

水庫集水區產砂熱區分析研究

林泰立 林鎮洋 陳起鳳*

摘要 受天然地形條件影響，我國水庫淤積速率快速，影響水庫庫容以及水資源調度，政府更在前瞻基礎建設計畫中將減砂入庫視為目標，維持庫容平衡，降低缺水風險。本研究欲建立合理快速的評估方法，定義出水庫集水區的主要產砂熱區，提供更有效率的減砂對策。本研究以石門水庫、霧社水庫和南化水庫等三座北中南水庫進行評估，將集水區劃分多個子集水區，以通用土壤流失公式 USLE 估算坡面土壤沖蝕量，以及使用坡面坡度與崩塌深度法計算崩塌土砂量，再加上坡面遞移率及河道遞移率，算出各子集水區每年平均土砂入庫量。此評估結果採用實際水庫清淤與淤積量，結果評估結果大多都落在 10 年實際數據的上下四分位數間，確認本研究方法為合理推估結果，以此建議此三座水庫的產砂熱區，建議作為後續優先治理對象。

關鍵詞：水庫集水區、USLE、土砂遞移率、產砂熱區

Sediment Yield Hotspots in Reservoir Watershed

Tai-Li Lin Jen-Yang Lin Chi-Feng Chen*

ABSTRACT Silt accumulates rapidly in Taiwan's reservoirs given their geographical characteristics, affecting Taiwan's reservoir capacity and allocation of water resources. In response, the Taiwanese government has set sediment reduction in reservoirs as a policy goal. Thus, the present study established a rapid and rational method for identifying the main sediment production hotspots in the watershed areas of Taiwan's reservoirs. This study analyzed three reservoirs located in the northern, central, and southern regions of Taiwan, namely, the Shimen Reservoir, Wushe Reservoir, and Nanhua Reservoir. The study divided the watershed areas of these reservoirs into multiple subwatershed areas and applied the Universal Soil Loss Equation (USLE) to estimate soil erosion from the land surface. Additionally, the study used the slope-length factor method to calculate the volume of collapsed sediment, along with the slope delivery ratio and channel delivery ratio, to determine the average annual volume of sediment entering the reservoirs. The assessment results were compared with actual reservoir dredging and siltation volumes obtained over 10 years, with most of the results falling within the upper and lower quartiles of the actual data, confirming that the method proposed in this study is reasonable. The identified hotspots should be prioritized in sediment reduction efforts.

Key Words: Reservoir catchment area, Universal Soil Loss Equation (USLE), Sediment delivery ratio (SDR), Sediment yield production hotspots

一、前言

臺灣四面環海且位於菲律賓和歐亞板塊交界處，因此颱風、地震等天災頻繁，降雨豐沛及特殊地質條件都加劇水庫淤積情形，有鑒於水庫集水區保育之重要性，行政院於民國 106 年核定前瞻基礎建設計畫-水環境建設-「加強水庫集水區保育治理計畫」，內容以集水區之「土砂控制」及「水質改善」兩大目標，以達到水庫保育及其永續發展。另外經濟部於 106~114 年提出「水庫庫容有效維持綱要計畫」，其目的為庫容維持與土砂治理，針對 13 座水庫（石門、曾文、南化、牡丹、烏山頭、霧社、白河、明德、德基、澄清湖、日月潭、仁義潭及阿公店水庫）列為重點改善標的，以長期（111-120 年）到水庫泥砂進出平衡，維持水庫有效庫容為目標。「減砂入庫」為集水區治理重點，然在廣大集水區面積

當中，若能定義主要產砂熱區，作為優先治理地區，可幫助有效達到減砂入庫目標。

集水區由坡面及溪流兩個地貌單元所組成，土壤沖蝕到進入水庫需經過產生以及運移等過程。土壤產生與流失可分為坡面土壤侵蝕量和崩塌量，稱之為坡面土壤流失量，而殘留沉積在坡面上未進入溪流的土壤，則不被計入坡面土壤流失量（水保局，2017）。此外，林昭遠等（2006）將土壤沖蝕量和崩塌泥砂產量配合遞移率觀念估算流入河道泥砂產量，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。在眾多的土壤沖蝕方法中，通用土壤流失公式 USLE(Wischmeier and Smith, 1978) 考量最基礎的機制以及可應用在不同區域尺度獲得了一致的普遍認可。USLE 公式具有簡單操作、輸入資料要求少以及考量不同地形起伏和土

地利用，為目前最主流方法。崩塌土砂量推估方法也有很多種，像是多變量分析法（吳俊鉉、陳樹群，2004）、不安定指數法（簡李濱，1992）、類神經網路法（張舜孔，2002；林彥享，2002；盧育聘，2003）、二元迴歸崩塌土體推估模式、坡面坡度與崩塌深度法（Linda and Okunishi, 1983）、崩塌面積與崩塌深度法（Guzzetti et al., 2009）、以水庫淤砂量體求崩塌體積、崩塌力學機制土體崩壞潛勢（連惠邦等，2008）、不同時期 DTM 差異估算崩塌量體、不同時期 LiDAR 高精度數值高程差異估算崩塌量體和直接監測法（北海道開發局建設部河川計畫課，2005）。本研究為建立簡化通用的方法，採用最簡易估計崩塌土體體積的方法坡面坡度與崩塌深度法，係以崩塌地平均深度與其崩塌面積之乘積。集水區土砂生產量，雖然直接量測最為簡單直接，但是費時且儀器測定困難，實測受到相當多環境變因干擾。以間接方式，包括公式推估（Takahashi, 1982）、統計經驗（吳建民，1978；經濟部水資會，1983；何智武、段錦浩，1983）、物理成因、泥砂遞移率（賴益成，1998）及數值高程等多種方式（水保局，2017），作為替代方式較為簡便。當土壤沖蝕或崩塌產生後，本研究採用其中的遞移率方法，估算最後的坡面土壤流失量。以子集水區為範圍分析每個集水區土砂生產後，再以遞移率的觀念計算每個子集水區到水庫出口的土砂運移量，在此定義為最後的土砂入庫量。因此在眾多方法中，本研究採用通用土壤流失公式 USLE 公式計算沖蝕量，利用坡面坡度與崩塌深度法計算崩塌量，再以坡面遞移率算出每個子集水區的土壤流失量後，再考量距離水庫的河道距離，以河道遞移率計算最後的土砂入庫量，以此決定土砂熱區。

沖蝕土砂量大多使用通用土壤流失公式 USLE 公式所計算，以網格式為單元，其優點結構簡單、容易使用，但由於不同來源的數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）網格大小不相同，計算成果之單位網格土壤沖蝕量分布圖的沖蝕量尺度差異很大（楊凱傑，2016），且網格單元結果不易於現地進行查核及比對，且會有網格跨越山脊線或河道等不符合地形邊界條件之情況，使同一網格內會有多種水流方向等情況，造成土壤流失量推估不甚合理（林俐玲等，2011），因此本研究以一個子集水區為單元所計算分析。植生覆蓋因子大多研究用衛星影像資料及遙測理論去分析，使用 SPOT 衛星影像利用 NDVI 公式計算植生指標值求得（林文賜等，2003），但衛星需要公開的大規模資料，且會因季節變化而容易產生誤差。林俐玲（1995）針對不同地表及植生覆蓋賦予其相對應之 C 值，建置地表及植生狀況之植生覆蓋因子對照表，計算子集水區內土地利用類型所占比權重，定義出子集水區 C 值。崩塌土砂量考慮其近岸侵蝕（崩塌）區屬於近岸侵蝕（崩塌）為主之區域（即重力侵蝕區域），此區域所流失之土砂將直接進入河道屬於造床土砂（蔡易達，2018），但本研究並無建立河道動床模式，將其簡化直接將崩塌區皆乘上坡面遞移率，且無近岸和離岸之分。

本研究目的為建立一個簡易又通用的模型，以石門、霧社、南化水庫為例，計算水庫的土砂入庫量，推估出集水區內的產砂熱區。為確定本研究計算結果是否合理，另收集案

例水庫近十年的實測來砂量進行比對。本研究可釐清各子集水區土壤沖蝕來源，亦作為水庫治理的優先考量熱區，協助主管機關達到減砂入庫和水庫永續的目標。

二、研究區域與研究方法

1. 研究區域

本研究根據水庫淤積率高、集水區面積較大（大於 100 平方公里）、主要供水、在槽水庫等因素，在北中南部各挑選了 1 座水庫作為分析對象，分別為石門水庫、霧社水庫以及南化水庫。為了進行產砂熱區評估，各水庫集水區需再切分為較小尺度的子集水區，本計畫子集水區先參考水保局公開資料“全台 839 子集水區圖資”。以石門水庫集水區為例，共包含 21 個子集水區，不再重新劃分。但霧社和南化之子集水區劃分數量較少且子集水區面積差異大，故再另外依流域分布重新劃分子集水區。根據水保局資料，霧社水庫切割 5 個子集水區，但集水區面積大小不一，恐會影響產砂熱區的呈現和分析，因此重新劃分為 11 個子集水區，將原先濁水溪上游子集水區再細分為濁水溪上游一到四號子集水區，平靜和塔羅灣溪子集水區亦是如此，使各子集水區面積大小較為接近。南化水庫原先僅為 1 個集水區，本研究則重新劃分為 5 個子集水區，分別為南化一號到五號子集水區。以下介紹此三個水庫集水區背景。

(1) 石門水庫

石門水庫集水區地理位置大約居於桃園市復興區與新竹縣尖石鄉，以淡水河上游之大漢溪流域為其主流，集水面積約為 763.4 平方公里。海拔主要介於 500 公尺至 3,500 公尺之間，全區自東南向西北傾斜，呈南北向之狹長腰形，平均坡度約為 34%。平均降雨量約在 2,500 毫米，雨季多集中於五至九月期間，其主要原因乃颱風所造成，在民國 110 年淤積率為 33.56%。土地利用情形，森林面積占比約為 91%，農業面積約為 2.5%，以旱田為主（水利署北區水資源分署，2023）。

(2) 霧社水庫

霧社水庫壩址位於南投縣，屬於濁水溪上游支流霧社溪，水庫集水區面積約 219 平方公里，主要用途為發電，海拔介於 1,000 至 3,600 公尺之間，平均高程大約在 2,050 公尺。本集水區地形東高西低，坡度由東向西遞減，東以中央山脈為界，平均坡度約亦達 56%，年降雨量 2200 毫米至 3000 毫米，在民國 110 年淤積率為 75.22%，屬於高度危害水庫。近年來人為開發嚴重，土地利用情形森林面積降低，占比約為 80%，且農業、遊憩興盛，產生超限利用問題（台灣電力股份有限公司，2022）。

(3) 南化水庫

南化水庫壩址位於臺南市南化區曾文溪支流後堀溪上，集水區面積約 108.3 平方公里，東北地勢陡峻，西南則多屬緩坡丘陵地形，因地質為泥岩加上特殊的

V 字河谷地形，沖刷作用盛行極易淘刷河岸，因此河川水系蜿蜒明顯，集水區之平均高程約為標高 473 公尺，平均坡度約 39.3%。河川枯豐現象明顯，豐水期為五月至九月，年總降雨量為 2,556 毫米，在民國 110 年淤積率為 43.47%，屬於高度危害。土地利用情形，森林面積占比約為 80%，農業面積約為 5%，以水稻和果樹為主 (台灣自來水股份有限公司，2022)。

2. 研究與方法

本研究評估長時間每年土砂入庫量，土壤沖蝕量採用年計總和之通用土壤流失公式 (USLE)，此外使用崩塌面積深度關係計算崩塌土砂量。本研究所分析產砂熱區可應用於未來水庫集水區之治理策略，由於近年前瞻計畫之執行，近年崩塌地治理之技術發展與配合植生復育工作已有相當的成效，如果把時間尺度拉到太長恐會有高估的疑慮，因此崩塌土砂量採用近 5 年的資料分析，更符合現況以利未來策略的擬定。河道泥砂沖淤量若精算可分為一次暴雨或長期模擬，惟需率定長時間土砂入庫量，因此採用泥砂遞移率 (sediment delivery ratio, SDR) 方式進行河道沖淤量之評估。

本研究之遞移率有兩個，首先考慮集水區坡面遞移率，其定義為子集水區坡面產砂量流至該子集水區匯流口之遞移率，主要參數為該子集水區之平均坡度及面積大小。再來是該匯流口之土砂量流達至水庫庫區之河道遞移率，主要參數為匯流口至入庫點之河道長度及河道坡度。本研究土砂計算流程圖如下圖 1 所示，計算公式與所需參數資料說明如下。

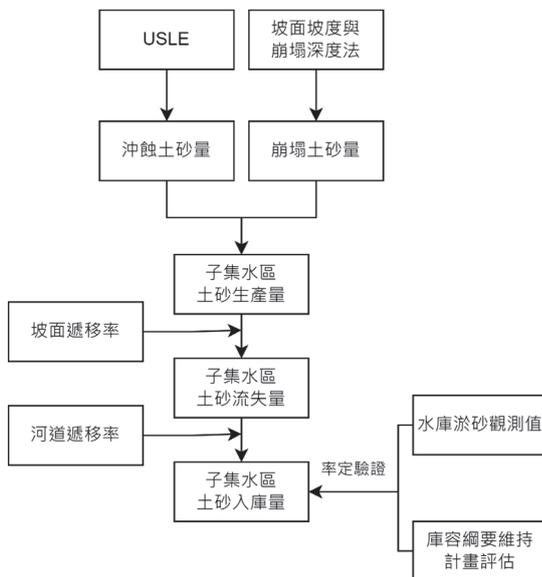


圖 1 本研究計算流程圖

Fig.1 Calculation flowchart of this study

(1) 沖蝕土砂量

集水區坡面會因降雨因素產生坡面土壤沖蝕之情形，本研究採通用土壤流失公式 (USLE) 進行推估長期 (年) 平均值之土壤沖蝕量 (式 1)，其定義皆參考水土保持手冊 (水保局，2017)。

$$A_m = R_m \times K_m \times L \times S \times C \times P \quad (式 1)$$

A = 每公頃之年平均土壤流失量 (公噸/公頃-年)；

R_m = 年平均降雨沖蝕指數 (百萬焦耳-毫米/公頃-小時-年)；

K_m = 土壤沖蝕性指數 (公噸-公頃-小時-年/百萬焦耳-毫米-公頃-小時-年)；

L = 坡長因子 (無因次)；

S = 坡度因子 (無因次)；

C = 植生覆蓋因子 (無因次)；

P = 水土保持因子 (無因次)。

① 降雨與逕流侵蝕指數 (R_m) 及土壤侵蝕性指數 (K_m)：

參考「行動水保服務網」(<https://serv.swcb.gov.tw/>)。

其降雨與逕流侵蝕指數係依臺灣地區 323 個雨量站 2002~2018 年 10 分鐘的雨量資料，以 (Wischmeier and Smith, 1987) 定義有效降雨兩場事件及其公式推估所得；土壤侵蝕性指數係依 105 年至 108 年間臺灣本島地區 526 個山坡地採集土樣，以 (Wischmeier and Smith, 1987) 公式推估所得。

② 坡長因子 (L) 和坡度因子 (S)：坡長因子參考水土保持手冊公式，如式 2 所示，利用地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 以 20 公尺大小網格分析計算。因臺灣地理環境地陡坡斜，依 (Wischmeier and Smith, 1987) 定義坡度公式當作坡度因子會有嚴重高估的情形，因此本研究參考 (McCool et al, 1987) 所建議公式，如式 3 和 4 估算 S 因子，其公式如下所示。

$$L = \left(\frac{l}{22.13}\right)^k \quad (式 2)$$

l=坡長 (公尺)

k=指數，與坡面坡度 S₀ 有關。當 S₀ 大於 5%，k=0.5；當 S₀ 介於 3%~5%，k=0.4；當 S₀ 介於 1%~3%，k=0.3；當 S₀ 小於 1%，k=0.2

$$S = 10.8\sin\theta + 0.03, \theta < 9\% \quad (式 3)$$

$$S = (\sin\theta / 0.0896)^{0.6}, \theta > 9\% \quad (式 4)$$

θ = 坡度 (度)

③ 覆蓋與管理因子 (C)：根據內政部“109-110 年全臺土地利用”圖資分析水庫集水區之土地利用分布，再依照土地利用分類所對應的 C 值進行計算。C 值係數參考自水土保持手冊 (水保局，2017) 如表 1 所示，因此由土地利用以及相對應 C 值，計算出每個子集水區所代表的平均 C 值。

表 1 USLE 中 C 值參考數值

Table 1 Reference C factors in USLE equation

土地利用分類	C 值	土地利用分類	C 值
農業	0.250	公共設施	0.010
森林	0.010	遊憩	0.005
交通	0.030	其他-草生地	0.050
水利	0.000	其他-裸露地	1.000
建築	0.010	其他-空置地	0.010

④ 水土保持處理因子 (P)：

假設無實施水土保持相關作法，以保守估計值 1 帶入。

(2) 崩塌土砂量

崩塌土砂量係指在地表或斜坡上因由於雨水、地震、山崩等原因引起的土砂崩塌，本研究利用既有崩塌地做分析，崩塌地資料參考林務局所繪 106 年至 110 年「衛星判釋全島崩塌地」共 5 期資料，使用坡面坡度與崩塌深度法計算崩塌土砂量，該方法根據參數為坡面坡度與對應之崩塌深度不同，參數如表 2 所示。國家災害防救科技中心 (NCDR) 建議之參數，針對台灣崩塌案例及整過往文獻資料，綜合中央地質調查現地調查人員經驗及過往崩塌案例之統計數據，整理出崩塌面積與崩塌深度之關係。下表參考國內水土保持手冊 (水保局，2017)，公式如式 5 所示。

$$\text{崩塌地平均深度} \times \text{崩塌面積} = \text{崩塌土砂量} \quad (\text{式 5})$$

表 2 坡面坡度與崩塌深度參考表

Table 2 Surface slope and the associated landslide depth

坡面坡度 (度)	國家災害防救科技中心(NCDR) (公尺)
<20	5
20~30	4
30~40	3
40~50	2
50~60	2
>60	2

(3) 遞移率

本研究參考國內水土保持手冊 (水保局，2017) 的泥砂遞移率概念，該指標用以衡量泥砂在受到雨水、風力、地震等多種外力因素影響下，從坡面運移到特定出口斷面的比值，進而估算輸砂量。本研究將遞移率區分為坡面遞移率 (SDR_s) 和河道遞移率 (SDR_r) 兩種，坡面遞移率表示子集水區內的土砂受外營力驅動，運移到子集水區之河道出口。本研究的坡面遞移率使用所建立的台灣地區槽水庫多因子公式 (式 6) (陳樹群、賴益成，1999)。河道遞移率則應用的單因子公式 (式 7) (陳樹群、賴益成，1999)，評估子集水區某特定出口斷面到水庫蓄水區的泥砂運移量。

$$SDR_s(\%) = 126.22A^{-0.35}S_s^{0.22} \quad (\text{式 6})$$

A=子集水區面積 (平方公里)

S_s=子集水區平均坡度 (%)

$$SDR_r(\%) = 129.02 \left(\frac{L}{\sqrt{S_r}} \right)^{-0.19} \quad (\text{式 7})$$

L=子集水區匯流口至庫區之河道長度 (公尺)

S_r=河道平均坡度 (%)

(4) 資料來源

本研究所使用的相關圖資來源如下表 3 整理。

表 3 本研究使用的圖資與來源

Table 3 The geographic sources used in this study

圖資	應用參數	來源
110年度全臺839子集水區範圍圖	集水區位置	內政部
水庫集水區	集水區位置	水利署 (2023)
數值高程模型 (20公尺)	坡面遞移率	內政部
衛星判釋全島崩塌地圖106~110年	河道遞移率	內政部
109-110年土地利用	崩塌土砂量	林務局
河川 (河道)	沖蝕土砂量	內政部
水庫蓄水範圍	河道遞移率	水利署 (2008)
	河道遞移率	水利署 (2023)

三、結果與討論

本研究完成 3 座重點水庫集水區產砂熱區分析，內文以石門水庫為例，完整說明坡面土砂量計算、泥砂遞移率及產砂熱區之計算過程，其餘 2 座水庫則重點說明土砂平衡計算結果及產砂熱區。

1. 石門水庫之坡面土砂生產量

石門水庫子集水區坡面土砂生產量 (包含沖蝕土砂量、崩塌土砂量) 如表 4 所示。集水區內總崩塌地土砂量為 878.7 萬立方公尺/年，沖蝕土砂量為 1,177 萬立方公尺/年，合計土砂生產量為 2,056 萬立方公尺/年。土砂生產量較高之子集水區多位於上游集水區，其中薩克亞金溪、他開琴溪土砂流失量較高，分別為 411.6 萬立方公尺/年及 489.8 萬立方公尺/年。

表 4 石門水庫子集水區土砂生產量

Table 4 Results of soil production in Shimen Reservoir sub-watershed

編號	子集水區	面積 (公頃)	崩塌土砂量 (萬立方公尺/年)	沖蝕土砂量 (萬立方公尺/年)	土砂生產量 (萬立方公尺/年)
1	薩克亞金溪	8,008	263.0	148.6	411.6
2	延老	2,670	51.9	47.4	99.3
3	他開琴溪	12,797	278.2	211.6	489.8
4	鎮西堡	2,882	30.5	57.4	87.8
5	新光	2,190	19.9	39.7	59.6
6	秀巒	2,824	37.1	95.0	132.0
7	下宇老	2,581	2.9	46.7	49.7
8	泰平	4,084	33.7	64.8	98.5
9	雪白山	3,031	26.7	32.3	59.0
10	萱源	1,069	5.4	27.8	33.2
11	菱山	3,592	23.8	35.4	59.3
12	大曼溪	2,676	22.1	37.3	59.4
13	巴陵	2,060	16.1	58.2	74.3
14	卡拉溪	1,892	1.2	32.6	33.7
15	卡議蘭	4,989	40.9	73.3	114.2
16	雪霧闊溪	2,411	6.7	26.4	33.1
17	高坡	4,658	10.6	50.3	60.9
18	霞雲	2,049	3.0	14.3	17.3
19	角板	3,125	3.9	37.8	41.7
20	三民溪	2,936	1.1	27.0	28.1
21	高邊坪	3,041	0.0	13.4	13.4
合計		75,562	878.7	1,177	2,056

2. 石門水庫之泥砂遞移率

泥砂遞移率計算分為集水區坡面遞移率及河道遞移率，其計算結果如表 5 及表 6 所示。集水區坡面遞移率主要參數為該子集水區之平均坡度及面積大小，平均坡度為使用數值高程模型所計算得知，各子集水區坡面遞移率介於 21.4% 至 50.6% 之間，其算術平均值為 34.7%。

表 5 石門水庫子集水區坡面遞移率

Table 5 Surface delivery ratio in Shimen Reservoir sub-watershed

編號	子集水區	面積 (平方公里)	平均坡度 (%)	集水區坡面遞移率 (%)
1	薩克亞金溪	80.2	65.9	24.8
2	延老	26.7	70.2	37.0
3	他開琴溪	128.3	71.7	21.4
4	鎮西堡	28.8	65.8	35.5
5	新光	21.9	70.7	39.7
6	秀巒	28.3	69.6	36.2
7	下宇老	25.8	64.3	36.7
8	泰平	40.8	69.2	31.8
9	雪山山	30.3	71.2	35.5
10	萱源	10.7	68.1	50.6
11	菱山	36.0	70.1	33.3
12	大曼溪	26.9	66.6	36.5
13	巴陵	20.6	62.2	39.4
14	卡拉溪	19.0	61.7	40.5
15	卡議蘭	49.9	67.6	29.5
16	雪霧鬧溪	24.2	70.6	38.3
17	高坡	46.6	57.9	29.2
18	霞雲	20.6	51.6	37.8
19	角板	31.3	47.5	32.1
20	三民溪	29.6	35.7	30.7
21	高邊坪	30.5	47.3	32.3

表 6 石門水庫子集水區河道遞移率

Table 6 River delivery ratio in Shimen Reservoir sub-watershed

編號	子集水區	子集水區與入庫 點河道長度 (公尺)	河道平均坡度 (%)	河道遞移率 (%)
1	薩克亞金溪	65,705	1.78%	39.7
2	延老	58,381	1.49%	40.0
3	他開琴溪	65,776	1.32%	38.6
4	鎮西堡	62,465	1.25%	38.8
5	新光	56,761	1.19%	39.3
6	秀巒	51,057	1.13%	39.9
7	下宇老	42,931	1.11%	41.2
8	泰平	34,805	1.09%	42.8
9	雪山山	34,793	1.24%	43.3
10	萱源	34,793	1.24%	43.3
11	菱山	30,741	1.17%	44.1
12	大曼溪	30,741	1.17%	44.1
13	巴陵	26,679	1.05%	44.8

編號	子集水區	子集水區與入庫 點河道長度 (公尺)	河道平均坡度 (%)	河道遞移率 (%)
14	卡拉溪	22,791	1.03%	46.1
15	卡議蘭	10,176	0.65%	51.4
16	雪霧鬧溪	10,176	0.65%	51.4
17	高坡	1,280	0.33%	71.6
18	霞雲	子集水區位於庫區周圍		100.0
19	角板	子集水區位於庫區周圍		100.0
20	三民溪	子集水區位於庫區周圍		100.0
21	高邊坪	子集水區位於庫區周圍		100.0

河道遞移率，主要參數為匯流口至入庫點之河道長度及河道坡度，參數需使用數值高程模型，本研究使用美國環保署水區綜合型模式 (BASINS) 軟體計算出各河道之上游高程及下游高程以及其河道長度，其計算結果如表 6 所示。其中霞雲、角板、三民溪、高邊坪等子集水區出口已經直接進入庫區，因此子集水區出口至庫區的河道長度為零，若以公式計算其河道遞移率之值為無限大。故此四個子集水區不考慮河道遞移影響，而設為 100%。其餘 17 子集水區之河道遞移率介於 38.6% 至 71.6% 之間，位於上游之子集水區其河道遞移率越低。

3. 產砂熱區

本研究將水庫集水區之產砂熱區定義為該子集水區之土砂入庫量，高於平均土砂入庫量。圖 2 至圖 4 顯示計算結果，圖上上述數值表示該子集水區的土砂產生量。顏色深淺則表示子集水區產砂程度，分級方式以標準差的一半當作分級，最深顏色表示高於平均之一半標準差以上，為土砂生產量最高之子集水區；次深表示高於平均和平均的一半標準差之間。最深與次深顏色者高於平均值，因此為產砂熱區。次淺顏色表示低於平均之一半標準差，最淺表示低於平均之一半標準差，表示此子集水區對於水庫淤積較無造成太大的影響。

(1) 石門水庫

綜整石門水庫土砂計算結果，集水區總土砂生產量為 2,056 萬立方公尺/年，其中 70.1% 殘留在坡面，16.3% 淤積在河道，13.6% 進入庫區。而石門水庫土砂貢獻無特別明顯為沖蝕土砂量或崩塌土砂量所造成，分別佔總土砂生產量之 57.3% 及 42.7%。

分析石門水庫之產砂熱區如表 7 及圖 2 所示，薩克亞金溪、他開琴溪仍是貢獻量相對較高之子集水區，土砂入庫量分別為 40.6 萬立方公尺/年及 40.6 萬立方公尺/年，約佔總土砂入庫量之 29.0%。而上游其餘土砂入庫量較高之子集水區為延老和秀巒，其土砂入庫量分別為 14.7 和 19.1 萬立方公尺/年，靠近下游子集水區貢獻量較高之子集水區為卡議蘭，其土砂入庫量為 17.3 萬立方公尺/年。上游子集水區因崩塌地較多，故土砂量以崩塌土砂量佔比較高，而中下游子集水區因人為開發如農地、交通用地較高，因此土砂量以沖蝕土砂量佔比較高。

表 7 石門水庫子集水區產砂量及河道輸砂量推估表

Table 7 Estimated results of soil yield of sub-watershed and the delivered sediments to Shimen Reservoir

編號	子集水區	面積 (公頃)	沖蝕土砂量 (萬立方公尺/ 年)	崩塌土砂量 (萬立方公尺/ 年)	土砂生產量 (萬立方公尺/ 年)	坡面遞移率 (%)	土砂流失量 (萬立方公尺/ 年)	河道遞移率 (%)	河道沖淤量 (萬立方公尺/ 年)	土砂入庫量 (萬立方公尺/ 年)
1	薩克亞金溪	8,008	148.6	263.0	411.6	24.8	102.2	39.7	61.6	40.6
2	延老	2,670	47.4	51.9	99.3	37.0	36.7	40.0	22.1	14.7
3	他開琴溪	12,797	211.6	278.2	489.8	21.4	105.1	38.6	64.5	40.6
4	鎮西堡	2,882	57.4	30.5	87.8	35.5	31.2	38.8	19.1	12.1
5	新光	2,190	39.7	19.9	59.6	39.7	23.7	39.3	14.4	9.3
6	秀巒	2,824	95.0	37.1	132.0	36.2	47.8	39.9	28.7	19.1
7	下宇老	2,581	46.7	2.9	49.7	36.7	18.2	41.2	10.7	7.5
8	泰平	4,084	64.8	33.7	98.5	31.8	31.3	42.8	17.9	13.4
9	雪白山	3,031	32.3	26.7	59.0	35.5	20.9	43.3	11.9	9.1
10	萱源	1,069	27.8	5.4	33.2	50.6	16.8	43.3	9.5	7.3
11	菱山	3,592	35.4	23.8	59.3	33.3	19.7	44.1	11.0	8.7
12	大曼溪	2,676	37.3	22.1	59.4	36.5	21.7	44.1	12.1	9.6
13	巴陵	2,060	58.2	16.1	74.3	39.4	29.3	44.8	16.2	13.1
14	卡拉溪	1,892	32.6	1.2	33.7	40.5	13.7	46.1	7.4	6.3
15	卡議蘭	4,989	73.3	40.9	114.2	29.5	33.7	51.4	16.3	17.3
16	雪霧閣溪	2,411	26.4	6.7	33.1	38.3	12.7	51.4	6.2	6.5
17	高坡	4,658	50.3	10.6	60.9	29.2	17.8	71.6	5.0	12.7
18	霞雲	2,049	14.3	3.0	17.3	37.8	6.5	100.0	0.0	6.5
19	角板	3,125	37.8	3.9	41.7	32.1	13.4	100.0	0.0	13.4
20	三民溪	2,936	27.0	1.1	28.1	30.7	8.6	100.0	0.0	8.6
21	高邊坪	3,041	13.4	0.0	13.4	32.3	4.3	100.0	0.0	4.3
總共		75,562	1,177	878.7	2,056		615.3		334.6	280.7
平均						34.7		55.3		13.4

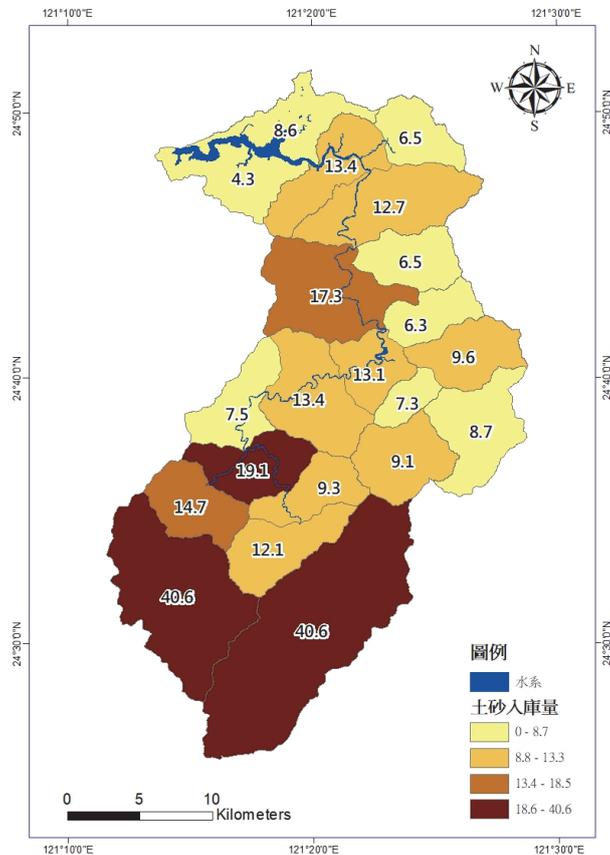


圖 2 石門水庫子集水區之土砂入庫量

Fig.2 The final delivered sediments produced by each sub-watershed of Shimen Reservoir.

(2) 霧社水庫

綜整霧社水庫土砂計算結果, 其集水區總土砂生產量為 910.2 萬立方公尺/年, 其中 57.3% 殘留在坡面, 19.6% 淤積在河道, 23.1% 進入庫區。而霧社水庫集水區內沖蝕土砂量及崩塌土砂量相當, 分別佔總土砂生產量之 53.3% 及 46.7%。

分析霧社水庫之產砂熱區如表 8 及圖 3 所示, 塔

羅灣溪二號為貢獻量相對較高之子集水區, 土砂入庫量為 38.2 萬立方公尺/年, 約佔總土砂入庫量之 18.2%。而平靜二號、濁水溪上游一號和濁水溪上游三號之土砂入庫量亦較高, 分別為 30.0、22.0 及 26.9 萬立方公尺/年。霧社水庫之崩塌土砂量大多數為河川上游, 如濁水溪和塔羅灣溪, 可以加強上游之崩場地治理, 此外平靜子集水區人為開發較為嚴重, 應為地表裸露及農地沖蝕土砂所導致。

表 8 霧社水庫子集水區產砂量及河道輸砂量推估表

Table 8 Estimated results of soil yield of sub-watershed and the delivered sediments to Wushe Reservoir.

編號	子集水區	面積 (公頃)	沖蝕土砂量 (萬立方公尺/年)	崩塌土砂量 (萬立方公尺/年)	土砂生產量 (萬立方公尺/年)	坡面遞移率 (%)	土砂流失量 (萬立方公尺/年)	河道遞移率 (%)	河道沖淤量 (萬立方公尺/年)	土砂入庫量 (萬立方公尺/年)
1	濁水溪上游一號	1,419	30.4	68.9	99.3	46.0	45.7	48.2	23.6	22.0
2	濁水溪上游二號	847	29.3	37.4	66.7	56.1	37.4	48.2	19.4	18.0
3	濁水溪上游三號	2,220	56.0	79.5	135.5	40.3	54.5	49.3	27.7	26.9
4	濁水溪上游四號	1,219	25.1	0.2	25.3	49.7	12.6	49.3	6.4	6.2
5	平靜一號	2,421	54.8	15.4	76.2	37.8	28.9	51.1	14.1	14.7
6	平靜二號	2,931	82.7	44.1	147.7	35.1	51.8	58.0	21.8	30.0
7	塔羅灣溪一號	2,342	44.7	19.8	64.5	39.2	25.3	54.1	11.6	13.7
8	塔羅灣溪二號	1,058	31.8	107.3	139.1	50.8	70.6	54.1	32.4	38.2
9	塔羅灣溪三號	1,941	46.1	25.3	73.1	41.2	30.1	58.0	12.6	17.5
10	馬海僕溪	2,097	27.5	22.1	50.8	40.8	20.7	57.2	8.9	11.8
11	萬大水庫	2,789	24.9	5.1	32.0	34.3	11.0	100.0	0.0	11.0
	總共	21,283	453.3	425.1	910.2		388.6		178.5	210.1
	平均					42.8		57.0		19.1

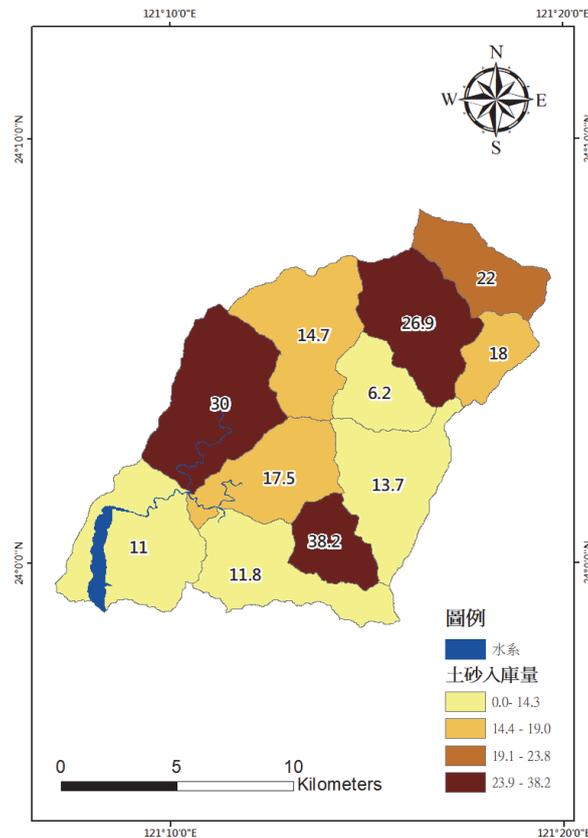


圖 3 霧社水庫子集水區之土砂入庫量

Fig.3 The final delivered sediments produced by each sub-watershed of Wushe Reservoir.

(3) 南化水庫

綜整南化水庫土砂計算結果，其集水區總土砂生產量為 861.0 萬立方公尺/年，其中 63.7% 殘留在坡面，7.0% 淤積在河道，29.3% 進入庫區。而南化水庫集水區內沖蝕土砂量及崩塌土砂量相當，分別佔總土砂生產量之 51.3% 及 48.7%。

分析南化水庫之產砂熱區如表 9 及圖 4 所示，南化三號和南化五號為貢獻量相對較高之子集水區，土砂入庫量分別為 81.5 及 64.4 萬立方公尺/年，約佔總土砂入庫量之 57.7%，其沖蝕土砂量及崩塌土砂量及均有明顯的貢獻，沖蝕土砂量以農地如種植果樹為主，崩塌土砂量為南化水庫地勢陡峭，山坡地多為山崩與地滑地質敏感區而導致崩塌。

表 9 南化水庫子集水區產砂量及河道輸砂量推估表

Table 9 Estimated results of soil yield of sub-watershed and the delivered sediments to Nanhua Reservoir.

編號	子集水區	面積 (公頃)	沖蝕土砂量 (萬立方公尺/年)	崩塌土砂量 (萬立方公尺/年)	土砂生產量 (萬立方公尺/年)	坡面遞移率 (%)	土砂流失量 (萬立方公尺/年)	河道遞移率 (%)	河道沖淤量 (萬立方公尺/年)	土砂入庫量 (萬立方公尺/年)
1	南化一號	2,930	123.8	125.1	249.0	32.8	81.7	54.5	37.1	44.6
2	南化二號	1,957	63.6	71.1	134.8	37.8	50.9	54.5	23.1	27.8
3	南化三號	1,782	112.8	94.7	207.4	39.3	81.5	100.0	0.0	81.5
4	南化四號	595	31.4	25.1	56.6	60.9	34.5	100.0	0.0	34.5
5	南化五號	3,375	109.6	103.6	213.2	30.2	64.4	100.0	0.0	64.4
	總共	10,639	441.3	419.7	861.0		313.0		60.3	252.7
	平均					40.2		81.8		50.5

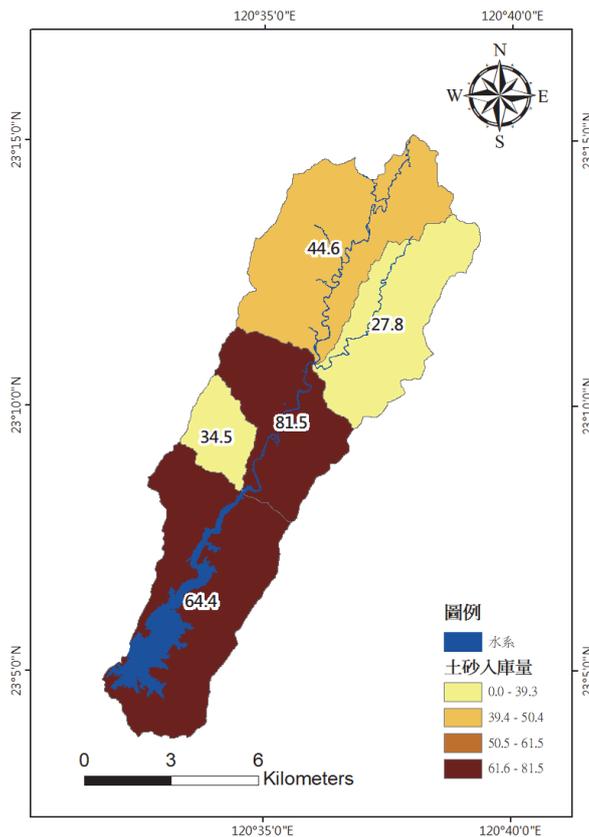


圖 4 南化水庫子集水區之土砂入庫量

Fig.4 The final delivered sediments produced by each sub-watershed of Nanhua Reservoir

四、庫容量測推估來砂量率定土砂入庫量

本研究參考「有效庫容維持綱要計畫」(經濟部，2016) 所列 13 座重點水庫之土砂入庫量，以及根據各水庫庫容量

測數據計算來砂量。庫容量測資料參考水庫「112 年-116 年水庫集水區保育實施計畫」(水利署北區水資源分署,2023；台灣電力股份有限公司，2022；台灣自來水股份有限公司，2022) 及水利署「公務統計報表-水庫清淤執行成果」，計算水庫啟用後年平均淤積量。本研究分析近年淤積量和清淤量

以推估各水庫平均每年來砂量 (式 8), 因歷年來砂量受到當年降雨影響明顯, 因此採用 10 年資料進行本研究方法的驗證。本研究推估結果屬於長期平均數據, 因本研究主要目的為定義產砂熱區, 並非進行單一年度的產砂量推估。因此若推估結果若在過去實際來砂量範圍, 則可驗證本評估方法尚屬合理可行。10 年 (民國 101 年至民國 110 年) 之來砂量推估數據進一步分析其上四分位數、中位數和下四分位數, 評析本研究所計算土砂入庫量的合理性。以石門水庫為例, 石門水庫 101 年到 110 年來砂量介於 -5.7 至 1,123 萬立方公尺/年, 計算出上下四分位數為 41.4 萬立方公尺/年和 342.8 萬立方公尺/年, 中位數為 213.8 萬立方公尺/年 (表

表 10 石門水庫庫容量測推估來砂量

Table 10 Estimation of actual sediments of Shimen Reservoir.

年度 (民國)	設計總容量 (萬立方公尺/年)	當年總容量 (註1) (萬立方公尺/年)	淤積量 (註2) (萬立方公尺/年)	年淤積量 (註3) (萬立方公尺/年)	清淤量 (萬立方公尺/年)	淤積率 (註4) (%)	來砂量 (萬立方公尺/年)
100	30,912	21,526	9,386	-212.0	108.6	30.4%	-103.4
101	30,912	21,714	9,198	-188.0	84.2	29.8%	-5.7
102	30,912	20,720	10,192	994.0	176.6	33.0%	1,123.1
103	30,912	20,826	10,086	-106.0	129.1	32.6%	56.8
104	30,912	20,471	10,441	355.0	162.8	33.8%	452.5
105	30,912	-	-	136.0	97.5	-	233.5
106	30,912	20,199	10,713	136.0	80.7	34.7%	216.7
107	30,912	20,315	10,597	-116.0	110.9	34.3%	-5.1
108	30,912	20,293	10,619	22.0	163.4	34.4%	185.4
109	30,912	20,416	10,496	-123.0	333.8	34.0%	210.8
110	30,912	20,533	10,374	-122.0	428.2	33.6%	306.2
111	30,912	20,422	10,490	116.0	444.5	33.9%	560.5

(註 1) 當年總容量指水庫當年所能容納之最大水量

(註 2) 淤積量指設計總容量減去當年總容量

(註 3) 年淤積量指當年淤積量減去上一年淤積量

(註 4) 淤積率指淤積量除以設計總容量

本研究推估 3 個水庫之土砂入庫量都在可接受範圍內 (表 11)。石門水庫所推估土砂入庫量為 280.7 萬立方公尺/年, 低於有效庫容維持計畫 353 萬立方公尺/年約 20.5%。但石門水庫近 10 年入庫量約 41.4 至 342.8 萬立方公尺/年, 中位數為 213.8 萬立方公尺/年。本研究所估算土砂入庫量落於實際每年來砂量之上下四分位範圍內。霧社水庫推估土砂入庫量為 210.1 萬立方公尺/年, 略高於有效庫容維持計畫 177 萬立方公尺/年, 但霧社水庫近 10 年入庫量介於 18.3 至 307.3 萬立方公尺/年, 中位數為 215.4 萬立方公尺/年。因此霧社水庫推估土砂入庫量落在近 10 年推估每年來砂量之上下四分位範圍。南化水庫所推估土砂入庫量為 252.7 萬立方公尺/年, 接近有效庫容維持計畫 265 萬立方公尺/年。南化水庫近

10)。水庫實際來砂量需考量水庫淤積量、清淤量及水力排砂, 而水力排砂是開放水庫底部的排砂閘門, 減少水庫淤積量的一種措施, 但此部分並無實際數據可供參考。因此本研究來砂量定義並未納入水力排砂量。在計算中, 年淤積量是由當年度淤積量扣除上一年度淤積量而得該年的淤積量。如果當年度淤積量因水力排砂或其他因素反而比上一年度少, 則兩者相減結果會使該年年淤積量為負值。清淤量則皆是正值。如果當年淤積量的負值大於清淤量時, 則總來砂量推估值會出現負值。實際總來砂量不可能為負, 因此未考慮水力排砂為本研究計算公式之限制與假設前提。

$$\text{來砂量} = \text{年淤積量} + \text{清淤量} + \text{水力排砂 (未考慮)} \quad (\text{式 8})$$

10 年入庫量約 100.2 至 230.3 萬立方公尺/年, 中位數為 182.9 萬立方公尺/年。

水庫實際土砂入庫量需於入庫溪流設置流量及懸浮固體 (濁度) 監測站進行評估, 不過目前有完整監測流量計濁度測站之水庫不多, 因此本研究參考水庫淤積量情形推估土砂入庫量。影響水庫淤積除了集水區上游來砂量之外, 其淤積量之多寡仍會受到水庫溢流或排砂、水庫運轉、颱風豪雨事件等影響, 本計畫並無考量水庫排砂情形, 故土砂入庫量應會略大於水庫淤積量, 與本研究推估之結果相似, 主要產出為評析水庫子集水區產砂熱區, 並以產砂量相對較高之子集水區作為後續治理對象。

表 11 本研究推估土砂入庫量與實際來砂量比較結果

Table 11 Comparison of the estimated and actual sediments of the studied reservoirs.

水庫	面積 (平方公里)	本研究推估土砂入庫量 (萬立方公尺/年)	庫容綱要計畫評估 (萬立方公尺/年)	10年來砂量 (萬立方公尺/年) (下四分數~上四分數)	水庫啟用後平均淤積量 (萬立方公尺/年)
石門水庫	755.6	280.7	353.0	213.8 (41.4~342.8)	177.8
霧社水庫	212.8	210.1	177.0	215.4 (18.3~307.3)	169.4
南化水庫	106.4	252.7	265.0	182.9 (100.2~230.3)	245.4

五、結論與建議

本研究使用通用土壤流失公式 USLE 及坡面坡度與崩塌深度法分別算出集水區沖蝕土砂量及崩塌土砂量，兩者相加則為集水區平均每年土砂生產總量，再利用遞移率去計算每個子集水區所土砂入庫量。本研究推估石門水庫之土砂入庫量為 280.7 萬立方公尺/年，沖蝕土砂量及崩塌土砂量所造成，分別佔總土砂生產量之 57.3% 及 42.7%，產砂熱區為薩克亞金溪、他開琴溪、延老、秀巒和卡議蘭。霧社水庫之土砂入庫量為 210.1 萬立方公尺/年，集水區內沖蝕土砂量及崩塌土砂量相當，分別佔總土砂生產量之 53.3% 及 46.7%，產砂熱區為濁水溪上游一號、濁水溪上游三號、平靜二號和塔羅灣溪二號；南化水庫之土砂入庫量為 252.7 萬立方公尺/年，集水區內沖蝕土砂量及崩塌土砂量相當，分別佔總土砂生產量之 51.3% 及 48.7%，產砂熱區為南化三號和南化五號。本研究推估結果大多落在實際來砂量範圍內，應屬於合理可行的推估方法。但本研究崩塌土砂量並無實際估算堆積面積，乃是使用坡面遞移率估算子集水區崩塌土砂量最後的產生量，此部分未來可再精進，以免高估崩塌土砂量。此外，採用 USLE 推估坡面土壤沖蝕量，其中土地利用圖資若無更細分類，僅採用農業用地係數代表各種不同農業用地，也可能有高估或低估情況。建議未來在 C 值應用上，可針對更詳細的現地農業用地資料分析。由於此方法須採用大量的圖資資料，但受限於土地利用圖資與劃分來自不同單位以及不同更新年份，使用上與實際現場恐有差異，建議由此研究方法所得之產砂熱區後，仍應搭配現勘，確定現場與圖資內容的差異程度。本研究的水庫來砂量統計以水庫年淤積量與清淤量總和計算，但實際來砂量應再加上水力排砂量，這部分應無實際數據則無納入實際來砂量計算中。未來若有實際數據，建議納入水庫實際來砂量計算。

誌 謝

感謝本研究由經濟部水利署計畫經費支持，計畫編號：MOEAWRA1120218，

參考文獻

- [1] 土砂管理研究グループ火山、土石流チーム，(2005)，「山地流域における土砂生産予測手法の研究」，北海道開発局建設部河川計画課。
- [2] 水利署北區水資源分署 (2023)，「石門水庫、榮華及鳶山堰水庫集水區保育實施計畫 (112-116 年)(核定本)」，第 42-45 頁。(Northern Region Water Resources Branch, Water Resources Agency. (2023). *Reservoir Watershed Conversation Implementation Plan of Shimen Reservoir, Ronghwa, and Yuanshanyan*, 42-45. (in Chinese))
- [3] 台灣自來水股份有限公司 (2022)，「水庫集水區保育實施計畫」，第 32-34 頁。(Taiwan Water Corporation. (2022).

- Reservoir Watershed Conversation Implementation Plan*, 32-34. (in Chinese))
- [4] 台灣電力股份有限公司 (2022)，「水庫集水區保育實施計畫」，第 28-32 頁。(Taipower. (2022). *Reservoir Watershed Conversation Implementation Plan*, 28-32. (in Chinese))
- [5] 行政院農業委員會水土保持局 (2017)，「水土保持手冊 (106 年版)」，行政院農業委員會水土保持局。(Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation. (2017). *Soil and Water Conservation Guideline*. (in Chinese))
- [6] 何智武、段錦浩 (1983)，「國姓水庫集水區泥砂產量之試驗分析研究」，國立中興大學水土保持研究所。(Ho, Z.W., and Tuan, C.H. (1983). *Test Analysis of Guoshi Reservoir Sediment Yield*. (in Chinese))
- [7] 吳俊鉉、陳樹群 (2004)，「崩塌潛勢預測方法於台灣適用性之初探」，水土保持學報，36(4)，295-306。(Wu, H.C., and Chen, S.C. (2004). "The Evaluation of the Landslide Potential Prediction Models Used in Taiwan." *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(4), 295-306. (in Chinese))
- [8] 吳建民 (1978)，「臺灣地區河川輸砂量之推估公式」，集水區及河川之經理研討會論文集，國立臺灣大學水資源研究小組，184-206。(Wu, C.M. (1978). "Estimation equations for river sediment load in Taiwan." *Proceedings of Watershed and River Management Conference*, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 184-206. (in Chinese))
- [9] 林文賜、林昭遠、周天穎 (2003)，「集水區空間資訊萃取及坡面泥砂產量推估之研究」，航測及遙測學刊，8(3)，33-58。(Lin, W.T., Lin, Z.Y., and Chou, T.Y. (2003). "Automated Watershed Delineation for Spatial Information Extraction and Slopeland Yield Evaluation." *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 8(3), 33-58. (in Chinese))
- [10] 林俐玲 (1995)，「覆蓋因子(C 值)之評定」，中美陡坡土壤流失量推估技術研討會論文集，第 109-116 頁。(Lin, L.L. (1995). "Determination of land cover (C) factor." *Proceedings of Taiwan and USA Slopeland Soil Loss Estimation Conference*, Taiwan. 109-116. (in Chinese))
- [11] 林俐玲，林可薇，陳品岡，沈哲緯 (2011)，「斜坡單元進行山坡地土壤流失量之推估」，水土保持學報，43(4)，395-410 頁。(Lin, L.L., Lin, K.W., Chen, P.G., and Shen, C.W. (2011). "Application of Slope Unit in Soil Loss Estimation." *Journal of Soil and Water Conservation*, 43(4), 395-410. (in Chinese))
- [12] 林彥享 (2002)，「運用類神經網路進行地震誘發山崩之潛感分析」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。(Lin, Y.H. (2002) *Application of Neural Network to Landslide Susceptibility Analysis*, Master Thesis, National Central University, Taiwan. (in Chinese))
- [13] 林昭遠、陳昱豪、林家榮 (2006)，「集水區泥砂產量推估之研究」，中華水土保持學報，38(2)，207-218。(Lin,

- C.Y., Chen, Y.H., and Lin, C.R. (2006). "A study of watershed sediment yield estimation." *Journal of Soil and Water Conservation*, 38(2), 207-218. (in Chinese))
- [14] 張舜孔 (2002), 「類神經網路應用在阿里山公路邊坡破壞因子之分析研究」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文。(Chang, S.K. (2002) *Application of Neural Network on Slope Failure Factors in Alishan Highway*, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan. (in Chinese))
- [15] 連惠邦、林秉賢、莊政霖、黃俊霖 (2008), 「斜面土體崩壞潛勢與土石流發生潛勢之相關研究—以嘉義豐山集水區為例」, 中華水土保持學報, 39(2), 225-239。(Lien, H.P., Lin, B.S., Chuang, C.L., and Huang, C.L. (2008). "Relationship between Slope Failure Potential and Debris Flow Occurrence Potential-Case Study of Chai-Yi Feng-Shan Watershed." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 39(2), 225-239. (in Chinese))
- [16] 陳樹群、賴益成 (1999), 「河川與集水區泥砂遞移率之推估」中華水土保持學報, 30(1), 47-57。(Chen, S.C., and Lai, I.C. (1999) "Estimating the Sediment Delivery Ratio in Rivers and Watersheds" *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 30(1), 47-57. (in Chinese))
- [17] 楊凱傑 (2016), 「石門水庫集水區土壤沖蝕的地形因子分析」, 國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士論文。(Yang, K.J. (2016) *Terrain Factor Analysis of Soil Erosion in Shihmen Reservoir Watershed*, Master Thesis, National Taipei University of Technology, Taiwan. (in Chinese))
- [18] 經濟部水利署 (2016), 「水庫庫容有效維持綱要計畫」。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs. (2016), *Master Plan of Reservoir Volume Maintenance*. (in Chinese))
- [19] 經濟部水資會 (1983), 「臺灣東部區域重要河川輸砂量研究」。(Water Resources Planning Council. (1983) *Sediment Load Study of Important Rivers in Eastern Taiwan*. (in Chinese))
- [20] 蔡易達 (2018), 「集水區土砂收支數值分析模型及其應用」, 逢甲大學土木工程系博士論文。(Tsai, I.T. (2018) *Numerical Analysis Model of Sediment Budget in Watersheds and its Application*, PhD Dissertation, Feng Chia University, Taiwan. (in Chinese))
- [21] 盧育聘 (2003), 「類神經網路於公路邊坡破壞潛能之評估」, 立德管理學院資源環境研究所碩士論文。(Lu, Y.P. (2003) *Evaluation of Highway Slope Failure Using Artificial Neural Networks*, Master Thesis, Leader University, Taiwan. (in Chinese))
- [22] 賴益成 (1998), 「集水區泥砂遞移率之推估研究」, 國立中興大學水土保持學碩士論文。(Lai, I.C. (1998) *Estimating the Sediment Delivery Ratio of the Watershed*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan. (in Chinese))
- [23] 簡李濱 (1992), 「應用地理資訊系統建立坡地安定評估之計量方法」, 國立中興大學土木工程學系碩士論文。(Jian, L.B. (1992) *Application of Geographic Information System in the Quantitative Assessment of Hillslope Stability*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan. (in Chinese))
- [24] Fausto Guzzettia, Francesca Ardizzone, Mauro Cardinali, Mauro Rossi, Daniela Valigi. 2009. Landslide Volumes and Landslide Mobilization Rates in Umbria. *Earth and Planetary Science Letters*, 279 (3-4), 222-229.
- [25] Lida, T and Okunishi, K. (1983). Development of hillslopes due to landslides, *Geomorphology*, 46, 67-77.
- [26] McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.R., Mulchler, C.K., and Meyer, L.D., 1987, "Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation." *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 30, no. 5, pp. 1387-1475.
- [27] Takahashi, T. (1982) Study on deposition of debris flows (3): Erosion of debris fan, *Annals of Disaster Prevention Research Institute*. Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 25B-2, 327-348. (in Japanese)
- [28] Wischmeier, W.H., and Smith D.D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning," U.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook*.

2024 年 03 月 11 日 收稿

2024 年 05 月 23 日 修正

2024 年 07 月 08 日 接受