

颱風時期石門水庫集水區即時逕流預測模式建立

Development of Real-time Runoff Forecasting System During Floods for Shihmen Watershed

國立臺灣海洋大學
河海工程學系
博士後研究員

黃仁國

Jen-Kuo Huang

國立臺灣海洋大學
河海工程學系
碩士

詹雅馨

Ya-Hsin Chan

國立臺灣海洋大學
河海工程學系
教授

李光敦*

Kwan Tun Lee

摘 要

近年來受全球氣候變遷影響，襲臺之颱風豪雨等事件頻率漸增，其所挾帶之豐沛雨量，常導致水庫上游入流之逕流洪峰及含砂量暴增，繼而使得原水濁度上昇，衝擊民生用水。本研究之目的，即為建立颱風時期水庫即時逕流預測系統，以供主管機關掌握上游入流資訊，並藉以降低洪氾風險及提高水資源利用效益。

研究中所建置之系統，首先以前期降雨紀錄，配合灰色理論 GM(1,1)模型預測未來 1 至 3 小時之降雨量，而後以荷頓公式並參照即時降水指標建議之初始入滲率，計算有效降雨，上述即時降水指標亦用於推估集水區內時變性之土壤飽和面積比例，以用於分別推估地表及地下逕流生成量。經運動波-地貌瞬時單位歷線模式演算，即可完成未來 1 至 3 小時之逕流預測；此外，研究中參考即時流量觀測資料，藉由一流量校正機制，以提高預測結果之準確度。經於石門水庫上游震雲流量站實測顯示，針對未來 1 至 3 小時降雨預測，大致能適切掌握其變化趨勢，惟長期距預測結果之準確性仍有待提昇。另於逕流推估上，不論於尖峰流量或整體歷線漲退，經校正後大抵能獲得良好結果。研究中亦針對模式演算提供一操作流程，以供主管機關於即時應用時之參考。

關鍵詞：即時逕流預測，運動波-地貌瞬時單位歷線模式，即時降水指標，灰色理論。

ABSTRACT

Due to the influence of climate change over the world, the typhoons and violent storms frequently invade Taiwan in recent years. The abundant rainfall often results in considerable amount of runoff and sediment to flow into downstream reservoir, causing

*通訊作者，國立臺灣海洋大學河海工程學系教授，202 基隆市中正區北寧路 2 號，ktlee@mail.ntou.edu.tw

the raw water to be highly turbid and affecting the public water supply. In this study, a real-time runoff forecasting system was developed to provide sufficient inflow information for authorities to mitigate the potential flooding risk and optimize the utilization of water resources.

The developed system uses grey theory GM(1,1) model cooperating with the anterior rainfall records to predict the incoming rainfall in next 1-3 hrs. The effective rainfall was determined by Horton's formula, in which the value of initial infiltration rate was estimated according to a current precipitation index (CPI). The CPI was also utilized to conclude the ratios of saturated and unsaturated zones in watershed where the surface and subsurface flows yielded, respectively. Then the runoff in next 1-3 hrs was forecasted using the kinematic-wave-based geomorphologic instantaneous unit hydrograph model and was further corrected by adopting an updating algorithm based on the on-site flow observation. As applying the developed system to Hsiayun watershed located upstream of Shihmen Reservoir, the variation of rainfall in next 1-3 hrs was adequately predicted; however the precision of longer lead-time results need further improving. The forecasted peak discharge, rising and recession limbs of runoff hydrograph were quite satisfactory after being corrected. In conclusion, a flowchart of the developed system was provided to authorities for real-time operation in future.

Keywords: Real-time flood forecast, KW-GIUH model, current precipitation index, grey theory.

一、緒 論

1.1 前言

石門水庫集水區位於臺灣北部淡水河流域大漢溪上游，集水區面積約 763.4 平方公里，原建庫主要標的為灌溉與防洪，目前因應民生及公共給水之功能日顯重要。近年來因受全球暖化及環境變遷影響，颱風及豪雨頻率漸增，所挾帶之高強度降雨，致使庫區上游河川流量大幅增加，且由於集水區內坡度陡峻、地質疏鬆等原因，加速崩坍沖蝕產生，繼而導致泥砂下移淤積，減少水庫蓄水空間；如於民國 93 年 8 月艾利颱風所挾帶之豪雨，嚴重沖刷上游土石，流入之巨量泥砂，使庫區之淤積量暴增至 2,703 萬立方公尺，約為過去 14 年淤積量之總和，該沖刷亦同時使得原水濁度升高，影響桃園地區民生用水逾二周之久，衝擊甚大。

由於水庫集水區之水文觀測，攸關整體防洪

操作策略之擬訂及水資源規劃參考之依據，因此，石門水庫主管機關持續進行水庫上游流量及含砂量觀測等作業。然而，若能配合相關即時水文觀測，建立即時逕流預測系統，將有助於颱風期間迅速掌握水庫入流資訊，藉以執行必要之防洪對策，減少災害損失，並獲取最佳水資源應用效益。

1.2 文獻回顧

即時逕流預測系統，需仰賴具時效性與可靠性之降雨預報及逕流演算模式。由於降雨歷程通常具高度複雜性及隨機性，因此當進行短延時雨量預測時，通常以簡化之數學模式推衍其可能的發展趨勢。自迴歸移動平均模式(Autoregressive moving average model, ARMA)為分析時間序列資料之簡易研究方法，其基本概念為將預測對象隨時間推移所形成之新資料序列視為一個隨機序列，並利用一數學模型描述或近似該序列

(Labadie *et al.*, 1981; Burlando *et al.*, 1993)。在已知當前降雨下，馬可夫鏈(Markov chain)中機率過渡之概念，亦常應用於發展機率型降雨預報模式(Klatt and Schultz, 1983; Bertoni *et al.*, 1992)。而近年來由於氣象雷達、遙感探測與氣象數值模式之發展，因此亦有諸多研究以此類工具預測空間降雨分佈(Borga *et al.*, 2000; Golding, 2000)。一般而言，降雨預測可歸屬於僅掌握部分訊息之控制問題，故可藉由Deng (1989)所提出之灰色系統理論予以分析。所謂灰色系統，係指對於部分訊息已知，而內涵架構亦為部分確知之系統，該理論適用於探討訊息不完整、關係不明確及操作機制不確定之問題(陳，1998)。有關灰色系統之研究大致可歸納為下列領域(1)灰色生成(grey generating)、(2)灰色關聯分析(grey relational analysis)、(3)灰色建模(grey model)、(4)灰色預測(grey prediction)、(5)灰色決策(grey decision)及(6)灰色控制(grey control)等(吳等，1996)。Yu *et al.* (2000, 2001)應用灰色系統結合模糊理論，建立短延時降雨預報模式，並於臺灣北部三峽及橫溪集水區獲得良好推估結果。廖等(2007)應用灰色理論中三點與四點 GM(1,1)外插模式進行臺灣濁水河流域短延時降雨預報，由研究結果發現前者之成果較後者為佳，上列模式括號內第一個 1 表示一階微分，第二個 1 表示一個輸入變數。因灰色系統理論主要為運用有限或少量數據資訊，以從事資料外延與分析，因此應用於即時雨量預測時，可搭配即時回傳之降雨紀錄，進行短延時的預測工作。本研究即以灰色理論 GM(1,1)模型進行降雨預測，並供後續逕流演算使用。

地形性降雨逕流模式以水流之物理機制為基礎，應用數學方程式與集水區地文參數，能較合理反應集水區逕流特性。Sherman (1932)提出之單位歷線理論，可謂地形性降雨逕流模式之基礎，其以集水區脈衝反應函數之線性疊加，推算下游控制點之逕流歷線。而後 Clark (1945)所提出的時間-面積曲線(time-area diagram)及 Nash (1957)的線性水庫模式(linear reservoir model)，則將集水區之貯蓄效應納入考量。Wooding (1965)

認為漫地流及渠流之流速差異甚大，進一步將集水區視為一個包含漫地流平面及渠流之 V 形概念化模型，並應用運動波理論推算其逕流歷線。Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979)續依 Horton-Strahler 河川級序定律，將集水區劃分為數個不同逕流階段，並以機率密度函數表示水流於各階段之運行時間，提出地貌瞬時單位歷線理論(geomorphic instantaneous unit hydrograph, GIUH)。有關用以描述逕流運行時間分佈之最適機率密度函數，於過去分別有以指數分佈、均勻分佈(Gupta *et al.*, 1980)及其兩者之合併(Cheng, 1982)或伽瑪函數(Jin, 1992)等之分析探討。Lee and Yen (1997)為避免早期地貌瞬時單位歷線模式需藉由水文紀錄或利用試驗資料檢定模式參數之缺陷(Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979; Agnese *et al.*, 1988)，遂將各級序次集水區假想為一 V 形漫地流模型並串聯之，而後以運動波解析方式，求解逕流運行時間機率密度函數之平均值，提出運動波-地貌瞬時單位歷線理論(kinematic-wave-based geomorphologic instantaneous unit hydrograph, KW-GIUH)。Yen and Lee (1997)並以荷頓比值表示逕流運行時間之平均值，使運動波-地貌瞬時單位歷線模式適用於無水文紀錄之集水區。Lee and Chang (2005)更導入部分集水面積概念(Betson, 1964)，發展能考慮地表下逕流運行機制之運動波-地貌瞬時單位歷線模式，該模式於近年已被廣泛應用於降雨逕流演算(Shadeed *et al.*, 2007; Cao *et al.*, 2010)，洪水預測(Chen, *et al.*, 2008)、單位歷線推求(Lee *et al.*, 2009a)、泥砂量推估(Arekhi and Rostamizad, 2011; Arekhi *et al.*, 2011)等其他領域(Wang and Tung, 2006, Lee *et al.*, 2009b)，並展現甚佳結果。因此，本研究擬採用該水文模式，並借鑒時變性部分集水面積概念(Lee and Huang, 2013)，以進行石門水庫上游集水區即時逕流模擬。此外，因集水區迅速逕流反應受土壤初始水份含量影響甚鉅(Da Ros and Borga, 1997; Norbiato *et al.*, 2008; Berthet *et al.*, 2009)，故於本研究另透過即時降雨指標(current precipitation index, CPI)，量化集水區乾濕狀態，並用以間接推估土壤初始入滲率，以供計算有效降雨量。

表 1 霞雲流量站上游集水區地文因子

河川級序	i 級序河川數目 N_i	i 級序河川平均長度 \bar{L}_i (km)	i 級序次集水區平均面積 \bar{A}_i (km ²)	i 級序次集水區面積比例 P_{0i}	i 級序漫地流平均坡度 \bar{S}_0 (m/m)	i 級序渠流平均坡度 \bar{S}_c (m/m)
1	333	0.81	1.10	0.590	0.435	0.307
2	70	2.14	5.21	0.192	0.462	0.198
3	13	4.88	22.54	0.086	0.488	0.148
4	3	17.01	139.99	0.070	0.509	0.074
5	1	44.67	622.81	0.062	0.433	0.038

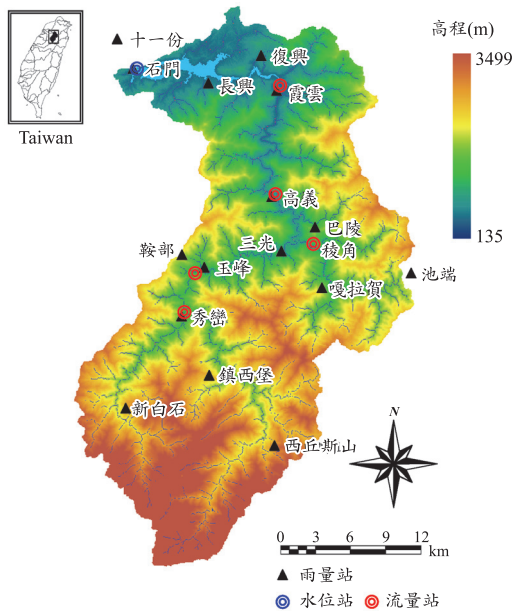


圖 1 石門水庫集水區地形、河川網路暨水文測站之空間分佈

於以下章節中，將分別簡述研究集水區概況與各採用之理論，而後依續說明模式分析結果、即時逕流預測系統建置架構與實例操作，冀能藉由該系統，提昇颱風時期逕流之掌握度。

二、研究集水區概述

如圖 1 所示，石門水庫集水區位於臺灣北部淡水河流域大漢溪上游，海拔自壩址之 135 公尺至山脊的 3499 公尺間，全區地勢自東北向西南傾斜，呈一南北向狹長之集水區。該集水區境內

現設有霞雲、高義、玉峰、稜角、秀巒等 5 個流量測站與石門水庫水位站，及石門、霞雲、長興、復興、高義、三光、玉峰、秀巒、池端、巴陵、嘎拉賀、鞍部、新白石、鎮西堡與西丘斯山等 15 個雨量測站。集水區年平均降雨量約 2200 公釐至 2800 公釐間，然而時間分佈甚不均勻，近 80% 之雨量集中於五月至十月之颱風豪雨季。

為避免石門水庫庫區蓄水影響流量觀測之準確性，故本研究以其上游之霞雲流量站及所轄之集水範圍為分析區域，該區域內之植被覆蓋包括農耕地(0.97%)、林地(95.63%)、裸露地(3.08%)、水體(0.30%)、建築物及道路(0.02%)等。經採用格點解析度為 40 公尺之數值高程資料，並參考 1/25,000 的地形圖，所擷取之河川網路特性及集水區地文因子，如表 1 所示，表中所列數值，主要為供運動波-地貌瞬時單位歷線模式逕流模擬使用。由該表可知，霞雲上游為一 5 級序之次集水區，其面積為 622.81 平方公里，平均坡度 0.4405，主流坡度 0.0329，大於運動波適用之坡度條件(李等，2009)，因此藉由運動波-地貌瞬時單位歷線模式進行降雨逕流演算，應符合水理條件限制。

三、即時逕流演算系統理論

3.1 灰色系統理論

若已知一組小時降雨紀錄序列 $R^{(0)}(t)$ 如下

$$R^{(0)}(t) = [r^{(0)}(1), r^{(0)}(2), \dots, r^{(0)}(k), \dots, r^{(0)}(n)] \dots \dots \dots (1)$$

則於灰色理論中，可經由一次累加生成運算 (accumulated generating operation, AGO)，降低 $R^{(0)}(t)$ 之隨機性，並使 $R^{(0)}(t)$ 被掩蓋之特徵或規律性浮現，即

$$R^{(1)}(t) = [r^{(1)}(1), r^{(1)}(2), \dots, r^{(1)}(k), \dots, r^{(1)}(n)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

其中

$$r^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k r^{(0)}(i) \quad \dots\dots\dots (3)$$

(2)式之 $R^{(1)}(t)$ 亦代表累積降雨深度序列。配合灰色理論之定義，GM(1,1)之一階常微分方程式可表示為(Deng, 1989)

$$\frac{dR^{(1)}(t)}{dt} + aR^{(1)}(t) = b \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中 a 、 b 為灰色參數(grey parameter)。依據灰色系統理論對離散資料之灰導數的定義，當選取單位時間間距 ($\Delta t = 1$)時，則(4)式之白化過程可表示為

$$R^{(0)}(k) + a \cdot z^{(1)}(k) = b \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$k = 2, 3, \dots, n$$

其中

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2} [r^{(1)}(k) + r^{(1)}(k-1)] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$k = 2, 3, \dots, n$$

或將(6)式代入(5)式並以矩陣形式表示，可改寫成

$$Y = B\theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Y = \begin{bmatrix} r^{(0)}(2) \\ r^{(0)}(3) \\ \vdots \\ r^{(0)}(n) \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & 1 \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}; \quad \theta = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (8a, b, c)$$

(8)式中之係數 a 、 b ，可由最小均方法求得，並代入(4)式之通解可得

$$\hat{r}^{(1)}(k+1) = \left(r^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中 $\hat{r}^{(1)}(k+1)$ 為累積降雨預測值，可經由一次累減生成 (inverse accumulated generating operation, IAGO) 以獲得預測之小時降雨量 $\hat{r}^{(0)}(k+1)$ ，即

$$\hat{r}^{(0)}(k+1) = \hat{r}^{(1)}(k+1) - \hat{r}^{(1)}(k) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$k = 2, 3, \dots, n$$

由於歷史降雨特性可能隱含未來降雨之變化趨勢，故本研究乃採用廖等(2007)建議，選用三筆雨量資料以滾動方式進行灰色系統之建模與預測工作，因此當最新之降雨資料回傳後，參數 a 、 b 可即時更新；又考量降雨強度之歷時變化具高度隨機性，導致當預測時距延長時，所得結果之準確性隨之減低，故研究中另參照 Yu et al. (2000)所提出之單一時間間距預報技巧(a single time-step forecasting technique)，以針對未來 $2\Delta t$ 、 $3\Delta t$ 之降雨進行預測。

3.2 地形性水文演算模式

基於 Horton-Strahler 河川級序定律，一個 Ω 級序之集水區可劃分為數個逕流階段，因此雨滴落於集水區後，將分別以地表逕流或地表下逕流之形式流至河川，並循序自低級序河川往高級序河川匯集。如圖 2 所示，當雨滴落於深色區域表示之飽和土壤時，將以地表逕流之形式匯流至鄰近河川，並移動至集水區出口；而當雨滴落於遠離河道之未飽和土壤時，將因入滲而以地表下逕流之方式匯入河川，並傳遞至下游出口。

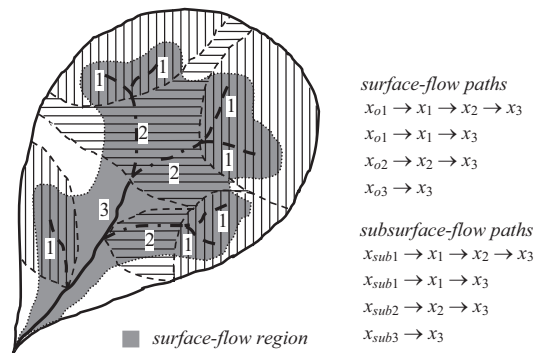


圖 2 考慮部分集水面積之集水區逕流路徑示意圖 (Lee and Chang, 2005)

若以 x_i 表示 i 級序之河川， x_{oi} 表示 i 級序集水區產生地表逕流之飽和面積範圍內之區域，其中 $i = 1、2、3、\dots、\Omega$ ，則集水區之瞬時單位歷線 $u(t)$ 可表示為 (Lee and Chang, 2005)

$$u(t) = u_s(t) + u_{sub}(t) \\ = \sum_{w_s \in W_s} \left[f_{x_{oi}}(t) * f_{x_i}(t) * \dots * f_{x_{\Omega}}(t) \right]_{w_s} P(w_s) + \\ \sum_{w_{sub} \in W_{sub}} \left[f_{x_{sub_1}}(t) * f_{x_i}(t) * \dots * f_{x_{\Omega}}(t) \right]_{w_{sub}} P(w_{sub}) \dots \dots \dots (11)$$

式中 $u_s(t)$ 與 $u_{sub}(t)$ 分別表示地表及地表下部分之瞬時單位歷線； $W_s = \langle x_{oi}, x_i, x_j, \dots, x_{\Omega} \rangle$ 與 $W_{sub} = \langle x_{sub_1}, x_i, x_j, \dots, x_{\Omega} \rangle$ 為地表及地表下逕流路徑之集合； $f_{x_i}(t)$ 為雨滴於 x_i 階段逕流運行之時間分佈，且其均值為 T_{x_i} (Gupta et al., 1980)；* 表示褶合積分； $P(w_s)$ 與 $P(w_{sub})$ 分別表示雨滴採取某一特定徑流路徑 w_s 或 w_{sub} 之機率，可定義為

$$P(w_s) = R_{PCA}(t) \cdot P_{O_A} \cdot P_{x_{oi}x_i} \cdot P_{x_ix_j} \dots P_{x_{kx_{\Omega}}} \dots \dots \dots (12)$$

$$P(w_{sub}) = [1 - R_{PCA}(t)] \cdot P_{O_A} \cdot P_{x_{sub_1}x_i} \dots P_{x_ix_j} \dots P_{x_{kx_{\Omega}}} \dots \dots \dots (13)$$

式中 $R_{PCA}(t)$ 為 t 時刻之飽和面積比例或稱之為部分集水面積比例 (ratio of partial contributing area)； P_{O_A} 為 i 級序集水區面積佔全流域集水面積之比例； $P_{x_{oi}x_i}$ 為雨滴由 i 級序漫地流區域至 i 級序河川之轉移機率； $P_{x_{sub_1}x_i}$ 為雨滴由 i 級序地表下逕流區域至 i 級序河川之轉移機率； $P_{x_ix_j}$ 則為雨滴由 i 級序河川至 j 級序河川 ($j > i$) 之轉移機率。

Lee and Yen (1997) 運用運動波理論配合考慮河川網路結構之 V 形漫地流平面模型，將逕流於各階之運行時間表示為 (Henderson and Wooding, 1964)

$$T_{x_{oi}} = \left(\frac{n_o \bar{L}_{oi}}{\bar{S}_{oi}^{1/2} i_e^{m-1}} \right)^{1/m} \dots \dots \dots (14)$$

$$T_{x_{sub_1}} = \frac{\eta \bar{L}_{sub_1}}{K_o \bar{S}_{sub_1}} \dots \dots \dots (15)$$

式中 $T_{x_{oi}}$ 與 $T_{x_{sub_1}}$ 分別為水流於 i 級序次集水區中，以地表逕流及地表下逕流形式之平均運行時間； n_o 為漫地流糙度係數； \bar{L}_{oi} 為 i 級序漫地流平均長度； \bar{S}_{oi} 為 i 級序漫地流平均坡度； i_e 為有效降雨強度； m 為常數，相較於曼寧公式，其值為 5/3； η 為孔隙率； \bar{L}_{sub_1} 為 i 級序地表下逕流平均逕流長度； K_o 為表層土壤水力傳導度； \bar{S}_{sub_1} 為 i 級序地表下逕流平均坡度。又水流於 i 級序渠流階段之平均逕流運行時間亦可推得為 (Lee and Yen, 1997)

$$T_{x_i} = \frac{B_i}{2i_e \bar{L}_{sub_1}} \left[\left(h_{co_1}^m + \frac{2i_e n_c \bar{L}_{sub_1} \bar{L}_{c_i}}{\bar{S}_{c_i}^{1/2} B_i} \right)^{\frac{1}{m}} - h_{co_1} \right] \dots \dots \dots (16)$$

式中 B_i 為 i 級序渠流寬度； \bar{L}_{c_i} 為 i 級序渠流平均長度； \bar{S}_{c_i} 為 i 級序渠流平均坡度； h_{co_1} 為上游次集水區匯入 i 級序渠流之平均水深。綜合各式結果，集水區於 t 時刻之總逕流量 $Q_{sim}(t)$ ，即可表示為有效降雨強度與瞬時單位歷線之褶合積分，即

$$Q_{sim}(t) = \int_0^t i_e(\tau) \cdot u(i_e, t - \tau) d\tau \dots \dots \dots (17)$$

式中 τ 為積分變數。

3.3 即時降水指標與部分集水面積關係之建立

由水文紀錄分析可知，地表下逕流退水機制呈指數遞減，因此為考慮 (12) 式與 (13) 式中 $R_{PCA}(t)$ 之時變效應，Lee and Huang (2013) 以一指數函數，定義即時降水指標與部分集水面積比例之關係為

$$R_{PCA}(t) = 1 - \exp\left[-\frac{CPI(t)}{CPI_c}\right] \dots\dots\dots(18)$$

其中

$$CPI(t) = CPI(t-1) \cdot K_r + R(t) \dots\dots\dots(19)$$

式中 CPI_c 為特性降水指標(characteristic value of CPI)； $CPI(t)$ 為 t 時刻集水區之即時降水指標； $R(t)$ 為 t 時刻之降雨深度； K_r 為退水常數，為集水區土壤特性、地形(Beschta, 1998)及蒸發(Choudhury and Blanchard, 1983)之函數，一般隨季節而異(Brocca *et al.*, 2005)，其值介於 0.85~0.98 之間，於實務應用上，常以固定常數簡化之(Linsley *et al.*, 1975; Fedora and Beschta, 1989; Heggen, 2001; Zhou *et al.*, 2000; McHale *et al.*, 2002)。

因 CPI 為集水區土壤飽和程度之量化性指標，因此由(18)式及(19)式可知，當 CPI 愈高時，表示土壤含水量愈大，此時集水區內土壤達飽和之面積百分比亦隨之增加，致使大部分雨滴將以地表逕流之形式運行；反之，當 CPI 愈低時，土壤達飽和之面積百分比相對降低，則降雨將入滲至地表下，以地表下逕流方式傳遞。

3.4 即時降水指標與降雨入滲關係之建立

一般進行降雨逕流演算時，需將截流、窪蓄、入滲、蒸發散等降雨損失予以扣除，以獲取有效降雨量，然而在即時演算之操作需求下，各變量難以準確推估。考量大型降雨事件中，截流、窪蓄及蒸發散等損失相對較小，應可予以忽略，故本研究乃假設入滲為主要之降雨損失，並採用荷頓公式(Horton, 1939)以計算入滲量。荷頓公式之數學方程式可表示為

$$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \dots\dots\dots(20)$$

式中 f_c 為平衡入滲率(equilibrium infiltration rate)； f_o 為初始入滲率(initial infiltration rate)； k 為入滲常數。 f_c 及 k 一般可參考 Rawls *et al.* (1993) 之土壤特性表而得知，而 f_o 則隨集水區初始乾濕狀態而異。

因即時逕流預測中，入滲損失之多寡影響逕流模擬結果甚鉅，因此適切評估暴雨發生前土壤之初始入滲率，將有助於提昇逕流演算結果之準確性。為此，本研究依 Lee and Huang (2013)之建議，將 f_o 與即時降水指標以一對數關係表示為

$$f_o = \alpha \ln[CPI(0)] + \beta \dots\dots\dots(21)$$

式中 α 與 β 為迴歸係數； $CPI(0)$ 為暴雨發生前之即時降雨指標。(21)式之對數關係，已廣泛應用於臺灣及美國等數個集水區，並獲得良好之迴歸結果(李等, 2009; Lee and Huang, 2013)。

四、結果與討論

4.1 灰色系統理論降雨推估

為探討灰色系統理論於降雨預測之可行性，研究中首先選用石門水庫上游西丘斯山雨量站於 1996 年至 2008 年之 9 場暴雨紀錄，逐時預測未來 1 至 3 小時之降雨，並與真實紀錄比對。為比較預測結果之優劣，研究中以總累積雨量誤差(error of total cumulative rainfall, *ETCR*)、效率係數(coefficient of efficiency, *CE*, Nash and Sutcliffe, 1970)以及相關係數(coefficient of correlation, *CC*)加以量化評估，其中，總累積雨量誤差定義為

$$ETCR(\%) = \frac{\left| \sum_{t=1}^n r^{(0)}(t) - \sum_{t=1}^n \hat{r}^{(0)}(t) \right|}{\sum_{t=1}^n r^{(0)}(t)} \times 100\% \dots\dots\dots(22)$$

式中 n 為降雨資料筆數。當 *ETCR* 趨近於 0 時，表示模式之誤差愈小。又效率係數定義為

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [r^{(1)}(t) - \bar{r}^{(1)}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [r^{(1)}(t) - \bar{r}^{(1)}]^2} \dots\dots\dots(23)$$

式中 $\bar{r}^{(1)}$ 為紀錄累積降雨之平均值。當 *CE* 值愈接近 1 時，表示預測與紀錄之累積降雨組體圖呈現較佳之一致性。而相關係數則定義為

表 2 以灰色系統理論預測西丘斯山雨量站於不同暴雨事件中，未來 1 至 3 小時之降雨表現

降雨事件	ETCR (%)			CE			CC		
	1-hr	2-hr	3-hr	1-hr	2-hr	3-hr	1-hr	2-hr	3-hr
1996-07-30	8.06	12.67	16.31	0.99	0.99	0.98	1.00	1.00	1.00
1997-08-17	5.01	8.74	13.28	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
1997-08-27	11.56	17.08	21.32	0.99	0.98	0.96	1.00	1.00	1.00
2000-08-22	13.90	16.04	18.95	0.99	0.98	0.97	1.00	1.00	1.00
2000-10-31	8.49	13.27	17.80	0.99	0.99	0.97	1.00	1.00	1.00
2001-09-15	11.05	15.32	19.04	0.99	0.98	0.97	1.00	1.00	1.00
2002-07-03	14.73	16.41	23.03	0.98	0.98	0.96	1.00	1.00	1.00
2004-08-23	5.21	8.07	11.30	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
2008-07-27	6.56	8.41	10.27	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00

$$CC = \frac{\sum_{t=1}^n [r^{(1)}(t) - \bar{r}^{(1)}] [\hat{r}^{(1)}(t) - \bar{r}^{(1)}(t)]}{\sqrt{\sum_{t=1}^n [r^{(1)}(t) - \bar{r}^{(1)}]^2 \cdot \sum_{t=1}^n [\hat{r}^{(1)}(t) - \bar{r}^{(1)}(t)]^2}} \dots\dots\dots(24)$$

式中 $\bar{r}^{(1)}$ 為預測累積降雨之平均值。當 CC 值愈趨近於 1 時，則預測與紀錄降雨間正相關之特性愈顯著。

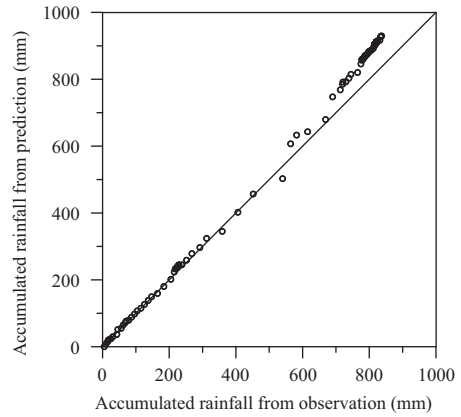
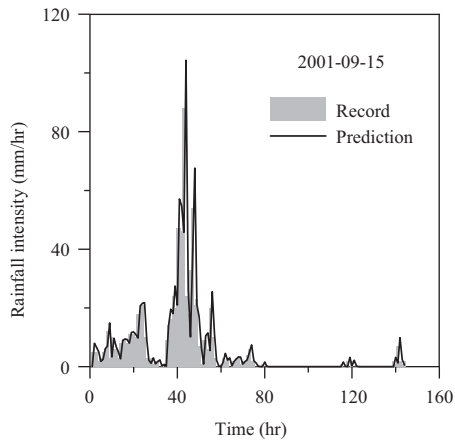
針對西丘斯山雨量站於 9 場暴雨事件之詳細分析結果，可彙整如表 2，而圖 3 所示為 2001 年 9 月 15 日之小時預測降雨及累積降雨組體圖。於表 2 中顯示，ETCR 隨預測時距之延長而提高，如於未來 3 小時預測降雨之 ETCR，其值可達未來 1 小時結果之二倍，然而由 $CE \geq 0.9$ 及 $CC \approx 1.0$ 之結果可知，針對未來 1 至 3 小時預測降雨之歷時變化與相關性，尚可獲得良好結果。由於灰色系統理論中，係以累積降雨為分析變量，且假設該變量於預測時刻之發展，乃依循其歷史特性之變化趨勢，即當過去時刻之累積降雨呈迅速增長時，預測時刻之累積值亦將明顯驟昇；反之，若過去時刻之累積降雨緩慢增長時，則預測時刻之累積值亦隨之平緩。該假設將使得未來 n 小時 ($n = 1、2、3$) 預測降雨之歷時分佈，相較於紀錄值有延後 n 小時之現象，如圖 3 所示，且當預測之時距愈長時，高、低估之情形愈顯著。此外，若歷

史降雨強度呈明顯起伏時，則灰色系統理論將無法反應該變異，繼而增加預測結果之不確定性。

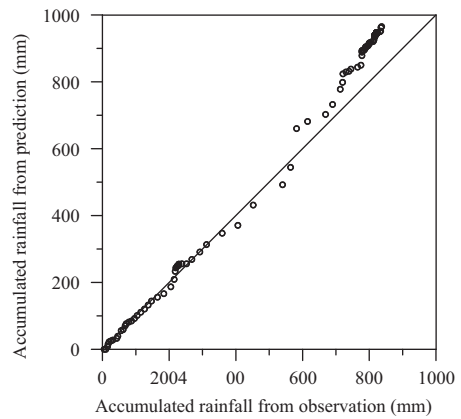
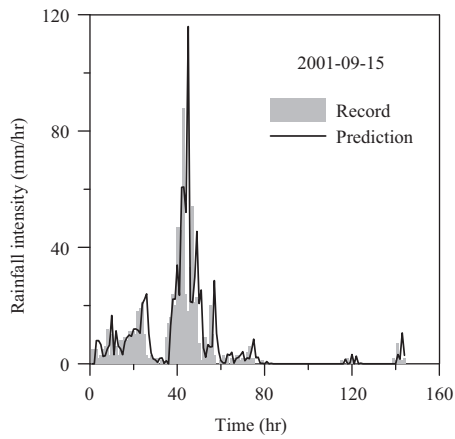
4.2 模式參數檢定分析

研究中所使用之逕流預測模式，需檢定參數包括退水常數 K_r 、特性降水指標 CPI_c 、漫地流糙度係數 n_o 、渠流糙度係數 n_c 及土壤水力傳導度 K_o 。其中，退水常數 K_r 表示經由一單位演算時距後，仍保留於土壤中之水量百分比，此亦反應土壤水分累積或消退之速率。 CPI_c 主控(18)式之曲線特性，影響部分集水面積比例 $P_{PCd}(t)$ 之推估。而漫地流糙度係數 n_o 與渠流糙度係數 n_c ，一般可參考 Chow (1959) 及美國陸軍兵工團(HEC, 1990) 針對不同地表覆蓋情形加以選定。土壤水力傳導度 K_o 則可依 Smedema and Rycroft (1983) 於不同土壤之試驗結果，擇適當值並由逕流檢定調整之。

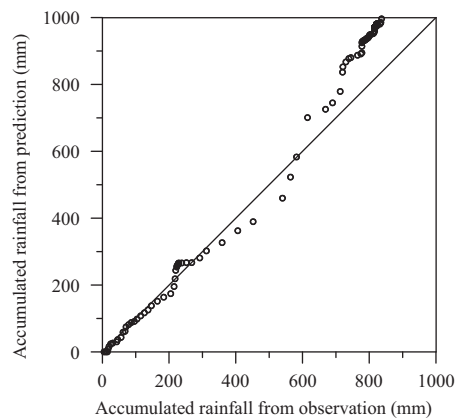
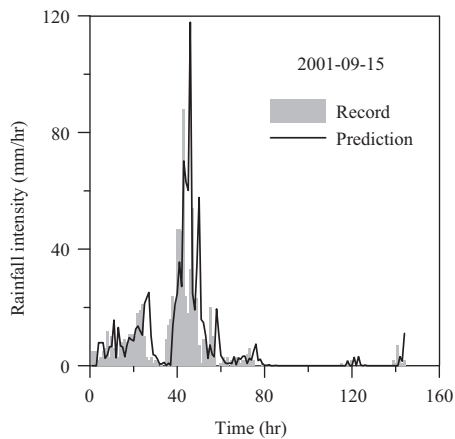
研究中以表 2 前 8 場暴雨紀錄配合徐昇式多邊形法推求空間平均降雨，經匯入逕流模擬演算，以檢定上述各參數。為利後續即時逕流演算應用，檢定過程乃欲於研究集水區歸納出具代表性之單一參數組。而為評估逕流演算結果之可靠度，研究中以模擬與紀錄間之尖峰流量誤差(error of peak discharge, EQ_p)、尖峰時刻誤差(error of time to peak, ET_p) 及效率係數等三項指標予以量化，各指標分別定義如下



(a)未來第1小時降雨預測



(b)未來第2小時降雨預測



(c)未來第3小時降雨預測

圖 3 西丘斯山雨量站於 2001 年 9 月 15 日暴雨事件之降雨預測結果

表 3 霞雲流量站上游集水區之模式參數檢定結果

退水常數 K_r	特性降水指標 CPI_c (mm)	平衡入滲率 f_c (cm/hr)	入滲常數 k (1/hr)	漫地流糙度係數 n_o	渠道糙度係數 n_c	土壤水力傳導度 K_o (m/s)
0.98	1600	0.15	0.14	0.55	0.05	0.015

表 4 霞雲流量站於不同暴雨事件下之逕流模擬結果

降雨事件	總降雨深度 (mm)	$(Q_p)_{rec}$ (m^3/s)	$CPI(0)$ (mm)	f_o (cm/hr)	$(Q_p)_{sim}$ (m^3/s)	EQ_p (%)	ET_p (hr)	CE	
1996-07-30	739.8	5796.3	13.12	1.7	5606.3	-3.28	-1	0.96	檢定
1997-08-17	284.2	2592.9	30.31	1.1	2578.8	-0.54	-1	0.95	檢定
1997-08-27	490.7	868.1	6.97	2.3	822.4	-5.26	-1	0.91	檢定
2000-08-22	643.3	1101.5	3.56	3.3	1111.9	0.94	-1	0.74	檢定
2000-10-31	304.7	1161.3	13.95	2.2	1197.0	3.07	-1	0.95	檢定
2001-09-15	893.4	3181.0	1.27	3.5	3284.8	0.91	-3	0.81	檢定
2002-07-03	426.0	2263.2	22.89	1.5	2192.4	-3.13	-1	0.92	檢定
2004-08-23	1198.1	7647.2	15.68	1.8	8122.3	6.56	-4	0.92	檢定
2008-07-27	284.8	1397.4	15.51	1.8	1376.7	-1.48	-1	0.84	驗證

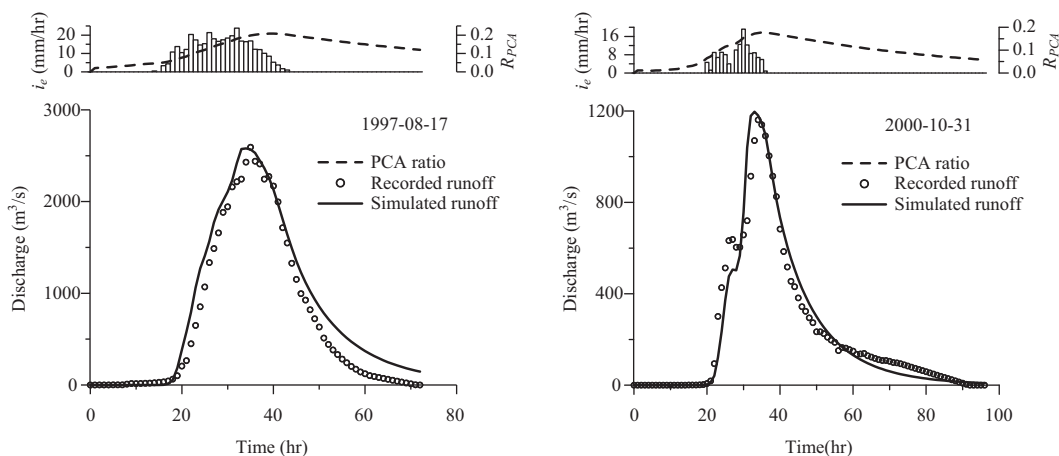


圖 4 霞雲流量站降雨逕流檢定結果

$$EQ_p(\%) = \frac{(Q_p)_{sim} - (Q_p)_{rec}}{(Q_p)_{rec}} \times 100\% \dots\dots\dots(25)$$

$$ET_p = (T_p)_{sim} - (T_p)_{rec} \dots\dots\dots(26)$$

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{sim}(t) - Q_{rec}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{rec}(t) - \bar{Q}_{rec}]^2} \dots\dots\dots(27)$$

式中 $(Q_p)_{sim}$ 與 $(Q_p)_{rec}$ 分別表示模擬及紀錄之尖峰流量； $(T_p)_{sim}$ 與 $(T_p)_{rec}$ 為模擬及紀錄之尖峰發生時刻； \bar{Q}_{rec} 為紀錄流量之平均值。藉由(25)式至(27)式，模式參數檢定與選用依據，乃考量模擬之逕流歷線滿足 $EQ_p \leq 15\%$ 及 $CE \geq 0.7$ 。檢定結果如表 3 所示，而各暴雨相關水文資訊及逕流模擬結果，則詳列於表 4。由表 4 可知，各暴雨事件模擬結果均符合上述 EQ_p 及 CE 之要求。圖 4 為針

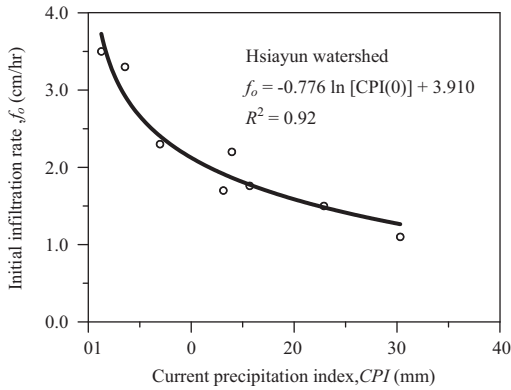


圖 5 初始入滲率與即時降水指標迴歸關係

對震雲控制點於 1997 年 8 月 17 日及 2000 年 10 月 31 日暴雨事件之逕流模擬結果，於圖中顯示，模擬所得歷線於尖峰流量、尖峰到達時刻及其上昇、退水段等，均與紀錄間呈良好之一致性，而藉由(18)式推估所得之部分集水面積比例 $R_{PCA}(t)$ ，亦隨歷線呈連續性漲退，並約於尖峰流量時刻達最大值。

4.3 集水區土壤初始入滲率推估

為能於暴雨發生前適時推估集水區土壤初始入滲率，以供計算有效降雨量，研究中將表 4 中各檢定場次之 f_0 與 $CPI(0)$ 點繪如圖 5，並以(21)式之對數關係進行迴歸，可得震雲上游 f_0 與 $CPI(0)$ 之關係為

$$f_0 = -0.776 \ln [CPI(0)] + 3.910 \quad \dots\dots\dots(28)$$

$$R^2 = 0.92$$

表 4 之 $CPI(0)$ ，為採各場暴雨發生前 30 天之降雨紀錄，經(19)式逐時累算而得。由判定係數 (coefficient of determination, R^2) 等於 0.92 可知， f_0 與 $CPI(0)$ 間具有甚佳之對數關係，故於暴雨前，即可透過即時降水指標 $CPI(0)$ 間接給定集水區初始入滲率。為驗證(28)式之適用性，研究中另以 2008 年 7 月 27 日之降雨事件為例，首先以累算所得之 $CPI(0) = 15.51$ 代入(28)式可知 $f_0 \cong 1.8 \text{ cm/hr}$ ，而後接續完成有效降雨推估與逕流演算，所得結果如圖 6 及表 4 未列所示，由 $EQ_p = -1.48\%$ 與 $CE = 0.84$ 之結果說明前述模式

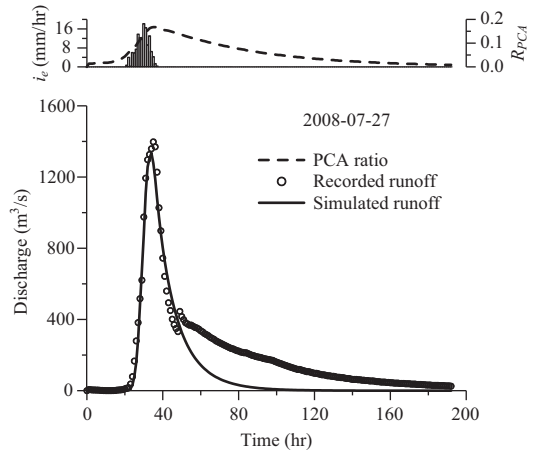


圖 6 震雲流量站降雨逕流模式驗證結果

檢定參數與(28)式之迴歸關係，確可應用於即時逕流預測模式之建置。

五、即時逕流演算系統

依據上述理論架構與分析結果，即可規劃建置集水區即時逕流預測系統。如圖 7 所示之流程，該系統首先利用各雨量站即時回傳之降雨紀錄，判斷是否滿足一預先設定之啟動機制，如特定時距內之累積降雨量超越某一門檻值等，以決定是否執行逕流預測。若是，則可依前 30 天之降雨紀錄，配合(28)式推估土壤初始入滲率，再者亦利用前 9 小時紀錄資料，搭配灰色理論與徐昇式法，預測未來 1 至 3 小時區域平均降雨；而後以(18)式及(19)式，計算對應之即時降水指標與部分集水面積比例，並接續以荷頓公式完成入滲量扣除與有效降雨推求；最後將有效降雨經運動波-地貌瞬時單位歷線模式演算，預測下游控制點之逕流量。

因各時刻之逕流量可由現地儀器量測並即時回傳，因此若能參照該回傳流量以輔助模擬流量之更正，則應可獲得較為準確之逕流預測。若已知 t 時刻之紀錄流量 $Q_{rec}(t)$ 與模擬流量 $Q_{sim}(t)$ ，則 $t+i$ 時刻之預測流量 $Q_{pre}(t+i)$ 可表示為(李等，2007)

$$Q_{pre}(t+i) = Q_{rec}(t) + [Q_{sim}(t+i) - Q_{sim}(t)] \quad \dots\dots\dots(29)$$

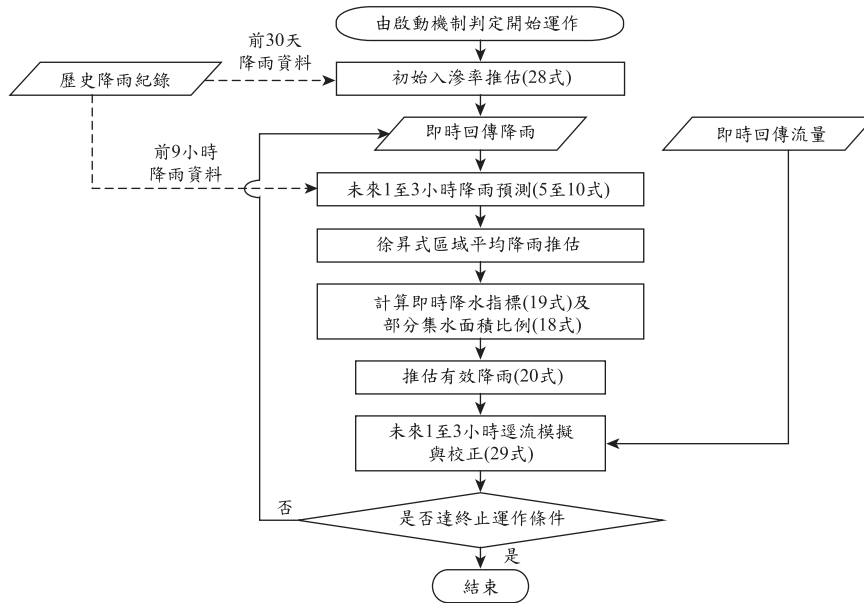


圖 7 即時逕流預測模式系統架構

表 5 霞雲流量站修正與未修正之逕流預測結果比較

降雨事件	未來第 1 小時						未來第 2 小時						未來第 3 小時					
	未修正			修正			未修正			修正			未修正			修正		
	EQ_p (%)	ET_p (hr)	CE	EQ_p (%)	ET_p (hr)	CE	EQ_p (%)	ET_p (hr)	CE	EQ_p (%)	ET_p (hr)	CE	EQ_p (%)	ET_p (hr)	CE	EQ_p (%)	ET_p (hr)	CE
1996-07-30	1.06	-1	0.95	2.83	1	0.98	10.93	0	0.94	8.62	0	0.96	20.98	1	0.90	18.67	1	0.95
1997-08-17	1.92	-2	0.95	0.61	1	0.99	12.07	-1	0.94	5.38	-1	0.97	19.92	0	0.93	13.23	0	0.96
1997-08-27	-3.81	0	0.91	5.16	-2	0.97	17.49	-1	0.91	30.81	-1	0.92	43.07	0	0.84	56.39	0	0.80
2000-08-22	9.21	-1	0.73	0.70	-1	0.95	27.46	0	0.62	23.30	-4	0.78	76.95	-3	0.33	81.19	-3	0.47
2000-10-31	2.87	-2	0.95	-2.24	1	0.97	31.49	-2	0.91	23.49	-2	0.90	63.69	-1	0.86	55.69	-1	0.82
2001-09-15	8.24	-2	0.80	-0.01	0	0.97	23.61	-1	0.76	10.89	1	0.91	40.81	0	0.66	23.90	0	0.81
2002-07-03	-1.09	-1	0.91	-2.78	1	0.98	15.78	-6	0.86	-0.81	-6	0.91	47.01	-5	0.78	30.42	-5	0.84
2004-08-23	7.31	-4	0.91	-2.97	1	0.97	19.43	-3	0.86	0.87	-3	0.93	27.71	-2	0.80	10.80	-3	0.89
2008-07-27	-1.93	-1	0.84	0.97	-3	0.98	10.25	-2	0.83	16.94	-2	0.96	25.12	-2	0.83	31.80	-1	0.92

(29)式之主要概念，為將 $Q_{pre}(t+i)$ 表示為 $Q_{rec}(t)$ 與逕流模擬差值 $Q_{sim}(t+i) - Q_{sim}(t)$ 之加成，隱含 $Q_{pre}(t) = Q_{rec}(t)$ 之假設。

藉由圖 7 所示之流程，本研究以表 4 之暴雨事件為例，並訂定過去 3 小時之累積降雨深度達 10 公釐為模式啟動門檻，以測試即時逕流預測機制之可行性，並同時以 EQ_p 、 ET_p 與 CE 評估逕流預測表現。演算結果彙整如表 5，而圖 8 為以 2004 年 8 月 23 日之暴雨事件為例，分別擷取未

來 1 至 3 小時預測流量所組成之逕流歷線圖。由表 5 可知，多數逕流歷線經(29)式修正後，其表現均較未修正前為佳，如於 2004 年 8 月 23 日之暴雨場次，未來 1 小時之 EQ_p 由未修正前之 7.31%，降低至修正後的 -2.97%，而 CE 則由 0.91 提昇至 0.97。因(29)式未包含 ET_p 之修正機制，故尖峰發生時刻無明顯差異。此外，由表 5 亦可發現，因未來 1 小時之預測流量與紀錄間之誤差尚小，故仍可藉由(29)式適度修正，然而未來 2、

3 小時之流量誤差漸增，致使修正效果有限，如於 2000 年 8 月 22 日之暴雨事件中，未來第 2 小時之 EQ_p 經修正後仍達 23.30%，而未來第 3 小時之 EQ_p 則由修正前之 76.95% 反提昇至修正後的 81.19%，且修正後之 CE 值亦不甚理想，造成該結果之主要原因，乃由於長時距之預測降雨已漸為高估，且又逐時累積所致。

六、結 論

本研究旨在建立集水區即時逕流預測系統，以利於颱風期間進行即時流量推估。研究中以石門水庫上游霞雲流量站為逕流控制點，首先藉由歷史暴雨紀錄，驗證灰色系統理論於未來 1 至 3 小時降雨預測之可行性，並另以流量紀錄，檢定控制點上游地文參數。研究中採用荷頓入滲公式扣除降雨損失，其方程式中之土壤初始入滲率，乃間接透過即時降水指標予以推估。而於逕流預測上，則以運動波-地貌瞬時單位歷線模式搭配灰色理論之預測降雨與一流量校正機制，以完成即時流量演算流程。

為正確推估暴雨發生前之土壤初始入滲率 f_0 ，研究中藉由即時降水指標對集水區乾燥濕態之描述，透過(21)式之迴歸式，建立 $CPI(0)$ 與 f_0 之對數關係。於霞雲控制點上游，由判定係數 $R^2 = 0.92$ 顯示兩變數間具高度相關性，因此可利用 $CPI(0)$ 間接推估集水區之 f_0 ，繼而計算有效降雨量以供逕流模擬應用。

因研究中所採用之灰色系統理論，係假設累積降雨於預測時刻之發展，乃依循其歷史特性之變化趨勢，即當過去時刻之累積降雨呈迅速增長時，預測時刻之累積值將明顯驟昇；反之，若過去時刻之累積降雨緩慢增長時，預測時刻之累積值亦隨之平緩。因此針對未來 1 小時之降雨與逕流量預測，尚能獲得良好結果；然而對於未來 2 小時及 3 小時之預測，易有高低估之情形。此外，當採用之前期降雨無明顯規律時，則以灰色系統理論則較難反應該變異，繼而增加預測結果之不確定性。藉由上述演算架構與分析結果，研究中擬定即時逕流預測之操作流程，如圖 7 所示，該流程之啟動條件，可藉由前期累計降雨是否逾指

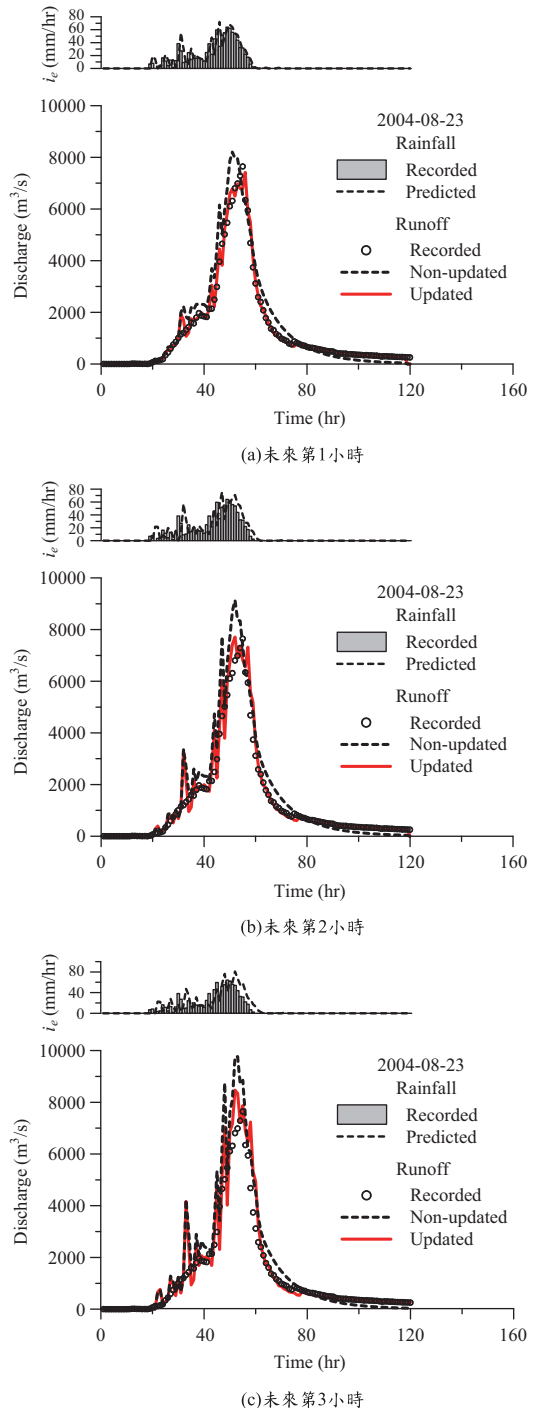


圖 8 霞雲流量站於未來 1 至 3 小時之逕流模擬歷線

定之門檻值而加以判定，或是否低於某一門檻值而宣告終止。

降雨預測之準確度影響逕流推估結果甚鉅，然而考量降雨於時間上具高度隨機性與變異性，本研究僅先以灰色系統理論預測未來 1 至 3 小時之降雨及其生成之逕流量，若需得知較長期距之降雨量，則需輔以其它氣象資料或數值模式，以能獲得較為可靠之結果，此亦為未來待努力之方向。

謝 誌

本研究承蒙國科會提供研究經費補助 (NSC-98-2625-M-019-001) 及水利署提供水文觀測資料，謹致謝忱。

參考文獻

1. Agnese, C., D'asaro, D., and Giordano, G., "Estimation of the time scale of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph from effective streamflow velocity," *Water Resources Research*, 24(7), 969-978, 1988.
2. Arekhi, S., and Rostamizad, G., "Sediment yield estimating from three micro-watersheds by integrated KW-GIUH and MUSLE models," *Elixir Agriculture*, 36, 3190-3199, 2011.
3. Arekhi, S., Shabani, A., and Alavipanah, S. K., "Evaluation of integrated KW-GIUH and MUSLE models to predict sediment yield using geographic information system (GIS) (Case study: Kengir watershed, Iran)," *African Journal of Agricultural Research*, 6(18), 4185-4198, 2011.
4. Berthet, L., Andréassian, V., Perrin, C., and Javelle, P., "How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments," *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 819-831, 2009.
5. Bertoni, J. C., Tucci, C. E., and Clarke, R. T., "Rainfall-based real-time flood forecasting," *Journal of Hydrology*, 131, 313-339, 1992.
6. Beschta, R. L., "Forest hydrology in the Pacific Northwest: additional research needs," *Journal of the American Water Resources Association*, 34(4), 729-741, 1998.
7. Beston, R. R., "What is watershed runoff?," *Journal of Geophysical research*, 69(8), 1541-1552, 1964.
8. Borga, M., Anagnostou, E. N., and Frank, E., "On the use of real-time radar rainfall estimates for flood prediction in mountainous basins," *Journal of Geophysical Research*, 105, 2269-2280, 2000.
9. Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., 2005, "Empirical and conceptual approaches for soil moisture estimation in view of event-based rainfall-runoff modeling. In Progress in Surface and Subsurface Water Studies at the Plot and Small Basin Scale," Maraga, F., Arattano, M. (eds). IHP-VI, Technical Documents in Hydrology No. 77. UNESCO: Paris; 1-8.
10. Burlando, P., Rosso, R., Gadavid, L. G., and Salas, J. D., "Forecasting of short-term rainfall using ARMA models," *Journal of Hydrology*, 144, 193-211, 1993.
11. Cao, S.-Y., Lee, K. T. Ho, J.-Y., Liu, X.-N., Huang, E., Yang, K.-J., "Analysis of runoff in ungauged mountain watersheds in Sichuan, China using kinematic-wave-based GIUH model," *Journal of Mountain Science*, 7(2), 157-166, 2010.
12. Chen, N.-C., Lee, K. T., Gartsman, B. I., Bugaets, A. N., 2008, "Applications of kinematic-wave based geomorphologic IUH model for rain floods prediction in Taiwan and Russia," Geophysical Research Abstracts, 10, EGU2008-A-05833, 2008 EGU General Assembly.
13. Cheng, B. L. M., 1982, "A study of geomorphologic instantaneous unit hydrograph," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Illinois University, Urbana-Champaign, U.S.A.
14. Choudhury, B. J., Blanchard, B. J., "Simulating soil water recession coefficients for agricultural

- watersheds,” *Water Resources Bulletin*, 19(2), 241-247, 1983.
15. Chow, V. T., 1959, Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill, Inc., 113.
 16. Clark, C. O., “Storage and the unit hydrograph,” *Transactions, ASCE*, 110, 2261, 1419-1446, 1945.
 17. Da Ros, D., and Borga, M., “Adaptive use of a conceptual model for real time flood forecasting,” *Nordic Hydrology*, 28(3), 169-188, 1997.
 18. Deng, J. L., “Introduction to grey system theory,” *Journal of Grey System*, 1(1), 1-24, 1989.
 19. Fedora, M. A., and Beschta, R. L., “Storm runoff simulation using an antecedent precipitation index (API) model,” *Journal of Hydrology*, 112(1/2), 121-133, 1989.
 20. Golding, B. W., “Quantitative precipitation forecasting in the UK,” *Journal of Hydrology*, 239, 286-305, 2000.
 21. Gupta, V. K., Waymire, E., and Wang, C. T., “A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology,” *Water Resources Research*, 16(5), 855-862, 1980.
 22. Heggen, R. J., “Normalized antecedent precipitation index,” *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(5), 377-381, 2001.
 23. Henderson, F. M., and Wooding, R. A., “Overland flow and groundwater flow from a steady rainfall of finite duration,” *Journal of Geophysical Research*, 69(8), 1531-1540, 1964.
 24. Horton, R. E., “Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacity,” *Transactions American Geophysical Union*, 20, 693-711, 1939.
 25. Hydrologic Engineer Center, 1990, HEC-1 Flood hydrograph package: User’s manual and programmer’s manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
 26. Jin, C. X., “A deterministic gamma-type geomorphologic instantaneous unit hydrograph based on path types,” *Water Resources Research*, 28(2), 479-486, 1992.
 27. Klatt, P., and Schultz, G. A., “Flood forecasting on the basis of radar rainfall measurement and rainfall forecasting,” *Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission*, IAHS Publ., 145, 1983.
 28. Labadie, J. W., Lazaro, R. C., and Morrow, D. M., “Worth of short-term rainfall forecasting for combined sewer overflow control,” *Water Resources Research*, 17(5), 1489-1497, 1981.
 29. Lee, K. T., and Yen, B. C., “Geomorphology and kinematic-wave based hydrograph deviation,” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(1), 73-80, 1997.
 30. Lee, K. T., Chang, C.-H., “Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling,” *Journal of Hydrology*, 311, 91-105, 2005.
 31. Lee, K. T., Chen, N.-C., Gartsman, B. I., “A current version of the model of a unit hydrograph and its use in Taiwan and Russia,” *Geography and Natural Resources*, 30(1), 79-85, 2009a.
 32. Lee, K. T., Chen, N.-C., Gartsman, B. I., “Impact of stream network structure on the transition break of peak flows,” *Journal of Hydrology*, 367, 283-292, 2009b.
 33. Lee, K. T., Huang, J.-K., “Runoff simulation considering time-varying partial contributing area based on current precipitation index,” *Journal of Hydrology*, 486, 443-454, 2013.
 34. Linsley, R. K., Kohler, M. A., and Paulhus, J.L.H., 1975, Hydrology for Engineers, 2nd edn. McGraw-Hill, New York.
 35. McHale, M. R., McDonnell, J. J., Mitchell, M. J., and Cirno, C. P., “A field-based study of soil water and groundwater nitrate release in an Adirondack forested watershed,” *Water Resources Research*, 38(4), 2002, DOI: 10. 1029/2000WR000102.

36. Nash, J. E., "The form of the instantaneous unit hydrograph," IASH publication, 45(3-4), 114-121, 1957.
37. Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., "River flow forecasting through conceptual models, Part 1-a discussion of principles," *Journal of Hydrology*, 10, 282-290, 1970.
38. Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E., and Anquetin, S., "Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins," *Journal of Hydrology*, 362(3-4), 274-290, 2008.
39. Rawls, W. J., Ahuja, L. R., Brakensiek, D. L., Shirmohammadi, A., 1993, "Infiltration and soil water movement," Maidment, D. R. (ed), Handbook of Hydrology, McGraw-Hill, Book Co., Chapter 5, 5.30.
40. Rodriguez-Iturbe, I., and Valdes, J. B., "The geomorphologic structure of hydrologic response," *Water Resources Research*, 15(6), 1409-1420, 1979.
41. Shadeed, S., Shaheen, H., and Jayyousi, A., "GIS-based KW-GIUH hydrological model of semiarid catchments: the case of Faria catchment, Palestine," *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 32, 3-16, 2007.
42. Sherman, L. K., "Streamflow from rainfall by the unit-graph method," *Engineering News Record*, 108, 501-505, 1932.
43. Smedema, L. K., and Rycroft, D. W., 1983, "Land drainage: planning and design of Agricultural Drainage Systems," Batsford, London, p. 376.
44. Wang, Y., Tung, T. K., "Stochastic generation of geomorphological instantaneous unit hydrograph-based flow hydrograph," *International Journal of River Basin Management*, 4(1), 49-56, 2006.
45. Wooding, R. A., "A hydraulic model for the catchment-stream problem, I. Kinematic-wave theory," *Journal of Hydrology*, 3(3), 254-267, 1965.
46. Yen, B. C., Lee, K. T., "Unit hydrograph derivation for ungauged watershed by stream order laws," *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 2(1), 1-9, 1997.
47. Yu, P.-S., Chen, C.J., Chen, S.-J., "Application of gray and fuzzy methods for rainfall forecasting," *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(4), 339-345, 2000.
48. Yu, P.-S., Chen, C.-J., Chen, S.-J., Lin, S.-C., "Application of grey model toward runoff forecasting," *Journal of the American Water Resources Association*, 37(1), 151-166, 2001.
49. Zhou, S. L., McMahon, T. A., Walton, A., Lewis, J., "Forecasting daily urban water demand: a case study of Melbourne," *Journal of Hydrology*, 236, 153-164, 2000.
50. 吳漢雄、鄧聚龍、溫坤禮，1996，「灰色分析入門」，高立圖書有限公司。
51. 李光敦、徐郁涵、詹雅馨、黃品淳、黃仁國、何瑞益，2009，"流域水情及淹水預報技術及資訊整合平台建置研究-子計畫：流域集塊式與分佈式降雨逕流模式之研發與應用(III)"，國科會專題研究計畫成果報告，NSC98-2625-M-019-001 號。
52. 李光敦、鍾逸茹、林立峰，2007，"德基水庫集水區即時逕流預測模式修正補充報告"，國立臺灣海洋大學河海工程研究所研究報告，台灣電力股份有限公司委託。
53. 陳憲宗，1988，"灰色預測在逕流預報之應用"，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
54. 廖苑雄、陳正炎、陳文正，2007，"GM(1,1)應用於短期降雨預測之研究-以濁水溪為例"，台灣水利，第 55 卷，第 4 期，60-66。

收稿日期：民國 103 年 10 月 8 日

修正日期：民國 103 年 12 月 17 日

接受日期：民國 103 年 12 月 23 日