



土地利用改變對都會集水區逕流歷線特性之影響

Changes of Land Use on The Effects of Runoff Hydrograph Characteristics for Urbanized Watersheds

國立台灣大學
生物環境系統工程學系教授
暨水工試驗所特級研究員

王如意

Ru - yih Wang

致遠管理學院
資訊管理學系
助理教授

鄭士仁

Shin - jen Cheng

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
博士班研究生

洪君伯

Chun-po Hung

摘 要

本研究之要旨為依據水文學理論之觀點以探討逕流歷線之最佳模擬及評估不同土地利用改變對集水區水文特性之影響。研究中，提出一應用氣象水文資料之分析方法予以定量研析集水區因不同土地利用改變所導致逕流歷線各種特性之變化。

文中首先應用克利金方法估算各子集水區平均雨量，而有效降雨之推估則採用 Φ 指數法與非線性規劃方法，以作為降雨-逕流模式之輸入。於檢定過程中，採用洗牌複演進法求取線性水庫串聯理論為基礎之空間分布模式之整體最佳參數。研究中並選用民國 55 年至 80 年之 30 場降雨-逕流事件為檢定場次，民國 81 年至 86 年之 10 場事件為驗證場次，並應用迴歸分析探討五堵集水區近三十年來土地利用改變與瞬時單位歷線間之相互關係，再研析水文模式中檢定參數隨不透水面積變化之因果關係。最後，以不同重現期距與延時之設計雨型為模式輸入，藉以評估集水區因土地利用改變所導致逕流歷線特性變化之因果關係。

由不同重現期距之設計洪水歷線模擬結果顯示，鑒於五堵上游集水區三十年來土地利用之持續且顯著地改變，使得集水區逕流歷線之洪峰流量與直接逕流體積增加，但洪峰到達時刻縮短。另外，與五堵集水區過去相同之洪峰流量值之重現期距則有降低之趨勢。此項因都市化演變，引致土地利用改變而發生水文效應之因果關係，可提供台灣都會區集水區經理之參考與應用。

關鍵詞：土地利用改變，單位歷線，空間分佈模式，設計洪水歷線。

ABSTRACT

This study focuses on two important issues: optimal simulation of runoff hydrographs and evaluation of the urbanization effect on watersheds hydrological characteristics. Kriging method was implemented to calculate average rainfall for subbasins and then rainfall excesses, the input data for subsequent rainfall-runoff modelling, were determined using the Φ -index method and a nonlinear programming method. Thirty and ten historical storm events occurred in the study area were used for parameter calibration and model validation, respectively. Global optimal parameters of a linear cascade reservoir model were estimated by the shuffled complex evolution (SCE) algorithm. Model parameters are found to be highly correlated with percentage of impervious areas. Results of rainfall-runoff analysis using various design storms indicate that, after thirty years of urbanization, peak flow and volume of direct runoff have increased significantly, while time-to-peak decreased. As a result, the return period of a pre-determined design discharge will become smaller, and extra remedial measure may be needed in future.

Keywords: Landuse change, Unit hydrograph, Distributed model, Design flood hydrograph.

一、緒 論

(一) 研究動機

一般土地利用之開發對集水區可能造成水文、水理及生態系統等環境之改變，其中包含生物族群之增減[45]、水質惡化與污染[24,48,54,57]、人工渠道、都市排水管路之水力效能改變[11,58]、流路變遷[27]及降雨－逕流特性改變[37]。由於人為不透水面積覆蓋之區域增加，集水區水文特性之大部分改變為逕流體積增加、洪峰流量增加、入滲量減少、集流時間縮短[14,35,58]、基流體積減少[53]與地下水位降低[7,47]等。另外，原有洪峰流量設計值之重現期距亦會降低[45]。毫無疑問地，集水區土地開發過程確實會影響其水資源環境，甚至造成下游地區之洪水災害[31]。而都市化因子可歸因於不透水表面[6,7,43,54,57]與人口密度[13]等兩種重要之特性。

系統分析方法現今常被應用於瞭解與解決複雜之都市化水文問題。於都市水資源與管理問題間，系統分析可應用於評估都市暴雨逕流、流

速與體積。於分散式都市水資源系統所遭遇之這些問題應該注重其空間與時間之變異，但是架構具時間與空間分布之都市水資源之數學模擬系統為一複雜艱難之工作。因此，空間變異有時可予以忽略，系統本身可視為集塊型式或者集中於空間中不具任何因次之點集合，而某些空間變異可藉由下列處理方式而得知：即將整個集水區細分為數個視為集塊系統之子集水區，這些子集水區彼此連結構成整個系統模式。雖然線性水庫串聯概念與實際逕流發生情形不相似，但其參數卻可說明集水區之物理特性。簡單之水庫串聯模式如 Nash 模式[46]與更複雜之串聯分布模式，其可能具有與流域特性相關之參數，雖然概念水庫本身無法代表真實流量之分量。上述模式於兩個水庫間之作用僅為上游概念水庫之輸出為下游水庫之入流。其中，概念水庫可為線性或非線性等不同體積－流量關係之詮釋[10,41]。

降雨－逕流模式常以超滲降雨作為模式之輸入。超滲降雨（有效降雨）之定義為總降雨扣除窪蓄、截留、蒸發與入滲等降雨損失值[15,16]。過去有數個方法可根據降雨資料來估算

超滲降雨之體積與其時間分布，一般較常使用如 Horton[29]、Philip[49]或其他入滲方程式來推估超滲降雨。

具降雨空間分布概念之水文模式首先由 Dooge[20]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。而後許多水文學者陸續對其概念作部分修正[12,39]與發展類似概念如 CELMOD₁、CELMOD₂、CELMOD₃、CELMOD₄ 與 CELMOD₅ 之半分布模式[18,17,19, 37]、地貌型瞬時單位歷線水文模式[26,33,50, 51,52]、並聯型半分布模式[10,30]。

設計雨型乃依據降雨記錄應用頻率分析與降雨強度－延時－頻率公式或其他統計方法求得，其可提供流域特定延時與頻率之降雨深度或強度推估。設計雨型常與以單位歷線為基礎之水文模式配合，藉以模擬集水區逕流發生過程及推估流域出口之逕流歷線及其洪峰流量與體積。

(二) 研究目的與方法

1. 研究目的

台北都會區近幾十年來隨著經濟蓬勃發展，基隆河系沿岸人口集中，人文薈萃，土地利用大幅改變，其影響水文效應頗為明顯。土地利用開發效應之於都市集水區之主要改變乃在於直接逕流體積增加、洪峰流量加大與到達尖峰時間縮短。一般而言，人口成長、道路面積與住宅地開發之擴大、森林與農地之減少等人文、地文因子均會造成都市集水區之入滲量減少及逕流係數加大，其皆可視為土地利用發展效應之因子。然上述諸因子，彼此相互影響，產生錯綜複雜之效應，對於土地利用改變過程中所造成水文特性之變異實值得作深入之探討。

本研究係研析逕流歷線之最佳模擬與土地利用改變過程中，不透水面積之增減與代表集水區入滲能力之參數及概念化降雨－逕流模式之物理參數間之關係及其於不同重現期距之設計雨型下，所模擬洪水歷線之尖峰流量、直接逕流體積與到達尖峰流量時刻等水文量之變化趨勢，臻以提供集水區治理規劃及其各項水利工程

設計營運之參考與應用。

2. 研究方法

本研究係研析降雨與逕流之轉換關係，且依據其以物理機制為概念之定率關係從而分析集水區因土地利用改變所導致降雨－逕流關係之變化趨勢。於降雨轉變為逕流過程之平均雨量推估、降雨損失估計與水文模式轉換函數等各項細節，均採用最佳化方法或不同概念予以運算，以取得與土地利用改變具明確關係之模式參數。

考慮降雨事件為二維隨機變量域，以具有時變性之半變異圖分析降雨歷程之空間變異特性。降雨深度之推估為一線性無偏估及最小估計誤差變異數之估計值。最佳估計值可在降雨隨機變量域之空間函數－半變異圖已知之情形下獲得。然而，實際上不同時刻有不同之半變異圖，對即時降雨事件之半變異圖仍無法加以應用。因此將降雨觀測資料予以標準化，而得非時變性之尺度氣候平均半變異圖，各時刻之半變異圖則為空間中降雨分布變異數與尺度氣候平均半變異圖[9,40]，如此便可迅速獲得不同時刻之半變異圖，進而從事即時平均降雨量之推估。

入滲過程乃在於描述降水滲入土壤之經過歷程，其為水文循環重要之一部分。入滲過程大致可分為兩部分，一為降水滲入土壤表面，重新補充上層土壤水份且提供剩餘水分子予下層土壤。另一為停留於地面之水分匯集成直接逕流，流入集水區之河渠網路，然後流出集水區出口。對於降雨－逕流事件之降雨損失研析部分，本研究採用傳統具非時變性之 Φ 指數法與具時變性分布之非線性規劃方法[44]予以估算水文模式所需之有效降雨輸入。而關於土地利用改變對集水區入滲能力之影響則依據美國土壤保持署 SCS 方法[57]之曲線號碼值（value of curve number）予以分析探討。

對於降雨－逕流模式之研析則採用屬於概念化水文架構之並聯型分布線性串聯水庫概念模式[10,30]。並聯型分布線性串聯水庫概念模式乃利用一系列平行之線性水庫串聯予以研析集水區特性。串聯線性水庫之並聯個數與每一串聯之水庫個數及其特性皆可由集水區之地文特性

得知。而集水區地文資料則由地形圖或藉由地理資訊系統予以求取，其可依據 Horton-Strahler 河網級序定律[55]定義雨滴落於地面上流至出口處之所有可能流路(path)。流路個數相對於線性水庫串聯之並聯個數，每個流路之每個元件為水庫，若水庫為線性($S=kQ$)，則蓄水常數 k 之單位為時間，其代表集水區之延遲時間(lag time)[46]。

當降雨強度大於土壤入滲容量時，超滲降雨開始聚集於地表上而產生直接逕流。集水區逕流於地表之流動假設為薄膜狀態 (travel as a thin sheet of water)，其亦可稱為漫地流 (overland flow)，而經過一段距離後則與河渠匯流，其移動方式與渠道斷面形狀有關，亦稱為河渠流 (channel flow)。並聯型分布線性串聯水庫概念模式即具有漫地流與河渠流之物理特性，雖然實際流況更為複雜，但其假設可使得集水區出口逕流歷線之模擬更為容易。

並聯型分布線性串聯水庫概念模式參數之推求方法乃直接應用洗牌複演進法 (Shuffled Complex Evolution algorithm, SCE) [21,22,23,56]，取得具物理意義之參數。研究中，為探討土地利用改變對水文效應之影響程度，乃假設水文模式之參數為不透水面積百分比之函數，並應用迴歸分析分別探討颱風降雨事件之概念化模式之參數與不透水面積百分比之關係，並將迴歸方程式結果用於模擬不同重現期距、降雨延時為 48 小時之洪水歷線，藉以研析不同頻率基準下洪峰流量、直接逕流體積與到達尖峰流量時刻等相關水文量因土地利用改變而變化之趨勢。

二、區域化變數理論

降雨—逕流模式之主要目的為建立降雨與逕流間之定率關係。而集塊模式或分布模式之檢定與驗證過程，皆須先行取得研究地區之平均雨量，以為模式之輸入。本研究乃採用克利金方法計算平均雨量。克利金法係假設降雨空間之變異程度已知，經由克利金系統獲得研究地區各個雨量測站之最佳權重值，從而求取研究地區之平均雨量。克利金方法具有線性無偏估最小估計變異數之特性。

(一) 半變異圖分析

半變異圖乃空間上任意兩隨機變數之相對距離與其半變異數所構成之關係圖。其意義為任意兩隨機變數因配對距離改變，導致兩隨機變數相關性之趨勢。配對距離愈近者，相關性愈大，變異愈小；反之，距離愈遠者，則變異增加，相關性降低。半變異圖代表觀測資料之空間相關結構，其為克利金法之核心，並左右克利金法估計結果之良窳。

一般而言，理論半變異圖通常未知，故須由觀測資料予以率定，此半變異圖稱為實驗半變異圖(experimental semi-variogram)[32,34,42]，而由於觀測資料本身所具有之隨機性(randomness)，所得之實驗半變異圖會呈現不規則之現象。然從統計觀點言之，對任意配對其相對距離 h_{ij} 近似 h 者，均視為與相對距離 h 相同之配對，以增加其配對數，而使得半變異圖較具規律性。其如下式所示：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{h_{ij}=h} [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \dots\dots\dots(1)$$

式中， h 為空間中任意配對之近似相對距離； $N(h)$ 為空間中近似相對距離 h 之配對數。 $Z(x_i)$ 為第 i 點之量測值； $Z(x_j)$ 為第 j 點之量測值。於實際應用時，常以一函數關係式予以套配，其可如下表示：

$$\gamma(h) = \omega\gamma(h, a) \dots\dots\dots(2)$$

當配對之相對距離 h 增加時，其相應之半變異圖值亦隨之增加，然相對距離 h 逐漸增加至某一距離後而使半變異圖值不再增加，即半變異圖維持一定值時，此時之距離增為影響距離(range)，而相對應之半變異圖值稱為閾值(sill) [32,34,42]。

(二) 克利金系統

克利金法係利用已知觀測資料之空間統計分佈 (即半變異圖模式)，對推估區域之統計量作分析研究。基於無偏估與最小估計變異數之最佳估計條件下，解出已知資料線性組合權重值，進而推求隨機變量域 $Z(x)$ 任意未知位置之最佳線性無偏估之估計值。線性估計值 Z_k^* 為 n 個可

用資料之線性組合[32,34,42]：

$$Z_K^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \dots\dots\dots(3)$$

以半變異圖表示克利金系統(Kriging system)如下：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{\gamma}(v_i, v_j) + \mu = \bar{\gamma}(V, v_i), & i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

而克利金估計變異數 (Kriging estimated variance) 則如式(5)所示：

$$\sigma_K^2 = -\bar{\gamma}(V, V) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(V, v_i) + \mu \dots\dots\dots(5)$$

三、降雨損失估計理論

有效降雨(超滲降雨)為降雨-逕流過程之重要環節,其為大部分降雨-逕流模式之輸入,對模式推估直接逕流量之精確度甚為重要。有效降雨定義為流域內之降雨扣除各種降雨損失後之淨降雨量,其總量應與直接逕流體積一致。對於降雨損失之估計,本研究採用Φ指數法、非線性規劃方法與美國土壤保持署之 SCS 方法。其中,Φ指數法與非線性規劃模式用以比較不同方法推估之降雨損失對降雨-逕流模式模擬結果之影響程度,而 SCS 方法則用來探討集水區都市化過程中,降雨入滲過程之變化趨勢。

(一) 入滲指數

入滲指數(infiltration index)為推求某暴雨時段平均入滲率之工具。一般乃採用Φ入滲指數。Φ指數之求法為雨量強度-時間曲線,即在降雨組體圖上繪出一水平直線,使線上超滲雨量等於直接逕流。該直線與橫座標之距離,以單位時間水深表示,即為Φ指數[3,15,16]。

(二) 線性規劃模式與非線性規劃模式

在線性規劃模式(Linear Programming model, LP model) [16,44]中,利用降雨推求單位歷線,其最小化觀測值與預測值之誤差必須符合下列

條件：

$$\min Z_0 = \sum_{i=1}^I (Z_i + V_i) \dots\dots\dots(6)$$

subject to

$$P_i U_1 + P_{i-1} U_2 + \dots + P_{i-j+1} U_j + Z_i - V_i = Q_i, \\ i = 1, 2, \dots, I \dots\dots\dots(7)$$

$$\alpha \sum_{j=1}^J U_j = 1 \dots\dots\dots(8)$$

$$U_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \dots\dots\dots(9)$$

$$Z_i \geq 0 \quad V_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, I \dots\dots\dots(10)$$

式中, Z_0 為目標函數; Z_i 為第 i 時刻觀測值大於預測值時之誤差; V_i 為第 i 時刻觀測值小於預測值時之誤差; P 為超滲降雨; U 為單位歷線; Δt 為歷線時間間距; i 為降雨延時; I 為降雨總延時; j 為單位歷線延時; J 為單位歷線總延時; α 為單位轉換因子。當逕流量單位為 m^3/s 時,參數 α 為將直接逕流體積 ($m^3/s \times$ 時間) 轉換為以 mm 表示之體積,其可如下表示：

$$\alpha = \frac{1000(3600) \Delta t}{(1000)^2 A} \dots\dots\dots(11)$$

式中, Δt 為以小時表示之歷線觀測時間間距; A 為集水區面積 (km^2)。目標函數中之誤差 $Q_i - \hat{Q}_i$ 以 Z_i 及 V_i 表示,當觀測值大於預測值時 $Z_i = Q_i - \hat{Q}_i$, $V_i = 0$, 而觀測值小於預測值時 $V_i = -(\hat{Q}_i - Q_i)$, $Z_i = 0$ 。式(7)為有效降雨與直接逕流之褶合積分運算式,式(8)表示單位歷線下所包含之體積等於一單位,在此定義為 1 公分之超滲降雨深度。於線性規劃模式中,決策變數為單位歷線值 U_j , 以及誤差值 Z_i 與 V_i 。

超滲降雨 P 定義為同一時刻下之總降雨量 R 扣除降雨損失 H [44]。因此,對一降雨事件第 i 時刻之有效降雨 P_i 表示如下：

$$P_i = R_i - H_i, \quad i = 1, 2, \dots, I \dots\dots\dots(12)$$

而其有效降雨與直接逕流之褶合積分運算式為：

$$\hat{Q}_i = (R_i - H_i)U_1 + (R_{i-1} - H_{i-1})U_2 + \dots + (R_{i-j+1} - H_{i-j+1})U_j \quad \dots(13)$$

由於加入降雨損失為決策變數，原線性規劃模式成爲非線性規劃模式(Non-Linear Programming model, NLP model)，其如下表示：

$$\min Z_0 = \sum_{i=1}^I (Z_i + V_i) \quad \dots(14)$$

subject to

$$(R_i - H_i)U_1 + (R_{i-1} - H_{i-1})U_2 + \dots + (R_{i-j+1} - H_{i-j+1})U_j + Z_i - V_i = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad \dots(15)$$

$$\sum_{i=1}^I (R_i - H_i) = D \quad \dots(16)$$

$$\alpha \sum_{j=1}^J U_j = 1 \quad \dots(17)$$

$$Z_i \geq 0 \quad V_i \geq 0 \quad U_j \geq 0 \quad 0 \leq H_i \leq R_i, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad j = 1, 2, \dots, J \quad \dots(18)$$

其中， D 為直接逕流量，與總超滲降雨相等，即：

$$D = \alpha \sum_{i=1}^I Q_i \quad \dots(19)$$

而式(18)之降雨損失則限制在 0 與降雨 R_i 之間，以合乎物理意義。

(三) 美國土壤保持署 SCS 方法

土工結構物之設計與評估集水區因土地利用改變之水文效應，常依據美國土壤保持署所發展之 SCS 方法中之曲線號碼(curve number)而加以應用。曲線號碼值之變化範圍為從 0 至 100，高曲線號碼表示集水區具有較低之貯蓄能力，因而產生較大之逕流量。SCS 水文方法應用下列式子估算累積逕流深度與累積降雨深度[57]：

$$\begin{cases} \sum R_i = \frac{(\sum P_i - kS)^2}{\sum P_i + (1-k)S}, & \sum P_i > kS \\ \sum R_i = 0, & \sum P_i \leq kS \end{cases} \quad \dots(20)$$

其中，

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \dots(21)$$

式中， $\sum R_i$ 為時刻 t 之累積逕流深度； $\sum P_i$ 為時刻 t 之累積降雨深度； S 為土壤最大貯蓄容量； CN 為曲線號碼。 $I_a = kS$ 代表入滲、截留與地表貯蓄之初期降雨損失， k 值一般取 0.2。上述所有變數之單位皆為英吋(inch)，只有 CN 為無因次單位。對某一時刻 Δt 之瞬時逕流深度 R_i (inch) 與瞬時逕流量 Q_i (cfs) 可如下表示：

$$R_i = \sum R_i - \sum R_{i-1} \quad \dots(22)$$

$$Q_i = \alpha \frac{R_i}{\Delta t} A \quad \dots(23)$$

式中， A 為集水區面積(acre)； α 為單位轉換因子。

四、單位歷線理論

地表逕流為由暴雨引致逕流最重要之組成部分，流域上之降水沿地面或地下匯集至各級序河網，最後由流域出口斷面流出，為一自然現象之過程，此一過程即為逕流形成過程。地表逕流過程為一複雜之自然現象，其由許多確定與隨機因子控制。

(一) 基本原理

降雨—逕流歷程中，常將集水區視為一個系統，系統之輸入函數為降雨，而逕流為降雨於系統內部綜合運作之輸出結果。三者之關係可如下式表示：

$$Y(t) = H(t)X(t) \quad \dots(24)$$

式中， $Y(t)$ 為系統之輸出函數； $X(t)$ 為系統之輸入函數； $H(t)$ 為系統之狀態轉移函數。系統之輸入、輸出可以藉由精密儀器觀測而得知，所以系統之狀態轉移函數才是研究降雨—逕流歷程之重心所在。

(二) 瞬時單位歷線之特性

假設有效雨量延時 T 收縮至無窮小，此時單位歷線稱為瞬時單位歷線(Instantaneous Unit

Hydrograph, IUH), 可以 $U(0,t)$ 表示[3,15,16]。瞬時單位歷線只為一種假設狀況, 用以分析洪水歷線之一種觀念。由線性單位歷線之疊加原理, 當一有效降雨函數 $I(\tau)$ 發生時, 該多場延時為等無限小之有效降雨組體圖將造成一直接逕流歷線 $Q(t)$ 等於 $I(\tau)$ 與 $U(0,t-\tau)$ 乘積之積分, 此即為褶合積分(convolution integral) :

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau)U(0,t-\tau)d\tau \dots\dots\dots(25)$$

式中, τ 為褶合積分之啞默變數(dummy variable); $U(0,t-\tau)$ 為核心函數(kernel function); $I(\tau)$ 為輸入函數(input function)。

一般瞬時單位歷線乃採用概念模式(conceptual models)。此等模式可引用物理類比法或數學模擬法, 將實際集水區比擬為線性水庫、線性河渠或時間-面積圖, 其各具有不同之假設與理論根據。

(三) 蓄水常數不等之線性串聯水庫模式

若線性串聯水庫模式中, 每個線性水庫之蓄水常數不相等, 則考慮第一個線性水庫, 在某時刻瞬時降雨一單位於線性水庫中, 其出流量為:

$$U_1(t) = \frac{1}{K_1} e^{-\frac{t}{K_1}} \dots\dots\dots(26)$$

式中, K_1 : 第一個線性水庫之蓄水常數。

第一個線性水庫之瞬時單位歷線視為第二個線性水庫之入流量, 依此類推可利用數學歸納法將之整理而獲得 N 個不等蓄水常數之線性串聯模式之瞬時單位歷線之數學通式[30], 其如下表示:

$$U_n(t) = \int_0^t U_{n-1}(\tau) \frac{1}{K_n} e^{-\frac{t-\tau}{K_n}} d\tau$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{K_1} e^{-\frac{t}{K_1}}, & N=1 \\ \frac{K_1^{N-2}}{\sum_{i=1}^N \prod_{j=1, j \neq i}^N (K_i - K_j)}, & N \geq 2 \dots\dots\dots(27) \end{cases}$$

式中, K_n : 第 n 個線性水庫之蓄水常數。

五、降雨-逕流模式建立及其參數最佳化分析

不少學者曾採用多種不同模式與方法專注於研析土地利用改變對相關水文效應之影響程度, 其中以概念化降雨-逕流模式之應用最為適合[8,35]。概念化降雨-逕流模式具有物理意義明確之參數, 對於經由降雨與逕流觀測記錄而率定之物理參數, 其適合用來說明研究集水區當時之地文條件。因此, 採用此類模式予以探討土地利用開發過程中之相關水文效應, 其參數必然因集水區當時之地文狀況而有所改變, 該變化參數即可說明相關水文效應變異之因果關係。

(一) 空間分布模式

本研究採用之空間分布模式為並聯型分布線性串聯水庫概念模式, 每個子集水區(subwatershed)或核胞(cell)具有兩個參數, 其為線性水庫蓄水常數 K_o 與線性渠道蓄水常數 K_c 。線性水庫蓄水常數代表子集水區漫地流之集流時間, 而線性渠道蓄水常數代表子集水區河渠流之集流時間, 其各自具有明確之物理意義。並聯型線性串聯水庫分布概念模式之參數個數視整個流域之分割數目而定, 若流域分割成 M 個集水區, 則有 $2M$ 個參數需要率定。

假設一單位有效降瞬間均勻落於集水區, 則降雨轉換為逕流, 而在集水區中遵循多條流路流至集水區出口處。基本上, 若集水區劃分為 N 個核胞, 則有 N 條流路。以基隆河中、上游之五堵集水區為例予以說明。降雨落於各核胞上流至集水區出口處之流路有四條路徑。模式中, 可將每一流路中之各核胞之漫地流與河渠流視為不同之狀態(state), 並且將每一流路比擬為數個不同狀態串聯而成, 而每個狀態係利用一線性水庫予以比擬。因此, 每一流路之反應為數個不同之線性水庫串聯之結果, 而集水區出口處之反應為所有流路之反應且並聯線性疊加而成。對五堵集水區而言, 其模式結構示意圖可如圖 1 所示。

對流路 1 而言, 其由 5 個不同狀態之線性水庫組成, 即第 1 個核胞之漫地流與河渠流, 第 2

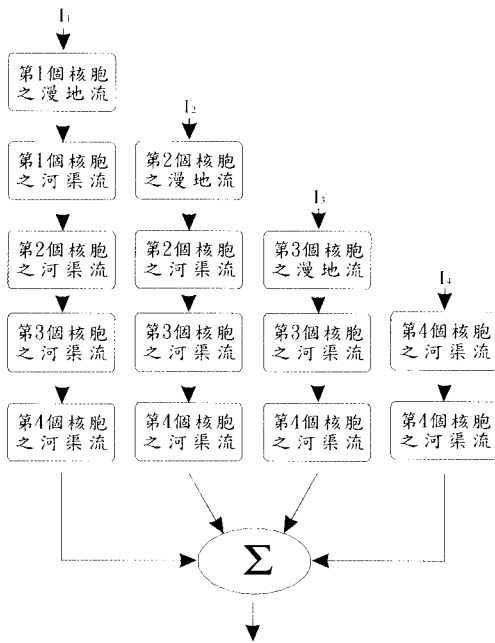


圖 1 五堵集水區之模式架構圖

個核胞之河渠流，第 3 個核胞之河渠流與第 4 個核胞之河渠流等 5 個。依據上述原則，流路 1 可視為 5 個不同線性水庫串聯而成，而每個線性水庫皆有其相對應之蓄水常數。因此，根據式(27)之不等蓄水常數之線性串聯通式，流路 1 於五堵集水區出口處之瞬時單位歷線可如下表示：

$$\begin{aligned}
 U_1(t) = & \frac{K_{O_1}^3}{(K_{O_1} - K_{C_1})(K_{O_1} - K_{C_2})(K_{O_1} - K_{C_3})(K_{O_1} - K_{C_4})} e^{-\frac{t}{K_{O_1}}} \\
 & + \frac{K_{C_1}^3}{(K_{C_1} - K_{O_1})(K_{C_1} - K_{C_2})(K_{C_1} - K_{C_3})(K_{C_1} - K_{C_4})} e^{-\frac{t}{K_{C_1}}} \\
 & + \frac{K_{C_2}^3}{(K_{C_2} - K_{O_1})(K_{C_2} - K_{C_1})(K_{C_2} - K_{C_3})(K_{C_2} - K_{C_4})} e^{-\frac{t}{K_{C_2}}} \\
 & + \frac{K_{C_3}^3}{(K_{C_3} - K_{O_1})(K_{C_3} - K_{C_1})(K_{C_3} - K_{C_2})(K_{C_3} - K_{C_4})} e^{-\frac{t}{K_{C_3}}} \\
 & + \frac{K_{C_4}^3}{(K_{C_4} - K_{O_1})(K_{C_4} - K_{C_1})(K_{C_4} - K_{C_2})(K_{C_4} - K_{C_3})} e^{-\frac{t}{K_{C_4}}} \\
 & \dots \dots \dots (28)
 \end{aligned}$$

式中， $U_i(t)$ 為流路 i 於集水區出口處之瞬時單位歷線； K_{O_i} 為第 i 個核胞之漫地流蓄水常數； K_{C_i} 為第 i 個核胞之河渠流蓄水常數。同理，流

路 2、流路 3 與流路 4 於五堵集水區出口處之瞬時單位歷線可如上述原則予以推導。

集水區出口處之出流歷線乃由各條流路之出流瞬時單位歷線與其在該集流面積上之降雨強度函數兩者經褶合積分後，再線性疊加而成。因此，集水區出口處之逕流歷線可應用下式予以計算：

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N \int_0^t I_i(\tau) U_i(t - \tau) d\tau \dots \dots \dots (29)$$

式中， $Q(t)$ 為集水區出口處之逕流歷線； $I_i(\tau)$ 為第 i 個核胞之降雨強度函數； $U_i(t - \tau)$ 為第 i 條流路於集水區出口處之出流瞬時單位歷線； N 為集水區核胞分割數目。

(二) 參數最佳化分析

由於逕流模式之參數最佳化 (parameter optimization) 常為多重區域性最佳值 (multi-local optimum) 及不連續等問題所困擾，因此，由目前常被廣泛應用之區域性參數最佳化方式，如羅森布洛克法 (Rosenbrock's method)、牛頓法 (Newton's method) 及最陡坡降法等 (steepest descent method) [38]，以尋求最佳參數值則較不易獲致滿意之結果。整體性最佳化 (global optimization) 理論於 1981 至 1990 間即有相當之進展，然卻未能於降雨-逕流模式中被廣泛地加以應用，實是受制於當時計算資源之有限，而今由於科技進步對於大量計算之負荷乃已不成問題。因此，以整體性最佳化方式從事降雨-逕流模式之最佳參數率定乃一值得深入探討課題。

本研究應用參數整體性最佳化方式之洗牌複演進法 (Shuffled Complex Evolution algorithm, SCE) [21,22,23,56] 以求取整體最佳化值。由於洗牌複演進法具有以機率性可充分提供搜尋空間之訊息，而定率性則可有效地利用反應平面之訊息以引導搜尋方向、可集中於最有可能之區域進行搜尋、各分組在全區改善方向上成系統演進以避免落入區域最佳值及由演進之觀念以較佳值取代原值等特性，因此可尋求得參數之整體最佳值。洗牌複演進法對尋求最佳參數值之演算流

程，包含洗牌複演進法與競爭複演進法（Competitive Complex Evolution algorithm, CCE）等二部份。

(三) 參數優選之目標函數

在優選過程中必須指定一特定目標函數，目標函數之功用在於使得參數最佳化過程中模式之模擬值與觀測值之誤差最小。為了避免發生偏估情事，Diskin 等[18]強調判斷模擬之完整性須指定多組目標函數而非單一目標函數。為能判定參數最佳化過程中模式模擬值與觀測值之套配程度，本研究參考 Ford 等[25]之研究報告，本研究利用下列之目標函數方式，作為從事參數最佳化時之目標函數式。所使用之目標函數如下所示[2,25]：

$$F_{obj} = \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [Q_{obj}(t) - Q_{sim}(t)]^2 \cdot W(t) \right\}^{\frac{1}{2}} + \Delta Q_p \quad \dots\dots\dots(30)$$

式中， F_{obj} 為目標函數值； T 為觀測總延時； $Q_{obs}(t)$ 為時刻 t 之觀測值； $Q_{sim}(t)$ 為時刻 t 之模擬值； $W(t)$ 為時刻 t 之權重值。

$$W(t) = \frac{Q_{obs}(t) + \bar{Q}_{obs}}{2\bar{Q}_{obs}} \quad \dots\dots\dots(31)$$

式中， \bar{Q}_{obs} ：觀測值之平均值。而 ΔQ_p 之定義如下：

$$\Delta Q_p = \begin{cases} \frac{Q_{obs,p} - Q_{sim,p}}{D^2}, & Q_{sim,p} < Q_{obs,p} \\ 0, & Q_{sim,p} \geq Q_{obs,p} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(32)$$

式中， $Q_{sim,p}$ 為模擬值之峰值； $Q_{obs,p}$ 為觀測值之峰值。

式(30)右邊第一項表示觀測歷線與模擬歷線間之均方根誤差，第二項代表觀測值之尖峰流量與模擬值之尖峰流量之誤差，對於最佳化參數值所對應之目標函數值將為最小。

(四) 模式合適性之校驗

為探討模式分析結果之合適性，本研究以效率係數 CE (coefficient of efficiency)，峰值誤差

EQ_p (error of peak discharge)與峰值到達時刻誤差 ET_p (error of time to peak discharge)等三項為校驗之標準。各項校驗標準定義如下：

1. 效率係數(CE)

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_{est}(i) - Q_{obs}(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_{obs}(i) - \bar{Q}_{obs}(i)]^2} \quad \dots\dots\dots(33)$$

式中， Q_{est} 為模式推估之流量 (m^3/s)； Q_{obs} 為觀測之流量 (m^3/s)； \bar{Q}_{obs} 為觀測流量之平均值 (m^3/s)。當 CE 值愈趨近於 1 時，表示模擬結果與實際資料愈密合，精確度愈高。

2. 洪峰流量誤差(EQ_p)

$$EQ_p(\%) = \frac{Q_{p,est} - Q_{p,obs}}{Q_{p,obs}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(34)$$

式中， $Q_{p,est}$ 為模式推估之洪峰流量 (m^3/s)； $Q_{p,obs}$ 為觀測之洪峰流量 (m^3/s)。當 EQ_p 為正值時，表示模式推估之洪峰值大於觀測之洪峰值；而 EQ_p 為負值時，表示模式推估值小於觀測值。

3. 洪峰到達時刻誤差(ET_p)

$$ET_p = T_{p,est} - T_{p,obs} \quad \dots\dots\dots(35)$$

式中， $T_{p,est}$ 為推估之洪峰到達時刻(hours)； $T_{p,obs}$ 為觀測之洪峰到達時刻(hours)。 ET_p 值(hours)愈小，表示模式洪峰到達時刻之估算愈準確。

六、研析資料之處理與土地利用改變對水文效應影響之分析

研究土地利用改變對水文效應影響必須考慮相關資料之可用性。因此，本研究乃應用瞬時單位歷線原理與特性，採用降雨－逕流模式之研析方式，並利用過去數十年之颱風事件之記錄降雨與逕流資料，予以分析集水區水文特性隨土地利用開發而改變之影響程度。另外，土地利用改變為長期性，若研究相關資料之記錄長度過於簡短，則無法確實觀察其相關改變程度。因此，本研究乃以基隆河流域之中上游集水區－五堵集水區為研析對象。研究中，探討五堵集水區自民

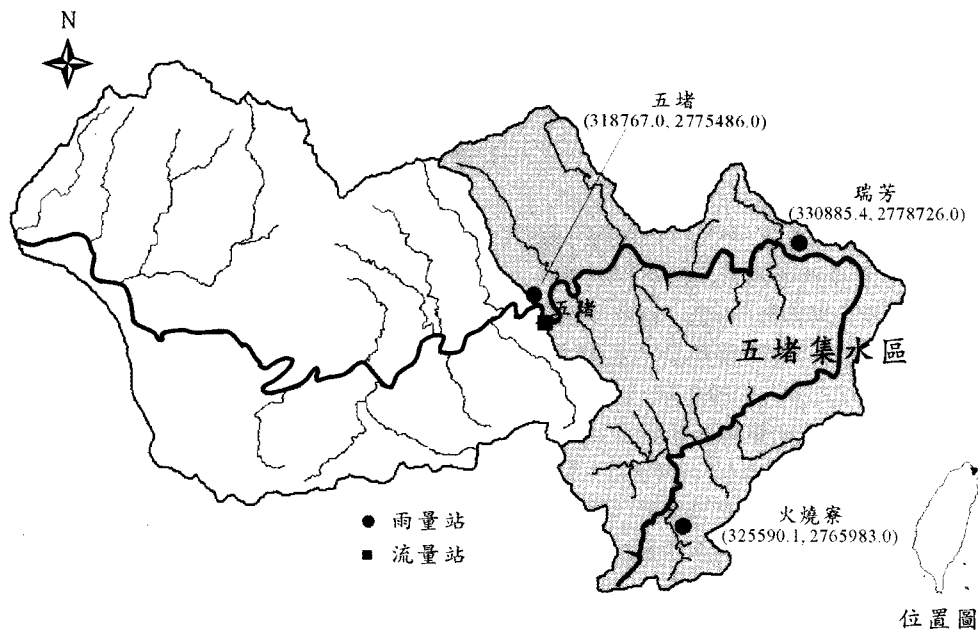


圖 2 基隆河流域圖

國 55 年至民國 86 年間土地利用因子與瞬時單位歷線間之相互關係，並探討水文模式中有關參數隨著年代變化之因果體系，進而評估不同重現期距條件下逕流相關水水量之變化，以提供淡水河流域地區各項水利工程建設之參考與應用。

(一) 研究流域簡介

基隆河發源於台北縣之菁桐山，流經瑞芳鎮、基隆市、汐止市，即流入台北市轄區內，包括內湖、南港、台北市舊市區，最後沿士林、北投南側，在關渡附近與淡水河匯流，主流長 86 公里，流域面積為 501 平方公里，為大台北地區主要河川之一。當其流經台北市轄區內，河床坡度逐漸平緩，河道蜿蜒，為一流況複雜之感潮河川。圖 2 為基隆河流域圖。

基隆河流域位於亞熱帶氣候區，冬季時受大陸性冷氣團籠罩，東北季風盛行，寒冷且多地形雨；夏季西南風吹襲，燠熱而時有陣雨。流域內東北部及北部因受東北季風之影響大，其雨量多於南部與西部，長年平均雨量以瑞芳附近為最高，各月雨量平均分配，為台灣其他地區罕見之

現象，平均年雨量為 2,865 mm，年平均逕流深度 2,177 mm，平均年逕流係數 0.76[4]。

(二) 研究資料蒐集與整理

1. 水文資料

本研究乃就基隆河流域之中上游集水區—五堵集水區之土地利用改變對水文效應影響作一系列之探討分析，主要選取五堵水文站為基隆河流域集水區之驗證流量站，分析其因土地利用開發導致相關水水量之改變。有關颱風場次共選取民國 55 年至民國 86 年間之 31 場颱風事件與 9 場暴雨事件，共計 40 場降雨—逕流事件。對於降雨之空間變異分析，採用淡水河流域之 14 個電傳雨量站予以分析克利金方法之半變異圖，而降雨—逕流模式所需之平均雨量則選取五堵集水區內經濟部水利署隸屬之瑞芳、五堵與火燒寮等三站予以計算求得。雨量測站之基本資料列如表 1 所示。

2. 土地利用開發之地文資料

土地利用開發過程主要為都市人口逐漸集中使得其相對應之地文因子變更，導致代表集水

表 1 淡水河流域水利署所屬雨量測站基本資料表

編號	站名	位置		標高 (公尺)	資料使用 年限(民國)
		東經	北緯		
1	林口(1)	121° 22'	25° 04'	250	63~86
2	三峽	121° 22'	24° 56'	33	69~86
3	石門(3)	121° 14'	23° 49'	140	67~86
4	大豹	121° 25'	24° 53'	590	64~86
5	大桶山	121° 33'	24° 52'	916	68~86
6	坪林(4)	121° 42'	24° 56'	200	67~86
7	火燒寮	121° 45'	25° 00'	380	46~86
8	瑞芳(2)	121° 48'	25° 07'	101	61~86
9	五堵	121° 42'	25° 05'	16	54~86
10	石碇(2)	121° 39'	25° 00'	140	60~86
11	中正橋	121° 31'	25° 01'	5	67~86
12	碧湖	121° 44'	24° 53'	360	60~86
13	福山	121° 30'	24° 47'	500	60~86
14	竹子湖	121° 32'	25° 10'	605	67~86

區水文特性之單位歷線改變，進而影響直接逕流之產生。基於上述觀點，應用土地利用與人口密度為集水區都市化演變之指標甚為合理，其中，土地利用為直接影響集水區水文特性之主要因子。因此，本研究乃假設水文模式之參數為土地利用開發因子（不透水面積）之函數，其可確實地觀察土地利用開發之擴展情形。

所謂地文因子於本研究乃指不透水面積，其為因土地利用開發過程中，道路、排水管路與建築物等皆會因土地利用開發之需求，所因應增加之程度。其於水文觀點上即為不透水面積增加。而不透水面積可另定義為降雨時刻，雨量未經由入滲而直接由超滲降雨轉換為直接逕流之面積。因此，本研究乃根據政府公布之資料—「台北縣統計要覽」[5]之內容，統計五堵上游集水區之養魚池、池沼、建物基地、寺廟用地、鐵道用地、道路、灌溉水路、溝渠、溜池與堤防用地等土地利用類別為不透水面積，並以百分比(%)表示，其餘土地利用類別則為透水面積。

(三) 平均雨量推估

Bastin 等[9]利用月降雨資料分析半變異圖之特性，發現半變異圖之參數 a 為非時變性，參

數 ω 為時變性。 t 時刻之半變異圖如下式所示：

$$\gamma(t, h_{ij}) = \omega(t) \gamma^*(h_{ij}, a) \dots\dots\dots (36)$$

其中， $\gamma^*(h_{ij}, a)$ 為氣候平均半變異圖； $\omega(k)$ 為尺度參數 (scale parameter)，代表各時刻之空間變異特性，其為時變性； a 為形狀參數 (shape parameter)，只與雨量測站之為置有關，其為非時變性。為了能夠快速處理半變異圖，定義各時刻 t 之空間變化平均值與變異數如下：

$$m(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p(t, x_i) \dots\dots\dots (37)$$

$$S^2(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [p(t, x_i) - m(t)]^2 \dots\dots\dots (38)$$

將各時刻 t 各雨量站之逐時觀測資料予以標準化，則無因次之實驗總平均半變異圖(dimensionless experimental global mean semivariogram)[9,40]如式(39)所示：

$$\gamma_d^*(h_{ij}, a) = \frac{1}{2T} \sum_{i=1}^T \left\{ \left[\frac{p(t, x_i) - p(t, x_j)}{S(t)} \right]^2 \right\} \dots\dots (39)$$

故各時刻 t 之理論半變異圖模式可如式(36)所示，而以尺度氣候平均半變異圖 (scaled climatological mean semivariogram) 代替氣候平

均半變異圖(climatological mean semivariogram) [9,40] :

$$\gamma(t, h_{ij}) = S^2(t) \gamma_d^*(h_{ij}, a) = S^2(t) \omega_0 h_{ij}^a \dots\dots\dots(40)$$

本研究根據下列程序計算降雨事件每小時之半變異圖，其詳細程序如下所述：

- (1)根據式(37)與式(38)計算研究地區所有飈洪事件每一時刻 t 可用雨量測站降雨量之變異數 $S^2(t)$ 與平均值 $m(t)$ 。
- (2)應用式(39)計算研究地區所有可用降雨事件唯一僅有之氣候平均半變異圖 $\gamma_d^*(h_{ij}, a)$ ，並且應用次幂模式予以套配以取得參數 ω_0 與 a 。
- (3)利用式(40)計算每小時之半變異圖，即將氣候平均半變異圖 $\gamma_d^*(h_{ij}, a)$ 乘上變異數 $S^2(t)$ 。

一般克利金法主要用途乃在於利用已知量測值推估隨機變量域中任一未知點或面之最佳線性及無偏估之推估值。若將之應用於推估平均雨量，則稱為區塊克利法 (block Kriging method)，其如下式所示：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \bar{\gamma}(V, x_i), & i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \dots\dots\dots(41)$$

式中， $\gamma(x_i, x_j)$ 為量測站 x_i 與 x_j 之半變異圖； $\bar{\gamma}(V, x_i)$ 為推估區域 V 與量測站 x_i 之平均半變異圖。於實際應用時，將推估區域 V 劃分為 M 個網格[1,40]。有關逐時平均雨量之計算程序如下所述：

- (1)將擬估計平均雨量之研究地區切割成合適大小之網格點。其中，合適大小之定義可根據式(5)之克利金估計變異數而判定。
- (2)計算任意雨量測站 x_i 與 x_j 間之半變異圖值，即式(41)等號左邊之 $\gamma(x_i, x_j)$ 。
- (3)計算擬估計平均雨量地區之網格點與每一個雨量測站 x_i 之平均半變異圖，即式(41)等號右邊之 $\bar{\gamma}(V, x_i)$ 。
- (4)求解式(41)之矩陣以取得雨量站之權重

值，然後計算研究地區之逐時平均雨量與其估計變異數。

(四) 有效降雨估計

1. Φ 指數法

Φ 指數法假設入滲率為非時變性，即降雨開始至結束期間之入滲損失為定值。雖然此假設不合理但因其非常簡易，故廣泛應用於降雨—逕流之模擬。對於 Φ 指數之求取，本研究採用二分法 (bisection method) 根據有效降雨與直接逕流體積相同之原則予以推求。

2. 非線性規劃模式

非線性規劃模式 (NLP model) 具有一線性之目標函數及數個線性與非線性之限制式，其一般形式可如下表示：

$$\min f(\mathbf{X}) \dots\dots\dots(42)$$

subject to

$$h(\mathbf{X}) = 0 \dots\dots\dots(43)$$

$$\mathbf{L} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{U} \dots\dots\dots(44)$$

式中， \mathbf{X} 為 n 個變數之向量形式； $f(\mathbf{X})$ 為目標函數； $h(\mathbf{X})$ 為 m 個等式限制式之向量形式，其可以為線性或非線性； \mathbf{L} 為以向量形式表示之 \mathbf{X} 向量之下限； \mathbf{U} 為以向量形式表示之 \mathbf{X} 向量之上限。

針對上述問題，本研究乃採用 FORTRAN IMSL 程式庫中之 DNCONF 副程式予以求解。DNCONF 副程式主要以二次規劃技術 (quadratic programming algorithm) 與有限差分梯度 (finite difference gradient) 作為非線性規劃主要求解方法，詳細理論可參考 IMSL 手冊。非線性規劃方法可同時推估時變性之降雨損失與單位歷線，進而推估直接逕流。本研究首先應用 Φ 指數法所得之超滲降雨作為線性規劃模式 (Linear Programming model, LP model) 之輸入，經由式(6)至式(10)以取得單位歷線值與推估直接逕流歷線。接著以 Φ 指數法所得之降雨損失與線性規劃模式所推估之單位歷線值作為非線性規劃模式之起始值，經由式(14)至式(19)推求時變性之降雨損失與合適

之單位歷線，並推估其逕流歷線。

(五) 美國土壤保持署 SCS 方法

美國土壤保持署 SCS 方法中之曲線號碼 CN 與集水區之土壤種類 (soil type)、土地利用及臨前土壤濕潤條件 (antecedent soil moisture condition) 有關，其適用於評估土地利用改變過程中，集水區入滲能力之變異狀況。本研究假設土地利用為曲線號碼 CN 值之主要因素，即曲線號碼 CN 為不透水面積之函數。對於資料之處理方式，Hjelmfelt[28]建議將降雨與逕流資料依序排列，以使逕流體積之頻率與降雨深度之頻率相同。經排序後，僅選用降雨與逕流之最大值予以計算曲線號碼 CN 值。Zevenbergen[59]則應用所有排序後之降雨及逕流資料，以非線性最小二乘法 (method of nonlinear least squares) 予以計算曲線號碼 CN 值。本研究則以未經排序之累積逕流體積與累積降雨深度資料，應用非線性最小二乘法予以計算曲線號碼 CN 值。針對此問題，本研究採用 FORTRAN IMSL 程式庫中之 DBCLSF 副程式予以求解上述非線性最小二乘法問題。

(六) 核胞之有效平均雨量

空間分布模式可針對不同之核胞輸入不同之有效降雨資料，以表現降雨在集水區之空間分布特性。本研究於每一核胞之有效平均降雨量之計算程序分述如下：

- (1) 針對某場降雨—逕流事件，應用區塊克利金法計算整個集水區之各時段平均降雨量，再根據體積平衡原則，將整個集水區各時段平均降雨量與基流分離後之總直接逕流量與作為 Φ 指數法與非線性規劃模式之輸入與輸出，予以求取降雨過程中各時刻之降雨損失。
- (2) 應用區塊克利金法計算集水區各個核胞每一小時平均降雨量，再將該核胞每一小時之平均降雨量予以扣除步驟 (1) 所得之降雨損失，而取得各核胞之初始有效平均降雨量 $IER_i(t)$ 。此處理方式乃假設降雨損失於集水區之空間上為均勻分布。

- (3) 考慮體積平衡，將每一核胞各時刻之初始有效平均降雨量 $IER_i(t)$ 累加轉換為初始有效直接逕流量 IEQ ，然後計算其與步驟 (1) 之總直接逕流量之差值 $DIEQ$ ，再將差值 $DIEQ$ 再轉換為以降雨深度為單位之 $DIER$ 。各核胞有效平均降雨之調整量則將差值 $DIER$ 依據其面積大小而比例分配。因此，第 i 個核胞各時刻之最終有效平均降雨量 $FER_i(t)$ 可如下式表示：

$$FER_i(t) = IER_i(t) + DIER \times \frac{A_i}{A} \dots\dots\dots(45)$$

式中， $FER_i(t)$ 為 t 時刻最終有效平均降雨量(mm)； $IER_i(t)$ 為 t 時刻初始有效平均降雨量(mm)； $DIER$ 為集水區初始有效平均降雨總量與總直接逕流量之差值(mm)； A_i 為各核胞面積 (km^2)； A 為集水區總面積 (km^2)。

(七) 模式之參數推求及其與土地利用之關係

本研究採用美國土壤保持署 SCS 方法與並聯型分布線性串聯水庫概念模式為主要研析方法，其參數分別為代表集水區土壤入滲能力之曲線號碼值 CN 及各核胞漫地流蓄水常數 K_o 與河渠流蓄水常數 K_c 。曲線號碼值 CN 採用非線性最小二乘法予以求取；並聯型分布線性串聯水庫概念模式直接以洗牌複演進參數優選法，予以優選最佳化參數。

上述兩種模式之參數分別具有集水區自然現象之特殊物理意義，其皆可用以研析集水區因都市開發而改變之相關水水量。於土地利用開發過程中，因人為需要而陸續有停車場、大型工商建築物、道路、鐵路等產生，不透水面積之改變最為明顯，其亦為影響各個水水量之直接因素。

有鑑於此，本研究乃假設不透水面積為上述模式參數之因子，即模式參數為集水區不透水面積百分比之函數。此種方式由於將概念化模式之參數定量化且其隨不透水面積之增減而具有一定之趨勢，因此易於應用於評估集水區土地利用開發對水水量之影響。然複雜之降雨—逕流過程

中，除受集水區地文條件影響外，亦可能因其他因素如降雨之氣候條件與土壤臨前濕潤情形而有所不同，每場降雨—逕流事件之參數必然相異，甚至可能差異頗大。針對此問題本研究採用下列方式處理，處理方法敘述如下：

根據模式參數值之變化趨勢，選擇一合適之不透水面積變化之區間，同一區間之參數值與不透水面積值視為相等，即將同一區間之參數值與不透水面積百分比值予以平均以代表該區間之參數與不透水面積百分比。應用迴歸分析予以定量模式參數與不透水面積之關係，而合適之區間以參數與不透水面積間之相關係數與區間樣本數目多寡為評判標準，此法稱為區間平均法。

(八) 土地利用開發對不同重現期距與延時之設計洪水歷線之影響

當上述模式參數與不透水面積之關係率定後，集水區之入滲能力與核心函數—瞬時單位歷線隨不透水面積增減之變化趨勢亦可確定，其代表集水區因土地利用開發而導致相對應水文特性之變異。然不同降雨量大小與延時等降雨條件之降雨—逕流過程，其因土地利用開發而改變之相關水文學量必然有所不同。代表集水區逕流特性之水文學量頗多，本研究考慮都市排水、防洪工程與水資源規劃等不同需求，針對直接逕流體積、洪峰到達時刻與洪峰流量等逕流特性，探討不同重現期距與降雨延時因土地利用改變而改變之逕流特性。

本研究首先依據降雨強度—延時—頻率曲線公式 (Horner 式) 之參數值[4]，應用交替區塊法 (alternating block method) [16]計算五堵集水區之五堵、瑞芳與火燒寮三個雨量站之 1.1 年、2 年、5 年、10 年、25 年、50 年、100 年與 200 年等八種不同重現期距及延時 48 小時之單站設計雨型，然後以克利金法計算五堵集水區其各核胞之平均設計雨型。另外，隨不透水面積改變而變化之降雨損失之計算則採用美國土壤保持署之 SCS 法，然後予以扣除而求得各核胞之有效平均設計雨型，以為各種降雨—逕流模式之輸入。降雨—逕流模式之參數值為前述之參

數與不透水面積率定關係 (迴歸方程式)。經由褶合積分，最後可求得隨土地利用改變之演進而改變之上述八種不同重現期距與兩種延時所形成之組合設計洪水歷線，藉以研析五堵集水區之直接逕流體積、洪峰到達時間與洪峰流量等逕流特性。

七、結果與討論

本研究主要目的為應用概念化降雨—逕流模式模擬最佳逕流歷線，並探討模式中優選出參數與土地利用之關係，進而研析代表集水區水文特性之單位歷線因土地利用改變而產生之變化，最後根據單位歷線與不透水面積之關係以評估不同降雨條件下計劃集水區因土地利用開發而改變之各種逕流特性。茲將研究過程之各種結果依序敘述如下，並分別討論之：

(一) 平均雨量與雨量測站之權重

針對集水區平均雨量之推估，本研究依據前述步驟處理 40 場颱風逐時雨量之無因次實驗半變異圖，並以次幕模式予以套配所得如下式：

$$\gamma_d^*(h_{ij}, a) = \omega_0 h^a = 0.12337h^{0.21} \dots\dots\dots (46)$$

再將五堵集水區劃分間距為 500 公尺之網格點，其總共有 928 個網格點。應用五堵、瑞芳與火燒寮等三個電傳雨量測站之降雨資料以估算五堵集水區 4 個核胞之 40 場降雨事件之逐時平均雨量，據以作為降雨—逕流模式之輸入。

於推估逐時平均雨量時，不同時刻半變異圖具有不同值。為簡化計算程序，本研究採用尺度氣候平均半變異圖之觀念，將降雨觀測資料予以標準化，而得固定參數 a 與 ω_0 。參數 $\omega(t)$ 為各時刻 t 空間中測站觀測資料之變異數 $S^2(t)$ 與 ω_0 之乘積，其代表 t 時刻降雨空間變異特性。如此可迅速計算各時刻半變異圖，進而由克利金系統決定測站權重值，以估計平均雨量。

(二) 降雨—逕流模式參數檢定

本研究為探討降雨—逕流模式參數與土地利用間之定率關係，選擇自民國 55 年至 80 年間

表 2 五堵集水區不同超滲降雨之檢定結果

颶洪名稱	Φ指數法			非線性規劃法			歷線形狀
	CE	EQp	ETp	CE	EQp	ETp	
暴雨(STORM)	0.70	-32.19	-2	0.71	-48.79	0	S
艾爾西(ELSIE)	0.79	-29.33	-1	0.90	-26.77	1	M
娜定(NADINE)	0.97	-7.94	0	0.96	-13.78	2	S
貝蒂(BETTY)	0.71	-41.00	-2	0.81	-38.70	-1	S
艾爾西(ELSIE)	0.91	-7.21	0	0.90	-19.79	1	S
琴恩(JEAN)	0.93	-20.96	0	0.90	-25.60	0	S
貝絲(BESS)	0.82	20.14	-4	0.92	-4.49	-1	M
暴雨(STORM)	0.87	-23.60	0	0.85	-36.40	1	S
魯碧(RUBY)	0.92	3.69	3	0.89	16.23	2	S
暴雨(STORM)	0.84	-22.81	1	0.85	-27.62	1	S
薇拉(VERA)	0.88	-21.11	-1	0.91	-24.45	0	S
暴雨(STORM)	0.97	-7.85	1	0.98	-7.74	1	S
安迪(ANDY)	0.93	-14.56	-1	0.94	-13.18	-1	S
西仕(CECIL)	0.92	-8.55	-1	0.95	-8.61	-1	M
暴雨(STORM)	0.79	-34.60	-1	0.82	-23.85	-1	S
暴雨(STORM)	0.82	-37.59	-1	0.89	-32.85	0	S
芙瑞達(FREDA)	0.87	-18.16	0	0.88	-24.11	0	S
傑魯得(GERALD)	0.84	-26.00	0	0.96	-17.67	0	M
比爾(BILL)	0.81	-28.48	1	0.91	-19.99	1	M
傑夫(JEFF)	0.95	-20.85	-2	0.94	-10.44	-4	M
白蘭黛(BRENDA)	0.91	-29.03	0	0.83	-23.45	-1	S
亞力士(ALEX)	0.94	-12.05	0	0.88	-0.15	-1	S
琳恩(LYNN)	0.85	-17.62	-1	0.86	-18.25	-2	M
暴雨(STORM)	0.97	-5.24	3	0.99	-7.36	3	M
歐菲莉(OFFLIA)	0.94	-18.38	-1	0.96	-16.05	-1	S
楊希(YANCY)	0.93	-13.06	0	0.93	-14.47	0	S
亞伯(ABE)	0.94	-20.89	0	0.95	-17.81	0	S
暴雨(STORM)	0.86	-16.97	0	0.86	-14.64	0	S
耐特(NAT)	0.98	-0.61	0	0.96	4.39	-1	S
露絲(RUTH)	0.94	-11.74	0	0.95	4.11	0	M
平均值	0.88	-17.49	-0.30	0.90	-17.08	-0.07	—

註：S 代表單峰事件，M 代表複峰事件

之 30 場降雨—逕流事件予以檢定合適之參數。而選用之 30 場事件中有 9 場為複峰事件，其餘為單峰事件。經由Φ指數法與非線性規劃模式等兩種方法所計算之降雨損失而依據前述處理方式以取得模式之有效降雨輸入。於參數最佳化過程中，直接以 SCE 參數優選法取得足以說明集水區水文條件之物理參數。最後，比較上述兩種不同輸入之逕流歷線模擬結果，以獲得不同土地利用改變程度之合適參數。表 2 為空間分布模式以Φ指數法與非線性規劃模式之降雨損失為依據之

檢定模擬結果。圖 3 至圖 4 為不同兩種超滲降雨之空間分布模式之部分逕流歷線檢定圖。

1. Φ指數法

效率係數方面，最高者為耐特颶洪(80/09/29)，最低者為暴雨事件(55/06/20)，其效率係數值分別為 0.98 與 0.70，30 場颶洪事件之平均效率係數值為 0.88。洪峰流量誤差方面，最佳者為耐特颶洪(80/09/29)，最差者為暴雨事件(73/06/02)，其洪峰流量誤差值分別為 -0.61%與 -37.59%，30 場颶洪事件之平均洪峰流量誤差值

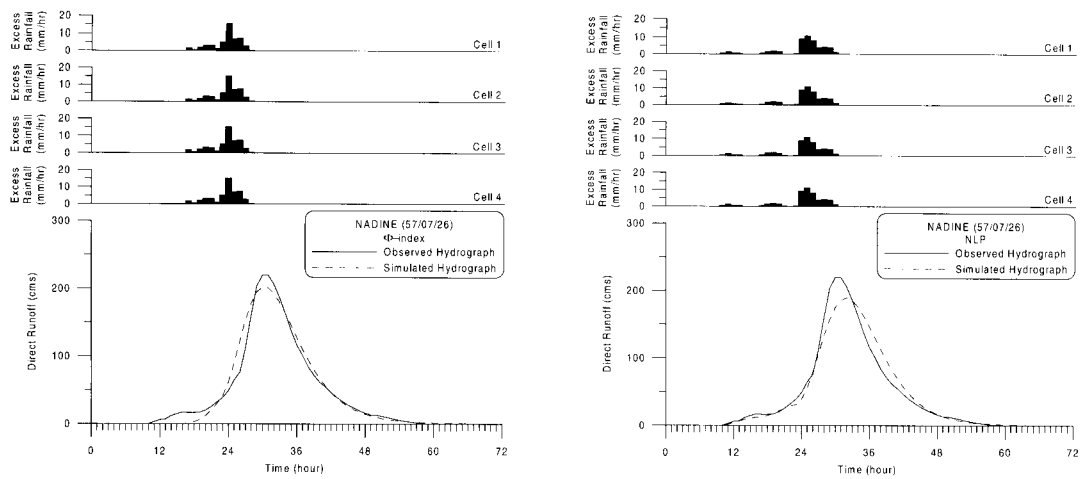


圖 3 五堵集水區綁定 (NADINE, 57/07/26) 逕流歷線檢定圖

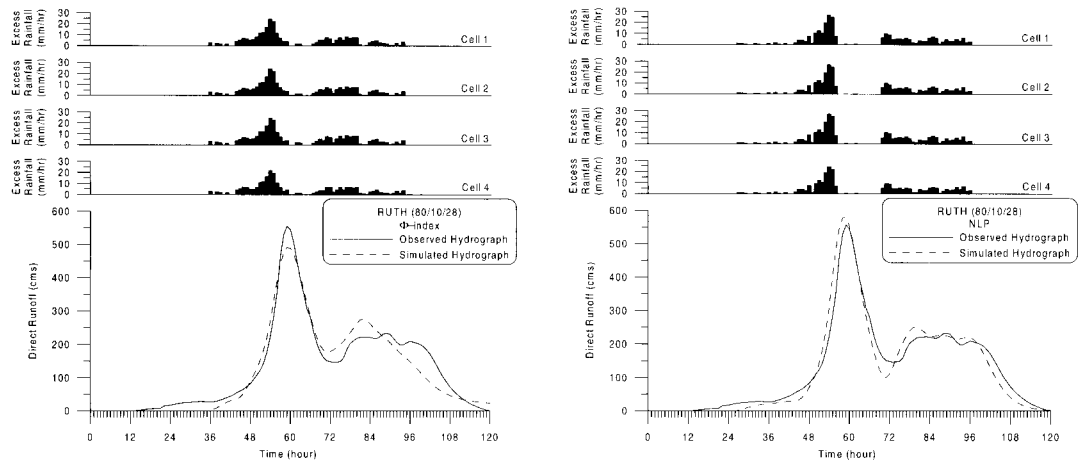


圖 4 五堵集水區露絲 (RUTH, 80/10/28) 逕流歷線檢定圖

為-17.49 %。洪峰到達時刻誤差方面，除了貝絲颱風洪(63/10/11)、魯碧颱風洪(65/07/03)與暴雨事件(77/09/29)高於 3 小時，其餘颱風事件皆小於 2 小時，30 場颱風事件之平均洪峰到達時刻誤差值為-0.30 小時。

2. 非線性規劃法

效率係數方面，最優者為暴雨事件(77/09/29)，最低者為暴雨事件(55/06/20)，其效率係數值分別為 0.99 與 0.71，30 場颱風事件之平均效率係數值為 0.90。洪峰流量誤差方面，最佳者為亞力士颱風洪(76/07/27)、最差者為暴雨事件(55/06/20)，其洪峰流量誤差值分別為-0.15 %與-

48.79 %，30 場颱風事件之平均洪峰流量誤差值為-17.08 %。洪峰到達時刻誤差方面，除了傑夫颱風洪(74/07/29)與暴雨事件(77/09/29)高於 3 小時，其餘颱風事件皆小於 2 小時，30 場颱風事件之平均洪峰到達時刻誤差值為 0.07 小時。

3. 綜合比較

於 30 場檢定事件中，有 28 場以非線性規劃法之結果為依據之模擬結果其效率係數值較 Φ 指數法者為高或約略相等。其中，4 場為複峰降雨—逕流事件。而洪峰流量誤差方面，以非線性規劃法為根據之 25 場降雨—逕流事件皆優於或約略等於 Φ 指數法者。其中，5 場為複峰事件。

4. Φ 指數法與非線性規劃法對逕流歷線模擬之影響

由於 Φ 指數法假設降雨期間入滲率為常數（非時變性），於降雨初期降雨量較小時刻中，可能高估某時刻之降雨損失，造成有效降雨為零或低估，而使得逕流歷線上升段之模擬偏低。不考慮臨前降水之情況下，初期降雨損失應較後期者為大， Φ 指數法常會高估降雨初期之有效降雨，而造成逕流歷線上升段之模擬偏高。

非線性規劃方法所得之降雨損失具有時變性，其較 Φ 指數法所得之非時變性降雨損失更合乎實際降雨—逕流歷程之特性。由圖 3 與圖 4 可知，應用非線性規劃法所模擬之直接逕流歷線較為平滑，且其與觀測直接逕流歷線亦較為吻合。但是，由於非線性規劃法視降雨損失為未知數，其理論架構較 Φ 指數法為複雜，必須花費更多運算時間。

由上述討論可知，根據非線性規劃法計算求得之降雨損失，將之應用於降雨—逕流模式之輸入，其所有檢定場次逕流模擬結果之整體表現優於 Φ 指數法。對於複峰事件具有明顯提高效率係數、降低洪峰流量誤差值，並改進到達洪峰時間誤差值，使其與觀測歷線具有較佳擬合程度之能力。而單峰或低流量事件，應用 Φ 指數法已能模擬出令人滿意之逕流歷線，使用非線性規劃法雖也能改善結果，惟改善幅度不若複峰高流量事件明顯。

(三) 模式參數與土地利用之關係

集水區土地利用開發問題一般可利用水文處理方法予以分析，由集水區之模式研析結果可經由率定降雨—逕流間之關係而探討其可能衍生之土地利用改變問題。本研究首先著重於降雨—逕流模式之最佳模擬，以取得足以說明當時集水區地文條件之模式參數，進而應用迴歸分析建立模式參數與集水區地文條件之關係。研究中，採用空間分布模式，其參數則可顯示整個集水區上、下游不同子集水區因土地利用改變導致之水文效應。由前述之結果得知，依據非線性規劃法所得之有效降雨為模式之輸入，可得逕流歷線之

較佳模擬。因此，本研究乃採用非線性規劃方法所求得之模式參數，據以研析單位歷線與不透水面積之關係。

表 3 為應用並聯型分布線性串聯水庫概念模式於五堵集水區各個核胞因不同程度土地利用改變之參數變化情形，其中，參數值為應用區間平均法將鄰近不透水面積之多場降雨—逕流事件之參數予以平均而得。參數 K_O 為各子集水區漫地流蓄水常數，代表漫地流流況，其由於土地利用改變因素隨著不透水面積之增加而具有較明顯減低之趨勢。代表子集水區河渠流蓄水常數，反映子集水區河渠流蓄水效應之參數 K_C 則呈現小幅度變化之趨勢。表 3 中，五堵集水區上游自下游之各核胞參數 K_O 之平均值分別為 2.05、2.80、3.25 與 6.7，標準偏差為 1.23、0.60、0.44 及 1.04；而參數 K_C 平均值各別為 1.46、1.84、2.50 及 2.77，而標準偏差為 0.30、0.29、0.16 與 0.24。由上述可知，參數 K_C 變化趨勢較參數 K_O 為小，此乃因為土地利用開發對應對水文之影響中，漫地流對集水區逕流特性佔主要因素。根據上述分析結果與考量減少參數個數以及避免參數間相互干擾等目的，本研究乃將各子集水區之參數 K_C 視為常數，其值分別為 1.46、1.84、2.50 與 2.77。

當參數 K_C 固定後，模式之其餘參數必須再重新率定，以確定其變化趨勢。表 4 為重新再檢定後之各子集水區參數表，表 5 則為再檢定之結果。經由三項校驗標準（ CE 、 EQ_p 與 ET_p ），表 5 之再檢定結果除了琴恩颯洪(63/07/19)之效率係數偏低外，其他場次皆有不錯之模擬效果。參數 K_{O_i} 與 K_{C_i} （ $i=1,2,\dots,4$ ）可決定代表各子集水區特性之單位歷線，而隨著個別子集水區不同之土地利用開發過程，不同子集水區特性必然具有各自之變化，即整個集水區上、下游受土地利用改變影響之程度亦迥異不同。因此，本研究乃應用迴歸分析建立各子集水區參數 K_O 與不透水面積之關係，圖 5 至圖 8 為土地利用開發過程中，四個子集水區代表漫地流參數 K_O 與不透水面積之關係。其中，迴歸方程式採用次冪型式，其乃考慮土地利用改變前期變化較土地利用改

表 3 空間分布模式之各個核胞參數表 (檢定)

核胞 1			核胞 2			核胞 3			核胞 4		
不透水面積 (%)	K_O	K_C	不透水面積 (%)	K_O	K_C	不透水面積 (%)	K_O	K_C	不透水面積 (%)	K_O	K_C
2.12	3.46	1.56	3.46	3.63	1.83	4.45	3.67	2.57	5.64	7.86	2.83
2.55	1.42	1.69	3.54	2.86	2.21	4.79	3.93	2.76	6.44	7.66	2.95
3.06	1.26	1.12	4.44	2.79	1.93	5.21	3.42	2.40	7.62	7.47	2.94
—	—	—	4.51	2.78	1.85	6.22	3.03	2.59	8.01	6.64	2.93
—	—	—	9.56	1.94	1.40	6.52	3.07	2.56	11.38	6.45	2.88
—	—	—	—	—	—	7.35	2.83	2.33	12.76	5.76	2.50
—	—	—	—	—	—	9.04	2.79	2.32	16.11	5.08	2.35
平均值	2.05	1.46	平均值	2.80	1.84	平均值	3.25	2.50	平均值	6.70	2.77
標準偏差	1.23	0.30	標準偏差	0.60	0.29	標準偏差	0.44	0.16	標準偏差	1.04	0.24

表 4 空間分布模式之各個核胞參數表 (再檢定)

核胞 1			核胞 2			核胞 3			核胞 4		
不透水面積 (%)	K_O	K_C	不透水面積 (%)	K_O	K_C	不透水面積 (%)	K_O	K_C	不透水面積 (%)	K_O	K_C
2.12	1.67	1.46	3.46	1.78	1.84	4.45	3.97	2.50	5.64	10.31	2.77
2.55	1.51	1.46	3.54	2.65	1.84	4.79	4.48	2.50	6.44	9.73	2.77
3.06	0.72	1.46	4.44	1.90	1.84	5.21	3.85	2.50	7.62	8.97	2.77
—	—	—	4.51	1.86	1.84	6.22	3.34	2.50	8.01	7.76	2.77
—	—	—	9.56	1.06	1.84	6.52	3.33	2.50	11.38	7.74	2.77
—	—	—	—	—	—	7.35	3.49	2.50	12.76	6.40	2.77
—	—	—	—	—	—	9.04	2.89	2.50	16.11	5.50	2.35

變後期為大之趨勢。四個子集水區漫地流蓄水常數 K_O 與不透水面積之關係方程式如下列四式所示：

$$\text{核胞 1: } K_{O_1} = 10.41 \cdot \text{Im}^{-2.29}, r^2 = 0.83 \dots(47)$$

$$\text{核胞 2: } K_{O_2} = 5.35 \cdot \text{Im}^{-0.71}, r^2 = 0.80 \dots(48)$$

$$\text{核胞 3: } K_{O_3} = 9.06 \cdot \text{Im}^{-0.51}, r^2 = 0.81 \dots(49)$$

$$\text{核胞 4: } K_{O_4} = 27.59 \cdot \text{Im}^{-0.57}, r^2 = 0.93 \dots(50)$$

式中, K_{O_i} 為核胞 i 之漫地流參數; Im 為集水區不透水面積百分比 (%)。

(四) 模式參數與不透水面積間關係之驗證

本研究選用自民國 81 年至 86 年之 10 場降雨—逕流事件, 以驗證研究地區模式參數之可用性。每場事件之超滲降雨採用非線性規劃方法計算, 然後應用空間分布模式, 經由褶合積分將有

效降雨轉換為直接逕流歷線。其中, 並聯型分布線性串聯水庫概念模式各核胞之河渠流參數 K_C 分別為 1.46、1.84、2.50 與 2.77, 漫地流參數 K_O 則利用式(47)至式(50)及該核胞與事件同時刻對應之不透水面積值。

表 6 為空間分布模式之驗證結果。圖 9 與圖 10 為其逕流歷線驗證圖。表 6 說明空間分布模式之效率係數所有事件皆高於 0.8; 而暴雨事件(83/06/18)、賀伯(85/07/31)、溫妮颱風(86/08/17)與安珀颱風(86/08/29)等 4 場事件之洪峰流量誤差高於 15%, 其餘事件則有令人滿意之結果; 洪峰到達時刻誤差方面所有事件皆低於 2 小時。

雖然上述模式參數可能因一些因素如水文氣象因子與臨前土壤濕潤情形, 而使得參數具有不確定性。但是, 數個參數與不透水面積迴歸關係之最低相關係數約為 0.80 (式(47)至式(50)), 其具有高度相關, 且其檢定與驗證之模擬結果良

表 5 五堵集水區空間分布模式之再檢定結果表

颶洪名稱	發生時間	CE	EQ_p	ET_p
暴雨(STORM)	55/06/20	0.73	-46.11	-1
艾爾西(ELSIE)	55/09/13	0.91	-24.51	0
娜定(NADINE)	57/07/26	0.97	-11.81	2
貝蒂(BETTY)	58/08/07	0.77	-32.66	-2
艾爾西(ELSIE)	58/09/26	0.91	-12.09	1
琴恩(JEAN)	63/07/19	0.51	0.00	-3
貝絲(BESS)	63/10/11	0.85	-9.00	0
暴雨(STORM)	64/08/04	0.86	-35.42	1
魯碧(RUBY)	65/07/03	0.79	31.43	2
暴雨(STORM)	65/08/11	0.84	-34.52	2
薇拉(VERA)	66/07/31	0.90	-29.47	1
暴雨(STORM)	66/11/15	0.97	-2.97	0
安迪(ANDY)	71/07/29	0.94	-10.99	-1
西仕(CECIL)	71/08/09	0.95	-13.82	-1
暴雨(STORM)	72/10/12	0.83	-24.43	-1
暴雨(STORM)	73/06/02	0.88	-36.37	0
芙瑞達(FREDA)	73/08/06	0.89	-20.50	0
傑魯得(GERALD)	73/08/14	0.96	-15.49	0
比爾(BILL)	73/11/18	0.91	-18.41	1
傑夫(JEFF)	74/07/29	0.86	-7.83	-5
白蘭黛(BRENDA)	74/10/03	0.84	-23.35	-1
亞力士(ALEX)	76/07/27	0.95	-14.38	0
琳恩(LYNN)	76/10/23	0.84	-17.72	-2
暴雨(STORM)	77/09/29	0.98	-8.71	3
歐菲莉(OFFLIA)	79/06/22	0.96	-18.41	-1
楊希(YANCY)	79/08/19	0.93	-22.94	0
亞伯(ABE)	79/08/30	0.95	-19.82	0
暴雨(STORM)	79/09/02	0.88	-17.84	0
耐特(NAT)	80/09/29	0.99	-7.92	0
露絲(RUTH)	80/10/28	0.96	2.80	0

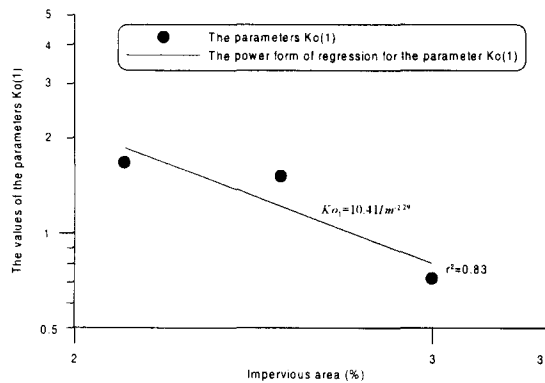


圖 5 五堵集水區核胞 1 參數 K_o 變化圖

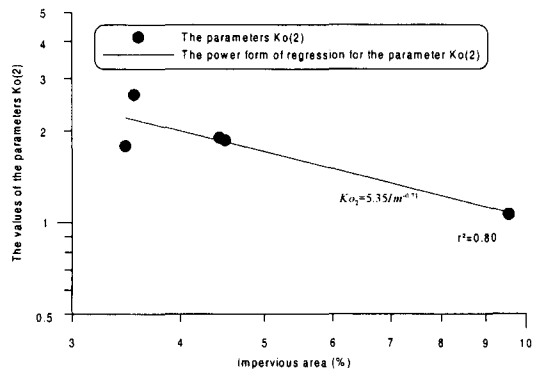


圖 6 五堵集水區核胞 2 參數 K_o 變化圖

表 6 五堵集水區空間分布模式之驗證結果表

颱風名稱	發生時間	CE	EQ_p	ET_p
寶莉(POLLY)	81/08/29	0.90	-4.48	-1
暴雨(STORM)	83/06/18	0.85	-20.92	0
道格(DOUG)	83/08/07	0.89	-5.12	-1
弗雷特(FRED)	83/08/20	0.89	13.21	0
葛拉絲(GLADYS)	83/09/01	0.86	2.80	-1
席斯(SETH)	83/10/09	0.98	2.23	1
賀伯(HERB)	85/07/31	0.96	-20.07	-1
薩恩(ZANE)	85/09/27	0.88	-9.53	0
溫妮(WINNIE)	86/08/17	0.91	-22.10	-1
安珀(AMBER)	86/08/29	0.82	-31.36	2

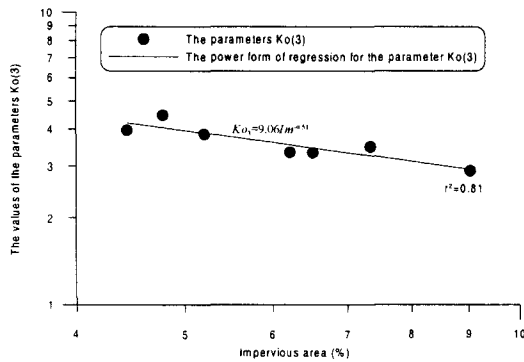


圖 7 五堵集水區核胞 3 參數 K_o 變化圖

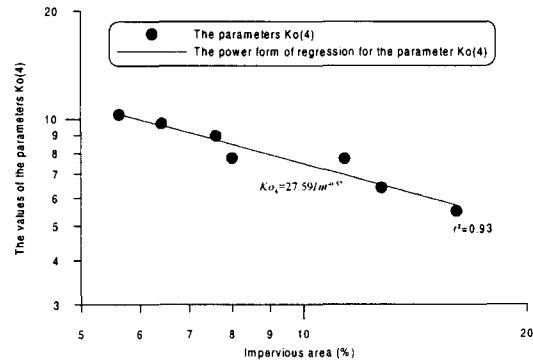


圖 8 五堵集水區核胞 4 參數 K_o 變化圖

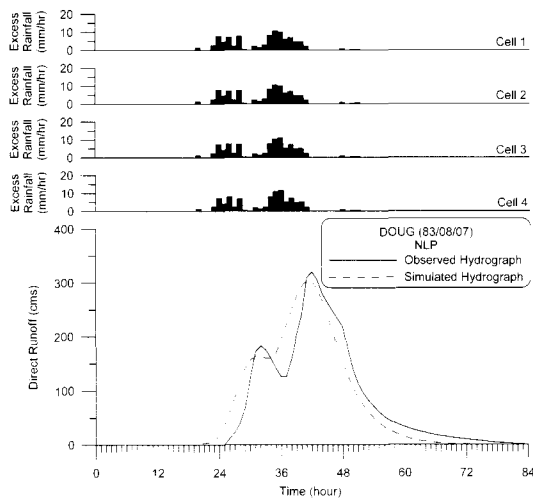


圖 9 道格颱風逕流歷線驗證圖

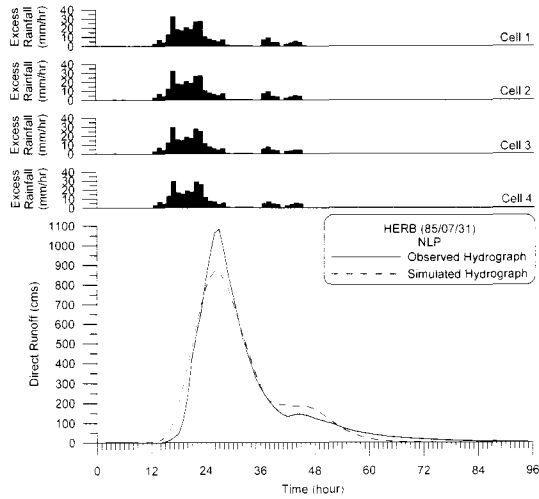


圖 10 賀伯颱風逕流歷線驗證圖

好。根據上述結果分析，不透水面積為土地利用開發過程對集水區特性之主要影響因子，而這些

分析結果可進一步應用於研析逕流歷線特性之改變。

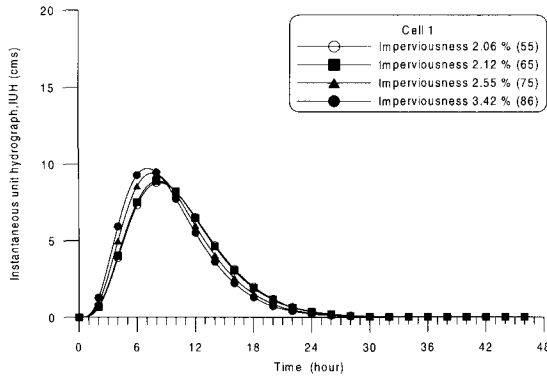


圖 11 核胞 1 之瞬時單位歷線圖

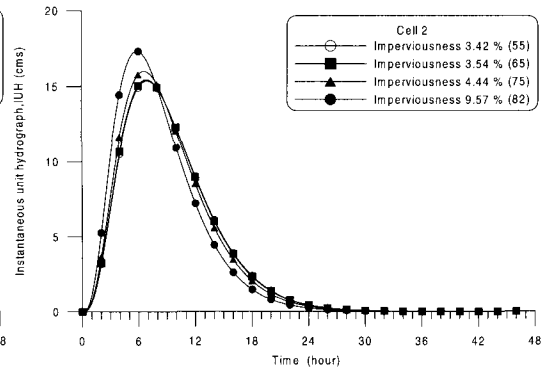


圖 12 核胞 1 之瞬時單位歷線圖

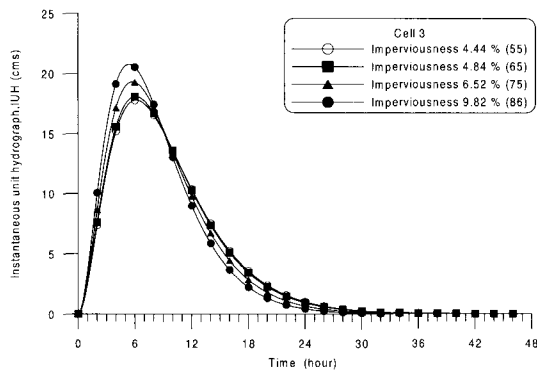


圖 13 核胞 1 之瞬時單位歷線圖

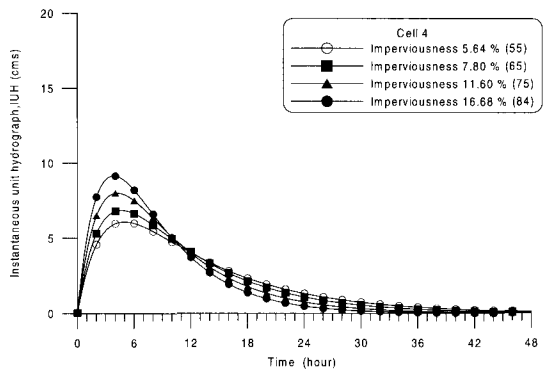


圖 14 核胞 1 之瞬時單位歷線圖

(五) 五堵集水區單位歷線特性之改變

於確定五堵集水區模式參數與不透水面積間之關係後，並聯型分布線性串聯水庫概念模式各核胞參數 K_C 為定值，而參數 K_O 則根據各核胞不透水面積改變與式(47)至式(50)予以求得其相對應之值。利用這些參數值可取得代表整個集水區或各子集水區水文特性之瞬時單位歷線，以瞭解五堵集水區於土地利用開發過程之變化。

集水區瞬時單位歷線之主要特性為洪峰流量 (peak flow) Q_m 與洪峰到達時間 (time to peak) t_m 。一旦隨著集水區土地利用發展進行之連續變化參數確定後，即可取得集水區之時變性單位歷線 (圖 11 至圖 14)，而其特性如洪峰流量與洪峰到達時間亦可同時得知。於民國 55 年至 86 年間，核胞 1 之不透水面積分別由 2.06% 增為 3.42%，其瞬時單位歷線洪峰流量由 8.78cms

增為 9.79cms，增加 1.01cms，其約 11.50%，洪峰到達時刻由 8.31 小時縮減至 6.95 小時，減少 1.36 小時，其約 16.37%；核胞 2 之不透水面積分別由 3.42% 增為 9.57%，其瞬時單位歷線洪峰流量由 15.36cms 增為 17.33cms，增加 1.97cms，其約 12.83%，洪峰到達時刻由 6.95 小時縮減至 5.88 小時，減少 1.07 小時，其約 15.40%；核胞 3 之不透水面積分別由 4.35% 增為 9.82%，其瞬時單位歷線洪峰流量由 17.71cms 增為 20.88cms，增加 3.17cms，其約 17.90%，洪峰到達時刻由 6.18 小時縮減至 5.39 小時，減少 0.79 小時，其約 12.78%；核胞 4 之不透水面積分別由 5.64% 增為 16.68%，其瞬時單位歷線洪峰流量由 6.08cms 增為 9.15cms，增加 3.07cms，其約 50.49%，洪峰到達時刻由 4.97 小時縮減至 3.84 小時，減少 1.13 小時，其約 22.74%。

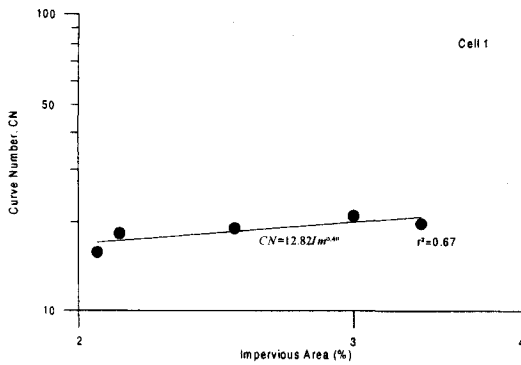


圖 15 核胞 1 曲線號碼與不透水面積關係圖

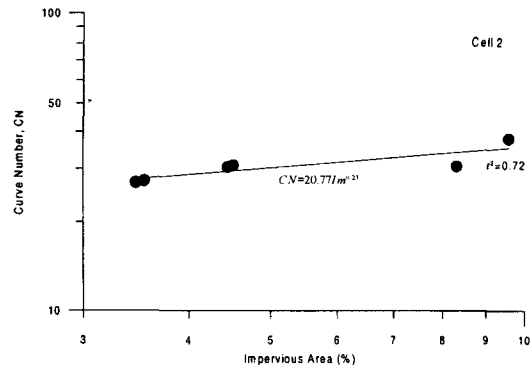


圖 16 核胞 2 曲線號碼與不透水面積關係圖

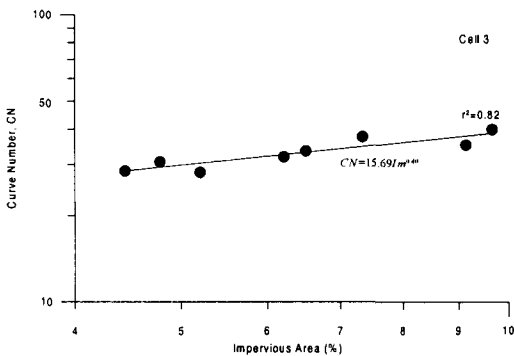


圖 17 核胞 3 曲線號碼與不透水面積關係圖

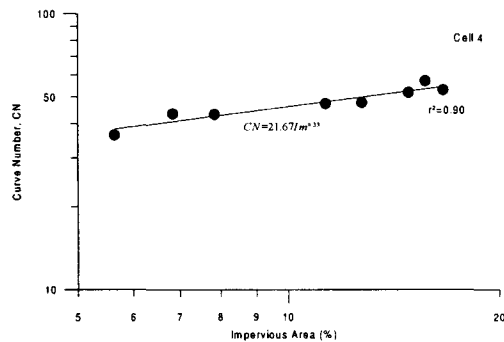


圖 18 核胞 4 曲線號碼與不透水面積關係圖

一般而言，上、下游不同位置子集水區具有不同之土地利用改變趨勢而導致不同水文特性之影響。然土地利用開發大多較集中於集水區下游地區，由上述結果得知，核胞 4 之不透水面積之改變較核胞 1 為大，而其對水文特性之影響亦較顯著，如核胞 4 瞬時單位歷線之洪峰流量改變為增加 50.49%，而核胞 1 則僅為 11.50%，並且核胞 4 瞬時單位歷線之洪峰流量增加百分比遠較其餘三個子集水區為多。

(六) 集水區土壤入滲能力之改變

集水區開發之典型變化為土地利用廣泛之人為改變，而集水區因道路、停車場等不透水面積之增加造成降雨入滲量、窪蓄截流之貯蓄量減少及漫地流快速產生等現象。針對集水區入滲能力消滅問題，本研究乃應用美國土壤保持署所提出之 SCS 方法，利用 40 場降雨—逕流事件之累積降雨與累積逕流間關係率定對應之曲線號碼

值。其中，代表集水區土壤最終貯蓄常數(ultimate storage constant) k 採經驗值 0.2。

研析過程中相同土地利用不同降雨事件之曲線號碼並不一定相等，本研究乃採用區間平均法將近似相同不透水面積之曲線號碼值予以平均，並且利用次幂迴歸方程式決定曲線號碼值與不透水面積之函數關係。圖 15 至圖 18 為 4 個子集水區不透水面積與曲線號碼之計算結果。式(51)至式(54)為曲線號碼值與不透水面積之關係方程式。

$$\text{核胞 1: } CN = 12.82 \cdot \text{Im}^{0.40}, r^2 = 0.67 \dots (51)$$

$$\text{核胞 2: } CN = 20.77 \cdot \text{Im}^{0.23}, r^2 = 0.72 \dots (52)$$

$$\text{核胞 3: } CN = 15.69 \cdot \text{Im}^{0.40}, r^2 = 0.82 \dots (53)$$

$$\text{核胞 4: } CN = 21.67 \cdot \text{Im}^{0.33}, r^2 = 0.90 \dots (54)$$

式中， CN 為 SCS 方法之曲線號碼值； Im 為集水區不透水面積百分比 (%)。

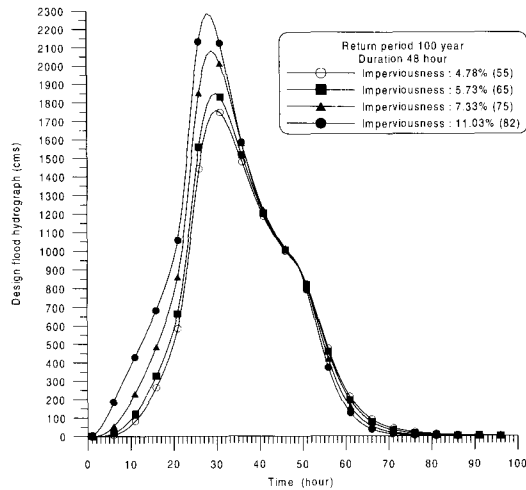


圖 19 重現期距 100 年不同土地利用洪水歷線圖

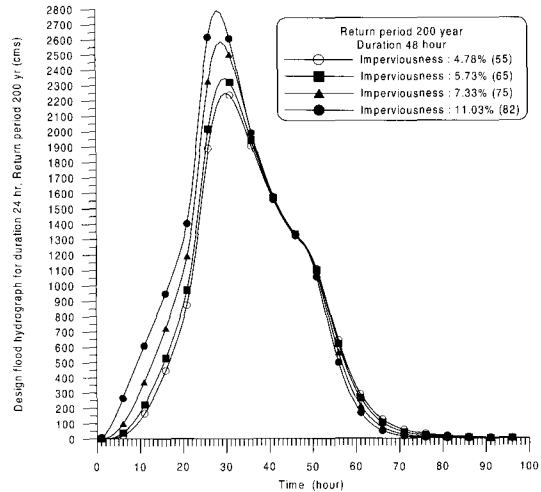


圖 20 重現期距 200 年不同土地利用洪水歷線圖

雖然較小降雨事件可能出現較高之曲線號碼值，本研究利用區間平均方法可將此特殊現象予以均化，而呈現一定之趨勢。圖 15 至圖 18 顯示隨著集水區之土地人為開發，不透水面積增加，而曲線號碼值增高，此乃表示隨著土地利用開發之進行，集水區之入滲能力漸行減弱，降雨於集水區之入滲量減少，使得更多之直接逕流量產生。接近下游地區之子集水區土地利用改變效應最為顯著，其曲線號碼值之增量亦較高。

(七) 五堵集水區洪水歷線特性之改變

於瞭解集水區因土地利用改變效應導致單位歷線特性與入滲之變化趨勢後，即可利用褶合積分將降雨轉換為直接逕流，藉以評估不透水面積改變對直接逕流歷線各種水文特性之影響程度。其中，本研究首先以 48 小時之降雨延時及 1.1、2、5、10、25、50、100 與 200 年等八種重現期距等共 16 個設計雨型作為模式之降雨輸入，而 4 個子集水區之降雨損失扣除則應用式(51)至式(54)及其對應之土地利用發展時期予以計算求得。根據上述 8 種設計雨型之有效降雨輸入，應用空間分布模式可取得五堵集水區及其各個子集水區對整個集水區出口之逕流歷線，以瞭解不同降雨條件下，逕流歷線特性於土地利用開發過程中之水量改變。

一般代表集水區逕流特性可採用不同之量化指標，本研究針對逕流歷線之重要因子如洪峰流量、洪峰到達時刻及直接逕流體積等三種逕流特性逐一探討，以利排水工程設計、水資源與防洪工程規劃之參考。圖 19 與圖 20 為八種重現期距與 48 小時延時，應用空間分布模式所模擬之不同土地利用發展階段之部分洪水歷線圖，圖中清晰地表現出五堵集水區因土地利用改變效應所導致逕流歷線之改變，其歷線形狀變得更為尖銳，而歷線尖峰具有前移趨勢。有關土地利用改變初期至目前之洪水歷線之洪峰到達時刻、洪峰流量與有效降雨體積等三種逕流特性之變化趨勢可如表 7 及圖 21 至圖 22 所示。由表 7 與圖 21 至圖 22 可知，洪峰到達時刻隨著不透水面積增加而縮短，而有效降雨體積與洪峰流量則增大，且大降雨事件（較高重現期距）有效降雨體積與洪峰流量之增加幅度較小降雨事件為大，而洪峰到達時刻則相反，小降雨事件之減少幅度較多。例如，於重現期距 200 年及降雨延時 48 小時之條件下，有效降雨體積約增加 210 mm，約為 19%；洪峰到達時刻將縮短 2 小時；而洪峰流量之增量有 550 cms 之多，其約 24%。

對於水資源規劃、排水工程設計等應用，常需分析未來上述三種逕流特性因集水區土地利用改變效應所造成之影響。針對這些需要，可直

表 7 土地利用改變前後之三種逕流歷線特性變化表

重現期距 (年)	洪峰到達時刻				洪峰流量				有效降雨體積			
	初期 4.78 % (hour)	目前 11.03% (hour)	改變量 (hour)	改變 百分比 (%)	初期 4.78 % (cms)	目前 11.03 % (cms)	改變量 (cms)	改變 百分比 (%)	初期 4.78 % (cms)	目前 11.03% (cms)	改變 量 (cms)	改變 百分比 (%)
1.1	33	28	-5	-15.15	114.15	353.73	239.58	209.89	56.52	149.93	93.40	165.25
2	31	28	-3	-9.68	322.78	676.49	353.71	109.58	145.10	271.31	126.22	86.99
5	31	28	-3	-9.68	585.71	1009.73	424.02	72.39	257.71	407.51	149.80	58.13
10	31	28	-3	-9.68	806.05	1267.48	461.43	57.25	356.61	520.62	164.01	45.99
25	30	28	-2	-6.67	1141.57	1639.88	498.30	43.65	512.87	693.07	180.20	35.14
50	30	28	-2	-6.67	1424.90	1944.69	519.79	36.48	652.11	842.95	190.84	29.27
100	30	28	-2	-6.67	1759.93	2287.86	527.93	30.00	839.00	1040.72	201.72	24.04
200	30	28	-2	-6.67	2250.06	2790.32	540.27	24.01	1123.39	1337.14	213.76	19.03

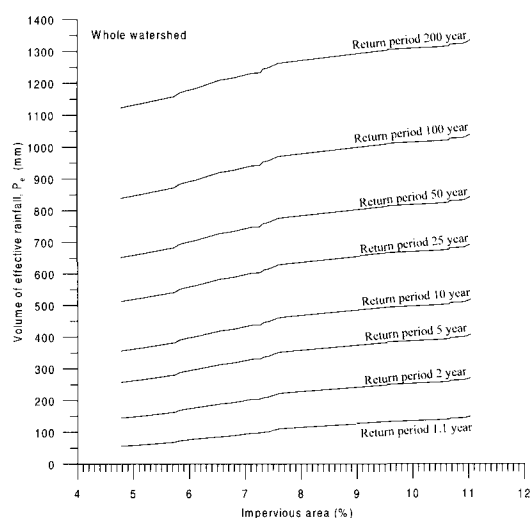


圖 21 不同土地利用有效降雨體積圖

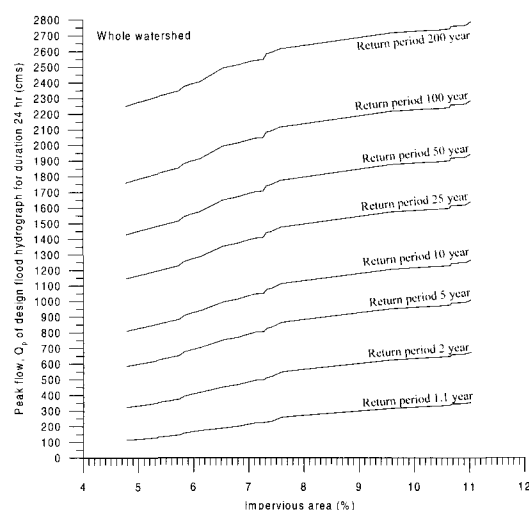


圖 22 不同土地利用洪峰流量變化圖

接預測未來集水區不透水面積百分比或由經由人口密度成長幅度，再根據人口密度與不透水面積之關係予以估計不透水面積百分比以取得模式應用之相關參數，然後使用空間分布模式模擬特定重現期距與延時之逕流歷線，即可取得其各種逕流特性。

於圖 21 與圖 22 中有效降雨體積與洪峰流量變化趨勢較不平滑，此乃因空間分布模式每個核胞之不透水面積變化不同，使得其參數 (K_D, K_C, CN) 變化亦相異。本研究以降雨—逕流模式研析未來土地利用改變導致集水區逕流係數變化情形與洪峰流量增大問題。其中，降

雨延時為 48 小時，而不透水面積百分比由 4.78% 逐漸變化至 100%。因此，隨著五堵集水區土地利用發展之不同降雨條件（八種重現期距）之逕流係數可如圖 23 所示。圖 24 為五堵集水區設計洪水歷線之洪峰流量值。

圖 23 顯示當集水區不透水面積增加時，同一重現期距降雨之逕流係數值亦增大，且降雨重現期距愈小（總降雨量愈小）其逕流係數增加幅度愈大。由圖 24 得知，若集水區不透水面積逐漸增加，則於同一降雨條件（重現期距）下，設計洪水歷線之洪峰流量具有逐漸增大之趨勢，而於不透水面積小於 50 % 之土地利用開發時

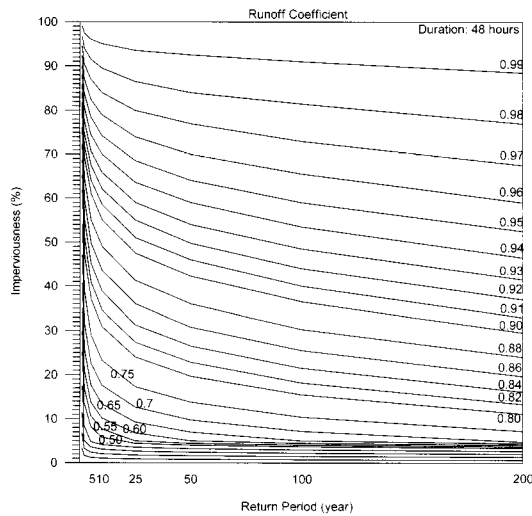


圖 23 不同重現期距與不同土地利用改變之逕流係數圖

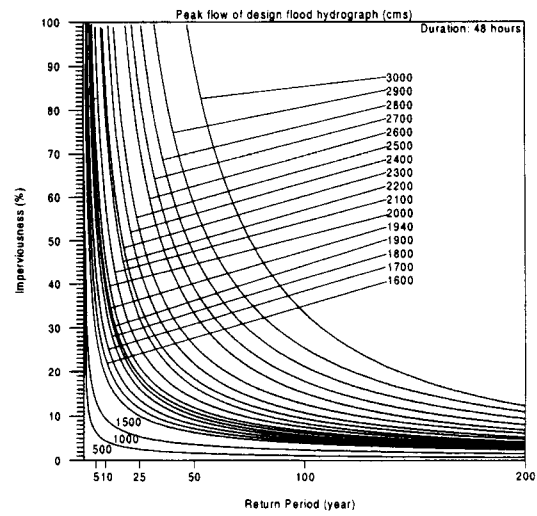


圖 24 不同重現期距與不同土地利用之洪峰流量圖

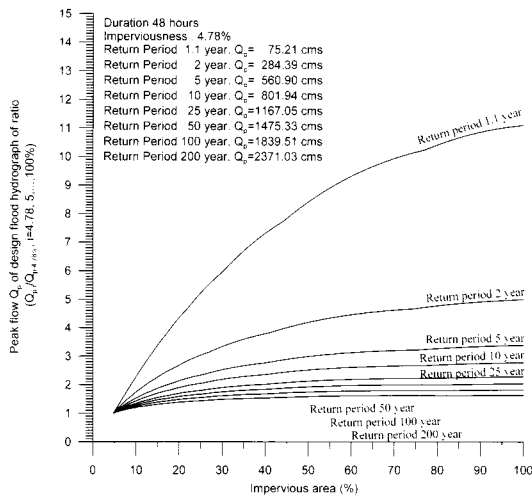


圖 25 不同土地利用與不同重現期距之洪峰流量變化圖

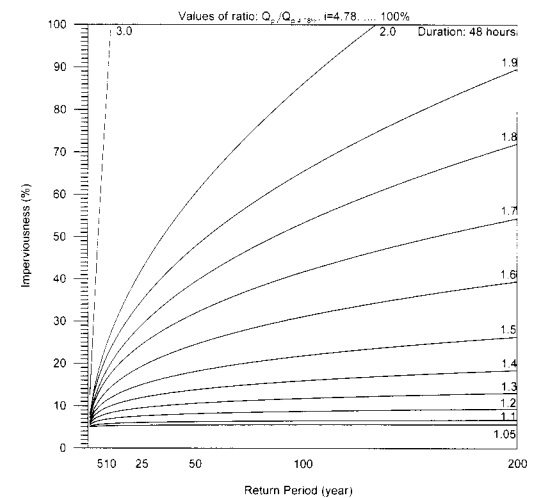


圖 26 不同重現期距與土地利用之洪峰流量比例圖

期，大降雨事件所形成之洪峰流量增量較小降雨事件為大。

設計洪水歷線之洪峰流量變化比例 ($Q_{p,i}/Q_{p,4.78\%}$, $i = 4.78, 5, \dots, 100\%$) 如圖 25 與圖 26 所示。圖 25 與圖 26 顯示土地利用開發過程中，高重現期距降雨事件所產生之洪峰流量增加比例較低重現期距之降雨事件為小，但不可忽略者為高重現期距降雨事件造成之災害遠較低重現期距降雨事件為大，且其增加之洪峰流量亦

較多。當確定未來之不透水面積時，對一具備將來發展考慮之水工結構物設計或水資源規劃方案，由圖 24 或圖 25 與圖 26 可取得相對應於土地利用之各種重現期距之洪峰流量值，此將有利於規劃地區之未來土地利用發展趨勢。

(八) 五堵集水區土地利用改變效應對洪水重現期距之影響

由前述得知，隨著集水區土地利用之發展，

洪水歷線之形狀隨之改變，洪峰流量亦隨著增大。此乃衍生一問題，即過去之一定重現期距降雨條件之洪峰流量值，其原有之重現期距經集水區土地利用開發後之改變值應為若干？該問題可依據圖 24 以圖解法方式取得改變值。由圖 24 得知，隨著集水區土地利用改變之進行，與過去相同洪峰流量之重現期距確實有減少之趨勢，而減少之幅度則因不同降雨條件而異。

八、結論與建議

1. 本研究應用克利金法中尺度氣候平均半變異圖之觀念使代表空間變異特性之半變異圖具有時變性及簡化計算程序之優點。對於即時降雨事件之研析，祇需求得各降雨時刻所有測站雨量之空間變異數，再結合理論半變異圖模式，即可迅速地推估出計劃集水區之平均雨量。
2. 本研究採用以線性串聯水庫概念為基礎且具空間分布特性之降雨—逕流模式。具有物理概念之線性水庫串聯水文模式易於闡釋因集水區土地利用改變效應而導致逕流歷線改變之影響。由檢定與驗證之模擬結果得知，應用非線性規劃方法所得之降雨損失具有時變性，不似 Φ 指數法所得之非時變性降雨損失，其與實際降雨—逕流歷程更為吻合，且其所模擬之逕流歷線亦較接近觀測歷線。採用非線性規劃方法計算求得之有效降雨應用於空間分布模式之模擬結果整體表現優於 Φ 指數法，對於複峰降雨—逕流事件效果更為顯著。
3. 隨著集水區土地利用開發而不透水面積逐漸增加，空間分布模式（並聯型分布線性串聯水庫概念模式）各子集水區之參數 K_0 具有明顯減少之趨勢，而各子集水區之參數 K_C 則變化不顯著。研析過程中，各子集水區之參數 K_C 皆予以固定以利探討集水區內所代表瞬時單位歷線之特性，其優點為減少參數個數與避免參數間關係非完全獨立。由上述分析結果證實隨著土地利用改變，集水區單位歷線之形狀亦隨之改變，有關土地利用開發效應所導致之變化可藉由研析水文模式參數之改變趨勢而得知。
4. 由多場颱風場次之檢定與驗證結果顯示五堵集水區瞬時單位歷線之洪峰流量增加 18%，洪峰到達時刻縮短 1 小時。而上、下游不同子集水區因土地利用改變不同導致其瞬時單位歷線之洪峰流量之增量依上游至下游之順序分別為 12%、13%、18%與 50%，洪峰到達時刻均約縮短 1 小時。此乃表示五堵集水區愈往下游都市化開發愈顯著，下游集水區特性變化較上游地區者為大。
5. 經美國土壤保持署 SCS 方法分析結果證實，五堵集水區歷經 30 年來之都市化演變與發展，道路、停車場與大型工商建築物等不透水面積之大幅度增加，使得集水區於降雨期間入滲量與地表貯蓄量顯著減少，而造成較過去更快、更多之直接逕流產生。上述變化愈往下游地區愈形明顯。
6. 本研究應用不同重現期距與 48 小時降雨延時之設計暴雨，作為降雨—逕流模式之輸入而模擬不同降雨條件下之各種設計洪水歷線。結果顯示高重現期距降雨事件之有效降雨體積及設計洪水歷線洪峰流量之增量較低重現期距降雨事件者為大；而小降雨事件之洪峰到達時刻縮短幅度較多。
7. 過去洪峰流量之重現期距，歷經集水區土地利用改變後，與以往相同洪峰流量數值之重現期距，隨著都市化發展將會逐漸地降低。其重現期距降低幅度則視不同降雨條件而異。
8. 依據本研究對集水區特性與逕流歷線之研析程序與結果，僅需得知不透水面積之變化趨勢，即可獲取水文模式應用之參數，進而評估集水區因土地利用改變對水文特性之影響程度。其研析結果於都市排水工程、水資源運用等工程規劃設計助益頗多。茲建議重要都會集水區宜普遍建立合適之推求降雨—逕流間定率之水文模式機制且定期更新模式參數與土地利用改變之關係，進而掌握其逕流歷線特性隨時間之變化趨勢。

參考文獻

1. 王如意、李如晃：「颱風逐時區域平均雨量最佳化估計之研究」，農業工程學報，第 39 卷第 3 期，p. 13- p. 30，1993。
2. 王如意、李戎威：「空間分布地表逕流多層核胞模式之研究及其應用」，行政院農業委員會研究計畫報告，1989。
3. 王如意、易任：《應用水文學》，上、下冊，國立編譯館出版，茂昌圖書有限公司發行，1979。
4. 王如意、鄭士仁等：「台北防洪整體檢討計畫(三)」，經濟部水資源局研究計畫報告，1998。
5. 台北縣政府：「台北縣統計要覽」，1967~1998。
6. Andersen, C. T., I. D. L. Foster and C. J. Pratt, "The Role of Urban Surfaces (Permeable Pavements) in Regulating Drainage and Evaporation: Development of A Laboratory Simulation Experiment," *Hydrological Processes*, **13**, 597-609,1999.
7. Arnold, C. L. J. and C. J. Gibbons, "Impervious Surface Coverage—The Emergence of A Key Environmental Indicator," *Journal of The American Planning Association*, **62**, 243-256, 1996.
8. Aronica, G. and M. Cannarozzo, "Studing The Hydrological Response of Urban Catchments Using A Semi-Distributed Linear Non-Linear Model," *Journal of Hydrology*, **238**, 35-43, 2000.
9. Bastin, G., B. Lorent, C. Duque and M. Gevers, "Optimal Estimation of The Average Rainfall and Optimal Selection of Raingauge Locations," *Water Resources Research*, **20(4)**, 463-470, 1984.
10. Bérod, D. D., V. P. Singh, D. Devred and A. Musy, "A Geomorphologic Non-Linear Cascade (GNC) Model for Estimation of Floods from Small Alpine Watersheds," *Journal of Hydrology*, **166**, 147-170, 1995.
11. Booth, D., "Stream Channel Incision Following Drainage Basin Urbanization," *Water Resources Bulletin*, **26**, 407-417, 1990.
12. Boyd, M. J., "A Storage Routing Model Relating Drainage Basin Hydrology and Geomorphology," *Water Resources Research*, **14(5)**, 921-928, 1978.
13. Changnon, D., D. Fox and S. Bork, "Differences in Warm-Season, Rainstorm-Generated Stormflows for Northeastern Illinois Urbanized Basins," *Water Resources Bulletin*, **32(6)**, 1307-1317, 1996.
14. Cheng, S. J. and R. Y. Wang, "An Approach for Evaluating The Hydrological Effects of Urbanization and Its Application," *Hydrological Processes* **16(7)**, 1403-1418, 2002.
15. Chow, V. T. (Editor), *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1964.
16. Chow, V. T., D. R. Maidment and L. W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988.
17. Diskin, M. H. and E. S. Simpson, "A Quasi-Linear Spatially Distributed Cell Model for The Surface Runoff System," *Water Resources Bulletin*, **14**, 903-908, 1978.
18. Diskin, M. H. and E. Simon, "A Procedure for Selection of Objective Function for Hydrologic Simulation Models," *Journal of Hydrology*, **34**, 129-149, 1977.
19. Diskin, M. H., "A Rational Routing Element for Watershed Cell Methods," *Journal of Hydrology*, **155**, 93-101, 1994.
20. Dooge, J. C. I., "A General Theory of The Unit Hydrograph," *Journal of Geophysical Research*, **64(1)**, 241-256, 1959.
21. Duan, Q., S. Sorooshian and V. K. Gupta, "Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models," *Water Resources Research*, **28(4)**, 1015-1031, 1992.

22. Duan, Q., S. Sorooshian and V. K. Gupta, "Optimal Use of The SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models," *Journal of Hydrology*, **158**, 265-284, 1994.
23. Duan, Q., V. K. Gupta and S. Sorooshian, "Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization," *Journal of Optimization Theory Application*, **76(3)**, 501-521, 1993.
24. Estebe, A., J. M. Mouchel and D. R. Thevenot, "Urban Runoff Impacts on Particulate Metal Concentrations in The River Seine," *Water, Air and Soil Pollution*, **108**, 83-105, 1998.
25. Ford, D. T., E. C. Morris and A. D. Feldman, *Corps of Engineers Rpxperience with Automatic Calibration of A Precipitation-Runoff Model in Water and Land Resource System*, (Y. Haimes and J. Kindler, eds.), Pergamon Press, New York, 1980.
26. Franchini, M. and P. E. O'Connell, "An Analysis of The Dynamic Component of The Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph," *Journal of Hydrology*, **175**, 407-428, 1996.
27. Gremillion, P., A. Gonyeau and M. Wanielista, "Application of Alternative Hydrograph Separation Models to Detect Changes in Flow Paths in A Watershed Undergoing Urban Development", *Hydrological Processes*, **14**, 1485-1501, 2000.
28. Hjelmfelt, A. T., "Empirical Investigation of Curve Number Technique," ASCE, Journal of The Hydraulics Division, 106, 1471-1476, 1980.
29. Horton, R. E., "An Approach toward A Physical Interpretation of Infiltration Capacity," *Soil Science Society of America Proceedings*, **5**, 399-417, 1940.
30. Hsieh, L. S. and R. Y. Wang, "A Semi-Distributed Parallel-Type Linear Reservoir Rainfall-Runoff Model and Its Application in Taiwan," *Hydrological Process*, **13**, 1247-1268, 1999.
31. Hvitved-Jacobsen, T. and Y. A. Yousef, "Analysis of Rainfall Series in Urban Drainage Control System," *Water Research*, **22**, 491-496, 1988.
32. Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M., *Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 1989.
33. Jin, C. X., "A Deterministic Gamma-Type Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Based on Path Types," *Water Resources Research*, **28(2)**, 479-486, 1992.
34. Journel, A. G. and Huijbregts, C. J., *Mining Geostatistics*, Academic Press, New York, 1978.
35. Kang, I. S., J. I. Park and V. P. Singh, "Effect of Urbanization on Runoff Characteristics of The On-Cheon Stream Watershed in Pusan, Korea," *Hydrological Processes*, **12**, 351-363, 1998.
36. Karnieli, A. M., M. H. Diskin and L. J. Lane, "CELMOD5—A Semi-Distributed Cell Model for Conversion of Rainfall into Runoff in Semi-Arid Watersheds," *Journal of Hydrology*, **157**, 61-85, 1994.
37. Krug, W. R., "Simulation of Temporal Changes in Rainfall — Runoff Characteristics, Coon Creek Basin, Wisconsin," *Water Resources Bulletin*, **32(4)**, 745-752, 1996.
38. Kuester, J. L. and J. H. Mize, *Optimization Technique with Fortran*, 1973.
39. Laurenson, E. M., "A Catchment Storage Model for Runoff-Routing," *Journal of Hydrology*, **2**, 241-256, 1964.
40. Lebel, T., G. Bastin, C. Obled and J. D. Creutin, "On The Accuracy of Areal Rainfall Estimation: A Case Study," *Water Resources Research*, **23(11)**, 2123-2134, 1987.
41. Maheshwari, B. L., "Values for The Exponent of The Storage-Discharge Equation in Runoff-Routing Models," *Journal of Hydrology*, **163**, 95-106, 1994.

42. Matheron, G., The Theory of Regionalized Variables and Its Application, Cahiers du Centre de Morphologic Mathematique, Ecole des Mines, Fountainbleau, France, 1971.
43. Matheussen, B., R. L. Kirschbaum, I. A. Goodman and G. M. O'Donnell, "Effects of Land Cover Changes on Streamflow in The Interior Columbia River Basin (USA and Canada)," *Hydrological Processes*, **14**, 867-885, 2000.
44. Mays, L. W. and C. K. Taur, "Unit Hydrographs via Nonlinear Programming," *Water Resources Research*, **18(4)**, 744-752, 1982.
45. Moscrip, A. L. and D. R. Montgomery, "Urbanization, Flood Frequency, and Salmon Abundance in Puget Lowland Streams," *Journal of The American Water Resources Association*, **33(6)**, 1289-1297, 1997.
46. Nash, J. E., "The Form of The Instantaneous Unit Hydrograph," *IAHS Publications*, **45**, 112-121, 1957.
47. Ng, H. Y. F. and J. Marsalek, "Simulation of The Effects of Urbanization on Basin Streamflow," *Water Resources Bulletin*, **25(1)**, 117-124, 1989.
48. Peters, N. E. and S. J. Kandell, "Evaluation of Stream Water Quality in Atlanta, Georgia and The Surrounding Region (USA)," *IAHS-AISH Publication*, **259**, 279-290, 1999.
49. Philip, J. R., "The Theory of Infiltration: I. The Infiltration Equation and Its Solution," *Soil Science*, **83(5)**, 345-357, 1957.
50. Rodríguez-Iturbe, I. and J. B. Valdés, "The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response," *Water Resources Research*, **15(6)**, 1409-1420, 1979.
51. Rodríguez-Iturbe, I., G. Devoto and J. B. Valdés, "Discharge Response Analysis and Hydrologic Similarity: The Interrelation between The Geomorphologic IUH and The Storm Characteristics," *Water Resources Research*, **15(6)**, 1435-1444, 1979.
52. Rodríguez-Iturbe, I., M. G. Sanabria and G. Caamaño, "On The Climatic Dependence of The IUH: A Rainfall-Runoff Analysis of The Nash Model and The Geomorphoclimatic Theory," *Water Resources Research*, **18(4)**, 887-903, 1982.
53. Simmons, D. L. and R. J. Reynolds, "Effects of Urbanization on Base Flow of Selected South-Shore Streams," Long Island, New York. *Water Resources Bulletin*, **18**, 797-805, 1982.
54. Singh, R. B., "Land Use/Cover Changes, Extreme Events and Ecohydrological Response in The Himalayan Region," *Hydrological Processes*, **12**, 2043-2055, 1998.
55. Smart, J. S., "Channel Networks," *Advances in Hydrosience*, **8**, 305-346, 1972.
56. Sorooshian, S., Q. Duan and V. K. Gupta, "Calibration of Rainfall-Runoff Models: Application of Global Optimization to The Sacramento Soil Moisture Accounting Model," *Water Resources Research*, **29**, 1185-1194, 1993.
57. Tsihrintzis, V. A. and R. Hamid, "Urban Stormwater Quantity/Quality Modeling Using The SCS Method and Empirical Equations," *Journal of The American Water Resources Association*, **33(1)**, 163-176, 1997.
58. Wong, T. S. W. and Y. Li, "Theoretical Assessment of Changes in Design Flood Peak of An Overland Plane for Two Opposing Urbanization Sequences," *Hydrological Processes*, **13**, 1629-1647, 1999.
59. Zevenbergen, A. W., "Runoff Curve Numbers for Rangeland from LANDSAT data," *USDA-Agricultural Research Service, Hydrological Laboratory Technical Report HL85-1*, Beltsville, Maryland, 71 pp., 1985.

收稿日期：民國 91 年 9 月 16 日

接受日期：民國 91 年 10 月 4 日