大的搜尋次數時，就開始降溫，而降溫的速度( $r$ )則是決定了降溫的幅度有多少。至於如何設定各參數的大小，在以往的論文中有相當廣泛的討論，其主要的原則討論如下：

在溫度  $T$  方面，最初溫度  $T_i$  的設定，大多需視問題而定；有人建議在初期鄰近解被接受率至少維持在 80% 以上 (Kirkpatrick et al., 1984)；另外在遇到多個區域最佳解求解問題時，也可將初始溫度( $T_i$ )設定高一點，如此可避免其解太快收斂於某一區域中，而減少找到全域最佳解的機會；雖然過高的溫度設定會造成計算上的浪費，不過設定過高的結果一般來說都優於設定過低的結果 (Dougherty and Marryott, 1991)，所以原則上，設定使初期鄰近解大多都能被接受的適合溫度。

最終溫度  $T_f$ ，關係到搜尋何時停止，大致上是以接近 0°C 為原則；不過對於搜尋何時停止，並非都是等到溫度降為設定的最終溫度  $T_f$ ，也有採用其它設定停止的法則，以達到所要求的目的，因為設定最終溫度的主要目的在於，當溫度降到一定程度時，其接收較劣鄰近解的機率便會相當的低，便可以收斂於某一個區域最佳解，所以只要當降低幾個溫度階段，其目前解都沒有改善的現象，表示已經無法再跳出此區域中，將收斂至此區域的最佳解，因此有研究者設定為當降溫數次後，其最佳解沒有發生變化的情況下則搜尋停止(Dougherty and Marryott, 1991)；另外訂定當所求得的最佳解符合決策者的要求時停止，也是相當常用的原則；當停止搜尋後，即決定此次搜尋找到的最佳解為何；根據模擬退火法模仿晶體退火的精神而言，最佳解應該是落在溫度最低時，目前解所在的位置，不過為了避免在搜尋的過程中，已經找到了全域最佳解，但最後並不是收斂在此區域中，所以在本研究中，會隨時比較降溫過程中所求得的目標函數值，並且紀錄較優的值做為最佳解，以防止錯失掉真正的全域最佳解。

降溫速度  $r$  方面，必須介於 0 到 1 之間，而傳統上多半是介於 0.8~0.99，且保持固定

(Kirkpatrick et al., 1984)；不過有人採用隨溫度與目前解的統計量而變更其降溫速度 (Huang et al., 1986; Dougherty and Marryott, 1991)，減少許多搜尋的次數，也有相當不錯的結果，不過都要大於 0.5 以上，否則降溫太快將易於陷入區域最佳解。

模擬退火法在演算上以每次溫度最大搜尋次數  $L_{max}$  作為模仿結晶體在該溫度中尋找熱穩定態的過程；對於  $L_{max}$  應該設為多少，Arts and van Laarhoven (1985) 曾經證明只要  $L_{max}$  夠大，模擬退火法最後找到的最佳解，為全區域最佳解的機率可以高達百分之百；所以一般  $L_{max}$  搜尋的次數越多，其所得全區域最佳解的機率就會提高；但如果設定過高卻也會造成計算上的浪費與效率的低落。如何定義適當的數字，有報告提供參考的依據，Kirkpatrick et al. (1983) 建議為決策變數個數的倍數；Dougherty and Marryott (1991)，實際將  $L_{max}$  訂為決策變數個數的 100 倍；Huang et al. (1986) 則採用隨著不同溫度而變。不過，至今相關的報告，大多無法肯定一個共通的準則，還是要依問題的大小與特性而定。

### 3.2 流量模擬模式(GWLF)

本研究中的流量模擬是採用一物理性水平衡模式(The GWLF Model)，此模式能反應出土地利用對流量之衝擊與影響，為一種反應區域性的流量模擬模式，其參數可根據集水區之土地利用及土壤特性等資料來決定，以提高流量預測之準確性，其水平衡概念如圖 3。

該模式會應用於台灣四個集水區(童慶斌等, 1999)，研究結果說明此模式可合理模擬河川流量。此模式所考慮之水平衡關係如下：當雨水降至地面後，一部分的水會入滲至土壤中；而另一部分則成為地表逕流，並直接流入河川中。此關係可由下列方程式表示：

$$I_t = R_t - Q_t \dots\dots\dots(2)$$

方程式中  $I_t$  是入滲量， $R_t$  是降雨量，而  $Q_t$  是地表逕流量，模式中所用的單位為公分。入滲水將補充未飽和層之土壤水分，如未飽和層之土

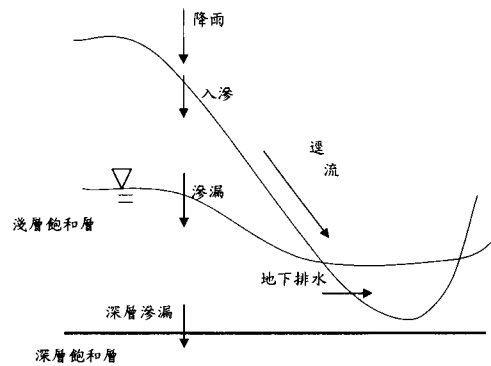


圖 3 流量模擬模式水平衡關係示意圖

壤水份超過土壤最大含水量，則水份將滲漏至飽和層。此外，未飽和層之土壤水份亦可能因蒸發散而帶離土壤。未飽和層之水平衡關係可由下列方程式表示：

$$U_{t+1} = U_t + I_t - Ev_t - PC_t \dots\dots\dots(3)$$

上式中的  $U_t$  是未飽和層之土壤水份含量， $Ev_t$  是蒸發散量，而  $PC_t$  是滲漏量，式中所用的單位為公分。

土壤自由含水層之水平衡關係可由下列方程式表示：

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t \dots\dots\dots(4)$$

上式中的  $S_t$  是淺層飽和層之土壤水份含量， $PC_t$  是未飽和層滲漏至飽和層之水量， $G_t$  是飽和層滲漏至河川之水量，而  $D_t$  是入滲至受限含水層之水量，式中所用的單位是公分。當河川水位高於地下水位時，河川補注土壤，則  $G_t$  為負值。在本研究中入滲至受限含水層之水量( $D_t$ )假設為零。河川流量即為地表逕流加地下水排至河川之基流量。未飽和層滲漏至飽和層之水量( $PC_t$ )可由下式算出：

$$PC_t = \text{MAX}[0, U_t + I_t - Ev_t - U^*] \dots\dots\dots(5)$$

上式中的  $U^*$  是最大土壤水份容量。

有各種不同的方法可用於估算地表逕流，如合理化公式、及 Curve Number 方法(Ogrosky and Mockus, 1964)等。在本研究中，將採用 Curve

Number 方法，主要是此種方法在計算地表逕流時可合理的反應土地利用方式及土壤水份之影響。而在前式中蒸發散量( $E_v$ )等於潛能蒸發散量( $PET$ )乘覆蓋係數( $CV$ )，且受限於未飽和層可用水份，可由下列方程式表示：

$$E_{v_i} = \text{Min}[Cv_i \times PET_i, U_i + I_i - PC_i] \dots\dots(6)$$

覆蓋係數將隨土地利用方式的不同而不同。藉由此概念性模式，可以評估土地利用對水資源之衝擊。

#### 四、應用模擬退火法決定集水區平均雨量

本研究方法將應用於德基水庫與曾文水庫上游集水區。模擬退火法的參數有初始溫度 ( $T_i$ )、最終溫度 ( $T_f$ )、相同溫度下最大搜尋次數 ( $L_{max}$ )、降溫速度 ( $r$ )。根據此問題的尺度，期望搜尋初期接受較劣鄰近解機率在 80% 之上，而在搜尋末期接受機率設在 0.1%，根據模擬初始解目標函數值範圍，將初始溫度( $T_i$ )設為 68℃，最終溫度 ( $T_f$ ) 則設為 1℃，至於相同溫度下最大搜尋次數 ( $L_{max}$ ) 設為雨量站個數的 10 倍(Kirkpatrick et al., 1983)，降溫速度 ( $r$ ) 方面保持 0.8~1 之間(Kirkpatrick et al., 1984)，設為 0.9。集水區描述、流量模式參數設定、及分析結果說明如下。

##### 4.1 德基水庫集水區之應用

###### 4.1.1 大甲溪流域概況

大甲溪源流於中央山脈，位於台中縣境內，是為本省主要河川之一，北鄰大安溪，南鄰烏溪，東以中央山脈與立霧溪為界，西奔流注入台灣海峽，流域面積 1235.7 平方公里；本溪全長 140.2 公里。該流域上游為德基水庫集水區，此集水區在本研究中定義為松茂水文測站以上面積為 417.1 平方公里，集水區內之豐水季雨量佔年總雨量之 75% 以上。其主要地形皆為高山，高峰大部份均在 3400 公尺以上，沿河岸之稜線上高度約 2000 公尺左右，在海拔 2000 至 2200 公尺處，有頗為廣大呈縱順地形之河谷，溪流河谷



圖 4 大甲溪上游德基水庫集水區流域的雨量站

分為沖積扇、河岸台地等不同的地形。本集水區夏秋兩季因西南氣流及颱風常帶來豪雨，雨量充沛；其年平均溫度隨著標高之增加而遞減，低溫時期為 12 月至翌年 2 月，以 1 月份為最低，夏季 6 月至 8 月為最高溫期，尤以 7 月份為最高；其集水區之土地利用，大部分為林地，包括天然針葉林、天然闊葉林、混交林和造林地，佔集水區面積約 84.0% 左右，果園約佔 5.8% 左右，草地地約佔 5.6%，其它約佔 4.6% 左右。

本研究以松茂水文測站 1977~1994 年的溫度記錄為流量模擬模式(The GWLF Model)所需的溫度資料。雨量資料則利用集水區內 9 個雨量站，分別為環山站、志佳陽大山站、平岩山站、無名山站、桃山站、捫山站、松峰站、松茂站及梨山站的日雨量資料，以傳統徐昇氏法求其集水區的平均降雨量，提供模式所需要的日雨量資料。利用上述的溫度與雨量資料來模擬大甲溪上游德基水庫集水區之河川流量，並與松茂站 1977~1994 年之流量紀錄比較。流域與雨量站位置分佈如圖 4。在模式應用上必須考量逕流係數(CN)及覆蓋係數(CV)和退水係數(RG)，配合模擬退火法所需參數設定整理如表 1。

表 1 模擬退火法與 GWLF 在本實例所採用的參數

相關設定參數	德基水庫 集水區	曾文水庫 集水區
初始溫度 (Ti)	68	68
最終溫度 (Tf)	1	1
相同溫最大搜尋 次數(Lmax)	90	60
降溫速度 (r)	0.9	0.9
覆蓋係數 (CV)	1 (1月~12月)	1 (2月~12月) 0.96 (1月)
逕流係數 (CN)	61.7	71.5
退水係數 (RG)	0.053	0.061

#### 4.1.2 結果比較

由配合模擬退火法以前十年 (1972~1981) 溫度與雨量資料檢定雨量站權重;再分別以此最佳權重、徐昇式權重以及平均權重計算後十年 (1982~1991) 平均降雨量,然後比較模擬流量與實際流量,其結果分別如圖 5、圖 6、圖 7,其相關統計值如表 2,從結果可以看出三種方法所模擬出來的河川流量,其趨勢與實際流量相當的類似,不過三種方法都還是有每個月約 5cm 的誤差,其中以本研究採用之模擬退火法所模擬出的流量為最準確。但差異並不顯著,主要可能是不同雨量站記錄資料差異不大,因此不同權重之影響不大,參考表 3 可得徐昇氏法與模擬退火法所求得之各雨量站之權重係數;此外,本研究採用之模式為一團塊式模式(Lump Model),對空間分佈之反應可能亦不夠敏感。

#### 4.2 曾文水庫集水區之應用

本研究另外將研究流程應用於曾文水庫集水區之流量估計。取有雨量站與流量共同有效之資料期間 1989~1994 年共 6 年的水文及氣象資料。

##### 4.2.1 曾文河流域概況

曾文溪自北端兒玉山發源,由東北流向西南,於台南市之北,注入台灣海峽,全長 136.9 公里,面積約 1212 平方公里,曾文河流域包括了台南、嘉義及高雄三縣之新化、曾文、新營、新豐、北門、旗山等六區,流域內大部份為山區,

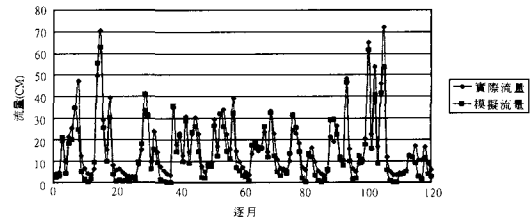


圖 5 平均權重模擬流量與實際流量比較-德基水庫集水區

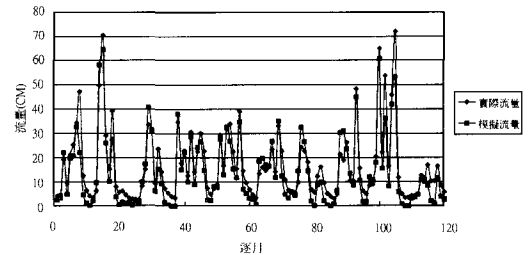


圖 6 徐昇氏法模擬流量與實際流量比較-德基水庫集水區

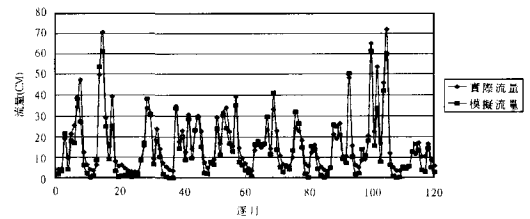


圖 7 模擬退火法模擬流量與實際流量比較-德基水庫集水區

約佔全面積之九成,其流域山地部份,緩坡地與急坡地交互起伏,然中游及下游則沿本溪溪岸有盆地性之平坦地。其流域的降雨情形,豐枯兩季相當的明顯,且地處台灣南部,降雨日數較少,約在 100 至 130 日之間,因冬季乾燥,鮮見降雨,故夏秋雨季,降雨量佔全年之大半,所以全年之 5~10 月為豐水期,11~次年 4 月為枯水期。流域內氣溫分佈情形,多為自上游至下游,漸漸呈現上昇趨勢,唯流域內因中游受益地地形影響、溫度反較下游為高,上、中、下游年平均氣溫分別約為 22.0°C、24.8°C、23.7°C。



表 2 各方法模擬的月流量與實際流量之比較

	Mean Square Error (cm/ month)			R-Squared		
	徐昇式法	平均權重	模擬退火法檢定權重	徐昇式法	平均權重	模擬退火法檢定權重
德基水庫集水區	5.71	5.48	5.26	0.88	0.88	0.90
曾文水庫集水區	9.00	8.42	5.70	0.96	0.96	0.97

表 3 各方法求得雨量站之權重係數

		環山站	梨山站	志佳陽山站	松茂站	平岩山站	桃山站	捫山站	無名山站	松峰站
德基水庫集水區	徐昇氏法	0.124	0.089	0.191	0.084	0.107	0.047	0.038	0.168	0.152
	模擬退火法	0.018	0.014	0.008	0.122	0.223	0.137	0.080	0.246	0.151
		曾文站	水山站	樂野站	里佳站	表湖站	馬頭山站			
曾文水庫集水區	徐昇氏法	0.070	0.107	0.131	0.268	0.171	0.254			
	模擬退火法	0.129	0.104	0.711	0.024	0.002	0.029			

曾文水庫集水區總面積約佔481平方公里，集水區內之土地利用大部份為林地，包括了針葉、闊葉、竹林等天然或人工林，約佔集水區面積之83.0%、草地約佔3.2%、果園約佔7.3%、其它為6.5%；其集水區內之土壤主要成份為粉土質細砂，平均土質粉土佔66%，黏土佔22%，砂9%，礫石3%；曾文水庫從民國62年興建完成開始運轉至今，在其集水區內，陸續設置了曾文、水山、樂野、里佳、表湖、馬頭山、龍美、三角南山以及大棟山等九個雨量測報站，其中，本研究採用了六個雨量資料較完整的測站(1975~1996)，如圖8，分別為曾文站、水山站、樂野站、里佳站、表湖站、馬頭山站，並且使用馬頭山站的日均溫資料。



圖 8 曾文溪上游曾文水庫集水區流域的雨量站

原址於水庫壩址的照興流量站之日流量資料(1963~1972)，做退水係數之率定，但是因為水庫集水區之流量測站無法繼續使用，所以本研究模式所需之流量資料是以水庫之水位變化反推之流量(1964~1994)；整理上述之集水區內各條件，配合模擬退火法之參數設定整理出參數表1。

#### 4.2.2 結果比較

本研究配合曾文水庫集水區內完整之歷史資料1989~1994年共6年，以前3年之資料代入

本研究模式中模擬，再將優化出的雨量站最佳控制面積權重代回模式且以6年的資料做檢定，然後與徐昇氏法和平均權重法做比較，其結果如圖9、圖10、圖11與表2，從結果可以看出來，本研究採用之模擬退火法模擬出之流量明顯地比其它兩種方法來的準確，再由圖可以看出來，在實際流量為高流量的時候，模擬退火法決定之權重能夠比較準確地模擬出與實際流量最接近之流量，參考表3可得徐昇氏法與模擬退火法所求得之各雨量站之權重係數。

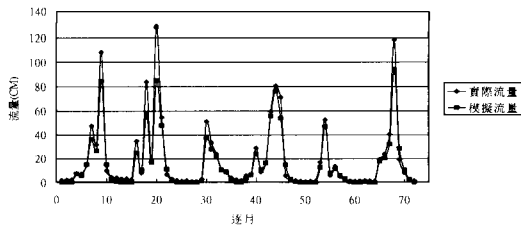


圖 9 平均權重模擬流量與實際流量比較-曾文水庫集水區

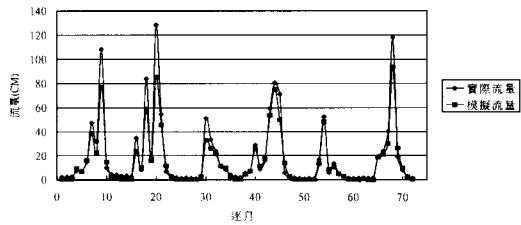


圖 10 徐昇氏法模擬流量與實際流量比較-曾文水庫集水區

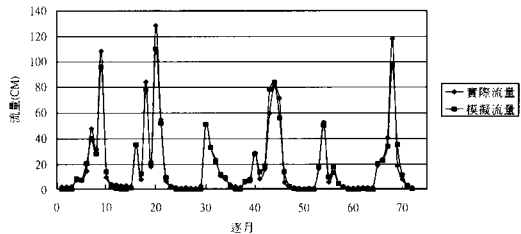


圖 11 模擬退火法模擬流量與實際流量比較-曾文水庫集水區

## 五、搜尋效能分析

上述之實例應用，模擬退火法確實能夠找到一組權重使得流量模擬結果比徐昇氏權重或是平均權重佳，但是否使用試誤法或其它優選的方法，例如亂數選取或是迭代改善法也能與模擬退火法擁有同樣的效能與效率，值得進一步探討。

此處所採用的亂數選取方法是以亂數隨機選取每一個解的組合，其解可以不規則地在可行解空間中跳動，以求所代入之解能夠平均地分配在可行解區域之中，不會落入任何一區域之中；而迭代改善法(Iterative Improvement)則是如同模

表 4 不同搜尋方法效能之比較

	模擬退火法	亂取選取法	迭代改善法
目標函數之平均值	343.11	348.96	352.11
目標函數之變異數	2.02	2.61	9.20

擬退火法，在搜尋鄰近解，但過程中，比較目標函數之優劣，其解只往較優之鄰近解移動，完全拒絕接受較劣之鄰近解，不同於模擬退火法有接受較劣解之機會以跳脫區域最佳解，所以其搜尋之結果將與初始解之選取有很大的關係。

比較之方式是以每一次亂數選取方法之初始解為三種方法之共同初始解，而搜尋鄰近解之個數則是以模擬退火法依參數設定所需要搜尋之點數(即 3600 點)為依據，以德基水庫集水區九個雨量站控制面積權重之優選問題為例，以三個不同的搜尋方法做了效能上的比較，分別給予五次初始解進行搜尋，其結果如表 4。分析結果顯示，以模擬退火法所求出之目標函數值幾乎在每一次求解過程中最佳解都能落在區域 (343.11) 附近，而亂數選取法以及迭代改善法每次找到的最佳解變異性較大，結果也較差，無法保證解的品質，所以模擬退火法不但擁有跳脫區域最佳解的能力，而且求解的效能也較優。

## 六、結論與建議

由結果來看，不論是德基水庫集水區或是曾文水庫集水區，以模擬退火法所得到的均方差都比傳統上的徐昇氏法和平均權重法來的小，不過一般來說，三種方法所得到的模擬流量都與實際流量的趨勢大致符合，主要可能是不同雨量站記錄資料差異不大，因此不同權重之影響不大；此外，本研究採用之流量模式為一團塊式模式(Lump Model)，對空間分佈之反應可能亦不夠敏感。

從物理上的觀點直接來說，徐昇式法假設以徐昇式法所劃分的各雨量站控制面積下，各面積內均勻降雨，或各面積內平均雨量為測站所測的雨量；平均權重則假設每一雨量站所控制的面積

相同，而本研究所採用之模擬退火法(Simulated Annealing)則是在其區域內之水文情形以及土地利用情形短時間內維持相當類似之條件，以現地資料決定出流量模擬模式最佳參數，在參數已無法再改善下，期望進一步以歷史資料配合流量模擬模式來優化雨量測站最佳之控制面積權重，提高流量模擬之準確性，若模式參數仍有改善空間，應以優化參數為先。其權重係數如表 3，從表 3 中可以看出模擬退火法所優化出之權重與徐昇氏權重不同之處，就德基水庫集區來說，雨量站之權重分配情形類似，而就曾文水庫集水區來說，明顯發現樂野站的權重較大，也就是樂野站雨量與集水區流量之關係較密切，但是否代表優選出之權重係數能夠反應出集水區地形意義，需進一步研究分析；得到權重之後，再代入之後的資料做檢定，結果顯示，此種優化方法可較合理預測流量。因模式參數誤差或不確定性被面積權重優化過程吸收，因此優選權重會因採用流量模式不同而不同。

本研究仍可進一步研究改善及應用於其它領域。例如模擬退火法中，相關的設定參數對於所求出的最優解有相當程度的影響，本次研究並未對於相關參數作敏感度分析，若能做進一步分析，將可獲得更佳之結果；在流量模擬模式方面，模擬退火法可以結合其它水文逕流模式來預測流量，並與 The GWLF Model 中團塊式流量模擬模式做比較；而在未來，期許能將本研究所採用之啟發性優化方法『模擬退火法』發展成一套裝之程式軟體，使其能夠依據問題所需的不同，簡單地輸入參數便能輕鬆運用，另外，期望將此方法配合其它模式解決優選問題，例如與類神經網路之結合，藉由模擬退火法跳脫區域最佳解之能力，再配合類神經網路之學習能力，更有效能地找到最適合之最佳解。

## 七、參考文獻

1. 周哲正，2000。模擬退火演算法在地下水參數分區與抽水率定之應用，國立臺灣大學農業工程學研究所碩士論文。
2. 童慶斌、洪念民、陳主惠，1999。氣候變遷對水資源影響評估與適應策略研擬，農業工程學報，第 45 卷第 4 期，第 73-90 頁。
3. 經濟部德基水庫集水區管理委員會，1996。德基水庫集水區數值地籍資料庫及遙測監測系統建立計畫報告書。
4. 經濟部水資源局，1999。德基水庫集水區第四期整體治理計畫水質監測與管理第二年。
5. 臺灣省曾文水庫工程局，1970。曾文水庫計畫地質報告彙編。
6. 謝金印，1996，曾文水庫管理局局誌，曾文水庫管理局。
7. Aarts, E.H.L. and P.J.M. van Laarhoven, 1985. Statistical cooling: A general approach to combinatorial optimization problems, *Philips J. Res.*, 40(4), 193-226,.
8. Dougherty, D. E., and R. A. Marryott, 1991. Optimal Groundwater Management 1. Simulated Annealing, *Water Resource. Res.*, 27(10), 2493-2508.
9. Fox, G., S.W. Otto, and E.A. Umland, 1986. Monte Carlo physics on a concurrent processor, *J.Stat.Phys.*, 43(5/6), 1209-1237.
10. Haith, D. A., Shoemaker, L. L., 1987. Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients. *Water Resources Bulletin*, 23(3), 471-478.
11. Huang, M.D., F. Romeo, and A. Sangiovanni-Vincentelli, 1986. An efficient general cooling schedule for simulated annealing, *IEEE Trans. Comput. Aided Design, CAD-5(1)*, 381-384.
12. Krickpatrick, S., C.D. Gelatt, and M.P. Vecchi, 1983. Optimization by simulated annealing, *Science*, 220(4598), 671-680.
13. Krickpatrick, S., 1984. Optimization by simulated annealing: Quantitative studies, *J. Stat. Phys.*, 34(5/6), 975-986.
14. Mayer, D.G. and J.A. Belward, K. Burrage, 1998. Tabu Search not an optimal choice for models of agricultural systems, *Agricultural Systems*, 58(2), 243-251.

15. Metropolis, N., A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, and E. Teller, 1953. Equation of state calculations by fast computing machines, J. Chem. Phys., 21(6), 1087-1092.
16. Mirosław MALEK, Mohan GURUSWAMY, Mihir PANDYA, 1989. Serial and parallel simulated annealing and tabu search algorithms for the traveling salesman problem, Annals of Operations Research, 21,59-84.
17. Ogrosky, H.O. and Mockus, V., 1964. Hydrology agricultural lands. In: Handbook of Applied Hydrology, V.T. Chow (Editor). McGraw-Hill, New York.

收稿日期：民國 89 年 10 月 26 日

修正日期：民國 89 年 11 月 18 日

接受日期：民國 89 年 11 月 24 日