

水筒模式應用於水稻梯田降雨－逕流之研究

Application of Tank Model on Terraced Paddy Field Rainfall-Runoff Research

國立中興大學
土木工程學系
教授

陳榮松*

Rong-song Chen

國立中興大學
土木工程學系
博士班研究生

楊國賢

Kuo-hsien Yang

國立中興大學
土木工程學系
博士班研究生

王國樑

Kuo-liang Wang

國立中興大學
土木工程學系
碩士

張濱傑

Yu-jie Chang

摘要

在水稻梯田之降雨－逕流模擬上，水筒模式與線性水庫能確實掌握流量模擬的變化趨勢，並結合參數自動率定法其參數率定方式更增效率及準確性。本研究利用水筒模式與線性水庫，分別對於水稻梯田來進行逕流模擬與參數分析之研究。擬以新竹縣新埔鎮大茅埔段之水稻梯田為試驗區，於試驗區之入流點及出流點處設置自記式水位計與雨量計，收集流量、雨量實測資料來進行模擬與探討。研究結果顯示水筒模式整體模擬均優於線性水庫。

關鍵詞：水稻梯田，水筒模式，線性水庫，逕流模擬，參數分析。

ABSTRACT

On a rainfall-runoff simulation of terraced paddy field, tank model and conceptual mode of linear reservoirs were applied to rainfall measurement in the simulation, and also automatic calibration method was used in the simulation to enhance its efficiency and accuracy. The research is to simulate the rainfall-runoff of a terraced paddy field by tank model, conceptual mode of linear reservoirs, and automatic calibration method. The terraced paddy field in Hsuing-Pu Hsiuing-Chu was selected to be our subjects. In this experimental field we arranged water-stage automatic recorders and automatic rain gauges at the entrance and the outlet of the flow to gather the data of rainfall in this region for rainfall-runoff simulation. The result showed that tank model surpassed conceptual model of linear reservoirs.

Keywords: Terraced Paddy Field, Tank Model, Conceptual model of linear reservoirs, Runoff simulation, Parameter analysis.

*通訊作者，國立中興大學土木工程學系教授，40227 台中市南區國光路 250 號，rschen@dragon.nchu.edu.tw

一、前言

近年來社會經濟活動快速成長與繁榮，農業用地逐漸被工商業用地取代。而由於台灣坡地面積佔全島之四分之三以上，及地形陡峻、地質破碎，因此早期為解決糧食不足的問題，除了在平原地區外，更在丘陵山谷等可資利用的地區廣為開闢梯田從事稻米的生產。

水稻梯田相較於一般坡地旱田，具有極佳的水土保育功能，例如蓄水調洪、水源涵養、土壤保全及防止土壤侵蝕等機能。水稻梯田的貯留效果不但可有效降低洪峰，亦可延遲洪峰到達的時刻。

梯田除了是世界的文化遺產，對於自然環境之保護如防止土壤侵蝕、洪水防治及地下水涵養等都具有公益功能；然而近年來，由於稻米的生產過剩及加入國際貿易組織的大環境影響下，水稻生產面臨相當大之減產壓力。尤其是梯田的部分，由於其水文、地形等先天條件的限制，原本就耕作不易且經營成本較高，再加上農村人口之老齡化、勞動力不足等後天條件的影響，常使水稻梯田有轉作、休耕甚至廢耕的傾向。有鑑於此，為深入探討水稻梯田對於環境與生態之貢獻，建立適用於水稻梯田地區之降雨-逕流模式，以掌握水稻梯田地區之逕流狀況及對環境的影響是首要且必須的工作。

關於降雨-逕流模式，自 Sherman [1932] 提出單位歷線理論，很多的降雨-逕流模式相繼出現。如 Clark [1945] 之時間-面積曲線 (Time-area curve method)，Nash [1957] 之線性水庫理論，將集水區比擬成連串之線性水庫，進而推導出伽瑪函數 (Gamma function) 及水庫常數 (Reservoir storage constant)，以及菅原氏 [1972] 提出之水筒模式 (Tank model) 等均是對於降雨事件模擬之水文模擬模式。

市川氏等 [1997] 組合計算短期洪水流出之低平地水筒模式與長期流出計算之複合水筒模式，提出新的水田模式，並將模式運用在木津川。其結果顯示，不論在長期之流出或短期之流出均可滿足重現性，唯在堤防越流時之河川尖峰

流量比實際值較小，而在灌溉期，河川流量有過大評估之傾向。佐藤氏等 [1998] 研究從水田而來的還原水的流出量，並探討水的有效利用問題。其結果發現對象流域在取水停止後的一日半的時間內還原水的流出會終止。還有灌溉期前後其水田的出流特性有不一致的現象，經判斷是因水田在插秧前有做整地翻土，而使得土壤的透水性改變造成的。早瀨氏 [1992] 以日本茨城縣里美村的梯田地區為例，為評估棄耕梯田調洪機能降低的程度，就流域的逕流量變化進行了模擬。

在參數最佳化方面，小林氏等 [1976] 等首次將 Powell 的共軛方向法導入水文學領域，將其應用於水筒模式之參數最佳化，把水筒模式參數的搜尋問題轉換成非線性函數的最小化問題，其成效良好。永井氏、角屋氏 [1979] [1980] 等，使用 Powell 法與 DFP 法 (共軛坡降法)，導入標準化的 SP 法，而提出 SDFP 法 (標準共軛坡降法)。近森氏等 [1979] 研究標準型水筒模式 SP (Standard Powell) 法決定法在實際運上的問題。在利用 SP (標準 Powell 法) 時必須要注意，會有局部最佳化的產生，所以必須要慎重的選用起始值，並檢視其結果是否符合物理性。Duan *et al.* [1992] [1994] 又提出類似 GA 之進化概念的全新最佳化搜索法的 SCE-UA 法 (Shuffled complex evolution method)，將其用在 13 個參數的概念雨水流出模式的參率定上，得到明顯的成效。田中氏 [1995] 並比較了 GA 法、GA 法與 Simplex 法的組合、GA 法與 Powell 法的組合、Multi-start Simplex 法、Multi-start Powell 法與 SCE-UA 法等全域最佳化法，發現其中以 Multi-start Powell 法與 SCE-UA 法在四段式水筒模式的 16 個參數率定上有極佳之效果。並將直接搜尋法之 Simplex 法與傾斜法之 Powell 法來比較二者對於水筒模式 16 個參數最佳化之性能，結果發現 Powell 法較 Simplex 法更有效率。陳榮松等 [2005] 以二全域自動化率定方法來對水筒模式之參數搜尋做一比較，一為 Multistart Powell 法，一為 SCE-UA 法。結果顯示兩種方法對於水筒模式 16 個參數之率定均有優越之搜尋能力，但在搜尋效率上以 SCE 法為優。

Dooge [1959]提出，其假設地表逕流歷程由線性水庫與線性渠道組合而成，每個水庫之不同輸入代表降雨具有空間分布之特性。王如意等 [2002]有關 Nash 模式參數之推求方法乃先行以動差法估算之，以作為參數優選法之起始值，進而再以洗牌複演進法 (Shuffled Complex Evolution algorithm, SCE) (Duan *et al.*, 1992, 1993, 1994; Sorooshian, 1993)，以求取整體最佳參數值。而並聯型分布線性串聯水庫概念模式則直接應用 SCE 參數優選法取得具物理意義之參數，以探討土地利用改變對水文效應之影響程度。Jasper A. Vrugt 等 [2006]將 SCE 法改良成為 SCEM-UA 法，利用平行分布式計算機系統的計算力量來解決三個複雜的專題研究，其平行參數估計結果與傳統連續優化方式作一比較，以提出理想的方法來解決複雜最佳化問題。

本研究於水稻梯田試驗區分別在流域入流點與出流點分別架設水文觀測站及雨量計，紀錄流量及雨量實測數據，並於現地調查包括田區之湛水深、田埂寬度與坡面垂直高度等地文特性，以建立模式分析所需之水文、地文參數資料。應用兩種不同參數自動化率定法分別套於水筒模式與線性水庫等兩種水文模式，在同一降雨期間分別就兩種不同之水文模式模擬並分析下游出流量之變化，並探討其差異性。

二、模式理論分析

2.1 水筒模式

水筒模式法係由前日本科學技術廳防災研究中心所長菅原氏於 1972 年所倡議之一種極具物理概念之水文模式。水筒模式概念是將流域之逕流機構，想像為數個互相聯結之貯蓄型容器(俗稱水筒, tank)，以容器本身具有明確之水量貯存與流動方向等特性，藉以描述自然集水區中錯綜複雜之水文現象。其示意圖如圖 1。假設降雨直接落在最上層水筒(第一段水筒)，則一部分雨水由出流孔流出一部分貯留於水筒內，剩下的水則由下方的滲漏孔入滲至下一段水筒。所以第二段水筒也是如此。當然水要從側流孔流出的話，雨量必須達到相當的高度才有可能從側流孔流出。

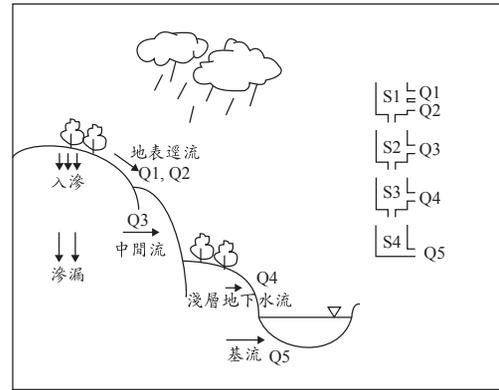


圖 1 水筒模式示意圖

由圖 1 中可知，各段的水筒都有其代表的物理意義，第一段水筒(Q1、Q2)代表流域地表逕流，第二段水筒(Q3)則代表流域中間流，第三段水筒(Q4)則代表流域的淺層地下水流，第四段水筒(Q5)則代表流域的基流。

菅原氏四段式水筒模式之構造簡單，且具有物理性，既可表現非線性，精度上也相當良好，因而被廣泛的使用於出流解析。而此模式最大之困難點在於模式的參數有 16 個之多，率定相當困難。以自動化參數率定法來對於水筒模式之參數進行探討，以求在逕流歷線模擬上得到良好的結果。

由於水筒模式具有單位歷線法、逕流函數法、貯蓄函數法等特點，易於使用且模擬效果良好，因此廣泛為各界所採用。其計算逕流量之方法與其特徵如下：

- (1) 初期損失及損失量，隨著降雨時間之經過所產生之變化現象自動地包含在模式中。(由最上段水筒之流出孔的高度與滲透孔可決定)。
- (2) 降雨增大時逕流亦加速增大之特性包含在模式中。(因最上段之水筒可含有數個流出孔)。
- (3) 降雨強度增大時，最上段水筒之貯蓄高會增加，河川流出量會變大，降雨強度變小時，則雨水大部份會滲透於下方之水筒，之後緩慢地流入河道。(利用單一個直列配置型之水筒模式)。
- (4) 各水筒之流出量各有固定之遞減曲線形態。如此，流出量可由數個具不同遞減性質之

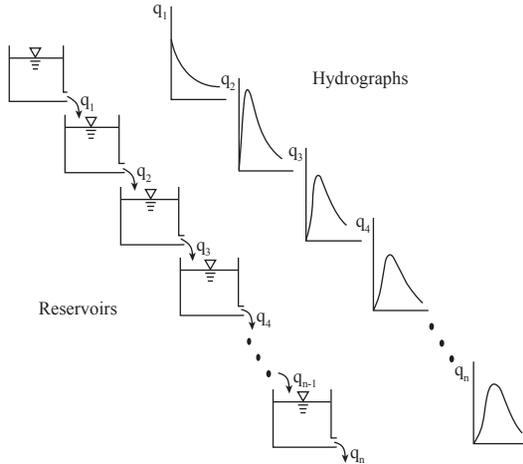


圖 2 線性水庫模式示意圖[易任·王如意]

逕流成分之和表示之。(利用數個直列配置型水筒之組合)。

- (5) 雨水經由水筒而移至下方水筒時，自動產生時間稽延(time lag)，故下方水筒之逕流成分自然產生時間稽延。(利用單一個直列配置型之水筒)
- (6) 具有單位歷線、逕流函數法、貯蓄函數法共同之特徵。
- (7) 逕流計算利用加、減、乘之運算即可。
- (8) 水筒模式之最大缺點在於模式中需決定之參數(各水筒之流出孔高度，孔乘係數，各水筒貯蓄高之初期值等)，需由試誤法(trial and error method)決定之。因此，模式參數之決定需要『經驗』與『靈感』，試誤法之計算次數一多，則需龐大之計算。
- (9) 無法表現洪水之傳播特性。河道流下距離較長之時，有必要設定河道之水筒模式，否則會影響演算精度。

2.2 線性水庫模式

線性水庫概念於 1957 年由那徐氏(Nash)實用化推廣，假想集水區由 n 個序列排成之線性水庫組成，水庫出流與蓄水量關係滿足 $S = KQ$ 之線性條件。設第一水庫瞬時間滿水，水流流入第二水庫，再流入第三、第四、……，第 n 個水庫。線性水庫模式其示意圖如圖 2。

此模式主要視雨量與逕流量之轉換有線性關係存在，屬於黑盒系統。將梯田集水區視為數個線性水庫之串聯，由其超滲降雨及直接逕流歷線分析求出該集水區之 Gamma 函數引數 N 與線性蓄水常數 K ，代入模式中模擬出流歷線。線性水庫模式中 Gamma 函數引數 N 與線性蓄水常數 K 乃利用動差定理求解。

2.3 參數自動化率定理論分析

2.3.1 MultiStart Powell 法

Powell 共軛方向法是對於非線性函數最小化相當優良之方法。其法為在所求之目標函數最佳值附近，可以正值 2 次形式近似表示之(永井明博、角屋睦，1979)，如(1)式。

$$f(x) = xT Ax + bTx + c \dots\dots\dots(1)$$

(其中 f 為目標函數， $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ (n 為參數數目)， A 為 $n \times n$ 的正定值行列， b 為常數向量(n 次元)， c 為一常數。)

正定值行列：若 n 行 n 列的對稱行列式 $A = AT$ 對任意不為 0 之向量 x ，存在著 $xT Ax > 0$ 則稱 A 為正定值行列。

若(1)式中正定值行列 A 與任意兩相異且不為 0 的向量 u 、 v 之間存在著 $uT Av = 0$ 關係式，則 u 、 v 關於 A 之間互為共軛方向。且 A 為正定值行列場合必存在著至少一組共軛的 n 個互為線性獨立向量。

Multi-start Powell 法主要為 Powell 共軛方向法之改良方法，以解決存在多個極小點問題，其主要根據局部探索法的 Powell 法，利用多次改變探索出發點，並以目標函數配合適當之限制條件與懲罰機制做為判斷基準，每一出發點皆可獲得一組解，其中目標函數最小者即為此次所求之最佳參數值(如圖 3 所示)。

2.3.2 洗牌複演算法(Shuffled Complex Evolution algorithm, 簡稱 SCE 法)

傳統的最佳化方法都有一個共同的弱點，就是會有局部最佳化的產生，這樣會對於多峰值的問題常會造成相當的困擾。因此，要解決這種多峰值問題，在參數優選時，搜尋的出發點(起始值)

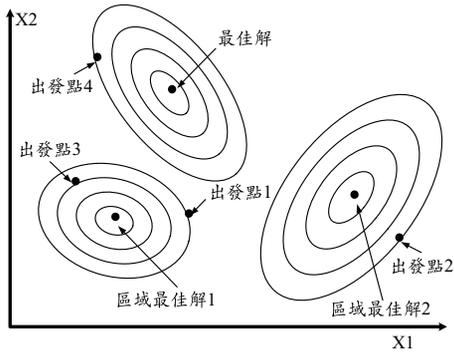


圖 3 Multi-start Powell Method 原理示意圖[田中丸治哉 1995]



圖 4 新竹縣新埔鎮大茅埔段試驗流域圖

必須要設得恰當，方可找到適合整體的最佳解，而不是找到區域最佳解。有鑑於此，自動化率定方法已引起相當的注意，而洗牌複演算法被證實為一有效且有效率的全球最佳化自動化方法。其參數搜尋程序如下：

1. 先決定 p 、 m 值， $p \geq 1$ 且 $m \geq n + 1$ ， p 為分組數， n 為問題之參數個數，所產生之樣本大小 $s = pm$ 。
2. 用均勻分佈法在可行空間 $\Omega \subset R^n$ ，產生樣本 X_1, X_2, \dots, X_s 等 s 點，並計算每一點 X_i 之函數值。
3. 將樣本點排序。將他們儲存在陣列

$$D = \{X_i, f_i, i = 1, 2, 3, \dots, s\}$$

因此 $i = 1$ 即為最小之函數值。

4. 分割 D 陣列為 p 個分組， A_1, A_2, \dots, A_p ，每一個分組包含 m 點，因此

$$A^k = \{X_j^k, f_j^k | X_j^k = X_{k+p(j-1)}, j = 1, 2, 3, \dots, m\}$$

5. 根據 CCE (Competitive Complex Evolution) 複合競爭演算法，推演每一個分組 A^k ， $k = 1, 2, 3, \dots, p$ 。
6. 混合分組點。將推演完後的 A_1, A_2, \dots, A_p 置回陣列中，因此

$$D = \{A^k, k = 1, 2, 3, \dots, p\}$$

再將 D 排序。

7. 檢查是否收斂。如果是則結束，否則退回步驟四。

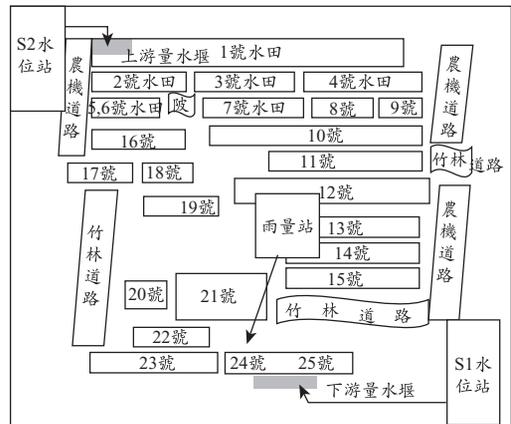


圖 5 試驗地水文站置示意圖

三、試驗流域概況

3.1 試驗區之地理環境概述

本研究試驗流域位於新竹縣新埔鎮大茅埔段(如圖 4 所示)，新埔鎮位居新竹縣的北方，東臨關西鎮，西接竹北市，南連芎林鄉，北與湖口鄉及桃園縣的龍潭鄉、楊梅鎮交界。地屬丘陵，山多平原少，中間有鳳山溪貫穿而過，沖積狹小平原，部落聚集匯集成街，總面積達七十二·五平方公里。

3.2 試驗區之水量測站與流量觀測方法

本研究試驗區位於新竹縣新埔鎮大茅埔段之坡地水稻梯田，在流域之上游入流點 S_2 站及下游出流點 S_1 站分別設置水量測站(如圖 5 所示)。水量測站包含導水管、水槽及自記式水位

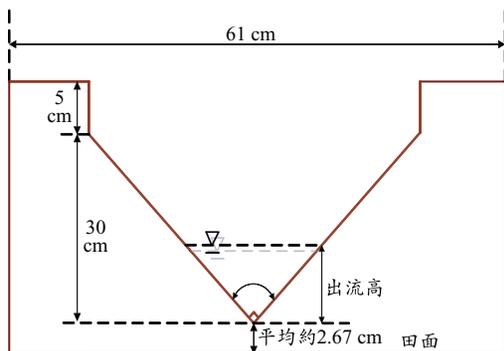


圖 6 出流水文站之尺寸示意圖

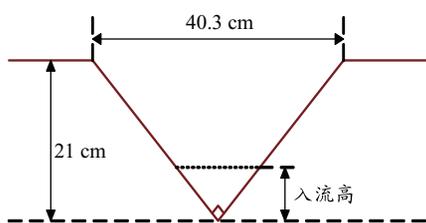


圖 7 入流水文站之尺寸示意圖

計，水槽之堰口為直角三角堰(如圖 6 及圖 7 所示)，換算流量公式使用沼知・黑川・淵澤[1942 (水理學)]公式(2 及 3 式)。

$$Q = Kh^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots (2)$$

其中

$$K = 1.354 + \frac{0.004}{h} + \left(0.14 + \frac{0.2}{\sqrt{D}}\right) \left(\frac{h}{B} - 0.09\right)^2 \dots (3)$$

適用範圍：

$$\begin{aligned} 0.5m \leq B \leq 1.2m, \quad 0.1m \leq D \leq 0.75m, \\ 0.07m \leq h \leq 0.26m \\ h \leq \frac{B}{3} \end{aligned}$$

四、模擬結果與討論

4.1 降雨事件資料

本研究共選用四場降雨事件，分別為 2004 年 7 月 2 日至 7 月 3 日降雨量為 107 mm (以下為降雨事件 A)與 7 月 18 日至 7 月 19 日降雨量為 83.5 mm (以下為降雨事件 B)此段期間適逢敏督

表 1 水文評鑑指標公式表

常用評鑑指標種類	評鑑指標方程式
均方根誤差 RMSE (Root mean squared error)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{N}}$
效率係數 CE (Coefficient of efficiency)	$CE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right]$
洪峰流量誤差百分比 EQp (Percent error of peak discharge)	$EQ_p (\%) = \frac{Q_{p(sim)} - Q_{p(obs)}}{Q_{p(obs)}} \times 100\%$
洪峰到達時刻誤差 ETp (Error of time to peak)	$ET_p = T_{sim} - T_{obs}$
逕流體積誤差百分比 EV (Percent error of total volume)	$EV (\%) = \frac{\sum_{t=1}^N Q_{sim} - \sum_{t=1}^N Q_{obs}}{\sum_{t=1}^N Q_{obs}} \times 100\%$

Q_{sim} ：模擬之流量(mm)； Q_{obs} ：觀測之流量(mm)； $Q_{p(obs)}$ ：觀測之洪峰流量(mm)； $Q_{p(sim)}$ ：模擬之洪峰流量(mm)； \bar{Q}_{obs} ：觀測流量之平均值(mm)； $T_{p(obs)}$ ：觀測之洪峰到達時間(分鐘)； $T_{p(sim)}$ ：預估之洪峰到達時間(分鐘)； N ：資料個數

利颱風過境，雨量充沛降雨強度大延時短，其西南氣流重創台灣，全台各地淹水災情 頻傳、山區土石流肆虐，造成極大的災害。另外兩場則是 2004 年 9 月 10 日至 9 月 14 日總降雨量為 586mm (以下為降雨事件 C)，及 2005 年 3 月 29 日降雨量為 47.5 mm (以下為降雨事件 D)。

4.2 模式之評鑑指標

為探討模式參數率定於試驗流域之適用性，須以不同之誤差指標進行水文模擬檢驗。現針對實測流量與模擬流量的關係做流量推估效能之評鑑，在本研究中採用統計及水文學上常用的五種指標(表 1)，藉此五種指標來評定各模式模擬之表現。

上述各指標中均方根誤差(RMSE)之值愈接近 0 時模式表現較佳。而洪峰誤差百分比(EQp)、總體積誤差百分比(EV)之值愈接近 0 時表示模式所推估之水文量愈準確。洪峰到達時刻(ETp)愈小則模式所推估之洪峰到達時刻愈佳。

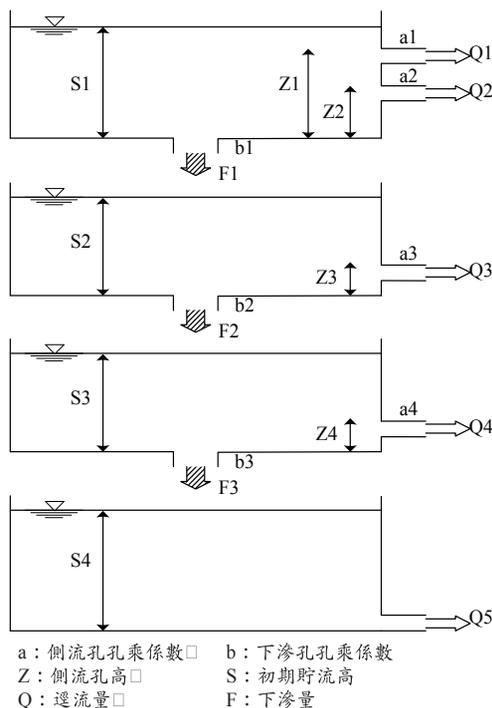


圖 8 水筒模式示意圖

當效率係數(CE)愈接近 1 時則表示模式對於模擬資料與觀測資料之歷線愈密合。

4.3 參數率定

4.3.1 水筒模式

降雨逕流模式選用對於水稻梯田適合性較佳之水筒模式，各段水筒之流出孔高度，孔乘係數，各水筒貯蓄高之初期值等，需經過多次假設之試誤計算，方能決定模式中各水筒之各流出孔口高度及其孔乘係數。在實際降雨場次中，由於錯綜複雜的水文現象與現地地文因子的差異下，並非每場降雨所率定出之參數均能達成收斂的一致性，各場次所率定出之參數也無法均能趨於一致。因此藉由 Multi-start Powell 法與 SCE 法等兩種參數自動化率定法分別對此四場降雨事件來率定水筒模式 16 個參數，以得出各 4 組參數值並由其中選擇以 RMSE 最小之各 1 組參數為代表，做為水筒模式率定之後的參數值以模擬驗證後 3 場之降雨-逕流資料，其中在 Multi-start Powell 法率定參數方面，參照圖 8，水筒模式中

表 2 水筒模式參數上下限值表(Multi-start Powell 法)

參數	單位	下限值	上限值
a1	-	0	1.0
a2	-	0	1.0
a3	-	0	1.0
a4	-	0	1.0
a5	-	0	1.0
b1	-	0	1.0
b2	-	0	1.0
b3	-	0	1.0
Z1	mm	110	150
Z2	mm	80	100
Z3	mm	0	100
Z4	mm	0	100
S1	mm	0	150
S2	mm	0	500
S3	mm	0	500
S4	mm	0	2000

表 3 Multi-start Powell、SCE 法率定參數表

參數	單位	Multi-start Powell	SCE
a1	-	0.4657	0.162
a2	-	0.4057	0.1
a3	-	0.3858	0.026
a4	-	0.0524	0.169
a5	-	0.00392	0.001
b1	-	0.0283	0.552
b2	-	0.0107	0.013
b3	-	0.0029	0.451
Z1	mm	131.08	125.259
Z2	mm	119.22	92.484
Z3	mm	6.6	23.252
Z4	mm	96.93	22.24
S1	mm	1.37	1.68
S2	mm	0	0.773
S3	mm	0.01	0.333
S4	mm	0.06	0.436

Z1 則可視為田埂高，一般約為 100 mm~200 mm 之間，Z2 視為田埂缺口流出高，一般為 0 mm~150 mm 之間；而經試驗地實地量測結果，田埂高 Z1 約為 110 mm~150 mm 之間，缺口高約為 80 mm~100 mm 之間，因此，將水筒模式之參數 Z1、Z2 上下限值範圍調整為現地量測結果做為水筒模式參數上下限值，以符實際，有關水筒模式參數上下限值如表 2 所示，以 Multi-start Powell 法與 SCE 法率定參數之結果如表 3 所示。

表 5 各場次之降雨-逕流模式模擬評估值

模式	圖號	降雨日期	總降雨量 (mm)	RMSE	CE	EQ _p (%)	ET _p (min)	EV (%)
1.	圖 9	2004-07-02	107	0.0009	0.951	5.1322	25	8.833
	圖 12	2004-07-18	83.5	0.0013	0.924	9.6396	15	18.537
	圖 15	2004-09-10	586	0.0016	0.908	-7.7586	20	-0.5252
	圖 18	2005-03-29	47.5	0.0009	0.941	-19.585	15	-12.784
	平均			0.0012	0.931	10.529*	18.75	10.17*
2.	圖 10	2004-07-02	107	0.0006	0.979	0.0307	25	5.5461
	圖 13	2004-07-18	83.5	0.0004	0.992	5.5235	5	-0.3996
	圖 16	2004-09-10	586	0.0017	0.896	-28.818	10	-17.879
	圖 19	2005-03-29	47.5	0.0009	0.938	-13.196	5	6.6366
	平均			0.0009	0.951	11.892*	11.25	7.6153*
3.	圖 11	2004-07-02	107	0.0013	0.894	-3.0563	15	26.733
	圖 14	2004-07-18	83.5	0.0013	0.923	15.132	5	44.136
	圖 17	2004-09-10	586	0.0018	0.887	11.071	15	-23.525
	圖 20	2005-03-29	47.5	0.0016	0.830	-12.936	5	-16.8
	平均			0.0015	0.883	10.549*	10	27.799*

註：模式 1：水筒模式結合 Multi-start Powell 法；模式 2：水筒模式結合 SCE 法；模式 3：線性水庫法
*為絕對值之平均

表 4 利用動差定理推求之線性蓄水常數 K 值與 Gamma 函數指數 N 值

降雨日期	線性蓄水常數 K 值	Gamma 函數指數 N 值
2004-07-02	0.063	14.899
2004-07-18	0.519	30.708
2004-09-10	2.453	26.891
2005-03-29	0.623	27.441

4.4 線性水庫模式

線性水庫模式中 Gamma 函數指數 N 與線性蓄水常數 K 係利用動差定理求解，其結果如表 4 所示。

4.5 水筒模式與線性水庫模擬結果比較

- (1) 事件 A (2004.7.2-3)：圖 9 至圖 11 所示。
- (2) 事件 B (2004.7.18-19)：圖 12 至圖 14 所示。
- (3) 事件 C (2004.9.10-14)：圖 15 至圖 17 所示。
- (4) 事件 D (2005.3.29)：圖 18 至圖 20 所示。

4.6 各模式模擬評估分析

從收集雨量、流量資料中，以四段式水筒模式與線性水庫模式進行降雨-逕流模擬，並以評估指標分別對四場降雨事件做評估，其評估結果

如表 5 所示；圖 9 至圖 20 則為各場次降雨模擬結果。

由表 5 可知，水筒模式之模擬結果，均方根誤差 RMSE 值最大為 0.0016、最小為 0.0009、平均為 0.0012，效率係數 CE 最小為 0.908、最大為 0.951、平均為 0.931，相對洪峰誤差 EQ_p 最大為 19.59%、最小為 5.13%、平均為 10.53%，而相對洪峰誤差時間 ET_p 最大為 25 分鐘、最小為 15 分鐘、平均為 18.75 分鐘，體積誤差 EV 則最大為 18.54%、最小為 0.53%、平均為 10.17%。

整體模擬效果相當不錯，唯尖峰誤差 ET_p 時間最大，但其他四種指標的平均皆屬上乘。

以 SCE 法率定參數模擬結果，均方根誤差 RMSE 值最大為 0.0017、最小為 0.0006、平均為 0.0009，效率係數 CE 最小為 0.896、最大為 0.992 平均為 0.951，相對洪峰誤差 EQ_p 最大為 28.82%、最小為 0.031%、平均為 11.9%，而相對洪峰誤差時間 ET_p 最大為 25 分鐘、最小為 5 分鐘、平均為 11.25 分鐘，體積誤差 EV 則最大為 17.88%、最小為 -0.4%、平均為 7.62%。

線性水庫模擬結果之均方根誤差 RMSE 值最大為 0.0018、最小為 0.0013、平均為 0.0015，效率係數 CE 最小為 0.83、最大為 0.923 平均為

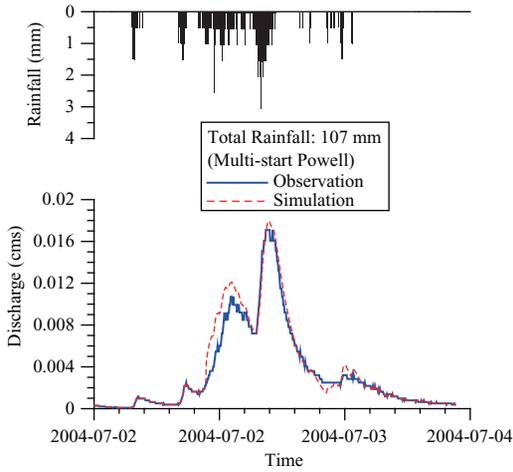


圖 9 水筒模式結合 Multi-start Powell 法之模擬成果

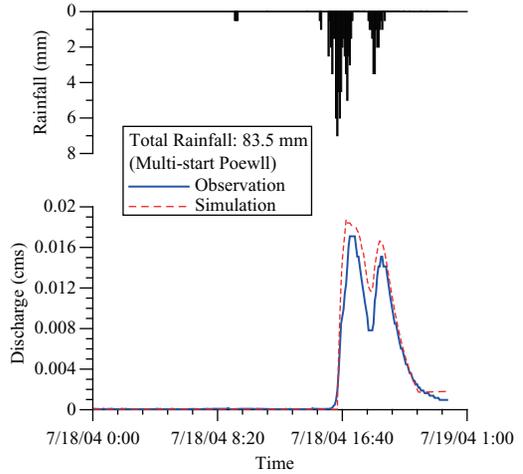


圖 12 水筒模式結合 Multi-start Powell 法之模擬成果

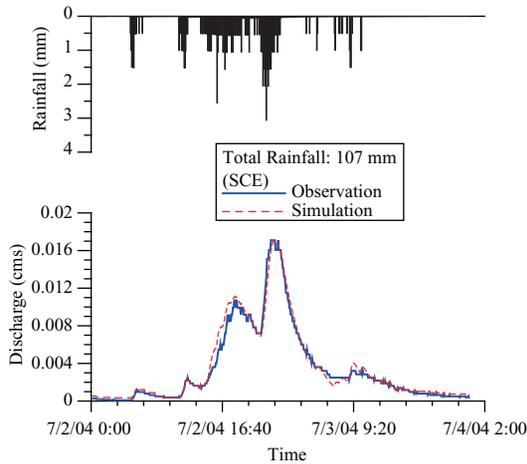


圖 10 水筒模式結合 SCE 法之模擬成果

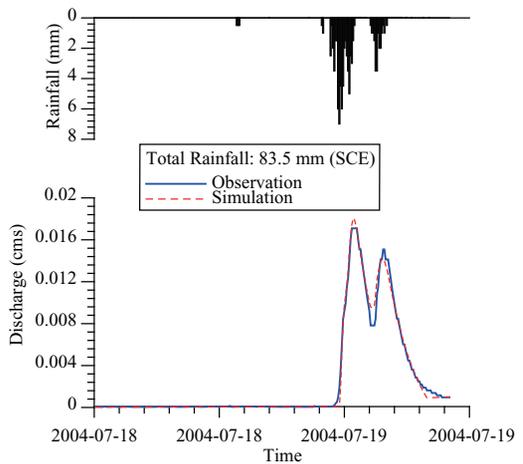


圖 13 水筒模式結合 SCE 法之模擬成果

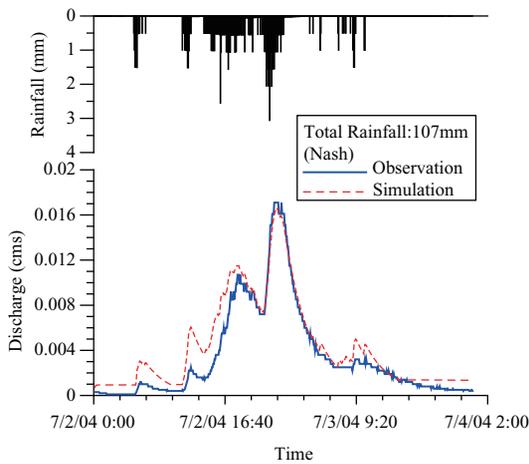


圖 11 線性水庫法模擬成果

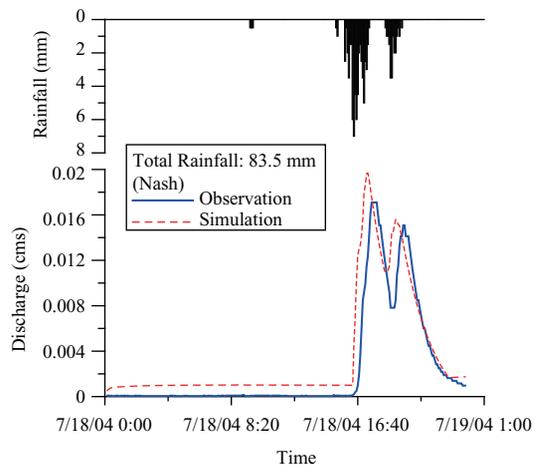


圖 14 線性水庫法模擬成果

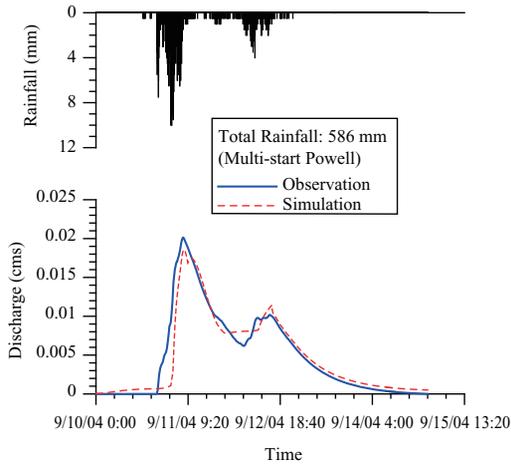


圖 15 水筒模式結合 Multi-start Powell 法之模擬成果

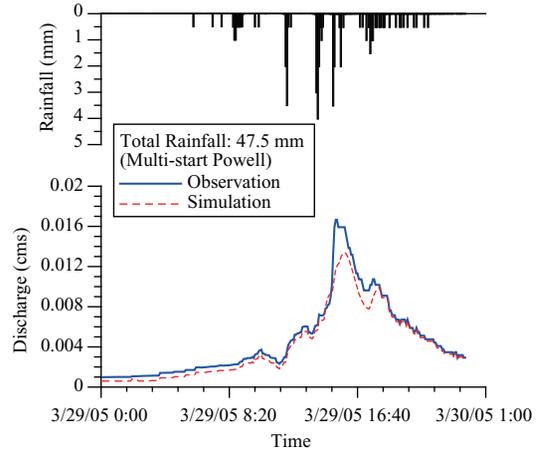


圖 18 水筒模式結合 Multi-start Powell 法之模擬成果

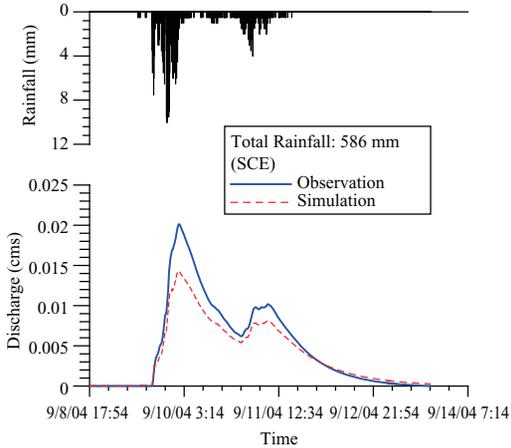


圖 16 水筒模式結合 SCE 法之模擬成果

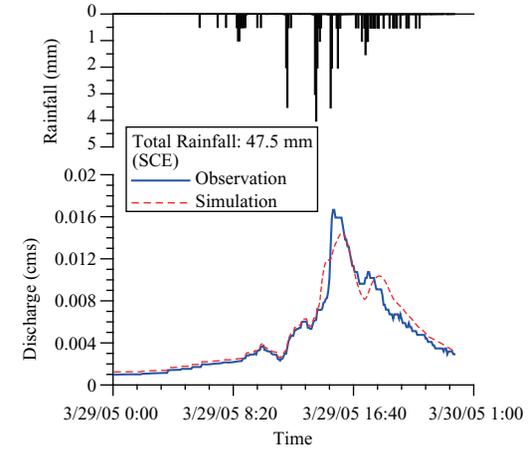


圖 19 水筒模式結合 SCE 法之模擬成果

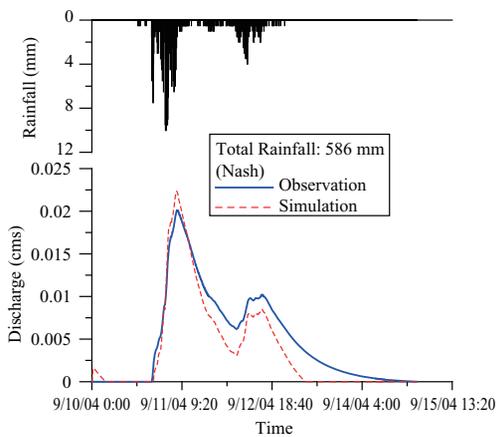


圖 17 線性水庫法模擬成果

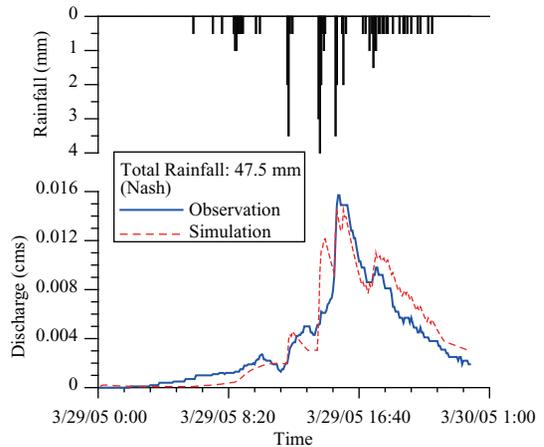


圖 20 線性水庫法模擬成果

0.883，相對洪峰誤差 EQp 最大為 15.13%、最小為 -3.06%、平均為 10.55%，而相對洪峰誤差時間 ETp 最大為 15 分鐘、最小為 5 分鐘、平均為 10 分鐘，體積誤差 EV 則最大為 44.14%、最小為 -16.8%、平均為 27.8%。

分析比較以上各水文模式之模擬結果，可看出水筒模式無論以 Multi-start Powell 法或 SCE 法來率定參數，整體模擬均優於線性水庫，能夠較準確的模擬出流量的變化，除了在洪峰誤差時間 ETp 之比較上，線性水庫之模擬結果優於水筒模式之模擬結果。兩種模式在尖峰流量的掌握上都有不錯的效果，在中低流量上的模擬，水筒模式則明顯較線性水庫更為精準。

4.7 討論

由研究模擬結果知，其造成差異的可能原因，主要可分為兩個部份來探討：

(1) 模式之適用性：水稻梯田地區本身屬於坡地水田，流域內有山地及梯田兩種地目，與一般平地水田、都市地區或是森林地區之地目均有差異，其流出機制也不盡相同，因此考慮山地與梯田部分之降雨-逕流模擬時，模式之架構不同，在描述集水區之水文現象時，線性水庫模式便有其不足以反映地表逕流過程中種種複雜的物理機制。

在水稻梯田區內，水筒模式這種極具物理概念之水文模式，考慮流域內複雜存在之水文因子，能將集水區系統之逕流機構，諸如入滲、滲漏、貯留、蒸發、地表逕流、中間流及基流等現象，藉以模擬流域內降雨-逕流之定率關係。雖參數眾多造成率定困難，若能獲得正確參數，在模擬效果上是相當不錯的。

線性水庫模式將水稻梯田視為數個線性水庫之串聯，由其超滲降雨及直接逕流歷線分析求出該流域之 Gamma 函數引數 N 與線性蓄水常數 K 以模擬出流歷線。基於累加原理及非時變原理之兩理想化假設，將實際集水區比擬為線性水庫或線性河渠，或時間-面積的關係圖，各具有不同之假設與理論根據。因此模式本身僅考慮 Gamma 函數引數 N 與線性蓄水

常數 K，較難涵蓋整個集水區之水文現象。

(2) 模式參數之準確性：水筒模式係屬參數型水文模式，其所需檢定的參數眾多，因此參數率定之優劣往往對於模擬精度有著決定性的影響。傳統水筒模式通常配合電腦運算而將之離散化，即於每個時間間距分別就當時貯蓄水量及該流出孔口係數，計算其逕流量。假設逕流量與貯蓄量呈線性關係，水筒模式以線性水庫法與水文連續方程式控制各筒中流出與蓄水量之關係。水筒模式逕流機制與自然集水區反應類似，足以解釋多種不同強度降雨所產生之逕流反應，反映地表逕流過程中種種複雜的物理機制。對於缺乏模式操作之經驗者來說，一組正確參數的求得，是相當困難的工作。藉由全域自動搜尋的 Multi-start Powell 法與 SCE 法來決定出流量之各參數，故使得模擬效果較為良好。

線性水庫模式僅有 Gamma 函數引數 N 與線性蓄水常數 K 值兩個參數，無論是蓄水常數相等或是蓄水常數不等之線性串聯水庫模式，均難代表集水區特性，應用本模式時需將雨量資料配合下游之實際出流量轉換為超滲降雨量，僅能就水文分析方面求取其入滲量，除增加了參數之不確定性外，由動差定理所率定出之 N 值與 K 值亦較難掌握其精確性，因此相較於水筒模式之多參數，線性水庫模式無法準確模擬出流量的變化。

五、結論

本研究之試驗地為新竹縣新埔鎮大茅埔段梯田區，蒐集此地水文、地文資料分別應用水筒模式與線性水庫模式模擬，獲得以下結論：

- (1) 水筒模式與線性水庫模式整體之模擬效果都相當不錯，在尖峰流量之模擬上兩者都有不錯的效果。
- (2) 水筒模式模擬地下水流以及中間流逕流機制之反應函數與真實集水區相似，足以解釋多種不同降雨強度所產生之逕流反應；而線性水庫本身僅考慮 Gamma 函數引數 N 與線性蓄水常數 K，較難涵蓋整個集水區之水文現象。

- (3)水筒模式無論以 Multi-start Powell 法或 SCE 法來率定參數，整體模擬均優於線性水庫，能夠較準確的模擬出流量的變化，除了在洪峰誤差時間 ET_p 之比較上，線性水庫之模擬結果優於水筒模式之模擬結果。兩種模式在尖峰流量的掌握上都有不錯的效果，在中低流量上的模擬，水筒模式則明顯較線性水庫更為精準。
- (4)水稻梯田的降雨-逕流模擬上，水筒模式僅需輸入降雨與地文參數等資料率定後，便可得到相當不錯的模擬結果，在眾多的降雨-逕流模式中，是值得推薦的好方法。

誌 謝

本研究部份成果承蒙行政院農業委員會(計畫編號：95 農科-4-1-1-利-b1(2))及經濟部水利署水利規劃試驗所(2002 年底)提供研究經費，謹致謝忱。

引用文獻

- 王如意，易任，應用水文學(上冊)(1992)，茂昌圖書，pp. 458-468。
- 王如意，易任，應用水文學(下冊)(1992)，茂昌圖書，pp. 51-52。
- 王如意，鄭士仁(2002)，降雨效應與土地利用改變對逕流特性之影響，台灣大學博士論文，pp. 1-10，pp. 31-38。
- 田中丸治哉(1995)，水筒模式參數的大區域探討，農業土木學會誌，第 178 號，pp. 503-512 (日文)。
- 早瀬吉雄(1992)，中山間地水田域之洪水防止機能評價，日本農業土木學會應用水文研究部會，應用水文，No. 4，pp. 81-89 (日文)。
- 永井明博、角屋 睦(1979)，「流出模式參數之最佳化手法」，京都大學防災研究所年報，第 22 號 B-2，pp. 209-224 (日文)。
- 小林慎太郎、丸山利輔(1976)，Powell 之共軛方向法於水筒模式參數探索之應用，農土論集 65，pp. 42-47 (日文)。
- 菅原正巳(1972)，流出解析法，共立出版株式社(日文)。
- 近森邦英、紙井泰典(1979)，「水筒模式最佳率定法之基礎檢討」，京都大學防災研究所年報，第 22 號 B-2，pp. 209-224 (日文)。
- 市川溫、佐藤康弘、立川康人、椎葉充晴(1997)，Development of the integrated paddy field element model which simulates long and short term runoff by using OHyMOS，水文·水資源學會誌，第 10 卷，第 6 號，pp. 557-570 (日文)。
- 佐藤政良(1998)，水田地域還原水之流出特性分析，農業土木學會誌，第 198 號，第 6 卷，第 6 號，pp. 87-93 (日文)。
- Clark, C.O. (1945), Storage and the unit hydrography. *Tran. ASCE*, 100(2261), pp. 1491-1446.
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K. (1994), Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *J. of Hydrology*, 158, pp. 265-284.
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K. (1993), Calibration of Rainfall-Runoff Models: Global Optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model, *Water Resources Research*, 29(4), pp. 1185-1194.
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K. (1992), Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 1015-1031.
- Dooge, J.C.I. (1959), A General Theory of The Unit Hydrograph, *Journal of Geophysical Research*, 64(1), pp. 241-256.
- Jasper A. Vrugt, Breannan O. Nallainb, Bruce A. Robinsona, Willem Bouten, Stefan C. Dekker, Peter M.A. Sloot, Application of parallel computing to stochastic parameter estimation in environmental models, *Computers & Geosciences* 32, pp. 1139-1155.
- Nash, J.E. (1957), The from of instantaneous unit hydrograph, *Inti. Assos. Sci. Hydrology*, 45(3), pp. 114-121.
- Rong-Song Chen, Lan-Chieh Pi and Cheng-Cheng

Hsieh (2005), Application of Parameter Optimization Method for Calibrating Tank Model, Journal of the American Water Resources Association, Vol. 41, No. 2, pp. 389-402.

20. Sherman, L.K. (1932), Streamflow from Rainfall by The Unit-Graph Method, Engineering News Record, 108, pp. 501-505.

21. Sorooshian, S., Duan, Q. and Gupta, V.K. (1993),

Calibration of Rainfall-Runoff Models: Global Optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model, Water Resources Research, 29(4), pp. 1185-1194.

收稿日期：民國 97 年 11 月 26 日

修正日期：民國 98 年 3 月 4 日

接受日期：民國 98 年 4 月 13 日