



三角形不規則網格之分布型降雨—逕流模式

Distributed Rainfall-Runoff Model Based on Triangulated Irregular Networks

國立台灣大學農業工程學研究所
教授兼水工試驗所研究員

王如意

Ru-yih Wang

國立台灣大學農業工程學研究所
博士班研究生

王鵬瑞

Peng-jui Wang

國立台灣大學農業工程學研究所碩士

蔡宜樺

Yi-hua Tsai

國立台灣大學農業工程學研究所碩士

洪君伯

Chun-po Hung

摘要

本文係建立一種可真實反應集水區地形結構及分布逕流歷程等特性之分布型降雨—逕流模式，冀以提供本省中、上游集水區水文規劃設計之應用。

本研究採用三角形不規則網格(Triangulated Irregular Networks, TIN)數值地形模式，將集水區劃分為若干小分區，提供降雨—逕流模式所需之分布型地文參數。然而，眾多三角網格所構成之坡地元件實隱藏著複雜多變之漫地流流路，形成降雨—逕流模式建立之一大難題。研究中嘗試保留原始漫地流流路，輔以電腦程式自動化建構模式所需之地文資料，期以更有效率且精確之方法解決此一水文應用上之瓶頸。

文中首先利用地理資訊系統套裝軟體(ARC/INFO)建立具研究區域地形變化代表性之點圖層(VIP)以及該集水區之河川網路與邊界兩圖層，透過此三種圖層建構代表該區域地形變化之三角形不規則網格；其次，藉由三角形不規則網格彼此之位向關係建立一組資料儲存格式，以便將集水區中所有劃分的小分區予以串接，進而建立三角網格之上下游關係；再者，以運動波理論為基礎，配合三角網格之各種地文資料，進行漫地流與河渠流之有限差分演算，求得集水區出口之逕流量；最後，嘗試以最佳參數平均值法、整體最佳參數優選法及模糊規劃參數優選法等方式進行模式之參數優選，並評估此三種參數優選方法之可行性。

為探討本研究中所建立三角形不規則網格分布型降雨—逕流模式之合適性，本文應用淡水河系中大漢溪流域之橫溪上游集水區九場颱風事件，分別以上述三種參數優選方法所得之最佳參數代入模式中進行模擬，均獲致令人滿意之結果，故研究中所提出之參數優選概念應屬可行。本模式可推廣用於推估中上游集水區颱風事件逕流之分布歷程，提供台灣坡地集水區防洪規劃治理時之參考應用。

關鍵詞：三角形不規則網格，重要點圖層，模糊規劃參數優選法。

ABSTRACT

The objective of this study is to establish and evaluate a distributed rainfall-runoff model based on triangulated irregular networks (TIN). Because of reflecting real terrain as a distributed runoff process, this model should be able to provide a better application for rainfall-runoff simulation of hillslope watersheds.

The triangulated irregular networks digital terrain model (TIN-DTM) is used to divide the project watershed and provides topographic data, which the model needs in the topographic analysis system. When developing a distributed rainfall-runoff model with the TIN-DTM, the most difficult problem is that there are too many overland flow paths to calculate. Therefore, this study suggests that the original overland flow paths should be reserved, and uses FORTRAN programs to set up an available configuration of topographic data automatically. It provides a more accurate and efficient way to solve this problem.

To establish a distributed rainfall-runoff model with TIN-DTM, there are two major processes. First, ARC/INFO software of Geographic Information System is used to create three kinds of coverage: stream networks coverage, boundary coverage and very important point (VIP) coverage to represent the topographic variation of a river basin. The TIN of the project area can be established by using these coverages. Each triangle in the TIN-DTM is depicted by three sets of data catalog, which are used to specify water flow direction and connect every triangle according to their topographic relations. Second, the kinematic wave model with finite-difference approximations is used to calculate the overland and channel flow of the river basin.

The parameters of this model are determined by three parameter optimization methods. That includes the mean of every optimum parameter, the optimum parameters of total examining events and the fuzzy programming parameter optimization, respectively. The second and the third methods have a new concept of the parameter optimization: all examining issues are regarded as a unity. The feasibility of these three optimization methods is assessed in order to examine their applicability in this model.

The model as well as the parameter optimization methods established in this study is applied to Heng-Chi upstream watershed, a tributary of Tanshui River Basin, and the simulation results are very satisfactory. Therefore, the concept of parameter optimizations suggested in this study is adequate and practical. This model, moreover, provides a new approach to flood forecast and management of hillside watersheds in Taiwan.

Keywords: Triangulated irregular networks (TIN), Very important point coverage, Fuzzy programming parameter optimization method.

一、緒論

(一) 研究動機與方法

眾所周知集水區之水文現象具有空間變異之特性，然而一般降雨—逕流模式常將集水區視為集塊系統(lumped system)，忽略水文現象於空間分布不均之特性；而分布型降雨—逕流模式除了能提供模擬水文現象之空間變異特性外，且較集塊系統更能反應集水區內部變化對逕流之影響。因此，發展一具有分析地形空間變化特性及逕流模擬功能之分布型模式，將有助於進一步評估集水區中、上游由於土地開發利用所造成之水文效應。

本研究中於地形模擬上係採用三角形不規則網格(Triangulated Irregular Networks, TIN)數值地形模式方法，以代表地形主要特徵變化之節點將集水區劃分為若干小分區，提供降雨—逕流模式所需之分布型地文參數。然而，眾多三角網格所構成之地表坡度元件實際上隱藏著複雜且多變之漫地流流路，此為建立降雨—逕流模式前必須加以思考及解決之一大問題。本研究嘗試保留漫地流之原始流路，基於網格坡向即為漫地流流向，以及網格中漫地流流路相互平行且不交錯等假設，輔以電腦程式自動化建構分布型降雨—逕流模式所需之地文資料，期以更有效率且精確之方法解決此一水文應用上之瓶頸。

研究中，首先利用地理資訊系統套裝軟體(ARC/INFO)建立代表研究區域地形變化之三角形不規則網格；其次，藉由網格彼此之位向關係建立一組資料儲存格式，將集水區中所有小分區予以串接；再者，以運動波理論為基礎配合三角網格之各種地文資料，進行漫地流與河渠流之有限差分計算，求得集水區出口逕流量；最後，嘗試以最佳參數平均值法、整體最佳參數優選法及模糊規劃參數優選法等三種優選方式進行模式之參數優選，比較其間之差異，並以淡水河系中大漢溪支流內橫溪上游集水區之颱風事件從事模式適用性之檢定與驗證。

(二) 文獻回顧

分布型模式之理論頗為複雜，初期發展大多僅侷限於考慮單一水文歷程之模式，當然也有少部份考慮相互影響之水文現象，如 Jonch(1979)所發展之 SHE 模式(Système Hydrologique Européen Model)，Morris(1980)亦提出 IHDM 模式(Institute of Hydrology Distributed Model)。

近來由於電腦計算能力增強以及數值地形模式(DTM)之廣泛應用，分布型降雨—逕流模式之研究愈趨熱絡，且成果也相當豐碩，此時所發展之分布模式大多以規則網格與三角形不規則網格等兩種數值地形模式為主。

就規則網格式之分布型降雨—逕流模式為例，有 Muzik(1996)以計算每一規則網格之逕流時間，建立任一時刻集水區面積與出口之流量關係，推求集水區之分布型單位歷線(distributed unit hydrograph)，並以此單位歷線模擬集水區出口之逕流量；Kuchment 等人(1996)提出一兼具漫地流、河渠流、壤中流、未飽和土壤層中水體垂直傳輸以及地表蒸發等功能之模式；Yu 與 Jeng(1997)於模式中採用荷頓式(Horton)處理集水區之入滲量，並以水文方程式配合線性與非線性蓄水函數透過有限差分法計算地表逕流之水文歷程等。

至於三角形不規則網格之分布型降雨—逕流模式雖較少，但仍有 Palacios 與 Cuevas(1992)所發展之 SHIFT (Sistema Hidrológico de Facetas Triangulares) 分布型模式，模式中輸入土壤與河床特性分布等資料，提供運動波推求逕流時所需之地文資料；Tachikawa 等人(1996)以三角形不規則網格劃分地形，再以三次曲線函數模擬單一漫地流流路之三角網格，以運動波模式進行地表及地表下逕流演算。

二、三角形不規則網格相關理論

(一) Delaunay 三角網格

所謂 Delaunay 三角網格即三角網格中任意三角形之外接圓上僅涵蓋此三角形之三頂點，其餘點均位於此外接圓外。基於縮短電腦計算時間與網格視覺展示效果等考量，Delaunay 三角網格已被認定為最佳選擇，且廣泛應用於電腦程式設

計上(Lee and Schachter, 1980)。圖 1 即為 Delaunay 三角網格示意圖。

(二) 三角網格坡向理論

所謂坡向乃指水滴落於斜板上任意位置後所流動之方向。在三角形不規則網格所儲存之資料中，坡向資料將用來決定漫地流之流向，其乃根據最陡坡降之概念進行推求。茲說明如下 (Palacios and Cuevas, 1986)：

假設空間中有一直線 OM ，如圖 2 所示，且定義：

$$y = ax + b \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$z = cx + d \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中 a 、 b 、 c 及 d 為待定係數，可以座標計算而得。今擬連接空間中之一點 P 於直線 OM 上，使 P 點至直線 OM 之坡降為最大或最小，假設交點為 M 點，則 \overline{PM} 之坡降為：

$$s = \frac{z - w}{D} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$D = \sqrt{(x - u)^2 + (y - v)^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中， z ： M 點之高程；
 w ： P 點之高程；
 D ： \overline{PM} 投影於 XY 平面之線段長度。

將(1)式、(2)式代入(3)式中，並對 x 作微分且令微分式為零，即 $\frac{ds}{dx} = 0$ ，則整理可得：

$$x^* = \frac{x_0^2 + (y_0 - v)^2 - x_1 x_0}{x_0 - x_1} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中， $x_0 = \frac{u + a(v - b)}{1 + a^2}$ ；

$$y_0 = ax_0 + b$$

$$x_1 = \frac{w - d}{c} \circ$$

將 x^* 代入(1)式及(2)式中，可得：

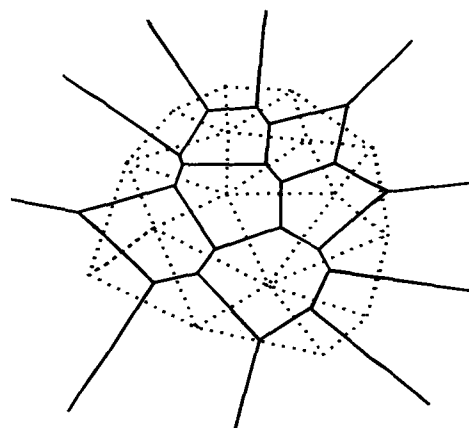


圖 1 Delaunay 三角網格示意圖 (摘自 Lee and Schachter, 1980)

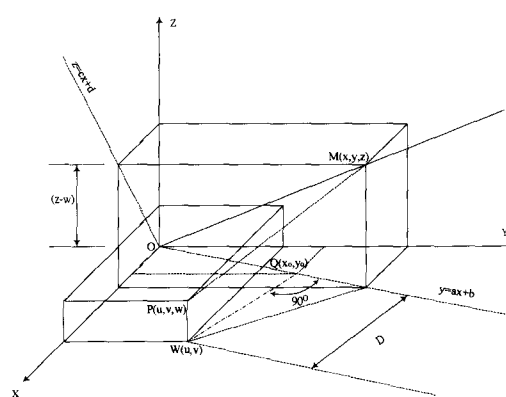


圖 2 三角網格坡向理論示意圖 (摘自 Palacios and Cuevas, 1986)

$$y^* = ax^* + b = a \left[\frac{x_0^2 + (y_0 - v)^2 - x_1 x_0}{x_0 - x_1} \right] + b \quad \dots\dots(6)$$

$$z^* = cx^* + d = c \left[\frac{x_0^2 + (y_0 - v)^2 - x_1 x_0}{x_0 - x_1} \right] + d \quad \dots\dots(7)$$

同時將 x^* 、 y^* 及 z^* 代入(3)式中，即可得最陡坡降為：

$$s = \frac{z^* - w}{D} = \frac{z^* - w}{\sqrt{(x^* - u)^2 + (y^* - v)^2}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

此時， s 即為吾人所擬推求之坡向，其正負號依計算結果而定。故經由上述程序，空間中任一三角網格之坡向均可予以求出。

三、模式建立

本研究所建立之分布型降雨—逕流模式主要包括如下兩大子模式：其一為可將 DEM 資料轉換成具有模擬地形主要變化特徵之三角形不規則網格數值地形模式，此模式可提供降雨—逕流模式所需之地文參數分布資料；其二為描述降雨與逕流關係之運動波模式，此模式除必須對研究區域內所有三角元件進行串接組合外，亦包含漫地流與河渠流之匯流演算。

(一) 三角形不規則網格數值地形模式

1. 三角形不規則網格之建構

建構三角形不規則網格(以下簡稱 TIN)之過程中包含了研究區域內之節點選取及連接節點成三角形兩個程序。在選擇節點部份，研究中將採用 VIP 圖層法，決定研究區域最具代表性之地貌節點；至於節點連結方式則為建構 TIN 之關鍵步驟，因為不同連結方式會造成不同之地貌，為避免節點連接時造成地形之嚴重錯誤，故加入研究區域之河川網路與邊界兩圖層，使 TIN 更能符合實際地形。

具備 VIP 圖層、集水區之邊界圖層及河川網路圖層後，即可以 ARC/INFO 之 CREATETIN 指令進行 TIN 之建構。ARC/INFO 於建構 TIN 時所使用之原理即為 Delaunay 三角網格理論，此法將 VIP 圖層、集水區邊界及河川網路等三圖層所提供之節點進行篩選，連接鄰近節點成三角形，檢查此三角網格之所有三角形外接圓內有無其他點存在；如有，則此三角形將被捨棄，改由內部之點與其頂點重新連接再進行測試，直到三角網格之所有三角形外接圓內均無其他點存在。建構 TIN 之流程如圖 3 所示。

2. TIN 資料儲存格式

藉由 ARC/INFO 所建構之三角形不規則網格圖層，可自動描述河川網路及地形坡度，將此圖層儲存為線圖層(line coverage)及多邊形圖層

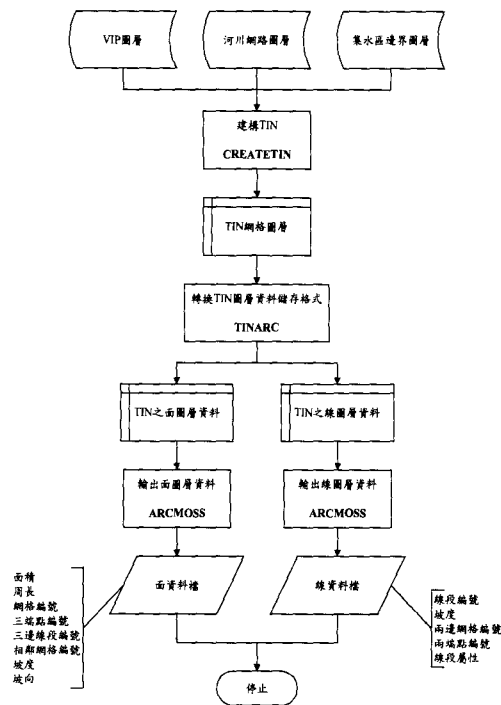


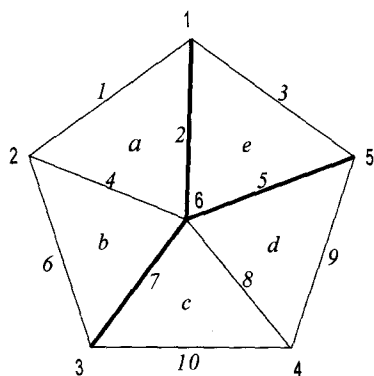
圖 3 建構三角形不規則網格流程圖

(polygon coverage)，如此即可得每個三角形不規則網格之點、線及面等三種資料。茲將此三種資料說明如下：

- (1) 點資料：主要記錄構成三角網格之點編號及其 x 、 y 、 z 座標。
- (2) 線資料：此資料記錄線段編號、構成線段之兩端點編號、線段左右兩邊之三角網格編號、線段長度與坡度資料，以及線段屬性資料。線段之屬性資料乃於建構 TIN 之過程中所給予，利用此屬性資料可定義出構成集水區邊界及河川網路等線段。研究中，將線段屬性分為 0 與 3 兩類，前者表示一般線段，僅用於劃分三角網格；後者表示該線段除了具有前者之功能外，亦代表線段屬於河川或集水區邊界。經由線段屬性資料可建立河川網路之上下游關係，並串接出集水區邊界，將集水區所包含之三角網格搜尋出來。

(3)面資料：所謂面即指三角網格而言，其中包含構成此三角網格之三個頂點與三條線段之編號，以及相鄰於該三角元素之三角網格編號，同時具有三角元素之面積、坡度及坡向資料。

茲將上述 TIN 之資料儲存格式舉例說明，如圖 4 所示。



點資料

點編號	x	y	z
1	125.00	75.00	1340.00
2	105.00	45.00	1200.00
:	:	:	:
:	:	:	:

線資料

線編號	上端點 編號	下端點 編號	右網格 編號	左網格 編號	屬性 資料
1	1	2	*	a	0
2	1	6	a	e	3
3	1	5	e	*	0
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:

*: 表示無資料

面資料

網格編號	網格之點 編號	網格之線 編號	相鄰網格 編號
a	1,2,6	1,4,2,	*,b,e
b	2,3,6	4,6,7	a,*,c
:	:	:	:
:	:	:	:

*: 表示無資料

圖 4 三角形不規則網格之位向資料示意圖

(二) 降雨—逕流模式

1. 三角坡地元件與河段之串接

在進行運動波之有限差分計算時，不論於河渠流或是漫地流都必須先確立河川線段或三角網格之上下游關係。在河渠流部分，首先給定集水區出口河川線段之編號，藉由線段上游端點編號搜尋與其相接線段，同時此線段屬性資料須為 3，以確認其為河段，依此逐步往上游搜尋即可串接整個河川網路。至於漫地流部分因涉及三角網格之串接，故較為複雜。

所謂三角網格之上下游關係乃指漫地流由一三角元件流入另一三角元件，故並非兩兩相鄰之三角網格即具有上下游關係。判斷三角網格間是否具有上下游關係，必須先確認網格三邊分別為漫地流之流出或流入邊。研究中將三角網格坡向向量與網格三邊向量分別做外積，若外積結果為正，則代表此邊為漫地流之流出邊；如為負值，則為漫地流之流入邊。

今假設有一三角網格 Δabc 如圖 5 所示，以逆時針方向對網格頂點進行編號， \vec{S} 為該網格之坡向向量，並以此向量分別對 \vec{ab} 、 \vec{bc} 及 \vec{ca} 三個向量做外積。圖中可知， $\vec{S} \times \vec{ab}$ 之外積為正值，表示此網格 \vec{ab} 為漫地流之流出邊，標記為 1；而 $\vec{S} \times \vec{bc}$ 與 $\vec{S} \times \vec{ca}$ 均為負值，表示該網格之 \vec{bc} 與 \vec{ca} 為漫地流之流入邊，標記為 0。

經上述可知，因每一線段均為兩三角網格之共同邊，故將會有兩個標記。當標記組合為 (0,0) 時，表示該線段為山脊；又當標記組合為 (1,1)

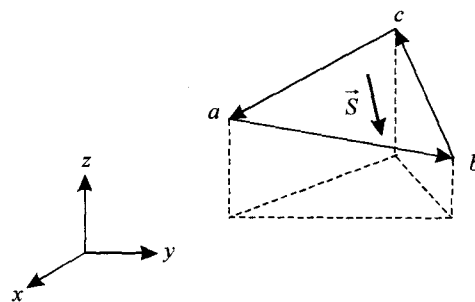


圖 5 三角元件坡向示意圖

時，表示兩三角網格之漫地流均匯集至該線段，則此線段即視為河川。前述兩種情況之三角網格間並無上下游關係。如標記組合為(1,0)時，表示漫地流流量將由某一網格流向另一網格，則此時兩三角網格即具有上下游關係。

2. 自動化差分資料之建立

集水區內之每一三角網格於一般情況下並非僅具有一個漫地流之流出或流入邊，如此將使得漫地流之演算更加複雜。以往，研究者均採用人工方式，將網格進行編修，目的在使集水區之所有三角網格均只具有單一漫地流流出邊，此方法不僅費時、費力，且易導致較大之誤差或錯誤出現。有鑑於此，本研究中嘗試保留網格中漫地流之原始流路，以電腦程式搭配前節所述之網格漫地流流向標記，自每一河段所對應之三角網格向上游追溯與其具上下游關係之網格。於此同時必須做下列兩點假設：一為網格之坡向即為漫地流之流向；其二，同一網格內之漫地流流路彼此間相互平行且不交錯，如圖 6 所示。

由於本研究之目的在建立一分布型之降雨一逕流模式，故以上述方式所建立之差分資料除具有確實地記錄漫地流各種流路之優點外，亦將各流路所流經之網格坡度、長度等分布型地文參數資料予以記錄，如此將可提供運動波模式之漫地流以及河渠流流量差分演算時所需之訊息。

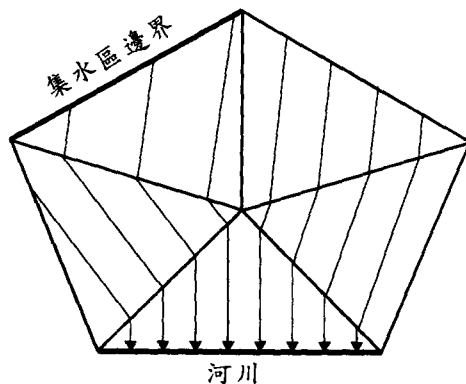


圖 6 自動化差分資料建立示意圖

3. 運動波之有限差分計算

(1) 運動波模式

自然洪水波(flood wave)中，運動波與動力波均可能存在，然而在陡峭地形中重力項之影響程度遠超過局部加速度項、傳導加速度項以及壓力項，即使在地表坡度非常平緩之地區，壓力項也才能與重力項具有相當之影響程度，故運動波模式適用於上游集水區水流傳輸之解析。運動波模式定義如下：

$$\text{連續方程式} \quad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{動量方程式} \quad S_o = S_f \quad \dots\dots\dots(10)$$

A. 漫地流之運動波連續方程式

研究中，流量之計算採用曼寧公式，則單位寬度漫地流流量 q 可表示為：

$$q = \frac{1}{n_o} h^{5/3} S_o^{1/2} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中， h ：漫地流水深；

S_o ：地表坡度；

n_o ：漫地流之曼寧糙度係數。

上式整理可得：

$$h = \left[\frac{n_o}{S_o^{1/2}} \right]^{3/5} q^{3/5} \quad \dots\dots\dots(12)$$

令 $\alpha_o = \left[\frac{n_o}{S_o^{1/2}} \right]^{3/5}$ 且 $\beta_o = \frac{3}{5}$ ，則 $h = \alpha_o q^{\beta_o}$ 。將 h

對 t 作偏微分：

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \alpha_o \beta_o q^{\beta_o - 1} \left[\frac{\partial q}{\partial t} \right] \quad \dots\dots\dots(13)$$

則漫地流之連續方程式可表示為：

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = r_e \quad \dots\dots\dots(14)$$

將(13)式代入(14)式可得：

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \alpha_o \beta_o q^{\beta_o - 1} \left[\frac{\partial q}{\partial t} \right] = r_e \dots\dots\dots(15)$$

上式即為漫地流之運動波連續方程式。

B. 河渠流之運動波連續方程式

同理，河渠流之流量以曼寧公式可表示為：

$$Q = AV = \frac{1}{n_c} AR^{2/3} S_c^{1/2} \dots\dots\dots(16)$$

- 式中， Q ：河渠流之流量；
- A ：渠道段面積；
- R ：水力半徑；
- S_c ：渠道坡度；
- n_c ：渠道之曼寧糙度係數。

假設渠寬遠大於水深，則：

$$Q = \frac{1}{n_c} A \left(\frac{A}{P} \right)^{2/3} S_c^{1/2} = \frac{1}{n_c} \frac{A^{5/3}}{B^{2/3}} S_c^{1/2} \dots\dots\dots(17)$$

- 式中， P ：溼周；
- B ：渠道寬度。

將上式整理可得：

$$A = \left(\frac{n_c B^{2/3}}{S_c^{1/2}} \right)^{3/5} Q^{3/5} \dots\dots\dots(18)$$

令 $\alpha_c = \left(\frac{n_c B^{2/3}}{S_c^{1/2}} \right)^{3/5}$ 且 $\beta_c = \frac{3}{5}$ ，則 $A = \alpha_c Q^{\beta_c}$ 。將

A 對時間 t 作偏微分：

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha_c \beta_c Q^{\beta_c - 1} \left[\frac{\partial Q}{\partial t} \right] \dots\dots\dots(19)$$

則河渠流之連續方程式可表示為：

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \dots\dots\dots(20)$$

將(19)式代入(20)式可得：

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha_c \beta_c q^{\beta_c - 1} \left[\frac{\partial Q}{\partial t} \right] = q \dots\dots\dots(21)$$

上式即為河渠流之運動波連續方程式。

(2) 運動波之數值解

研究擬採用隱性差分法進行運動波之有限差分計算，可得線性運動波有限差分式如下：

$$\begin{aligned} & \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} + \alpha \beta \left[\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right]^{\beta-1} \left[\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta t} \right] \\ & = \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_i^{j+1}}{2} \end{aligned} \dots\dots\dots(22)$$

利用上式可將 Q_{i+1}^{j+1} 表示為：

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha \beta Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_i^{j+1}}{2} \right) \right]}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right]} \dots\dots\dots(23)$$

故，計算漫地流之差分式可表示為：

$$q_{i+1}^{j+1} = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x_0} q_i^{j+1} + \alpha_o \beta_o q_{i+1}^j \left(\frac{q_{i+1}^j + q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta_o-1} + \Delta t \left(\frac{r_{e,i+1}^{j+1} + r_{e,i}^j}{2} \right) \right]}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x_0} + \alpha_o \beta_o \left(\frac{q_{i+1}^j + q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta_o-1} \right]} \dots\dots\dots(24)$$

其中， Δx_0 為計算漫地流時所使用之差分距離。

計算河渠流之差分式則表示為：

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x_c} Q_i^{j+1} + \alpha_c \beta_c Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta_c-1} + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_i^{j+1}}{2} \right) \right]}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x_c} + \alpha_c \beta_c \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta_c-1} \right]} \dots\dots\dots(25)$$

其中， Δx_c 為計算河渠流時所使用之差分距離。

利用漫地流與河渠流兩差分式，配合先前所述之差分資料，即可進行逕流之演算。

四、參數優選

水文模式中常訂定若干參數以模擬研究流域水文現象之變化，所引用之水文參數通常必須

藉由一些參數優選方法(method of parameter optimization)來決定。一般作法是先選定一種參數優選方法，再針對數場已發生之颱風事件求出其最佳參數值；再者，將各場次之最佳參數值取平均以作為該研究區域之最佳參數組合。然而，將各場次之最佳參數值取平均所得之平均參數，其對於原先參與檢定之颱風事件而言均非各場之最佳參數，因此引發吾人對參數優選方式產生兩種想法：一為應該嘗試將集水區中所有用於參數檢定之颱風事件視為一個整體，於參數優選時以尋求整體誤差最小之參數做為最佳參數組合，如此將比平均參數更具實質意義；其二，由於各場次之最佳參數取平均所得之平均參數均較各場次之最佳參數為劣，不禁令人聯想起這似乎是一種彼此間相互妥協之狀態，如此吾人何以確定將各場次之最佳參數取平均值所得之平均參數即為彼此相互妥協後之最佳狀態，亦即整體而言令吾人最滿意之狀態，故研究中採模糊規劃方式以優選出令吾人滿意度最大之最佳參數值。

(一) 模糊規劃理論

「模糊(fuzzy)」一詞是美國數學家 Zadeh 於 1963 年提出，模糊集合(fuzzy sets)與古典集合(classical sets)之差異，在於其特別考慮事物不確定性之程度以及不確定性之可能。古典數學將事物之特性採取二分法，模糊集合理論強調人類之知覺、主觀性、態度、目標及觀念等具有模糊性因素，是無法以傳統之二值邏輯系統予以描述，必須以隸屬函數表達事物之屬性與特徵。例如對於冷之感受，每個人可能都不盡相同，在 12°C 時，有人可能覺得很冷，有人可能覺得普通，因此模糊集合之特徵在於描述對一事物感受之隸屬程度。而模糊數學規劃(fuzzy mathematical programming)即為考慮系統參數、目標或限制式等模糊特性之數學規劃。

1. 模糊數學規劃之隸屬函數

隸屬函數(membership function)為模糊集合理論之基礎，其將一元素是否屬於某一集合以介於 0 與 1 之間之程度等級加以描述，越接近 1 則

隸屬程度越高。模糊數學規劃即將此種模糊概念，透過隸屬函數反應於目標函數或限制式中。

在模式中，如模糊限制式為 $Ax \leq b$ 之型態，可假設此模糊限制式之隸屬函數為非遞增函數(non-increasing functions)；若限制式為 $Ax \geq b$ 之型態，則假設此模糊限制式之隸屬函數為非遞減函數(non-decreasing functions)，如圖 7 所示。若為 $Ax = b$ 之等式型態限制式，則假設其為三角形或梯形之隸屬函數，如圖 8 所示，此時可看成是一個非遞增隸屬函數與非遞減隸屬函數之交集。

2. 模糊線性規劃

模糊線性規劃(fuzzy linear programming, FLP)即強調模式中之所有隸屬函數均為線性。一般在建構模式時，若規劃中之限制式具有模糊資源，則可將模式表示如下：

$$\begin{aligned} \max \quad & Z = cx \dots\dots\dots(26) \\ \text{s.t.} \quad & (Ax)_i \leq b_i \quad \forall i \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

其中， b_i 為介於模糊區間 $[b_i, b_i + P_i]$ 之值， P_i 為已知之忍恕值(tolerance)，此模式限制式之模糊隸屬函數如圖 9 所示。

一般而言，若僅考慮目標或限制式具有模糊特性，則稱此模式為非對稱型模糊數學規劃；若目標函數與限制式均同時具有模糊性，則稱為對稱型模糊數學規劃。針對模糊線性規劃模式，於實際應用時常做下列假設：

- (1) 模式中之隸屬函數均為線性。
- (2) 在對稱型模糊規劃模式中，利用最小滿意度最大化之運算子(max-min operator)進行模糊集合決策分析，如圖 10 所示。亦即：

$$\begin{aligned} \mu_D(x) &= \mu_G \cap \mu_C \\ &= \max[\min\{\mu_G, \mu_C\}] \dots\dots\dots(27) \end{aligned}$$

式中， μ_D ：模式之最佳滿意度；
 μ_G ：極大化目標之隸屬函數；
 μ_C ：限制式型態為「 \leq 」之隸屬函數。

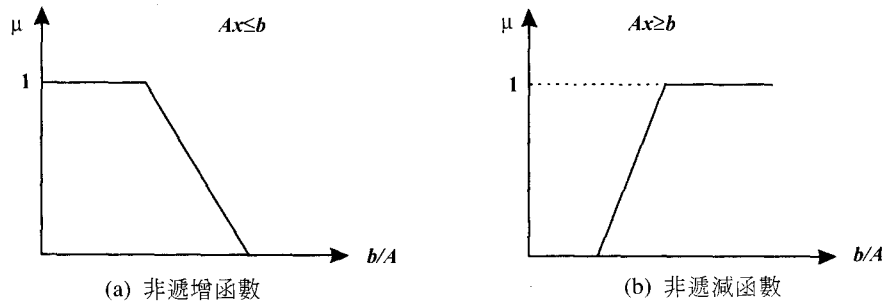


圖 7 對應不等限制式之模糊隸屬函數型態圖(摘自張氏, 1997)

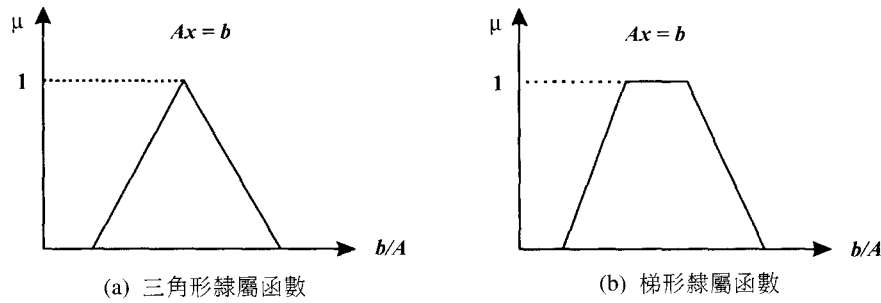


圖 8 對應等號限制式之模糊隸屬函數型態圖(摘自張氏, 1997)

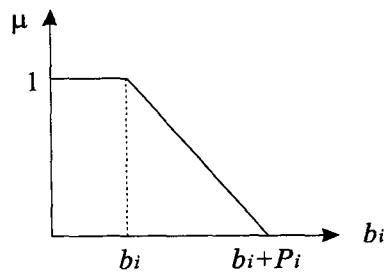


圖 9 模糊限制式之隸屬函數圖(摘自張氏, 1997)

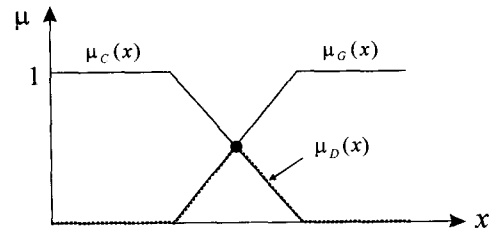


圖 10 最小滿意度最大化運算子示意圖(摘自張氏, 1997)

(二) 模式參數最佳化

在模式參數最佳化方面，將針對先前所述之三種參數優選概念，即各檢定場次之最佳參數取平均值、將所有檢定場次視為一整體求取最佳參數及模糊線性規劃參數優選等進行評估，以瞭解其間之差異與適用性。同時，必須選擇一參數優選方法做為參數優選概念之輔助工具。為避免優

選結果受初始值影響而落入區域(local)最佳解，故研究中擬採用可搜尋全域(global)最佳值之適應逢機搜尋(Adaptive Random Search; ARS)法(游氏等人, 1995)。

ARS 法不具深奧數學理論，但於實際應用上可獲致令人滿意之效果。使用此法前須先依據流域特性或操作者之經驗決定一尋優範圍，茲將步

驟說明如下：

- (1) 隨意訂定一起始焦點，例如優選範圍之中心。
- (2) 在搜尋範圍內隨意產生 n 個點(亦可均勻分布)，計算各點之目標函數值，並記憶最佳點之位置。
- (3) 重複步驟(2)，直到完成指定之執行次數 m 為止，並且在執行第 i 次時，將搜尋範圍以焦點為中心縮小為原先之 $\frac{1}{10i}$ 。
- (4) 比較上述步驟所得之 m 個記憶值，選擇其中最佳函數值所對應之點為新焦點。判斷此焦點是否於最小搜尋範圍時所尋得，如果是，則此點即為最佳值；反之，則進行步驟(5)。
- (5) 重複步驟(2)至(4)，直到最佳值落入最小搜尋範圍內，則此點即為所求之最佳參數值。

ARS 法之詳細流程如圖 11 所示。茲再將三種參數優選法概念說明如下：

1. 最佳參數平均法

此法乃將所有用於參數檢定之颱風場次以 ARS 法求取各場之最佳參數值，再將所有參數取平均值以做為該研究區域之最佳參數組合，並以此組參數代入模式中進行參數之驗證，並評估其適用性。

在此方法中所使用之目標函數式定義如下(王氏與李氏，1989)：

$$F_{obj} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_{obs}(i) - Q_{est}(i)]^2 \cdot WT(i) \right\} + DQ \quad (28)$$

其中， $WT(i)$ 與 DQ 之計算如下所示：

$$WT(i) = \frac{Q_{obs}(i) + \bar{Q}_{obs}}{2\bar{Q}_{obs}} \dots\dots\dots(29)$$

$$DQ = \begin{cases} \frac{(Q_{obs,p} - Q_{est,p})}{N^2} & \text{if } Q_{est,p} < Q_{obs,p} \dots\dots(30) \\ 0 & \text{if } Q_{est,p} > Q_{obs,p} \end{cases}$$

式中， N ：觀測值之延時；

$Q_{obs}(i)$ ：第 i 時刻之觀測流量；

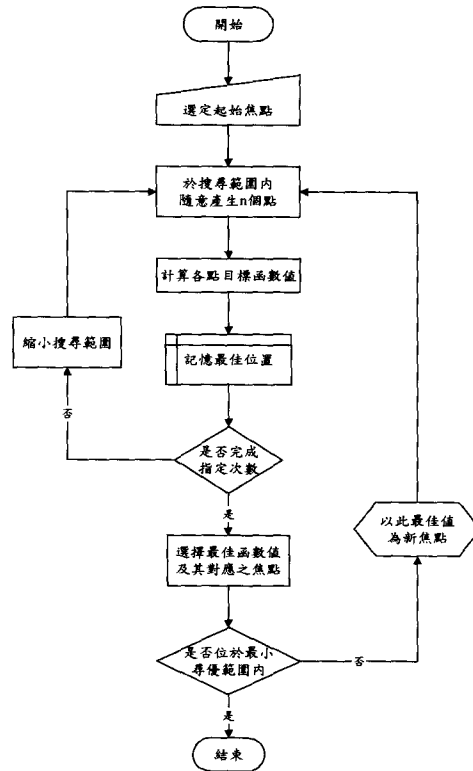


圖 11 ARS 參數優選法流程圖

- $Q_{est}(i)$ ：第 i 時刻之推估流量；
- \bar{Q}_{obs} ：觀測流量之平均值；
- $Q_{obs,p}$ ：觀測流量之洪峰值；
- $Q_{est,p}$ ：推估流量之洪峰值；
- $WT(i)$ ：第 i 時刻之權重值；
- DQ ：洪峰誤差加權值。

上式為考慮整體模擬效果最佳化之目標函數，主要根據模擬與觀測流量之差異程度以及洪峰流量之擬合度兩部份做一綜合性考量。

2. 整體最佳參數優選法

將所有檢定場次視為整體，以 ARS 法優選所有檢定場次目標函數之總和最小者為最佳參數組合，則此組參數值對所有檢定場次而言均非最佳值，但就整體評估而言實為最佳。

此方法於優選時所使用之目標函數與最佳參數平均法雷同，差別在於必須考量所有檢定場次整體效應，故將目標函數式定義如下：

$$F_{obj} = \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} [Q_{obs}(i) - Q_{est}(i)]^2 \cdot WT_j(i) + DQ_j \right\} \quad \dots\dots\dots(31)$$

其中， M 表示所有檢定場次， j 代表檢定之場次，其餘參數之代表意義均如前所述。

3. 模糊線性規劃參數優選法

此法亦為一種整體評估方法，目的在尋求一組參數組合，使所有檢定場次之最小滿意度得到最大化。由於模式中隸屬函數將隨著參數不同而改變，故以 x 表示參數值。本研究中將效率係數 (CE) 之隸屬函數訂為一非遞減函數，表示如下：

$$\mu_{CE}(CE(x)) = \begin{cases} 1 & \text{if } CE(x) > 1 \\ CE(x) & \text{if } 0 \leq CE(x) \leq 1 \dots\dots\dots(32) \\ 0 & \text{if } CE(x) < 0 \end{cases}$$

洪峰流量誤差 (EQP) 之隸屬函數訂為一種三角形隸屬函數，表示如下：

$$\mu_{EQP}(EQP(x)) = \begin{cases} 1 & \text{if } EQP(x) = 0 \\ 1 - \frac{EQP(x)}{100} & \text{if } EQP(x) > 0 \dots\dots\dots(33) \\ 1 - \frac{EQP(x)}{-90} & \text{if } EQP(x) < 0 \end{cases}$$

其中，「100」為上限忍恕值，「-90」為下限忍恕值，此時洪峰流量低估段之斜率比洪峰流量高估段之斜率陡，表示相同推估誤差量時，洪峰流量低估情況所帶來之滿意度較低。洪峰到達時刻誤差 (ETP) 之隸屬函數亦為一種三角形隸屬函數，如下所示：

$$\mu_{ETP}(ETP(x)) = \begin{cases} 1 & \text{if } ETP(x) = 0 \\ 1 - \frac{ETP(x)}{8} & \text{if } ETP(x) > 0 \dots\dots\dots(34) \\ 1 - \frac{ETP(x)}{-8} & \text{if } ETP(x) < 0 \end{cases}$$

其中，「8」為上限忍恕值，「-8」為下限忍恕值，此時洪峰到達時刻誤差為正或為負其斜率相同，表示相同推估誤差量下兩種情況所帶來之滿意度相同。最後，模糊線性規劃參數優選模式可建構如下：

$$\begin{aligned} \max \quad & \alpha \dots\dots\dots(35) \\ \text{s.t.} \quad & \mu_{CE}(EC(x)) \geq \alpha \\ & \mu_{EQP}(EQP(x)) \geq \alpha \\ & \mu_{ETP}(ETP(x)) \geq \alpha \\ & \alpha \in [0,1] \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

由上述模式可看出，此模糊規劃參數優選模式同時考量效率係數、洪峰流量誤差以及洪峰到達時刻誤差等三種評估模式優劣指標，期能優選出一組對所有檢定場次之三種指標而言均具有相同滿意度之最佳參數組合。優選時同樣以 ARS 法中所決定之參數值代入降雨—逕流模式中，求出所需之效率係數、洪峰流量誤差以及洪峰到達時刻誤差等值，再以模糊規劃模式計算此組參數之滿意度，最後以滿意度最大者所對應之點為最佳參數值。

五、模式檢定與驗證

(一) 研究區域簡介

本研究擬以淡水河系中大漢河流域之橫溪上游集水區為研究區域，該集水區主要位於三峽鎮內，集水面積為 57 平方公里，出口處設有水文站記錄水位—流量資料，可提供本研究於模式建構及參數優選之所需。地理位置如圖 12 所示。

(二) 資料蒐集與整理

1. 地文資料

本研究以中央大學太空及遙測中心所出版之 DEM (40m×40m) 相片基本圖為地形之主要處理資料，將其轉換為 ASCII 檔案，再經由 ARC/INFO 建構成研究所需之格網地形圖層。

2. 水文資料

橫溪上游集水區之電傳雨量站僅有大豹一站，為經濟部水利處所轄屬，並以橫溪流量記錄做為模式檢定及驗證之憑藉。

3. 颱風事件之選取

表 1 橫溪上游集水區用於模式分析之颱風事件記錄表

場次	颱風名稱	發生時間	類別	延時 (hrs)
1	歐拉(Ora)	67.10.12	檢定	72
2	貝絲(Bess)	74.10.03	檢定	62
3	韋恩(Wayne)	75.08.22	檢定	70
4	艾貝(Abby)	75.09.17	驗證	67
5	傑魯得(Gerald)	76.09.08	檢定	80
6	琳恩(Lynn)	76.10.23	驗證	69
7	楊希(Yancy)	79.08.18	檢定	40
8	亞伯(Abe)	79.08.30	驗證	41
9	黛特(Dot)	79.09.07	檢定	70

為確定模式應用於研析地區之合適性，本研究於橫溪上游集水區選用自民國 67 年至民國 79 年間九場颱風事件進行檢定與驗證工作。如表 1 所示。

(三) 研析步驟

1. 首先將研究區域之 ASCII 檔案經由 ARC/INFO 轉換成格網地形圖層，如圖 13 所示，利用此圖層再建構出研究所需之地形重要點圖層、河川網路圖層以及集水區邊界圖層等，分別示於圖 14、圖 15 及圖 16。
2. 利用地形重要點圖層、河川網路圖層及集水區邊界圖層建構研究區域地形變化之三角形不規則網格，如圖 17 所示；並將網格位向關係資料予以輸出。
3. 利用三角網格位向關係及各項地形資料，串接研究區域之集水區邊界與河川網路，並建立網格之上下游關係。接著整理有限差分計算所需之資料。
4. 以三種參數優選方法決定各種參數組合，將其代入降雨—逕流模式中進行運動波漫地流與河渠流演算，並藉由目標值優選出個別最佳參數值。
5. 利用此三組最佳參數進行模式驗證，評估模式適用性，並比較三種參數優選方法結果之差異，分析其優缺點。

(四) 參數之敏感度分析

為確定本研究建立模式推估流量之正確性且深入瞭解模式對參數敏感程度，故對模式中所含有之漫地流糙度係數(n_o)、河渠流糙度係數(n_c)及河渠斷面寬度(B)進行一連串敏感度分析，探討不同參數變化對模式之影響趨勢，作為參數檢定與驗證之依據。同時，亦將降雨強度(I)與兩糙度係數(n_o 、 n_c)間之相互影響關係進行敏感度分析探討。

一般而言，模糊規劃模式隸屬函數之忍恕值訂定常隨著個人面對事件之態度及觀念不同而有所差異。由於吾人對洪峰流量推估結果高估與低估之感受程度並不相同，為瞭解忍恕值訂定對模式模擬結果之影響趨勢，故本研究將洪峰流量誤差模糊隸屬函數上限忍恕值定為「100」，下限忍恕值以「-100」、「-90」及「-80」等分別予以考量，其所代表之意義為：「-100」表示吾人對洪峰流量高估或低估之觀感相同，無特別偏好；「-90」與「-80」則代表吾人在相同洪峰流量誤差下，較偏好高估情況，且「-80」比「-90」之偏好情況更甚。藉此進行敏感度分析。

(五) 模式適合性檢定

為探討本模式應用於研究集水區之合適性，分別以效率係數(Coefficient of Efficiency)、洪峰流量誤差(Error of Peak Discharge)、洪峰到達時刻誤差(Error of Time to Peak)等三項指標客觀評估模式之合適性。茲將各項評估指標定義如下：

1. 效率係數(CE)

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [Q_{obs}(i) - Q_{est}(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [Q_{obs}(i) - \bar{Q}_{obs}(i)]^2} \dots\dots\dots(36)$$

式中， $Q_{est}(i)$ ：第 i 時刻之模式推估流量；
 $Q_{obs}(i)$ ：第 i 時刻之實際觀測流量；
 \bar{Q}_{obs} ：實際觀測流量之平均值；
 N ：觀測流量之延時。

2. 洪峰流量誤差(EQP)

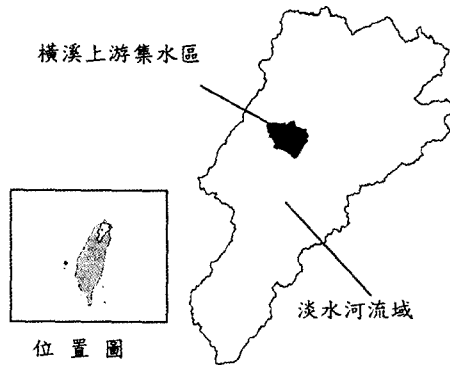


圖 12 橫溪上游集水區位置圖

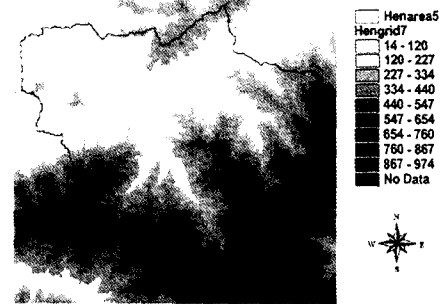


圖 13 橫溪上游集水區地形高程圖

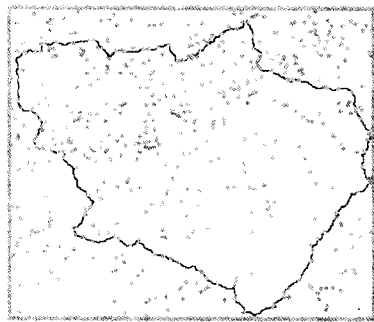


圖 14 橫溪上游集水區點圖層

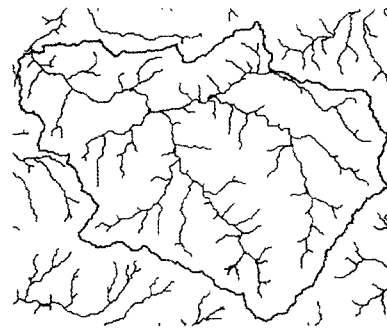


圖 15 橫溪上游集水區河川網路圖



圖 16 橫溪上游集水區邊界圖

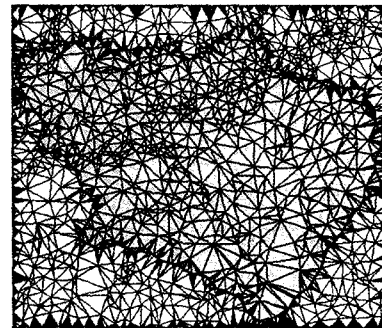


圖 17 橫溪上游集水區 TIN 圖層

$$EQP = \frac{Q_{p,est} - Q_{p,obs}}{Q_{p,obs}} \times 100\% \dots\dots\dots(37)$$

式中， $Q_{p,est}$ ：模式推估之洪峰流量；
 $Q_{p,obs}$ ：實際觀測之洪峰流量。

3. 洪峰到達時刻誤差 (ETP)

$$ETP = T_{p,est} - T_{p,obs} \dots\dots\dots(38)$$

式中， $T_{p,est}$ ：模式推估之洪峰到達時刻；
 $T_{p,obs}$ ：實際觀測之洪峰到達時刻。

六、結果與討論

本研究以三角形不規則網格模擬研究區域之地形變化，建立分布型模式所需之地文參數資料，提供運動波模式進行研究區域出口之逕流演算，藉由敏感度分析了解參數對模式之影響趨勢，並配合三種參數優選方法評估此分布型降雨—逕流模式於研究區域之適用性。茲將已獲得之結果討論如下：

1. 對於漫地流糙度係數 n_o 、河渠流糙度係數 n_c 及渠寬 B 等地文參數，以及降雨強度之敏感度測試方法與結果分述如下：

(1) 漫地流與河渠流糙度係數之數值試驗結果如圖 18 及圖 19 所示，由結果可知，集水區出口逕流歷線之峰值隨著 n_o 、 n_c 之增加而減少，且 n_o 較 n_c 之影響更大；峰值到達時刻則隨著 n_o 、 n_c 之增加而延後，而 n_c 較 n_o 之影響稍顯著；同時，退水情形隨著 n_o 、 n_c 之增加較為緩慢。此敏感度分析結果與一般漫地流糙度係數及河渠流糙度係數之性質一致，因此，於參數檢定時應符合實際之物理機制。

(2) 河渠斷面寬度 B 之數值試驗結果如圖 20 所示。由結果顯示， B 增加對逕流歷線之峰值、峰值到達時刻以及退水情形之影響趨勢與 n_o 、 n_c 均相同，但較不如 n_o 、 n_c 顯著。故於參數優選時，僅以漫地流與河渠流糙度係數作為模式之待優選參數，同時將河渠斷面寬度 B 訂為 30 公尺。

(3) 同時為瞭解降雨強度與地文參數 n_o 、 n_c 間之相互影響趨勢，故以 1~5mm/hr 之降雨強度進行數值試驗，結果如圖 21 所示。經分析比較可知，隨著降雨強度之增強，逕流歷線形狀將越高聳，峰值到達時刻提前，且退水速度加快。因此，降雨強度增強將使得 n_o 、 n_c 對降低洪峰流量、延遲洪峰到達時刻以及延緩退水等影響程度受到減弱。

上述敏感度分析結果均列於表 2。

2. 洪峰流量誤差模糊隸屬函數下限忍恕值敏感度分析方面，將結果說明如下：

表 2 地文參數與降雨強度之敏感度分析表

項目 參數	參數值	峰值 (cms)	峰值變 化率(%)	峰值到達 時間(hr)
參數 n_o	0.1	1.70	-	8
	0.3	1.18	-30.6	11
	0.5	0.93	-21.2	12
	0.7	0.76	-18.3	13
	0.9	0.65	-14.5	14
參數 n_c	0.01	1.18	-	7
	0.03	1.02	-13.6	10
	0.05	0.93	-8.8	12
	0.07	0.86	-7.5	14
	0.09	0.80	-7.0	16
渠寬 B	10	1.06	-	9
	20	0.98	-7.5	11
	30	0.93	-5.1	12
	40	0.89	-4.3	13
	50	0.86	-3.4	14
降雨強度 I	1	0.93	-	12
	2	2.59	+178.5	9
	3	4.63	+78.8	8
	4	7.06	+52.5	7
	5	9.59	+35.8	6

(1) 對三種不同下限忍恕值，以模糊規劃參數優選法進行參數優選，所得最佳參數如表 3 所示。三種下限忍恕值所求得之最佳參數組合 (n_o, n_c) 分別為：下限忍恕值「-100」為(0.60,0.03)，滿意度 0.82；下限忍恕值「-90」為(0.50,0.03)，滿意度為 0.81；下限忍恕值「-80」為(0.40,0.03)，滿意度 0.80。由此可知，隨著下限忍恕值由「-100」升高至「-80」，表示吾人對洪峰流量低估所造成之誤差滿意度愈來愈低，故滿意度會隨之下降。

表 3 洪峰流量誤差模糊隸屬函數下限忍恕值敏感度分析優選結果表

下限忍 恕值	參數項目			
	n_o	n_c	整體目標 函數值	滿意度
-100	0.60	0.03	167.56	0.82
-90	0.50	0.03	172.25	0.81
-80	0.40	0.03	178.79	0.80

表 4 洪峰流量誤差模糊隸屬函數下限忍恕值敏感度分析表

忍恕值	評估項目	颶風名稱								
		歐拉	貝絲	韋恩	艾貝	傑魯得	琳恩	楊希	亞伯	黛特
-100	效率係數(CE)	0.94	0.85	0.85	0.87	0.87	0.89	0.95	0.93	0.84
	洪峰流量誤差(%)	16.78	-18.18	-2.37	-3.69	11.25	-3.32	-18.31	-19.80	-16.59
	洪峰時間誤差(hrs)	1	0	0	0	-1	-1	0	0	0
-90	效率係數(CE)	0.94	0.84	0.84	0.86	0.86	0.89	0.94	0.92	0.82
	洪峰流量誤差(%)	17.90	-17.54	-1.08	-2.41	14.88	-2.42	-17.42	-18.59	-15.21
	洪峰時間誤差(hrs)	1	0	0	0	0	-1	0	0	0
-80	效率係數(CE)	0.94	0.82	0.83	0.85	0.83	0.89	0.94	0.92	0.80
	洪峰流量誤差(%)	19.08	-16.87	0.40	-1.00	19.22	-1.54	-16.45	-17.25	-13.75
	洪峰時間誤差(hrs)	1	0	0	0	0	-1	0	0	0

(2)將上述三組參數值代入降雨—逕流模式中，以橫溪上游集水區九場颶洪事件進行模擬，結果列於表 4，並將部分結果示於圖 22 及圖 23。由結果可知，隨著下限忍恕值由「-100」升高至「-80」，洪峰流量之推估均有逐漸加大之趨勢而效率係數則恰巧相反，呈現逐漸下降之趨勢。此乃由於洪峰流量誤差模糊隸屬函數下限忍恕值增加時，吾人對洪峰流量低估情形下之滿意度將更趨嚴苛，因此於參數優選時會傾向儘可能使洪峰流量高估之參數組合，於此同時，則必須犧牲效率係數之滿意度，致使效率係數受到影響而變差。至於洪峰到達時刻誤差方面，也由原先之傑魯得及琳恩兩場颶風誤差 1 小時，改善至只有傑魯得颶風誤差 1 小時，其餘八場颶洪均準確預估。

在進行模式之參數優選時，於模糊規劃參數優選法中，本研究將洪峰流量誤差模糊隸屬函數下限忍恕值訂為「-90」，以避免效率係數過低。

3. 本研究以橫溪上游集水區之六場颶洪事件進行模式參數之檢定，將漫地流糙度係數 n_o 之優選範圍設定為 0.1~0.7，河渠流糙度係數 n_c 之優選範圍定為 0.01~0.07，以 ARS 法對六場颶洪事件進行最佳參數檢定，所得結果如表 5 所示。以三種參數優選方法所獲得之最佳參數

組合 (n_o, n_c) 分別為：最佳參數平均值法(0.67, 0.052)，整體最佳參數優選法(0.70, 0.05)，模糊規劃參數優選法(0.5, 0.03)。同時，以效率係數(CE)、洪峰流量誤差(EQP)及洪峰到達時刻誤差(ETP)等三項指標，評估比較模擬結果之準確性，所得結果列於表 6，並將部分颶洪場次示於圖 24 及圖 25。茲將參數優選與模式檢定所獲致之結果敘述如下：

(1)在參數優選方面，除了優選出三種方法之最佳參數組合外，亦分別求出三種參數組合於整體最佳參數優選法及模糊規劃參數優選法之目標函數值，並列於表 7。由表中可知，就整體性之擬合度而言以整體最佳參數優選法為最佳，其目標函數值為 162.54；就模擬之滿意度而言，則以模糊規劃參數優選法為最佳，其滿意度為 0.811。經此結果，吾人先前之懷疑確可獲得證實，即傳統上將最佳參數取平均值之方法就整體上而言其誤差總和並非最小，且在相互妥協後之滿意度亦非最大，故最佳參數平均值法實非一最佳之選擇。

(2)在模式檢定之效率係數(CE)方面，最佳參數平均值法之最佳場次為楊希(0.94)，最劣場次為黛特(0.86)及韋恩(0.86)；整體最佳參數優選法之最佳場次為楊希(0.94)，最劣場次為黛特(0.86)；模糊規劃參數優選法之最佳場次為歐拉(0.94)及楊希(0.94)，最劣場次

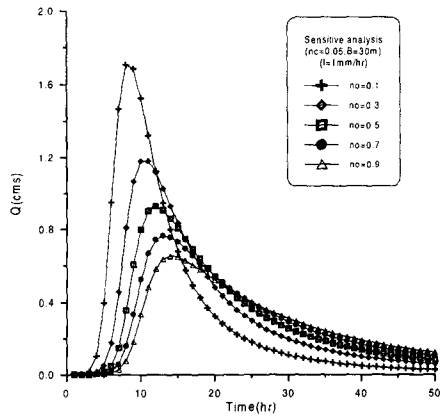


圖 18 n_0 之敏感度分析結果

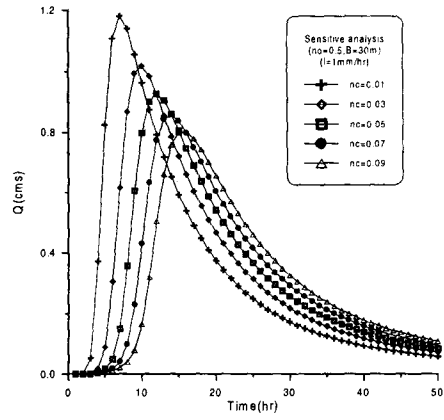


圖 19 n_c 之敏感度分析結果

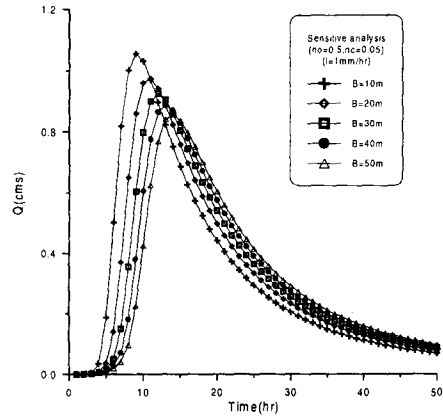


圖 20 渠道寬度敏感度分析結果

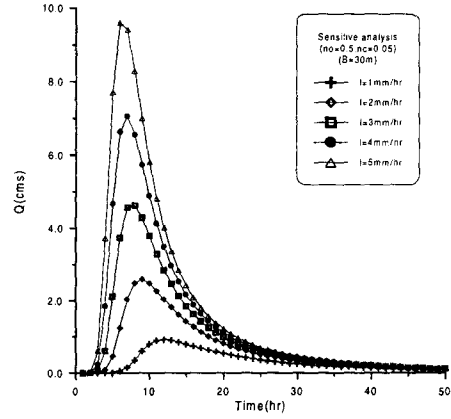


圖 21 降雨強度敏感度分析結果

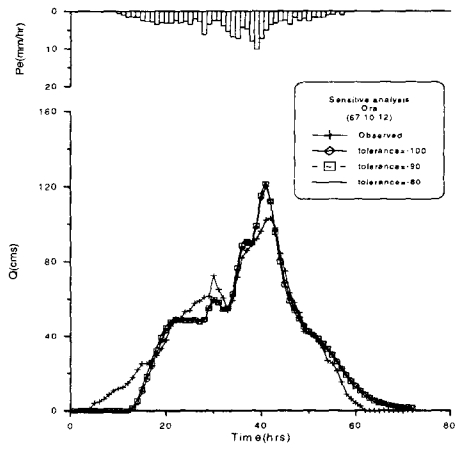


圖 22 下限忍恕值之敏感度分析結果 (歐拉颱風)

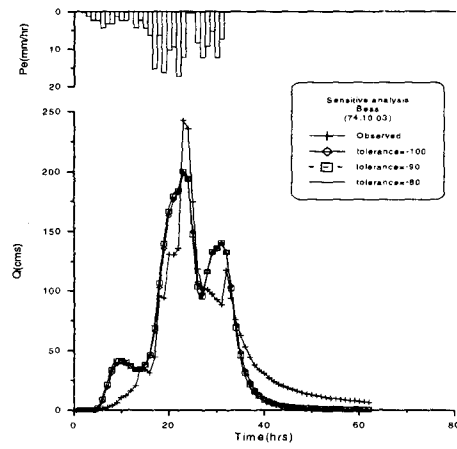


圖 23 下限忍恕值之敏感度分析結果 (貝絲颱風)

表 5 ARS 法優選各檢定颱洪場次之最佳參數表

參數	颱風名稱						平均	總和
	歐拉	貝絲	韋恩	傑魯得	楊希	黛特		
n_o	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.7	0.67	-
n_c	0.03	0.07	0.04	0.07	0.03	0.07	0.052	-
目標函數值	7.94	23.83	29.60	28.00	41.77	26.48	-	157.62

表 6 三種參數優選法之最佳參數表

優選法	參數	n_o	n_c	整體目標函數值	滿意度
最佳參數平均值法		0.67	0.052	162.77	0.773
整體最佳參數優選法		0.7	0.05	162.54	0.771
模糊規劃參數優選法		0.5	0.03	172.25	0.811

表 7 模式套配三種參數優選方法之檢定結果表

模式	評估項目	颱風名稱					
		歐拉	貝絲	韋恩	傑魯得	楊希	黛特
最佳參數平均值法	效率係數(CE)	0.93	0.88	0.86	0.90	0.94	0.86
	洪峰流量誤差(%)	14.43	-19.64	-5.65	9.34	-20.47	-18.53
	洪峰時間誤差(hrs)	1	0	0	-1	0	-1
整體最佳參數優選	效率係數(CE)	0.93	0.88	0.87	0.90	0.94	0.86
	洪峰流量誤差(%)	14.27	-19.74	-5.75	8.98	-20.59	-18.71
	洪峰時間誤差(hrs)	1	0	0	-1	0	-1
模糊規劃參數優選	效率係數(CE)	0.94	0.84	0.84	0.86	0.94	0.82
	洪峰流量誤差(%)	17.90	-17.54	-1.08	14.88	-17.42	-15.21
	洪峰時間誤差(hrs)	1	0	0	0	0	0

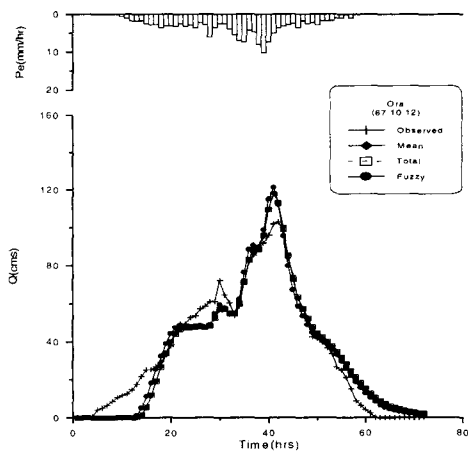


圖 24 歐拉颱風之模式檢定圖

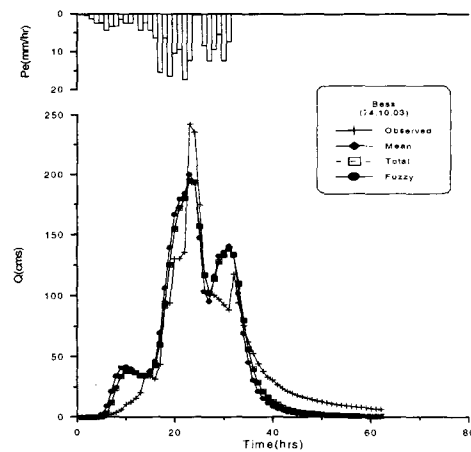


圖 25 貝絲颱風之模式檢定圖

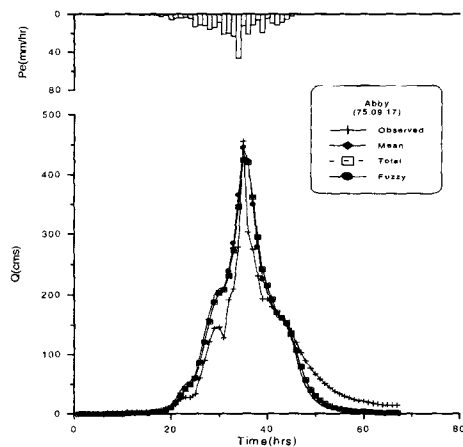


圖 26 艾貝颱風之模式驗證圖

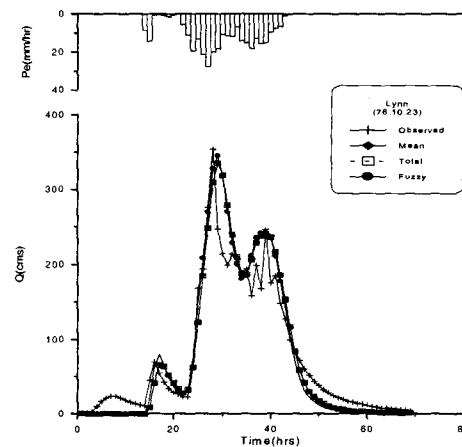


圖 27 琳恩颱風之模式驗證圖

為黛特(0.82)。由於最佳參數平均值法與整體最佳參數優選法兩者之參數本身差異並不大，故於六場颱風事件模擬所得之效率係數可說是幾乎完全一樣；至於模糊規劃參數優選法所得之模擬結果除了歐拉及楊希兩場颱風外，其餘四場之效率係數均略劣於前兩種方法。

- (3)在洪峰流量誤差(EQP)方面，最佳參數平均值法最佳場次為韋恩(-5.65%)，最劣為楊希(-20.47%)；整體最佳參數優選法最佳場次為韋恩(-5.75%)，最劣為楊希(-20.59%)；模糊規劃參數優選法之最佳場次為韋恩(-1.08%)，最劣為楊希(-17.42%)。由此可看出，模糊規劃參數優選法於洪峰流量之推估上確實可改善低估之情形，故於較重視洪峰流量推估之規劃問題中，不失為一可行之選擇。
- (4)在洪峰到達時刻誤差(ETP)上，最佳參數平均值法及整體最佳參數優選法之結果相同，貝絲、韋恩及楊希等三場颱風均無誤差，歐拉、傑魯得及黛特等颱風均誤差 1 小時；模糊規劃參數優選法於貝絲、韋恩、傑魯得、楊希及黛特等五場颱風均準確預測，僅歐拉颱風誤差 1 小時。由上述結果

可知，模糊規劃參數優選法在洪峰到達時刻誤差上亦有顯著之改善，此乃其將洪峰到達時刻誤差視為一限制條件所致，故於參數優選時能同時對洪峰到達時刻加以考量，得到相同之滿意度。

4. 在模式驗證部分，將三種參數優選方法所檢定之最佳參數組合代入模式中，以橫溪上游集水區之艾貝、琳恩及亞伯等三場颱風事件進行模式之驗證，結果如表 8 所列，並將部分結果示於圖 26 及圖 27，茲將結果分述如下：

表 8 模式套配三種參數優選方法之驗證結果表

模式	評估項目	颱風名稱		
		艾貝	琳恩	亞伯
最佳參數平均值法	效率係數(CE)	0.88	0.89	0.92
	洪峰流量誤差(%)	-6.70	-4.94	-22.64
	洪峰時間誤差(hrs)	0	-1	0
整體最佳參數優選	效率係數(CE)	0.88	0.89	0.92
	洪峰流量誤差(%)	-6.87	-5.15	-22.79
	洪峰時間誤差(hrs)	0	-1	0
模糊規劃參數優選	效率係數(CE)	0.86	0.89	0.92
	洪峰流量誤差(%)	-2.41	-2.42	-18.59
	洪峰時間誤差(hrs)	0	-1	0

(1)在效率係數(CE)方面,最佳參數平均值法與整體最佳參數優選法之結果相同,最佳場次為亞伯(0.92),最劣場次為艾貝(0.88);模糊規劃參數優選法之最佳場次為亞伯(0.92),最劣場次為艾貝(0.86)。

(2)在洪峰流量誤差(EQP)部分,最佳參數平均值法最佳場次為琳恩(-4.94%),最劣為亞伯(-22.64%);整體最佳參數優選法最佳場次為琳恩(-5.15%),最劣為亞伯(-22.79%);模糊規劃參數優選法最佳場次為艾貝(-2.41%),最劣為亞伯(-18.59%)。

(3)在洪峰到達時刻誤差(ETP)方面,三種參數優選方法所得之結果均相同,艾貝及亞伯兩場颱風均能準確預估,僅琳恩颱風誤差1小時。

整體而言,三場颱風場次之驗證結果令吾人滿意;同時,三種參數優選方法於模式驗證時所得結果之趨勢與檢定結果大致相同,故不再贅述。

5. 本模式以 ARS 法針對單場颱風事件進行最佳參數優選時,多場檢定之颱風事件所得之最佳參數值會落於優選範圍邊界上,參看表 5。研判造成此現象之原因可能有下列兩點:

(1)坡度大小對漫地流及河渠流之水流運行速度有決定性之影響,坡度較陡將有助於水流之運行。本模式所使用之坡度乃模擬實際地形變化而得之分布型坡度,而非傳統模式中所採用之平均坡度,於地形起伏較劇之上游集水區,分布型坡度將較平均坡度陡峭,故易加快水流之運行速度;同時,上游集水區亦受地表下逕流影響,其逕流歷線之洪峰出現時刻將較晚且退水亦較為緩慢。

(2)由於建立三角形不規則網格時,對河川網路之模擬上具有一容忍誤差,使模擬之河川網路不如實際河川蜿蜒,因此亦將加快水流之運行速度。

經上述原因可知,參數優選時勢必傾向於加大漫地流與河渠流之糙度係數,藉以增加漫地流與河渠流之運行時間,以延緩水

流流速。然而,由先前之敏感度分析結果已知,漫地流與河渠流之糙度係數愈大將導致洪峰流量降低,此亦可能是模式於多場颱風事件模擬時,洪峰流量部分低估之原因。

6. 模式中於漫地流之差分演算部份曾做兩個基本假設,即三角元件之坡向為漫地流流向,以及漫地流流向彼此相互平行且不交錯。由於模式之檢定與驗證結果均達相當之滿意程度,故上述兩種基本假設於本模式中可成立。

7. 由模式之檢定與驗證結果可知,模糊規劃參數優選法於洪峰流量誤差及洪峰到達時刻誤差上均較其餘兩種方法為佳,此乃模糊規劃參數優選法同時將效率係數、洪峰流量誤差與洪峰到達時刻誤差等三項指標視為限制式,因此於參數優選時三者均具有相當之影響程度,故模糊規劃參數優選法會犧牲較好之效率係數而傾向使三項指標都能達到相同之滿意程度。所以,雖然模糊規劃參數優選法所得之效率係數較差,但仍然可以滿足吾人之要求,尤其於防洪規劃上,此法可在不影響糙度係數之合理範圍情況下,提高洪峰設計量之安全度,將有利於工程上之考量。

七、結論與建議

(一) 結論

1. 以往採用三角形不規則網格模擬地形變化之分布型模式中,對於具有複雜流徑之漫地流坡度元件均以網格之坡向向量為劃分基準,採用人工方式進行網格編修,目的在使複雜之漫地流流路單一化,以便於逕流模式之建立。本研究則嘗試保留原始漫地流流路,以電腦程式自動建立逕流模式所需之差分網格資料,如此除可節省大量投入網格編修之人力外,亦為一較有效率且精確之作法,不失為另一可行且較佳之替代方案。

2. 研究中所提出之整體最佳參數優選法及模糊規劃參數優選法,其將所有檢定之颱風場次視為整體進行參數之優選,且於模式之檢定與驗證上均獲致令人滿意之結果,故將所有檢定颱

洪場次視為整體之概念確實可行，可提供參數優選時不同之選擇。

3. 模糊規劃參數優選法為一具有彈性之參數優選方法，其特性為可依照使用者之需求增減模式中之限制式，並根據吾人對研究事件之認知、偏好等訂定不同忍恕值之模糊隸屬函數，優選出考量使用者所有設置條件下滿意度最大之最佳參數值，不似傳統之參數優選方法僅能於所有檢定颱風場次中獲得一組最佳參數值。
4. 本研究中所建立之三角形不規則網格分布型降雨—逕流模式，以大漢河流域之橫溪上游集水區九場颱風洪事件進行模擬，均獲致令人滿意之結果。此外，由於本模式對研究區域之地形未做任何概念化之假設，故以運動波模式演算所得之集水區逕流分布歷程將更趨真實，如此則可依據吾人之實際需求，進一步提供集水區出口以外任意河段位置之逕流歷線，此非一般集塊模式所具有之功能，所以應可提供集水區中上游開發對水文現象影響評估上之參考。

(二) 建議

1. 由於上游集水區之截流、窪蓄及入滲等現象較顯著，導致其地表下蘊含豐富之地下水流，使水文歷程愈趨複雜，此時如僅以考量地表逕流之模式進行模擬，將不易獲得滿意之結果。因此，建議今後亦將地表下逕流部份納入模式中一起考量，如此可降低洪峰流量誤差，解決模擬時退水過快之問題，且參數優選時易落於優選範圍邊界上之情形亦可獲得改善。
2. 集水區入滲量之多寡受眾多因子影響，且彼此互為因果關係。研究中以入滲指數 ϕ 扣除基流決定有效降雨之方式雖較為簡便，但並不適用於上游集水區，因其所推求為降雨時間內之平均入滲量，與隨時間遞減之實際入滲情形並不相符，常造成逕流模擬時因前段入滲量扣除太少使得推估量高於實際觀測值，洪峰發生時段又因入滲量扣除過多導致洪峰流量低估，至於退水時段也因入滲量扣除過多致使模擬之

退水過快，故入滲指數 ϕ 應較適用於下游之都市地區。至於上游之集水區建議可改以採用入滲率隨時間遞減之入滲曲線，同時考量土壤覆蓋、臨前水文條件等影響因素，對降雨—逕流模式應用於中上游集水區之模擬結果應有所助益。

參考文獻

1. 王如意、易任：應用水文學，上、下冊，國立編譯館出版社，茂昌圖書公司發行，1990。
2. 王如意、李戎威：「核胞模式之理論研析及其應用於流域之洪水演算」，農業工程學報，第 35 卷第 4 期，pp. 1-23，1989。
3. 張乃斌：環境數學系統優化原理，新雅出版社，1997。
4. 游保杉、鄭玉荻、蔡長泰：「應用全域最佳化技巧於分布型降雨—逕流模式」，台灣水利，第 43 卷第 2 期，pp. 45-53，1995。
5. Kuchment, L. S., Demidov, V. N., Naden, P. S. and Cooper, D. M., "Rainfall-Runoff Modelling of the Ouse Basin, North Yorkshire: an Application of a Physically Based Distributed Model," Journal of Hydrology, Vol. 181, pp. 323-342, 1996.
6. Lee, D. T. and Schachter, B. J., "Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation," International Journal of Computer and Information Sciences, Vol. 9, No. 3, 1980.
7. Muzik, I., "Flood Modelling with GIS-Derived Distributed Unit Hydrographs," Hydrological Processes, Vol. 10, No. 9, pp. 1401-1409, 1996.
8. Palacios-Vélez, O. L. and Cuevas-Renaud, B., "Automated River-Course, Ridge and Basin Delineation from Digital Elevation Data," Journal of Hydrology, Vol. 86, pp. 299-314, 1986.
9. Palacios-Vélez, O. L. and Cuevas-Renaud, B., "SHIFT: a Distributed Runoff Model Using Irregular Triangular Facets," Journal of

- Hydrology, Vol. 134, pp. 35-55, 1992.
10. Tachikawa, Y., Shiiba, M. and Takasao, T., "TIN-Based Topographic Modelling and Runoff Prediction Using a Basin Geomorphic Information System," Application of GIS in Hydrology and Water Resources Management, Proceedings of the Vienna Conference, Italy, pp. 225-232, 1996.
11. Yu, P. S. and Jeng, Y. C., "A Study on Grid Based Distributed Rainfall-Runoff Models," Water Resources Management, Vol. 11, pp. 83-99, 1997.

收稿日期：民國 89 年 2 月 15 日

接受日期：民國 89 年 3 月 10 日