

高屏溪上游地區地形地質對河床土砂之影響分析

壽克堅^{[1]*} 費立沅^[2] 陳勉銘^[2] 魏正岳^[2] 洪嘉好^[1] 黃怡婷^[1]

摘 要 河相改變其與水流量與河川搬運能力及泥砂供給量關係密切。本研究以土砂平衡關係推導出土砂生產指標 (I_p) 及土砂堆積搬運指標 (I_R)，以台灣南部高屏溪流域為對象，選用莫拉克颱風 (2009) 以及凡那比颱風 (2010) 就集水區之土砂搬運、堆積及平衡進行探討。本研究於兩項指標中分別選用不同因子圖層，其中包括地形因子 (坡度、坡型、河道寬度及坡度、河岸坡度、摩擦角)、雨量因子與崩塌比，再利用 GIS 軟體之分析功能配合多變量分析方法進行上述之影響分析。結果發現，莫拉克颱風於集水區內造成的大量土砂堆積，至兩年後凡那比颱風時有漸漸往中下游運移之趨勢，表示土砂運移堆積情形也已漸達平衡。堆積仍然嚴重地區，需考慮人為治理或清疏方式解決土砂堆積之問題，否則再一次颱風或暴雨事件，皆可能造成二次災害。

關鍵詞：地理資訊系統、土砂生產、土砂堆積運移、影響因子分析。

The Influence of Topography and Geology on Sedimentation in the Upstream Area of Kao-Ping Catchment

Keh-Jian Shou^{[1]*} Li-Yuan Fei^[2] Mien-Min Chen^[2] Cheng-Yueh Wei^[2]
Chia-Yu Hung^[1] Yi-Ting Huang^[1]

ABSTRACT The transportation and production of sediments are closely related to changes in river morphology. Based on the balance of sediments, this study establishes two major indexes, the sediment generation index I_p and the sedimentation transportation index I_R . In this study, we examined the impact of Typhoon Morakot and Typhoon Fanapi on the generation and transportation of sediment in Kao-Ping River in southern Taiwan. For both indexes, we selected a number of control factors, such as topography, rainfall, river morphology, landslide, etc., for the GIS multi-variable analyses. The results revealed a huge amount of sediment generated and accumulated during Typhoon Morakot. For Typhoon Fanapi two years later, it suggests sediment accumulation is limited at the downstream areas and the transportation of sediment is becoming more balanced. However, there are still tremendous amounts of sediment in the river banks that possess hazard potential and need to be treated.

Key Words : GIS, sediments generation, sedimentation transportation, control factor analysis.

一、前 言

河相改變是地形地貌變遷之一環，河相之改變與

水流量決定之搬運能力及泥砂之供給量關係密切，水流量決定於集水區面積及氣候，泥砂之供給量則決定於包括河床沖蝕之地表侵蝕，以及中上游坡地之崩

[1] 國立中興大學土木工程學系

Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan.

[2] 經濟部中央地質調查所

Central Geological Survey, MOEA.

* Corresponding Author. E-mail : kjshou@dragon.nchu.edu.tw

塌。河川之沖蝕微觀而言又可細分為摘除 (plucking)、磨蝕 (abrasion) 及穴蝕作用 (cavitation) 等機制, Whipple (2000) 以上述之微觀機制探討修正水力侵蝕定理 (stream-power erosion law), 並且發現河床之岩性、節理間距、層面及破裂面等對於河床之沖蝕影響甚大)。河相變遷之探討與時間及河道的尺度關係密切, 長時間大範圍之變遷應考慮板塊運動引起之地殼變動及氣候之改變, 而短時間小範圍之變遷應考慮地震或暴雨之擾動、河床岩石之局部差異、及河床沉積物之變化。Howard (1994) 針對岩盤、粗礫、及細礫河床探討板塊運動及河床沉積物特性對河床侵蝕之影響, 並且發現小區域之河相之變遷乃至於河床之沖蝕速率有必要個別考慮。

台灣的集水區侵蝕及堆積主要受地震及颱風兩大外力的影響, 強烈地震以數十年一次之頻率, 颱風以每年數次不同的頻率交互影響各流域。震後災區內之集水區土砂侵蝕及堆積主要受地震所影響, 但隨時間之遞移, 地震之影響逐漸式微, 颱風之影響逐漸增強。由於地質之特性影響了地形演變的進程, 也決定了該集水區河道的泥砂來源, 對土石流發生及河道侵蝕與堆積有決定性的影響。本研究以台灣南部高屏流域為對象, 選用 2008 年莫拉克颱風以及 2010 年凡那比颱風就集水區之土砂搬運、堆積及平衡進行探討; 以土砂平衡關係推導出土砂生產指標 (I_p) 及土砂堆積搬運指標 (I_R) 以進行進一步分析。為考量不同河段不同之地形地質、土砂堆積、降雨分布及搬運能力等特性, 將集水區分為較小及水單元進行分析; 此外, 土砂生產指標 (I_p) 及土砂堆積搬運指標 (I_R) 分別選取影響因子進行分析, 期望能得到有用的結果, 以提供評定防災與治理工作的需求。Wohl (2008) 則對河段 (reach scale) 尺度之山區河相變遷進行研究, 探討三種不同類型之河相與水流、河道幾何、河床粗糙度及河床岩性等因子關係。

二、基本理論

本研究就集水區之土砂搬運、堆積及平衡進行探討, 為考量不同河段不同之地形地質、土砂堆積、降雨分布及搬運能力等特性, 將集水區分為較小集水單元進行分析; 先建立集水單元之平衡方程式, 再將平衡方程式中之土砂生產量及土砂淤積量等主要項目進行影響因子分析。本研究利用 GIS 軟體 Arc View 之圖層分析功能進行上述之分析。

考慮單一集水單元, 本研究引入一衡量土砂堆積之指標值 I_s , 其物理涵意相當於土砂堆積之平均高度, 定義為:

$$I_s = \frac{V_s}{A_s} \quad (1)$$

其中, V_s : 每一集水單元內之土砂淤積量; A_s : 每一集水單元之面積。

考慮時間及空間條件, 單一集水單元之土砂堆積平衡方程式可推導如式 2:

$$\Delta I_{s,i} = I_{s,i}^m - I_{s,i}^{m-1} = \frac{\Delta V_{s,i}}{A_{s,i}} \quad (2)$$

其中, i 代表第 i 個集水區, m 代表時間點 (或事件點)。

考慮空間條件, 上式中 $\Delta V_{s,i}$ 為集水單元本身土砂生產量、鄰近上游集水單元之土砂流入量、及集水單元本身之流出量等因素所決定; 換言之, 土砂平衡概念可簡化為「土砂淤積量 = 生產量 + 流入量 - 流出量」。

上式右側可改寫為式 3:

$$\frac{\Delta V_{s,i}}{A_{s,i}} = \frac{\Delta V_{p,i}}{A_{s,i}} + \frac{\Delta V_{a,i} - \Delta V_{b,i}}{A_{s,i}} \quad (3)$$

其中, V_a : 流入量; V_b : 流出量; V_p : 生產量考慮一個典型五個集水單元之系統 (參見圖 1, 集水單元 i 之流入土砂為鄰近上游集水單元 $i+1$ 、集水單元 k 、及集水單元 j 之流出土砂; 集水單元 i 之流出土砂為鄰近下游集水單元 $i-1$ 之流入土砂。

式 3 可進一步改寫為式 4:

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta V_{p,i}}{A_{s,i}} + \frac{\Delta V_{a,i} - \Delta V_{b,i}}{A_{s,i}} \\ &= \frac{\Delta V_{p,i}}{A_{s,i}} + \frac{\Delta V_{a1} + \Delta V_{a2} + \Delta V_{a3} - \Delta V_{b1}}{A_{s,i}} \\ &= \frac{\Delta V_{p,i}}{A_{s,i}} + \frac{\Delta V_{b,i+1} + \Delta V_{b,j} + \Delta V_{b,k} - \Delta V_{b,i}}{A_{s,i}} \end{aligned} \quad (4)$$

由上式平衡方程式整理為

$$\begin{aligned} \Delta V_{s,i} &= \Delta V_{p,i} \\ &+ \left(\Delta V_{b,i+1} + \Delta V_{b,j} + \Delta V_{b,k} - \Delta V_{b,i} \right) \\ &= \Delta V_{p,i} + \Delta V_{t,i} \end{aligned} \quad (5)$$

等號右側可區分為土砂生產量 $\Delta V_{p,i}$ 與周邊土砂運移變化量 $\Delta V_{t,i}$ 兩大項。因此，任一集水單元土砂堆積之情形，應藉由土砂生產量與周邊土砂運移關係兩部分進行了解。為量化集水單元內土砂生產運移之概況，配合土砂生產量與周邊土砂運移之淨堆積量兩大項之探討，建立土砂生產指標 I_p 與土砂堆積搬運指標 I_R 。本研究結合常見地形、地質、氣候、與河相等因子，進行多變量因子分析。本研究採用類似不安定指數法之多變量分析法，先針對影響因子分級及正規化，其次統計迴歸出各因子之權重，後建立各指標值之計算公式。

本研究除土砂生產圖層及土砂運移圖層直接使用地調所資料庫之成果圖資外，相關影響因子之圖層為數值地形資料及基本地質資料加工產出。本研究以台灣南部高屏溪流域為研究區域，選用 2009 年莫拉克颱風以及 2010 年凡那比颱風兩個事件就集水區之土砂搬運、堆積及平衡進行探討。以莫拉克颱風為模式學習及驗證之事件，進而探討高屏溪流域土砂搬運堆積之趨勢行為及其影響因子。

三、土砂生產指標研究

關於土砂生產量之探討，本研究乃透過多變量分析之概念，建立單一集水單元 i 中單位面積土砂生產量與地質、地形、雨量等相關因子之關係，進而推導出各次事件下以集水單元為單位之土砂生產指標。選定分析事件—本研究選定莫拉克颱風與凡那比颱風做為分析事件，藉由此二個代表性事件來了解近年高屏溪流域土砂生產變化。

本研究選定坡度 S_{ai} 、順逆向指標 I_d 、最大降雨強度 R_a 、累積雨量 R_i 、地表摩擦角 ψ 與集水單元崩壞比 R_L 等六項因子進行多變量分析。關聯因子基本上與土砂生產量成下列關係：

$$\frac{\Delta V_{p,i}}{A_{s,i}} \propto S_{ai}, I_d, R_a, R_i, \frac{1}{\psi}, R_L \quad (6)$$

V_p ：生產量； A_s ：每一集水單元之面積。

其中，依 Bates & Jackson (Glossary of Geology, 1987) [4] 對於順向坡的解釋，岩盤層面傾角與坡面傾角大致同向的邊坡，屬於順向坡 (dip slope)；逆向坡 (escarpment slope) 則是指岩盤層面以逆傾方向插入坡面的岩盤邊坡而稱之 (圖 2)。坡向順逆指標萃取不易，一般需要利用地層位態來推估之，但由於地層位態屬

於非連續性的資料型態，需要找一個合適的內差方法來描述整個地層所分布形態。再加上地層位態的資料變化性較為平緩，選擇的內差方法需能夠貼切的描述此一微緩的變化。

Wentworth 等 (1987) 在空間位態的模擬上，認為利用空間向量來作內差有相當的困難度，於是便將此平面以另二個參數：傾向 (dip direction) 及傾角 (dip angle)，來處理以作內差。由於傾角值為 0° - 90° 的連續值，傾向方位卻由 0° - 360° ，所以 Wentworth 等人是將傾向方位角及傾角值作水平面上的內差。順向坡的夾角參考定義 Goodman (1989) 為岩層傾向角與坡面傾向角相差 30° 。許惠瑛 (2007) 利用空間分析法中的克利金法來推估岩層傾向，並與該區數值高程模型 DEM 進行夾角差異計算，不連續面傾向與坡面方向相互關係之差異值分為五類：高度順向 ($\pm 0^\circ \sim \pm 30^\circ$)、中度順向 ($\pm 30^\circ \sim \pm 60^\circ$)、斜交坡 ($\pm 60^\circ \sim \pm 120^\circ$)、中度逆向 ($\pm 120^\circ \sim \pm 150^\circ$) 與高度逆向 ($\pm 150^\circ \sim \pm 180^\circ$)。

以 Kriging 法產製流域內前述六項因子網格資料 ($20 \times 20m$)，其中坡度、順逆向指標與地表摩擦角因子為地質條件，假設地質條件不因事件不同而造成改變，而集水單元崩壞比、累積雨量與最大降雨強度則依各事件之實際數據進行分析 (圖 3~7)。同時並蒐集流域內各集水單元土砂生產量與集水單元面積等基本資料，以計算集水單元單位面積土砂生產量 (圖 6)。

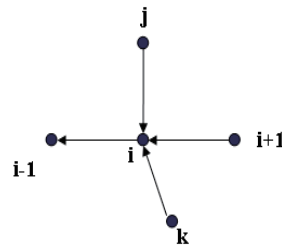


圖 1 單一集水單元 i 周邊土砂運移關係示意圖

Fig.1 Peripheral sediment movement for single sub-catchment unit i

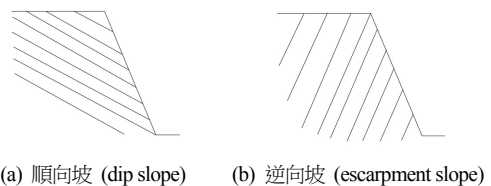
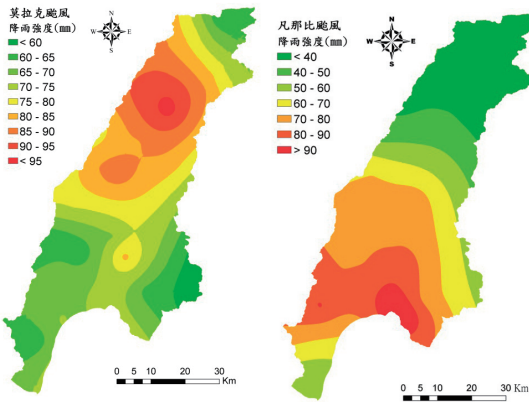


圖 2 順逆坡示意圖

Fig.2 Dip and escarpment slope

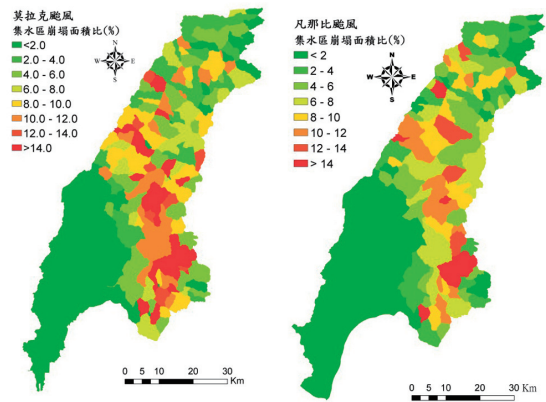


莫拉克颱風 Morakot

凡那比颱風 Fanapi

圖 3 降雨強度

Fig.3 Distributions of rainfall intensity

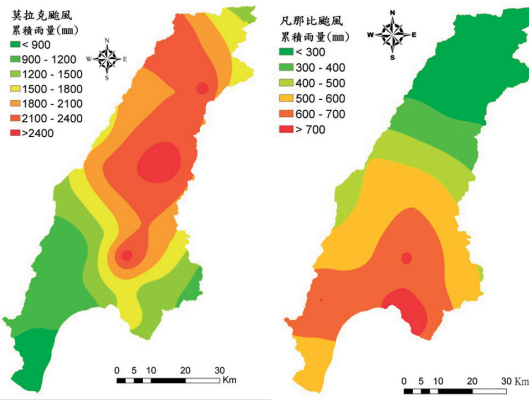


莫拉克颱風 Morakot

凡那比颱風 Fanapi

圖 5 集水區崩塌面積比

Fig.5 Catchment landslide ratio

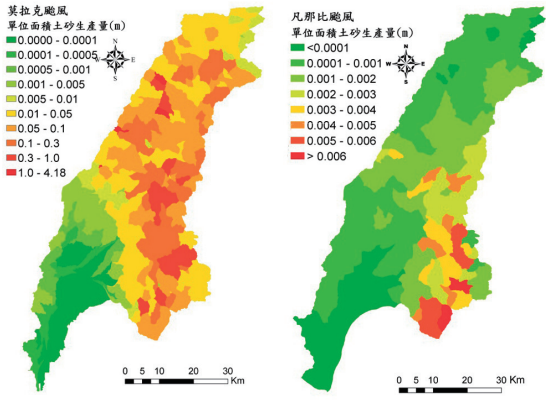


莫拉克颱風 Morakot

凡那比颱風 Fanapi

圖 4 累積雨量

Fig.4 Distributions of accumulated rainfall

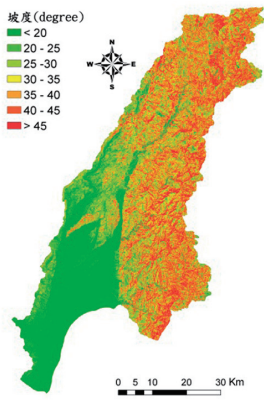


莫拉克颱風 Morakot

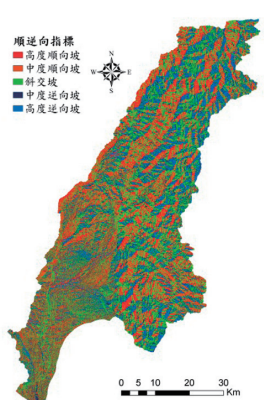
凡那比颱風 Fanapi

圖 6 單位面積土砂生產量

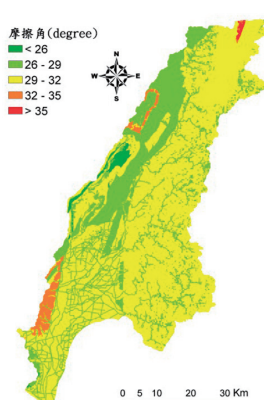
Fig.6 Distribution of sediment production



坡度slope



順逆向指標dip slope index



摩擦角friction angle

圖 7 地形地質因子圖層

Fig.7 Distribution of topographic and geological factors (slope, dip slope index, friction angle)

得出因子圖層後針對各因子先進行群聚運算以進行分級，各因子之分級如表 1 所示。統計各分級下土砂生產量分布情形，決定土砂生產指數，再運用多變量分析計算土砂生產指標 I_p ，指標計算如式 7：

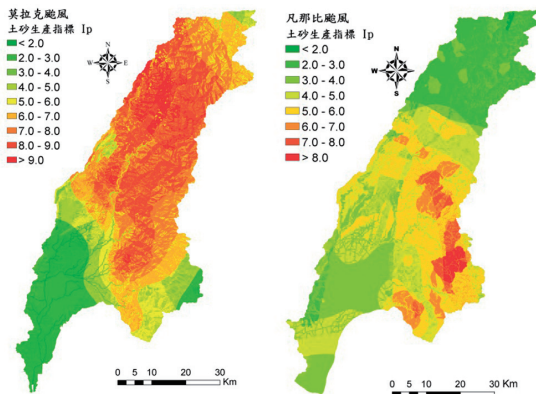
$$I_p = S_{ai} w_1 \times I_d w_2 \times R_a w_3 \times R_i w_4 \times \varphi w_5 \times R_L w_6 \quad (7)$$

其中 w 代表 1~6 各因子各別權重，權重之決定方式乃是基於前一步驟各分級下土砂生產量平均值與分布，計算相關係數後依相關係數決定，後利用各因子圖層以多變量分析或得土砂生產指標 I_p 成果 (圖 8)。

從雨量分布來看，莫拉克颱風降下高達 2400 公厘之累積雨量遠高過凡那比颱風，而在莫拉克颱風降雨量集中在中游區段，凡那比颱風則是集中於隘寮溪區域。這些降雨集中的地區，從土砂生產指標分佈 (圖 8) 來看，可發現相對產生較大之土砂生產，由於在兩事件中，降雨集中地區易造成崩塌現象，也因此容易在河道上產生大量土砂材料，尤其在莫拉克颱風期間，中游區段發生大規模崩塌，而土砂並非只在主河道上，更多處發生於支流與野溪，造成土砂不易排出，此時就容易產生極度不平衡狀態。

四、土砂堆積搬運指標研究

本項研究藉由河網分析之概念，將各集水單元土砂生產量、河道侵蝕堆積量與集水單元土砂流出量，依河網關係進行彙整計算，以了解各集水單元土砂運



莫拉克颱風 Morakot

凡那比颱風 Fanapi

圖 8 土砂生產指標 I_p 成果
Fig.8 Distributions of I_p

移情形。河道土砂侵蝕堆積量一般而言與河段長寬、河床坡降與河道蜿蜒度等因子有關。然而單就河道侵蝕堆積數據分析，並無法直接與河段長寬、河床坡降與河道蜿蜒度關連，即當一河段發生土砂堆積情形，其發生原因可能是該河段先天環境因素易產生堆積，抑或是其先天環境因素不易堆積，但上游湧入巨量土砂無法順利消化所致。故在河道土砂運移評估上，本研究將同時考量各集水單元土砂流出量與堆積量以決定該集水區河段是否易於堆積，其判斷指標如式 8。

$$R = \frac{\Delta V_s, i}{\Delta V_b, i} \quad (8)$$

表 1 土砂生產指標 I_p 影響因子分級表

Table 1 Classification of control factors for I_p

累積雨量 (mm)		最大降雨強度 (mm)		崩塌百分比	
莫拉克	凡那比	莫拉克	凡那比	莫拉克	凡那比
<900	<300	<60	<40	<2	<2
900-1200	300-400	60-65	40-50	2-4	2-4
1200-1500	400-500	65-70	50-60	4-6	4-6
1500-1800	500-600	70-75	60-70	6-8	6-8
1800-2100	600-700	75-80	70-80	8-10	8-10
2100-2400	>700	80-90	80-90	10-12	10-12
>2400	-	90-95	>90	12-14	12-14
-		>95	-	>14	>14
以下地質條件不改變					
順逆向指標		摩擦角 (°)		坡度 (°)	
高度順向		<26		<20	
中度順向		26-29		20-25	
斜交坡		29-32		25-30	
中度逆向		32-35		30-35	
高度逆向		>35		35-40	
-		-		40-45	
-		-		>45	

表 2 堆積搬運比計算示意

Table 2 Calculation of the ratio of accumulation and transportation

假設流出量為100單位土砂時		
堆積量	堆積搬運比R	備註
-100	-1	流出量完全由侵蝕而來
-50	-0.5	流出量1/2由侵蝕而來
0	0	河相平衡
50	0.5	土砂堆積33%
100	1	土砂堆積50%
900	9	土砂堆積90%

其中, R 為河道之堆積搬運比; $\Delta V_{s,i}$ 為河道之土砂堆積量; $\Delta V_{b,i}$ 為河道之土砂流出量經由河道堆積指標, 本研究可了解高屏溪流域易發生土砂堆積之河段範圍, 解決堆積量受上游流入量影響問題, 其分析方法如下:

首先將高屏溪內子集水區之土砂堆積與流出量資料, 依據式 8 進行堆積搬運比之計算。當子集水區內土砂侵蝕則計算式之分子為負數, 此時 R 值範圍應落在-1~0 之間; 如有土砂堆積情形則 R 值為大於 0 之正數。以假設流出量為 100 單位土砂時, 計算成果值域示意如表 2 所示; 顯示侵蝕堆積比 R 用於釐清河道土砂運移情形, 顯示值域不對稱性, 有待進一步正規化。此外, 如能分出山區上游、中游河道與下游開闊河面等不同河相類型之土砂運移模式有一定程度之幫助。

首先建立堆積搬運趨勢, 由於侵蝕情形與堆積情形之值域分布並非對稱, 導致子集水區堆積搬運比 R 值資料分布于負值過於集中, 而正值多分布于 0~5 之間, 最下游河道開闊區約 5~10 之間。為解決此一比值域分布不均問題, 使後續分析關聯因子能順利與堆積搬運趨勢結合, 本研究依比值先修正值域為 0~10, 以 5 代表平衡狀態, 0~5 為侵蝕傾向, 而 5~10 為堆積傾向。其計算方式如式 9 所示:

$$\begin{aligned} \text{If } R < 0, R' &= (1 + R) \times 5 \\ \text{If } R > 0, R' &= 5 + \left(\frac{R}{R + 1}\right) \times 5 \end{aligned} \quad (9)$$

基於土砂堆積搬運趨勢之成果, 本研究採用多變量分析之方法, 基於地調所資料庫可用之圖資, 選定

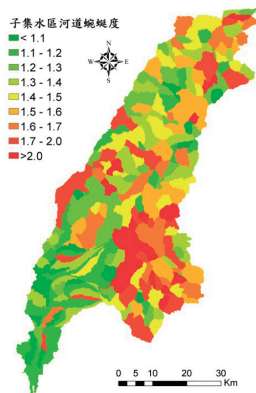
關聯因子為河流寬度 W_d 、河流坡度 R_s 、河岸坡度 B_s 、河道蜿蜒度 S_i 、最大降雨強度 R_i 、累積雨量 R_a 與子集水區崩塌面積比 R_L 因子進行多變量分析 (各因子圖層如圖 9~10)。關聯因子基本上與土砂堆積搬運成下列關係:

$$\frac{V_{t,i}}{A_{s,i}} \propto W_d, \frac{1}{R_s}, \frac{1}{B_s}, S_i, \frac{1}{R_L}, R_i, R_a \quad (10)$$

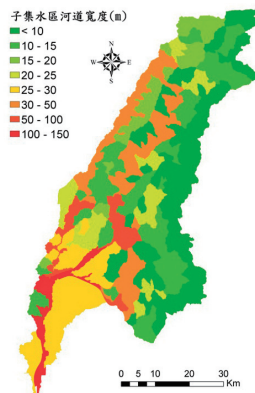
表 3 土砂堆積搬運指標 R 因子分類表

Table 3 Classification of control factors for I_R

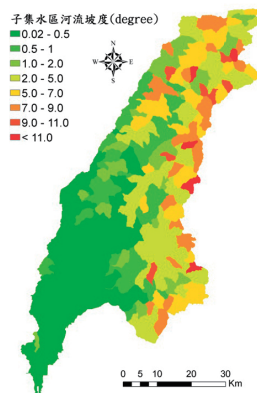
河道寬度 (m)		蜿蜒度		河岸坡度 (°)	
莫拉克	凡那比	莫拉克	凡那比	莫拉克	凡那比
<10	<20	<1.1	<1.0	<5	<5
10-15	20-40	1.1-1.2	1.0-1.2	5-10	5-10
15-20	40-60	1.2-1.3	1.2-1.4	10-15	10-15
20-25	60-80	1.3-1.4	1.4-1.6	15-20	15-20
25-30	80-100	1.4-1.5	1.6-1.8	20-25	20-25
30-50	100-120	1.6-1.7	1.8-2.0	25-30	25-30
50-100	>120	1.7-2.0	2.0-2.2	30-35	30-35
>100	-	>2.1	2.2-2.4	>35	35-40
-	-	-	>2.4	-	40-45
			-		>45
河流坡度 (°)		崩塌百分比			
莫拉克	凡那比	莫拉克	凡那比		
<0.5	<1.0	<2	<2		
0.5-1.0	1.0-2.5	2-4	2-4		
1.0-2.0	2.5-4.5	4-6	4-6		
2.0-5.0	4.5-6.5	6-8	6-8		
5.0-7.0	6.5-8.5	8-10	8-10		
7.0-9.0	>8.5	10-12	10-12		
9.0-11.0	-	12-14	12-14		
>11.0	-	>14	>14		



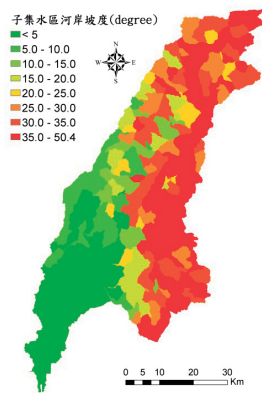
(a) 河道蜿蜒度



(b) 河道寬度



(c) 河流坡度



(d) 河岸坡度

圖 9 地形因子圖層

Fig.9 Distributions of topographic factors

同土砂生產指標將因子分級，如表 3 所示。後續則統計各分級下集水單元土砂堆積運移指標分布情形與平均值，再決定該分級之土砂堆積運移指標值 I_R ，以等同土砂生產指標 I_P 之值域 1~10 來給定 (表 3)。

運用多變量分析方法計算土砂堆積搬運指標 I_R (圖 11)，其指標計算式如式 11 所示，其中 W 代表 1~7 各因子各別權重，權重之決定方式乃是基於前一步驟各分級下土砂堆積趨勢平均值與分布情形，計算所得之相關係數後決定。

$$I_R = Wd^{w1} \times Ri^{w2} \times Rs^{w3} \times Bs^{w4} \times Ra^{w5} \times R_L^{w6} \times Si^{w7} \quad (11)$$

從土砂堆積搬運指標分佈圖來看，高屏溪流域於莫拉克颱風時集水區中上游區段大多呈現堆積之狀況，尤其在其老農溪及旗山溪中游以及隘寮溪上游一段最為嚴重，在此事件中產生之過大量土砂，而導致當時堆積於各主之流處，無法順利運送，但在一年後之凡那比颱風，雖然也因降雨在隘寮溪一帶產生崩塌導致某些集水單元土砂量增多，但在老農溪及旗山溪一帶可發現其土砂量已漸漸往下游運移，也表示此區也逐漸達到平衡之狀態。

五、結 論

本研究以台灣南部高屏溪流域為研究區域，選用 2009 年莫拉克颱風以及 2010 年凡那比颱風兩個事件就集水區之土砂搬運、堆積及平衡進行探討。以莫拉克颱風為模式學習及驗證之事件，進而探討高屏溪流域土砂搬運堆積之趨勢行為及其影響因子。

土砂生產指標 I_P ：2009 年的莫拉克颱風造成台灣南部地區五十年來最大的災害，從雨量分佈圖來看，颱風期間高達 2400mm 之累積雨量遠超過凡那比颱風 (最高 800mm 以下)，甚至達到某些地區整年之累積雨量。從兩事件之土砂生產量來看，凡那比颱風之土砂生產明顯比莫拉克颱風時減少許多。從兩事件之土砂生產指標來看，其產生較大土砂生產區域大多集中於降雨量較大的區域，而此些地區也因此容易造成崩塌發生，導致土砂量的生產，尤其在莫拉克颱風時，在高屏溪中游區因雨勢過大，而發生大規模崩塌以及堰塞湖潰堤，導致大量土砂量產生；而在凡那比颱風時雨量明顯較少，但同樣的在此次事件雨量集中於隘寮溪一帶致使崩塌發生，也在此區某些集水單元產生較多之土砂量。

土砂堆積搬運指標 I_R ：以多變量分析計算所得 I_R 方面，在莫拉克颱風時，顯示高屏溪集水區內大多呈現堆積知情況，由於在流域內多處產生大量崩塌，而導致土砂材料堆積情形，其中最嚴重處包含旗山溪小林村道民生段、老農溪中游區段以及隘寮溪上游處，這些土砂大多皆還堆積在各主支流中游處，土砂運移情形並非非常明顯；而在凡那比颱風時其土砂生產量已明顯減少，除了在隘寮溪因在凡那比颱風時降下較

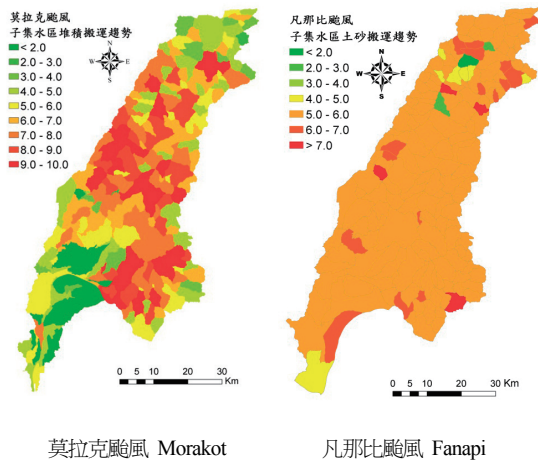


圖 10 集水單元堆積搬運趨勢圖
Fig.10 Distribution of sediment accumulation and transportation

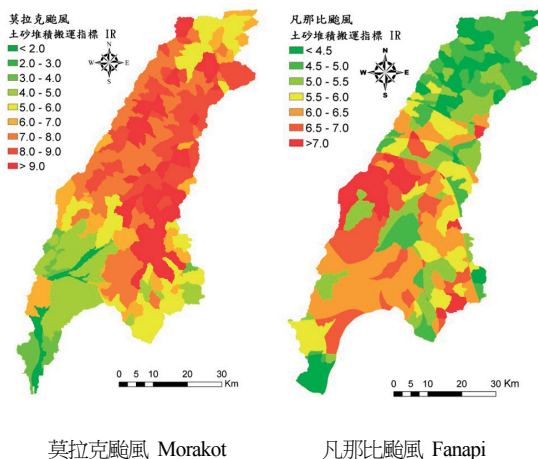


圖 11 土砂堆積搬運指標 I_R 成果
Fig.11 Distributions of I_R

大雨量而產生較多之土砂生產外，而莫拉克所帶來的影響在此時也已較為不明顯，對於此事件之土砂堆積搬運之推演與莫拉克颱風時也有明顯差異。因凡那比颱風之土砂大部分為莫拉克時所留下來的，從凡那比颱風之土砂堆積搬運指標中可看出，大部份之崩塌材料已經開始被傳輸至中下游，故集水區之土砂開始有減少的情形，故上游也因土砂減少開始有侵蝕的狀況發生。

從土砂生產指標來看，可發現凡那比颱風之土砂生產分佈明顯少於莫拉克颱風時，其生產分佈於兩事件中亦明顯不同，除了因降雨關係之外，也可能在莫拉克颱風時之崩塌地在一年後已呈現較穩定之狀態；而於土砂堆積搬運指標來看，莫拉克颱風時，因大規模崩塌而產生之大量土砂，在當時無法順利運輸而導致中游區段主流河道上呈現堆積情況，但從凡那比颱風來看，土砂量不僅明顯減少之外，大量之土砂也漸漸往下游運移，表示雖然在莫拉克颱風時造成五十年來最大的災害，但其之影響也已逐漸減緩，但在某些集水單元仍有土砂無法以自然的方式排出集水區，未來仍需考慮以人為治理或疏通方式解決土砂堆積問題，否則再一次颱風或暴雨事件，皆可能造成二次災害。

誌 謝

本文承蒙地調所易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置計畫提供資料 (編號 99-5826901000-7-A5-05)，謹此致謝。

參考文獻

1. 許惠瑛 (2007), 「台灣中部地區降雨誘發崩塌之影響因子研究」, 國立中興大學土木工程學系碩士論文。(Hu, H.Y. (2007). *Study on the Control Factors of Rainfall Induced Landslides in Central Taiwan*, Master thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
2. 中央地質調查所 (2009), 「易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置計畫」, 第二期
3. Whipple, K.X., Hancock, G.S., and Anderson, R.S. (2000). "River Incision Into Bedrock: Mechanics and Relative Efficacy of Plucking." *Abrasion, and Cavitation, GSA Bulletin*, 112(3), 490-503.
4. Howard, A.D., Dietrich, W.E., and Seidl, M.A. (1994). "Modeling Fluvial Erosion on Regional to Continental Scales." *J. of Geophysical Research* NO.B7, 13971-13986.
5. Wohl, E., and Merritt, D. (2008). "Reach-scale Channel Geometry of Mountain Stream." *Geomorphology*, 93, 168-185.
6. Bates, R.L., and Jackson, J.A. (1980). *Glossary of geology*, 2nd ed.: Falls Church, Va., American Geological Institute, 751 p.
7. Wentworth, C.M., Ellen, S.D., and Mark, R.K. (1987). "Improved Analysis Of Regional Engineering Geology Using Geographic Information Systems." In Proceedings, GIS'87-San Francisco Second Annual International Conference, Exhibits and Workshops On Geographic Information Systems, San Francisco, California, Oct. 26-30, 1987, 636-649.
8. Goodman, R.E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*, edited by: John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 478.

2011年08月03日 收稿

2011年11月01日 修正

2012年03月08日 接受

(本文開放討論至 2013 年 3 月 31 日)