

## 暴雨期間泥沙濃度率定曲線特性探討

楊其錚<sup>[1]\*</sup> 李光敦<sup>[2]</sup>

**摘要** 降雨過程因逕流匯集作用，所以造成河川中流量的增加，而且因為雨滴與漫地流對土壤表面的沖蝕作用，亦同時導致河川中泥沙濃度增加。Williams (1989) 曾採用不同集水區實際量測資料，系統性地探討流量歷線與泥沙歷線間之關係，說明河道中泥沙濃度率定曲線之特性，並將之區分為 5 大類，即單一值線、順時針迴圈、逆時針迴圈、單一直線加迴圈，以及 8 字形迴圈。本研究藉由新近發展的地貌瞬時單位泥沙歷線模式，詳細探討逕流歷線與泥沙歷線之關係，而後分析泥沙濃度率定曲線特性。研究中以美國密西西比州 Goodwin 試驗集水區為例，藉由模式參數之設定，計算出不同的逕流運行時間與泥沙運行時間，而產生 Williams (1989) 所述泥沙濃度率定曲線的五大類型。研究結果顯示，當泥沙運行時間與逕流運行時間相等時，泥沙濃度率定曲線呈現單一值線關係；當泥沙運行時間小於逕流運行時間，泥沙濃度率定曲線呈現順時針迴圈關係；當泥沙運行時間大於逕流運行時間，泥沙濃度率定曲線呈現逆時針迴圈關係。而當集水區泥沙濃度率定曲線呈單一直線加迴圈或是 8 字形迴圈，則是不同階段水流與泥沙運行時間大小不一的複雜混合型態。

**關鍵詞：**泥沙濃度率定曲線、泥沙運行時間、逕流運行時間、瞬時單位泥沙歷線。

## Investigating the characteristics of sediment concentration rating curves during storms

Chi-Cheng Yang<sup>[1]\*</sup> Kwan Tun Lee<sup>[2]</sup>

**ABSTRACT** In rainstorm periods, overland flow will concentrate to channels resulting in the increasing of channel flow, and soil will also be eroded by rainfall impact and the shear force of the overland flow to increase sediment concentration in the channel flow. Williams (1989) examined the relationship between the flow hydrograph and sedimentgraph, and concluded that the sediment concentration rating curve can be classified into five categories: single-valued line, clockwise loop, counterclockwise loop, single line plus a loop, and figure eight. In this study, the Goodwin Creek Experimental Watershed, located in Mississippi, USA, was selected as a test site, and a newly developed geomorphologic instantaneous unit sedimentgraph model (GIUS) was used to simulate the flow and sediment hydrographs during storms. The five categories of sediment concentration rating curves can be generated by assigning different model parameters. The results indicate when the flow travel time equals the sediment travel time, a single-valued rating curve can be generated. When the sediment travel time is less than the flow

---

[1] 水利署水利防災中心  
Water Disaster Mitigation Center, Water Resource Agency, Taipei 106, Taiwan, R.O.C.

[2] 台灣海洋大學河海工程學研究所  
Department of River and Harbor Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung 202, Taiwan, R.O.C.

\*Corresponding Author. E-mail address: ccyang@wra.gov.tw

travel time, the rating curve will show a clockwise-loop shape. A counterclockwise-loop rating curve indicates the sediment travel time is larger than the flow travel time. If the sediment travel time is larger than the flow travel time in some specified runoff states and the sediment travel time is less than the flow travel time in other runoff states, then a single line plus a loop rating curve or a figure-eight rating curve will be found.

**Key Words:** sediment concentration rating curve, sediment travel time, flow travel time, instantaneous unit sedimentgraph.

## 一、前言

一年之中，較大流量的水文事件通常是由少數幾次的颱風豪雨所引致，因此集水區內的泥沙，大部份也是在短暫的水文延時內輸送至下游。傳統上常以泥沙濃度率定曲線（sediment concentration rating curve）計算泥沙量，泥沙濃度率定曲線是以經驗方式尋找泥沙濃度與流量間之關係，藉由紀錄資料經迴歸後以幕次函數（power function）表示，但泥沙產出過程相當複雜，實際上，颱風期間泥沙濃度與流量的關係往往呈現遲滯效應（hysteresis effect）之特性，而非一對一的單調函數，亦即降雨事件中同一流量可能對應到幾個差異甚大的泥沙濃度。Williams (1989) 區分單一水文事件中之泥沙濃度與流量關係為 5 種型態，如圖 1 所示，分別為單一值線（single-valued line）、順時針迴圈（clockwise loop）、逆時針迴圈（counterclockwise loop）、單一直線加迴圈（single line plus a loop）以及 8 字形迴圈（figure eight），造成各類遲滯迴圈（hysteretic loop）之原因繁多，舉凡臨前降雨、水文事件間隔、降雨量、降雨特性、乾濕季節、溫度、土壤含水量、沙源、逕流量、泥沙運移過程以及地形等，均能對遲滯迴圈產生顯著的影響（Wood, 1977; Williams, 1989; Sickingabula, 1998; Asselman, 1999; Brasington and Richards, 2000; Seeger *et al.*, 2004; Lawler *et al.*, 2006; Megnounif *et al.*, 2007; Lefrancois *et al.*, 2007）。

由於泥沙濃度與河川流量間存在著複雜的關係，且暴雨期間泥沙濃度的變化十分顯著，部份學者以運行時間的差異來說明遲滯效應。一般咸信，小型集水區之泥沙尖峰到達時刻快於流量尖峰到達時刻，但由於泥沙係以水流之流速運移，而流量則是以洪水之波速傳遞，因此隨著集水區變大或運行距離變長後，在洪水波速較快的情況下，流量尖峰不僅將超越泥沙尖峰，且愈往下游兩尖峰到達時刻之差異愈大（Johnson,

1943; Einstein, 1943; Heidel, 1956; Glover and Johnson, 1974; Marcus, 1989）。然而，晚近部份的研究則發現完全相反地趨勢，即由實測資料顯示，某些大集水區之泥沙尖峰到達時刻仍快於流量尖峰，究其原因可能是河道坡降變緩、滲坑（sink）或河岸沖蝕（bank erosion）等因素所造成（Bull *et al.*, 1995; Olive *et al.*, 1996; Bull, 1997）。簡言之，泥沙運行時間（sediment travel time）與逕流運行時間（runoff travel time）的差異特性，是造成泥沙濃度與流量形成不同遲滯迴圈關係的主要原因之一。

本研究應用美國密西西比州 Panola County 之 Goodwin Creek 試驗集水區之地文特性，經由參數調整方式計算各階段泥沙運行時間，並以運動波-地貌瞬時單位歷線模式（kinematic-wave-based geomorphologic instantaneous unit hydrograph; Lee and Yen, 1997）以及地貌瞬時單位泥沙歷線模式（geomorphologic instantaneous unit sedimentgraph; Lee and Yang, 2010），模擬集水區瞬時降雨所形成的瞬時單位歷線（instantaneous unit hydrograph）與瞬時單位泥沙歷線（instantaneous unit sedimentgraph），並將數值試驗結果依照 Williams (1989) 的遲滯迴圈分類方式予以區分，藉此說明泥沙運行時間與泥沙濃度率定曲線特性間之關係。

## 二、研究方法

形成集水區泥沙流出量以及河川流量之因素繁多，為釐清泥沙與逕流之運行時間差異與泥沙濃度率定曲線之間的關係，本研究以瞬時單位泥沙歷線與瞬時單位歷線進行比較。研究中以運動波-地貌瞬時單位歷線模式計算瞬時單位歷線，該模式係以逕流運行時間為基礎，不僅能顧及集水區地文特性，並能反應降雨強度對逕流運行時間之影響，為一兼具非線性與時變性之降雨逕流模式（Lee and Yen, 1997; Lee *et al.*, 2008）；瞬時單位泥沙歷線則是以地貌瞬時單位泥沙

歷線模式模擬之，該模式係以泥沙運行時間為基礎，並考慮土壤沖蝕過程以及泥沙隨水流運移的特性，因此模式具有反應泥沙動態效應之能力(Lee and Yang, 2010)。

### 1. 運動波-地貌瞬時單位歷線理論

基於 Horton-Strahler 之河川級序定律，一個  $\Omega$  級序之集水區可以被區分為  $2^{\Omega-1}$  個階段，當雨滴降落於漫地流區域後，將循序由低級序河川流往高級序河

川，而後逐漸流至集水區出口（如圖 2）。若以  $x_{oi}$  為  $i$  級序漫地流區域，而  $x_i$  為  $i$  級序河川，其中  $i=1, 2, \dots, \Omega$ ，且假設  $x_{oi} \rightarrow x_i \rightarrow x_j \rightarrow \dots \rightarrow x_{\Omega}$  表示某一特定逕流路徑  $w$ ，則雨滴採取此一特定路徑之機率可表示 (Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979)

$$P(w) = P_{OA_i} \cdot P_{x_{oi}x_i} \cdot P_{x_i x_j} \cdot \dots \cdot P_{x_k x_{\Omega}} \quad (1)$$

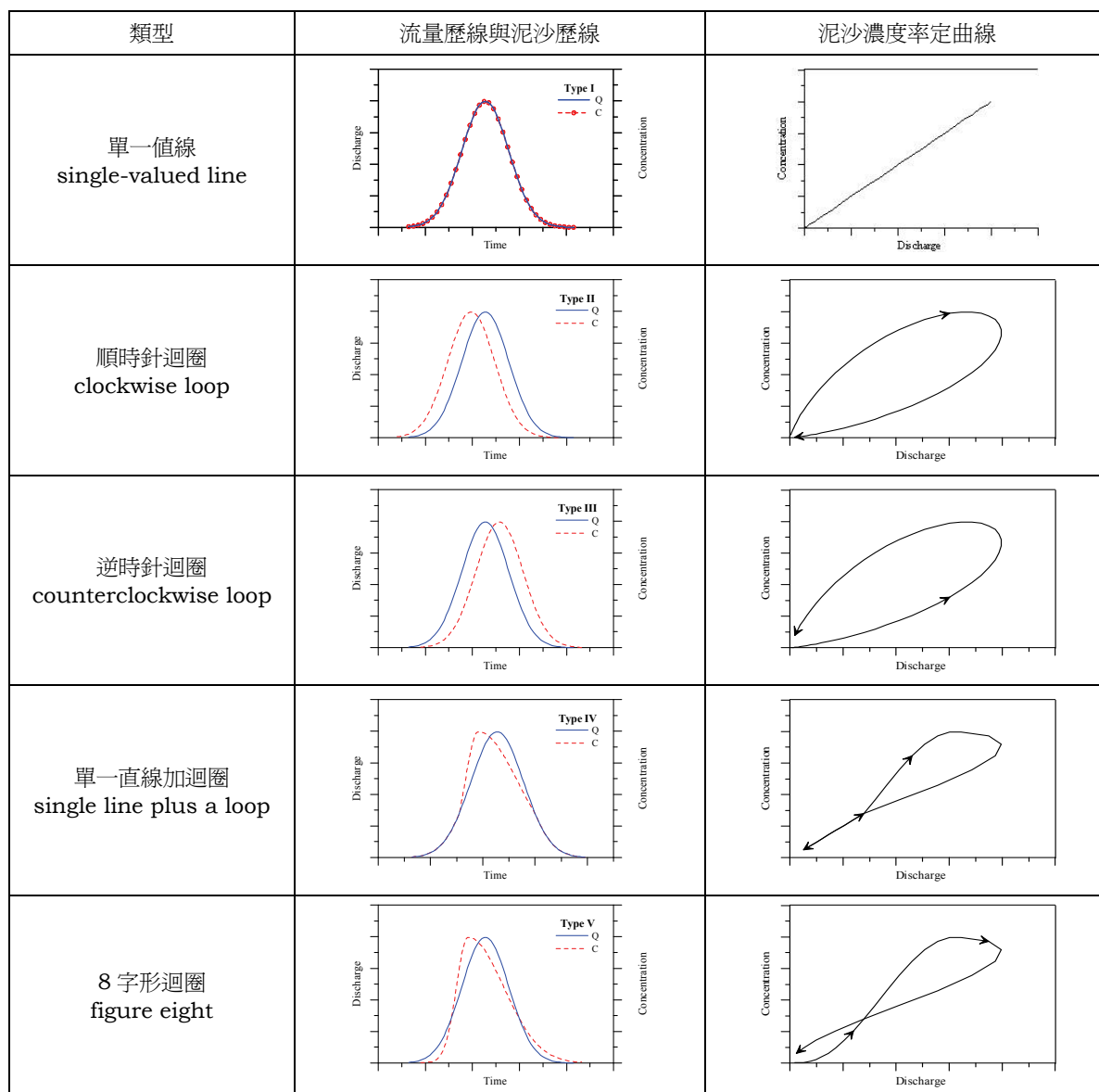


圖 1 泥沙濃度率定曲線的五種類型

Fig.1 Five categories of sediment rating curve (after Williams, 1989)

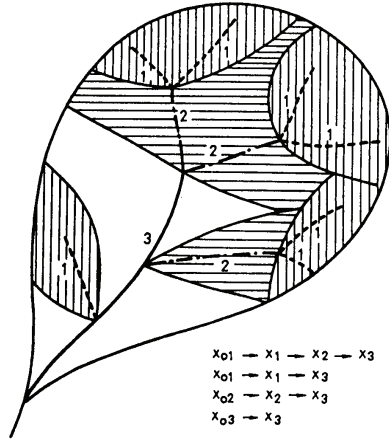


圖 2 集水區逕流路徑示意圖 (Lee and Yen, 1997)

Fig.2 Flow paths of a third-order watershed (after Lee and Yen, 1997)

式中  $P_{O_{A_i}}$  為  $i$  級序漫地流區域面積相對於全流域面積之比例;  $P_{x_{o_i}x_i}$  為雨滴由  $i$  級序漫地流區域流至  $i$  級序河川之轉移機率, 由上述假設知其為 1;  $P_{x_i x_j}$  為雨滴由  $i$  級序河川流至  $j(j > i)$  級序河川之轉移機率。該集水區之瞬時單位歷線則可表示為 (Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979)

$$u(t) = \sum_{w \in W} \left[ f_{x_{o_i}}(t) * f_{x_i}(t) * f_{x_j}(t) * \dots * f_{x_{\Omega}}(t) \right]_{w} \cdot P(w) \quad (2)$$

式中  $W$  表逕流路徑之集合  $W = \langle x_{o_i}, x_i, x_j, \dots, x_{\Omega} \rangle$ ;  $f_{x_{o_i}}(t)$  表示雨滴於  $x_{o_i}$  階段之逕流運行時間分佈;  $f_{x_j}(t)$  表示雨滴於  $x_j$  階段之逕流運行時間分佈; \* 表褶合積分 (convolution integral)。

若依河川級序定律劃分河川網路級序, 並將每個  $i$  級序的次集水區視為一個 V 形漫地流模型 (如圖 3), 在此 V 形漫地流模型中, 由降雨產生的逕流在流經兩側漫地流平面之後匯入中央渠道。水流在漫地流階段與渠流階段之簡化動量方程式可表示為

$$q_x = \alpha_x h_x^m \quad (3)$$

式中  $q_x$  為漫地流或渠流階段之單位寬度流量;  $\alpha_x$  為漫地流或渠流階段之水力特性參數, 可分別表示為  $\alpha_{o_i} = \bar{S}_{o_i}^{1/2} / n_o$  及  $\alpha_{c_i} = (B_i \bar{S}_{c_i}^{1/2}) / n_{c_i}$ ;  $h_x$  為漫地流或渠

流階段之水深;  $m$  為常數。搭配水流連續方程式, 即可應用運動波理論以解析方式, 直接求解特定路徑  $w$  之逕流運行時間 (Lee and Yen, 1997; Lee et al., 2008)

$$T_{x_w} = \left( \frac{n_o \bar{L}_{o_i}}{\bar{S}_{o_i}^{1/2} l_e^{m-1}} \right)^{1/m} + \sum_{i=1}^{\Omega} \frac{B_i}{2i_e \bar{L}_{o_i}} \left[ \left( h_{co_i}^m + \frac{2i_e n_{c_i} \bar{L}_{o_i} \bar{L}_{c_i}}{B_i \bar{S}_{c_i}^{1/2}} \right)^{1/m} - h_{co_i} \right] \quad (4)$$

式中  $l_e$  為有效降雨;  $n_o$  與  $n_{c_i}$  分別為  $i$  級序漫地流糙度係數及河川糙度係數;  $\bar{L}_{o_i}$  與  $\bar{L}_{c_i}$  分別為  $i$  級序漫地流平均長度及河川平均長度;  $\bar{S}_{o_i}$  與  $\bar{S}_{c_i}$  分別為  $i$  級序漫地流及河川之平均坡度;  $B_i$  為  $i$  級序河川寬度;  $m$  若相對於曼寧公式則等於 5/3;  $h_{co_i}$  為  $i$  級序河川入口處之水深。

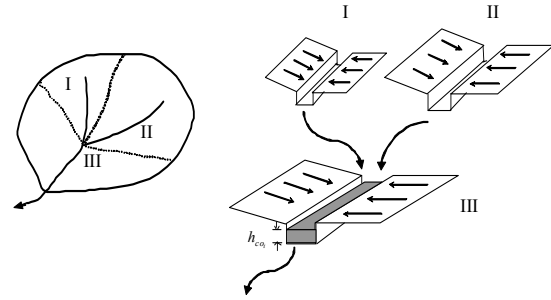


圖 3 考慮河川網路之集水區 V 形漫地流模型 (Lee and Yen, 1997)

Fig.3 V-shaped subwatershed (Lee and Yen, 1997)

## 2. 地貌瞬時單位泥沙歷線模式

Lee and Yang (2010) 以上述相同之 V 形漫地流模型, 應用運動波理論建立地貌瞬時單位泥沙歷線模式 (geomorphologic instantaneous unit sedimentgraph, GIUS), 將集水區之瞬時單位泥沙歷線表示為

$$u_s(t) = \sum_{w \in W} \left[ f_{x_{o_i}}(t) * f_{x_i}(t) * f_{x_j}(t) * \dots * f_{x_{\Omega}}(t) \right]_{sw} \cdot P_s(w) \quad (5)$$

亦即瞬時單位泥沙歷線可表示為土壤顆粒於不同階段運行時間分佈之褶合積分, 乘上土壤顆粒選取不同逕流路徑之機率, 其中  $P_s(w)$  表示為

$$P_s(w) = P_{O_{A_i}} \cdot (P_{x_{oi}x_i} \cdot SDR_{o_i}) \cdot (P_{x_jx_j} \cdot SDR_{j_j}) \cdots (P_{x_kx_{\Omega}} \cdot SDR_{k_{\Omega}}) \quad (6)$$

式中  $SDR_{o_i}$  為泥沙由  $i$  級序漫地流平面進入  $i$  級序河川之泥沙運移率； $SDR_{j_j}$  (或  $SDR_{k_{\Omega}}$ ) 為泥沙經由  $i$  (或  $k$ ) 級序河川進入  $j$  (或  $\Omega$ ) 級序河川的泥沙運移率。

若將泥沙於漫地流平面運移之簡化動量方程式表示為

$$q_{s_i} = \gamma_{o_i} h_{so_i}^{\lambda} \quad (7)$$

式中  $q_{s_i}$  為  $i$  級序漫地流平面上之泥沙流出量； $h_{so_i}$  為  $i$  級序漫地流平面上之含沙水流水深 (sediment-laden-flow depth)；假設參數  $\gamma_{o_i} = a_{o_i} (\bar{S}_{o_i}^{1/2} / n_{o_i})^{b_{o_i}}$  以及  $\lambda$  等於 5/3，即可藉由連續方程式求得  $i$  級序漫地流平面之泥沙運行時間 (Lee and Yang, 2010)

$$T_{so_i} = \left( \frac{\bar{L}_{o_i}}{a_{o_i} (\bar{S}_{o_i}^{1/2} / n_{o_i})^{b_{o_i}} D^{\lambda-1}} \right)^{1/\lambda} \quad (8)$$

式中  $D$  為單位面積之土壤沖蝕量 (erosion rate)； $a_{o_i}$  及  $b_{o_i}$  為參數。同理，若將泥沙於河川中之簡化動量方程式表示為

$$Q_{s_i} = \gamma_{c_i} h_{sc_i}^{\lambda} \quad (9)$$

式中  $Q_{s_i}$  為  $i$  級序渠流之泥沙流出量； $h_{sc_i}$  為  $i$  級序河川之含沙水流水深；假設參數  $\gamma_{c_i} = a_{c_i} (B_i \bar{S}_{c_i}^{1/2} / n_{c_i})^{b_{c_i}}$ ，並藉由連續方程式求得  $i$  級序河川泥沙運行時間 (Lee and Yang, 2010)

$$T_{sc_i} = \frac{B_i}{2D\bar{L}_{o_i} \cdot SDR_{o_i}} \left[ \left( h_{sc_{oi}}^{\lambda} + \frac{2D\bar{L}_{o_i} \bar{L}_{c_i} \cdot SDR_{o_i}}{a_{c_i} (B_i \bar{S}_{c_i}^{1/2} / n_{c_i})^{b_{c_i}}} \right)^{1/\lambda} - h_{sc_{oi}} \right] \quad (10)$$

式中  $a_{c_i}$  及  $b_{c_i}$  為參數； $h_{sc_{oi}}$  為  $i$  級序河川入口處之含沙水流水深，表示為

$$h_{sc_{oi}} = \left[ \frac{D \cdot EA_i}{a_{c_i} (B_i \bar{S}_{c_i}^{1/2} / n_{c_i})^{b_{c_i}} \cdot N_i} \right]^{1/\lambda} \quad (11)$$

式中  $N_i$  為  $i$  級序河川數量且

$$EA_i = \sum_{j=1}^M AP_{O_{A_j}} \cdot (P_{x_{oj}x_j} \cdot SDR_{o_j}) \cdot (P_{x_jx_m} \cdot SDR_{j_m}) \cdots (P_{x_nx_i} \cdot SDR_{n_i}) \quad (12)$$

式中  $M = 2^{i-1} - 1$ ； $A$  為集水區總面積。

### 三、模式應用結果與討論

本研究藉由參數調整以改變泥沙運行時間，藉此衍生出不同的瞬時單位泥沙歷線，進而呈現各類遲滯迴圈型態，以探討泥沙濃度率定曲線之特性，研究中所應用之集水區、模式之參數特性與實際應用情形、以及各類遲滯迴圈之數值模擬結果，詳述如下。

#### 1. 應用集水區概述

本研究以 Goodwin Creek 集水區地文特性，進行地貌瞬時單位歷線模式以及地貌瞬時單位泥沙歷線模式之數值試驗，此集水區位於美國密西西比州之 Panola County，密西西比河流域耶珠河 (Yazoo river) 支流上 (Blackmarr, 1995)，集水區河川網路如圖 4 所示。整個研究集水區面積為 21.44 km<sup>2</sup>，平均坡度約為 0.0257，集水區內最高與最低高程分別為 129 m 及 66 m，最高河川級序為 4 級序，集水區出口處河寬為 29.58 m，各項地文因子以及河川轉移機率詳列於表 1。該集水區歷年之雨量、流量、泥沙濃度以及土地利用狀況等紀錄資料，均已公開於美國農業部 (United States Department of Agriculture) 網站，下載網址為 <http://ars.usda.gov/Business/docs.htm?docid=5120>。

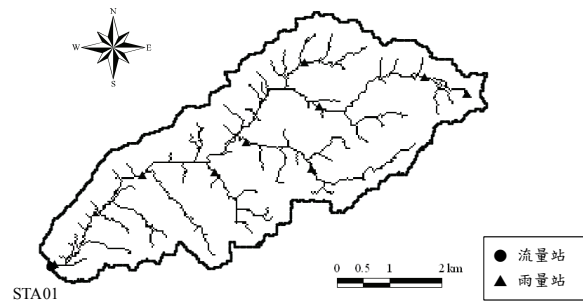


圖 4 Goodwin Creek 河川網路圖  
Fig.4 Map of the Goodwin Creek watershed

表 1 Goodwin Creek 集水區之地文因子

**Table 1 Geomorphologic factors of Goodwin Creek watershed**

級序 $i$	河川數目 $N_i$	次集水區面積比例 $P_{oA_i}$	河川平均長度 $\bar{L}_{c_i}$ (m)	漫地流平均坡度 $\bar{S}_{o_i}$	河川平均坡度 $\bar{S}_{c_i}$
1	62	0.64342	430	0.0252	0.0113
2	10	0.21930	1,540	0.0284	0.0073
3	2	0.04614	1,300	0.0307	0.0012
4	1	0.09114	7,470	0.0301	0.0024

\* 河川轉移機率： $P_{x_1x_2} = 0.661$ 、 $P_{x_1x_3} = 0.032$ 、 $P_{x_1x_4} = 0.306$ 、 $P_{x_2x_3} = 0.500$ 、 $P_{x_2x_4} = 0.500$ 、 $P_{x_3x_4} = 1$ 。

2. 地貌瞬時單位泥沙歷線模式之參數特性與實際應用情形

由上述地貌瞬時單位泥沙歷線模式顯示，同一集水區在地文特性不變的情況下，影響泥沙運行時間(或瞬時單位泥沙歷線)之參數包括  $a_o$ 、 $b_o$ 、 $a_c$ 、 $b_c$ 、 $SDR_{o_i}$  以及  $SDR_{c_i}$ 。若  $D = 0.00001 kg/m^2/s$  且  $SDR_{o_i} = SDR_{c_i} = 1$ ，圖 5 至圖 8 為各參數改變對瞬時單位泥沙歷線之影響，圖中瞬時單位泥沙歷線係以第(5)式計算所得的機率分佈，因此泥沙濃度之單位為機率值。圖 5、圖 6 以及圖 8 顯示，當  $a_o$ 、 $a_c$  以及  $b_c$  數值增大，泥沙運行時間變快，泥沙歷線尖峰增高，且泥沙尖峰到達時刻提前；但當  $b_o$  數值增大，泥沙運行時間略為變慢，泥沙歷線尖峰略為減低，且泥沙尖峰到達時刻些微延後，惟歷線變化並不顯著(如圖 7)。

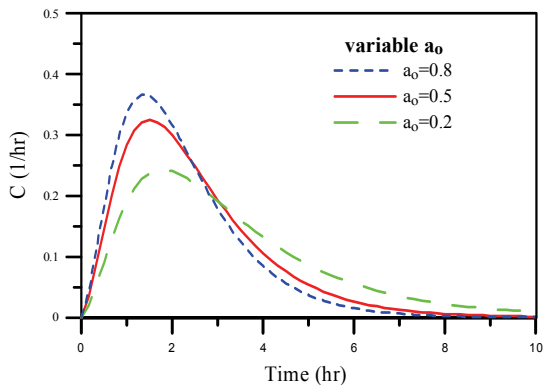


圖 5 不同  $a_o$  值之瞬時單位泥沙歷線

**Fig.5 Variation of IUS with  $a_o$  value**

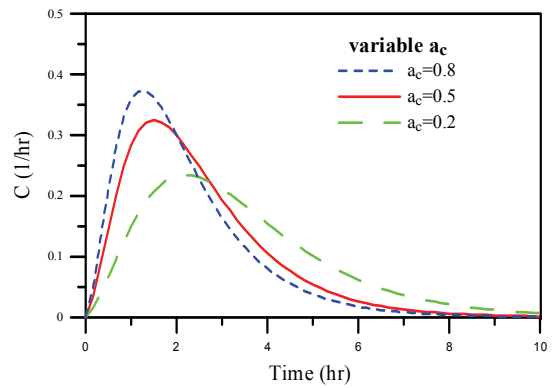


圖 6 不同  $a_c$  值之瞬時單位泥沙歷線

**Fig.6 Variation of IUS with  $a_c$  value**

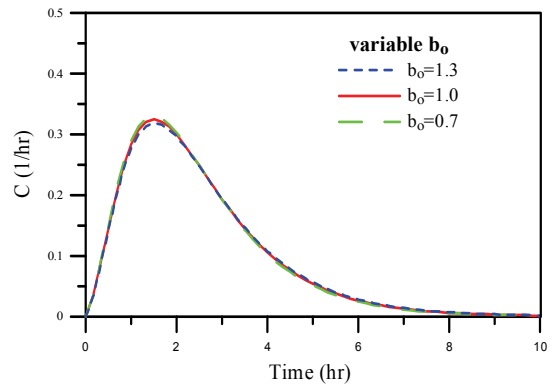


圖 7 不同  $b_o$  值之瞬時單位泥沙歷線

**Fig.7 Variation of IUS with  $b_o$  value**

圖 9 是 2000 年 4 月 3 日與 2001 年 2 月 15 日發生於 Goodwin Creek 集水區的兩場真實降雨事

件，圖中顯示，以運動波-地貌瞬時單位歷線模式所模擬之流量歷線，與出口處的流量紀錄十分近似；圖 10 則為該集水區相同場次所測得之泥沙紀錄，圖中亦顯示，地貌瞬時單位泥沙歷線模式對泥沙量之模擬結果，尚稱良好。

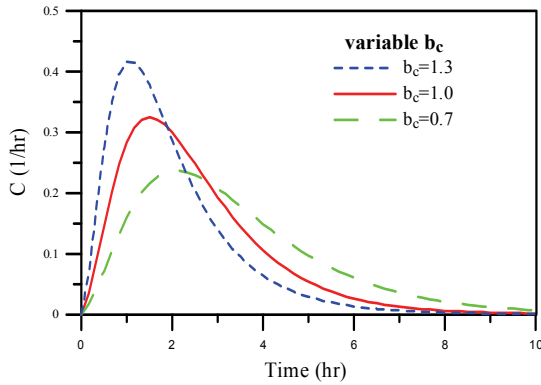


圖 8 不同  $b_c$  值之瞬時單位泥沙歷線

Fig.8 Variation of IUS with  $b_c$  value

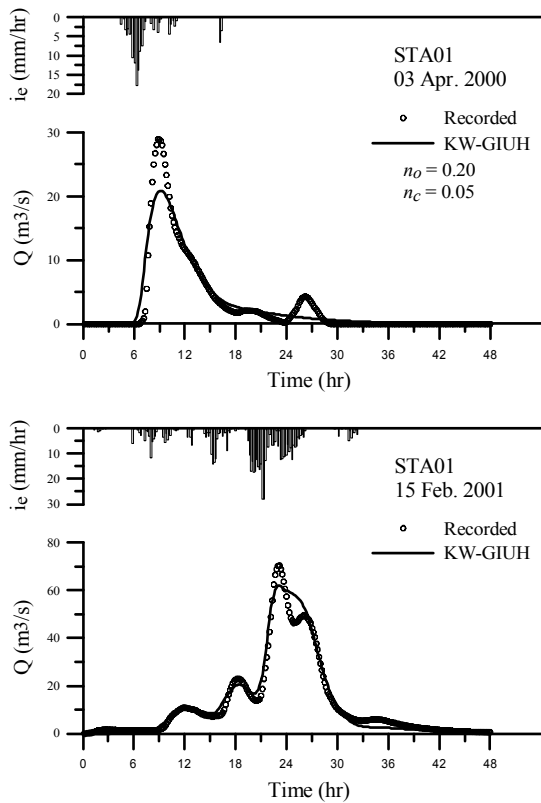


圖 9 流量歷線模擬結果

Fig.9 Flow hydrograph simulations

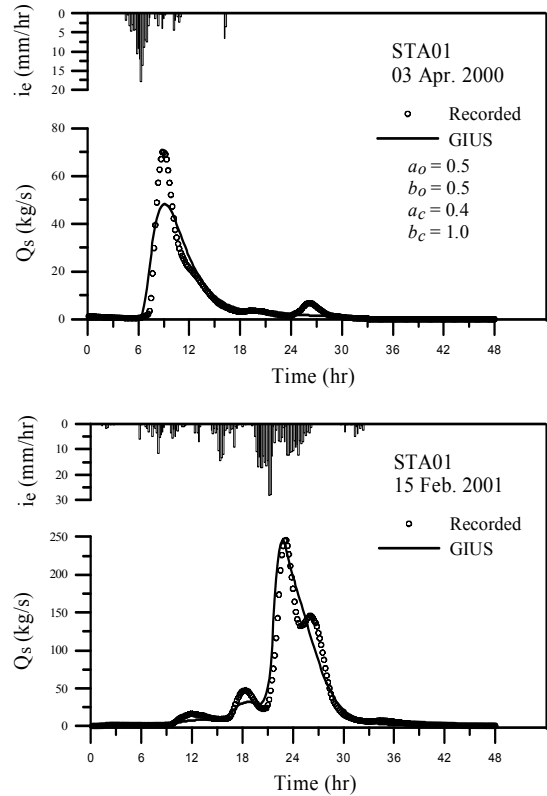


圖 10 泥沙歷線模擬結果

Fig.10 Sedimentgraph simulations

### 3. 單一值線 (single-valued line)

依運動波-地貌瞬時單位歷線模式以及地貌瞬時單位泥沙歷線模式之理論，當各階段逕流運行時間等於泥沙運行時間時，瞬時單位歷線與瞬時單位泥沙歷線之分佈將完全相同，此時泥沙與流量間之關係即為單一值線。圖 11(a)中之流量部份，為  $i = 10 \text{ mm/hr}$ 、漫地流糙度係數  $n_o = 0.50$  以及河川糙度係數  $n_c = 0.02$  時，經運動波-地貌瞬時單位歷線模式所計算求得之瞬時單位歷線；泥沙濃度部份，則為  $D = 0.0001 \text{ kg/m}^2/\text{s}$  以及  $SDR_{o_i} = SDR_{y_i} = 1$ ，經地貌瞬時單位泥沙歷線計算所求得之瞬時單位泥沙歷線，由於各階段之逕流運行時間與泥沙運行時間相等，其形狀與瞬時單位歷線完全相同，此時模式參數是以試誤法求得，當  $b_{o_i} = 1$  且  $a_{o_i} = 0.43$  時，可使  $T_{so_i} = T_{o_i}$ ，又當  $b_{c_i} = 1$  且  $a_{c_1} = 0.43$ 、 $a_{c_2} = 0.44$ 、 $a_{c_3} = 0.39$ 、 $a_{c_4} = 0.43$  時，可使  $T_{sc_i} = T_{c_i}$ 。如圖 11(b)所示，此種情形下之泥沙濃度率定曲線呈現單一值線關係，一個



水流條件會對應到一個泥沙生成量，此率定曲線發生在沙源充足或泥沙容易運移之情況（Williams, 1989）。後續各泥沙濃度率定曲線之數值模擬，流量部份與本例相同，泥沙濃度部份則是調整  $a_{o_i}$  與  $a_{c_i}$  兩項參數而得。

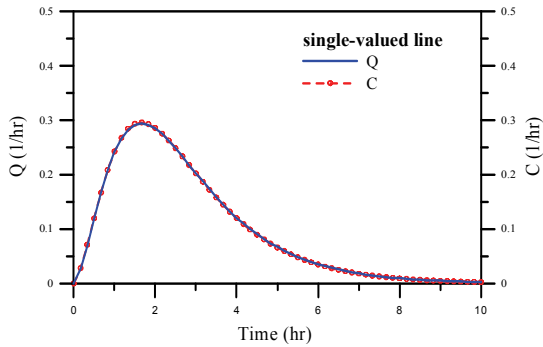


圖 11(a) 單一值線關係之歷線

Fig.11(a) Single-valued C-Q relationship

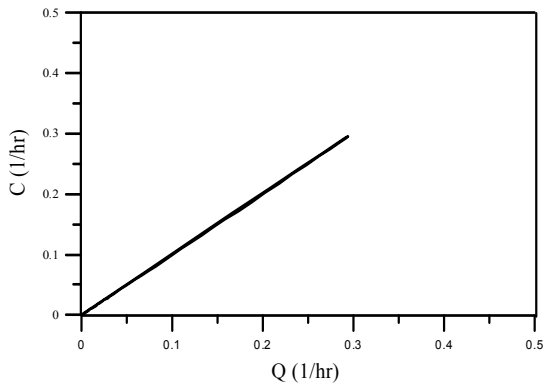


圖 11(b) 單一值線

Fig.11(b) Single-valued line

#### 4. 順時針迴圈 (clockwise loop)

圖 12(a)顯示一個集水區的泥沙歷線尖峰與尖峰到達時刻，大量超前逕流歷線之情形（此時模式參數為  $a_{o_i} = 0.63$ 、 $a_{c_i} = 0.63$ 、 $a_{c_2} = 0.64$ 、 $a_{c_3} = 0.59$ 、 $a_{c_4} = 0.63$ ）。Williams (1989) 認為這種情形通常發生在面積較小的集水區，或是雨季剛開始時期；而圖形中泥沙歷線快速消滅的原因，則可能是初期的沙源耗盡，或者是護甲效應所致。如圖 12(b)所示，此種情形下之泥沙濃度率定曲線呈現順時針迴圈的形狀，一個水流條件會對應到兩個泥沙生成量。在逕流歷線

上昇段，會對應到一個較高的泥沙產生量；而在逕流歷線退水段，則會對應到一個較低的泥沙產生量。

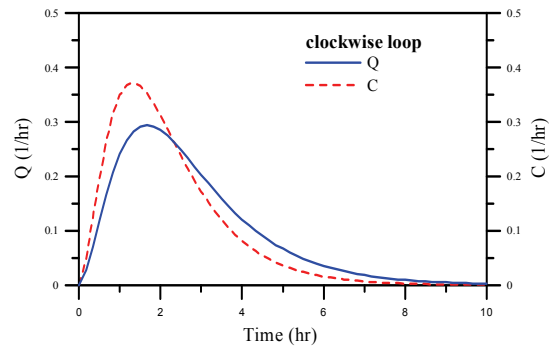


圖 12(a) 順時針迴圈關係之歷線

Fig.12(a) Clockwise C-Q relationship

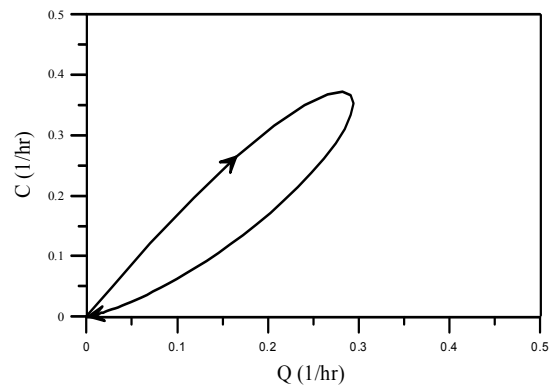


圖 12(b) 順時針迴圈

Fig.12(b) Clockwise loop

#### 5. 逆時針迴圈 (counterclockwise loop)

圖 13(a)顯示一個集水區的泥沙歷線尖峰與尖峰到達時刻，大幅落後逕流歷線之情形（此時模式參數為  $a_{o_i} = 0.23$ 、 $a_{c_i} = 0.23$ 、 $a_{c_2} = 0.24$ 、 $a_{c_3} = 0.19$ ）。Williams (1989) 認為這種情形主要發生在逕流與泥沙傳遞速度不同之時，圖中泥沙歷線消退緩慢之原因，則可能是易蝕性土壤受到大雨較長時間之侵蝕、集水區內降雨分佈不均或是季節變化等原因所致。如圖 13(b)所示，此種情形下之泥沙濃度率定曲線呈現逆時針迴圈的形狀，一個水流條件會對應到兩個泥沙生成量。在逕流歷線上昇段，會對應到一個較低的泥沙產生量；而在逕流歷線退水段，則會對應到一個較高的泥沙產生量。



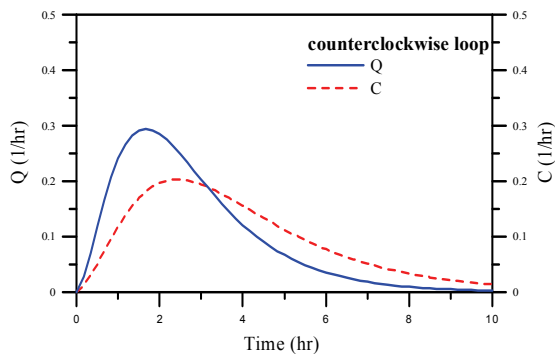


圖 13(a) 逆時針迴圈關係之歷線  
**Fig.13(a) Counterclockwise C-Q relationship**

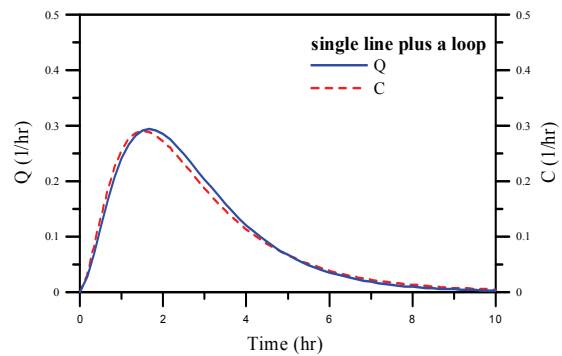


圖 14(a) 單一直線加迴圈關係之歷線  
**Fig.14(a) Single line plus a loop C-Q relationship**

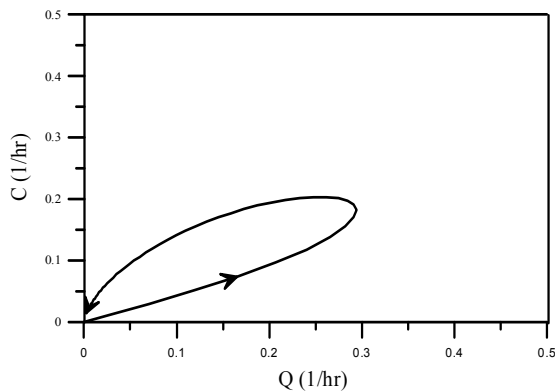


圖 13(b) 逆時針迴圈  
**Fig.13(b) Counterclockwise loop**

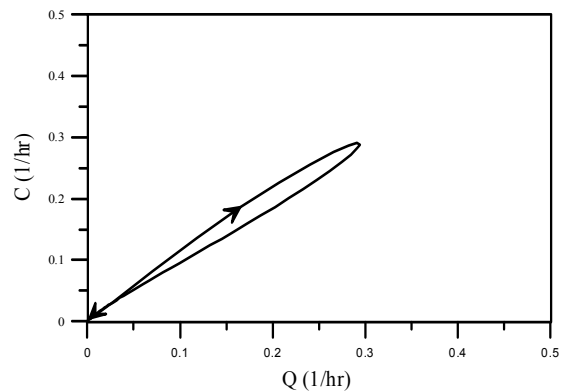


圖 14(b) 單一直線加迴圈  
**Fig.14(b) Single line plus a loop**

6. 單一直線加迴圈 (single line plus a loop)

圖 14(a)顯示一個集水區的泥沙歷線尖峰與尖峰到達時刻, 些微地超前逕流歷線之情形; 但在低流量時期, 兩歷線之形狀相同 (此時模式參數為  $a_{o_1} = 0.30$ 、 $a_{o_2} = 1.00$ 、 $a_{o_3} = 5.00$ 、 $a_{o_4} = 0.20$ 、 $a_{c_1} = 0.30$ 、 $a_{c_2} = 0.44$ 、 $a_{c_3} = 0.50$ 、 $a_{c_4} = 0.50$ )。Williams (1989) 認為這是一種混合的關係型態, 由單一值線與順時針迴圈組成, 其形成原因與上述相同, 多半是受泥沙沈淤貯存、沙源量或泥沙運移能力等因子影響所致。如圖 14(b)所示, 此種情形下之泥沙濃度率定曲線在低流量時期呈現單一值線關係, 一個水流條件會對應到一個泥沙生成量; 但在高流量時期出現順時針迴圈的形狀, 此時一個水流條件會對應到兩個泥沙生成量。

7. 8 字形迴圈 (figure eight)

圖 15(a)顯示一個集水區的泥沙歷線尖峰與尖峰到達時刻, 略為超前於逕流歷線, 然而泥沙歷線在高流量時期即已快速消退的情形; 但在低流量時期, 泥沙歷線反應卻慢於逕流歷線 (此時模式參數為  $a_{o_1} = 10.00$ 、 $a_{o_2} = 0.43$ 、 $a_{o_3} = 0.43$ 、 $a_{o_4} = 0.10$ 、 $a_{c_1} = 0.43$ 、 $a_{c_2} = 0.44$ 、 $a_{c_3} = 0.39$ 、 $a_{c_4} = 0.10$ )。Williams (1989) 認為這也是一種混合的關係型態, 由順時針迴圈與逆時針迴圈組合而成, 形成原因複雜。如圖 15(b)所示, 此種情形下之泥沙濃度率定曲線呈現 8 字形迴圈的形狀, 一個水流條件會同時對應到較高與較低的兩個泥沙生成量。低流量時期, 逕流歷線上昇段會對應到較低的泥沙產生量, 退水段則對應到較高的泥沙產生量; 高流量時期則反之, 逕流歷線上昇段會對應到較高的泥沙產生量, 退水段則對應到較低的泥沙產生量。

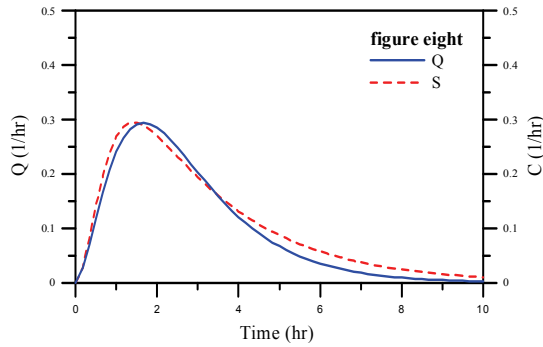


圖 15(a) 8 字形迴圈關係之歷線

Fig.15(a) Figure eight C-Q relationship

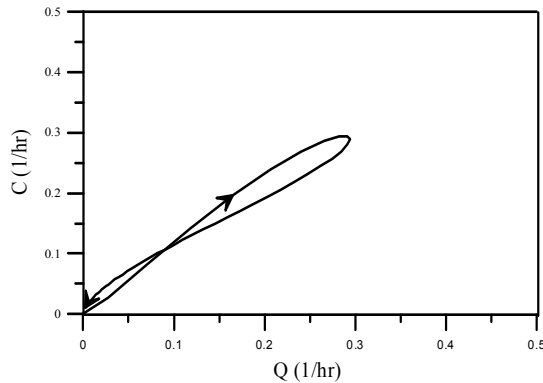


圖 15(b) 8 字形迴圈

Fig.15(b) Figure eight

#### 四、結 論

本研究藉由地貌瞬時單位泥沙歷線模式，詳細探討 Williams (1989) 所述泥沙濃度率定曲線的五大類型，研究結果顯示，泥沙運行時間與逕流運行時間的差異情形，可形成不同特性之泥沙濃度率定曲線，因此，集水區逕流運行時間以及泥沙運行時間之關係，可視為影響滯滯迴圈型態的重要因素。此外，數值試驗過程僅調整  $a_o$  與  $a_c$  兩項參數，卻已能適切改變瞬時單位泥沙歷線，由此顯見，具有結構合理、參數少、彈性好以及計算簡便等優點。

#### 參考文獻

Asselman, N.E.M. (1999). "Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine," *Hydrol. Process.*, 13: 1437-1450.  
Blackmarr, W. A. (1995). "Documentation of hydrologic, geomorphic, and sediment

transport measurements on the Goodwin Creek Experimental Watershed, Northern Mississippi, for the period 1982-1993," preliminary release, USDA-ARS National Sedimentation Laboratory, Oxford, MS.

Brasington, J. and K. Richards (2000). "Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills," *Hydrol. Process.*, 14: 2559-2574.

Bull, L. J. (1997). "Relative velocities of discharge and sediment waves for the River Severn, UK," *Hydrol. Sci. J.*, 42(5): 649-660.

Bull, L.J., D.M Lawler, G.J.L. Leeks, and S. Marks (1995). "Downstream changes in suspended sediment fluxes in the River Severn, UK," In: *Effects of scale on interpretation and management of sediment and water quality*, ed. by W. R. Osterkamp (Proc. Boulder Symp., July 1995), 27-36. IAHS Publ. no. 226.

Einstein, H.A. (1943). "Discussion on distribution graphs of suspended-matter concentration," *Trans. - ASCE*, 69: 957-958.

Glover, B.J. and P. Johnson (1974). "Variations in the natural chemical concentration of river water during flood flows, and the lag effect," *J. Hydrol.*, 22: 303-316.

Heidel, S.G. (1956). "The progressive lag of sediment concentration with flood waves," *Transaction, AGU.*, 37(1): 56-66.

Johnson, J.W. (1943). "Distribution graphs of suspended-matter concentration," *Trans. - ASCE*, 33(1): 100-104.

Lawler, D.M., G.E. Petts, I.D.L. Foster, and S. Harper (2006). "Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river system: The Upper Tame, West Midlands, UK," *Science of the Total Environment*, 360: 109-126.

Lee, K.T. and B.C. Yen (1997). "Geomorphology and kinematic-wave-based hydrograph derivation," *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 123(1): 73-80.

Lee, K.T. and C.C. Yang (2010). "Estimation of sediment yield during storms based on soil and watershed geomorphology characteristics," *J. Hydrol.*, 382: 145-153.

- Lee, K.T., N.C. Chen and Y.-R. Chung (2008). "Derivation of variable IUH corresponding to time-varying rainfall intensity during storms," *Hydrol. Sci. J.*, 53(2): 323-337.
- Lefrancois, J., C. Grimaldi, C. Gascuel-Oudou and N. Gilliet (2007). "Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments," *Hydrol. Process*, 21: 2923-2933.
- Marcus, W.A. (1989). "Lag-time routing of suspended sediment concentrations during unsteady flow," *Geological Society of America Bulletin*, 101: 644-651.
- Megnounif, A., A. Terfous, A. Ghenaïm and J.-B. Poulet (2007). "Key processes influencing erosion and sediment transport in a semi-arid Mediterranean area: the Upper Tafna catchment, Algeria," *Hydrol. Sci. J.*, 52(6): 1271-1284.
- Olive, L.J., J.M. Olley, P.J. Wallbrink and A.S. Murray (1996). "Downstream patterns of sediment transport during floods in the Murrumbidgee River, NSW, Australia," *Z. für Geomorphologie, Supplementband*, 105: 129-140.
- Rodriguez-Iturbe, I. and J.B. Valdes (1979). "The geomorphologic structure of hydrologic response," *Water Resour. Res.*, 15(6): 1409-1420.
- Seeger, M., M.P. Errea, S. Begueria, J. Arnaez, C. Marti, J. M. Garcia-Ruiz (2004). "Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees," *J. Hydrol.*, 288: 299-311.
- Sichingabula, H.M. (1998). "Factors controlling variations in suspended sediment concentration for single-valued sediment rating curves, Fraser River, British Columbia, Canada," *Hydrol. Process.*, 12: 1869-1894.
- Williams, G.P. (1989). "Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers," *J. Hydrol.*, 111: 89-106.
- Wood, P.A. (1977). "Controls of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England," *Sedimentology*, 24: 437-445.

---

2010年3月19日 收稿

2010年7月5日 修正

2010年10月22日 接受

(本文開放討論至2011年6月30日)