

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計劃七：集集地震對烏溪流域降雨-逕流過程影響之研究

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-002-044-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：林國峰

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 92 年 11 月 6 日

## 中文摘要

本年度為集集地震對烏溪流域降雨逕流過程影響計畫第二年。本研究提出以具時變性之克利金法計算流域平均雨量及以多目標遺傳演算法自動檢定模式參數的方法。本年度應用所提出的方法，推估烏溪流域實際颱風事件的流域平均雨量，並探討烏溪流域的降雨逕流過程的特性及差異。研究結果顯示烏溪流域的降雨逕流過程在地震前後確實存在相當顯著的差異。其所造成的影響不僅使得地震後的總逕流體積增加亦使得洪峰到達時間提前。本研究的成果可供各研究及水利工程單位改善烏溪流域降雨逕流模擬之用

**關鍵詞：**集集地震、降雨—逕流過程、多目標遺傳演算法

## Abstract

This study is the second year's work of a two-year project. In the project, the influence of Chi-chi earthquake on rainfall-runoff process in Wu-creek Watershed is studied. In this study, a time-varying kriging was proposed to estimate the basin average precipitation and a multi-objective model parameters auto-calibration method was developed. Then these methods are used to estimate the basin average precipitation and to analyze the characteristics and the differences of the rainfall-runoff process in Wu-creek watershed before and after the Chi-Chi earthquake. The result shows that there are significant differences of the rainfall-runoff process in Wu-creek watershed before and after the Chi-Chi earthquake. Not only the total volume of the runoff increases but also the time to peak is advanced. The research centers and hydrological engineering departments can also use the achievement of this study to improve the simulation the rainfall-runoff process in Wu-creek watershed.

Keywords: Chi-Chi earthquake, rainfall-runoff process, multi-objective genetic algorithm

## 一、前言

民國 88 年 9 月 21 日凌晨 1 時 47 分，在北緯 23.85 度、東經 120.81 度，亦即在南投日月潭西方 12 公里附近，發生芮氏規模 7.3 的強烈大地震，震源深度為地表下 7.5 公里。本次地震起因於車籠埔斷層的活動，造成長約 105 公里的地表斷裂或錯動。由於斷層的錯動，造成地表的劇烈的變動，由 GPS 衛星控制點的位移情形可知地表變動的情形：在水平位移方面，位於車籠埔斷層東側點位均向西北方移位，較大的位移量位置分別為：東勢-8.5 公尺、大虎山-5.0 公尺；斷層西側點位均向東南方向位移，最大位移量之點位為：豐原地政事務所-0.95 公尺。在垂直位移方面，於斷層東側約 15 公里範圍內均為隆起，最大隆起量點位為大虎山-3.2 公尺，斷層東側約 15 公里範圍外均為下陷，下陷量最大者為鹿角山-0.77 公尺；斷層西側點則普遍下降，最大下陷量之點位為大尖山-0.68 公尺。

水文現象與當地自然環境息息相關，環境之變遷均會影響該地區的水文現象。各種防洪排水及水資源利用設施的設計與興建均有賴於水文現象的分析。然而集集大地震後，因為地表的變動產生了大規模的崩山、走山、地層下陷及隆起的地形改變，不僅改變原有集水區的分水嶺，崩塌的土石塊，亦造成了河川流路的改變，流域的形狀、面積、地表植被覆蓋也隨之改變，對於地形地貌之改變可謂相當劇烈，對於水文現象的影響勢必非常明顯。其中，對於降雨—逕流的型態，例如洪峰流量、稽延時間、集流時間、洪峰到達時間等，更是影響甚鉅。因此，實有必要對地震後之降雨—逕流過程加以研究。

降雨—逕流模式的不確定性來自於輸入的不確定性 模式本身的不確定性以及二者的交互作用（王俊明，1999），而降雨為降雨—逕流過程的輸入，模式是真實環境的簡化模擬，會

隨因地震而改變的水文環境而變化，想要了解因地震造成對降雨—逕流過程的影響，則須先掌握降雨的不確定性，才能將降雨及模式本身的不確定性分離，以便單獨研究地震所造成之影響。本研究在去年已對烏溪流域的降雨情況加以分析，並擇定了具時變性的克利金法估算流域平均雨量，因此本年度之研究沿用去年之方法估算流域平均雨量。而在參數檢定方面，則應用去年的研究所獲得自動化模式參數優選方法檢定地震後的模式參數並與地震前之模式進行比較。

## 二、文獻回顧

區域化變數理論(Matheron, 1971)被廣泛的應用於地下水、礦冶及水文領域的研究中；最早被應用在南非的採礦工程中以瞭解礦藏於空間中的分佈情形(Journel and Huijbergets, 1978)，後續如 Chua and Bras (1982)對於雨量之半變異圖在不同的地形及高程所產生的變化加以探討。Bastin (1984)發現半變異圖的二個參數—門檻值(sill)及影響距離(range)—影響距離與雨量站分佈位置有關，不隨時間變化；門檻值則具有時變性，並應用於流域即時平均降雨量的估計以及雨量站網的最佳化。鄭士仁(1993)應用克利金法於流域內任一點之降雨深度之估計及雨量站網之規劃模式。劉清源與鄭克聲(1995)將空間距離代換為時間距離來使用克利金法於乾旱臨前時距預測之應用。克利金法具有最佳線性不偏估 (Best linear unbiased estimator, BLUE) 的特性；最佳表估計誤差變異數為最小、線性表示資料的序率歷程可疊加、不偏估表估計誤差的期望值為零，其主要目的為研究資料在空間中的分佈特性，再依據此特性來推估空間中無觀測資料但需要的資料數值。

水筒模式法(tank model)乃由日本科學技術廳菅原正已所倡議之水文模式(菅原正已, 1985)，屬於灰盒水文模式。其概念乃是將流域之逕流機構，置換為由數個貯留型模型容器所組成。首先考慮流域內複雜存在之水文因子，諸如入滲、滲漏、貯留、蒸發、地表逕流、中間流及基流等現象，再以數個相連接的貯留型之模型容器加以類比，藉以模擬流域內降雨 - 逕流之定率關係的模念型之水文模式。水筒模式具有單位歷線法(unit hydrograph method)、逕流函數(runoff function method)、貯蓄函數法(storage function method)等共同特點。

參數檢定之複雜性一般隨著參數的個數增加而增大。只有少數參數的模式也許尚可採用最小平方誤差法反覆作圖求得參數。但超過五個參數的模式則必須使用更系統化的方法或自動檢定策略(Liong et al., 2001)。自動化檢定策略便紛紛依適當的簡化和假設而發展。自動化檢定策略比試誤法優於二點：一是計算快速且工作幾乎全由電腦負擔，二是不會因判斷者的主觀認定受影響。(Refsgaard and Storm, 1996)。近來的檢定策略更是朝同時滿足多個目標函數的方向邁進。在解決僅有一個目標函數的問題時可以發現，隨著目標函數的不同便會得到不相同的參數組合，故此時目標函數的選擇極為重要且敏感。且吾人做決策時實際上面臨的是往往是許多相衝突的目標，故多目標函數的最佳化(multiobjective optimization)比單一個目標函數之檢定更貼近實用。處理多目標最佳化的問題又可以稱作柏拉圖優選(Pareto optimality)，而此類問題的解則稱作柏拉圖解(Steuer, 1986)。改善其中某一目標結果常會使另一目標結果變差，通常不存在單一組解可以同時滿足所有目標函數的最佳解，而是得到一群解的集合。多目標最佳化的重點之一就是找出儘可能多的柏拉圖解以求得柏拉圖解集合的交換曲線(trade-off curve)供決策者參考(Loughlin and Ranjithan, 1997)。

遺傳演算法為一由觀察自然界中生物演化特性而得啟發之演算法。因其具有分散式、平行搜尋的特性，且一次的演算就可以產生多組解，故十分適合應用於多目標最佳化的問題，以此求出柏拉圖解集合的交換曲線。此法由 John Holland 於 1960 開始發展，截至目前 GA 已被廣泛應用於各學科領域，像是與類神經網路的結合、設定類神經網路之權重(Dolan and Dyer, 1985; Ackley et al., 1985)，工程設計與自動控制(Petty et al., 1987)等等。Goldberg and Kuo (1987)首先將遺傳演算法應用於水資源方面，處理管線最佳化問題。Wang (1991) 以遺傳演算

法率定降雨逕流模式中的參數，另外於水庫操作、地下水問題在國內外之相關應用不勝枚舉，顯示 GAs 在水資源方面的應用亦有許多發展性。而對 GAs 本身參數的討探之研究，以及針對處理多目標最佳化的改良版本也不斷被提出，如 Horn et al. (1993)的 NPGA (niched Pareto genetic algorithm), Lis and Eiben (1997)的 MSGA (multi-sexual genetic algorithm)等等，顯示 GAs 的搜尋能力已被廣為認同，並具有強大的擴充性。

### 三、研究方法

#### 1. 流域平均雨量

流域平均雨量不僅是空間的隨機變數亦是時間的序率歷程 因此本研究採用具時變性之區塊克利金法(block kriging)計算流域平均雨量。

$$m(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P(x_i, t) \quad (1)$$

$$s^2(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P(x_i, t) - m(t)]^2 \quad (2)$$

$$\gamma_d(h_{ij}) = \frac{1}{2t} \sum_{k=1}^t \left\{ \left[ \frac{P(k, x_i) - P(k, x_j)}{s(k)} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

而實際的半變異圖為

$$\gamma(h_{ij}, t) = s^2(t) w_0 \gamma_d(h_{ij}, a) \quad (4)$$

區塊克利金系統如下所示：

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j(t) \gamma(t, h_{ij}) + \mu(t) = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \gamma(t, z_i, \zeta) d\zeta \quad i = 1 \wedge n \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i(t) = 1 \quad (6)$$

其中  $\frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \gamma(t, z_i, \zeta) d\zeta \cong \frac{1}{M} \sum \gamma(t, z_i, z_{n+j})$ 、 $t$  為時間、 $\mu(t)$  為 Lagrange multiplier、 $n$  為紀錄站

個數、 $M$  為網格點數。

而流域平均雨量估計值為：

$$\bar{P}(t) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(t) P_i(t) \quad (7)$$

估計誤差變異數：

$$\sigma_E^2(t) = \mu(t) + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \lambda_i(t) \gamma(t, z_i, z_{n+j}) - \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \gamma(t, z_{n+i}, z_{n+j}) \quad (8)$$

#### 2. 水筒模式

本研究選用以三個水筒組合(如圖 1)的水筒模式，以表現降雨逕流機制。第一及第二水筒代表地表及中間層，各有三個開孔，各筒上兩個孔口之出流分別為地表逕流及地表下逕流，最下方孔口之出流分別為入滲及滲漏。由於若水筒內貯留高度未到達開孔高度  $h_l$  時，祇有滲透量產生而不可能有流出量，故此  $h_l$  之高度即表示初期損失或土壤濕度不足，所降雨水為土壤所

吸收。此種水筒常被使用於第一或第二水筒較多，因為降雨時間短而強度大之降雨容易造成地表逕流，而時間長但強度小的降雨可能只增加其滲透量，以及土壤濕度，而不會產生地表逕流。而第三水筒則代表地下含水層，有兩個開孔，右方孔口之出流代表地下水逕流，最下方之孔口則表示第三水筒之深層滲漏。圖中  $h_{ij}$ 、 $C_{jk}$  分別代表第  $j$  個水筒、第  $k$  個孔口之孔口高度及孔口係數，而  $y_j$  則為各水筒之初始水深。

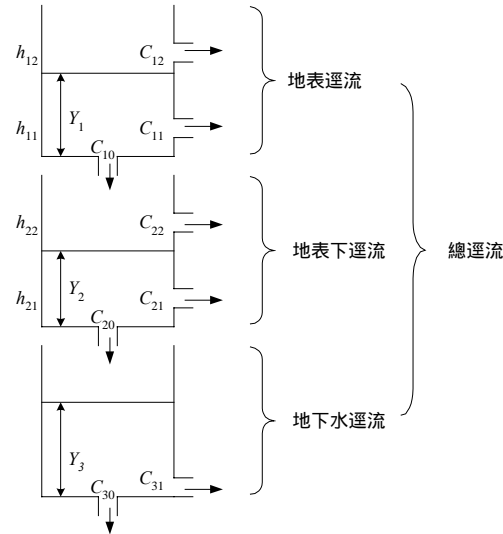


圖 1 本研究採用之水筒模式架構

### 3.多目標遺傳演算法

遺傳演算法的基本概念是根據達爾文的進化論學說「物競天擇，適者生存」(survival of the fittest)而來。針對某一環境適應問題，生物體內的基因便已潛在地保有此一問題的「解」。而此解尚未產生，是因為它分散地存在許多個體當中，只有不同的基因重新組合才能得到適合的解。即使母代未具有可以適應環境的特性，但在一代接一代交配/基因的複製重組後，優勝劣敗的結果，最後其子代終能得到「良好的」基因型。在應用裡，一段段的基因代表了每一單獨的參數，而將所有基因相連成串即成一條染色體，也就是說，一條染色體就代表了一組我們所欲優選參數的集合。而遺傳演算法因為具有分散式、平行搜尋的特性，故相當適合應用於多目標最佳化的問題。遺傳演算法流程圖如圖 2 所示。Fleming (1995)提出的 MOGA，使用新排序策略，方法是先計算出比某一點非顯著的點數，再將點數加 1 即為該點的編號數(rank)，接著線性給定每一編號群的適合度值，故編號數相同，便會得到相同的適合度。因為在遺傳演算法多次的演算之後有時會失去群體的多樣性（即基因偏移），使得柏拉圖解集合之交換平面無法求得 (Goldberg, 1989)。故必須引入 Niche 的觀念。所謂的 niche 是一種模仿自然界中“物以類聚”的分群概念。Cavichino (1970)率先引入了基於預選擇(preselection)機制的 Niche，De Jong (1975)一般化了 Cavichino 的預選擇機制，而提出以排擠(crowding)為基礎的 niche。Goldberg and Richardson (1987)則是定義了共享函數(shareness function)用來確定個體與群體內的其他個體之間的共享度，並且提出以適合度共享 fitness sharing 為基礎的 niche。

在做降雨逕流檢定時一般常必須滿足以下幾點之良好吻合：(1)觀測逕流量與模擬逕流量總逕流體積，(2)總體觀測歷線與模擬歷線之形狀特徵，(3)觀測值與模擬值在洪峰流量之到達時間及洪峰值。本研究使用三個目標函數以求符合觀測流量之特徵，分述如下：

(1)總逕流體積誤差(water balance error)

$$F_1(\theta) = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_{obs,i} - Q_{sim,i}(\theta)] \right| \quad (9)$$

(2)均方根誤差估計值

$$F_2(\theta) = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_{obs,i} - Q_{sim,i}(\theta)]^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

(3)尖峰流量絕對誤差

$$F_3(\theta) = |Q_{sim}^{peak} - Q_{obs}^{peak}| \quad (11)$$



圖 2 遺傳演算法流程圖

#### 四、烏溪流域概況

烏溪位於本省中部，發源於中央山脈合歡山西麓，以流域面積既為本省第四大河川。流域範圍東以中央山脈為界，北鄰大甲河流域，西鄰台灣海峽，南鄰濁水溪；東西長約 84 公里，南北寬約 52 公里，略似桐葉狀。主要水系分為北港溪、南港溪、眉溪、烏溪本流、貓羅溪、大里溪、筏子溪；上游為北港溪、南港溪河流而成，北港流域較大，流量較豐，故一般均以北港溪為幹流；全流域面積約 2026 平方公里，幹流長度 119 公里，河床平均坡度為 1/100。

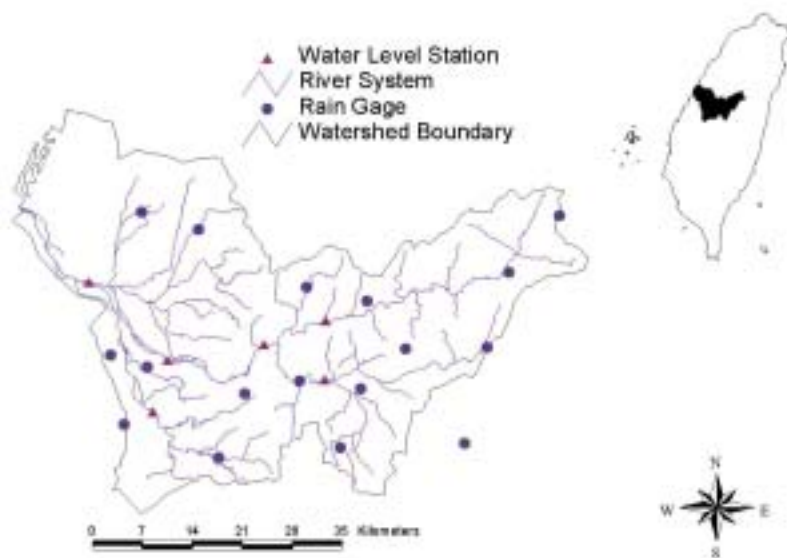


圖 3 烏溪流域示意圖

## 五、地震前後降雨逕流過程之變化

模式檢定之結果如圖 4及圖 5所示。其中瑞伯颱風為地震前之事件而納莉颱風則為地震後之事件。由圖 5可知本研究提出隻模式及模式的檢定方法所得到的結果可良好的運用在多峰的逕流事件中。本研究分別將檢定瑞伯颱風及納莉颱風所得的模式視為地震前及地震後之降雨逕流的機制。比較的做法是將地震前的降雨輸入檢定地震後所得模式之中，再將得到的逕流歷線與地震前真實的逕流歷線相較。若地震前後之降雨逕流過程並無顯著的變化，則模擬得到的逕流歷線與真實逕流歷線並不會有顯著的差異。反之，則地震前後之降雨逕流過程具有顯著的變化。由表 1可知若將地震前之降雨輸入地震後之模式，所得的模擬結果在體積誤差呈現上升的狀態，洪峰流量則呈現少許之差異，而洪峰到達時間呈現提早的趨勢，約提前 2.67 個小時。因此地震後的降雨逕流過程確實與地震前的降雨逕流過程具有相當大的差異性。

## 六、結論

降雨—逕流模式輸出的不確定性來自於輸入的不確定性。模式本身的不確定性和這二者間的交互作用。集集地震對烏溪流域的水文環境造成了重大的改變，這樣的改變會反映在降雨—逕流模式本身的參數上。若要了解集集地震對烏溪流域的降雨—逕流過程造成的影響，則必須先掌握該流域降雨的特性，如此才能針對地震所造成的影響與降雨之不確定性分離。因此本研究利用區域化變數理論的方法，不僅將降雨視為是時間上的序率過程，更是空間中的序率過程，因此本研究在流域平均雨量的計算上採取具時變性的克利金法來計算，以符合實際之降雨現象。此外本研究以去年所發展的多目標遺傳演算法優選水筒模式的參數，進而建立地震前及地震後烏溪流域之降雨逕流模式，根據該模式，本研究同時亦比較了地震前後烏溪流域之降雨逕流過程的差異性。證據顯示，在地震後烏溪流域的降雨逕流過程在總逕流體積方面呈現較地震前大的趨勢，洪峰流量則呈現些微的變化而洪峰到達時間較地震前則顯著的提前約 3 個小時。因此可以斷言，烏溪流域的降雨逕流過程在地震前後確實存在極大的差異。而造成變化的原因是因為地震所造成的地形、地貌抑或是地表下地層的改變則有待更進一步的研究。

綜合來說，本研究提出了以時變性克利金法推估流域平均雨量及以多目標遺傳演算法優選水筒模式參數的方法進行烏溪流域降雨逕流過程的分析。所得到的成果可供國內外各研究及工程單位所使用，以改善烏溪流域降雨逕流的模擬結果。

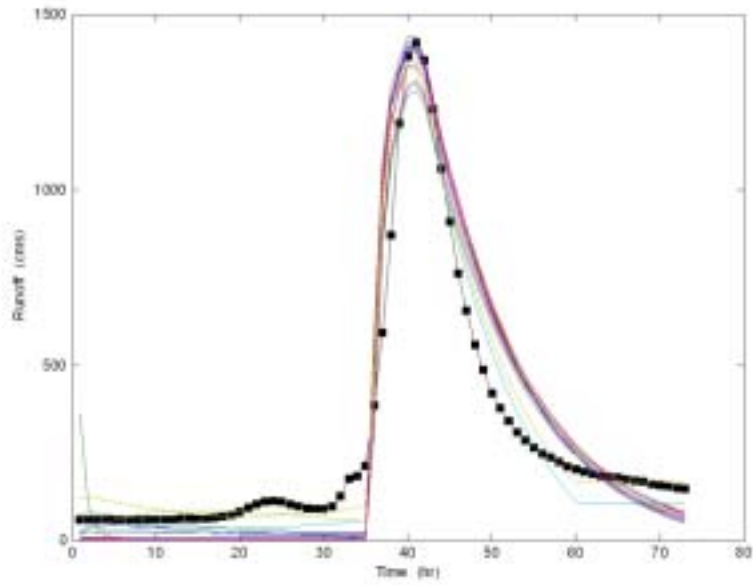


圖 4 瑞伯颱風模式參數檢定後之模擬結果(圖中方形為觀測值,實線為檢定所得參數之模擬值)

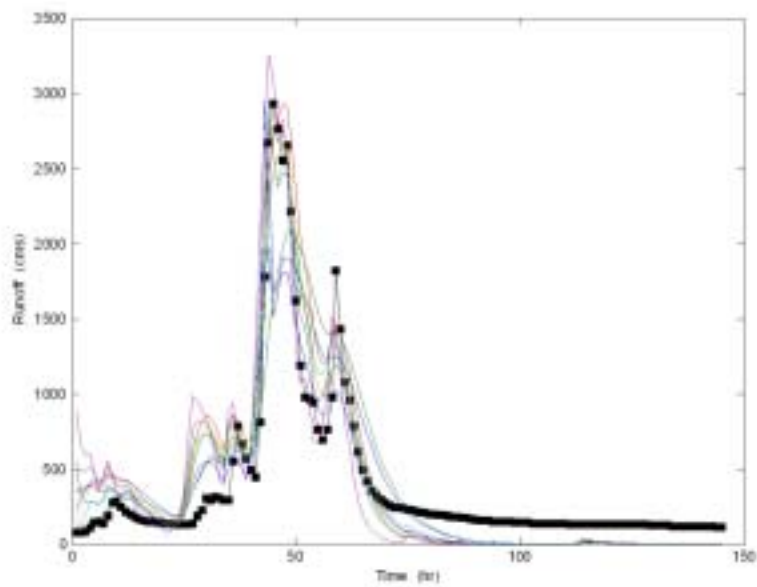


圖 5 納莉颱風模式參數檢定後之模擬結果(圖中方形為觀測值,實線為檢定所得參數之模擬值)



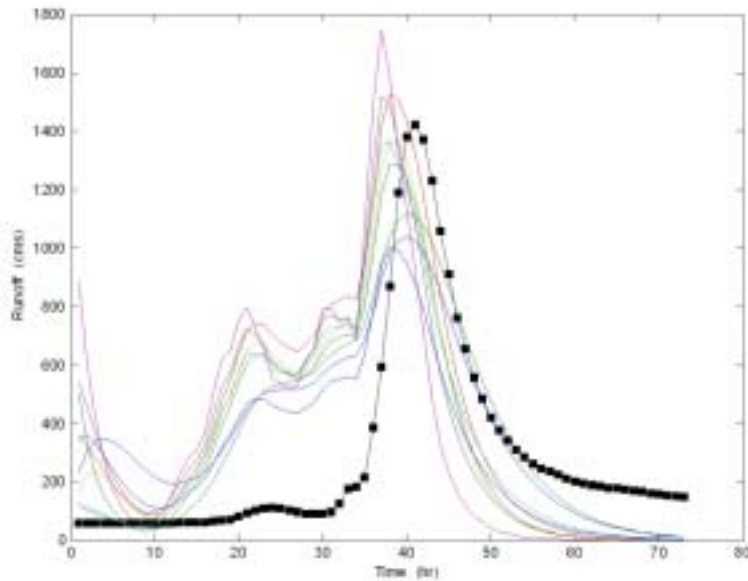


圖 6 以震後納莉颱風檢定所得模式模擬震前瑞伯颱風之結果 ( 圖中方形為觀測值，實線為模擬值 )

表 1 以震後納莉颱風檢定所得模式模擬震前瑞伯颱風之比較

|      | 體積誤差<br>(%) | 洪峰流量誤差<br>(%) | 洪峰到達時間誤差<br>(hr) |
|------|-------------|---------------|------------------|
| 平均值  | 28.84       | -6.36         | -2.67            |
| 標準偏差 | 10.72       | 246.95        | 1.12             |

## 七、參考文獻

- Ackley, D.H., Hinton, G.E., and Sejnowski, T.J., "A Learning Algorithm for Boltzmann Machines," *Cognitive Science*, 9, 147-169, 1985.
- Bastin, G., Lorent, B., Duque, C. and Gevers, M., "Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gage locations," *Water Resources Research*, 20(4), 463-470, 1984.
- Cavicchino, D.J., "Adaptive Search Using Simulated Evolution," Doctoral Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Mich., 1970.
- Chua, S.H. and Bras, R.L., "Optimal Estimations of mean areal precipitation in regions of orographic influence," *Journal of Hydrology*, 57, 23-48, 1982.
- De Jong, K.A., "An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems," PhD dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Mich., 1975.
- Dolan, C., and Dyer, M.G., "Learning planning heuristics through observation," *Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence*. University of California, Los Angeles, CA., 1985.
- Fonseca, C.M., and Fleming, P.J., "Multi-objective optimization," *Handbook of evolutionary computation*, IOP Publishing Ltd. and Oxford University Press, New York, 1995.
- Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA., 412 pp., 1989.
- Goldberg, D.E., and Kuo, C.H., "Genetic algorithms in pipeline optimization," *Journal of*

- Computing in Civil Engineering*, ASCE, 1(2), 128-141, 1987.
- Goldberg, D.E., and Richardson, J., "Genetic Algorithms with Sharing for Multimodal Function Optimization," *Genetic Algorithms and Their Applications, Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 41-49, 1987.
- Haupt, Randy, L., and Haupt, S.E., *Practical Genetic Algorithms*, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- Horn, J., and Nafploitis, N., "Multi-objective optimization using the niched Pareto genetic algorithm," IlliGAL Rep. 93005, Genetic Algorithms Lab., University of Illinois, Urbana-Champaign, Ill., 1993.
- Journel, A.G. and Huijbergets, C.J., *Mining Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 1978.
- Liong, S.Y., Khu, S.T., and Chan, W.T., Derivation of Pareto Front with Genetic Algorithm and Neural Network. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(1), 52-61, 2001,
- Lis, J. and Eiben, A.E., "A Multisexual Genetic Algorithm for Multicriteria optimization," *Proceedings of the Fourth IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Indianapolis, IN., 1997.
- Loughlin, D.H. and Ranjithan S., "The Neighborhood Constraint Method: A Genetic Algorithm-Based Multiobjective Optimization Technique," *Proceedings of the 7th International Conference on Genetic Algorithms*, ed. Thomas Back, East Lansing, Michigan, pp. 666- 673, 1997.
- Matheron, G., "The theory of regionalized variables and its applications," Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique, Ecole des Mines, Fountainbleau, France, 1971.
- Petty, C.B., Leuze, M.R, and Grefenstette, J.J., "A parallel genetic algorithm," *Proceedings of the 2nd International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 155-161, 1987.
- Refsgaard, J.C. and Storm, B., "Construction, calibration and validation of hydrological models," *Distributed hydrological modelling*, M. B. Abbott and J. C. Refsgaard, eds., Klumer Publications, Dordrecht, Boston, pp. 41-54, 1996.
- Richardson, J.T., Palmer, M.R., Liepins, G., and Hilliard, M., "Some guidelines for genetic algorithms with penalty functions," *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Genetic Algorithms*, J. D. Schaffer, ed., Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Mateo, Calif., pp. 191-197, 1989.
- Schaffer, J.D., "Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms," PhD dissertation, Vanderbilt University, Nashville, Tenn., 1984.
- Smith, R.E., Forrest, S., and Perelson, A.S., "Searching for diverse, cooperative populations with genetic algorithms." TCGA Rep. No. 92002, Dept. of Engrg., Mech., University of Alabama, Tuscaloosa, Ala., 1992.
- Sorooshian, S., and Dracup, J.A., "Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: correlated and heteroscedastic error cases," *Water Resources Research*, 19(1), 251-259, 1980.
- Srinivas, N., and Deb, K., "Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms," *Evolutionary Computation*, 2(3), 221-248, 1995.
- Steuer, R.E., *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- Wang, Q.J., "The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models," *Water Resources Research*, 27(9), 2467-2471, 1991.
- 王俊明, 「降雨空間變異性對降雨—逕流模擬的影響」, 國立台灣大學碩士論文, 1999。
- 江得榮, 「逕流預報模式回饋演算之研究」, 國立台灣大學碩士論文, 2001。
- 劉清源, 鄭克聲, 「區域化變數理論於乾旱臨前時距預測之應用。臺灣水利」, 43(2), 75-84, 1995。
- 鄭士仁, 「降雨深度最佳估計方法之研究及其應用於區域雨量站網之規劃設計」, 國立臺灣大學碩士論文, 1993。
- 菅原正已, 「水文水櫃模式分析技術研習會講義」, 國立臺灣大學土木工程學研究所, 1985。