

集水區泥砂產量推估之研究

林昭遠⁽¹⁾ 陳昱豪⁽²⁾ 林家榮⁽³⁾

摘要

近年來臺灣山坡地飽受天然災害摧毀，尤其以暴雨時期帶來之傷亡損失特別嚴重，災害之產生源自於暴雨所降下之雨量對於坡面產生沖蝕，坡面泥砂流失進入河道中形成挾砂水流甚至土石流，土砂經由河道向下游吞噬居民生命財產，產生災害甚鉅。然而災害之防治，須從致災原因探究起，因此河道泥砂產量的探究即為水土保持工作上不可或缺的一環。本研究以濁水溪流域陳有蘭溪集水區為對象，分析賀伯颱風、921 地震、桃芝颱風、72 水災等事件之泥砂量。藉由通用土壤流失公式推估土壤流失量。並由各時期 SPOT 衛星影像推估出崩場地進而推算崩場地泥砂產量。將土壤流失量和崩場泥砂產量配合遞移率觀念估算流入河道泥砂產量，在此次研究發現崩場地遞移量遠比 USLE 所算出之泥砂遞移量少，顯示出災害發生之原因乃於短期間降下大量豪雨將蘊藏於坡面之土砂一次攜出超過下游負荷能力所致。

(關鍵字: 坡面沖蝕 崩場地 遞移率)

A study of watershed sediment yield estimation

Chao-Yuan Lin⁽¹⁾

Professor, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University

Yu-hau Chen⁽²⁾, Chia-rung Lin⁽³⁾

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University

ABSTRACT

Due to steep topography, vulnerable geology, and improper landuse, debris flow occurs frequently at the mountain areas where people suffers from the disaster of debris flow during the typhoon seasons. Casualty and property losses during the torrential rain period are very high. The main hazard reason is the severe erosion caused by the intensive rain fall, the sediment from the slopeland slide into the channel may deteriorate the flood event and even cause debris flow. However, the mitigation methods need be based on the mechanics of the hazard. The sediment yield estimation

(1) 國立中興大學水土保持學系教授

(2) 國立中興大學水土保持學系碩士班學生

(3) 國立中興大學水土保持學系博士班學生

becomes an important task for the soil and water conservation works. The study area is the Chen-yu-lan Stream watershed, the 921 earthquakes, typhoon Toraji, and the 72 Flood were the study events, and USLE (Universal Soil Loss Equation) was used to estimate soil loss from slopelands. The method suggested by Khazai and Sitar was employed to predict the landslide quantity. Combining SDR (Sediment Delivery Ratio) and channel attenuation in a storm event and the SPOT satellite images and digital terrain models were used to process the vegetation index analysis for identifying landslide sites, and sediment yield. Results indicate that, the sediment yield from the collapse is far less than the slopeland and the hazard was induced by the over-loaded quantity of sediments from the severe storm event.

(**Keyword:** Soil loss, Landslide, Sediment Delivery Ratio)

前言

針對集水區輸出之土砂量，因其機制甚為複雜，目前各家學說大致上皆採用經驗式加以評估，因上述輸砂演算及推估法則，常因計算式極為複雜以及較佳適用效果差異懸殊，而使模擬河道輸砂時無法精確分析。部分計算式更面臨資料不易取得，例如：分層厚度、能量坡降、傳遞速度，或必須假設代表值，例如：顆粒單次移動距離、河床粗糙度。而本研究所提出的推估河道泥砂產量是將河道泥砂分為推移質和懸浮載二部分；假設推移質是經由崩塌產生之土方，而懸浮載是坡面泥砂提供。研究中將推估概念發展成電腦模式，讓整個演算去除人為誤差，提供較為客觀之結果。

文獻回顧

(一) 坡面泥砂遞移量之估算

泥砂遞移量的計算方式，係考慮集水區泥砂經由沖蝕傳輸至下游出口處者，謂之集水區泥砂產量；此與集水區總沖蝕量不同。在某一時期內通過溝渠或河流某一斷面之輸砂量與該斷面以上之集水區總土壤流失量之比，稱為泥砂遞移率(Sediment Delivery Ratio; SDR)。依照 Walling(1988)針對遞移率在美國水土保持學會所出版之「土壤沖蝕研究方法」(Soil Erosion Research Methods)一書中所定義之內容則為：集水區出水口泥砂產量($t/km^2/yr$)

與泥砂總量($t/km^2/yr$)之比值。

整體而言，坡面土壤沖蝕在河川輸砂之貢獻度，仍須計算遞移率，以便瞭解坡面土壤沖蝕的年沖蝕量與真正進入河道的泥砂量。泥砂遞移率之計算常因理論過於複雜，而導致實務上無法計算或專業人員亦無法有效評估的窘境。Walling (1988)與 Walling *et al.*(2002)亦提到雖然有許多文獻記載泥砂遞移率可能低到 0.05~5%之間，但以集水區整體觀點而言，因存在許多不確定性，仍無法建立一套正確且客觀之泥砂遞移率之評估法則，本研究將依照 Lin *et al.* (2002)所提出泥砂遞移率係以單位網格為基礎，配合土壤流失量可推估集水區出口的坡面泥砂遞移量之理論，進行計算。參酌國內、外學者之研究成果，對於泥砂遞移率之評估公式，學者對集水區泥砂產量之推估趨勢，已由傳統之整體集水區之長度、面積、坡度等計算觀點，轉而成為以處理數位高程模組(Digital Elevation Model, DEM)，並以網格式逐步推導之理論技術建構為主，因其可更為精確評估局部狀況與整合時下之地理資訊系統(GIS)之技術，以提供查詢、展示、分析等平台。

(二) 崩場地泥砂產量推估

針對崩場地土石崩塌量之推估，依照水土保持技術規範第六十七條規定：「崩塌量調查方法，應由實測或部分配合推估實施

之。新崩場地，得利用實際勘查或利用航照圖判斷，亦可利用衛星影像等最新科技，以進行崩塌量之調查。」

崩塌發生之原因常為土壤孔隙水壓增加，致使風化層的抵抗力小於重力作用，而導致地滑或崩塌現象之發生。當岩石碎屑件和土壤與水分沿坡面向下移動，直到崩塌材料用盡為止方停止運動，崩塌材料常因此堆積在河道或較緩之坡面。在崩塌量之推估上，一般常用的方法為(Dymond et al., 1999) 假設坡面之剪應力等於抗剪力時(圖 1)，為啟動崩塌之機制瞬間，此時剪應力為 $F_g = \rho * g * \sin\theta$ 而抗剪力為 $F_s = S/d$ ，因此可得崩塌深度與坡度之關係為： $d = S/(\rho * g * \sin\theta)$ 式中

- S：剪應力、
- d：崩塌深度、
- ρ ：土體密度、
- g：重力加速度、
- θ ：坡度。

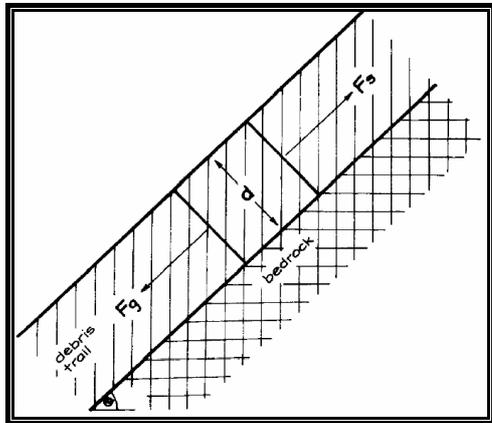


圖 1 坡面崩塌機制示意圖

Fig.1 The illustration of landslide mechanics

由上式可觀察到崩塌深度與坡度之正弦呈現正比關係，但事實上並非任何坡度的邊坡皆可發生崩塌現象，崩塌常發生在某特定範圍內(歐陽元淳，2003)，因緩和的邊坡無法促使坡面產生足夠的剪應力，而陡峭邊

坡則常因表土的風化層太薄，亦無法產生足夠的崩塌力量。Khazai and Sitar 針對集水區內崩場地進行評估時，依照不同的坡度範圍給定代表性的崩塌深度如下表 1：

表 1 坡度與崩塌代表性深度對照表

Table1. The summary of the representative landslide depth and average slope

坡面坡度(度)	崩塌平均代表深度
<30	2m
30-40	1.5m
40-60	1m
>60	0.5m

上述假設崩塌為風化後之岩體或崩積層，故為一經驗式，若能以現地調查則以現地調查為主，但在對大面積之集水區進行總體評估或大量之崩場地土方量計算時，實為一簡單迅速的方法。(歐陽元淳，2003)

材料與方法

(一) 研究試區概況

陳有蘭溪為濁水溪主要支流之一，河長 42Km，流域面積 448 Km²。集水區內匯集玉山北坡面、阿里山脈東坡面與郡大山脈西坡面之水朝北流，為一斷層線縱谷。其行政區域圖如圖 2。流域呈狹長形，主流由南向北流，坡降高達 6.1%，除陳有蘭溪及和社溪坡降在 10%以下外，較大的支流如內茅埔溪、郡坑溪、牛稠坑溪、筆石溪、十八重溪、阿里不動溪及沙里仙溪等均在 10%~25%。至於流域面積，除幾條主要支流的流域面積較大外，85% 的支流流域面積在 10 Km² 以下，其中 50% 在 2Km² 以下。流域內各支流大多為坡陡流急的小集水區。由於上游支流短、水流急，向源侵蝕旺盛，主、支流向下游供應大量土石。本流域內之土地依坡度可分為七級。坡度小於 40% 的土地面積僅有 72.85 km² (含河川面積)。坡度大於 40% 之土地面積佔全區

83.73%；坡度大於 55%之山坡地占全區之 69.23%。

(二) 研究方法及流程

本研究將集水區土砂災害來源主要分為二大部分：1.坡面泥砂遞移量 2.崩場地泥砂遞移量；其中總體泥砂量透過河道輸砂而產生，對於保全對象之影響，則採用遞移率的觀念加以計算，流程如下圖 3。

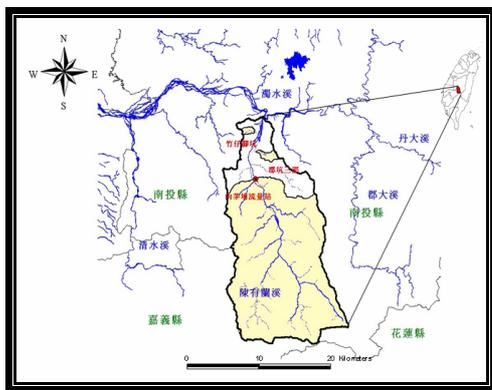


圖 2 研究區行政區域圖
 Fig. 2 The study area

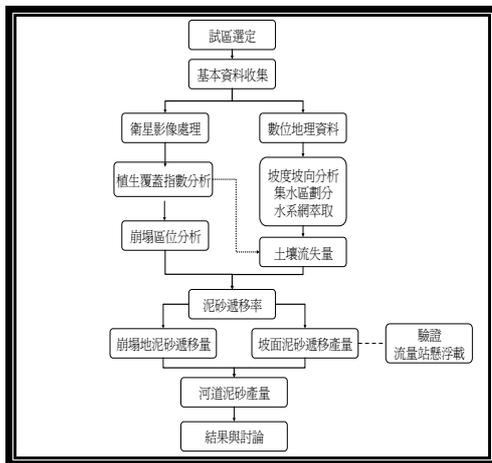


圖 3 研究流程示意圖
 Fig. 3 The flowchart of this study

在試區上本研究選取陳有蘭溪及其中之內茅埔流量站以及陳有蘭溪上游郡坑三部溪、竹仔腳坑溪等四集水區進行研究。利用

通用土壤流失公式推算各時期集水區之年土壤流失量，接著以單一場次暴雨之雨量與年平均雨量比值換成該場暴雨所產生之土壤流失量。再利用各時期影像之植生覆蓋因子(C)推估出崩場地，進而推算崩場地泥砂產量，配合遞移率之觀念推估土壤流失量和崩場地泥砂產量進入河道之泥砂量。

由於土壤流失量代表集水區泥砂之懸浮載部份，因此以陳有蘭溪下游內茅埔流量站之懸浮載資料進行驗證，首先將 1972-2004 之所有降雨流量資料與所測得之懸浮載值進行相關分析求得其相關式，再以該事件流量代入所推出之迴歸式與通用土壤流失公式所推估坡面泥砂遞移量進行比對。

(三) 研究步驟

1. 土壤流失量及坡面泥砂遞移量

a. 土壤流失量

本研究採用水土保持技術規範之萬用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE)估算坡面泥砂產量其公式如下：

$$Am = Rm \times Km \times L \times S \times C \times P$$

Am:土壤流失量(tons/ha/yr)；

Rm:降雨沖蝕指數(Mj-mm/ha-hr-yr)；

Km:土壤沖蝕指數
(tons-ha-hr-yr/Mj-mm-ha-yr)；

L:坡長因子；

S:坡度因子；

C:覆蓋與管理因子；

P:水土保持因子。

b. 坡面泥砂遞移量

本研究所提出之坡面泥砂遞移量之計算，基於整合地理資訊系統並結合網格式計算理論與集水區自動劃分等技術，其方法論係延續 Lin *et al.* (2002)所建構之理論基礎，假設坡面泥砂主要係由坡面地表水所帶動，運移至渠道(常流水)而流失。依此假設及泥砂遞移率之定義，泥砂遞移率可視為某格點對最

接近渠道格點之泥砂貢獻量，若將泥砂貢獻量用網格上游流入面積表示，則網格上游流入面積愈大，其產生的逕流量亦愈大，愈能將泥砂帶至河道。因此，集水區坡面上任一格點之泥砂遞移率，可視為該格點上游流入面積(A_{grid})與該格點流至最接近渠道之上游流入面積(A_{total})之比值；意即濱水區愈靠近渠道之格點，其坡面沖蝕之泥砂愈容易進入渠道，而增加河道之泥砂產量，故泥砂遞移率愈高。集水區之坡面泥砂產量(Y_s)可由集水區坡面土壤流失量(A_m)與坡面泥砂遞移率(SDR)之乘積($Y_s=A_m*SDR$)來推算，藉由網格之排水流向可計算每個網格之泥砂遞移率及泥砂量(圖 4)。

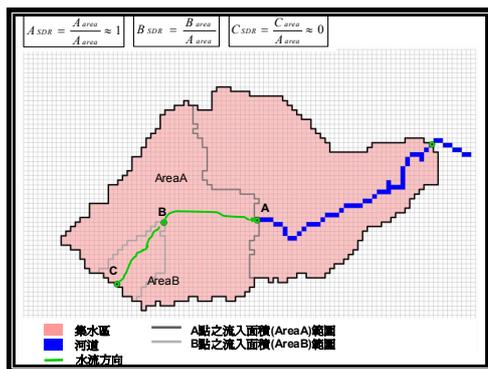


圖 4 集水區坡面泥砂遞移率示意圖

Fig.4 The illustration of the sediment delivery ratio concepts in a watershed

2. 崩塌區位分析及崩塌泥砂遞移量

a. 崩塌區位分析

以往崩塌地判定經常利用航照圖以人工方式進行判釋，往往因經驗及主觀意識之差異產生影響。本研究崩塌地區位分析乃利用衛星遙測影像資料之數值化，由於植物對於不同光譜吸收能力不同之特性，以可見光及近紅外光之比值建立常態化差異植生指標(NDVI)，其計算方法如下。

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

NIR :近紅外光 ; R :紅光

針對常態化差異植生指標進行線性反轉後配置出 C 值，其公式為：

$$C = (1 - NDVI) / 2$$

由於植物對於近紅外光反射較裸露土石強。因此，植生良好之區域 C 值較小；崩塌後地表植生遭受破壞呈現裸露狀態， C 值相對增加。有鑑於此，以前後時期之 C 值差異即綠色植生量高低判別崩場地之及地表復育情形，崩塌萃取採用經驗式之 C 值，為起始值可得一崩塌檔案。開啓崩塌檔案與 2 期衛星影像進行比對，對崩場地符合影像差異與否調整 2 期之 C 值差至崩塌檔案與實地崩塌情形達到符合即為所推估之崩場地。

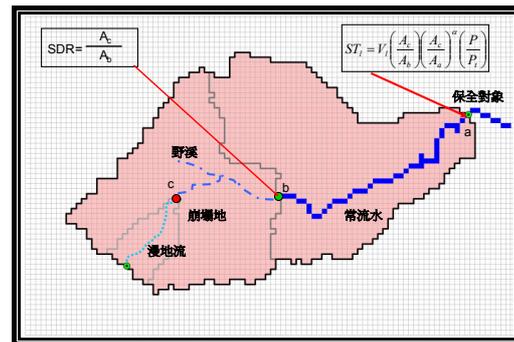


圖 5 集水區崩場地泥砂遞移量示意圖

Fig.5 The illustration of the sediment delivery quantity from landslide site in the watershed

b. 崩場地泥砂遞移量

崩場地對保全對象之泥砂產量為崩塌土砂量沿河道遞移至保全對象之輸送量，遞移路徑與公式以圖 5 說明，其輸砂通式可寫成：以圖 5 表示；假設於集水區上游 c 點發生崩塌，其崩塌量須考慮輸送到常流水之能力即為以遞移率修正。再者崩塌粒徑大小同時對於保全對象之搬運能力不同，粒徑大之崩塌搬運所須動能較高較不易對下游產生影響；反之顆粒小之崩塌易於搬運，因此研究中建議依崩塌型式以不同粒徑大小給與不同輸砂衰減係數加以修正，並配合事件雨量與年平

均雨量之比值；即為坡面泥砂遞移量。

$$ST_t = V_l \left(\frac{A_c}{A_b} \right) \left(\frac{A_c}{A_a} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_t} \right)$$

式中，

ST_t ：泥砂遞移量 (m^3)、

V_l ：崩塌體積 (m^3)、

A_a ：鄰近保全對象河道之集水區面積(ha)、

A_b ：b 點之集水區面積 (ha)、

A_c ：c 點之集水區面積 (ha)、

P ：單場雨量 (mm)、

P_t ：年雨量 (mm)、

α ：輸砂衰減係數。

(四) 河道泥砂產量

河道輸送之泥砂量包括來自坡面的土壤沖蝕遞移量(懸浮載)與崩塌地的土砂遞移量，針對保全對象產生的總體泥砂運移量之通式可寫為：

$$ST_t = (ST_{slope} + ST_{landslide}) \quad \text{式中；}$$

ST_t ：總體泥砂運移量 (Total Sediment Transport, ST_t)、

$ST_{slope}(ST_s)$ ：來自坡面的土壤沖蝕遞移量、

$ST_{landslide}(ST_l)$ ：來自崩塌地的土砂遞移量。

河道潛在輸砂效能與地文因子(坡度)及水文因子(流量)有關，且並非每一單場降雨皆會導致相同的輸砂量。因此本研究亦提出在同一集水區探討土砂災害時，單場暴雨(single event)的雨量將會影響每次泥砂的運移量，將此雨量影響關係納入計算式中，其公式將會改寫成：

$$ST_t = (ST_s + ST_l) \left(\frac{P}{P_t} \right)$$

若將泥砂來源之二大部分，分開計算時公式可更進一步寫成：

$$ST_t = V_s \left(\frac{A_c}{A_b} \right) \left(\frac{A_c}{A_a} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_t} \right) + V_l \left(\frac{A_c}{A_b} \right) \left(\frac{A_c}{A_a} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_t} \right)$$

式中， V_s ：可由土壤沖蝕通用公式(USLE)中評估獲得，惟因土壤沖蝕之輸砂衰減係數為0($\alpha=0$)，故整體公式可寫為：

$$ST_t = V_s \left(\frac{A_c}{A_b} \right) \left(\frac{P}{P_t} \right) + V_l \left(\frac{A_c}{A_b} \right) \left(\frac{A_c}{A_a} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_t} \right)$$

式中崩塌地土砂遞移衰減之影響因子可分為：

1. 面積因子：

若崩塌地離保全對象非常遠 ($\frac{A_c}{A_a} \cong 0$)，則輸砂率影響不大；若崩塌地離保全對象非常近

($\frac{A_c}{A_a} \cong 1$)，則影響輸砂率甚鉅。

2. 輸砂衰減係數：

α 值為輸砂衰減係數，其可能由細顆粒之土壤沖蝕之完全遞移($\alpha=0$)至大顆粒土砂遞移比率($\alpha=1$)；此類分布應進一步比對河床質(D_{50})調查，以建立類似水土保持技術規範中泥砂運移量所採用之計算公式。

結果與討論

(一) 坡面泥砂遞移量

本研究利用通用土壤流失公式並配合泥砂遞移率推估陳有蘭溪集水區，於賀伯颱風、921 地震、桃芝颱風及 72 水災等四時期年坡面泥砂遞移量，其結果如表 2 所示。由表 2 可得知於 2001 年桃芝颱風時陳有蘭溪流域坡面所產生之沖蝕最為嚴重，其中內茅埔流量站集水區沖蝕深度最深高達 2.31cm/yr；且該年雨量達到 3264mm 已高於歷年平均降雨 2500mm，其雨量充沛足以將以往蓄積於集水區之土砂一並帶出。本研究以各事件暴雨雨量佔全年總雨量(表 3)之比例，推算各事件之坡面泥砂遞移量(如表 4)。分析顯示單場事件對集水區造成之影響以桃芝颱風產生土砂量最大，累積沖刷量為 2,553,784ton，其中內茅埔流量站於賀伯颱風事件對集水區其沖蝕深度高達 0.43cm/yr。以空間分布而言；將內

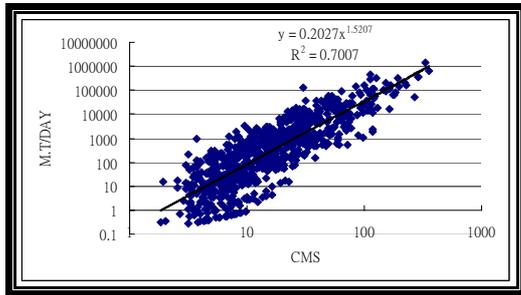


圖 5、1972~2004 率定曲線
Fig. 5 The rating curve during 1972-2004

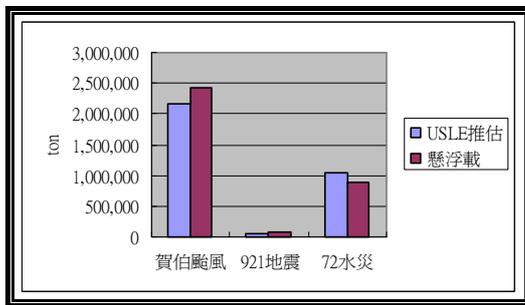


圖 6、坡面泥砂遞移量比對
Fig. 6 The illustration of the soil loss prediction by the USLE and measured suspended load

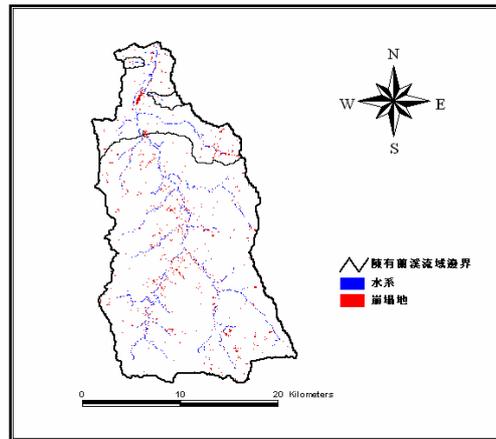


圖 7 陳有蘭溪集水區 72 水災新增崩塌地
Fig. 7 The new landslide sites caused by the 72 Flood in the Chen-Yu-Lan Stream watershed

茅埔流量站做為中、上游與下游之分界，陳有蘭溪集水區平均沖蝕深度為 1.07cm，而內茅埔流量站上游之地區平均沖蝕深度為 1.20cm。由此可知陳有蘭溪集水區中、上游區域沖刷情形較為嚴重。

表 2 年坡面泥砂遞移量

Table 2. The soil loss prediction estimated by USLE in the Chen-Yu-Lan Stream watershed

影像時期		賀伯颱風 (1996/11/25)		921 地震 (1999/10/31)		桃芝颱風 (2001/12/3)		72 水災 (2004/07/12)	
集水區	集水區 面積 (km ²)	年 沖蝕量 (ton/yr)	沖蝕 深度 (cm/yr)	年 沖蝕量 (ton/yr)	沖蝕 深度 (cm/yr)	年 沖蝕量 (ton/yr)	沖蝕 深度 (cm/yr)	年 沖蝕量 (ton/yr)	沖蝕 深度 (cm/yr)
陳有蘭溪	447.94	5,545,222	0.65	3,182,201	0.47	13,642,469	2.18	6,134,672	0.98
內茅埔 流量站	366.5	4,703,168	0.92	2,740,028	0.53	11,876,746	2.31	5,238,026	1.02
郡坑三部	3.64	2,237	0.44	6,286	0.12	45,216	0.89	22,112	0.43
竹子腳坑	1.92	20,034	0.75	12,059	0.45	41,576	1.55	17,274	0.64

表 3 各時期雨量分布

Table 3. The rainfall data for annual record and single event

內茅埔流量站	賀伯颱風 (1996/8/1)	921 地震 (1999/9/21)	桃芝颱風 (2001/7/31)	72 水災 (2004/7/2)	歷年平均 降雨量
年雨量 (mm)	1,883	1,582	3,264	2,500	2500
單場降雨 (mm)	862	23	611	500	

表 4 各事件坡面泥砂遞移量

Table 4. The soil loss prediction for each storm event

集水區	賀伯颱風		921 地震		桃芝颱風		72 水災	
	事件 沖蝕量	沖蝕 深度	事件 沖蝕量	沖蝕 深度	事件 沖蝕量	沖蝕 深度	事件 沖蝕量	沖蝕 深度
	(ton)	(cm)	(ton)	(cm)	(ton)	(cm)	(ton)	(cm)
陳有蘭溪	2,538,493	0.28	46,265	0.01	2,553,784	0.40	1,226,934	0.2
內茅埔 流量站	2,153,017	0.42	39,836	0.01	2,223,251	0.43	1,047,605	0.2
郡坑三部	1,024	0.20	91.1232	0.00	8,464	0.18	4,422	0.09
竹子腳坑	9,171	0.35	175.2856	0.01	7,783	0.29	3,455	0.13

(二) 坡面泥砂遞移量驗證

採用內茅埔流量站之實測懸浮載資料(氣象局水文資訊網)進行驗證。內茅埔流量站設於 1972 年;但 2001 年由於桃芝颱風雨量過大將其沖毀,故僅以賀伯及 921 地震、72 水災 3 事件進行驗證。由於流量站實測懸浮載資料並非定期量測;據此,研究選定以 1972~2004 之懸浮載資料與流量資料進行相關分析。分析上採用 $Q_s=aQ^N$, 以此法推估誤差可能達到 50% (王如意, 1979); 分析結果顯示 $Q_s=203.Q^{1.52}$ (圖 5), 判定係數高達 0.7。暴雨事件為集水區帶來較高之流量; 研究中, 將事件發生後, 大於平時之流量資料萃取出(如表 5), 與推估之懸浮載相關式進行坡面泥砂遞移量驗證。

由事件之暴雨流量推算出懸浮載泥砂產

量(如表 6), 得知內茅埔歷年沖蝕量介於 0.02~0.47cm, 而懸浮載推估之沖蝕深度介於 0.01~0.42, 誤差介於 11~50%(誤差於 921 地震時最高)。筆者提出假設誤差來源, 由於水文資訊網對於懸浮載之測定並非定期量測, 往往暴雨期間礙於測量困難及安全性考量而無法進行量測。而暴雨期間正是懸浮載最多時, 一旦缺少這些資料, 單以高流量進行反推便會產生高估之情形。由圖 6 (坡面泥砂比對) 可看出針對坡面泥砂遞移量使用兩種不同方法進行比較, 雖然數據上有所誤差, 但其泥砂量卻有相同的趨勢。此點也可說明研究上所使用的 USLE 法有其準確性。且當流量比較大時兩方法之間誤差便較為減少, 僅有 11% 左右; 由此判斷於河道流量大時, 以懸浮載進行坡面泥砂遞移量驗證, 結果顯示 USLE 所推估出之坡面泥砂量與河道中懸浮

資料相當吻合。意即進行河道輸出量之研究，可以坡面泥砂遞移量代表河道中懸浮載。

此外本研究所採用之通用土壤流失公式是以單一時期影像來取代整年之植生因子，推求全年之泥砂產量可能會產生誤差的情形；而且台灣山坡地往往有水土保持設施存

在，研究中水土保持因子 P 假設為 1，易導致 USLE 所推估之沖蝕量過大。此外崩塌的產生同時包含推移載與懸浮載，所以在懸浮載驗證上所推出之泥砂遞移量可能並非完全來自坡面，所以有可能因此產生誤差。

表 5、事件流量統計

Table 5. The flow discharge data for the hazard event

賀伯颱風	流量 (cms)	921 地震	流量 (cms)	72 水災	流量 (cms)
1996/8/1	1860	1999/2/22	33	2007/7/3	234
1996/8/2	686	1999/2/23	36	2007/7/4	625
1996/8/3	384	1999/2/24	36	2007/7/5	338
1996/8/4	277	1999/2/25	48	2007/7/6	181
1996/8/5	196	1999/2/26	52	2007/7/7	125
1996/8/6	146	1999/2/27	80	2007/7/8	124
1996/8/7	107	1999/2/28	66	2007/7/9	119
總和	3656		352		1749
平均	522		50		250

表 6 坡面泥砂遞移量比對

Table 6. The comparison for the soil loss prediction by the USLE and measured suspended load

內茅埔 流量站	賀伯颱風		921 地震		72 水災	
	累積 沖蝕量	沖蝕 深度	累積 沖蝕量	沖蝕 深度	累積 沖蝕量	沖蝕 深度
	(ton)	(cm)	(ton)	(cm)	(ton)	(cm)
USLE 推估	2,153,017	0.42	39,836	0.01	1,047,605	0.20
懸浮載	2,419,446	0.47	72,434	0.02	894,498	0.17

(三) 崩場地泥砂遞移量

由各時期的植生覆蓋因子 C 值推求各時期間的新增崩場地如(圖 7)。並推算相關資訊包含：崩場地面積、崩場地斜面面積，如表 7 由崩場面積配合當地坡度給予崩場深度便可推估出崩場地體積如表 8。而崩場地會因當地

土石大小影響推移能力，因此輔以衰減係數子加以修正，配合遞移率試算崩場地於不同衰減係數之下所產生河道泥砂產量如表 9。由表 8 可得知本研究所推估之崩場地以桃芝颱風最多其土方量高達 33,039,934m³ (以陳有蘭溪上游集水區為例)，而 72 水災崩場地最少其

值僅及桃芝颱風之 1/5。由表 9 發現崩塌遞移量相當少，僅占總崩塌量 1/300~1/50，推測崩塌所產生之土方對河道之影響並非即時產生災情而是潛藏於集水區之中，當遇到暴雨事件時提供土料。

表 7 各時期影像推估新增崩塌地面積(m²)

Table 7. The estimated landslide areas (m²) in the different stages for the Chen-Yu-Lan Stream

集水區	賀伯颱風 (1996/8/1)	921 地震 (1999/9/21)	桃芝颱風 (2001/7/31)	72 水災 (2004/07/2)
陳有蘭溪	7,150,400	4,387,200	16,201,600	3,212,800
內茅埔流量站	4,718,400	3,676,800	11,521,600	2,396,800
郡坑三部	48,000	0	268,800	14,400
竹子腳坑	43,200	99,200	136,000	16,000

表 8 陳有蘭溪新增崩塌地體積(m³)

Table 8. The estimated landslide volumes (m³) in the different stages for the Chen-Yu-Lan Stream

集水區	賀伯颱風 (1996/8/1)	921 地震 (1999/9/21)	桃芝颱風 (2001/7/31)	72 水災 (2004/07/2)
陳有蘭溪	13,995,634	7,190,955	33,039,934	6,107,551
內茅埔流量站	7,191,508	5,980,726	23,401,075	4,530,634
郡坑三部	98,468	0	55,972	30,221
竹子腳坑	85,320	171,805	284,955	31,873

表 9 陳有蘭溪崩塌地河道泥砂產量(m³)

Table 9. The estimated sediment yield volumes (m³) from the landslides for the Chen-Yu-Lan Stream

陳有蘭溪	衰減係數(α)				
	0	0.25	0.5	0.75	1
賀伯颱風 (1996/8/1)	306,347	87,731	26,565	8,335	2,681
921 地震 (1996/11/25)	2,632	692	191	55	16
桃芝颱風 (2001/7/31)	417,352	149,208	55,531	21,295	8,357
72 水災 (2004/07/2)	21,840	5,248	1,330	348	93

(四) 河道泥砂產量

將坡面泥砂遞移量和崩場地泥砂遞移量相加即為河道泥砂產量(表 10)。由表 10 可看出河道所能攜出之泥砂大部份來自坡面泥砂，而崩場所產生之土石可能由於發生崩場地點距離河道遙遠，並受崩塌土石大小衰竭其推移能力所影響，因此對河道未發生即時性的影響。而各時期中又以賀伯颱風及桃芝颱風（可能因 921 地震造成坡面土壤鬆動）河道產生較多之泥砂量，以各時期雨量分析

發現河道泥砂產量並非僅與單場暴雨雨量相關。72 水災所帶來雨量約 500mm 僅小於桃芝颱風雨量 611mm 些許，而桃芝颱風所產生泥砂卻高達 72 水災之 2.5 倍，因此推斷桃芝颱風龐大雨量將由 921 地震所造成崩塌殘留於集水區中之土方帶出；而 72 水災雖雨量大但於桃芝颱風之後並未發生重大崩塌事件，集水區中土方量遠比發生桃芝颱風時少之故，所以 72 水災所產生之土砂量並未如桃芝颱風一般大。

表 10 陳有蘭溪河道泥砂產量(m³)

Table 10. The estimated sediment yield volumes (m³) in the channels for the Chen-Yu-Lan Stream

陳有蘭溪	衰減係數(α)				
	0	0.25	0.5	0.75	1
賀伯颱風 (1996/8/1)	2,844,840	2,626,224	2,565,058	2,546,828	2,541,174
921 (1996/11/25)	48,897	46,957	46,456	46,320	46,281
桃芝颱風 (2001/7/31)	2,971,136	2,702,992	2,609,315	2,575,079	2,562,141
72 水災 (2004/07/2)	1,248,774	1,232,182	1,228,264	1,227,282	1,227,027

結論與建議

經由結果分析發現集水區所推估出由崩場地遞移量遠比坡面泥砂遞移產量少。以桃芝颱風為例坡面泥砂量為 1,956,023m³，而崩場之輸出土砂量僅有 417,352m³，此現象研判當地致災原因主要為 921 地震所崩落蓄積於集水區之土砂，於短期間經由暴雨大量帶出超過下游所能負荷所致。反觀之 2004 年之 72 水災單場雨量儘管高達 500mm，但試區於桃芝颱風後並無大規模崩塌因而試區中土料不足儘管降雨量高卻不會產生土砂災害。換言之集水區土砂災害產生需要二因素 1.降雨充

沛 2.足夠土料，當滿足兩條件後便極可能發生重大災情。此外對於不同土壤之崩塌粒徑亦為影響土砂輸送能力之重大因子，建議未來研究可針對崩塌土方進行更深入的分析以鑑別土體衰減能力，藉此將對崩場地之影響更明確的判示，健全集水區治理系統。如於易發生災情地區進行長期控管可得知保全對象即時的情形；於災害發生前由雨量推算災情嚴重程度並建立預警系統，且於災害發生後對災區進行整治，進一步於環境敏感地點有效配置防砂壩等。除有效提升整治率保障保全對象，更達減災防災之效，並提供集水

水土保持學報 38(2)：207-218 (2006)

Journal of Soil and Water Conservation, 38(2)：207-218 (2006)

區經營者於設計規劃時參採，使經營者進行治理工作時有更完備的資訊可供參考，使集水區可免於水土災害之苦，也讓人民的生命財產獲得更多保障。

sediment budgets for two small lowland agricultural catchments in the UK”, Catena, 47, 4, pp. 323-353.

參考文獻

- 1.王如意、易任 (1979)，「應用水文學」，國立編譯館，pp.377~382。
- 2.行政院農業委員會 (2004)，「水土保持技術規範」，pp.36~58。
- 3.林文賜 (2002)，「集水區空間資訊萃取及坡面泥砂產量推估之研究」，pp.44~49。
- 4.林昭遠 田倚寧 (2005)，「集水區降雨逕流與泥砂產量關係之研究」，pp.37~42。
- 5.歐陽元淳 (2003)，「水庫集水區土壤沖蝕之研究-以石門、翡翠水庫為例」，國立臺灣大學地理環境資源學研究所碩士論文，pp.17~20。
- 6.Dymond, J.R., Jessen, M.R., Lovell, L.R., (1999), ”Computer simulation of shallow landsliding in New Zealand hill country”, pp.122-131.
- 7.Khazai, B., and Sitar, N., (2000), ”Companion website for landslides in Native Ground : A GIS-Based Approach to Regional Seismic Stability Slope Stability Assessment”, <http://www2.ced.berkeley.edu:8002/index2.html>, [2002, March 20].
- 8.Lin, C.Y., Lin, W.T., Chou, W.C., (2002), ”Soil erosion prediction and sediment yield estimation, the Taiwan experience”. Soil & Tillage Research 68, 2, pp. 143-152.
- 9.Walling, R.L., (1988), ”Soil Erosion Research Methods”. Soil and Water Conservation Society, Iowa, USA.
- 10.Walling, D.E.; Russell, M.A.; Hodgkinson, R.A.; Zhang, Y., (2002), ”Establishing