

霧社水庫集水區土砂生產量與其自然環境 和土地利用之關係

Sediment Yield in the Wushed Reservoir Watershed and its Relations to Environmental and Land-use Factors

國立彰化師範大學地理學系
碩士

曾麗綺

Li-Chi Tseng

國立彰化師範大學地理學系
助理教授

陳毅青*

Yi-Chin Chen

摘 要

霧社水庫位於濁水溪上游，集水區大量崩塌和土石沖刷，造成水庫嚴重淤積。對於霧社水庫的淤積情形，社會大眾紛紛將矛頭指向濁水溪上游支流的崩塌以及清境農場、廬山溫泉的人為開發，但目前尚無研究針對霧社水庫集水區的土砂來源進行完整的量化分析。本研究量化霧社水庫集水區土砂量來源，崩塌土砂量是利用林務局提供的 2002-2014 年山崩目錄，配合面積-體積經驗公式進行估算，土壤沖蝕量則是以通用土壤流失公式估算。研究結果顯示霧社水庫集水區年平均土砂量為 507 萬公噸，其中，崩塌土砂量約佔 288 萬公噸，年平均土壤沖蝕量約佔 219 萬公噸，兩者比例約為六比四。在 2008 年以前，集水區土砂量和水庫淤積量相近，說明邊坡和水庫的泥砂系統的連結度良好；在 2008 年之後，強降雨帶來大量土砂堆積在邊坡和河道上，並未完全進入水庫庫區。進一步分析土砂和自然與土地利用關係示，集水區的崩塌土砂主要受到地質構造影響，與人為開發關係不顯著；土壤沖蝕則受到道路與農地開發的影響。整體來說，地質構造因素造成的崩塌為集水區主要土砂來源，人為開發主導土壤沖蝕的貢獻雖然較少，但仍然不應忽視，可藉由水土保持與植被復育等措施著手，減少農地與裸露地土砂之沖刷。

關鍵詞：霧社水庫，坡單元，崩塌，土壤沖蝕，土地利用。

ABSTRACT

Wushed Reservoir, located in the upstream of the Chuoshui River, has serve problem

*通訊作者，國立彰化師範大學地理學系助理教授，50007 彰化市進德路 1 號，yichinchen@cc.ncue.edu.tw

of sedimentation due to large amount of sediment eroded from landsliding and soil erosion in the watershed. The public think that the sediment is mainly from the landslides in the upstream of the Chuoshui River and the over-cultivation in the Chingjing Farm and Lushan warm spring. However, there are no sufficient scientific and quantitative evidences to clarify these debates. This study adopted quantitative approach to estimate the sediment yield in the Wushed Reservoir watershed in 2002-2014. Landslide erosion is estimated by using landslide inventory and a volume-area scaling relationship. Soil erosion is calculated by using the Universal Soil Loss Equation (USLE). The results show that the averaged sediment yield rate is 5.07 Mt yr^{-1} (million tons annually), which landslide and soil erosion contributed 2.88 Mt yr^{-1} and 2.19 Mt yr^{-1} , respectively. Before 2008, the sediment yield from watershed is generally consistent with that of reservoir sedimentation, indicating a well connectivity between hillslope and reservoir. After 2008, large amount of sediment triggered by intensive rainfall were trapped in hillslopes and river and did not transport into the reservoir. Moreover, the analyst of the relations between sediment yield and the effects of environmental and land-use suggested that the landslide is controlled by geological structure, instead of land-use; soil erosion is accelerated by road construction and cultivation. In summary, the geological-controlled landslide contributes the major part of total sediment yield. The contribution from soil erosion is relatively minor, but is considerable. This study suggested that the authorities should adopt soil watershed conservation and recovery of forest cover to reduce the surface erosion on the farm and bared hillslopes.

Keywords: Wushed reservoir, Sediment yield, Landslide, Soil erosion, Land-use.

一、前言

2013 年齊柏林導演所執導的紀錄片——看見台灣，以空拍方式呈現台灣環境現狀，飛越霧社水庫拍下了嚴重淤積的湖面，不再是過去擁有翠綠湖水的碧湖，也藉由這一部紀錄片喚起各界正視水庫的淤砂問題。對於霧社水庫的淤積情形，社會大眾紛紛將矛頭指向濁水溪上游支流塔羅灣溪的崩塌，以及清境、廬山地區的民宿、旅館的興建和高山農業的開發對山區土地超限利用所導致的土壤沖蝕，引起政府與社會大眾關注與爭議。

霧社水庫集水區即是台灣水庫淤積的典型實例，台灣位在歐亞大陸板塊與菲律賓海洋板塊接觸帶上，地形高聳，高山地形多於平原地形，且屬環太平洋地震帶之一環，板塊運動活躍，地

震發生頻仍，造就脆弱敏感之地質環境。再者，台灣地處亞熱帶氣候區，平均年降水量高達 2,500 毫米，受季風、颱風影響，降雨集中於夏、秋兩季，常帶來高強度降雨，導致邊坡產生大量的崩塌與土石流(陳毅青，2012)。除了自然環境因素之外，人為因素也會增加地表侵蝕速率，霧社水庫集水區海拔高度差異大，氣候條件適合栽種茶葉、溫帶水果與高冷蔬菜等高價作物，加上山區優美的風景與森林資源，近年來國人逐漸重視休閒遊憩，觀光遊憩產業開始蓬勃發展，民宿、旅館開始大量興建(陳文福、莊栢椿，2009；林偉誠，2012)，因此山區過度開墾與集水區土地開發，加速土壤沖蝕速率(邱昱嘉，2008；楊宜嫻，2015)。綜上，崩塌、土石流與土壤沖蝕的泥砂不僅造成河道淤塞，亦造成水庫淤砂逐年增加，影響水庫蓄水功能與縮短其使用年限。霧社水庫集水區同

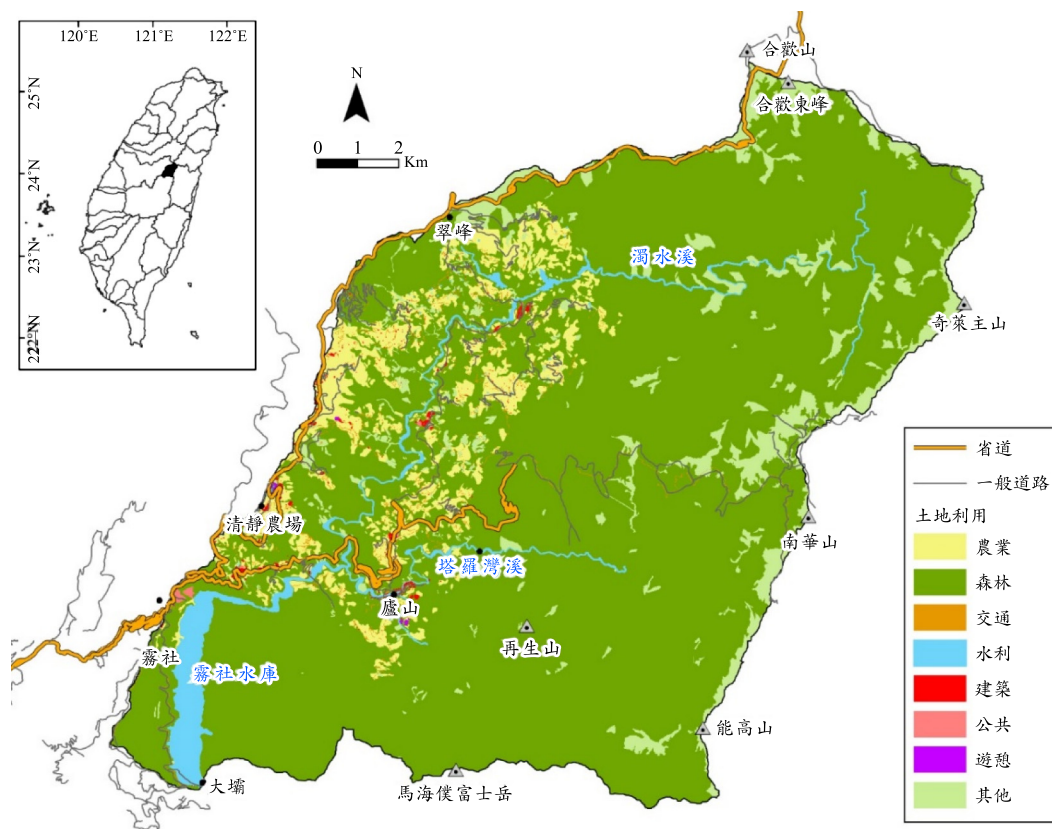


圖 1 霧社水庫集水區地理位置與土地利用

時具備大量人為開發和自然地理環境，分析集水區土砂生產來源與分布，有助於釐清自然和人文因素對於集水區泥砂生產貢獻，為台灣水庫永續經營管理之重要課題。

本研究量化霧社水庫集水區之崩塌與土壤沖蝕量之分布，比較集水區土砂生產量與水庫淤積量之間的關係，以釐清水庫泥砂來源，並分別探討自然環境因素及人為開發對泥砂生產的關係，釐清霧社水庫淤砂與地文、人文因子之關係，期望能提供相關單位作為參考，往後在處理霧社水庫淤砂時能從問題之根源著手，針對集水區治理提出有效的解決方案，以改善或緩解水庫淤積之狀況。

二、霧社水庫集水區

霧社水庫集水區的行政區屬於南投縣仁愛

鄉，並位於中央山脈西麓，山脈呈北東—南南西走向，地形起伏大，地勢由東北向西南低降，海拔高度介於 956 公尺(霧社水庫出水口)至 3,560 公尺(奇萊主山)，匯合濁水溪上游、支流塔羅灣溪與馬海僕溪之水流，集水區面積 219 平方公里(圖 1)。

集水區主要土地利用為森林地(圖 1)，佔集水區總面積的 82.2%，特別分布在集水區中部與東側的無人干擾的山區；其次為農業的 7.3%，主要分布在集水區西側的山坡上，如清境農場、廬山、翠峰等地區；其它土地利用類型佔 7.2%，包含草地或高山箭竹草坡，主要分布於集水區東側的高海拔地區；道路與建築用地則分別只佔 0.8%和 0.3%，主要集中在西側的清境農場附近與河谷低地。

自然環境方面，集水區的平均年雨量約為

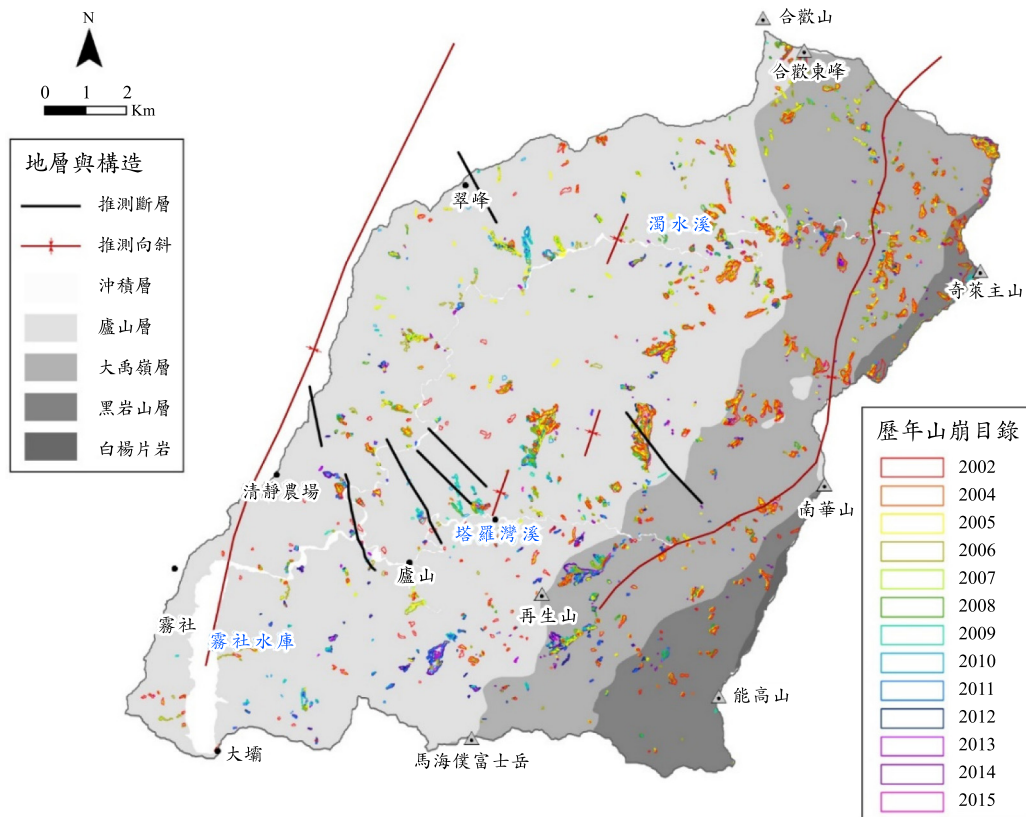


圖 2 霧社水庫集水區地質構造與歷年崩塌位置

2,800 mm，降雨多集中於五到九月間，佔全年總降雨量的 70%，屬乾濕季分明的氣候型態，降雨時間分布不均，使河川流量洪枯流量懸殊。地質組成由西向東排列有廬山層、大禹嶺層、黑岩山層與白楊片岩層，以及河谷的沖積層(圖 2)，岩性主要由變質砂岩、板岩、千枚岩與硬砂岩互層組成，其中以中新世廬山層(輕度變質之第三紀亞變質岩)範圍最廣，岩性由厚層板岩組成，劈理發達，易沿著劈理扭曲、破碎。集水區內亦發育許多褶皺構造，大致呈南北走向；並有多條推測斷層分布，多呈西北—東南走向，岩層傾向多為南偏東 60°到 90°之間。

三、研究方法

3.1 崩塌土砂量估算

為了估算集水區之崩塌土砂量，本研究從政

府資料開放平台取得 2002 年至 2015 年的山崩目錄(無 2003 年資料)。此山崩目錄係由林務局委託成功大學劉正千教授，以當年度 1 至 7 月全島鑲嵌福衛二號衛星影像(多頻譜影像解析度 8 公尺，全色態影像解析度 2 公尺)，若有無法取得或無衛星影像資料的區域，再以 SPOT5-HRG 衛星影像替代，由衛星影像產生常態化差值植生指標(NDVI)和綠度植被指數(GVI)，再以半自動判釋崩塌地作業標準，繪製崩塌地判釋最小面積為 0.1 公頃，最後套疊土地利用與地形圖，剔除農地、道路與河床等誤判(Liu *et al.*, 2011)，歷年崩塌的空間分布如圖 2 所示。

由於山崩目錄僅提供崩塌面積的資訊，而缺乏崩塌深度或體積的資訊，許多研究建立崩塌體積與崩塌形貌或地形之間的關係式，如坡度(Khazai and Sitar, 2000)、崩塌長軸的長度(Hovius

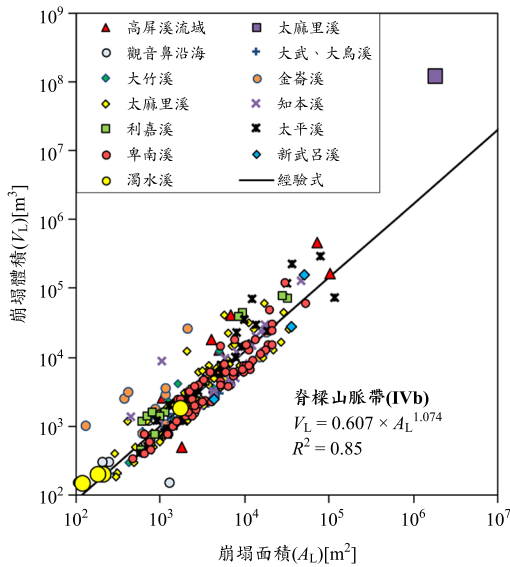


圖 3 脊樑山脈帶之崩塌體積與面積公式

et al., 1997)、崩塌面積(Guzzetti *et al.*, 2009)或土壤厚度(鍾欣翰, 2008)等, 用以推估崩塌體積。其中, 崩塌面積-體積的關係式主要是基於崩塌自我相似(self-similar)的假設, 已被國內外許多學者採用(如 Guzzetti *et al.*, 2009; 陳樹群等, 2010; Parker *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2013)。因此, 本研究採用崩塌面積-體積關係式推估崩塌土砂量, 關係式則依據沈哲緯等(2016)建立台灣各地質區的體積-面積經驗公式, 本研究區所在的脊樑山脈帶的經驗公式如公式(1)和圖 3 所示:

$$V_L = 0.607 \times A_L^{1.074} \quad \dots\dots\dots(1)$$

其中, V_L 為崩塌體積(立方公尺); A_L 為崩塌投影面積(平方公尺)。為進一步確認此經驗公式在霧社水庫集水區的適用性, 參考國立臺灣大學所執行的「濁水溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫」(經濟部水利署, 2013)所測量的四處崩塌地的體積進行驗證(如圖 3 中黃色圓圈), 顯示經驗公式推估量與觀測量相當吻合。此外, 此經驗公式樣本的崩塌面積主要介於 5×10^2 至 2×10^5 平方公尺, 與霧社水庫集水區最大崩塌面積為 3.3×10^5 平方公尺, 接近最大崩塌樣本較多的範

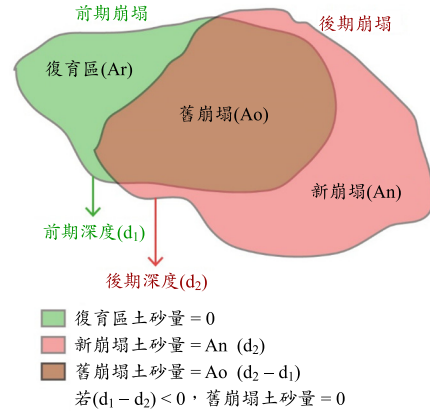


圖 4 崩塌土砂量計算概念圖

圍, 表示此公式適用於推估霧社水庫集水區之崩塌體積。

將歷年山崩目錄的崩塌帶入體積-面積經驗公式, 求得各個崩塌的體積, 將體積除以面積變得到崩塌平均深度, 並假設崩塌土砂平均分布在崩塌面上。在計算各年度間的崩塌土砂量(圖 4), 將後期與前期崩塌深度相減, 若後期深度為零或後期深度小於前期深度, 代表崩塌有復育之情形, 則該年度間的崩塌深度為零; 若後期深度大於零, 代表崩塌有持續擴大之情形, 即可得新崩塌深度。分別統計各年度間每個坡單元內崩塌體積總量, 並將崩塌體積加總後取其平均值(單位為立方公尺)。將各個坡單元的崩塌總量平均值乘以岩石與土壤總體密度 2.32 公噸/立方公尺(Tsai *et al.*, 2012)求得崩塌的質量(單位為公噸)。

3.2 土壤沖蝕量估算

土壤沖蝕採用通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE), 其公式如下:

$$A_m = R_m \cdot K_m \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \dots\dots\dots(2)$$

其中 A_m 為每公頃之年平均土壤流失量(公噸/公頃-年)、 R_m 為年平均降雨沖蝕指數(10^6 焦耳-毫米/公頃-小時-年)、 K_m 為土壤沖蝕性指數(公噸-公頃-小時-年/ 10^6 焦耳-毫米/公頃-小時-年)、 L 為坡長因子、 S 為坡度因子、 C 為植生覆蓋因子以及 P 為

水土保持因子或侵蝕管理因子。各因子計算方法說明如下：

(1) 降雨沖蝕指數(R_m)

Wischmeier and Smith (1958)的研究發現降雨事件造成的土壤流失量與降雨總動能和最大 30 分鐘降雨強度(I_{30})具有高度相關性。單場事件之降雨沖蝕指數表示為：

$$R_{30} = I_{30} \times \sum_{i=1}^n (E_i \times I_i) \quad \dots\dots\dots (3)$$

其中， I_i 為第 i 小時的時雨量(mm/h)； E_i 為第 i 小時的單位降雨量之動能(MJ/mm-ha)，降雨動能計算式為：

$$\begin{aligned} E_i &= 0.119 + 0.0873 \cdot \log_{10} I_i & I_i \leq 76 \text{ mm/h} \\ E_i &= 0.283 & I_i > 76 \text{ mm/h} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

由於 30 分鐘雨量資料較難以取得，本研究採用楊斯堯等(2010)所提出的擬似降雨沖蝕指數，利用最大時雨量代替最大 30 分鐘雨量計算，得到擬似降雨沖蝕指數，再將擬似降雨沖蝕指數乘以 1.52 倍，得到單場事件之降雨沖蝕指數。

計算長期降雨沖蝕指數時，則須先界定有效雨場，本研究雨場分割標準係設定時雨量達 4 mm 為有效降雨時間開始，而連續 6 小時的時雨量低於 4 mm 時作為雨場的結束點(詹錢登，2001)。本研究採用 2002 年至 2014 年間，中央氣象局設置的翠峰、廬山、萬大、瑞岩、仁愛，以及水利署設置的翠峰雨量站的時雨量資料，進行雨場切割。再將各場降雨事件的時雨量資料帶入方程式(2)和(3)，計算各雨量站每場降雨事件之降雨沖蝕指數並予以加總得到各測站之擬似年降雨沖蝕指數，並以空間內插求得擬似降雨沖蝕指數之空間分布。

(2) 土壤沖蝕性指數(K_m)

土壤沖蝕性指數的計算主要根據水土保持手冊之建議值，因霧社水庫集水區並無樣點，故參考鄰近的樣點。其中，虎頭山位於研究區的西南側，屬於陡峭之邊坡，推測其土壤材料與研究

區相近。故選定虎頭山之 K_m 值設定為 0.0329。

(3) 坡長因子(L)

坡長因子反應地表漫地流加速土壤沖蝕的程度，坡長因子計算公式如下：

$$L = \left(\frac{X}{22.13} \right)^m \quad \dots\dots\dots (5)$$

其中， X 為坡長之水平距離(m)，為地表漫地流流動的距離； m 為修正係數，當坡度大於 5%， m 為 0.5。本研究採用 Lin *et al.* (2002)和林俐玲(2010a)之建議坡長之水平距離，首先，利用數值高程模型計算每個網格的八方位流向(圖 5a)，根據流向計算每個網格累積流長(flow length)，得到每個網格的坡長水平距離。再者，設定坡長以不超過 120 公尺為原則(林俐玲，2010a)，將坡長大於 120 公尺網格視為渠道流，不屬於土壤沖蝕考慮的範圍，而坡長小於或等於 120 公尺，則為漫地流發生的區域，會造成土壤沖蝕。最後，將帶入累積流長公式(5)計算網格坡長因子，再統計各個坡單元的平均坡長因子(林俐玲等人，2011)。

(4) 坡度因子(S)

由於本研究區為陡坡地形，坡度因子若採用 Wischmeier and Smith (1978)建議的公式則會有明顯高估現象(范正成，1995；陳樹群，2009)。故採用 McCool *et al.* (1987)所建議較適用於陡坡地形之坡度因子計算式，代入地形坡度(θ)求得，其公式如下：

$$\begin{aligned} S &= 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 9\% \\ S &= (\sin \theta / 0.0896)^{0.6} & \theta \geq 9\% \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(5) 覆蓋因子(C)

依據水土保持手冊的建議值，就本研究區內之土地利用—農業(旱作、果樹)、遊憩(休閒設施、遊樂場所)、建築(住宅、商業、倉儲)、道路、森林及裸露地等分別給定 C 值，與坡單元套疊後取其平均值。

(6) 水土保持因子(P)

根據土地利用圖確認研究區內無大型水土保持處理場、棄土場或路砂及農場砂石開採處，將 P 值設定為 1.0。

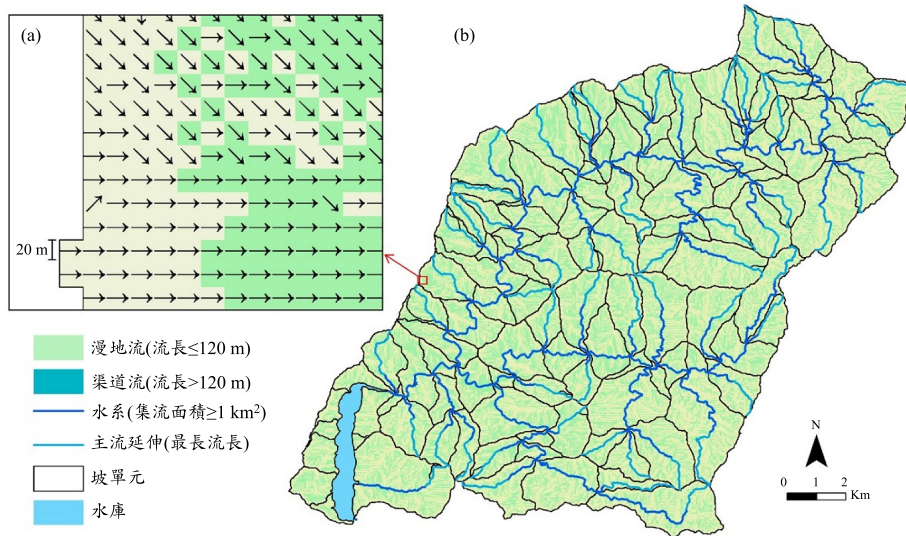


圖 5 主流延伸法產生坡單元圖之示意圖

3.3 坡單元

為了統計集水區崩塌和土壤沖蝕的空間分布，本研究利用內政部 20 公尺數值高程模型為基礎，利用 ArcGIS 的 Hydrology 模組，產製淹蓄填補(Fill)、流向(Flow Direction)、集流面積(Flow Accumulation)和集水區(Watershed)，並設定 1 平方公里為集水區閾值，產生集水區單元(watershed unit)，並利用主流延伸法搜尋最長的水流路徑，切割集水區單元以產生坡單元(圖 5b)，因主流延伸法可獲得較均質的坡單元(Wang *et al.*, 2017)，再透過人工編修剔除不合理或過小的單元，完成 218 個坡單元。

3.4 自然環境和土地利用因子

為探討土砂生產量與自然環境和土地利用之關係，自然環境因子使用高程、坡度、坡向、岩層因子；高程、坡度、坡向由內政部 20 公尺數值高程模型計算獲得，統計各個坡單元的平均值；岩層資料來自於中央地質調查所五萬分之一地質圖。土地利用則根據土地利用資料中的農地和道路類型，統計各個坡單元中的道路密度和農地密度，道路密度表示單位面積內道路的總長度，為個別坡單元內的總道路長度(公尺)/該坡單

元的面積(平方公尺)，農業密度呈現單位面積內的農地面積的比例，為個別坡單元內農地面積(平方公尺)/該坡單元面積(平方公尺)。

將上述因子套疊坡單元或地質單元統計各個坡單元內的單位面積土砂生產量，為總土砂量(公噸)/單元面積(公頃)。相關性分析使用採用斯皮爾曼等級相關係數(Spearman rank correlation coefficient)進行雙尾檢定，分析各項自然和人文因子與土砂生產量之相關性，以及是否達到顯著水準，藉此量化分析結果釐清土砂生產量的影響主因。

四、結果與討論

4.1 泥砂生產量與水庫淤積量

各年度崩塌土砂和土壤沖蝕量詳如表 1。歷年的崩塌土砂量介於 59~623 萬公噸，年平均崩塌土砂量為 288 萬公噸。土壤沖蝕量介於 79~659 萬公噸，年平均土壤沖蝕量為每年 219 萬公噸。總土砂量則介於 182~1,182 萬公噸，年平均土砂量為 507 公噸，崩塌和土壤沖蝕貢獻的土砂量約為 6:4，說明崩塌仍為集水區主要泥砂來源，但土壤沖蝕的貢獻仍無法小覷。

歷年土砂量變異相當大，土砂生產量最大與

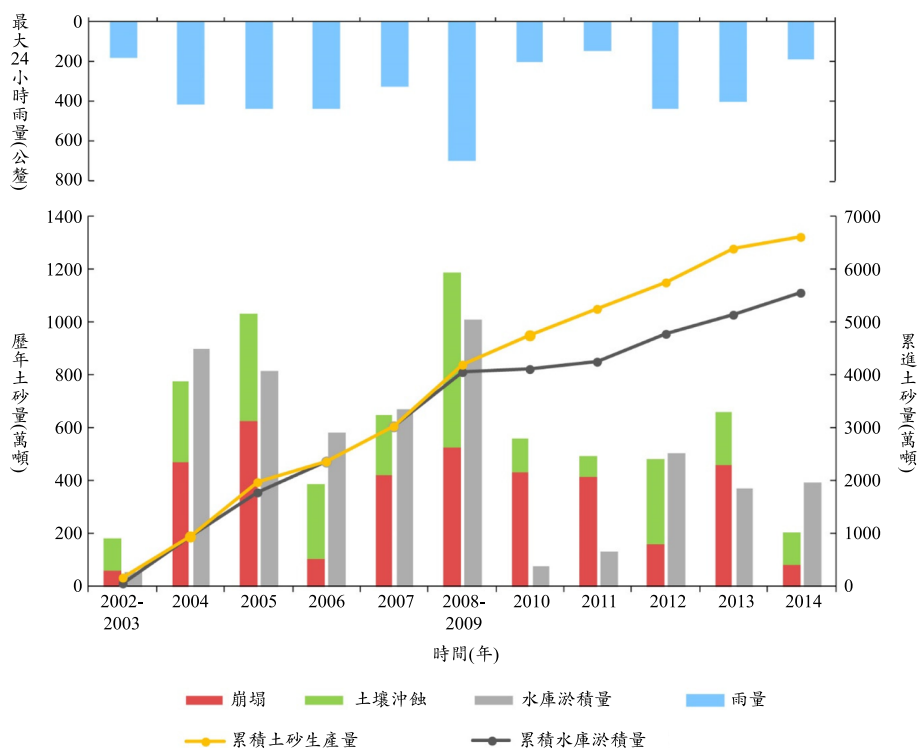


圖 6 歷年水庫淤積量與土砂生產量

最小年的差距達 6 倍，與該年度的颱風降雨強度相關(圖 6)。2005 年經歷梅雨、海棠和馬莎颱風侵襲，該年最大 24 小時雨量為 434 mm。2008 年則經歷卡枚基和辛樂克颱風侵襲，該年最大 24 小時雨量為 701 mm，並造成研究範圍的廬山溫泉區北坡母安山發生大規模岩體滑動(林俐玲等，2010b)，洪流挾帶大量土石湧入溫泉區，造成塔羅灣溪河道大量淤積，崩塌災情十分慘重。霧社水庫集水區雖非 2009 年莫拉克颱風主要災區，但其最大 24 小時降雨量達 400 mm，由於 2008-2009 年風災頻繁且災情嚴重，因此崩塌土砂量達 523 萬噸，土壤沖蝕量有 659 萬噸。而歷年總土砂量中又以 2002-2003 年的 182 萬噸最低，崩塌量僅 59 萬公噸，土壤沖蝕量僅有 123 萬公噸，因此期間的侵台颱風少，且未造成重大災情。顯示颱風所帶來極端降雨對於集水區邊坡土砂量影響甚鉅。

為瞭解土砂生產量與水庫淤積量的關係，表

1 亦呈現霧社水庫集水區之泥砂遞移率(Sediment Delivery Ratio, SDR)，泥砂遞移率係指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，可定義為集水區出水口泥砂產量(公噸/年)與泥砂總量(公噸/年)之比值(Walling, 1983)，亦即土砂生產量不會完全進入下游水庫，泥砂移動有遲滯現象。本研究假設集水區出水口泥砂產量相當於霧社水庫淤積量，因霧社水庫無排砂設施，囚砂率大於 90% (經濟部水利署，2011)，泥砂總量則相當於崩塌和土壤沖蝕量的總和，不考慮河川冲刷的貢獻。

由表 1 中可發現水庫集水區除了 2002-2003 年的泥砂遞移率僅 32%外，2008-2009 年前泥砂遞移率多接近 100%左右；在 2008-2009 年到 2010 年期間泥砂遞移率明顯降至 87%，而後 2011 年開始至 2014 年間泥砂遞移則穩定維持在 80-90%。說明在 2008 年之前，絕大多數邊坡生產的

表 1 水庫淤積量與推估土砂量比較

年度	實際水庫淤積量(萬公噸)			推估土砂生產量(萬公噸)				遞移率(%)
	體積 (萬立方公尺)	質量	累積質量	崩塌	土壤沖蝕	總量	累積總量	
2002-2003	38	58	58	59	123	182	182	32
2004	601	902	960	472	302	774	956	100
2005	544	816	1,776	623	406	1,029	1,985	89
2006	389	584	2,360	104	284	388	2,373	99
2007	4,8	673	3,033	420	224	644	3,017	101
2008-2009	675	1,013	4,046	523	659	1,182	4,199	96
2010	52	78	4,124	430	127	557	4,756	87
2011	91	137	4,261	415	79	494	5,250	81
2012	337	505	4,766	158	325	483	5,733	83
2013	249	374	5,140	459	198	657	6,390	80
2014	265	398	5,538	81	125	206	6,596	84
加總	3,696	5,544		3,744	2,852	6,596		
平均	284	426		288	219	507		

*假設實際水庫淤積量水庫淤積量總體積密度為 1.5 公噸/立方公尺

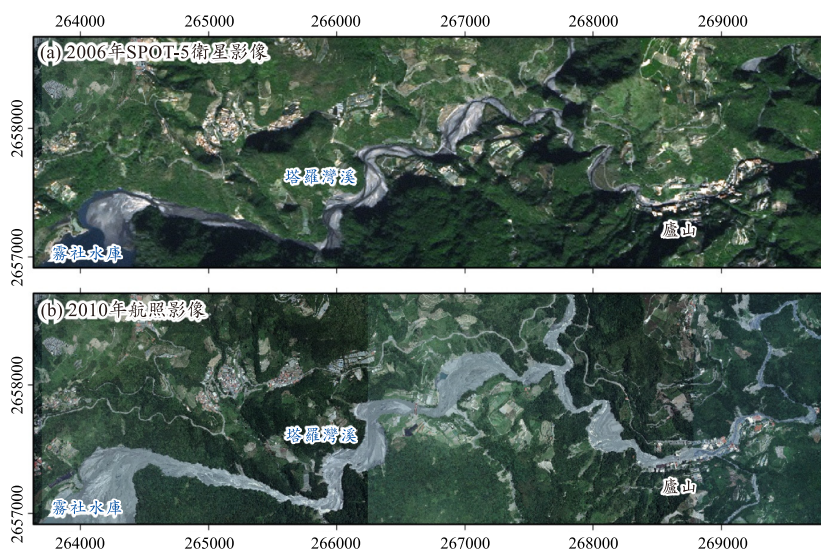


圖 7 2008 年辛樂克颱風前後塔羅灣溪河道淤積

泥砂皆流入水庫淤積。

在 2008-2009 年到 2010 年期間，泥砂遞移率明顯降至 87%，而後 2011 年開始至 2014 年間泥砂遞移則穩定維持在 80%。因霧社水庫無任何排砂措施，可排除水庫洩洪與排砂的因素，可能因為強降雨產生大量的崩塌土砂與土壤沖蝕，河

川的輸砂能力雖然因流量增加而提升，但仍無法將所有泥砂搬運至水庫蓄水區，仍有部分泥砂累積於上游的邊坡上與河道內，加上 2009 年後颱風事件對於中部低區的影響皆不大，雨水、河水沖蝕無法完全搬運進入水庫，仍有部分泥砂累積於上游的邊坡上與河道內。由衛星影像圖(圖 7)亦

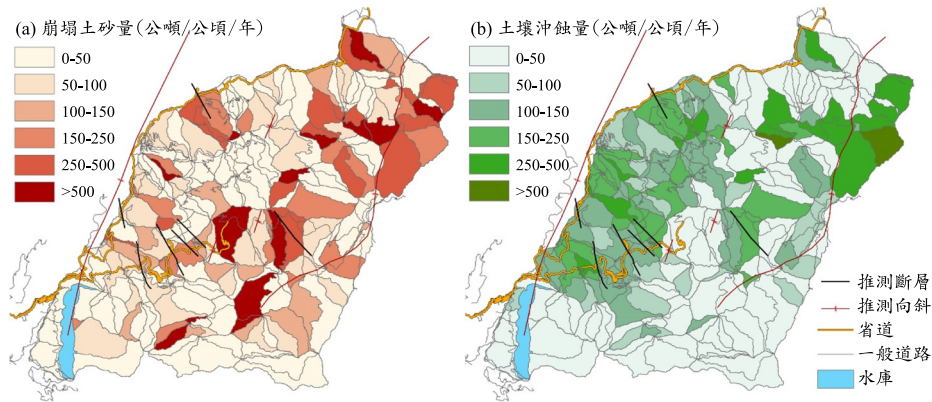


圖 8 崩塌與土壤沖蝕量的空間分布

顯示 2008 年辛樂克颱風後，廬山到水庫的河道明顯拓寬，代表大量泥砂淤積河道上，無法完全搬運至水庫庫區。

相較於其它研究，霧社水庫集水區具有較高的泥砂遞移率，如 Walling (1983) 和陳樹群和賴益成(1999)皆指出泥砂遞移率與集水面積有關，台灣的經驗公式為 $SDR = 165.67A^{-0.24}$ ，根據此公式則霧社水庫集水區泥砂遞移率為 45%。顯示霧社水庫集水區的邊坡泥砂能夠很快速的傳輸到河川或水庫系統，邊坡和河道之間具有高度的連結性(connectivity)，可能因為霧社水庫集水區坡度陡峭，且崩塌大多接近濁水溪本流與支流塔羅灣溪，而主要土壤沖蝕區又鄰近水庫蓄水區所導致。

崩塌土砂和土壤沖蝕量在空間分布上有很大的差異(圖 8)，高崩塌土砂量的坡單元主要集中在東側(圖 8a)，大致呈現東北-西南方向，與研究區岩層的分布相關，並且大多鄰近推測斷層附近，顯示崩塌土砂生產量可能受到地質構造所控制，而集水區西側的崩塌土砂量相較低，又集水區東側的農地和道路相較為稀少，顯示土地利用與開發並非主要造成崩塌土砂的來源。

土壤沖蝕量的空間分布集中在集水區西側(圖 8b)，也是道路與農業開發密集的区域，原因係因農地的開發是需要產業道路設置，而農地開發增加地表裸露，進而加速土壤沖蝕速率。此外，

集水區的東北側也有較高的沖蝕量，主要因為高山地區為植被稀疏的箭竹草坡，地表覆蓋相對於海拔森林較差，因此具有較高的土壤沖蝕量。整體來說，土壤沖蝕量與土地利用狀況息息相關。

4.2 自然環境和土地利用與土砂生產量之相關性

相關性雙尾檢定結果如表 2 所示，崩塌土砂量與高程呈顯著正相關(相關係數 0.243**), 但與坡度無顯著相關(相關係數 0.110)。土地利用因子方面，崩塌土砂量與道路密度無顯著相關，與農業密度呈現顯著負相關。因土壤沖蝕量的公式考慮地表覆蓋因子，故與道路和農業密度皆呈現顯著正相關，與道路密度的相關係數為 0.505**, 與農業密度的相關係數為 0.550**。各因子探討如下：

4.2.1 高程因子

崩塌土砂量與高程呈現顯著正相關(相關係數 0.243**), 以統計分析發現隨高程增加，平均崩塌土砂量隨之增加(圖 9a)。前人研究指出台灣崩塌大多發生在海拔 500-1500 公尺的中海拔山區(詹勳全, 2015; Huang *et al.*, 2017)，隨高程增減，侵蝕率也隨之降低(陳毅青, 2012)。但陳樹群等(2005)指出高程因子在中高海拔可能存在不同的直接因素，而非高程本身。而本研究區之高程與地質分布具有相依性，可能為隱含的因素。而土壤沖蝕則與高程無顯著關係。

表 2 自然環境與土地利用因子 Spearman 相關性雙尾檢定

	高程	坡度	道路 密度	農業 密度	崩塌 土砂量	土壤 沖蝕量	土砂 生產量
高程	1.000						
坡度	.319**	1.000					
道路	-.444**	-.546**	1.000				
農業	-.545**	-.505**	.793**	1.000			
崩塌土砂量	.243**	.110	-.127	-.210**	1.000		
土壤沖蝕量	-.118	-.163*	.505**	.550**	.404**	1.000	
土砂生產量	.010	-.017	.315**	.319**	.719**	.883**	1.000

**顯著水準 0.01 下，兩者具有顯著相關性(雙尾)；*顯著水準 0.05 下，兩者具有顯著相關性(雙尾)

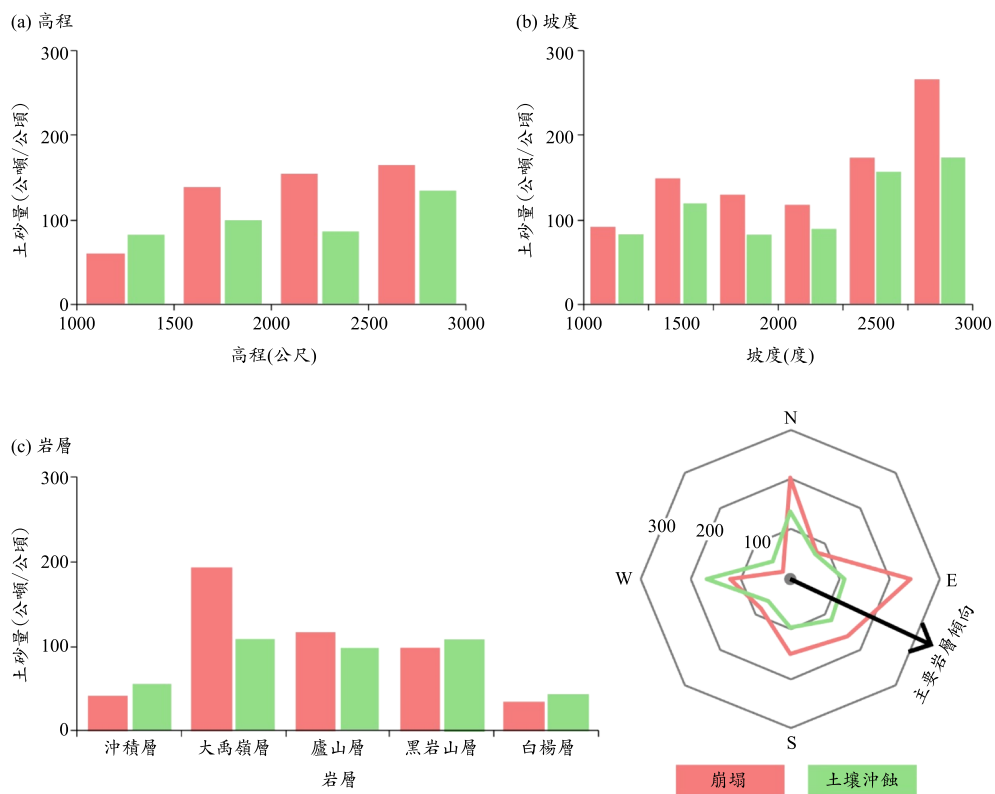


圖 9 自然因子與土砂生產量的關係，紅色與綠色柱狀圖分別為崩塌土砂量與土壤沖蝕量，(a)高程因子；(b)坡度因子；(c)岩層；(d)坡向，黑色箭頭表示研究區主要岩層的傾向。

4.2.2 坡度

崩塌土砂量與坡度無顯著相關性(圖 9b)。理論上，邊坡越陡峭，提供越多塊體運動越大的下滑力(Montgomery and Brandon, 2002)。但許多研究也指出，當坡度介於 30°-40°時，崩塌量反而下

降。可能因為邊坡組成材料控制其坡度，岩石強度越強邊坡越陡(Schmidt and Montgomery, 1995)，故坡度並非主導崩塌率的主要因素，而是取決於岩石的強度，以及坡度與臨界坡度的閾值(Larsen and Montgomery, 2012)，故坡度與崩塌量

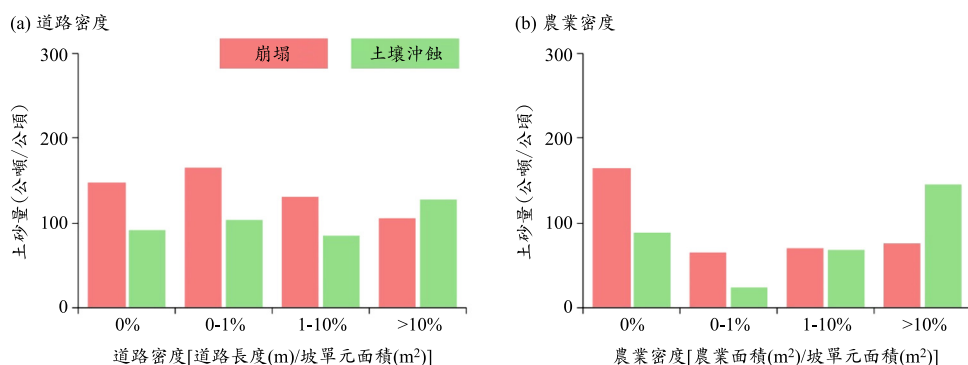


圖 10 土地利用與土砂生產量的關係，(a)道路密度；(b)農業密度。

之間關係並不明顯。而土壤沖蝕量則基於土壤沖蝕公式，使土壤沖蝕量與坡度呈現函數之關係。

4.2.3 岩層

本研究區地勢大致東高西低，而東側海拔高之處岩層為大禹嶺層的崩塌土砂量與土壤沖蝕量最高，其次為廬山層和黑山岩層(圖 9c)。另外將研究區之構造線與單位面積崩塌量做比較(圖 8b)，顯示單位面積崩塌量高之坡單元大多分布在構造線通過處，因此可推知隨高程變化影響崩塌量的多寡，其背後隱含著地質(岩性、構造線)對崩塌的影響性。

4.2.4 坡向與坡型

研究區崩塌土砂量在北、東二類坡向最多(圖 9d)；本研究區的岩層的傾向多為南偏東 60°-90°之間，故向東和向東南的邊坡屬於順向坡，向西和向西北屬於崖坡(逆向坡)，其餘的屬於斜交坡。其中，順向坡的崩塌土砂量最大，其次為斜交坡，崖坡則最輕微。東、東南與南三坡向合計為崩塌土砂量最高之區域，此外向北之坡向崩塌量也相當高。因東與東南向邊坡屬順向坡的弱面與邊坡平行，地表水若由上層岩石滲入至層面並蓄積，是下層岩石潤滑、軟化，導致剪力強度降低，促使上層岩順著下層岩面下滑，崩塌便產生，在台灣西部麓山帶十分常見(陳樹群等，2005)。

4.2.5 道路

道路密度與崩塌土砂量呈現無顯著相關，與土壤沖蝕量呈現顯著正相關(表 2)，發現崩塌量最高是道路開發密度 0.1-1% 以下的地方，甚至崩塌

量隨著道路密度增加有降低的情形(圖 10a)。顯示道路的開發並非崩塌發生的主要元兇；隨道路開發密度增加，土壤沖蝕量亦增加，可能為道路開發促使農業的開發，降低植被覆蓋率，灌溉用水、雨水冲刷造成水土迅速流失。

4.2.6 農地

農地密度與崩塌土砂量呈現顯著負相關，與土壤沖蝕量呈現顯著正相關(表 2)。究其原因係農業墾耕關係植被覆蓋率低，使覆蓋因子值提高，所以土壤沖蝕農業呈顯著正相關。而無農業開發之處，土壤沖蝕量單位面積仍達 88 公噸/公頃(圖 10b)，是由於在研究區內有許多人煙罕至之處為裸露地，缺乏植被覆蓋自然土壤沖蝕量就高。而崩塌土砂量最高之者為無農業開發之處，而在有農業開發之處，崩塌量雖隨著密度增加而提高，但其單位面積崩塌量遠低於無農業開發之處，也說明農業並非造成崩塌的主因。

4.3 土地利用改變減少土壤沖蝕的效益

土壤沖蝕量與土地利用狀況息息相關，應由水土保持與植被復育等措施著手，以減少農地與裸露地土砂之冲刷。因此，本研究分別模擬三種土地利用復育情境對於減少土壤沖蝕量之效益，模擬結果如表 3 所示，各情境說明如下：

情境 1 中將農業用地中半數的果樹與旱作面積(占集水區面積約 3%)棄耕成為雜草地，土壤沖蝕量可由 219 萬公噸/年降為 200 萬公噸/年，若再進一步復育成林地，土壤沖蝕量則可降至 197

表 3 土地利用改變減少土壤沖蝕的效益

情境	土地利用變更	面積(%)	平均土壤沖蝕量之變化(萬公噸/年)
1	農地 → 雜草地 → 林地	50	219 → 200 → 197
2	裸露地 → 雜草地	33	219 → 197
3	農地設置水土保持設施	100	219 → 206

萬噸/年，年土壤沖蝕量減少約 22 萬公噸。

情境 2 考慮研究區內的崩塌復育狀況不佳，裸露地面積約有 730 公頃，地表缺乏植被覆蓋，雨水的沖刷易產生土壤流失，嘗試將低海拔且有道路能接近的裸露地(佔崩塌地面積 33%，佔集水區總面積 1%)加強水土保持工作，使土地利用變更為雜草地，土壤沖蝕量由 219 萬公噸/年降至 197 萬公噸/年，年土壤沖蝕量減少約 22 萬公噸。

情境 3 考量要求農地棄耕非易事，若加強水土保持措施，USLE 中改變水土保持因子(P 值)，將全部農地 P 值由 1 降至 0.5，結果顯示土壤沖蝕量由 219 萬公噸/年降低至 206 萬公噸，相較於前 3 項情境，模擬 3 是在不影響農民生計的情況下，能夠有效降低土壤沖蝕量，可作為之短期之改善策略。

從上述的情境分析中發現，裸露地是霧社水庫土壤沖蝕量中相當重要的泥砂來源，改變裸露地的植生覆蓋狀況可減少相當的土壤沖蝕量。然而，造成其裸露主因為地質脆弱而易崩塌，且裸露地又多分布在人煙罕至的高海拔坡地，難以採用採用人為復育的方式降低裸露地面積，因此，本研究建議應優先復育鄰近道路之裸露地，並從水土保持方面著手改善農地土壤沖蝕量，而長期目標則是進行林地的復育，從人為與自然環境兩方面著手始能降低水庫淤砂來源，延長水庫的使用期限。

五、結論與建議

5.1 結論

本研究量化霧社水庫集水區之崩塌與土壤沖蝕量之分布，比較集水區土砂生產量與水庫淤積量之間的關係，以釐清水庫泥砂來源，並分別探討自然環境因素及人為開發對泥砂生產的關

係。本研究結論如下：

1. 利用崩塌面積體積公式關係及通用土壤流失公式求得 2002 年至 2014 年間霧社水庫集水區年平均崩塌土砂量 288 萬公噸、土壤沖蝕量為 219 萬公噸，年總土砂生產量約 507 萬噸，崩塌和土壤沖蝕的土砂量對水庫淤砂量都相當重要，其產砂量之比值約為六比四。此外，本研究推估之集水區土砂生產量與霧社水庫淤砂量趨勢相當一致，說明邊坡和水庫的泥砂系統的連結性良好，僅在 2008 年之後因為重大降雨事件中產生大量土砂，邊坡和河流作用無法將所以泥砂搬運進入水庫，仍有部分泥砂累積於上游的邊坡上與河道內所導致。
2. 崩塌土砂量和土壤沖蝕量在空間分布上有很大的差異。崩塌受自然因素主導，其發生的主要控制因素為地質因素與短延時降雨；人為開發因素對崩塌的影響不明顯，但加速土壤沖蝕量，影響土壤沖蝕量的重要因子為植被覆蓋狀況。但相對自然產生的崩塌的產砂量、裸露地的土壤沖蝕量，人為開發所造成土壤沖蝕較為輕微。
3. 統計檢定結果顯示，集水區崩塌土砂量與高程、地質與坡向或坡型呈現顯著正相關，與坡度無關，說明崩塌與地質構造息息相關；而土壤沖蝕量與道路和農業呈現顯著正相關，說明土壤沖蝕主要受到土地利用狀況影響而產生加速沖蝕。
4. 農地與裸露地之復育將可明顯減少集水區土壤沖蝕量，若半數農地退耕為林地，每年將可減少 22 萬公噸的沖蝕量；若將鄰近道路的裸露地復育，每年將可減少 22 萬公噸的沖蝕量；若所有農地採取相當之水土保持

措施，每年將可減少 13 萬公噸的沖蝕量。建議可從鄰近道路裸露地優先復育，並針對農地採取適當水土保持措施。

5.2 建議

自然因素導致之崩塌貢獻集水區主要的土砂量，但許多崩塌位於集水區東側高海拔和道路難以抵達的山區，且崩塌主要受到地質構造控制，工程手段治理較為困難。而人為開發所貢獻之土壤沖蝕量雖然相對輕微，但仍貢獻近 40% 土砂量，且大多位於道路可及的集水區西側山坡，面對亟待改善的水庫淤積問題，建議應由水土保持與裸露地植被復育等措施著手，減少農地與裸露地土砂之沖刷。

謝 誌

感謝經濟部水利署鍾寬茂科長的協助，及台灣電力公司提供霧社水庫相關資料，使本文得以順利完成。

參考文獻

1. Chen, Y.C., Chang, K.T., Chiu, Y.J., Lau, S.M., Lee, H.Y., “Quantifying rainfall controls on catchment-scale landslide erosion in Taiwan,” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 38, pp. 372–382, 2013.
2. Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., and Valigi, D., “Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy,” *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 279, pp. 222–229, 2009.
3. Hovius, N., Stark, C.P., and Allen, P.A., “Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping,” *Geology*, Vol. 25, No. 3, pp. 231–234, 1997.
4. Huang, J.C., Milliman, J.D., Lee, T.Y., Chen, Y.C., Lee, J.F., Liu, C.C., Lin, J.C., and Kao, S.J., “Terrain attributes of earthquake- and rainstorm-induced landslides in orogenic mountain Belt, Taiwan,” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 42, pp. 1549–1559, 2017.
5. Khazai, B., and Sitar, N., “Landsliding in Native Ground: A GIS-Based Approach to Regional Seismic Slope Stability Assessment.” Internet Report, 2000.
6. Larsen, I.J., and Montgomery, D.R., “Landslide erosion coupled to tectonics and river incision,” *Nature Geoscience*, Vol. 5, No. 7, pp. 468–473, 2012.
7. Lin, C.Y., Lin, W.T., and Chou, W.C., “Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience,” *Soil & Tillage Research*, Vol. 68, pp. 143–152, 2002.
8. Liu, C.C., Shieh, C.L., Lin, J.C., and Wu, A.M., “Classification of non-vegetated areas using Formosat-2 high spatiotemporal imagery: the case of Tseng-Wen Reservoir catchment area (Taiwan),” *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 32, pp. 8519–8540, 2011.
9. McCool, D.K., Brown, L.C., Forster, G.R., Mutchler, C.K., and Meyer, L.D. “Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation,” *Transactions of the ASAE*, Vol. 30, No. 5, pp. 1387–1396, 1987.
10. Montgomery, D.R., and Brandon, M.T., “Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges,” *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 201, No. 3, pp. 481–489, 2002.
11. Parker, R.N., Densmore, A.L., Rosser, N.J., De Michele, M., Li, Y., Huang, R., Whadcoat, S., and Petley, D.N., “Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth,” *Nature Geoscience*, Vol. 4, No. 7, pp. 449–452, 2011.
12. Schmidt, K.M., and Montgomery, D.R., “Limits to relief,” *Science*, Vol. 270, No. 5236, pp. 617–620, 1995.
13. Tsai, Z.X., You, G.J.Y., Lee, H.Y., and Chiu, Y.J., “Use of a total station to monitor post-failure sediment yields in landslide sites of the Shihmen reservoir watershed, Taiwan,” *Geomorphology*, Vol. 139, pp. 438–451, 2012.

14. Walling, D.E., "The sediment delivery problem," *Journal of Hydrology*, Vol. 65, pp. 209–237, 1983.
15. Wang, S.F., Chen, Y.C., Song, C.E., "The Resistance of Land Use to the Landslide under Different Rainfall Intensity," *International Symposium on Remote Sensing 2017*, 17-19 May, Nagoya, Japan, 2017.
16. Wischmeier, W.H., Smith, D.D., and Uhland, R.E., "Evaluation of factors in the soil loss equation," *Agricultural Engineering*, Vol. 39, pp. 458–474, 1958.
17. Wischmeier, W.H., and Smith, D.D., "Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning," In: US Department Agricultural Handbook, Vol. 537, pp. 1578–1582, 1978.
18. 沈哲緯、劉時宏、陳毅青、邱昱嘉、劉格非，「全臺流域集水區崩塌土砂收支研究與探討—以莫拉克颱風為例」，*農工學報*，第 62 卷，第 3 期，第 23–42 頁，2016。
19. 林俐玲，「通用土壤流失公式(USLE)之應用與誤用」，*水保技術*，第 5 卷，第 2 期，第 119–121 頁，2010a。
20. 林俐玲、黃振全、顏呈仰、黃貞凱、鄭裕適、張益通，「深層岩體潛移邊坡滑動行為研究—以廬山地滑為例」，*水土保持學報*，第 42 卷，第 1 期，第 1–14 頁，2010b。
21. 林俐玲、林可薇、陳品岡、沈哲緯，「斜坡單元進行坡地土壤流失量之推估」，*水土保持學報*，第 43 卷，第 4 期，第 395–410 頁，2011。
22. 林偉誠，「清境地區土地利用適宜性問題與對策之探討」，*國立中興大學水土保持學系碩士論文*，2012。
23. 邱昱嘉，「放射性核種銻 137 在土壤重新分布率估算之研究」，*國立台灣大學土木工程研究所博士論文*，2008。
24. 范正成，「通用土壤流失公式在台灣地區應用之探討」，*中美陡坡土壤流失量推估技術研討會論文輯*，第 1–52 頁，1995。
25. 陳文福、莊栢椿，「高山地區民宿發展永續經營策略之探討—以南投清境地區為例」，*坡地防災學報*，第 8 卷，第 2 期，第 1–18 頁，2009。
26. 陳毅青，「降雨誘發崩塌侵蝕之規模頻率及其控制因子」，*國立台灣大學土木工程研究所博士論文*，2012。
27. 陳樹群、賴益成，「河川與集水區泥砂遞移率之推估研究」，*中華水土保持學報*，第 30 卷，第 1 期，第 47–57 頁，1999。
28. 陳樹群、馮智偉，「應用 Logistic 迴歸繪製崩塌潛感圖—以濁水溪流域為例」，*中華水土保持學報*，第 36 卷，第 2 期，第 191–201 頁，2005。
29. 陳樹群、吳俊毅、吳岳霖、王士豪，「GIS 圖層及修正因子建置臺灣通用土壤流失公式(TUSLE)--以石門水庫集水區為例」，*中華水土保持學報*，第 40 卷，第 2 期，第 185–197 頁，2009。
30. 陳樹群、翁愷翎、吳俊銘，「玉峰溪集水區崩塌特性與崩塌體積之探討」，*中華水土保持學報*，第 41 卷，第 3 期，第 217–229 頁，2010。
31. 楊宜嫻，「高山地區土地利用問題與對策研擬之研究—以南投清境地區為例」，*長榮大學土地管理與開發學系碩士論文*，2015。
32. 楊斯堯，「曾文溪集水區降雨沖蝕指數與土砂災害關聯性之研究」，*國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文*，2010。
33. 經濟部水利署，氣候變遷下水庫排砂對策研究(2/2)成果報告。經濟部水利署，台北，2011。
34. 經濟部水利署，「濁水溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫」，*經濟部水利署水利規劃試驗所*，台北，2013。
35. 詹勳全、張嘉琪、陳樹群、魏郁軒、王昭堡、李桃生，「台灣山區淺層崩落地特性調查與分析」，*中華水土保持學報*，第 46 卷，第 1 期，第 19–28 頁，2015。
36. 詹錢登，土石流發生降雨警戒值模式之研究，*行政院農委會水土保持局*，南投，2001。
37. 鍾欣翰，「考慮水文模式的地形穩定分析—以匹亞溪集水區為例」，*國立中央大學應用地質研究所碩士論文*，2008。

收稿日期：民國 107 年 10 月 10 日
修正日期：民國 107 年 11 月 19 日
接受日期：民國 107 年 12 月 13 日