

玉峰集水區颱風事件河川流量和 懸移質濃度關係之研究

The Relationship between Discharge and Suspended Sediment Concentration at Typhoon Events in Yu-Feng Catchment

朱怡亭*

Yi-Ting Chu

徐美玲**

Mei-Ling Hsu

Abstract

Hourly water samples collected in the Yu-Feng catchment, an upper montane catchment of Shihmen Reservoir, from seven typhoon events in 2002 and 2006 were used to construct hydrographs and time series of sediment concentration. It was found that the relationship between discharge and sediment concentration of an event was related to the antecedent rainfall, rainfall characteristics, and the timing of the events in the typhoon season. The hysteresis effect was less obvious when typhoons occurred in the beginning of the typhoon season. In contrast, typhoons which took place right after others showed clockwise hysteretic loops, indicating signs of sediment depletion in the catchment. Comparison of the landslide intensities at the loci of hourly rainfall centers in temporal sequence with the pattern of sediment concentration in the hydrographs verified the importance of landslides in affecting the fluvial sediment concentration.

Comparisons of landslides records showed that landslide area increased two

* 國立臺灣大學地理環境資源研究所碩士

Master, Institute of Geography, National Taiwan University.

** 國立臺灣大學地理環境資源學系副教授，通訊作者 (e-mail: hsu@ntu.edu.tw)

Associate Professor, Department of Geography, National Taiwan University, Corresponding Author.

times from 2002 to 2006. During the same time period, the sediment concentration level from the typhoon events increased 13.1 - 15.6 times. Sediment concentration in the rising limbs of those 2006 hydrographs increased at much higher rates than those of 2002 hydrographs. In contrast, sediment concentration in the falling limbs of 2006 hydrographs decreased at much slower rates than those of 2002 hydrographs. These phenomena testified the existence of abundant sediment supply in 2006.

Keywords: typhoon, landslide, hysteretic loop, suspended sediment, rainfall center.

摘 要

本研究搜集颱風期間的短時距懸移質樣本，分析石門水庫上游玉峰集水區 2002 和 2006 年共 7 場颱風流量與懸移質濃度的關係。研究發現，單場颱風流量與懸移質濃度關係與臨前雨量、降雨特性和颱風發生時間有關，發生在颱風季節初期者遲滯效應不明顯，但出現在其他颱風之後者，其懸移質濃度與流量的關係則呈現順時針遲滯圈形態，顯示颱風事件末期輸砂供應不足的現象。此外，暴雨中心與主要崩塌地的相對關係，也與單場事件的懸移質濃度變化趨勢相吻合。

透過集水區崩塌地變遷分析，2002 至 2006 年這段期間崩塌地面積增加了 2 倍，且大多集中在河道附近，使 2006 年的懸移質濃度則較 2002 年增加了 13.1-15.6 倍。兩年的懸移質濃度在流量的上升翼和下降翼反應不一，2006 年上升翼濃度增加速率比 2002 年快，下降翼減少速率則比 2002 年緩慢，顯示 2006 年懸移質供應量較充足，突顯集水區崩塌地變遷對河川懸移質濃度變化的影響力。

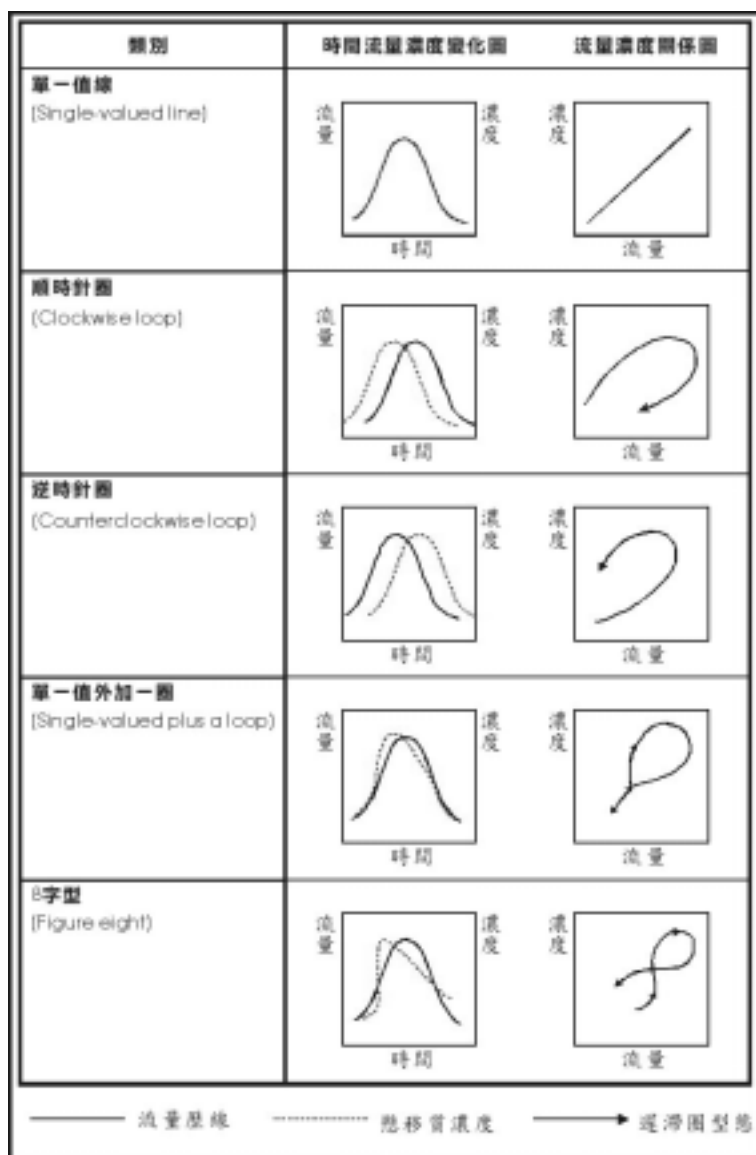
關鍵字：颱風、崩塌、遲滯圈、懸移質、暴雨中心

前 言

臺灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的交界處，板塊的擠壓活動造就出陡峻的地貌和破碎的地質，加上位處西太平洋颱風路徑通過的範圍內，颱風經常帶來豐沛且集中的降雨，而在山區造成崩塌，崩落的物質則經常在隨後的颱風豪雨中，被流水搬運至河道，成為河流懸移質輸砂的供應源。因此，臺灣在這種自然條件影響下，雖然面積僅佔全世界陸地面積的 0.024%，但懸移質輸砂量卻佔全球的 1.9% (Dadson *et al.*, 2003)。

集水區的懸移質輸砂量可視為流水侵蝕地表速率的指標，而可透過河川懸移質輸砂濃度和流量歷線的關係加以推估。然而，河流流量和懸移質輸砂濃度常存在著複雜的變化，在相同流量下，懸移質濃度可相差到十的數次方倍 (Walling and Webb, 1982)。暴雨事件的輸砂濃度變化更為顯著，並常因當時的水文環境條件和懸移質輸砂的供應狀況，而呈現不同型態的遲滯效應 (Hysteresis effects)。根據 Williams (1989) 整理的懸移質濃度和流量的關係 (C-Q relations)，大致呈現 5 種型態 (圖 1)：單一值線 (single-valued line)、順時針圈 (clockwise loop)、逆時針圈 (counterclockwise loop)、單一值外加一圈 (single-value plus a loop) 和 8 字型 (figure eight)。各遲滯圈 (C-Q) 類型乃是相鄰降雨事件的間隔時間

(Walling and Teed, 1971; Wood, 1977) 事件的延時 (Wood, 1977) 乾濕季 (Asselman, 1999) 降雨強度、臨前降雨 (Jeje *et al.*, 1991) 逕流量等因素共同塑造的結果。此等因子的變化細節須透過密集的採樣觀測資料才能看出端倪。



資料來源：改繪並整理自 Williams (1989)。

圖 1 懸移質濃度和流量變化 (C-Q relations) 的五種類型：
單一值線、順時針圈、逆時針圈、單一值外加一圈和 8 字型

Fig. 1. Five common types of C-Q relations: single-valued line, clockwise loop, counterclockwise loop, single-valued plus a loop, and figure eight.

輸砂供應來源區的變遷也可能影響河流輸砂濃度。石門水庫的淤積量曾於 2004 年艾利颱風及 2005 年馬莎颱風過後大幅提升 (鍾朝恭與劉家盛, 2005), 當時有相關研究指出颱風時造成的坡地崩塌是集水區輸砂大幅增加的主要因素 (吳東雄與劉家盛, 2005; 湯曉虞, 2007; 蔡宗賢, 2005), 然而, 這些研究尚缺短時距實測資料的佐證, 無法對單場暴雨事件流量和懸移濃度的關係, 以及崩塌地對懸移質輸砂搬運的影響做比較詳細的剖析, 因此本研究選擇 2006 年 4 場颱風事件, 進行懸移質濃度採樣, 並配合前人在 2002 年所得的 3 場颱風懸移質濃度資料 (邱昱嘉, 2003), 分析 2002 至 2006 年這段時期崩塌地的變遷, 再比對此等變遷對集水區流量和河川懸移質濃度關係的影響。

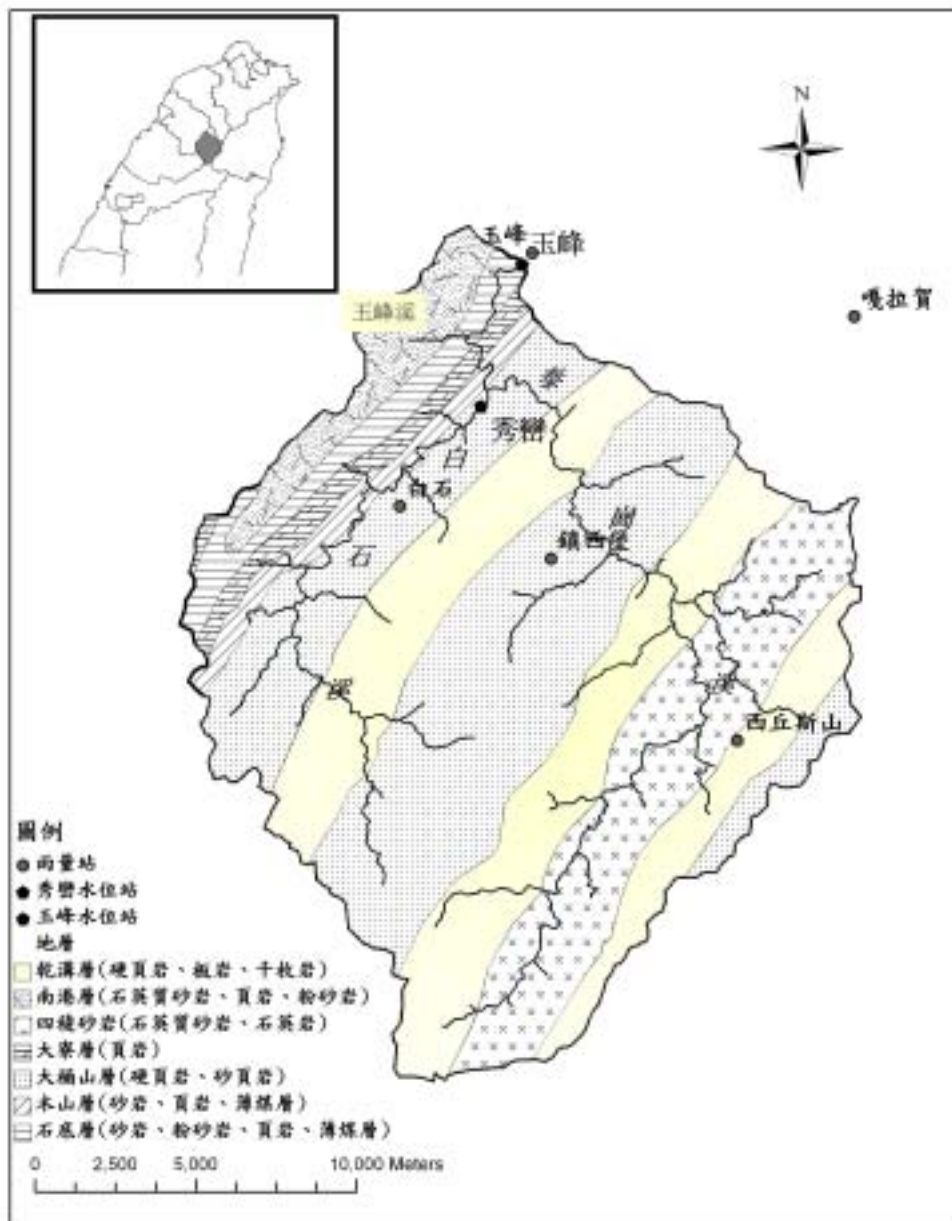
研究區概述

玉峰集水區位於新竹縣尖石鄉和五峰鄉境內, 為石門水庫集水區上游的集水區, 屬於中高海拔 (海拔高度介於 688m-3,529m), 面積約 335.29 平方公里, 約呈南北向之菱形狀, 東西兩大支流為白石溪和泰崗溪, 自南而北匯流後稱玉峰溪。境內地層有乾溝層、南港層、四稜砂岩、大寮層、大桶山層、木山層及石底層 (圖 2)。研究區內地質破碎, 加上區內坡度陡峭, 有 68% 的面積坡度大於 55% (六級坡), 極易發生土壤沖蝕和崩塌, 為地質災害之高潛勢區, 崩塌比例居石門水庫各次集水區之冠 (歐陽元淳, 2003)。

本區年雨量約 2,200mm, 根據集水區境內的玉峰測站資料, 6-9 月的降雨量佔全年雨量的 60%, 颱風是此區降雨的主要來源, 經常在短時間內帶來豐沛的雨量, 例如艾利颱風 (2004 年 8 月 23 日-8 月 25 日) 降下 1,118mm 的雨量, 佔該年年雨量的 37%; 隔年馬莎颱風也降下 885mm (2005 年 8 月 4 日-8 月 5 日) 的雨量, 佔年雨量的 24%。颱風降雨經常大幅提高河水流量; 根據水利署水文年報, 玉峰水位站的最大日流量是由葛樂禮颱風在 1963 年 9 月 11 日所造成的 2,510 CMS; 該場颱風瞬時最大流量為 4,220 CMS。各年的最大流量幾乎都是由颱風所造成, 其中, 艾利颱風瞬時最大流量高達 3,640 CMS; 馬莎颱風期間瞬時最大流量高達 2,801 CMS。

研究方法

河流的懸移質濃度是集水區水文系統複雜交互作用下的結果, 但主要受到兩個因素的控制, 一為提供輸砂搬運能量的河流流量; 另一為集水區的輸砂供應量。供應量的多寡則取自於邊坡和河道系統的供應, 邊坡系統中的崩塌地是臺灣輸砂供應的重要來源 (張石角, 1973; Dadson *et al.*, 2004; Hovius *et al.*, 2000), 不同時期河流懸移質濃度與崩塌面積在時間和空間分布的變化有關 (Dadson *et al.*, 2004), 河道系統中的輸砂供應量則會受到降雨特性、臨前降雨和發生時間影響。因此本研究首先分析 2002 至 2006 年這段期間崩塌地的時空變遷, 以作為此區懸移質採樣環境的背景資料, 接著探討 2002 及 2006 年颱風事件流量與懸移質濃度的關係, 分析影響河道輸砂供應的因子、暴雨中心對應之崩塌地對輸砂濃度的影響, 最後再比較兩年懸移質輸砂濃度變化趨勢。



資料來源：工業技術研究院能源與資源研究所 (1998)；經濟部水利署 (2004)。

圖 2 玉峰集水區地質與氣象水文測站分布圖

Fig. 2. The geology, rain gauge, and gauging stations in Yu-Feng catchment.

(一) 崩塌地變遷分析

崩塌地是懸移質輸砂的供應源之一，崩塌土方量的大小會影響潛在的輸砂供應量，由於石門水庫集水區的崩塌多為淺層崩塌 (李錫堤，2005；趙倬群，2004)，故本研究以崩塌地面積的變動代表土方

量的變動趨勢。崩塌資料包括工研院能源與資源研究所和林務局利用航照圖和衛星影像所判釋的 2003 年艾利颱風前和 2005 年馬莎颱風後崩塌地，以及自行利用 2004 年艾利颱風後農林航測所拍攝的航照圖，判釋的崩塌地資料。在探討崩塌與輸砂的關係時，理應利用同時期的崩塌與輸砂資料，但蒐集到 2002 年的懸移質資料，卻沒有直接利用該年航照所判釋的崩塌地資料；所幸研究區在 2002 至 2003 年間，並未發生特別嚴重的豪雨，因此以 2003 年的崩塌地資料代表 2002 年採樣期的崩塌狀態。

James (1985) 提出崩塌地和河道的距離，以及崩塌地的坡度是影響崩塌泥砂運移的主要因素，因此本研究根據三年的崩塌地圖層資料，及 9 公尺解析度的 DEM，利用 ArcGIS 9.1 的空間分析模組 (Spatial analyst) 計算崩塌地之斜坡面積、坡度，並計算崩塌地趾部距河道的距離，以了解崩塌物質的輸運難易。

(二) 颱風事件懸移質輸砂資料的取得

由於颱風的雨量 and 降雨強度相較大於其他類型的降雨，較能有效地搬運輸砂，是河川懸移質輸砂輸送的關鍵時期，而其輸運的強弱變化需透過短時距密集的採樣方能偵測。因此，本研究利用 2002 年邱昱嘉 (2003) 在雷馬遜颱風、娜克莉颱風和辛樂克颱風事件時，於石門水庫上游玉峰集水區的玉峰橋以兩小時間距所採得的河流懸移質資料，以及 2006 年自行於同一地點，配合水位和雨量的觀測時間，於碧利斯颱風、凱米颱風、寶發颱風和珊珊颱風期間，每隔一個小時採集一次的水樣，比對前後兩段時間崩塌地的變化與懸移質濃度的變動趨勢。

採樣方法為表面取樣法 (surface and dip sampling) (Edwards and Glysson, 1970)，將河道寬度分成 4 等分，在其 3 個分隔點，利用自製採樣器 (照片 1) 採取水樣。樣本採回後在實驗室，經抽氣、過濾、烘乾和秤重，得出懸移質重量，再換算成濃度值，然後將同一時間所採得的 3 個資料值加以平均，以代表該時段的懸移質濃度。



照片 1 採樣儀器

Photo 1. The sampler.

(三) 雨量與流量資料的取得

河流的懸移質濃度高低乃與當時的雨量 and 流量有關。本研究利用研究區及鄰近的 5 個雨量測站

(圖 2) 的雨量資料 (經濟部水利署北區水資源局, 2007), 以徐昇多邊形法 (Thiessen polygons) 估算各場颱風的時平均雨量、雨峰降雨量和臨前降雨量。另為研究各場颱風暴雨中心的空間分布, 乃以克利金 (Kriging) 空間推估方法 (張志昌, 2006) 推估集水區雨量。根據集水區內及區外 (南山、馬達拉、池端、巴陵、雪嶺), 共 10 個雨量站, 推估研究區內各網格的時雨量值, 以找出各小時的暴雨中心。

另根據水利署在玉峰橋旁所設水位記錄器的每小時水位觀測資料, 利用水位與流量的率定曲線求取時流量, 繪製水文歷線, 並計算流量回歸期來評估各場颱風洪峰流量在該測站記錄中的相對大小。由於經濟部水利署 (2004) 曾利用玉峰測站歷年流量資料進行瞬時洪峰流量的頻率分析, 經適合度檢定後, 建議極端值第一類分布法 (Type I Extremal) 最適用於本區, 因此, 本研究以此機率分布計算瞬時洪峰流量之回歸期。

(四) 懸移質濃度和流量關係的分析

由於 2002 和 2006 年使用不同的採樣儀器, 為了避免因儀器不同所造成的系統誤差, 將兩個研究所採得的懸移質濃度資料, 與水利署在同一時段的採樣資料進行差異性檢定 (t 檢定, $\alpha = 0.1$)。檢定結果顯示, 2002 年的採樣結果與水利署的資料無顯著差異, 而 2006 年的採樣濃度高於水利署的資料, 但呈現高度相關性。推測可能是本研究所使用之採樣儀器的採樣深度略較水利署的採樣深, 受底層較高懸移質濃度的影響, 而導致系統性偏高的現象。因此根據其偏誤關係 (式 1), 進行 2006 年採樣值的修正。

$$y = 2.667x^{0.7996}, \quad R^2 = 0.8972 \quad (1)$$

x : 2006 年實測值 y : 修正值

接著繪製各場颱風事件的懸移質濃度 (C) 與流量 (Q) 歷線圖 (temporal graph), 以及濃度和流量關係圖 (C-Q relations), 或稱為遲滯圈 (hysteretic loop), 以檢視颱風事件的懸移質濃度和流量的關係。遲滯圈類型受到流量和當時的環境狀態所左右, 其中流量因子是直接影響懸移質濃度變化的關鍵所在, 以皮爾生積差相關係數 (Pearson product moment correlation coefficient) 分析各場颱風事件流量和懸移質濃度的相關性。

(五) 影響河道淤砂供應量的因子

暴雨時河道系統的懸移質輸砂供輸, 受該場暴雨發生在雨季的初期或後期 (Lootens and Lumbu, 1986), 以及相鄰暴雨事件的時間 (Walling and Teed, 1971; Wood, 1977) 的影響。本研究以臨前降雨量和臨前降雨指數 (Butler, 1957, 引自 Gregory and Walling, 1973) 分析該場颱風發生時集水區輸砂的可能消耗程度。臨前降雨指數 (Antecedent precipitation index) 為該降雨事件發生前特定長度時間內的降雨量的函數, 原則上, 愈接近研究事件的時雨量加權越大。

$$P_a = P_t \times K^t \quad (2)$$

P_a : 臨前降雨指數; P_t : 事件發生前連續 t 天的總累積雨量; K 1.0, 通常介於 0.85-0.98 (Butler, 1957, 引自 Gregory and Walling, 1973)。K 值參考 Jeje *et al.* (1991), 設為 0.85。

(六) 颱風暴雨中心和崩塌地時空分佈與懸移質濃度變化關係的分析

颱風期間, 位於暴雨中心所經路徑的地面所受到的降雨沖擊較大, 如果地面因崩塌而呈現裸露的

狀態，則易受沖蝕而產生大量的輸砂，因此暴雨中心與崩塌地的時空分析有助於瞭解河流懸移質濃度的變動。2002 至 2006 年期間，玉峰集水區先後在艾利颱風和馬莎颱風中發生兩次大規模崩塌，這 2 場颱風在集水區各地的累積降雨量介於 500-1,500mm。相較之下，本研究取得懸移質濃度資料的 7 場颱風事件，除了 2002 年的雷瑪遜颱風總降雨量為 491mm 外，其餘各場颱風總降雨量介於 43mm-256mm，皆未引發大規模崩塌，因此以 2003 年的崩塌地資料表示 2002 年颱風時的崩塌狀態；以馬莎颱風後的崩塌地資料表示 2006 年颱風時的崩塌狀態，假設裸露破碎崩塌地是集水區在豪雨中主要的邊坡淤砂供應源。

由於各重要淤砂供應源所提供的淤砂抵達採樣點的先後次序，可能左右該點採樣濃度隨時間的變動趨勢，因此以各崩塌地與採樣點的距離作為分區的標準，又因白石溪與泰崗溪流域的崩塌狀況差異甚大，因此再分成兩個次集水區，分別統計各距離等級區中的崩塌地面積。並且登錄各小時暴雨中心出現位置所屬的距離組別，進一步分析其與崩塌地的關係。

(七) 以率定曲線評估懸移質濃度變化趨勢

為比較兩年懸移質濃度在颱風事件的變化趨勢，利用冪次迴歸方程式（率定曲線）（林孟龍和林俊全，2003；黃朝恩，1982；陳翰霖和張瑞津，2003；Hovius *et al.*, 2000; Walling, 1977; Walling and Webb, 1987），分別估算水文歷線上升翼和下降翼的懸移質濃度變化趨勢（Burt *et al.*, 1983; Lootens and Lumbu, 1986; Walling and Webb, 1987）。

$$C = aQ^b \quad (3)$$

式 (3) 中， C 為單位懸移質輸砂濃度 (ppm)， Q 為流量 (CMS)， a 、 b 為經驗係數。同時以判定係數 (R^2) 來衡量迴歸方程式的解釋能力。

結果與討論

(一) 2002 至 2006 年集水區崩塌地的變遷

研究期間的崩塌資料顯示，玉峰集水區總崩塌面積有逐年增加的趨勢（圖 3），2003 年集水區境內共有 254.7 公頃的崩塌地，2004 年艾利颱風後，總崩塌面積增加至 467.8 公頃，2005 年馬莎颱風後更累積至 507.7 公頃。另外，各年崩塌地發生的坡度以 30°以上佔大多數（相當於坡度 55%以上的六級坡），2003 年崩塌地的坡度，以 40°-50°最多，約佔 47%；2004 年及 2005 年崩塌地分布坡度雖集中在 30°-40°，分別佔 34%和 37%，但 40°-50°也分別佔有 28%和 34%，比例甚高，崩塌發生地的坡度陡峭，有利於崩塌物質向下坡移動。

玉峰集水區這段期間的崩塌地以白石溪集水區崩塌地增加最多，達 261.8 公頃，為 2003 年 (82.1 公頃) 的 3.2 倍，同時期泰崗溪集水區的崩塌地僅增加 56.6 公頃，這與艾利颱風和馬莎颱風的暴雨中心皆出現在白石溪集水區，降雨量過高而導致崩塌有關。

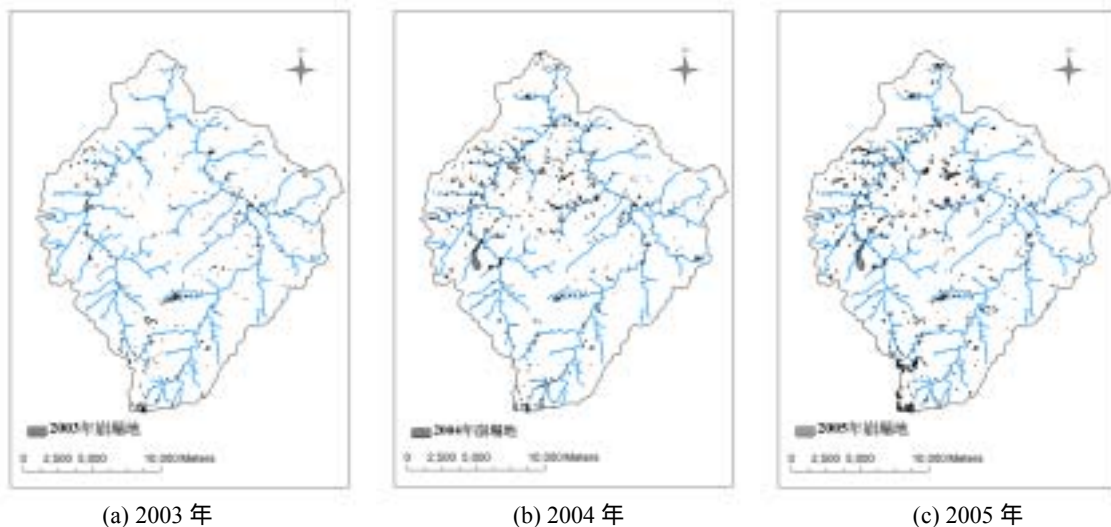


圖 3 2003 至 2005 年玉峰集水區的崩塌地分布

Fig. 3. The distribution of landslides in 2003, 2004 and 2005 in Yu-Feng catchment.

崩塌地距離河道的遠近會影響輸砂進入河流的難易，分析結果顯示 2005 年緊鄰河道的總崩塌面積，較 2003 年增加了 3.4 倍。其中，白石溪河道旁的崩塌面積增加幅度最大（圖 4），共增加 102.7 公頃，比 2003 年增加 7 倍；至於泰崗溪緊鄰河道的崩塌面積則只比 2003 年多了 12.5 公頃，增加幅度甚小（圖 5）。推測鄰近河道崩塌地的大量增加應與颱風豪雨造成河水暴漲，河流侵蝕坡腳，加速河岸崩塌有關，而此類崩塌地數量的增加，將提高泥砂被雨水帶入河流的機率。

本研究於 2006 年 4 和 6 月所進行野外考察時，在白石溪和泰崗溪的匯流處，觀察到白石溪溪水渾濁，而泰崗溪則相對清澈，顯見玉峰測站的懸移質來源主要來自白石溪（照片 2），與前述颱風後白石溪河道旁崩塌地增加的現象相符。

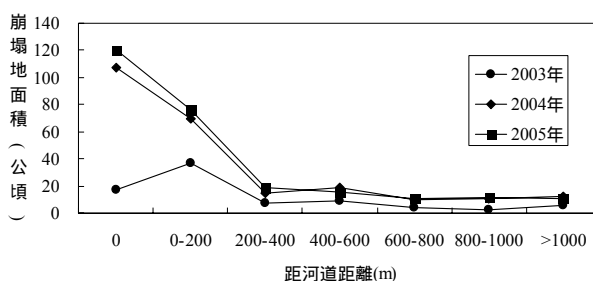


圖 4 2003 至 2005 年白石溪集水區崩塌地分布與距河道遠近的關係

Fig. 4. The distribution of landslides in 2003, 2004, and 2005 in relation to the shortest distances to the channel in Baishi catchment.

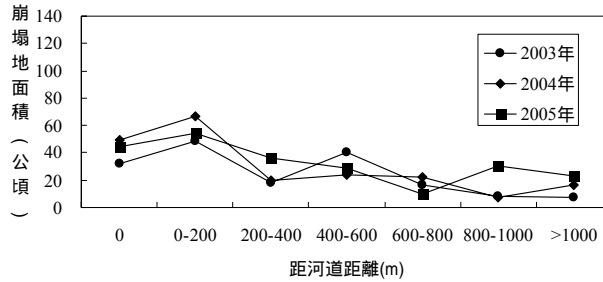


圖 5 2003 至 2005 年泰崗溪集水區崩塌地分布與距河道遠近的關係

Fig. 5. The distribution of landslides in 2003, 2004, and 2005 in relation to the shortest distances to the channel in Taigang catchment.



拍照日期：2006 年 6 月 22 日。前 7 天臨前雨量為 40.1mm，降雨指數為 12.8。

照片 2 白石溪和泰崗溪匯流處，白石溪溪水混濁；泰崗溪相對清澈

Photo 2. The turbid Baishi Stream and the relatively clearer Taigang Stream at their confluence.

(二) 單場颱風事件流量和懸移質輸砂濃度的歷線變化

各場颱風中，以 2002 年雷馬遜颱風的總降雨量 (491mm) 和洪峰流量 (1,523.10 CMS) 最高 (表 1、表 2)；而以 2006 年凱米颱風最低，分別為 43mm 和 57.77 CMS。各場颱風的流量回歸期，除雷馬遜颱風為 3.8 年，洪峰規模較大外，其餘皆在 1.07-1.18 年的範圍內；洪峰滯延時間 (lag time) 則均介於 3-8 小時。

2002 年 3 場颱風流量和懸移質濃度都呈現正相關 (表 3)，唯相關程度有所差異。雷馬遜颱風相關係數最高，達 0.95；娜克莉颱風次之，為 0.87；辛樂克颱風為唯一具多雨峰降雨特徵的颱風，結果流量與懸移質濃度的相關係數最小，僅只 0.12。此外，3 場颱風的懸移質濃度和流量在上升翼和下降翼的關係並不一致 (圖 6)，第一場的雷馬遜颱風呈現局部複合型遲滯圈，在下降翼的中段，懸移質濃度高於上升翼之濃度，但是後段則明顯低於上升翼濃度，顯示中段有較充足的輸砂供應，後段則供應不足。其後的兩場颱風則呈現明顯順時針遲滯圈，亦即在下降翼時同樣流量的濃度比上升翼時來得低，顯示懸移質輸砂供應在洪峰之後的耗盡現象。

表 1 各場颱風雨量資料表

Table 1. The rainfall characteristics of the studied typhoon events.

降雨特性	颱風事件						
	2002 年			2006 年			
	(1) 雷馬遜	(2) 娜克莉	(3) 辛樂克	(1) 碧利斯	(2) 凱米	(3) 寶發	(4) 珊珊
降雨日期	7/3-7/5	7/10-7/11	9/5-9/7	7/12-7/15	7/24-7/25	8/8-8/9	9/15-9/17
降雨延時 (hour)	34	33	57	74	25	27	42
總降雨量 (mm)	491	66	256	158	43	82	146
平均降雨強度 (mm/hour)	14.4	2.0	4.5	2.1	1.7	3.0	3.5
1 小時最大降雨強度 (mm/hour)	41.0	13.8	20.0	11.6	6.5	10.0	20.0
雨峰降雨延時 (hour)	13	9	9	24	6	10	14
雨峰降雨量 (mm)	294	53	117	132	33	67	123
雨峰降雨強度 (mm/hour)	22.6	5.9	13.0	5.5	5.5	6.7	8.8
颱風前 7 天臨前雨量 (mm)	29	540	10	17	48	1	131
颱風前 7 天臨前降雨指數	9	173	3	5	15	0	42
颱風前 15 天臨前雨量 (mm)	52	546	10	60	226	51	218
颱風前 15 天臨前降雨指數	5	48	1	5	20	4	19

表 2 各場颱風流量資料表

Table 2. Characteristics of discharge in each typhoon event.

颱風事件	降雨日期	最大洪峰流量	初始流量	洪峰滯延時間	水文歷線型態	流量回歸期 (年)
		(CMS)	(CMS)	(小時)		
雷馬遜	2002/7/3 - 7/5	1523.10	3.81	7	單峰	3.80
娜克莉	2002/7/10 - 7/11	107.99	32.84	6	單峰	1.09
辛樂克	2002/9/5 - 9/7	154.93	4.56	-	複合	1.10
碧利斯	2006/7/12 - 7/15	220.19	16.77	8	單峰	1.13
凱米	2006/7/24 - 7/25	57.77	20.22	5	單峰	1.07
寶發	2006/8/8 - 8/9	103.61	11.35	3	單峰	1.08
珊珊	2006/9/15 - 9/17	314.07	17.88	4	單峰	1.18

表 3 2002 年颱風流量和懸移質濃度的相關係數表

Table 3. Pearson product correlation coefficient between discharge and suspended sediment concentration in the typhoon events in 2002.

颱風事件	皮爾生積差相關係數
雷馬遜	0.95**
娜克莉	0.87**
辛樂克	0.12

* 顯著水準<0.05 ** 顯著水準<0.01

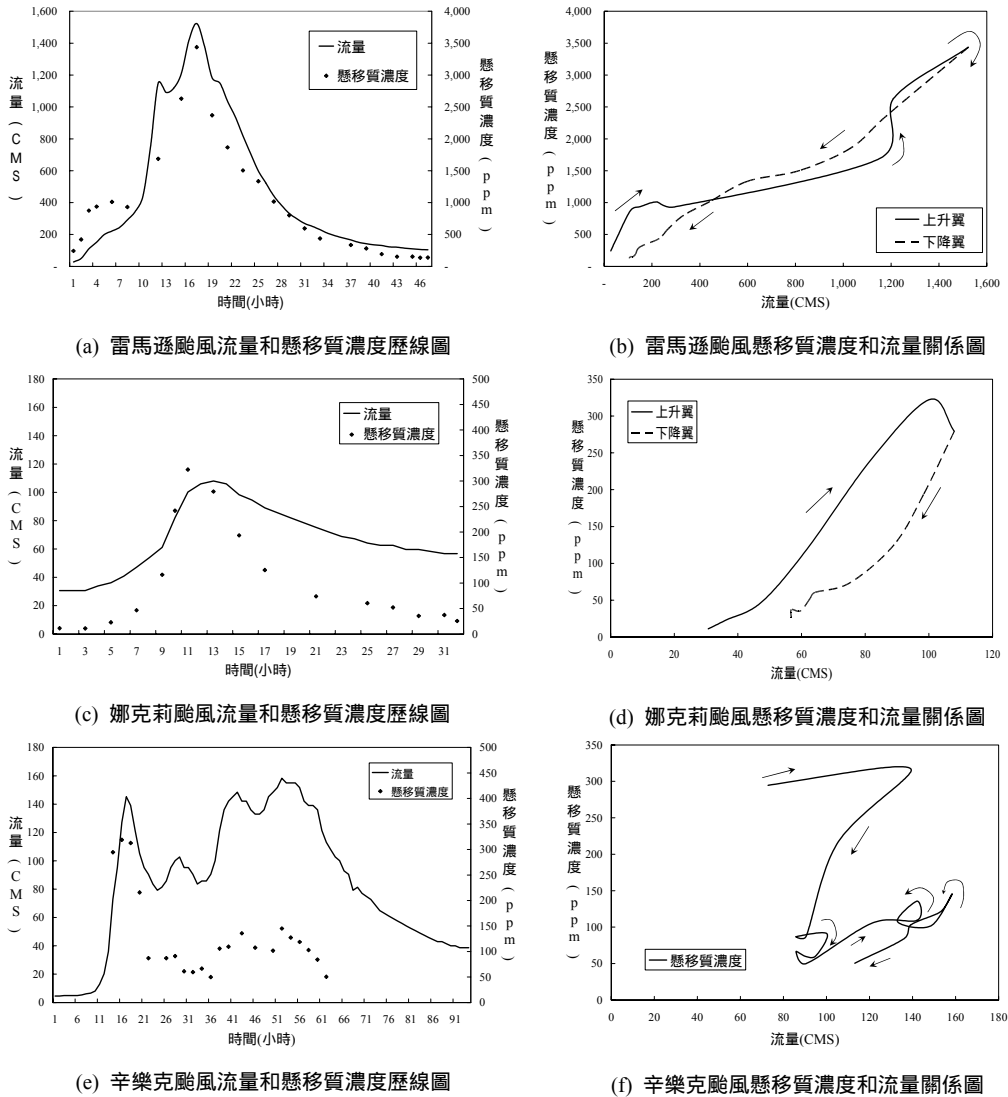


圖 6 2002 年各場颱風懸移質濃度和流量之關係

Fig. 6. Hysteresis relations between S.S.C. and stream discharge (Q) in 2002.

2006 年取得 4 場颱風的懸移質濃度樣本，碧利斯颱風和凱米颱風皆採得整場事件的懸移質濃度，而寶發颱風僅採得降雨結束以後第 6 至第 25 小時的濃度，珊珊颱風則採得洪峰過後下降翼的懸移質濃度。各時間點的懸移質濃度值乃以同一時間所採得的三個樣本資料值，經式 (1) 修正再予平均求得。另外，碧利斯颱風和寶發颱風在某些時間點所採的三瓶樣本中，有一瓶特別高，推測可能是採集到較底層的懸移質。當此種情形出現時，則同時在圖中標示該時段濃度的平均數和中位數 (圖 7a、7e)，並分別以兩種方式進行資料處理：(1) 當同一時間所採第三瓶的懸移質濃度高過或低於另外兩瓶的 5 倍以上時，去除該瓶濃度值；(2) 將該時間點的所有採樣資料自分析資料中刪除。利用實際所得懸移質

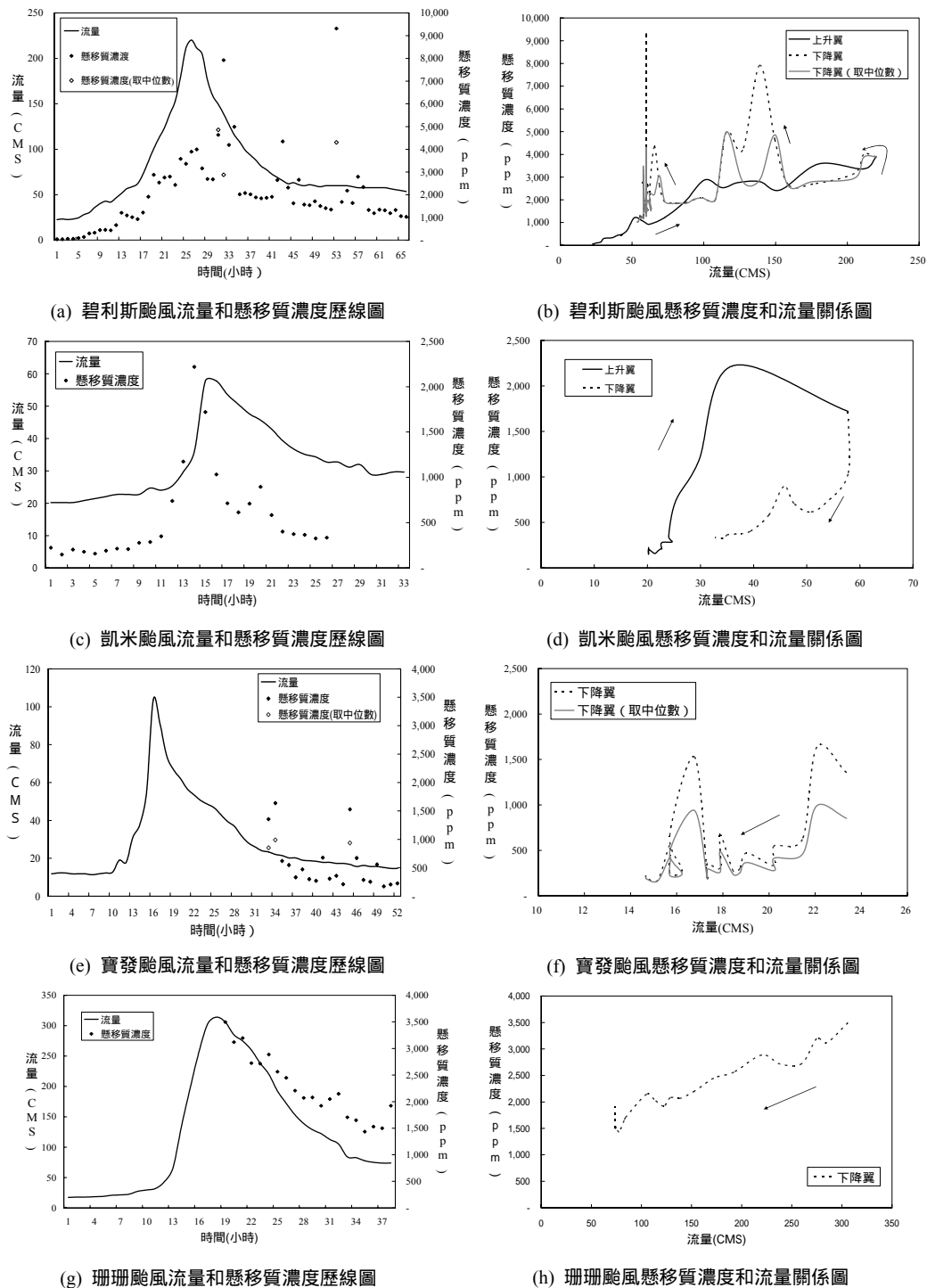


圖 7 2006 年各場颱風懸移質濃度和流量之關係

Fig. 7. Hysteresis relations between S.S.C. and stream discharge (Q) in 2006.

濃度與流量進行相關性分析 (表 4)，發現相關係數均達 0.5 以上，其中碧利斯經過修正的濃度與流量的相關係數更提高至 0.75 以上。

從懸移質濃度和流量的關係圖 (圖 7) 顯示，第一場的碧利斯颱風呈現近似逆時針遲滯圈型態，懸移質濃度在下降翼後段明顯高於上升翼相同流量時的濃度值，與雷瑪遜颱風在下降翼後段輸砂耗盡的情形不同。第二場的凱米颱風則呈現明顯的順時針遲滯圈型態，水文歷線下降翼的懸移質濃度不及上升翼同流量的濃度。第三場寶發颱風，在下降翼後段濃度值與對應的流量變化 (23 CMS-14 CMS)，呈現高低波動情形，此時已經是降雨結束後 6 小時以上，但在流量 14 CMS 時仍有 225 ppm 的濃度，高於 2002 年 3 場颱風降雨期間的下降翼的懸移質濃度 (雷瑪遜颱風流量 104.1 CMS，濃度 139ppm；娜克莉颱風 56.8 CMS，26ppm；辛樂克颱風 113 CMS，51ppm)，而且濃度下降速度緩慢，並未出現 2002 年濃度耗盡的情況。最後一場的珊珊颱風下降翼的濃度和流量關係則較為一致。

表 4 2006 年颱風流量和懸移質濃度的相關係數表 (寶發颱風和珊珊颱風僅代表下降翼之相關係數)
Table 4. Pearson product correlation coefficient between discharge and suspended sediment concentration in 2006 (The correlation coefficients of typhoon Bopha and typhoon Shanshan are calculated using data collected at the falling limbs).

颱風事件	皮爾生積差相關係數	颱風事件	皮爾生積差相關係數
碧利斯	0.51**	寶發	0.52*
碧利斯 (修正極端值)	0.75**	寶發 (修正極端值)	0.31
碧利斯颱風 (去除極端值)	0.76**	寶發 (去除極端值)	0.07
凱米	0.53**	珊珊	0.95**

* 顯著水準<0.05 ** 顯著水準<0.01

(三) 影響懸移質濃度和流量關係的原因

1. 影響河道輸砂供應的因子

颱風事件發生時間、降雨特性和臨前降雨等因子會影響颱風河道懸移質的供應情形。雷瑪遜颱風為 2002 年第一場侵臺的颱風，累積雨量高，且該年度未曾在此事件之前有任何大強度的降雨，其 7 天臨前降雨指數偏低 (表 1)，推測集水區的邊坡或河床在颱風前的乾季裡累積了充足的淤砂 (Asselman, 1999)，加上該場颱風雨峰降水強度達 22.6mm，對地表的侵蝕力相對較強，有利於懸移質輸砂的搬運。

第二場的娜克莉颱風，從降雨日期來看，兩場颱風只差距 5 天，7 天臨前降雨指數高達 173，先前貯存於河床上的物質在雷馬遜颱風時已被大量沖刷，加上娜克莉颱風的降雨量和雨峰降雨強度都較雷瑪遜颱風低，侵蝕力大不如前，因此相同流量下的懸移質濃度比前場颱風低 (圖 8)。此外，從河道供應情形推論，當河水位上升侵蝕力增加時，便將河道上的細粒泥沙搬走 (Lenzi and March, 2000)，待水位消退時，河床上所留下的粗顆粒物質形成盾甲層 (armored layer)，保護了底層的泥沙，導致後繼水流無力搬動粗顆粒，而使濃度降低，使流量與懸移質濃度呈現順時針遲滯型態。

2002 年最後一場颱風辛樂克，降雨和流量均呈多峰型態，7 天臨前降雨指數雖僅只 3，但因已值颱風季尾間，河道鬆動的淤砂已大量被前兩場颱風沖刷殆盡，因此除在其第一次洪峰有較高的懸移質濃度外，其後懸移質濃度雖隨洪峰上升，但濃度顯著下降（圖 6e）。儘管其降雨量和降雨強度皆高於娜克莉颱風，其後期的懸移質濃度卻較低（圖 8），顯見輸砂供應量的多寡是決定颱風懸移質濃度高低的關鍵。

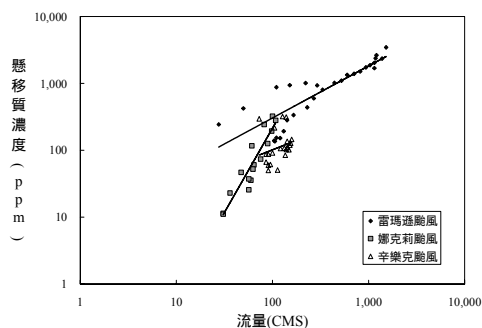


圖 8 2002 年颱風流量與懸移質濃度散佈圖

Fig. 8. Relationship between discharge and S.S.C. for typhoons in 2002.

2006 年的碧利斯颱風發生在颱風季節初期，累積雨量為 158mm，臨前降雨量低，下降翼濃度高於上升翼的濃度，懸移質輸砂供應充足。至於第二場凱米颱風與前場差距 9 天，並且雨量相對較小，僅 43mm，水流不及另外幾場颱風強勁，細粒淤砂很可能在水位上升時就被攜走，使得水文歷線下降翼的懸移質濃度不及上升翼同流量時的濃度。

2006 年最後一場珊珊颱風，降雨強度和洪峰流量較第一場的碧利斯颱風高，但是懸移質濃度卻較低（圖 9）。以發生時間來看，珊珊已進入颱風季節末期，臨前降雨量高，達 131mm（圖 11），相較高於碧利斯颱風前 7 天的 19mm 累積雨量（圖 10），兩者前 7 天臨前降雨指數分別為 42 和 5。此外，珊珊颱風之前的降雨曾造成前後 3 次洪峰，這些接連發生的洪水可能已將河床淤砂消耗殆盡，因此造成其後珊珊颱風懸移質濃度低降的現象（Walling and Webb, 1982）。

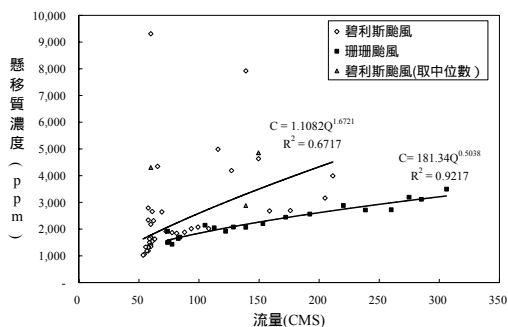


圖 9 碧利斯颱風和珊珊颱風下降翼流量和懸移質濃度散佈圖

Fig. 9. Relationship between discharge and S.S.C. of falling limbs for Bilis typhoon and Shanshan typhoon.

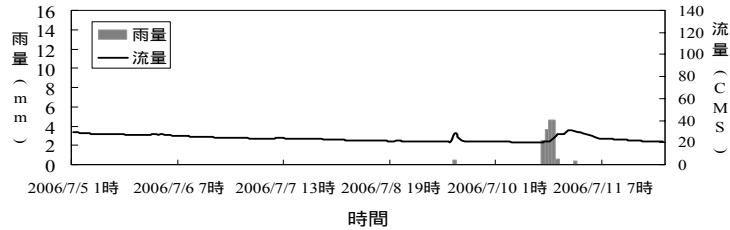


圖 10 碧利斯颱風臨前雨量 and 前期流量分布圖

Fig. 10. Antecedent precipitation and antecedent discharge for Bilis typhoon.

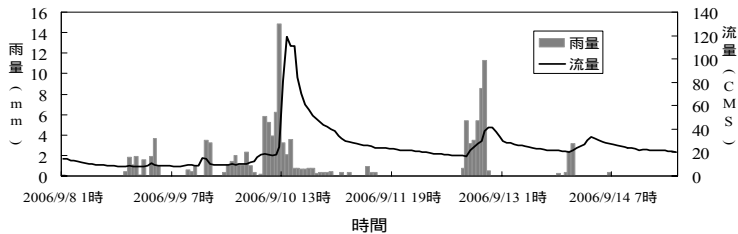


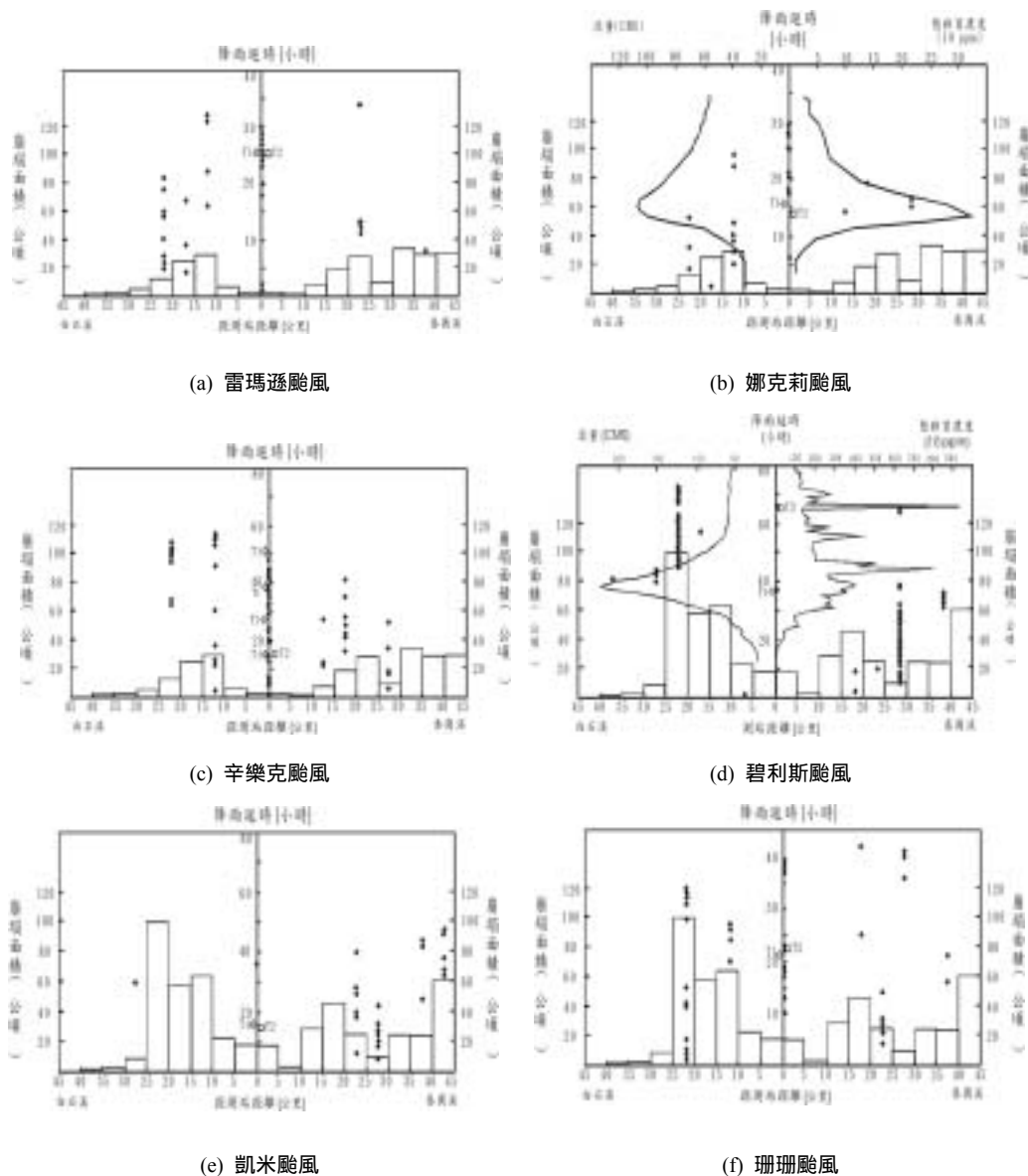
圖 11 珊珊颱風臨前雨量 and 前期流量分布圖

Fig. 11. Antecedent precipitation and antecedent discharge for Shanshan typhoon.

2. 暴雨中心對應的崩場地大小對輸砂的供應

裸露的崩場地及其崩積物極易受到雨水沖蝕，是河流懸移質的重要供應源。大致而言，源自崩場地的輸砂到達採樣點的時間與兩者間的距離成正比，而自崩場地沖刷下來的輸砂量則與崩場地面積及降雨強度呈正相關性，因此進一步分析距離採樣點不同遠近的崩場地面積與暴雨中心的出現頻率與時序對懸移質濃度的影響。分析時以玉峰採樣點為原點，向左右分白石溪與泰崗溪兩集水區加以統計（圖 12），圖中橫軸以玉峰測站位置為原點，兩側分別為白石溪與泰崗溪集水區中的各次小區距測站的距離；中央縱軸為降雨延時；兩邊的縱軸則為各區崩場地的總面積；其中，距離測站 0-5km 的區間屬玉峰溪，為便於繪製乃將此區的崩場地面積重覆畫在原點兩側兩個流域中，圖中的點標示各時段的暴雨中心所在位置，在不考慮遞移率等因子下，其暴雨中心所在位置所對應的崩場地面積越高，表示可能產生越高的輸砂量。

圖 12b 和圖 12d 顯示，娜克莉和碧利斯颱風的暴雨中心出現在崩場地面積集中區的時間與懸移質濃度變大的時間頗為相符；娜克莉颱風前段暴雨中心在崩場地較多的白石溪流域，後期轉至崩場地面積較小的玉峰測站附近，降雨前期來自崩場邊坡系統的淤砂供應比例提高，再加上河道中既有的細粒淤砂供應，使懸移質濃度提高，之後暴雨中心移往崩場地較少的玉峰地區，使得來自崩場的供應量減少，河道本身的細粒淤砂又已被前段洪水帶走，因此懸移質濃度降低。而碧利斯颱風降雨前段的暴雨中心集中在距測站 25-30km 的泰崗溪處，雨量約降下 105mm，接著轉至白石溪中游 20-25km 處，約降下 75mm，前者所對應的崩場地面積小於後者，結果使該颱風後期特定流量的懸移質濃度高於上升翼。



☐ : 崩塌地面積 : 降雨中心 T1 : 洪峰時間 T2 : 懸移質濃度最高峰

—— : 圖 (b)、(d) 的左半圖為流量歷線, 右半圖為懸移質濃度歷線

說明: 從娜克莉颱風和碧利斯颱風(圖 b、d) 中的流量和濃度歷線對照降雨中心移動趨勢, 最為相符。此外, 珊珊颱風的懸移質濃度高峰 (T2) 僅為下降翼時的最高峰, 非整場事件。辛樂克颱風為多峰流量, 洪峰 (T1) 共發生 4 次。

圖 12 各颱風暴雨中心和對應之崩塌地面積圖

Fig. 12. The location of rainfall center in the progress of individual typhoon events and the area of landslides in respective location.

雷馬遜颱風前段雨量集中在白石河流域 10-25km (距測站) 處，後期則集中在玉峰測站附近，由於該場颱風降雨強度較高，即使暴雨中心後期集中在下游的玉峰測站附近，但集水區上游每小時平均雨量仍達 12-30mm，因此仍帶動崩塌地的輸砂往下游移動，而提高懸移質濃度。至於辛樂克颱風整場事件的暴雨中心，則主要位在玉峰測站附近，所對應的崩塌面積小，後期暴雨中心雖移至白石溪，但因雨勢小，而無法提高輸砂搬運量。

2006 年的颱風中，和碧利斯颱風降雨規模相當的珊珊颱風，其雨峰期間的暴雨中心 (延時第 13 至 26 小時) 集中在崩塌地面積最小的玉峰測站附近，應該也是造成珊珊颱風懸移質濃度較低的原因。凱米颱風降雨則集中在泰崗河流域，前段在中游地區，後期往上游移動，但降雨規模最小，無法有效提高來自崩塌地的輸砂搬運量，淤砂來源以河道為主，因此在沒有持續的淤砂供應下，下降翼即呈耗盡現象。

綜上所論，雨峰時段的暴雨中心如發生在崩塌地集中的區域，易提高輸砂濃度。不過，如果降雨強度過低，則即使暴雨中心位置發生在崩塌地相對較多的地區，也不易提高輸砂濃度。

(四) 2002 與 2006 年颱風懸移質濃度的變化趨勢

整合 2002 和 2006 年颱風事件流量和懸移質濃度資料，得出兩年的率定曲線 (表 5、圖 13)。結果顯示，經式 1 校正後，當流量在 50 CMS 到 300 CMS 之間，2006 年颱風事件的懸移質濃度較 2002 年增加 13.1-15.6 倍。檢視利用水利署於 2002 和 2006 年於玉峰測站測得之懸移質濃度值 (經濟部水利署, 2006)，所分別求算的率定曲線，兩年濃度差距則在 11.4-20.6 倍之間，與本研究結果相當，據此推論本研究的經校正後的濃度應屬合理 (表 6)。

表 5 2002 和 2006 年懸移質濃度和流量之率定曲線表

Table 5. The rating curves between S.S.C. and discharge in 2002 and 2006.

分類	率定曲線 $C=aQ^b$	R^2	樣本數 (個)
2002年上升翼	$C=0.97Q^{1.1273}$	0.62**	26
2002年下降翼	$C=0.16Q^{1.4001}$	0.89**	36
2002年全部資料	$C=0.49Q^{1.2159}$	0.70**	62
2002年 (排除雷馬遜)	$C=0.19Q^{1.3675}$	0.51**	38
2006年上升翼	$C=1.57Q^{1.5386}$	0.75**	41
2006年下降翼	$C=34.57Q^{0.8845}$	0.66**	91
2006年全部資料	$C=11.11Q^{1.1204}$	0.65**	132

* 顯著水準<0.05 ** 顯著水準<0.01

由於雷馬遜颱風的流量規模高出其他 6 場颱風事件甚多，可能對邊坡和河床造成比較明顯的侵蝕，因此另將其除外，以另外兩場颱風資料求算 2002 年的流量與濃度率定曲線 (圖 13)，結果同樣的流量得到更低的濃度值，並使兩個年份的濃度值差距變大，達 14.3-22.2 倍。

另外將兩年份的懸移質濃度資料分成上升翼和下降翼進行分析 (表 5、圖 14)，以 $C=aQ^b$ 關係式表示， b 越大表示懸移質濃度隨流量的增加速率越快。以 2002 年來看，上升翼 ($b=1.1273$) 增加速率較

下降翼 ($b=1.4001$) 的減少速率慢；2006 年則相反，上升翼 ($b=1.5386$) 增加速率較下降翼 ($b=0.8845$) 減少速率快。另外，2006 年上升翼濃度增加的速率比 2002 年快，顯示集水區輸砂供應充足，並可快速進入河道。而 2002 年下降翼的濃度降低速率比 2006 年快，顯示前者輸砂耗盡的情況較為嚴重。此外，檢視同年上升翼懸移質濃度與下降翼濃度的比值，發現在低流量時，2002 年的濃度比值隨著流量降低而增大，但 2006 年的濃度比值卻隨著流量的下降而降低 (表 7)，顯示 2002 年在各颱風末期，隨著時間拉長，懸移質濃度耗盡情形越明顯；而 2006 年水文歷線下降翼的懸移質濃度反而比上升翼的濃度高，顯示輸砂供應仍然充足，即使流量已經下降仍然無法在短時間恢復到洪水前的低濃度，此項結果應與集水區在 2002 到 2006 年間崩塌地大量增加密切相關。

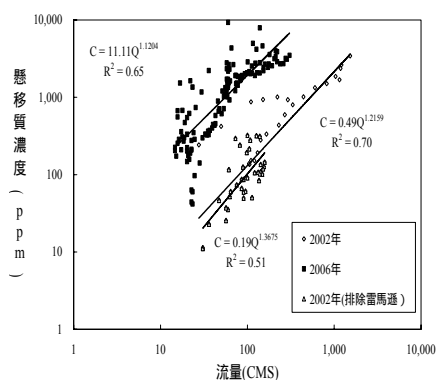


圖 13 2002 年和 2006 年懸移質濃度資料之率定曲線

Fig. 13. Rating relationship between S.S.C. and discharge for 2002 and 2006.

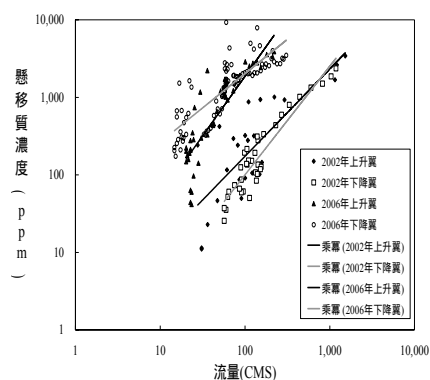


圖 14 2002 和 2006 年流量和懸移質濃度散佈圖 (以上升翼和下降翼作區分)

Fig. 14. The scatter plot of S.S.C. and discharge for 2002 and 2006 (Distinguished by rising limbs and falling limbs).

表 6 2002 和 2006 年經率定曲線得出相同流量下懸移質濃度值比較表

Table 6. Comparisons among S.S.C. derived from various rating curves.

流量 (CMS)	濃度值 (ppm)						
	水利署			邱昱嘉 (2003)	本研究 採樣	經式 (1) 校正值	
	2002 年 (a)	2006 年 (b)	相差倍數 b/a	2002 年 (c)	2006 年 (d)	2006 年 (e)	相差倍數 e/c
50	68	1,404	20.6	57	1,431	890	15.6
100	157	2,573	16.4	132	3,781	1,934	14.7
150	256	3,667	14.3	217	6,673	3,047	14.0
300	591	6,722	11.4	504	17,624	6,623	13.1

表 7 2002 和 2006 年上升翼和下降翼濃度比較表

Table 7. Comparisons of the S.S.C. at the rising limbs and falling limbs of typhoons in 2002 and 2006.

流量 (CMS)	2002 年懸移質濃度 (ppm)			2006 年懸移質濃度 (ppm)		
	上升翼	下降翼	相差倍數	上升翼	下降翼	相差倍數
	(Cr)	(Cf)	(Cr/Cf)	(Cr)	(Cf)	(Cr/Cf)
50	78	38	2.0	646	1,100	0.6
100	168	101	1.7	1,875	2,031	0.9
150	265	179	1.5	3,500	2,907	1.2
200	366	268	1.4	5,448	3,749	1.5

結 論

透過分析 2002 至 2006 年玉峰集水區崩塌地的變遷、各場颱風流量與懸移質濃度的關係和原因分析，發現 2002 和 2006 年的河流懸移質濃度的變化與崩塌地的時空變動關係密切。

艾利和馬莎颱風於玉峰集水區境內誘發了大量的崩塌地，總崩塌面積增為颱風前的 2 倍，其中大多數發生在河道旁，成為往後暴雨時的主要輸砂來源。不但使得 2006 年懸移質濃度比 2002 年相同流量下的濃度高，也造成各場颱風水文歷線上升翼和下降翼的懸移質濃度變化的明顯差異；2006 年懸移質濃度在上升翼的上升速率較 2002 年高；下降翼濃度的下降速率則較 2002 年緩慢，顯示集水區輸砂供應源確實大幅提高。

單就同一年颱風的流量和懸移質濃度關係，受到發生時間、臨前降雨、降雨型態等因素的交互影響。雷馬遜颱風和碧利斯颱風皆發生在颱風季節初期，臨前降雨指數低，集水區懸移質供應較不虞匱乏，下降翼濃度耗盡的情形較不明顯。娜克莉颱風和凱米颱風發生前 10 天內皆曾有其他颱風，其流量與懸移質濃度關係呈現順時針遲滯效應。辛樂克颱風則因多峰的雨量和流量型態，颱風末期呈現懸移質耗盡的現象，愈到颱風季節末期懸移質濃度降低的情形也較明顯。此外，雨峰時段的暴雨中心如出現在崩塌地集中的區域，可有效提高輸砂濃度，且其濃度的升降與暴雨中心落在崩塌地集中區的時間先後密切相關。

謝 辭

衷心感謝邱昱嘉學長提供相關資料和採樣意見，姜壽浩學長對本文分析方法之建議及協助採樣，石門水庫管理中心丘應杰先生提供玉峰測站水文資料，並感謝李科旻、王誠緯、陳彥樺、楊嵐雅、朱怡樺、許立志同學協助野外採樣和繪圖，以及兩位審查委員對本文所提的寶貴意見和指正。

引用文獻

- 工業技術研究院能源與資源研究所 (1998) 石門水庫集水區崩塌地及土地利用航測調查計畫整體報告書, 臺北: 臺灣省北區水資源局。
- 李錫堤 (2005) 石門水庫集水區空中勘查, 地質, 24 (4): 33-36。
- 吳東雄、劉家盛 (2005) 艾莉颱風對石門水庫集水區崩塌及濁度變化之影響, 水利, 15: 36-42。
- 邱昱嘉 (2003) 應用 HSPF 模式與鈹 137 技術於集水區產砂量推估之研究, 國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 林孟龍、林俊全 (2003) 颱風對於蘭陽溪上游集水區懸移質生產特性的影響, 地理學報, 33: 39-53。
- 張石角 (1973) 曾文水庫集水區細粒淤砂生產過程的研究, 中華農學會報, 84: 53-69。
- 張志昌 (2006) 整合氣象雷達與即時降雨資料於颱風降雨推估之研究, 國立臺灣大學地理環境資源研究所碩士論文。
- 經濟部水利署 (2004) 臺灣地區河川流量資料庫水文分析, <http://water.hre.ntou.edu.tw/~river/cgi-bin/query.pl> [2006.1.5]。
- 經濟部水利署 (2006) 水文年報, http://gweb.wra.gov.tw/wrhygis/?pge_no=182 [2005.10.12]。
- 經濟部水利署北區水資源局 (2007), 石門水庫水情資訊, http://www.wranb.gov.tw/wranb_spring/content/index.asp? [2006.11.1]。
- 陳翰霖、張瑞津 (2003) 曾文水庫對流量和輸沙量的影響, 師大地理研究報告, 39: 37-53。
- 黃朝恩 (1982) 臺灣河川輸沙特性及其地形意義, 師大學報, 27: 649-679。
- 湯曉虞 (2007) 石門水庫集水區保育治理, 工程環境會刊, 18: 127-139。
- 趙倬群 (2004) 石門水庫集水區崩塌土砂產量推估之研究, 國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 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研究所碩士論文。
- 蔡宗賢 (2005) 水庫集水區暴雨時期崩塌土砂量推估之研究, 國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 鍾朝恭、劉家盛 (2005) 石門水庫的原水濁度為何飆高? 從艾利颱風談起, 地質, 24 (4): 16-22。
- Asselman, N. E. M. (1999) Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine, *Hydrological Process*, 13: 1437-1450.
- Burt, T. P., Donohoe, M. A. and Vann, A. R. (1983) The effect of forestry drainage operations on upland sediment yields: the results of a storm-based study, *Earth Surface Processes and Landforms*, 8: 339-346.
- Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W. B., Hsieh, M. L., Willett, S. D., Ching, H. J., Horng, M. J., Chen, M. C., Stark, C. P., Lague, D. and Lin, J. C. (2003) Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen, *Nature*, 426: 648-651.
- Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W. B., Lin, J. C., Hsu, M. L., Lin, C. W., Horng, M. J., Chen, C. T., Milliman, J. and Stark, C. P. (2004) Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt, *Geology*, 32: 733-736.
- Edwards, T. K. and Glysson, G. D. (1970) Field methods for measurement of fluvial sediment, *Techniques of*

- Water-Resources Investigations*, Book 3, Washington, D.C.: United States Geological Survey.
- Gregory, K. L. and Walling, D. E. (1973) *Drainage Basin Form and Process: A Geomorphological Approach*, London: Edward Arnold Ltd.
- Hovius, N., Stark, C. P., Chu, H. T. and Lin, J. C. (2000) Supply and removal of sediment in a landslide dominated mountain belt: Central Range, Taiwan, *Journal of Geology*, 108: 73-89.
- James, C. S. (1985) Sediment transfer to overbank sections, *Journal of Hydraulic Research*, 23: 435-452.
- Jeje, L. K., Ogunkoya, O. O. and Oluwatimilehin, J. M. (1991) Variation in suspended sediment concentration during storm discharges in three small streams in upper osun basin, central western Nigeria in three small streams in upper osun basin, central western Nigeria, *Hydrological Processes*, 5 (4) : 361-369.
- Lenzi, M. A. and Marchi, L. (2000) Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites-northeastern Italy, *Catena*, 39: 267-282.
- Lootens, M. and Lumbu, S. (1986) Suspended sediment production in a suburban tropical basin (Lubumbashi, Zaire), *Hydrological Sciences Journal*, 31 (1): 39-49.
- Walling, D. E. (1977) Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin, *Water Resources Research*, 13 (3): 531-538.
- Walling, D. E. and Teed, A. (1971) A simple pumping sampler for research into suspended sediment transport in small catchments, *Journal of Hydrology*, 13 (4): 325-337.
- Walling, D. E. and Webb, B. W. (1982) Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields. In: Walling, D. E. (ed.) *Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield*, England: IAHS Publication, 327-337.
- Walling, D. E. and Webb, B. W. (1987) Suspended load in gravel bed rivers: UK experience. In: Thorne, C. R., Bathurst, J. C. and Hay, R. D. (eds.) *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, New York: John Wiley and Sons, 691-732.
- Williams, G. P. (1989) Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers, *Journal of Hydrology*, 111 (1-4): 89-106.
- Wood, P. A. (1977) Controls of variation in suspended sediment concentration in the river Rother, West Sussex, England, *Sedimentology*, 24 (3): 437-445.

2007年4月11日 收稿

2007年5月21日 修正

2007年7月10日 接受