中華水土保持學報, 57(3):99-110(2026)
*Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 57* (3): *99-110* (2026)
DOI: 10.29417/JCSWC.202609_57(3).0001


# 坡面土壤有機碳對泥砂遞移之影響－以屏東東門溪為例

邱怡嘉[1]　林秉賢[2]*　李維峰[3]

**摘　　要**　傳統土壤侵蝕評估多採固定參數，難以反映土壤性質之時變特性。本研究以現地採樣取得之土壤有機碳 (SOC) 為基礎，建立坡面泥砂遞移量之動態推估方程。利用 van Bemmelen 係數將 SOC 換算為有機質含量 (OM)，進而計算動態土壤侵蝕性指數 (Km)，並於固定其他因子條件下，透過 InVEST SDR 模組模擬坡面泥砂遞移量 (SDV) 之變化。結果顯示，東門溪四季 SOC 變化具有可辨識性，且當土壤侵蝕性增加時，坡面泥砂遞移量亦隨之增加。東門溪之坡面泥砂遞移彈性係數 β 為 1.41，表示土壤侵蝕性指數比值每增加 1%，坡面泥砂遞移量比值平均增加約 1.41%。以 β = 1.41 建立之 SOC 推估方程，其 2024 年建模資料之平均絕對百分比誤差 (MAPE) 為 3.95%，以 2025 年驗證之誤差為 2.97%，顯示該方程於同一流域內具有良好適用性。SOC 可作為坡面侵蝕動態監測與坡面泥砂遞移量推估之重要依據，並可作為坡地管理與水土保持規劃之參考。
**關鍵詞：**土壤有機碳、土壤侵蝕性指數、泥砂遞移率、InVEST 模式

# Effect of Slope Soil Organic Carbon on Sediment Delivery: A Case Study of Dongmen Creek, Pingtung

I-Chia Chiu[1]　Bing-Shyan Lin[2]*　Wei-F Lee[3]

**ABSTRACT**　Traditional soil erosion assessments often rely on fixed parameters, limiting their ability to capture temporal variability in soil properties. This study developed a dynamic equation for estimating hillslope sediment delivery based on field-measured soil organic carbon (SOC). The van Bemmelen factor was used to estimate soil organic matter (OM) from SOC, which was then applied to calculate the dynamic soil erodibility index (Km). With all other model inputs held constant, the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) Sediment Delivery Ratio (SDR) model was used to simulate variations in hillslope sediment delivery under different seasonal Km scenarios. The results indicated that seasonal SOC variations in Dongmen Creek were distinguishable and that modeled hillslope sediment delivery increased with increasing soil erodibility. The hillslope sediment delivery elasticity coefficient (β) was 1.41, indicating that a 1% increase in the soil erodibility ratio relative to the static baseline corresponded to an approximately 1.41% increase in the modeled sediment delivery ratio. The SOC-based prediction equation established with β = 1.41 yielded a mean absolute percentage error (MAPE) of 3.95% for the 2024 calibration data, while validation in 2025 resulted in an error of 2.97%, indicating good applicability within the same watershed. Overall, these findings suggest that SOC can be used to monitor hillslope erosion dynamics and estimate hillslope sediment delivery. The findings may also guide slope-land management and soil and water conservation planning.
***Key Words:*** soil organic carbon, soil erodibility index, sediment delivery ratio, InVEST model

## 一、前　　言

土壤侵蝕為坡地環境管理中關鍵的地貌作用，其受降雨動能、地表逕流及土壤性質之交互影響。現行坡面侵蝕評估多廣泛採用通用土壤流失公式 (USLE) 或其修正版 (RUSLE)，其中土壤侵蝕性指數 (K 因子；本研究記為 Km) 係描述土壤抗蝕能力之核心參數。在實務應用上多將 Km 視為長期不變之靜態值，難以反映土壤性質隨季節或管理措施產生之時變性，進而限制了模式在動態預警與精準模擬上之應用價值。

在眾多土壤指標中，土壤有機碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 為評估土壤品質與結構穩定性之重要因子。本研究以現地 SOC 監測資料作為更新依據，將土壤狀態的時序變化轉化為 Km 的動態調整，並進一步反映於坡面泥砂遞移量 (Sediment Delivery Volume, SDV)，則可提供更具時序性的分析基礎，補足傳統模式在動態更新上的不足。

〔1〕逢甲大學營建及防災中心
Construction and Disaster Prevention Research Center, Feng Chia University, Taichung, Taiwan, R.O.C.
〔2〕逢甲大學水利工程與資源保育學系
Department of Water Resources Engineering and Conservation, Feng Chia University, Taichung, Taiwan, R.O.C.
〔3〕英商奧雅納工程顧問公司
Taipei Office, Arup, Taiwan, R.O.C.
* Corresponding Author. E-mail:bslin@o365.fcu.edu.tw

另一方面，坡面侵蝕所產生之泥砂，並非全數均可輸送至河道，其遞移結果仍受到坡面條件、集水面積與地形連通性影響。

本研究以土壤有機碳 (SOC) 作為唯一時間變動來源，利用 Van Bemmelen 係數將 SOC 換算為土壤有機質含量，建立季節性動態土壤侵蝕性指數 (Km) 圖層；並於 InVEST SDR 模組中固定降雨侵蝕指數、地形因子、覆蓋管理因子、水土保持處理因子及模組參數，僅透過 Km 之變動分析坡面泥砂遞移量之差異。藉此，探討坡面土壤有機碳季節變動之可辨識性，檢驗 SOC 變化是否可透過 Km 之動態調整反映於坡面泥砂遞移量之差異，並進一步建立 SOC、Km 與 SDV 之關聯，推估泥砂遞移彈性係數 (β)，作為坡地動態管理與水土保持規劃之參考。

基於上述研究架構，本研究預期 SOC 增加時，由 SOC 換算有機質後計算之土壤侵蝕性指數(Km)呈下降趨勢；另在其他模型因子固定之條件下，相對於靜態基準情境，Km 比值增加時，坡面泥砂遞移量比值(SDV_ratio)呈同向增加。

## 二、研究方法

本節將闡述以土壤有機碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 作為唯一時間變動來源之坡面泥砂遞移 (Sediment Delivery Volume, SDV) 推估模型的建構方法與完整操作流程，研究方法包括研究區選定、土壤有機碳 (SOC) 現地採樣與分析、動態土壤侵蝕性指數 (Km) 建構、InVEST SDR 模擬，以及坡面泥砂遞移推估方程之建立；其 SOC–Km–SDV 推估架構與整體研究流程分別如圖 1 與圖 2 所示。

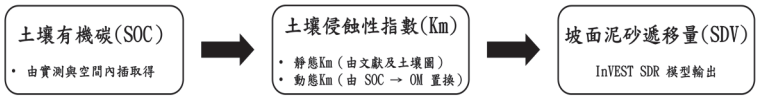


圖 1 SOC–Km–SDV 模型推估架構圖

**Fig.1 Framework of the SOC–Km–SDV predictive model**

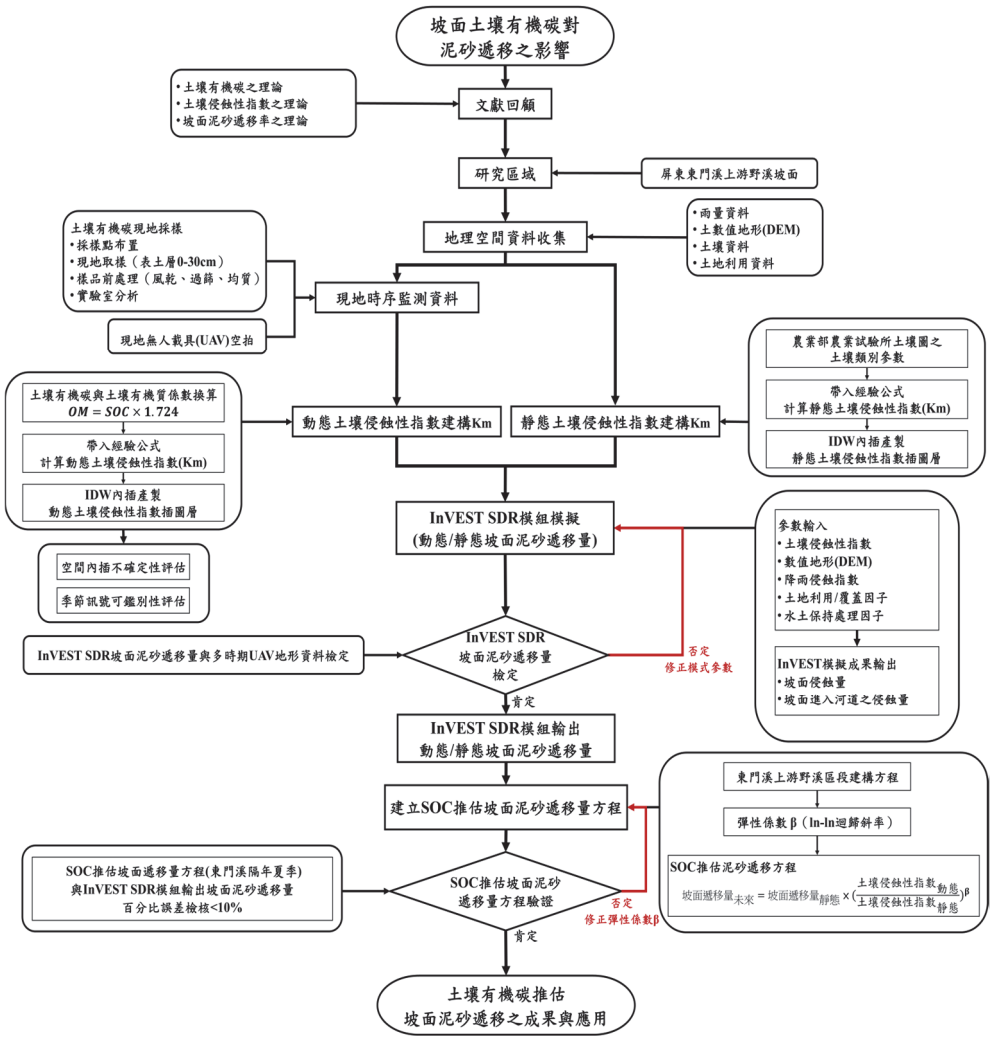


圖 2 研究流程圖

**Fig.2 Research workflow**

## 1. 研究區域

本研究以屏東縣東門溪上游野溪坡面區段為研究區域如圖 3 所示。東門溪屬山區小型溪流，地形起伏明顯，坡面逕流與土砂沖淤作用活躍，適合作為探討土壤性質變動對坡面侵蝕與泥砂遞移反應之研究場域。研究區內包含河道、護岸、固床工、果園及林地等不同地表覆蓋與利用型態，具備顯著之空間異質性，且受季節性降雨與植生變動影響，土壤有機碳含量具有時序差異。

研究區內水土保持工程係分期施作，各期工程之竣工年份及所在河段有所不同。為反映研究區內不同工程期別之空間分布特性，本研究依工程竣工年份及其分布範圍將研究區劃分為四個區域，使不同施工時序之工程河段得以區分，並保留其空間位置與工程時序背景。

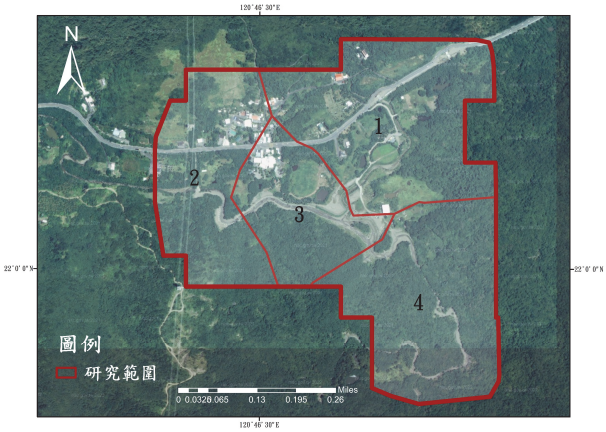


圖 3 東門溪上游野溪區段地理位置圖

**Fig.3 Location map of the upstream Dongmen Creek wild stream section**

## 2. 土壤有機碳現地採樣設計與分析

(1) 土壤有機碳現地採樣設計與配置

為掌握研究區土壤有機碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 之空間分布與季節變動，採固定樣點重複採樣方式進行監測。樣點配置以不同土地利用型態與地表環境條件為基礎，涵蓋護岸、固床工、河道、果園及林地等區域，以提升樣本對研究區土壤環境之代表性。採樣深度統一為表土 0-30 cm，此深度為多數礦質土壤碳監測與侵蝕敏感層分析之常用範圍，亦可兼顧土壤有機碳變化與坡面侵蝕反應之觀測需求。

各採樣點於不同季節進行重複採樣，以建立具時序性的 SOC 監測資料。樣點位置於各期採樣中維持一致，藉以降低因重訪偏差造成之變異。本研究於東門溪共完成五期採樣，共 19 處採樣點，如表 1、圖 4 所示。採樣所得之 SOC 資料作為後續動態土壤侵蝕性指數建構之核心輸入，並用以分析其季節性變動是否足以反映坡面泥砂遞移量之差異。

(2) 土壤有機碳測定方法與分析

現地採集之土壤樣品運回實驗室後，首先進行前處理，包括自然風乾、去除礫石與植物殘體，並通過 2 mm 篩網以獲得均質化之細土部分。樣品以 1 M 鹽酸處理以去除碳酸鹽，再行烘乾備測。

土壤有機碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 含量採用高溫燃燒－紅外線檢測法，使用總有機碳分析儀(型號：OIA 1030D TOC)進行分析。測定前，以不同量之標準品建立檢量線，相關係數 (R) 須達 0.995 以上，以確認儀器量測之有效性。為確保分析品質，各批次樣品均進行重複測定及標準參考物質之品質查核。

本研究主要探討土壤有機碳 (SOC) 變動對土壤侵蝕性及坡面泥砂遞移之影響，因此以 SOC 作為直接量測之土壤性質指標，並採高溫燃燒－紅外線法搭配總有機碳分析儀進行定量。此方法可直接取得各採樣期之 SOC 含量，作為不同時期 SOC 變動分析之實測資料。土壤有機質 (SOM) 則由實測 SOC 換算取得，主要供土壤侵蝕性指數 (Km) 計算使用，使研究分析仍以實測 SOC 之變動為核心。

本研究所有土壤有機碳分析作業均委託逢甲大學環境工程與科學學系專業實驗室依標準作業流程進行。本節僅說明分析方法與流程。

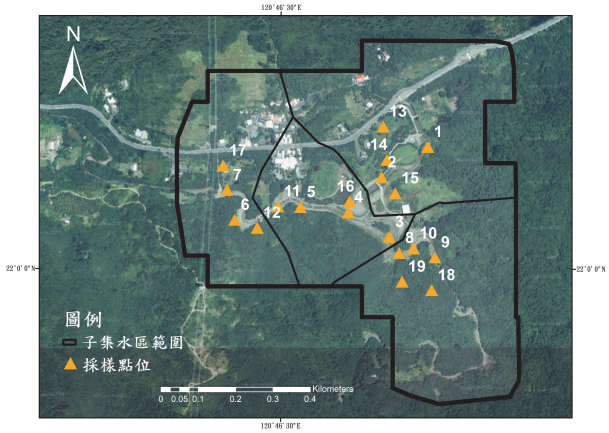


圖 4 東門溪上游野溪區段之採樣點位圖

**Fig.4 Sampling locations in the upstream Dongmen Creek wild stream section**

表 1 採樣時程與點位表

**Table 1 Sampling schedule and sampling locations**

| 研究區域 | 採樣期別 | 採樣日期 | 季節涵蓋 | 點位數量 |
|---|---|---|---|---|
| 屏東縣東門溪 | 第一期 | 2024年4月 | 春季段 | 19 |
| | 第二期 | 2024年7月 | 夏季段 | 19 |
| | 第三期 | 2024年10月 | 秋季段 | 19 |
| | 第四期 | 2025年2月 | 冬季段 | 19 |
| | 第五期 | 2025年6月 | 隔年夏季段 | 19 |

## 3. 動態土壤侵蝕性指數建構

為反映土壤有機碳季節變動對土壤抗蝕能力之影響，本研究以 SOC 作為唯一時間變動來源，建立各季節之動態土壤侵蝕性指數 (Km) 圖層。其流程包括：先將 SOC 換算為土壤有機質含量 (OM)，再代入 Wischmeier & Smith (1978) 提出之土壤侵蝕性指數經驗公式，更新其中有機質相關參數；

至於粒徑組成、土壤結構碼與滲透性碼等其他土壤性質參數，則維持不變，以凸顯 SOC 變動之效果。

(1) 土壤有機碳與土壤有機質之換算

土壤侵蝕性指數 Km 經驗式以有機質含量 OM(%)作為輸入變數之一，本研究採用 Van Bemmelen 係數進行換算，其基本假設為土壤有機質中碳含量約占 58%(Pribyl, 2010)，其轉換公式如下：

$$OM = SOC \times 1.724 \quad (1)$$

式中，$OM$為壤有機質含量(%)；$SOC$為本研究現地採樣，透過實驗分析之土壤有機碳量 (%)。

(2) 土壤侵蝕性指數計算

土壤侵蝕性指數 Km 經驗式採用 Wischmeier & Smith (1978) 提出之經驗公式如下：

$$K_m = 0.1317 \times \frac{\{2.1\times10^{-4}\times M^{1.14}\times(12-OM)+3.25\times(s-2)+2.5\times(p-3)\}}{100} \quad (2)$$

式中，Km 為土壤侵蝕性指數 (t·ha·h·yr /(ha·MJ·mm·yr))；M 為粒徑參數，M=(%silt+%very fine sand)×(100-%clay)；OM 為有機質含量 (%)；s 為土壤結構碼(1-4 級)；p 為滲透性碼(1-6 級)。參考《農業部農業試驗所(屏東縣山坡地土壤調查報告)》依 Wischmeier & Smith (1978) 提出之經驗公式建立「靜態 Km」與「動態 Km」兩類圖層，作為後續分析與 InVEST SDR 模擬之輸入資料。

①靜態 Km 值(基準情境)：

採用農業部農業試驗所土壤圖與土壤調查報告書取得之輸入參數 (粒徑組成、土壤結構碼 s、滲透性碼 p、有機質 OM)，並代入經驗公式計算，建立靜態 Km 圖層，作為後續相對變化分析之基準。

②動態 Km 值 (季節情境)：

由於季節性 SOC 為離散採樣點資料，首先將土壤有機碳換算為土壤有機質，並經驗公式計算各採樣點 Km 值，再以反距離加權法 (Inverse Distance Weighting interpolation, IDW) 內插成連續圖層建構動態 Km 圖層。

為確保靜態與各季節動態 Km 圖層可直接比較，於輸出時統一座標系統、空間解析度與研究區範圍。

## 4. InVEST SDR 模組參數與情境設計

本研究採用 InVEST SDR (Sediment Delivery Ratio) 模組模擬坡面泥砂遞移量。該模組以 RUSLE 架構為基礎，並結合地形連通性概念，估算網格尺度之土壤流失量、泥砂遞移率及實際輸送至河道之泥砂量，流程圖如圖 5 所示。

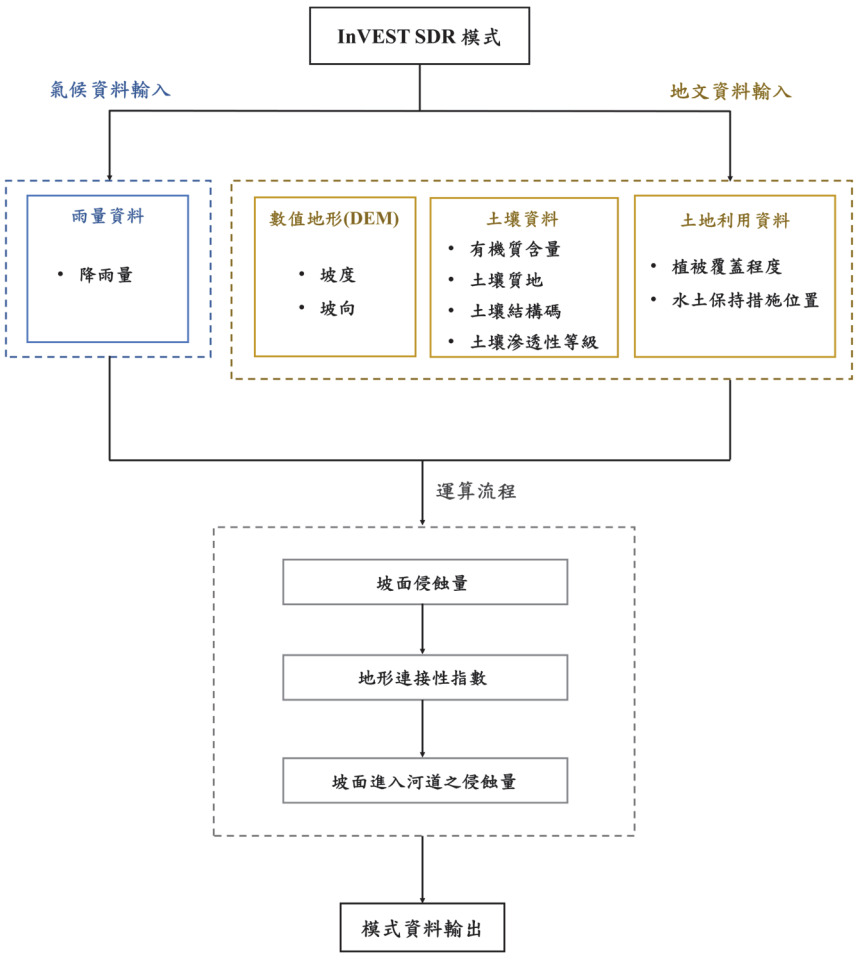


圖 5 InVEST SDR 模式模擬流程圖

**Fig.5 Flowchart of the InVEST SDR modeling procedure**

依本研究設計，基準情境採用靜態 Km 圖層作為輸入，代表傳統固定 Km 值條件下之年尺度坡面泥砂遞移背景值；季節情境則分別代入由各季節土壤有機碳 (SOC) 推估之動態 Km 圖層，包括春、夏、秋、冬及隔年夏季。採單一變動來源之控制式設計，除 Km 圖層依情境更新外，其餘輸入因子，包括降雨侵蝕指數 Rm、坡長坡度因子 LS、覆蓋管理因子 C、水土保持處理因子 P 及 SDR 模組參數，於各情境中皆維持一致，土地利用／覆蓋資料採用 Esri Land Cover 全球土地覆蓋圖，並依研究區地物特性進行重分類。另因未另行量化研究區坡面保育措施對 P 因子，故統一設定 P=1，以避免引入缺乏現地佐證之參數假設。主要輸入資料來源、空間分布圖及參數設定彙整如圖 6 至圖 15 及表 2 至表 4 所示。

(1) 坡面土壤侵蝕量

InVEST SDR 模組以修正式通用土壤流失公式 (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)估算各網格單元之年土壤侵蝕量。

$$A_m = R_m \times K_m \times LS \times C \times P \quad (3)$$

其中 $A_m$ 為網格單元的每年土壤侵蝕量 (t/ha/yr)，計算公式為修正通用土壤流失方程 RUSLE；$R_m$ 為降雨侵蝕指數(MJ·mm/(ha·h·yr))；$LS$ 為坡長坡度因子 (無因次)；$C$ 為覆蓋管理因子 (無因次)；$P$ 為水土保持措施因子 (無因次)；$K_m$ 為土壤侵蝕性指數 (t·ha·h·yr /(ha·MJ·mm·yr))，本研究之核心變動項為 $K_m$，其餘因子在各情境固定。

(2) 坡面泥砂遞移率

地形連通性理論推估各網格單元之泥砂遞移率。首先，計算地形連接性指數 (Index of Connectivity, ICICIC)，以量化坡面至河道的沉積物傳輸連通性。

$$IC = log_{10}(\frac{D_{up}}{D_{dn}}) \quad (4)$$

其中 $D_{up}$ 表示該像元上坡方向的產砂潛勢 (與上坡貢獻面積、坡度與地表覆蓋阻力等相關)；$D_{dn}$ 表示從該像元沿下坡至河道路徑之沉積阻滯能力(與加權路徑長度、坡度及地表覆蓋阻力等相關)當 $D_{up}$愈大且 $D_{dn}$ 愈小，代表地形通性越強，沉積物越容易由坡面輸送至河道，$IC$ 值亦隨之增加。接續，再將 IC 轉換為泥砂遞移率 SDR：

$$SDR_i = \frac{SDR_{max}}{1+exp(\frac{IC_0-IC_i}{k})} \quad (5)$$

其中 $SDR_{max}$、$IC_0$ 與 $k$ 為模型參數。控制 SDR–IC 關係曲線的斜率與反應強度。當某網格 $IC$ 值大、地形與水文連通性強時，該網格 $SDR_i$ 趨近 $SDR_{max}$；反之，若 $IC$ 值小，多數泥砂在坡面或坡腳處即被滯留，該網格的 SDR 值將趨近於 0。

(3) 坡面泥砂遞移量

估算每個像元實際輸送至河道的遞移量。

$$SDV = A_i \times SDR_i \quad (6)$$

為比較各季節情境與靜態基準情境之差異，本研究另計算坡面泥砂遞移量比值：

$$R_{SDV} = \frac{SDV_i}{SDV_0} \quad (7)$$

式中，$R_{SDV}$為第 i 季節相對於基準情境之坡面泥砂遞移量比值；$SDV_i$為第 i 季節之模擬值；$SDV_0$為靜態基準情境之模擬值。

InVEST 模型本身以年為時間尺度，本研究將不同季節量測所得的 SOC 轉換為對應之 Km 圖層，代入模型時視作該季節代表性的土壤侵蝕狀態，並以坡面泥砂遞移量作為比較 Km 相對變化效應的指標。因此，本研究關注的是不同 Km 狀態下遞移量的相對變化，而非精確的季節遞移量。

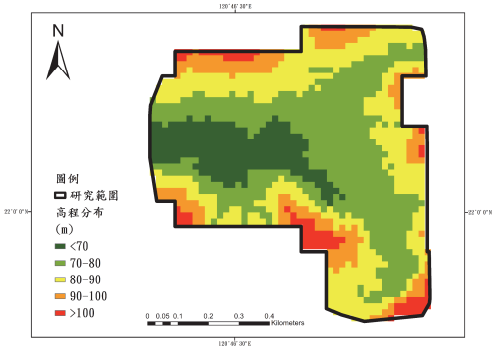


圖 6 高程分布圖

**Fig.6 Elevation map**

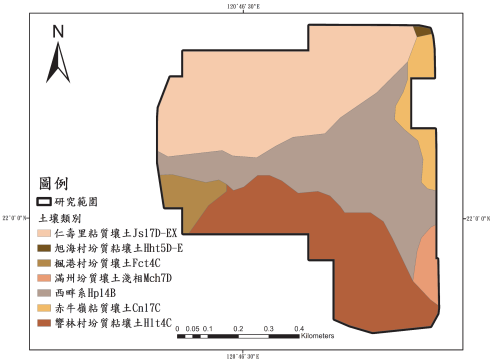


圖 7 土壤類別圖

**Fig.7 Soil type map**

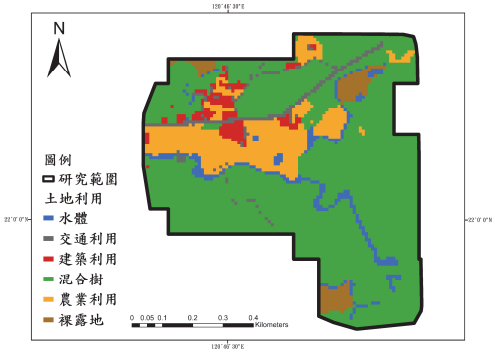


圖 8 土地利用圖

**Fig.8 Land use map**

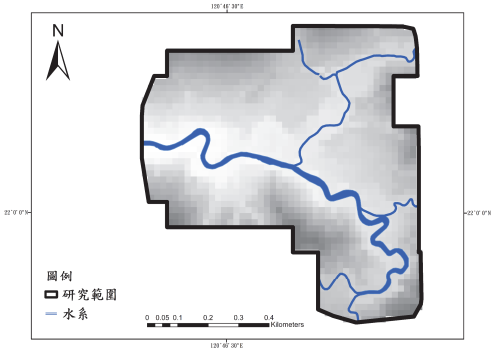


圖 9 水系圖

**Fig.9 Drainage network map**

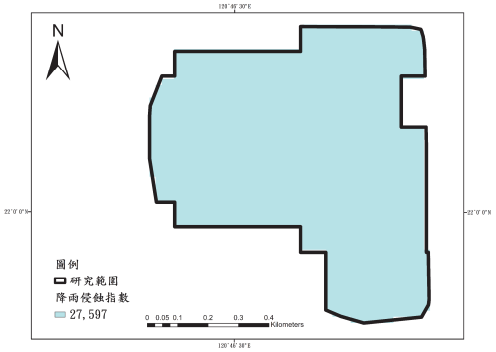


圖 10 降雨侵蝕性指數

**Fig.10 Rainfall erosivity map**

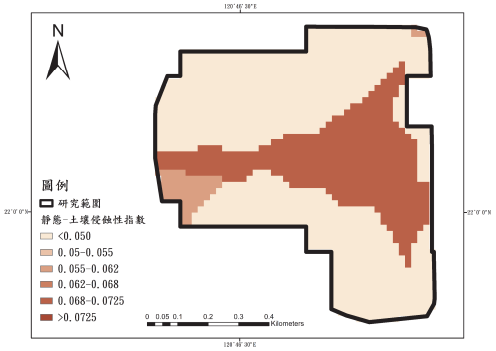


圖 11 靜態土壤侵蝕性指數

**Fig.11 Static soil erodibility index map**

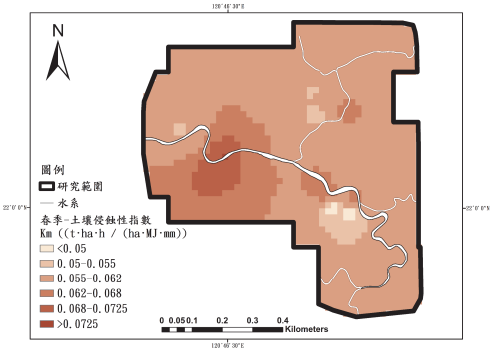


圖 12 春季-土壤侵蝕性指數

**Fig.12 Spring soil erodibility index map**

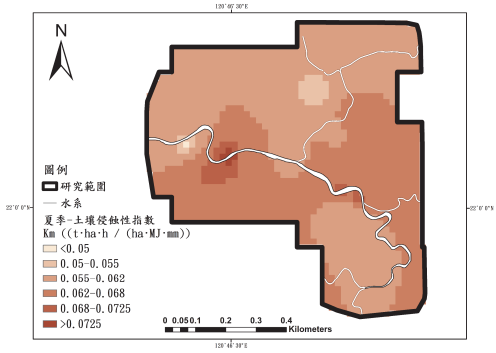


圖 13 夏季-土壤侵蝕性指數

**Fig.13 Summer soil erodibility index map**

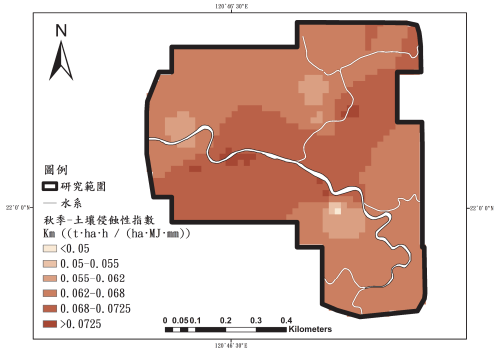


圖 14 秋季-土壤侵蝕性指數

**Fig.14 Autumn soil erodibility index map**

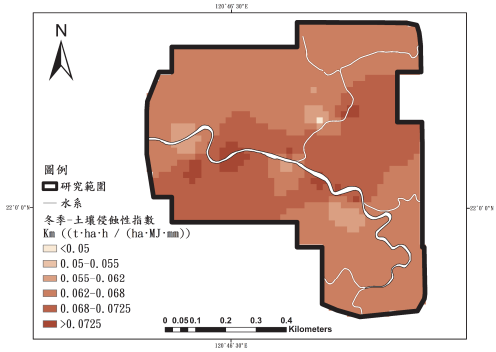


圖 15 冬季-土壤侵蝕性指數

**Fig.15 Winter soil erodibility index map**

## 5. 土壤有機碳推估坡面泥砂遞移方程之建構

建立由土壤有機碳推估坡面泥砂遞移量之方程。由於本研究採單一變動來源設計，即除外其他變數維持固定，因此可假設坡面泥砂遞移量比值與土壤侵蝕性指數比值之間存在冪次關係：

$$R_{SDV} = (R_{Km})^{\beta} \tag{8}$$

式中，$R_{SDV}$為坡面泥砂遞移量比值，表示某季節情境下之坡面泥砂遞移量相對於靜態基準情境之比值；$R_{Km}$為土壤侵蝕性指數比值，表示某季節情境下之土壤侵蝕性指數相對於靜態基準情境之比值；$\beta$ 為坡面泥砂遞移彈性係數，用以表示土壤侵蝕性指數變動對坡面泥砂遞移量變動之敏感程度。

表 2 InVEST SDR 輸入與資料來源

**Table 2 Input data and sources for the InVEST SDR model**

| 模型輸入項目 | 資料來源與年份 |
|---|---|
| 數值地形模型 | 2024年內政部國土測繪中心 (DEM 20 m) |
| 土壤侵蝕性指數 | 農業部農業試驗所 (屏東縣山坡地土壤調查報告) |
| 降雨侵蝕指數 | 農業部農村發展及水土保持署 (行動水保服務網) |
| 土地利用/覆蓋因子 | 2024年內政部國土測繪中心土地利用圖資<br>2024年全球土地覆蓋圖Esri Land Cover<br>行政院農業委員會水土保持局 (水土保持手冊) |
| 生物物理參數表覆蓋管理因子/水土保持處理因子 | 行政院農業委員會水土保持局 (水土保持手冊) |
| SDR 模組參數 | InVEST使用手冊與相關文獻／區域經驗設定 |
| 閾值匯流累積 | 2024年政府資料開放平台 (水系圖) |

表 3 東門溪 InVEST SDR 參數設定

**Table 3 InVEST SDR Parameter Settings for Dongmen Creek**

| 參數 | 設定值 | 設定依據 |
|---|---|---|
| 閾值匯流累積量 (TFA) | 75 | 2024年政府資料開放平台 (水系圖) |
| Borselli k | 2 | 預設值 |
| $IC_0$ | 0.5 | 預設值 |
| SDRmax | 0.8 | 預設值 |
| Maximum L | 122 | 預設值 |

表 4 東門溪土地利用類別與參數設定

**Table 4 Land use categories and parameter settings in Dongmen Creek**

| 土地利用類別 (LULC) | 覆蓋與管理因子 (C) | 水土保持處理因子 (P) |
|---|---|---|
| 水體 (Water) | 0.00 | 1.00 |
| 交通利用 (Transportation) | 0.00 | 1.00 |
| 建築利用 (Built-up) | 0.01 | 1.00 |
| 混合樹 (Mixed Treed) | 0.01 | 1.00 |
| 農業利用 (Agricultural Land) | 0.20 | 1.00 |
| 裸露地 (Bare Ground) | 1.00 | 1.00 |

資料來源：行政院農業委員會水土保持局(水土保持手冊)及全球土地覆蓋圖 Esri Land Cover

當 $\beta$>1 時，表示坡面泥砂遞移量對土壤侵蝕性指數變動具有放大反應；當 $\beta$<1 時，則表示其反應相對鈍化；若 $\beta$=1，則表示兩者呈等比例變動關係。

為估計 $\beta$，本研究將式(8)兩側取自然對數，得到線性化形式：

$$ln(R_{SDV}) = \beta \times ln(R_{Km}) \quad (9)$$

再以各子集水區、各季節之 $R_{Km}$與 $R_{SDV}$ 配對資料進行 ln–ln 迴歸，以估計彈性係數 $\beta$。

由於$R_{Km} = Km_i/Km_0$可由各季節實測 SOC 經式 (1) 與式 (2) 推得，因此最終可建立以 SOC 之坡面泥砂遞移量快速推估式：

$$SDV_i = SDV_0(\frac{Km_i}{Km_0})^{\beta} \quad (10)$$

其中，$SDV_i$為 i 季節之坡面泥砂遞移量，$SDV_0$為基準情境之坡面泥砂遞移量，$Km_i$為由 i 季 SOC 推得之動態土壤侵蝕性指數，$Km_0$為基準土壤侵蝕性指數。此式可在不重新執行 InVEST SDR 模擬之情況下，依據新取得之 SOC 監測資料快速估算坡面泥砂遞移量，提升模式於時序監測與坡地管理上之應用效率。

# 三、結果與討論

## 1. 土壤有機碳之季節變動與可辨識性

依據 LOOCV 交叉驗證，東門溪各採樣期土壤有機碳 (SOC) 空間內插之均方根誤差 (RMSE) 介於 0.32%–0.63%，如表 5 所示。以秋季內插精度最佳，春季次之；由圖 16 至圖 19 可見，春季與秋季之 LOOCV 預測值與實測值較接近 1:1 參考線，散佈相對集中。相較之下，夏季與冬季部分樣點之實測 SOC 與鄰近樣點差異較大，使內插預測值出現較明顯之高估或低估。由於 RMSE 對較大誤差較為敏感，少數偏差較大的樣點會提高整體 RMSE；其中冬季 SOC 數值變異幅度較低，局部異常值對預測結果之影響相對較大，因此夏、冬兩季之 LOOCV 散佈較為發散，空間內插不確定性亦相對較高。此 SOC 空間差異可能亦受到季節性環境條件變化影響，使不同樣點之 SOC 變動程度有所差異。

本研究採用訊號雜訊比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 作為評估 SOC 季節變動可辨識度的主要指標，用以判斷季節差異是否具足夠解釋力。東門溪各季土壤有機碳(SOC)之空間內插結果如表 5 所示，以東門溪全年 SOC 平均值約 1.07 %為參考，四季之訊號雜訊比 (SNR) 介於 1.71–3.37，均大於 1，表示雖然內插結果仍存在一定程度之誤差，SOC 在春、夏、秋、冬之間的差異仍可從背景不確定性中被清楚區分，季節訊號並未被內插誤差所掩蓋。

表 5 東門溪各季 SOC 空間內插誤差與訊號雜訊比統計表

**Table 5 Statistics of seasonal SOC spatial interpolation errors and signal-to-noise ratios in Dongmen Creek**

| 採樣期 | 均方根誤差 (RMSE) | 訊號雜訊比 (SNR) |
|---|---|---|
| 春季 | 0.38 | 2.83 |
| 夏季 | 0.55 | 1.94 |
| 秋季 | 0.32 | 3.37 |
| 冬季 | 0.63 | 1.71 |

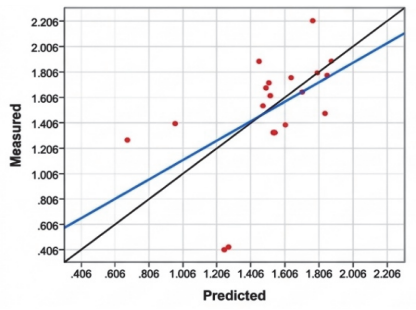


圖 16 春季 LOOCV 散佈圖

**Fig.16 Scatter plot of LOOCV predicted versus observed values in spring**

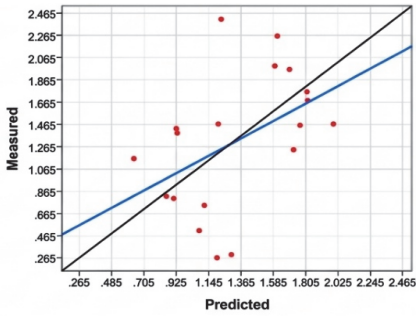


圖 17 夏季 LOOCV 散佈圖

**Fig.17 Scatter plot of LOOCV predicted versus observed values in summer**

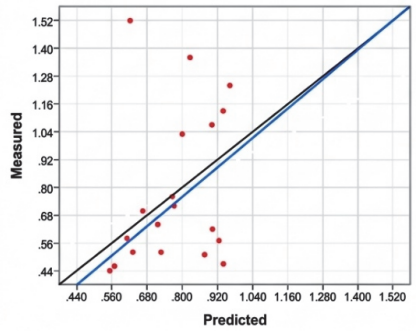


圖 18 秋季 LOOCV 散佈圖

**Fig.18 Scatter plot of LOOCV predicted versus observed values in autumn**

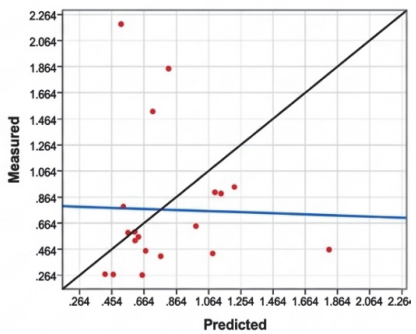


圖 19 冬季 LOOCV 散佈圖

**Fig.19 Scatter plot of LOOCV predicted versus observed values in winter**

## 2. 坡面泥砂遞移量與 DoD 沖刷體積之比較

受限於東門溪研究區缺乏長期輸砂監測資料，本研究採用 2024 年 7 月 (夏季) 及 2024 年 10 月 (秋季) 採樣當日同步取得之 UAV DEM 資料，以秋季 DEM 減夏季 DEM 進行地形差分 (DEM of Difference, DoD)，推估兩期測量期間之子集水區沖刷體積，作為檢定 InVEST SDR 模式輸出空間分布合理性之依據。

由表 6 可知，東門溪夏季 InVEST SDR 模擬之坡面泥砂遞移量與 DoD 推估之實際沖刷體積，在泥砂來源區判識上整體趨勢相近。四個子集水區之占比差介於 0.85-7.51 pp，均低於 10 pp；其中子集水區 2 在兩者中皆為最主要來源區，且四個子集水區排序皆為「2 > 4 > 1 > 3」，顯示模式在空間判定上具有一致性。

在局部子集水區之實際沖刷量與模擬坡面泥砂遞移量仍存在差異，顯示坡面侵蝕量未必可完全轉化為輸送至河道之有效遞移量。沿程暫存、局部沉積及地形連通性差異，仍為控制最終泥砂輸出之重要因素。整體而言，InVEST SDR 模式於本研究區之坡面泥砂遞移空間分布模擬具有合理性。

## 3. 土壤有機碳、土壤侵蝕性指數與坡面泥砂遞移量之相關性

由於 Km 係由實測 SOC 換算有機質後計算所得，而 SDV 則為以 Km 作為輸入之一之 InVEST SDR 模擬結果，因此 SOC、Km 與 SDV 之間具有既定的參數關聯；本節相關分析主要用以描述既定研究架構下各變數之變動方向與關聯程度。

為檢驗土壤有機碳 (SOC) 較高之區域是否對應較低之土壤侵蝕性指數 (Km)，本研究採用格網像元尺度進行分析。由 SOC 轉換為有機質含量並計算動態 Km 後，可觀察到明顯之季節性土壤侵蝕性指數變化。Spearman 等級相關分析結果顯示，SOC 與 Km 整體呈顯著負相關，四季合併之相關係數為 $\rho = -0.805 (p < 0.001)$，顯示較高之 SOC 有助於土壤團聚體形成與結構穩定，降低土壤對侵蝕作用之敏感度，支持以 SOC 作為變動因子修正 Km 值之合理性。各季節之相關分析結果如表 7 所示。

為確認土壤侵蝕性指數變動是否會對應相同方向之坡面泥砂遞移量變化，本研究針對動態 Km 比值與坡面泥砂遞移量比值進行相關分析。結果如表 8 所示，四季合併之 Spearman 相關係數為 $0.712 (p < 0.001)$，顯示相對於靜態基準情境，當土壤侵蝕性指數增加時，坡面泥砂遞移量亦隨之增加，表示土壤有機碳變動所引致之土壤侵蝕性差異，可反映於坡面泥砂遞移反應。

由表 9 可進一步觀察各子集水區於不同季節情境下之變化情形。各子集水區之 Km 比值皆大於 1，介於 1.085-1.433 之間；相對應之坡面泥砂遞移量比值亦皆大於 1，介於 1.118-1.715 之間，顯示各季節動態情境下之土壤侵蝕性與坡面泥砂遞移量均高於靜態基準值。其中，以子集水區 4 之增幅最為明顯，秋、冬兩季之坡面泥砂遞移量比值分別達 1.689 與

1.715；相較之下，子集水區 1 之變動幅度較小。此結果顯示，不同子集水區對土壤侵蝕性變動之遞移反應具有空間差異，但整體趨勢一致呈現「Km 增加，SDV 亦增加」之同向關係。

表 6 東門溪夏季各子集水區 DoD 沖刷體積與坡面泥砂遞移量比較表

**Table 6 Comparison of DoD erosion volumes and slope sediment delivery volumes among sub-watersheds in Dongmen Creek during summer**

| 子集水區編號 | 模擬坡面遞移量 (t/yr) | 實際沖刷體積 ($10^4 m^3$) (註1) | 模擬坡面遞移量占比 (%) | 實際沖刷體積占比 (%) | 占比差 Δpp (pp) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 24.05 | 5.33 | 5.64 | 6.49 | -0.85 |
| 2 | 350.84 | 61.40 | 82.26 | 74.75 | +7.51 |
| 3 | 13.02 | 1.80 | 3.05 | 2.19 | +0.86 |
| 4 | 38.62 | 13.61 | 9.05 | 16.56 | -7.51 |
| 合計 | 426.52 | 82.41 | 100 | 100 | - |

表 7 東門溪土壤有機碳與土壤侵蝕性指數 Spearman 相關係數表

**Table 7 Spearman correlation coefficients between soil organic carbon and soil erodibility index in Dongmen Creek**

| 季節 | 樣本數 n | Spearman ρ | $p$ 值 |
|---|---|---|---|
| 春季 | 1,566 | −0.050 | 0.048 |
| 夏季 | 1,566 | −0.704 | <0.001 |
| 秋季 | 1,566 | −0.745 | <0.001 |
| 冬季 | 1,566 | −0.487 | <0.001 |
| 四季合併 | 6264 | −0.805 | <0.001 |

表 8 東門溪土壤侵蝕性指數與坡面遞移量之比值 Spearman 相關係數

**Table 8 Spearman correlation coefficients between the ratios of soil erodibility index and slope sediment delivery volume in Dongmen Creek**

| 季節 | 樣本數 n | Spearman ρ | $p$ 值 |
|---|---|---|---|
| 春季 | 1,566 | 0.482 | <0.001 |
| 夏季 | 1,566 | 0.660 | <0.001 |
| 秋季 | 1,566 | 0.592 | <0.001 |
| 冬季 | 1,566 | 0.447 | <0.001 |
| 四季合併 | 5848 | 0.712 | < 0.001 |

## 4. 坡面泥砂遞移彈性係數 β

為量化土壤侵蝕性指數變動對坡面泥砂遞移量之影響程度，以四個子集水區於四季情境共 16 組資料進行對數–對數迴歸，如表 9 及表 10 所示。迴歸結果顯示，東門溪之坡面泥砂遞移彈性係數為 $\beta$ = 1.41，換算為實際坡面泥砂遞移量，則可表示為：

$$SDV_{\mathrm{i}}=SDV_0\left(\frac{Km_{\mathrm{i}}}{Km_0}\right)^{1.41}$$

相關係數 $R$ = 0.930，決定係數 $R^2$ = 0.865，且達顯著水準($p$ < 0.001)。此結果表示，在本研究控制條件下，當土壤侵蝕性指數比值增加 1%時，坡面泥砂遞移量比值平均增加約 1.41%，顯示坡面泥砂遞移量對土壤侵蝕性變動具有放大反應。

在本研究固定地形、土地覆蓋及 SDR 模組參數之控制條件下，$\beta$ 反映既定泥砂連通條件下 Km 相對變動與坡面泥砂遞移量相對變動之整體反應程度。綜合表 8 之相關分析、表 9 之比值結果，以及表 10 之迴歸分析皆顯示，在固定其餘因子條件下，坡面泥砂遞移量之變動可由土壤侵蝕性指數之相對變化加以解釋，並可透過彈性係數 $\beta$ 量化其反應程度。

表 9 東門溪動態情境下各子集水區之土壤侵蝕性指數與 InVEST 模擬坡面泥砂遞移量相對於靜態基準之比值

**Table 9 Ratios of soil erodibility index and InVEST-simulated slope sediment delivery volume relative to the static baseline for each sub-watershed under dynamic scenarios in Dongmen Creek**

| 子集水區編號 | 季節 | 土壤沖蝕指數比值 ($\mathbf{K_{m_{ratio}}}$) (註1) | 坡面遞移量比值 ($\boldsymbol{SDV_{ratio}}$) (註2) |
|---|---|---|---|
| **1** | 春季 | 1.085 | 1.118 |
| **2** | 春季 | 1.220 | 1.275 |
| **3** | 春季 | 1.214 | 1.367 |
| **4** | 春季 | 1.249 | 1.495 |
| **1** | 夏季 | 1.101 | 1.135 |
| **2** | 夏季 | 1.220 | 1.275 |
| **3** | 夏季 | 1.219 | 1.378 |
| **4** | 夏季 | 1.350 | 1.614 |
| **1** | 秋季 | 1.232 | 1.268 |
| **2** | 秋季 | 1.319 | 1.391 |
| **3** | 秋季 | 1.346 | 1.526 |
| **4** | 秋季 | 1.413 | 1.689 |
| **1** | 冬季 | 1.230 | 1.265 |
| **2** | 冬季 | 1.325 | 1.390 |
| **3** | 冬季 | 1.324 | 1.492 |
| **4** | 冬季 | 1.433 | 1.715 |

(註 1)土壤沖蝕指數比值為動態土壤沖蝕指數除以靜態土壤沖蝕指數
(註 2)坡面遞移比值為動態坡面遞移量除以靜態坡面遞移量

表 10 對數－對數迴歸估計東門溪坡面之遞移彈性係數 β

**Table 10 Sediment delivery elasticity coefficient (β) estimated by log–log regression for slopes in Dongmen Creek**

| 統計指標 | 數值與結果 |
|---|---|
| 迴歸方程式 | $SDV_{\mathrm{ratio}} = (K_{m_{ratio}})^{1.41}$ |
| 遞移彈性係數$\beta$ | 1.41 |
| 相關係數$R$ | 0.930 |
| 決定係數$\boldsymbol{R^2}$ | 0.865 |
| 顯著性 $p$ | < 0.001 |

## 5. 土壤有機碳推估坡面泥砂遞移方程之適用性分析

以 $\beta$ = 1.41 建立之 SOC 推估坡面泥砂遞移方程，對東門溪四季建模資料具有良好再現能力。由表 11 可知，方程推估值與 InVEST 模擬值整體相近，百分比誤差介於−8.39%至+7.10% 之間，平均絕對百分比誤差 (MAPE) 為 3.95%。所有樣本皆落於 ±10% 範圍內，顯示單一彈性係數已可有效描述不同季節與子集水區之相對遞移反應。推估值與模擬值之對應關係如圖 20 所示。

表 11 東門溪 SOC 推估坡面遞移方程與 InVEST 模擬遞移之百分比誤差

**Table 11 Percentage errors between SOC-based predicted slope sediment delivery and InVEST-simulated sediment delivery in Dongmen Creek**

| 子集水區編號 | 季節 | 推估方程比值 | InVEST模擬比值 | 百分比誤差 (%) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 春季 | 1.123 | 1.118 | +0.46% |
| 2 | | 1.324 | 1.275 | +3.90% |
| 3 | | 1.316 | 1.367 | -3.76% |
| 4 | | 1.370 | 1.495 | -8.39% |
| 1 | 夏季 | 1.146 | 1.135 | +1.03% |
| 2 | | 1.325 | 1.275 | +3.92% |
| 3 | | 1.322 | 1.378 | -4.04% |
| 4 | | 1.528 | 1.614 | -5.30% |
| 1 | 秋季 | 1.344 | 1.268 | +5.92% |
| 2 | | 1.479 | 1.391 | +6.35% |
| 3 | | 1.522 | 1.526 | -0.26% |
| 4 | | 1.630 | 1.689 | -3.52% |
| 1 | 冬季 | 1.340 | 1.265 | +5.89% |
| 2 | | 1.488 | 1.390 | +7.10% |
| 3 | | 1.486 | 1.492 | -0.35% |
| 4 | | 1.664 | 1.715 | -2.97% |
| 平均值 | | | — | MAPE=3.95% |

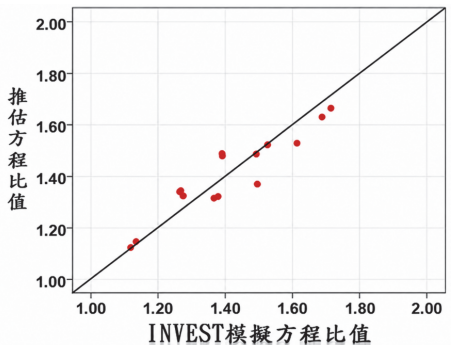


圖 20 InVEST 模擬遞移比值與 SOC 推估方程遞移比值之散佈圖

**Fig.20 Scatter plot of InVEST-simulated delivery ratios versus SOC-based predicted delivery ratios**

由各子集水區之誤差分布可知，子集水區 1 與 2 多呈現正誤差，方程推估值略高於 InVEST 模擬值；子集水區 3 與 4 則多呈現負誤差，在局部條件下仍存在未被單一彈性係數完全捕捉之差異。儘管如此，各季各子集水區之誤差幅度均維持在可接受範圍內，顯示所建立之推估方程對東門溪坡面泥砂遞移反應具有穩定之再現能力。

此外，本研究再以 2025 年隔年夏季新樣本進行驗證。由表 14 可知，2025 年夏季 InVEST 模擬之坡面泥砂遞移量為 467.88 噸/年，方程推估值為 481.77 噸/年，差值為 13.89 噸/年，百分比誤差為+2.97%；以前一年夏季作為比較時，2024 年夏季之誤差亦僅為+2.68%。兩期夏季之誤差皆低於 3%，顯示該方程於同一流域內具有良好之時間穩定性。

由表 12 至表 14 可知，2025 年夏季各子集水區之 Km 值與坡面泥砂遞移量均高於 2024 年夏季。整體而言，InVEST 模擬結果顯示約增加 9.67%，而方程推估結果約增加 9.98%，兩者在變動方向與增幅大小上均相近，表示該方程不僅能掌握坡面泥砂遞移量之總量水準，亦能合理反映短期年際變化之相對幅度。

在流域地貌條件與土地利用未發生顯著變動之前提下，只要持續更新 SOC 監測資料，即可透過既有方程快速估算東門溪坡面泥砂遞移量之相對變化。SOC 不僅可作為土壤性質監測指標，亦可進一步轉換為坡面泥砂遞移資訊，作為坡地動態管理與水土保持規劃之輔助工具。

表 12 東門溪 2024 年及 2025 年各子集水區之土壤侵蝕性指數

**Table 12 Soil erodibility indices of each sub-watershed in Dongmen Creek in 2024 and 2025**

| 子集水區編號 | $Km_0$ 基準 | $K_{m_i}$ 2024夏季 | $K_{m_i}$ 2025夏季 | $K_{m_{ratio}}$ 2024夏季 | $K_{m_{ratio}}$ 2025夏季 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.055 | 0.060 | 0.065 | 1.101 | 1.187 |
| 2 | 0.050 | 0.062 | 0.066 | 1.220 | 1.307 |
| 3 | 0.052 | 0.064 | 0.070 | 1.219 | 1.330 |
| 4 | 0.046 | 0.062 | 0.065 | 1.350 | 1.417 |

表 13 東門溪 2024 年及 2025 年各子集水區之 InVEST 模擬坡面泥砂遞移量

**Table13 InVEST-simulated slope sediment delivery volumes of each sub-watershed in Dongmen Creek in 2024 and 2025**

| 子集水區編號 | $SDV_0$ 基準 | $SDV_i$ 2024夏季 | $SDV_i$ 2025夏季 |
|---|---|---|---|
| 1 | 21.184 | 24.037 | 25.917 |
| 2 | 275.168 | 350.936 | 387.137 |
| 3 | 9.448 | 13.021 | 14.281 |
| 4 | 23.929 | 38.622 | 40.542 |

表 14 東門溪夏季 SOC 推估坡面遞移量方程之驗證

**Table 14 Validation of the SOC-based slope sediment delivery equation for summer in Dongmen Creek**

| 季節情境 | 推估之坡面遞移量 (噸/年) | InVEST 模擬坡面遞移量 (噸/年) | 差值 (噸/年) (註1) | 百分比誤差 (%) |
|---|---|---|---|---|
| 2024年夏季 | 438.05 | 426.61 | 11.44 | +2.68% |
| 2025年夏季 | 481.77 | 467.88 | 13.89 | +2.97% |

(註 1) 差值為推估之坡面遞移量減 InVEST 模擬之坡面遞移量

## 四、結論與建議

本研究以東門溪上游野溪區段為研究區，將土壤有機碳 (SOC) 作為唯一時間變動來源，建立 SOC–Km–SDV 推估架構，以探討土壤性質變化對坡面泥砂遞移量之影響。主要結論如下：

1. 東門溪各季 SOC 具有明顯季節訊號。四季之訊號雜訊比 (SNR) 介於 1.71–3.37，均大於 1，表示 SOC 季節變動幅度高於空間內插誤差，具可辨識性。
2. SOC 與土壤侵蝕性指數 Km 呈顯著負相關。四季合併之 Spearman 相關係數為−0.805($p$ <0.001)，顯示較高之 SOC 有助於提升土壤結構穩定性並降低土壤侵蝕性，支持以 SOC 作為 Km 動態修正因子之合理性。
3. 土壤侵蝕性指數比值與坡面泥砂遞移量比值呈顯著正相關。四季合併之 Spearman 相關係數為 0.712($p$ < 0.001)，顯示在其他因子固定條件下，當土壤侵蝕性增加時，坡面泥砂遞移量亦隨之增加。
4. 東門溪坡面泥砂遞移彈性係數為 β=1.41，決定係數 $R^2$=0.865。此結果表示，當 Km 增加 1%時，坡面泥砂遞移量平均增加約 1.41%，顯示坡面泥砂遞移量對土壤侵蝕性變動具有放大反應。
5. 以 β=1.41 建立之 SOC 推估坡面泥砂遞移方程具有良好適用性。四季建模資料之百分比誤差介於−8.39%至+7.10%之間，平均絕對百分比誤差(MAPE)為 3.95%；以隔年夏季新樣本驗證時，誤差約為+2.97%，顯示該方程在同一流域內具有良好穩定性。

綜合而言，SOC 可透過動態調整土壤侵蝕性指數 Km，進一步影響坡面泥砂遞移量；本研究所建立之推估方程可在不重新執行 InVEST SDR 模擬之情況下，快速估算坡面泥砂遞移量之相對變化，具有作為坡地監測、侵蝕評估與水土保持規劃輔助工具之潛力。

## 參考文獻


[1] 行政院農業委員會水土保持局 (2017)。水土保持手冊。(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan (2017). *Soil and water conservation handbook*, Taiwan. (in Chinese))

[2] 行政院環境保護署 (2022)。土壤採樣方法 (NIEA S102.64B)。(Environmental Protection Administration, Executive Yuan (2022). *Soil Sampling Method (NIEA S102.64B)*, Environmental Protection Administration, Executive Yuan, Taiwan. (in Chinese))

[3] 農業部農業試驗所 (2023)。土壤有機質測定方法－燃燒／紅外線測定法 (TARI S201.1B)。 (Taiwan Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture (2023). *Method for Determining Soil Organic Matter-Combustion/Infrared Spectroscopy (TARI S201.1B)*, Taiwan Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture, Taiwan. (in Chinese))

[4] 林湘芸、李文櫻、林俐玲 (2015)。土壤沖蝕性指數不同推估公式比較之研究。水土保持學報，47(4)，1487-1494。(Lin, S.Y., Lee, W.Y., and Lin, L.L. (2015). "Study of different formulas to estimate soil erodibility factor." *Journal of Soil and Water Conservation*, 47(4), 1487-1494. (in Chinese))

[5] 陳樹群、賴益成 (1999)。河川與集水區泥砂遞移率之推估研究。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))

[6] 董小萍、鄧學謙、林致君、巫建達 (2004)。台灣地區土壤沖蝕指數簡易推估程式之建立。水土保持學報，36(4)，271-282。(Dung, S.P., Deng, S.C., Lin, C.C., and Wu, C.D. (2004). "Establishing the simple prediction method of the soil erodibility index in Taiwan." *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(4), 271-282. (in Chinese))

[7] 萬鑫森、黃俊義 (1989)。臺灣坡地土壤沖蝕。中華水土保持學報，20(2)，17-45。(Wann, S.S., and Hwang, J.I. (1989). "Soil erosion on hillslopes of Taiwan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 20(2), 17-45. (in Chinese))

[8] Borselli, L., Cassi, P., and Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena,* 75(3), 268-277.

[9] Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S., and Mueller, C. (2015). A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. *Science of the Total Environment,* 524-525, 166-177.

[10] Hamel, P., Falinski, K., Sharp, R., Auerbach, D.A., Sanchez-Canales, M., and Dennedy-Frank, P.J. (2017). Sediment delivery modeling in practice: Comparing the effects of watershed characteristics and data resolution across hydroclimatic regions. *Science of the Total Environment,* 580, 1381-1388.

[11] Kadlec, V., Holubík, O., Procházková, E., Urbanová, J., and Tippl, M. (2012). Soil organic carbon dynamics and its influence on the soil erodibility factor. *Soil and Water Research,* 7(3), 97-108.

[12] Pribyl, D.W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma,* 156(3-4), 75-83.

[13] Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., et al. (2020). InVEST 3.9.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.

[14] Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., and Roberts, A.M. (2012). Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology,* 138(1), 74-88.

[15] Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.

[16] Wuest, S.B. (2014). Seasonal variation in soil organic carbon. *Soil Science Society of America Journal,* 78(4), 1442-1447

2026 年 07 月 14 日 收稿
2026 年 08 月 13 日 修正
2026 年 09 月 10 日 接受