

石門水庫集水區河道輸砂特性分析與土砂入庫量推估

林泰立 張建業 林鎮洋 陳起鳳*

摘要 臺灣山區水庫常受強降雨與颱風影響，導致泥砂輸出高度變異。土砂輸出推估研究中，河道輸砂部分受到泥砂本身特性以及水理條件等影響最不易推估。本研究以石門水庫為例，以實測含砂濃度與流量推估懸移載，以及使用何黃公式推估推移載，再以實際來砂量進行驗證。研究結果顯示，石門水庫集水區主流河道之懸移載與推移載比例約為 70:30，豐水期輸砂量占全年 86%。透過水位－流量回歸與異常值剔除，輸砂估算誤差由原先的 20.9%降至 11.2%，於部分穩定年度可控制於 7%內。在此架構下，未來若有即時含砂濃度與流量就可推估即時河道輸砂量。綜合本研究推估、觀測與前人模式結果，石門水庫 2013 至 2022 年每年平均土砂入庫量約為 301.6 至 358.7 萬立方公尺，落於歷史合理範圍。本研究結果可應用於水庫淤積預警、清淤規劃與庫容管理，對水庫永續經營具實質助益。

關鍵詞：水庫集水區、河道輸砂量、土砂入庫量、即時預警

Analysis of River Sediment Transportation and Sediment Yield in the Shihmen Reservoir Watershed

Tai-Li Lin Kean-Yip Chong Jen-Yang Lin Chi-Feng Chen*

ABSTRACT Rapid accumulation of silt in reservoirs poses a major challenge for water resource management. However, estimating sediment transportation is difficult because of the complex interaction between sediment properties and hydraulic conditions. In this study, a reliable and efficient method was developed to assess sediment transportation and identify sediment hotspots. Shihmen Reservoir was used as an example. The results indicated that the ratio of suspended load to bed load was approximately 70:30. The high-water season accounted for 86% of the annual sediment load. Through water level-discharge regression and outlier removal, the sediment load estimation error was reduced from 20.9% to 11.2% and was controlled within 7% in stable years. Overall, this method can enable the real-time estimation of channel sediment load in the presence of real-time sediment concentrations and flow rates. When this study's estimates were combined with observations and previous modeling results, the average annual sediment inflow to the Shihmen Reservoir in 2013–2022 was found to be approximately 3.016–3.587 million cubic meters, a range that is within historical trends. These findings can be applied to reservoir sedimentation early warning systems, desilting plans, and reservoir storage capacity management strategies, providing substantial benefits for the sustainable operation of reservoirs.

Key Words: reservoir watershed, sediment transportation, sediment yield, real-time warning

一、前言

臺灣水庫多位於山區，集水區地形陡峻、地質破碎，颱風與強降雨事件頻繁，導致泥砂輸送具有高度的時空變異性。強降雨導致大量泥砂迅速匯入水庫庫區，不僅加速淤積，亦嚴重影響水庫的蓄水功能與使用壽命。準確估算長期平均輸砂量與實際入庫土砂量，對水資源規劃、清淤策略制定及水庫永續經營至關重要。Walling(1994) 指出，集水區出口的土砂產量是評估上游土壤侵蝕與輸送過程的重要指標。然而，輸砂行為受地形、坡度、河網結構、植被覆蓋與土壤性質等複雜因素影響，導致相關模型在參數設置上具有高度不確定性。集水區常被視為「黑盒系統」，傳統模型多未充分

考慮防砂壩等人為設施對輸砂通量與沉積分布的調節作用(林泰立等, 2024)，增加估算的困難。因此，欲精確掌握集水區輸砂狀況，仍需透過長期監測入庫溪流的流量與泥砂濃度，並結合本土化估算方法，以提升預測的可靠度。

河川輸砂主要由懸移載與推移載構成，兩者在運移機制與估算方法上差異顯著。懸移載指粒徑細小、易被水流懸浮的泥砂，通常佔總輸砂量的主要部分。Allen & Petersen (1981) 指出，若人為採樣方法不當，可能導致懸移載長期輸砂量高估 30%以上。此外，懸移載濃度高峰與洪峰流量不同步，即使使用相同的流量與濃度資料，不同率定方式也可能導致估算偏差 (Griffiths, 1979; Adams, 1980)。推移載則指與河床

直接接觸的粗粒物質，其輸送量在洪峰期間變化劇烈，採樣極具挑戰性。採樣器接近或接觸河床時，易干擾水流結構與底床物質的自然運移，且推移載輸送量常在短時間內急劇變化，需長時間採樣以降低變異性誤差（連惠邦，2017）。由於直接觀測推移載的困難，實務上多採用間接分析法，透過水力參數與床質樣本，應用經驗或半經驗公式估算推移量（王如意，1988）。然而，國際常用公式（如 MPM、Schoklitsch 公式）因未充分考慮臺灣河川的陡坡、急流與粗大顆粒特性，適用性受限，誤差較大。為此，黃宏斌（1992）基於何智武與黃宏斌（1983）的水槽試驗資料，提出針對臺灣河川特性的「何黃公式」，簡化參數並提升擬合度。

2017 年《庫容有效維持綱要計畫》中石門水庫引用霞雲水砂觀測站自 1963 年起的歷史資料，透過篩選流量超過 300 每秒立方公尺的洪水事件，結合懸浮含砂濃度（Suspended Sediment Concentration, SSC）的迴歸分析，估算年平均入庫土砂量約為 353 萬立方公尺。目前多數水庫缺乏專用的含砂濃度觀測系統，實務上常以濁度（Turbidity）或總懸浮固體（Total Suspended Solids, TSS）作為替代指標。許盈松等（2007）研究顯示，濁度與泥砂濃度具有高度相關性，可作為近似估算依據，但濁度計受限於量測上限（約 3,000 NTU），在洪水高濃度情境下易發生失真。例如，2004 年艾利颱風期間，石門水庫原水濁度曾飆升至 70,000 NTU，遠超傳統濁度儀的量測能力，導致估算結果偏低。為克服此問題，本研究參考環境部《水中懸浮固體檢測方法－自動監測設施法》，採用霞雲水砂觀測站配備的 SOLITAX sc 感測器，以校正曲線將濁度換算為重量濃度（g/L），提升洪峰期間數據的穩定性與準確性。因此，本研究以總懸浮固體作為懸移載估算的基礎，並進一步推導總輸砂量。

集水區輸砂量可由上述方法進行估算，然過去實測資料有限，難以驗證總輸砂量推估是否合理。近年來，水庫入庫泥砂量的定義逐步完善。過往僅涵蓋自然沉積或人工清除的泥砂量，2024 年起水利署將水力排砂納入清淤統計，反映政府對泥砂收支管理的重視（水利署，2025）。此政策更能提供完整的數據基礎，與推估值進行比對。但輸砂估算仍受流量資料品質的限制。Ho et al.(2023) 指出，流量數據的合理性與穩定性是影響輸砂模擬精度的關鍵。其結合 HEC-HMS、LVMDR、SEEDR 與 SRH-2D 等模型，建構降雨、流量與泥砂的耦合關係，並透過回歸修正方法補全資料與排除異常值，提升模型預測精度。因此，在估算方法與實測資料等種種挑戰下，集水區輸砂量仍需要完整評估，尤其不同估算方法所用參數需進行案例調整，以達到適合該集水區使用。

有鑑於上述挑戰，本研究以石門水庫為案例，整合霞雲水砂觀測站的懸浮固體濃度與流量資料，分別估算懸移載與

推移載輸砂量，並推導集水區年平均入庫泥砂總量。同時，結合歷年清淤成果、庫容變化與水力排砂實際數據，驗證入庫土砂量，並建構一套具即時性、代表性與操作性潛力的輸砂分析模型。本研究成果可應用於水庫泥砂預警和庫容管理，對提升水庫永續經營能力與政策效益具實質貢獻。

二、研究區域與研究方法

1. 研究區域

(1) 區域概況及背景介紹

石門水庫位於臺灣北部大漢溪中上游河段，集水區橫跨桃園市復興區與新竹縣尖石鄉，總面積約 763.4 平方公里。地形東南高、西北低，海拔介於 500 至 3,500 公尺之間，平均坡度約 34%，其中 59.5% 的區域坡度大於 55%，高低落差劇烈，尤以泰崗溪、白石溪與三光溪流域的 V 形峽谷地形最具代表性（水利署，2022）。地區岩性以第三至第四紀沉積岩為主，包括砂岩、頁岩與硬頁岩，構造裂隙與板理發達，加上氣候濕熱及極端降雨條件，使岩層易風化崩解，產生大量細顆粒泥砂。土壤則因地形與母岩多樣，呈現紅壤、沖積土及石質土等多樣性，顯示其具高度的源頭供砂異質性。

石門水庫位處亞熱帶季風氣候區，年均降雨約 2,500 毫米，豐水期集中於 5 至 10 月，主要來自颱風、西南氣流及梅雨鋒面，短時強降雨常導致逕流急遽上升，輸砂量暴增，造成水庫淤積壓力加劇。自 1963 年啟用以來，石門水庫歷經多次颱風侵襲，淤積情況日益嚴重。至 2023 年底，累積淤積量已達 1 億 490 萬立方公尺，占設計總容量（3 億 912 萬立方公尺）的 33.93%。綜合地形陡峻、地質脆弱及降雨集中等條件，石門水庫集水區呈現高度輸砂潛勢，為本研究探討對象。

(2) 極端水文紀錄

2013 年至 2022 年間石門水庫持續受到多次極端事件的考驗，表 1 彙整了《111 年度經濟部水利署北區水資源局統計年報》（北區水資源分署，2023a），此期間最大放流量超過每秒 1,000 立方公尺的歷史上對石門水庫淤積影響顯著的水文事件。其中 2013 年蘇力颱風、2015 年蘇迪勒颱風與杜鵑颱風，以及 2016 年梅姬颱風尤為顯著。這些事件的洪峰流量及最大放流量均達到每秒 3,000 立方公尺以上。對水庫的蓄水功能與結構安全帶來嚴峻挑戰。

表 1 石門水庫極端水文事件統整表

Table 1 Summary of Typhoon and hydrological events in the Shimen Reservoir

年分 (西元)	極端水文名稱	日期 (起~迄)	總降雨量 (mm)	洪峰流量 (cms)	最大放流 (cms)
2013年	蘇力颱風	07/12~07/18	450	5,458	4,949
	潭美颱風	08/20~08/28	543	2,410	1,953
	天兔颱風	09/20~09/25	268	1,195	1,060
	菲特颱風	10/04~10/11	279	1,393	1,320
2015年	蘇迪勒颱風	08/06~08/09	473	5,634	5,026
	杜鵑颱風	09/27~09/29	409	3,802	3,051
2016年	梅姬颱風	09/26~09/29	428	4,268	4,000
2017年	0602豪雨	06/02~06/06	271	1,428	1,422
2019年	米塔颱風	09/29~10/03	202	1,091	1,047
2021年	烟花颱風	07/21~07/30	508	2,309	2,304
	圓規颱風	10/10~10/16	283	1,301	1,284
2022年	軒嵐諾颱風	09/01~09/09	435	1,426	1,381
	梅花颱風	09/10~09/19	336	1,103	1,084
	尼莎颱風	10/15~10/22	369	1,749	1,682

2. 研究方法

水庫平均總體土砂入庫量應以建庫以來的長期數據進行評估，然實務上存在資料缺漏問題，例如 2012 年的含砂濃度資料並不完整，而水力排砂相關數據亦自 2012 年才開始建置。因此，本研究選擇以 2013 至 2022 年為分析期間，在可取得且具代表性資料的基礎上進行十年尺度分析，不僅能貼近當前實況，也較能反映集水區年際輸砂變異與典型產砂特性。

河道輸砂量分為懸浮載與推移載，本研究懸浮載的推估乃利用實際含砂濃度與流量資料，另一方面利用實測流量與何黃公式推估推移載，兩者相加得出霞雲水砂觀測站之河道輸砂量，同時進一步分析懸移載與推移載之比例關係，以及全年輸砂量之豐枯期變異情形（豐枯比）。然而，觀測站僅能反映局部河段之輸砂情形，無法直接代表整體集水區之輸砂狀況。因此，本研究參考林泰立等 (2024) 同樣在石門水庫集水區所提出的土壤沖蝕量、崩塌量與遞移率概念模型，結合水砂觀測站位置與庫區上游比例，採用比例法估算整體集水區之輸砂量。除了推估方法外，另外以實際監測之來砂量，包括年淤積量、清淤量與水力排砂量等，驗證本研究推估結果。同時透過平均值與分位數統計分析，呈現其在年度尺度上的變異特性。由於含砂濃度與流量有即時監測數據，若驗證可行，則未來可建立即時估算之輸砂潛勢模型，掌握即時輸砂量。研究流程如下圖 1。

(1) 水砂觀測站

石門水庫集水區靠近庫區設有兩個水砂觀測站，分別為羅浮水砂觀測站與霞雲水砂觀測站。在工程實務中，羅浮水砂觀測站常被視為入庫點，且北區水資源分署 (2023c) 說明該測站配備基於時域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 技術的含砂濃度觀測站，其觀測原理主要基於電磁波在不同介質中傳遞速度的差異，透過理論分析與計算電磁波於水中感測器的走時，推估河川水中含砂濃度。但羅浮測站未配

備流量實測設備，其入庫流量數據需依據出庫流量反推估算，存在潛在的數據誤差與時效性限制。

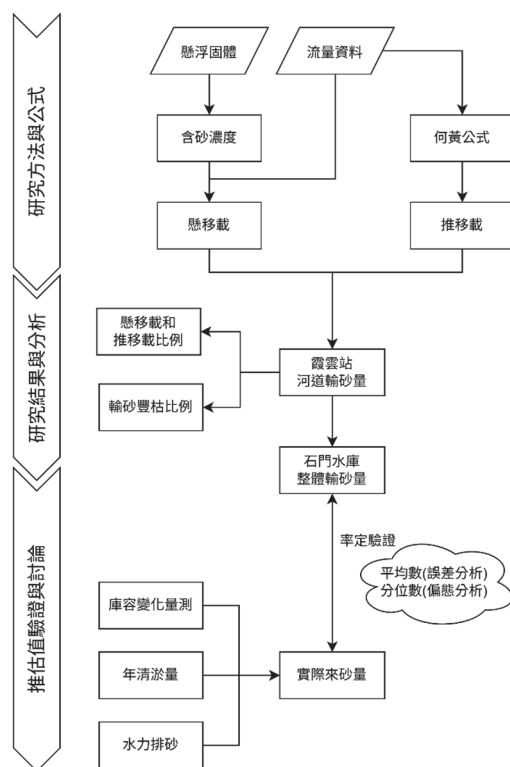


圖 1 研究流程圖

Fig.1 Flowchart of this study

因此，本研究選定霞雲水砂觀測站測站作為輸砂入庫點。霞雲水砂觀測站亦設有流量水文觀測站，可提供準確的流量數據，雖未設專用含砂濃度觀測站，但霞雲站配備濁度計與懸浮固體濃度計，可利用此實測值推估含砂濃度。霞雲站懸浮固體濃度的量測採用 Hach 公司生產的 SOLITAX sc 儀器，主要針對水體中的懸浮顆粒進行量測，該感測器配備兩刷式自動清洗

功能，感測器外殼以不銹鋼保護，可完全沉入水中直接測量，範圍為 0.001 至 150 g/L，精確性誤差在 5% 以內，確保數據的可靠性和穩定性（北區水資源分署，2011）。

(2) 流量與輸砂量

① 流量

參考每年經濟部水利署公告《水文年報》中日平均流量與日平均水位資料，本研究使用對數延伸法繪製水位-流量曲線圖，以檢核流量資料品質的可靠性。首先先假設水位-流量關係為下（式 1 所示），其河川無流量時水位（Z 值）、常數 a 和 b 為未知，以試誤法找出流量 $\log(Q)$ 和水深 $\log(H-Z)$ 成一直線， R^2 值最高時表示其 Z 值最吻合無流量時水位，求出每年水位-流量曲線方程式（王如意與易任，1988）。本研究發現部分年份的水位-流量曲線方程式並無依照乘冪形式呈現，可能當年資料有異常情形，因此推估過程中剔除異常年份，重新回歸後取得霞雲水文站 2013-2022 年的水位-流量曲線方程式。再利用此回歸公式將異常年份水位資料帶入，取得調整後的流量。

$$Q = a(H - Z)^b \quad (\text{式 1})$$

Q：流量 (cms)

H：水位 (m)

Z：無流量時水位 (m)

a、b：常數

② 輸砂量

水利署官網中水利名詞定義輸砂為泥砂在水流中運移的各種現象與過程。由於水與砂之運動相當複雜，泥砂運移學乃是研究此種二相流的力學，因為泥砂為固態，而水流為液態，泥砂的運動完全受制於水流之作用力，如果含砂濃度太高時，亦會相互作用。本研究參考水利署（2013）《水利工程技術規範-河川治理篇》定義河川輸砂量可分為依運動形式和性質的不同可分為懸移質輸砂量與推移質輸砂量，如圖 2 和式 2 所示。

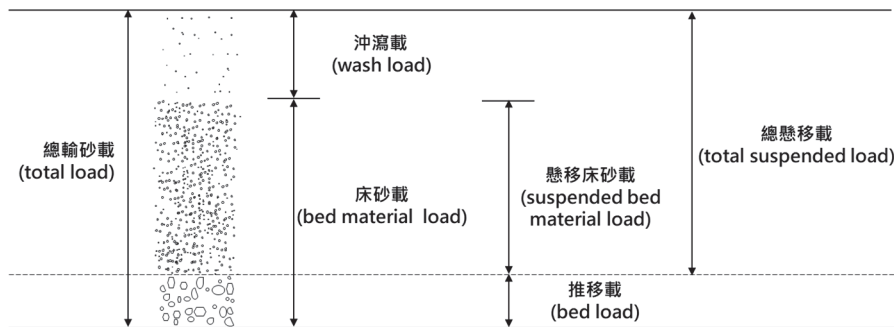
$$Q_r = Q_s + Q_b \quad (\text{式 2})$$

式中，

Q_r ：總輸砂量 (m^3/s)

Q_s ：懸移載輸砂量 (m^3/s)

Q_b ：推移載輸砂量 (m^3/s)



資料來源：修改自 張偉瑛 (2012)

圖 2 河道輸砂型式分類示意圖

Fig.2 Classification of river sediment transport types

(3) 懸移載

本研究參考水利署（2013）《水利工程技術規範—河川治理篇》中之敘述，該規範指出各水文站監測資料多屬懸移質輸砂量，且其推估原理可簡化為流量與平均含砂濃度的乘積（如式 3 所示）。因此，本研究假設觀測資料所提供之含砂濃度為垂向平均值，並據此以流量乘以含砂濃度計算懸移載輸砂量。泥砂密度假設為每立方公尺 1.4 公噸。

$$Q_s = C_v Q / D \quad (\text{式 3})$$

式中，

Q_s ：懸移載輸砂量 (m^3/s)

C_v ：含砂濃度 (kg/m^3)

Q：流量 (m^3/s)

σ ：泥砂密度 (kg/m^3)

(4) 推移載

推移質輸砂係形成河川斷面之最重要因素，因不易直接測量，通常採用公式間接估算。採取河床質樣本作顆粒分析，再配合水力的參數以經驗或半經驗公式加以推定（王如意與易任，1988）。本研究參照臺灣較常推估的公式，以臨界流量趨動型的何黃公式（式 4、式 5 與式 6）所估算，原理為推移質之移動，係流速超過其臨界值之結果。

公式參數皆參考農村水保署（2017）《水土保持手冊》中的建議數據，其中溪床坡度以霞雲水砂觀測站至上游高義水砂觀測站的平均溪床坡度，當中最關鍵溪床粒徑參數，則參考水利署（2024）統整農村水保署 2006 至 2009 年的河床粒徑調查報告，採取最靠近水砂觀測站之主河道河床粒徑調查結果（如圖 3 所示），附近有取樣點編號 61 至 64 號，其中 64 號該數值明顯偏離其餘測量結果，超出合理範圍，判定為離群值，不納入分析，因此本研究採取中央粒徑（ d_{50} ）為 12mm

以作為估算推移載之粒徑。最後將估算出的單位溪寬推移載運移量與溪寬乘積則為推移載輸砂量。

$$q_b = 0.4383 \cdot S^{1.41} \cdot (q - q_c) \quad (\text{式 } 4)$$

$$q_c = 1.259 \cdot 10^{-7} \cdot D_g^{1.56} \cdot S^{-1} \quad (\text{式 } 5)$$

$$D_g = \frac{D}{\left[\frac{v^2}{(\frac{\sigma}{\rho} - 1)g} \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (\text{式 } 6)$$

式中，

q_b ：單位溪寬推移載運移量 (cms/m)

q_c ：單位溪寬之推移載起動流量 (cms/m)

q ：單位溪寬流量 (cms/m)

S ：溪床坡度 (dimensionless)

D_g ：溪床之無因次粒徑 (dimensionless)

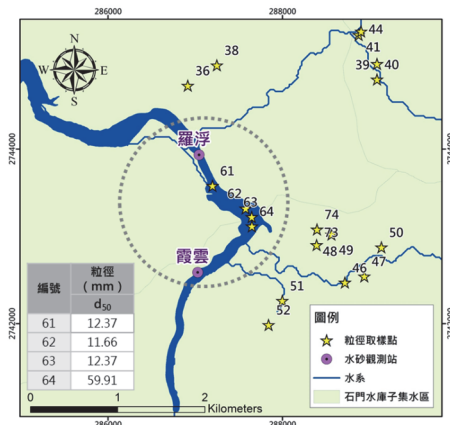
D ：推移載之粒徑 (m)，一般以 d_{50} 代替

σ ：泥砂密度 (kg/m^3)，一般石英砂約為 $2,650 \text{ kg/m}^3$

ρ ：水密度 (kg/m^3)，水溫 20°C 時，約為 $1,000 \text{ kg/m}^3$

v ：水之動黏滯係數 (m^2/s)，水溫 20°C 時，約為 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

g ：重力加速度 (m/s^2)，一般約為 9.8 m/s^2



資料來源：水利署 (2024)

圖 3 河床粒徑取樣點位置圖

Fig.3 Location map of riverbed grain size sampling points

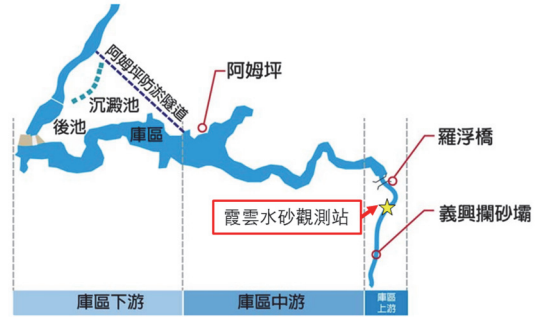
(5) 來砂量

土砂入庫量即來砂量，為每年由集水區輸送至水庫或沉積於庫區之土砂總量。為了解集水區的實際來砂量，本研究參考北區水資源分署 (2023a)《111 年度經濟部水利署北區水資源局統計年報》，以水庫庫容變化實測數據估算來砂量，定義為年淤積量、年清淤量與水力排砂量之和 (見式 7 所示)。以石門水庫為例，其清淤數據依清淤地點與方式分為義興壩清淤、羅浮清淤及庫區抽泥。然而從空間看，如圖 4 所示，義興壩清淤位於霞雲水砂觀測站 (入庫點) 上游，不計入最後的實際來砂量。因此，本研究在計算石門水庫來砂量時，僅納入羅浮清淤、庫區抽泥及水力排砂數據，來驗證入庫點的實際貢獻。

另外，阿姆坪防淤隧道於 2022 年竣工，是石門水

庫關鍵的淤泥處理設施，採用複合式清淤技術，而非單純的水力排砂。平時抽泥經由隧道上方的輸泥管輸送至出口，篩分後細泥放淤於沖淤池，待颱風時引洪水進行沖淤，使回歸大漢溪及出海。因此阿姆坪防淤隧道中的排砂量屬於淤積量部分，不重複計入每年來砂量。

$$\text{來砂量} = \text{年淤積量} + \text{清淤量} + \text{水力排砂} \quad (\text{式 } 7)$$



資料來源：修改自 北區水資源分署 (2023b)

圖 4 石門水庫清淤策略位置圖

Fig.4 Location map of dredging strategies in the Shimen Reservoir

三、結果與討論

1. 水砂測站流量分析

(1) 建立回歸曲線並修正流量

本研究分析經濟部水利署《水文年報》(2013 至 2022 年) 之水位與流量數據，推導年度水位-流量曲線方程式，計算結果如表 2 所示，用以評估流量資料之可靠性。但 2016 年、2017 年與 2021 年的水位-流量曲線明顯偏離典型乘幕關係，如圖 5、圖 6 與圖 7，研判可能為資料異常或數據誤植所致。

為提升資料一致性與回歸式的穩定性，本研究另建立一套流量修正方法，假設所有年份應符合乘幕關係。對其餘七個年份 (2013、2014、2015、2018、2019、2020、2022) 進行回歸分析後發現，其決定係數 (R^2) 均高於 0.88，顯示回歸式具高度解釋力。基此，本研究統整上述七年數據，剔除異常年份 (2016、2017、2021)，重新建立十年尺度的水位-流量回歸方程式， R^2 達 0.92，顯示整體迴歸模型具良好代表性與可信度 (見圖 8)。最後，將 2016、2017 與 2021 年之原始水位代入該回歸式，重新計算對應之流量，以修正異常資料，使其符合物理意義並提升資料整體一致性。

(2) 驗證修正後流量

霞雲水砂觀測站與石門水庫實際入庫流量測量點 (羅浮水砂觀測站) 距離相近，因此本研究參考北區水資源分署 (2023a)《111 年度經濟部水利署北區水資源局統計年報》中的石門水庫年入庫流量數據，將修正後的霞雲水砂觀測站流量與石門水庫的年入庫流量進行對比 (表 3 所示)。結果顯示，修正後的流量與石門

水庫年入庫流量的趨勢較為一致,且較貼近 45 度趨勢的輔助灰色虛線 (圖 9 所示),顯示修正方法有效提升了流量數據的準確性與代表性。

表 2 各年分之霞雲水砂觀測站水位-流量曲線方程式統整表
Table 2 Summary table of stage-discharge curve equations at the Xiayun Sediment Observatory by year

年分	回歸曲線方程式	決定係數
2013	$Y=12.2617(X-245.7)^{3.1172}$	0.9973
2014	$Y=0.0018(X-243.8)^{7.7459}$	0.9877
2015	$Y=9.7334(X-245.9)^{3.4686}$	0.8823
2016	異常	-
2017	異常	-
2018	$Y=21.8933(X-246.0)^{3.3535}$	0.9401
2019	$Y=22.6523(X-246.0)^{2.5595}$	0.9958
2020	$Y=6.6859(X-245.7)^{4.3917}$	0.9846
2021	異常	-
2022	$Y=23.4637(X-246.0)^{2.7693}$	0.9462
2013~2022	$Y=37.1545(X-246.2)^{2.5465}$	0.9230

X : 水位 (m) Y : 流量 (cms)

表 3 修正前後的霞雲水砂觀測站年流量與石門水庫年入庫流量對比表
Table 3 Comparison table of annual flow at the Xiayun Sediment Observatory and annual inflow into the Shimen Reservoir before and after correction

年分	水利署公告 霞雲站年流量 (m ³ /y)	本研究修正後 霞雲站年流量 (m ³ /y)	石門水庫 年入流量 (m ³ /y)
2013		28,702	22,142
2014		7,472	12,021
2015		31,963	16,944
2016	9,503	14,946	20,140
2017	12,690	12,821	14,735
2018	7,351		11,541
2019	10,697		13,751
2020	3,851		6,432
2021	3,818	12,143	15,809
2022		12,841	19,766

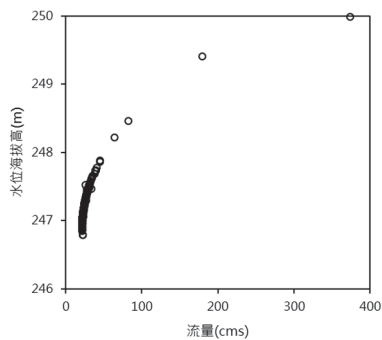


圖 5 2016 年水位-流量回歸關係圖

Fig.5 Stage-discharge regression plot for 2016

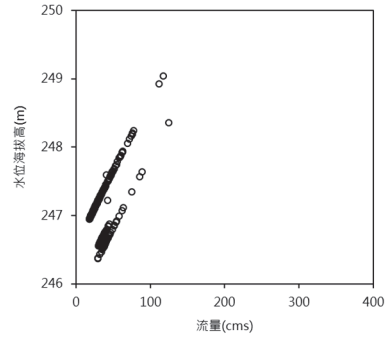


圖 6 2017 年水位-流量回歸關係圖

Fig.6 Stage-discharge regression plot for 2017

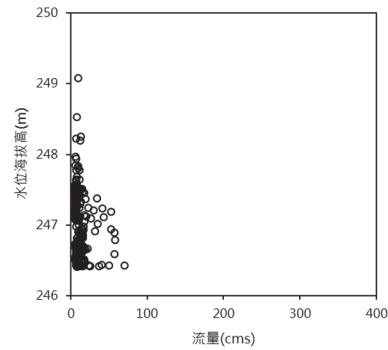


圖 7 2021 年水位-流量回歸關係圖

Fig.7 Stage-discharge regression plot for 2021

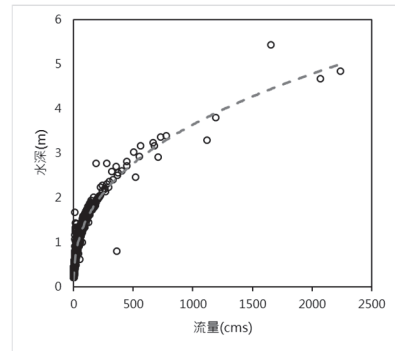


圖 8 2013~2022 年水位-流量回歸關係圖

Fig.8 Stage-discharge regression plot from 2013 to 2022

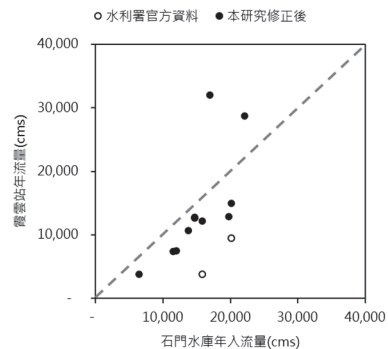


圖 9 修正前後的霞雲水砂觀測站年流量與石門水庫年入庫流量分析圖

Fig.9 The adjusted annual flow at the Xiayun station and annual observed inflow of the Shimen Reservoir

2. 推移載與懸移載比例

懸移載主要由水流懸浮細顆粒形成，其比例隨水文條件(如流量與降雨)而變動；推移載則通過顆粒沿河床滾動或滑動輸移，依賴臨界驅動流量。本研究以霞雲水砂觀測站 2013 至 2022 年的實測數據為基礎，分析這十年懸移載與推移載在總輸砂量中的總量及其比例。結果顯示，年總輸砂量介於 11.9 至 1093.7 萬立方公尺之間(表 4)。懸移載比例呈顯著年際變異，範圍介於 6% 至 82%，反映水文條件的顯著影響。Bagnold(1966) 指出，在低流量條件下，水流紊動減弱，難以有效懸浮細顆粒，導致懸移載比例下降。相對地，推移載因其依賴顆粒運動的物理機制，即使在低流量條件下，仍可維持相對穩定的輸移率。台灣河川多為陡坡河道，坡度效應進一步強化推移載的相對重要性，尤其在低流量條件下，此趨勢更為顯著。

為探討長期趨勢，本研究計算十年平均年輸砂量，並估算懸移載與推移載的平均比例，結果約為 70:30。此結果與統整表 5 台灣相關研究一致，顯示懸移載在長期尺度下占主

表 5 本研究與其他研究之推移載與懸移載比例綜整表

Table 5 Summary of the ratio of bedload to suspended load in Taiwanese cases

研究名稱	研究內文	(懸：推)
吳建民 (1978)	分析台灣河川輸砂特性，假設推移載約為懸移載的40%	71:29
林金炳 (1996)	石門水庫集水區及霞雲水文站的輸砂與河相特性進行研究，估算當懸移載輸砂量為100時，推移載約為37.77	73:27
Dadson et al.(2003)	綜合台灣河川輸砂數據，得出懸移載與推移載的平均比例約為70:30。	70:30
	本研究石門水庫集水區懸移和推移載比例	70:30

3. 輸砂豐枯比

本研究以霞雲水砂觀測站輸砂量資料進行分析，將每年 5 月至 10 月界定為豐水期，11 月至翌年 4 月為枯水期。以圖 10 所示，不論採用中位數或平均值進行評估，霞雲觀測站以上集水區之輸砂量於豐水期與枯水期之比例約為 86：14，呈現高度季節性分布。即便在輸砂分布最不均之年度，豐水期所占比例亦達 75%，顯示大部分土砂皆於豐水期由逕流挾帶進入水庫庫區。

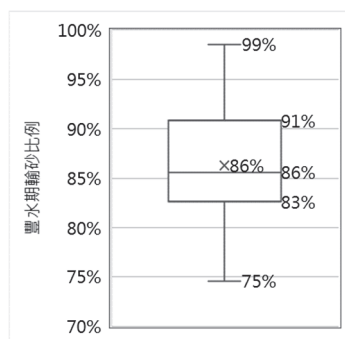


圖 10 石門水庫於 2013 至 2022 年輸砂量豐枯比例盒鬚圖
Fig.10 Box-and-whisker plot of wet-to-dry season sediment ratios in the Shimen Reservoir from 2013 to 2022

進一步以月份尺度進行細部探討，從圖 11 之盒鬚圖可觀察出輸砂量主要集中於每年 7 月至 10 月，正值臺灣颱風

導地位，反映台灣高降雨與陡坡地形條件下的輸砂特性。

表 4 推移載和懸移載量體推估和比例關係表

Table 4 Estimated volumes and proportional relationship table of bed load and suspended load

年分	懸移載 (10^4m^3) (A)	推移載 (10^4m^3) (B)	總輸砂量 (10^4m^3) (C) = (A) + (B)	總輸砂量中懸移載佔比 (A) / (C)
2013	538.1	179.9	718.0	75%
2014	40.5	35.6	76.0	53%
2015	891.6	202.1	1093.7	82%
2016	112.5	86.3	198.8	57%
2017	78.9	73.5	152.5	52%
2018	34.8	36.8	71.6	49%
2019	17.9	57.5	75.4	24%
2020	0.7	11.2	11.9	6%
2021	84.3	71.4	155.8	54%
2022	113.8	72.1	185.9	61%
平均	191.3	82.6	274.0	70%

頻繁發生時期。此現象推論與颱風所引發之短時強降雨高度相關，強降雨促使坡面引發崩塌或表土沖蝕，大量土砂進入河道，進而由高流量條件下由水流挾帶輸送至水庫庫區。由此可知，颱風事件對集水區土砂動態具有顯著影響，其所導致之高強度降雨與洪峰流量是短期輸砂量劇增的主因。

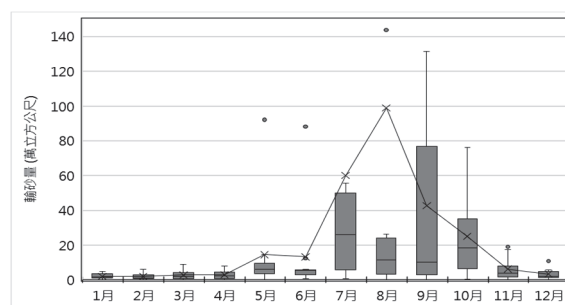


圖 11 石門水庫於 2013 至 2022 年各月分之輸砂量盒鬚圖
Fig.11 Box-and-whisker plot of monthly sediment in the Shimen Reservoir from 2013 to 2022

4. 來砂量

以土砂保育健康診斷模式為例，可透過崩蝕深度與含砂濃度評估集水區的土砂流失情形(陳樹群等，2011)，進而探討集水區的產砂特性。不過土砂入庫量最直接的反映指標為庫容淤積率的變化，因此，本研究利用庫容量測數據推估實際來砂量，並考量人為清淤及水力設施(如排砂閘門)將土砂排出庫區的影響。為更準確反映集水區的產砂情形，本研究

在計算實際來砂量時，將上述因素納入考量，以完整推估集水區來砂量變化。

然而，水庫實際來砂量的推估需考量年淤積量、清淤量及水力排砂的數據品質，估算結果如表 6 所示。年淤積量由當年度庫容減去上一年度庫容計算，若因測量誤差、底泥壓密(受本身自重與水壓影響)或其他因素，當年度庫容低於上一年度，則年淤積量可能呈負值。清淤量與水力排砂則恆為正值。若為負值，表示年淤積量的絕對值超過清淤量與水力排砂之和，總來砂量就可能出現負值。例如，石門水庫 2013 至 2022 年數據中最低值為-48.4 萬立方公尺/年，其實不代表實際無土砂入庫，而是可能有庫容測量誤差或底泥壓密的影響。總來砂量不可能為負，因此本研究假設未考慮庫容測量誤差與底泥壓密效應，此為本計算方法的限制條件。

5. 河道輸砂量推估與驗證結果

為全面評估石門水庫集水區的輸砂特性，本研究以霞雲水砂觀測站的實測河道輸砂量為基礎，結合林泰立等 (2024) 建置之土壤沖蝕、崩塌量及遞移率的概念模型 (修正原研究之 5 年崩塌數據，變為統一尺度 10 年)，推估水庫整體輸砂

量(定義為包含上游及庫區下游產砂的總入庫輸砂量)。如圖 12 所示，霞雲水砂觀站上游集水區的土砂入庫量約佔整體入庫總量的 86%，庫區 (入庫點下游) 的入庫土砂量約佔 14%。據此，本研究採用此比例，將霞雲水砂觀測站估算的河道輸砂量換算為石門水庫整體輸砂量。

為檢核整體輸砂量與來砂量的一致性，本研究進行逐年數據對比 (表 7)，結果顯示，兩者的絕對誤差範圍為 5%至 283%。剔除 2014 年和 2018 年 (來砂量呈負值) 後，誤差範圍縮減至 5%至 122%。由於本研究以日為最小時間尺度估算輸砂量，再總和為整年輸砂量，若能確保流量品質穩定，如 2016 與 2017 年等降雨情況較為穩定年份，來砂量與修正後輸砂量的誤差可控制在 7% 以內，顯示在無極端事件時，本研究估算精度高，且有潛力達到即時輸砂量推估。不過流量為本研究計算方法中的重要參數，需先確保流量品質，才能有較接近實際的輸砂量推估值。整體而言，石門水庫的平均輸砂量為 318.5 萬立方公尺/年，與來砂量平均值 358.7 萬立方公尺/年相比，誤差約為 11.2%，顯示本方法在長期平均值推估上具良好可靠性。

表 6 石門水庫集水區來砂量推估表

Table 6 Estimated sediment inflow table for the Shimen Reservoir watershed

年分	當年總容量 (10^4m^3)(註1)	淤積量 (10^4m^3)(註2)	年淤積量 (10^4m^3)(註3)	清淤量 (10^4m^3)	水力排砂 (10^4m^3)	來砂量 (10^4m^3)
2013	20,720	10,192	994.0	48.8	402.1	1,444.9
2014	20,826	10,086	-106.0	56.1	1.5	-48.4
2015	20,471	10,441	355.0	83.8	133.9	572.7
2016	-(註4)	-(註4)	136.0 (註5)	38.0	70.0	244.0
2017	20,199	10,713	136.0 (註5)	49.9	5.0	190.8
2018	20,315	10,597	-116.0	69.3	0.0	-46.7
2019	20,293	10,619	22.0	132.0	0.1	154.1
2020	20,416	10,496	-123.0	295.2	0.0	172.2
2021	20,533	10,374	-122.0	396.7	63.1	337.9
2022	20,422	10,490	116.0	421.2	28.7	565.9
平均	-	-	129.2	159.1	70.4	358.7

(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) 當年無庫容測量資料

(註 5) 2016 年因缺乏水庫總容量之測量數據，故將 2015 年至 2017 年之累積淤積差額 (272 萬立方公尺) 平均分配，推估 2016 年與 2017 年之年淤積量皆為 136.0 萬立方公尺。

表 7 依比例推估整體輸砂量和來砂量誤差分析表

Table 7 Error analysis table of total sediment transport and sediment inflow estimated by proportional method

年分	來砂量 (10^4m^3) (A)	霞雲站河道輸砂量 (10^4m^3) (B)	石門水庫整體輸砂量 (10^4m^3) (C) = (B) / 0.86	誤差 (A - C) / (A)
2013	1444.9	718.0	834.9	42%
2014	-48.4	76.0	88.4	283%
2015	572.7	1093.7	1271.7	-122%
2016	244.0	198.8 (86.5)	231.2 (100.6)	5% (59%)
2017	190.8	152.5 (102.6)	177.3 (119.3)	7% (37%)
2018	-46.7	71.6	83.2	278%
2019	154.1	75.4	87.7	43%
2020	172.2	11.9	13.8	92%
2021	337.9	155.8	181.1 (22.2)	46% (93%)
2022	565.9	185.9	216.1	62%
平均	358.7	274.0 (244.1)	318.5 (283.8)	11.2% (20.9%)

(註) 2016年、2017年、2021年和平均後的括號內之數字，為未修正之流量所估算的輸砂量與其誤差

6. 河道輸砂量偏態特性分析與分位數分析

集水區的輸砂量受降雨強度和年際變異性影響，表現出顯著的分布不對稱性。大多數年份的輸砂量偏低，但少數極端洪水事件（如颱風引發的強降雨）可導致輸砂量大幅增加，遠超典型年份，致使機率分布呈現右偏態（positive skewness）。石門水庫 2013 至 2022 年的實測數據顯示，來砂量和整體輸砂量的最大值均顯著高於中位數和其他年份的數值，推測主要由颱風引發的極端降雨導致山區崩塌和高濃度逕流所致。

為系統性檢視輸砂量分布特性，本研究採用直方圖和盒鬚圖進行視覺化分析（參見圖 13 與圖 14）。直方圖顯示大多數年份的來砂量和整體輸砂量集中於低值區間，右側呈現長尾分布，符合右偏態特徵。盒鬚圖分析中，中位數（Q2）因其對離群值的穩健性，可有效表徵集水區的典型輸砂水準。盒鬚圖的上界，定義為上四分位數（Q3）加上 1.5 倍四分位距（IQR），代表非極端高輸砂情境的閾值，用於評估模型對中高輸砂年份的模擬能力。超過該上界的數據點被視為離群值（圖中藍色圓點），反映極端輸砂事件。盒鬚圖下界可能低於物理意義上的最小輸砂量，且在集水區輸砂分析中重要性較低，主要作為分布對稱性的參考。盒鬚圖顯示中位數偏離盒體中心，且存在若干離群點；直方圖則顯示平均數位於中位數右側，進一步證實來砂量與整體輸砂量的右偏態特性，表明少數極端事件對總體輸砂量具主導作用。

考慮到樣本數僅十年，偏態指標的統計穩定性可能受

限。然而，通過直方圖、盒鬚圖及分位數分析（包括 Q2、Q3 和 IQR），仍確定石門水庫輸砂量為右偏態趨勢。此分布特性表明，無法單純依賴平均值表示輸砂量分布，建議需結合分位數指標進行補充分析，以全面描述集水區輸砂行為的異質性。

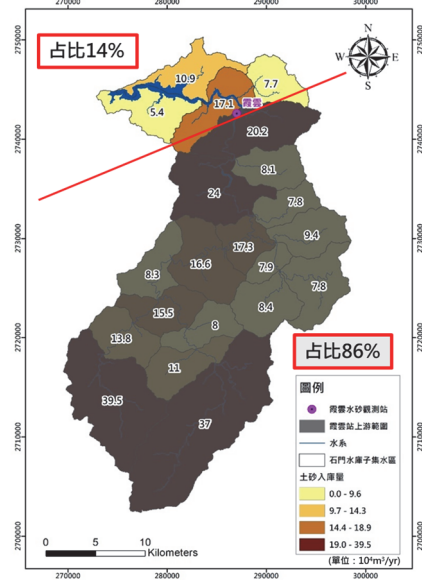


圖 12 霞雲水砂觀測站為界的庫區和上游土砂入庫量比例圖

Fig.12 Proportional diagram of sediment inflow from upstream and reservoir area divided by the Xiayun Sediment Observatory

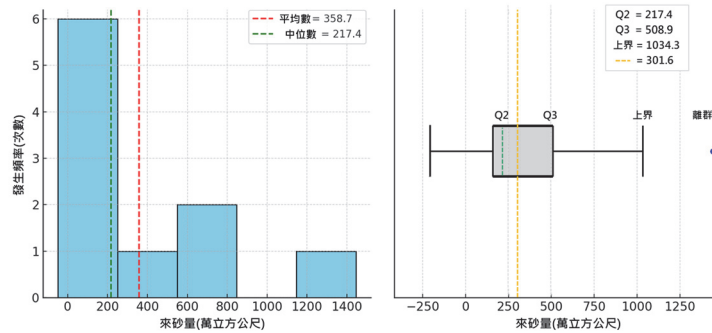


圖 13 石門水庫實際來砂量之直方圖和盒鬚圖分布

Fig.13 Histogram and box-and-whisker plot of the observed sediment inflow of the Shimen Reservoir

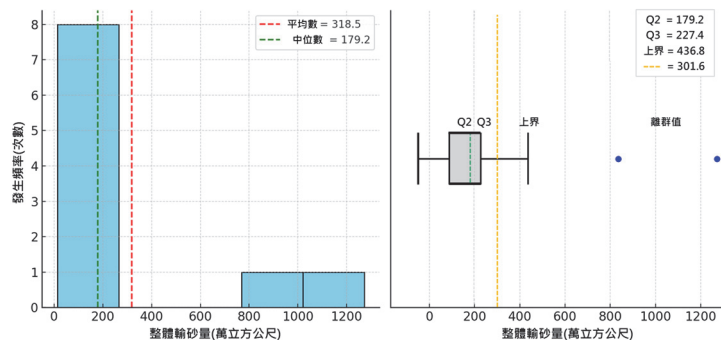


圖 14 石門水庫整體輸砂量之直方圖和盒鬚圖分布

Fig.14 Histogram and box-and-whisker plot of the estimated sediment transport volume of the Shimen Reservoir

根據石門水庫 2013 至 2022 年的實測數據，來砂量和整體輸砂量的分位數估計結果如表 8 所示。來砂量的 Q2 為 217.4 萬立方公尺/年，盒鬚圖上界為 1034.3 萬立方公尺/年；整體輸砂量的 Q2 為 179.2 萬立方公尺/年，盒鬚圖上界為 436.8 萬立方公尺/年。林泰立等 (2024) 方法推估土砂入庫量為 301.6 萬立方公尺/年，於圖 13 與圖 14 黃色虛線標示，其值皆落於 Q2 與盒鬚圖上界之間，且落在兩組分布的重疊合理區間 (217.4 至 436.8 萬立方公尺/年) 內，表明其處於歷史輸砂分布的中至偏高區段，屬於統計上的合理範圍。

分位數校準方法強調模型輸出與實測分布的對應關係。若模型推估值長期高於盒鬚圖上界，可能高估集水區輸砂的潛勢；若低於 Q2，可能低估總體輸砂能力。分位數校準作為平均值校準的補充，提升模型對典型及偏高輸砂情境的模擬精度。平均值校準確保輸砂總量的長期平衡，分位數校準則聚焦於分布形狀。二者結合應用可在年際波動顯著的案例解析。當模型推估值落於實測分布的合理範圍，輸砂量估計亦具較高可靠性。

表 8 實際來砂量與推估輸砂量之分位數比對表

Table 8 Quantile analysis of the observed sediment inflow and the estimated sediment transport

項目	實際來砂量 (10 ⁴ m ³)	推估輸砂量 (10 ⁴ m ³)
下四分位數 (Q1)	158.6	87.9
中位數 (Q2)	217.4	179.2
上四分位數 (Q3)	508.9	227.4
上界 (Q3+1.5×IQR)	1034.3	436.8
合理範圍 (中位數至上界)	217.4 ~ 1034.3	179.2 ~ 436.8

四、結論與建議

本研究以石門水庫集水區為對象，旨在建立一套高效分析框架，利用實測含砂濃度與流量資料估算懸移載，並依據流量推估推移載，兩者相加得出霞雲水砂觀測站之河道輸砂量，再以比例法量化集水區總土砂入庫量。此方法可顯示即時與長期的土砂運輸性質與時間尺度上的變化。研究成果亦顯示石門水庫集水區入庫點之平均年懸移載與推移載比例約為 70:30，輸砂量中主要為懸移載。且輸砂量於豐水期 (高峰 7 月至 10 月) 與枯水期比例約為 86:14，顯示颱風引發的洪峰流量顯著增加土砂入庫量。彙整水文及泥砂資料，本研究推估之整體輸砂量 (318.5 萬立方公尺/年)，以及實際來砂量 (358.7 萬立方公尺/年)，估算 2013 至 2022 年石門水庫年平均土砂入庫量約介於 301.6 至 358.7 萬立方公尺/年，歷史輸砂分布屬於右偏分布。

本研究輸砂模型主要參數為實測流量，但部分流量數據異常需進行修正，未修正流量前推估輸砂量與實際來砂量誤差約為 20.9%，但利用回歸之水位-流量曲線方程式，並對進行異常數據修正，可將輸砂量誤差降至 11.2%，顯示流量品質對輸砂估算影響甚鉅。以本研究採用之方法，未來只要有水位及懸浮固體(含砂濃度)資料，就可以藉由水位推得流量，並進一步估算輸砂量，得到即時輸砂量數值，幫助水庫管理單位掌握即時資訊並採用預警措施。

參考文獻

- [1] 王如意、易任 (1988), 「應用水文學(上冊)」, 國立編譯館, 台灣。(Wang, R.Y., and Yi, R. (1988). *Applied Hydrology (Volume 1)*, National Compilation and Translation Bureau, Taiwan. (in Chinese))
- [2] 何智武、黃宏斌 (1983), 「臺灣上游湍流河道之輸砂模式研究」, 中華水土保持學報, 14(1-2), 95-106。(He, Z.W., and Huang, H.B. (1983). "Study on sediment transport model of turbulent rivers in upstream Taiwan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 14(1-2), 95-106. (in Chinese))
- [3] 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, 184-206。(Wu, J.M. (1978). "Estimation formula for river sediment transport in Taiwan." *Proceedings of Symposium on Watershed and River Management*, 184-206. (in Chinese))
- [4] 林金炳 (1996), 「石門水庫集水區輸砂與水文河相關係之研究」, 國立中興大學水土保持學系碩士論文, 台灣。(Lin, J.B. (1996). *Study on the Relationship between Sediment Transport and Hydrology in the Shihmen Reservoir Watershed*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan. (in Chinese))
- [5] 林泰立、林鎮洋、陳起鳳 (2024), 「水庫集水區產砂熱區分析研究」, 中華水土保持學報, 55(3), 143-153。(Lin, T.L., Lin, Z.Y., and Chen, Q.F. (2024). "Analysis of sediment production hotspots in reservoir watersheds." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 55(3), 143-153. (in Chinese))
- [6] 張倚瑛 (2012), 「濁水溪下游河段低水流況下推移載於總輸砂量之比例—以自強大橋處為例」, 逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士論文, 台灣。(Zhang, J.Y. (2012). *Proportion of Bed Load in Total Sediment Transport under Low Flow Conditions in the Downstream of Choshui River: A Case Study at Ziqiang Bridge*, Master Thesis, Feng Chia University, Taiwan. (in Chinese))
- [7] 許盈松、蔡俊鋒、魏綺瑪、黃宏甫 (2007), 「水庫泥砂濁度與濃度率定關係研究—以石門水庫為例」, 農業工程學報, 53(1), 62-71。(Xu, Y.S., Cai, J.F., Wei, Q.M., and Huang, H.P. (2007). "Study on the calibration relationship between reservoir sediment turbidity and concentration: A case study of Shihmen Reservoir." *Journal of Agricultural Engineering*, 53(1), 62-71. (in Chinese))
- [8] 連惠邦 (2017), 「土砂災害與防治」, 五南圖書, 台灣。(Lian, H.B. (2017). *Sediment Disasters and Prevention*, Wu-Nan Book Inc., Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [9] 陳樹群、吳俊毅、王文江、謝政道、周伯愷 (2011), 「臺北水源特定區土砂保育健康診斷模式之建立」, 中華水土保持學報, 42(3), 207-218。(Chen, S.C., Wu, J.Y., Wang, W.J., Xie, Z.D., and Zhou, B.K. (2011). "Establishment of a sediment conservation health diagnosis model for the Taipei water source area." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(3), 207-218. (in Chinese))

- [10] 黃宏斌 (1992), 「陡坡水槽之輸砂量模式研究」, 台灣水利, 40(1), 44-51. (Huang, H.B. (1992). "Study on sediment transport model for steep flumes." *Taiwan Water Conservancy*, 40(1), 44-51. (in Chinese))
- [11] 經濟部水利署 (2013), 「水利工程技術規範：河川治理篇」, 經濟部水利署, 台灣。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs (2013). *Technical Specifications for Hydraulic Engineering: River Management*, Water Resources Agency, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [12] 經濟部水利署 (2016), 「水庫庫容有效維持綱要計畫」, 經濟部水利署, 台灣。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs (2016). *Master Plan for Effective Maintenance of Reservoir Capacity*, Water Resources Agency, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [13] 經濟部水利署 (2022), 「石門水庫、榮華壩及鳶山堰水庫集水區保育實施計畫 (112-116 年)」, 經濟部水利署, 台灣。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs (2022). *Implementation Plan for Watershed Conservation of Shihmen Reservoir, Ronghua Dam, and Yuanshan Weir (2023-2027)*, Water Resources Agency, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [14] 經濟部水利署 (2023), 「中華民國一一一年臺灣水文年報總冊」, 經濟部水利署, 台灣。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs (2023). *2022 Taiwan Hydrological Yearbook*, Water Resources Agency, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [15] 經濟部水利署 (2024), 「水庫集水區入庫土砂量體觀測及囚砂區域評估規劃機制建立—以石門水庫為例 (2/2)」, 經濟部水利署, 台灣。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs (2024). *Establishment of Mechanisms for Monitoring Inflow Sediment Volume and Assessing Sediment Trapping Areas in Reservoir Watersheds: A Case Study of Shihmen Reservoir (2/2)*, Water Resources Agency, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [16] 經濟部水利署 (2025), 「近 5 年(109-113)公告水庫清淤量」, 經濟部水利署, 台灣。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs (2025). *Announced Reservoir Desilting Volumes for the Past 5 Years (2020-2024)*, Water Resources Agency, Taipei, Taiwan. https://www.wra.gov.tw/News_Content.aspx?n=2868&s=7007 (Jul. 1, 2025). (in Chinese))
- [17] 經濟部水利署北區水資源分署 (2011), 「石門水庫集水區保育治理研究綜整計畫委託專業服務」, 經濟部水利署北區水資源分署, 台灣。(Northern Region Water Resources Office, Water Resources Agency (2011). *Comprehensive Study on Shihmen Reservoir Watershed Conservation and Management*, Northern Region Water Resources Office, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [18] 經濟部水利署北區水資源分署 (2023a), 「111 年度經濟部水利署北區水資源局統計年報」, 經濟部水利署北區水資源分署, 台灣。(Northern Region Water Resources Office, Water Resources Agency (2023a). *2022 Statistical Yearbook of the Northern Region Water Resources Office*, Northern Region Water Resources Office, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [19] 經濟部水利署北區水資源分署 (2023b), 「水庫清淤策略」, 經濟部水利署北區水資源分署, 台灣。(Northern Region Water Resources Office, Water Resources Agency (2023b). *Reservoir Desilting Strategies*, Northern Region Water Resources Office, Taipei, Taiwan, <https://web.wra.gov.tw/shihmen/cp.aspx?n=7485> (Jul. 1, 2025). (in Chinese))
- [20] 經濟部水利署北區水資源分署 (2023c), 「濁度與泥砂觀測」, 經濟部水利署北區水資源分署, 台灣。(Northern Region Water Resources Office, Water Resources Agency (2023c). *Turbidity and Sediment Observation*, Northern Region Water Resources Office, Taipei, Taiwan, <https://web.wra.gov.tw/shihmen/cp.aspx?n=7480> (Jul. 1, 2025). (in Chinese))
- [21] 農業部農村發展及水土保持署 (2017), 「水土保持手冊」, 農業部農村發展及水土保持署, 台灣。(Department of Rural Development and Soil and Water Conservation, Ministry of Agriculture (2017). *Soil and Water Conservation Handbook*, Department of Rural Development and Soil and Water Conservation, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [22] Adams, J. (1980). "High sediment yields from major rivers of the western Southern Alps, New Zealand." *Nature*, 287(5777), 88-89.
- [23] Allen, P.B., and Petersen, D.V. (1981). "A study of the variability of suspended sediment measurements." *Erosion and Sediment Transport Measurement: Proceedings of the Florence Symposium*, June 1981, International Association of Hydrological Sciences, Publication No. 133, 203-211.
- [24] Bagnold, R.A. (1966). "An approach to the sediment transport problem from general physics." *U.S. Geological Survey Professional Paper 422-I*, U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- [25] Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Lin, J.-C., Hsu, M.-L., Lin, C.-W., Horng, M.-J., Chen, T.-C., Milliman, J., and Stark, C.P. (2003). "Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen." *Nature*, 426(6967), 648-651.
- [26] Griffiths, G.A. (1979). "High sediment yields from major rivers of the western Southern Alps, New Zealand." *Nature*, 282(5734), 61-63.
- [27] Ho, H.-C., Hsu, S.-M., Tseng, C.-M., and Chou, C.-C. (2023). "Three-phase data augmentation for the prediction of sediment flux in mountain basins during typhoon events." *Environmental Modelling and Software*, 160, 105607.
- [28] Walling, D.E. (1994). "Measuring sediment yield from river basins." *Soil Erosion Research Methods*, R. Lal, ed., Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press, Ankeny, IA, 29-56.

2025 年 08 月 12 日 收稿

2025 年 11 月 18 日 修正

2026 年 04 月 20 日 接受