

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.041 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.041

李冰砚, 李进林, 韦杰, 等. 三峡水库消落带泥沙和土壤的可蚀性空间分布及差异[J]. 水土保持学报, 2026, 40(1): 373-380.

LI Bingyan, LI Jinlin, WEI Jie, et al. Spatial distribution and differences in erodibility between sediment and soil in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1): 373-380.

## 三峡水库消落带泥沙和土壤的可蚀性空间分布及差异

李冰砚<sup>1,2</sup>, 李进林<sup>2</sup>, 韦杰<sup>1,3</sup>, 贺秀斌<sup>4</sup>, 唐强<sup>5</sup>, 吴胜军<sup>2</sup>, 黄平<sup>2</sup>

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;

3. 重庆市三峡库区地表生态过程野外科学观测研究站, 重庆 405400; 4. 中国科学院·水利部成都

山地灾害与环境研究所, 成都 610213; 5. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

**摘要:** [目的] 为探究三峡水库消落带沉积泥沙与原地土壤间的可蚀性空间分布及差异。[方法] 以三峡水库土质消落带为研究对象, 分别采集沉积泥沙和原地土壤样品, 测试颗粒组成和总有机碳含量, 计算颗粒组成的体积维数( $D_v$ )、结构稳定性指数(SSI)和可蚀性因子( $K$ ), 分析可蚀性的空间分异及类别间的差异。[结果] 1) 三峡水库消落带沉积泥沙的 SSI 和  $K$  的平均值分别为 26.26% 和  $0.046\ 65(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$ , 均显著高于原地土壤的 15.06% 和  $0.045\ 90(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$  ( $p<0.05$ ), 但沉积泥沙与原地土壤间的  $D_v$  不存在显著差异, 分别为 2.74 和 2.73。2) 水库沿程方向上(库尾至坝前), 消落带沉积泥沙和原地土壤的 SSI 均呈波动变化, 而二者间的  $K$  变化趋势不同, 其中, 沉积泥沙的  $K$  无明显变化趋势, 而原地土壤的  $K$  在奉节(FJ)的上游和下游均呈降低趋势, 且该点下游显著高于上游。3) 消落带高程梯度上, 沉积泥沙 SSI 随高程的上升呈显著增加趋势 ( $p<0.05$ ),  $K$  的变化趋势不明显。原地土壤的 SSI 随高程升高呈先增后减趋势, 而  $K$  的高程梯度差异不明显。4) 消落带沉积泥沙的可蚀性与其理化性质间的相关性高于原地土壤。[结论] 三峡水库消落带沉积泥沙和原地土壤间的可蚀性存在显著差异, 研究结果可为水库消落带水土保持与生态保育提供理论参考。

**关键词:** 沉积泥沙; 原地土壤; 可蚀性; 消落带; 三峡水库

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0373-08

## Spatial Distribution and Differences in Erodibility between Sediment and Soil in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir

LI Bingyan<sup>1,2</sup>, LI Jinlin<sup>2</sup>, WEI Jie<sup>1,3</sup>, HE Xiubin<sup>4</sup>, TANG Qiang<sup>5</sup>, WU Shengjun<sup>2</sup>, HUANG Ping<sup>2</sup>

(1. School of Geography and Tourism Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Institute of

Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. Chongqing Field

Observation and Research Station of Surface Ecological Processes in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 405400, China;

4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Chengdu 610213, China; 5. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the spatial distribution and differences in erodibility between sediment and in-situ soil in the water-level fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir. [Methods] The soil-based WLFZ of the Three Gorges Reservoir was selected as the study area. Sediment and in-situ soil samples were collected separately, and their particle composition and total organic carbon content were tested. The volume dimension ( $D_v$ ) of particle composition, structural stability index (SSI), and erodibility factor ( $K$ ) were calculated. The spatial distribution of erodibility and differences between types were analyzed. [Results] 1) The average SSI and  $K$  values of sediment in the WLFZ of the Three Gorges Reservoir were 26.26% and  $0.046\ 65$

收稿日期: 2025-09-15

修回日期: 2025-10-31

录用日期: 2025-11-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-19

资助项目: 三峡后续工作科研项目(5000002024CC20004); 国家自然科学基金项目(42207411, 42371071); 重庆市博士后出站留(来)渝项目; 重庆市两江新区出站博士后科研经费支持项目

第一作者: 李冰砚(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: li\_byann@163.com

通信作者: 李进林(1991—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: chinlin\_lee@sina.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}$ )/( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2$ ), respectively, both significantly higher than those of the in-situ soil, which were 15.06% ( $p < 0.01$ ) and 0.045 90 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}$ )/( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2$ ) ( $p < 0.05$ ). However, there was no significant difference in  $D_v$  between sediment and in-situ soil, which were 2.74 and 2.73, respectively. 2) Along the longitudinal direction of the reservoir (from the tail to the dam front), the SSI values of both sediment and in-situ soil showed fluctuating changes, while the variation trends of the  $K$  values differed between the two. Among them, the  $K$  value of sediment had no obvious trend, while the  $K$  value of in-situ soil showed a decreasing trend in the upstream and downstream of Fengjie (FJ), with significantly higher values downstream than upstream. 3) Along the elevation gradient of the WLFZ, the SSI value of sediment increased significantly with the increase of elevation ( $p < 0.05$ ), while the variation trend of  $K$  value was not obvious. In contrast, the SSI of in-situ soil first increased and then decreased with the increase of elevation, while  $K$  exhibited no evident elevation-dependent differentiation. 4) The correlation between the erodibility and physicochemical properties of sediment was higher than that of in-situ soil in the WLFZ. [Conclusion] Significant differences in erodibility were observed between sediments and in-situ soil in the WLFZ of the Three Gorges Reservoir. The research findings can provide a theoretical basis for soil and water conservation and ecological protection in the WLFZ.

**Keywords:** sediment; in-situ soil; erodibility; water-level fluctuation zone; Three Gorges Reservoir

Received: 2025-09-15

Revised: 2025-10-31

Accepted: 2025-11-02

Online(www.cnki.net): 2025-11-19

土壤可蚀性反映土壤在降雨、径流冲刷及壤中流等外营力复合或交替作用下发生分离和迁移的难易程度<sup>[1]</sup>,已在土壤侵蚀风险评估中得到广泛应用。水库消落带基质的可蚀性关乎岸线稳定、植被动态、生态功能等方面<sup>[2]</sup>。因此,研究水库消落带基质的可蚀性,是理解生态演替过程、研发生态修复技术、制定生态保护政策等方面的重要基础。

水库消落带土壤侵蚀的影响因素可大致分为外部环境因素和内在理化性质两类。其中,主要的外部环境因素是水力干扰的劣化作用和植被固土的保护作用。消落带土壤可蚀性在周期性水力干扰下呈明显的高程梯度分异<sup>[3]</sup>。已有研究<sup>[4]</sup>表明,低高程消落带经历更频繁的干湿交替和更长的淹水时间,导致其土壤浸润软化、胶结物质流失、抗剪强度降低。不仅如此,水位升降过程直接改变孔隙压力,破坏消落带土壤的结构稳定性。相反,高海拔消落带的出露时间较长、水力扰动较少、稳定性较高,因此,表现出更强的抗侵蚀能力<sup>[5]</sup>。消落带植被能够有效抑制土壤侵蚀<sup>[6]</sup>。一方面,植被的地上部分增加消落带坡面的粗糙度,能有效减缓水流速度,进而通过削弱水力干扰(波浪)的影响降低消落带土壤侵蚀,已有研究<sup>[7]</sup>表明,提高消落带植被覆盖度能显著降低土壤侵蚀量;另一方面,植被的地下根系通过穿插缠绕、根土黏结等作用形成根-土复合体,进而提高消落带土体的抗剪强度,有益于土壤的结构稳定性和抗蚀性<sup>[8]</sup>。需要注意的是,外部环境因素影响消落带土壤侵蚀的本质是改变

土壤的物理化学性质。

消落带土壤的内在理化性质是其可蚀性的决定性因素,主要受成土过程及发育过程的影响。总体来看,水库消落带基质包括沉积泥沙和原地土壤2种基本类型。其中,消落带沉积泥沙是由水体中的悬移质泥沙在高水位期间沉积的泥质层,其物源组成复杂、理化性质空间差异性强。沉积泥沙与原地土壤相比,其质地较细、养分含量较高、胶结强度较低<sup>[9]</sup>。尽管沉积型消落带在淹水期间是细颗粒泥沙和养分物质的“汇”,但在出露期也可能在坡面径流、波浪等外营力的作用下发生侵蚀。侵蚀型消落带是细颗粒土壤和养分物质的“源”<sup>[10]</sup>,导致其层次构型、团聚结构、抗蚀性能、生产力等性质发生变化。因此,侵蚀型消落带和沉积型消落带间的基质可蚀性存在明显差异。

目前,关于水库消落带基质的研究中,尽管已涉及理化性质的空间分异特征及形成机制等方面,然而,水库消落带作为新生的脆弱生态系统,其土类基质的演变过程需持续关注和跟踪研究。更重要的是,已有的研究未明确对比分析沉积泥沙与原地土壤间的差异,不利于深入理解消落带基质稳定性与合理配置保护措施。为此,本研究以三峡水库干流常年回水区土质消落带为研究对象,探究沉积泥沙和原地土壤可蚀性的空间分异特征及其差异,研究结果可为三峡水库消落带水土保持措施优化与生态保育提供理论依据。

# 1 材料与方 法

## 1.1 研究区概况

三峡水库坝址位于湖北省宜昌市秭归县三斗坪,回水末端为重庆市江津区花红坝,干流回水河段全长约 660 km,其中,秭归至涪陵为常年回水区(约 500 km),涪陵至江津为变动回水区(约 160 km)(图 1a)。三峡水库采取“蓄清排浑”运行调度模式,在每年汛期(5—9月)将水库水位降至 145 m 运行,非汛期则将水位提升至 175 m 运行。蓄水位周期性涨落导致库周形成垂直落差达 30 m、总面积约 349 km<sup>2</sup>的消落带。从岩土组构特征来看,有土质消落带、岩质消落带和土石混合消落带,岸线长度占比分别约为 70%、20% 和 10%。消落带基质除原地土壤外,还有泥沙沉积层,沉积厚度因地形和高程而存在差异。消落带的优势植物种有狗牙根、苍耳和扁穗牛鞭草。三峡库区属亚热带季风气候,年平均气温为 14.7~18.2℃,总降水量为 1 200~1 400 mm,降水主要集中在 6—8月,约占全年的 45%~50%。

## 1.2 样品采集与测试

本研究的采样时间为 2022 年 8 月(水位消落期),采样区为涪陵至秭归段(常年回水区)的土质消落带,分别选取沉积型消落带和侵蚀型消落带采集沉积泥沙与原地土壤样品。考虑到消落带沉积泥沙和原地土壤分布的空间异质性,本研究的采样点在

空间上并非均匀分布,而是在泥沙沉积明显或原地土壤成片的区域加密布点,每个采样区按“S”形设置 5 个采样点。沿程方向上,自上游至下游在涪陵(FL)、丰都(FD)、忠县(ZX)、万州(WZ)、云阳(YY)、奉节(FJ)、巫山(WS)、巴东(BD)、秭归(ZG)设置采样区(图 1a)。高程梯度上的采样带设置在忠县样区,然后根据消落带的局部地形特征,分别在泥沙沉积区和土壤侵蚀迹地选择不同高程的位置作为采样点(图 1b)。依据《水土保持试验规程》(SL 419-2007)和既有研究成果,通过颗粒质感、色调及剖面结构等区分消落带基质类型。原地土壤的色调鲜明、质地粗糙、存在团聚结构,而沉积泥沙的色调深暗、质地细腻、纹层结构明显。沉积泥沙样品是先将植被清除后,采集的无根系和侵入体的泥沙样品。采集土壤样品时,则根据表层覆盖情况,清除表面杂物后采集原生土壤样品。最终,采集 103 个沉积泥沙样品和 33 个原地土壤样品。所有样品经均匀混合后装入自封袋带回实验室,在室温条件下风干后,使用玛瑙研钵研磨至全部通过 2 mm 孔径尼龙筛。采用四分法从已过 2 mm 筛的样品中取 1/4,继续研磨至完全通过 0.25 mm 孔径尼龙筛。

样品粒度组成采用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪(Malvern,英国)测定,总有机碳(TOC)使用 Vario MACRO Cube 元素分析仪(Elementar,德国)进行定量分析。

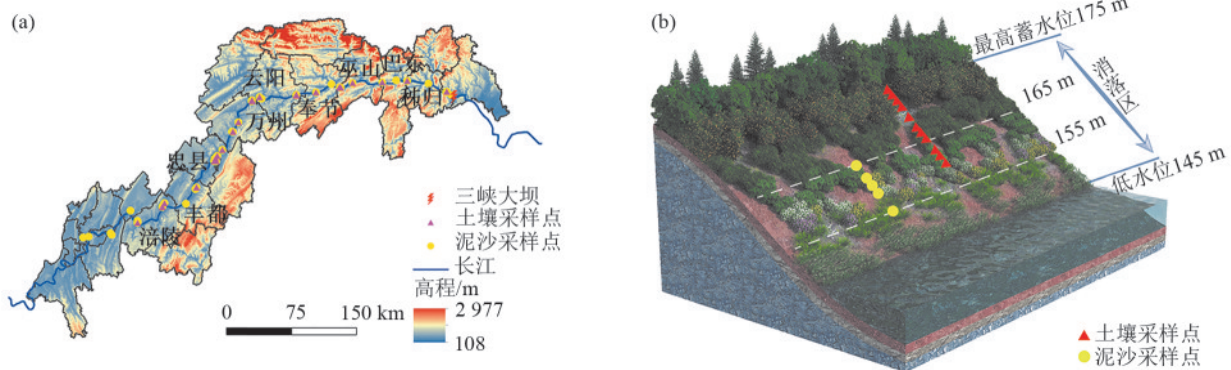


图 1 采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites

## 1.3 体积分形维数与可蚀性指标

本研究采用激光粒度仪所测定的结果为粒径的体积分数,在此基础上,运用王国梁等<sup>[11]</sup>建立的模型计算颗粒组成的体积分形维数,该模型表达式为:

$$\frac{V_{(r<R)}}{V_T} = \left(\frac{R}{\lambda_v}\right)^{3-D_v} \quad (1)$$

式中:R 为泥沙颗粒的粒径,mm;V<sub>(r<R)</sub> 为泥沙颗粒直径<R 的累计体积分数;V<sub>T</sub> 为泥沙的总体积;λ<sub>v</sub> 为对所有粒级而言的上限值,数值上等于最大粒径,

mm;D<sub>v</sub> 为泥沙颗粒分布的体积分形维数;R 取某级粒级上限值与下限值的算术平均值。将公式(1)两边同时取对数,可得到:

$$\log \left[ \frac{V_{(r<R)}}{V_T} \right] = (3 - D_v) \log \left( \frac{R}{\lambda_v} \right) \quad (2)$$

计算体积分形维数时,以  $\log \left[ \frac{V_{(r<R)}}{V_T} \right]$  为因变量、 $\log \left( \frac{R}{\lambda_v} \right)$  为自变量进行线性回归分析(不包括常数

项),体积分形维数( $D_v$ )即为3减去回归系数。

结构稳定性指数(structure stability index, SSI)是评估有机质对维持土壤结构稳定性贡献程度的指标,主要反映土壤结构对外界扰动的弹性恢复能力。本研究运用该指数评估消落带原地土壤和沉积泥沙的结构稳定性。根据SSI阈值范围划分结构退化风险等级,当 $SSI > 7.0\%$ 时,有机质含量充足,能够有效维持团聚体稳定性,结构退化风险较低;当SSI为 $5.0\% \sim 7.0\%$ 时,有机质对结构稳定的支撑作用减弱,存在较高的退化风险;当 $SSI < 5.0\%$ 时,有机质严重损失,结构稳定性显著降低。结构稳定性指数

$$K_{EPIC} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 \text{Sand} \left( 1 - \frac{\text{Silt}}{100} \right) \right] \right\} \left( \frac{\text{Silt}}{\text{Clay} + \text{Silt}} \right)^{0.3} \times \left( 1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \left( 1.0 - \frac{0.7\text{SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN1})} \right) \quad (4)$$

式中:Sand为砂粒质量分数,%;C为有机碳质量分数,%;SN1=1-Sand/100。土壤可蚀性因子(K)单位为美国制,将其计算结果乘以0.1317转化为国际制单位( $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ )。

#### 1.4 数据分析

本研究运用Microsoft Office软件对数据进行初步处理,运用SPSS 23软件对数据进行独立样本t检验,以分析原地土壤与沉积泥沙间的性质差异,采用Pearson相关系数量化结构稳定性、可蚀性因子与基本理化性质的相关性,运用Origin 2021软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 消落带基质的颗粒组成和可蚀性差异

沉积泥沙和原地土壤的 $D_v$ 分别为2.68~2.78和2.59~2.81,平均值分别为2.74和2.73,二者间不存在显著差异( $p > 0.05$ )(图2),说明消落带沉积泥沙和原地土壤的颗粒组成均匀性大致相似。沉积泥沙的

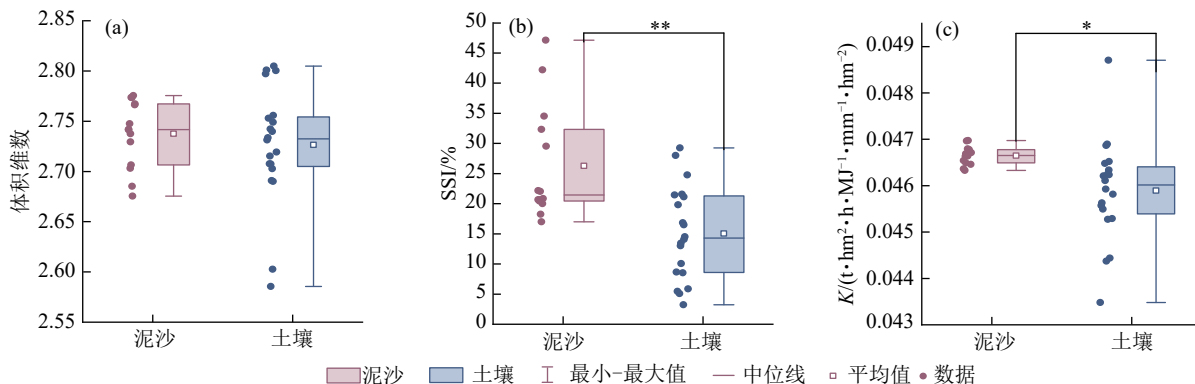
的计算公式为:

$$SSI = \frac{OM}{\text{Clay} + \text{Silt}} \times 100\% = \frac{TOC \times 1.724}{\text{Clay} + \text{Silt}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:OM为有机质质量分数,%;Clay为黏粒质量分数,%;Silt为粉粒质量分数,%;1.724为有机质和有机碳间的换算系数。

土壤可蚀性(K)是表征土壤抵抗侵蚀能力的指标。土壤K越大,说明土壤对侵蚀作用的敏感性越高,抗侵蚀能力越弱。本研究运用 $K_{EPIC}$ 模型计算消落带原地土壤和沉积泥沙的可蚀性因子(K),计算公式为:

SSI平均值为26.26%,显著高于土壤的15.06%( $p < 0.01$ ),说明消落带沉积泥沙的结构稳定性更高。总体来看,沉积泥沙和原地土壤的SSI均高于7%,表明消落带基质结构退化的风险较低。需要说明的是,沉积泥沙和原地土壤SSI的变异系数均较高,分别为35.88%和51.51%,表明消落带基质的结构稳定性在空间分布上不均匀。沉积泥沙与原地土壤的K分别为0.04633~0.04697、0.04348~0.04871( $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ),平均值分别为0.04665、0.04590( $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ),二者间的差异通过统计学意义的显著性检验( $p < 0.05$ )(图2),说明沉积泥沙的可蚀性更强,在侵蚀营力的作用下更容易流失。相比而言,沉积泥沙K的平均值与中位数更接近,且变异系数较低,而原地土壤K的平均值与中位数差异较大,且变异系数较高,说明消落带沉积泥沙的可蚀性较均匀,而原地土壤的可蚀性变化较大。



注:\*表示两样本间指标存在显著差异( $p < 0.05$ );\*\*表示两样本间指标存在极显著差异( $p < 0.01$ )。下同。

图2 消落带沉积泥沙和原地土壤体积维数、SSI与K对比

Fig.2 Comparison of volume dimension, SSI, and K values of sediment and in-situ soil in the water-level fluctuation zone

### 2.2 消落带基质的可蚀性沿程分异特征

总体来看,消落带沉积泥沙 SSI 在沿程方向上(从上游至下游)呈波动变化趋势。沉积泥沙 SSI 大致可划分为 3 个等级,相对较高的有 ZX 和 ZG,平均值为 22.09%,其次是 FL、FD、WZ、YY 和 WS,平均值为 20.52%,最低的是 FJ 和 BD,平均值为 17.61% (图 3)。相比消落带沉积泥沙而言,消落带原地土壤 SSI 的沿程波动变化更加剧烈,除 BD 与 ZG 间的差异不大以外(差值为 0.44%),其余任意相邻 2 个样点间均存在明显差异,其中,差异最大的 WS 与 BD,达到

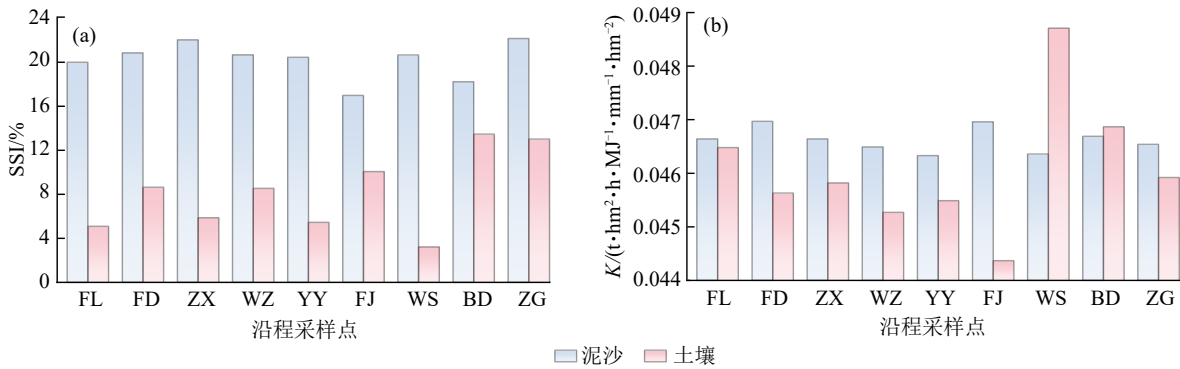


图 3 消落带不同沿程沉积泥沙与原地土壤 SSI 和 K

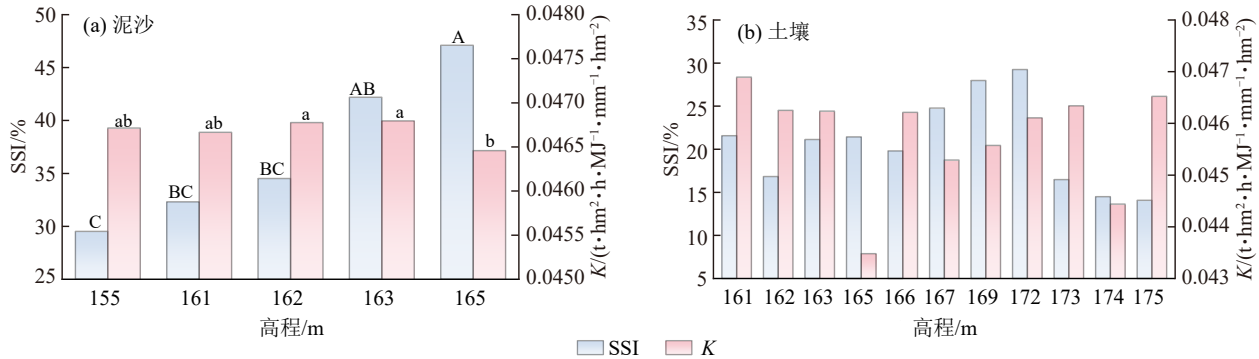
Fig.3 SSI and K values of sediment and in-situ soil at different sampling sites along longitudinal direction in the water-level fluctuation zone

### 2.3 消落带基质的可蚀性高程梯度分异特征

总体来看,消落带沉积泥沙的 SSI 随高程的升高而逐渐增加(图 4),在高程为 165 m 处为 47.11%,与高程 155、161、162 m 处的泥沙 SSI 存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。消落带原地土壤的 SSI 随高程的升高呈先增加后减小趋势,在高程 172 m 处出现最大值,为 29.25%,随后逐渐减小至高程 175 m 处的 14.07%。相比而言,原地土壤的 SSI 在高程 172~175 m 段的递减速率明显大于其在 161~172 m 段的递增速率。消落带沉积泥沙 K 随高程的变化趋势不明显,在高程为 165 m 处出现最小值,为 0.046 46 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ),显著低于高程 162 m 处

10.24%,是 BD 与 ZG 的 23.3 倍。消落带沉积泥沙 K 的沿程变化趋势不明显,各样点间的差异不大,最大值和最小值分别出现在 FD 和 YY,分别为 0.046 97、0.046 33 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ),二者差值仅为 0.000 64 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ )。消落带原地土壤 K 的沿程分布具有区段性特征,其中,从 FL~FJ 和 WS~ZG 均呈明显降低趋势,但 FL~FJ 段的平均值低于 WS~ZG 段,分别为 0.045 51、0.047 17 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ )。说明消落带原地土壤的结构稳定性和可蚀性具有更明显的空间分异。

的 0.046 78 和高程 163 m 处的 0.046 80 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ),但与高程 155、161 m 处泥沙 K 间均没有显著性差异 ( $p < 0.05$ )。消落带原地土壤的 K 随高程的增加呈波动变化趋势,在高程 161 m 处出现最大值,为 0.046 90 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ),在高程 165、174 m 处出现较低值,分别为 0.043 48、0.044 44 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ )。需要注意的是,消落带原地土壤的 K 在高程为 162、163、166、173 m 处的差异不明显,分别为 0.046 25、0.046 24、0.046 21 和 0.046 34 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ )。说明消落带原地土壤的可蚀性随高程的变化比沉积泥沙更复杂。



注:不同大写字母表示泥沙 SSI 存在显著差异 ( $p < 0.05$ );不同小写字母表示泥沙 K 存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。

图 4 消落带不同高程沉积泥沙与原地土壤 SSI 和 K

Fig.4 SSI and K values of sediment and in-situ soil at different elevations in the water-level fluctuation zone

## 2.4 消落带基质可蚀性与理化性质的相关性

消落带沉积泥沙 SSI 与 OM 呈高度正相关, 相关系数为 0.99 ( $p < 0.01$ ), 与  $D_v$  呈极显著正相关, 相关系数为 0.49 ( $p < 0.01$ ), 与中值粒径呈显著负相关, 相关系数为  $-0.27$  ( $p < 0.01$ ), 而与黏粒、粉粒和砂粒含量均无统计学意义的显著性相关(图 5)。说明消落带泥沙沉积层的 OM 含量对其结构稳定性的影响比粒度更明显。消落带沉积泥沙  $K$  与粉粒含量呈极显著正相关, 相关系数为 0.98 ( $p < 0.01$ ), 而与黏粒和砂粒含量均呈显著负相关, 相关系数分别为  $-0.39$  和  $-0.57$  ( $p <$

0.01), 说明粒度偏细或者偏粗均有利于提高消落带泥沙沉积层的抗蚀性。消落带原地土壤的 SSI 与 OM 和黏粒含量分别呈显著和极显著正相关, 相关系数分别为 0.99 ( $p < 0.01$ ) 和 0.41 ( $p < 0.05$ ), 而与其他特性间均无统计学意义的显著性相关。消落带原地土壤的  $K$  与粉粒含量呈高度正相关, 相关系数为 0.71 ( $p < 0.01$ ), 与砂粒和  $D_v$  均呈中度负相关, 相关系数分别为  $-0.55$  和  $-0.44$  ( $p < 0.01$ ), 而与中值粒径和 OM 含量的相关性较低 ( $p > 0.05$ )。总体来看, 消落带沉积泥沙的可蚀性与其理化性质间的相关性更加明显。

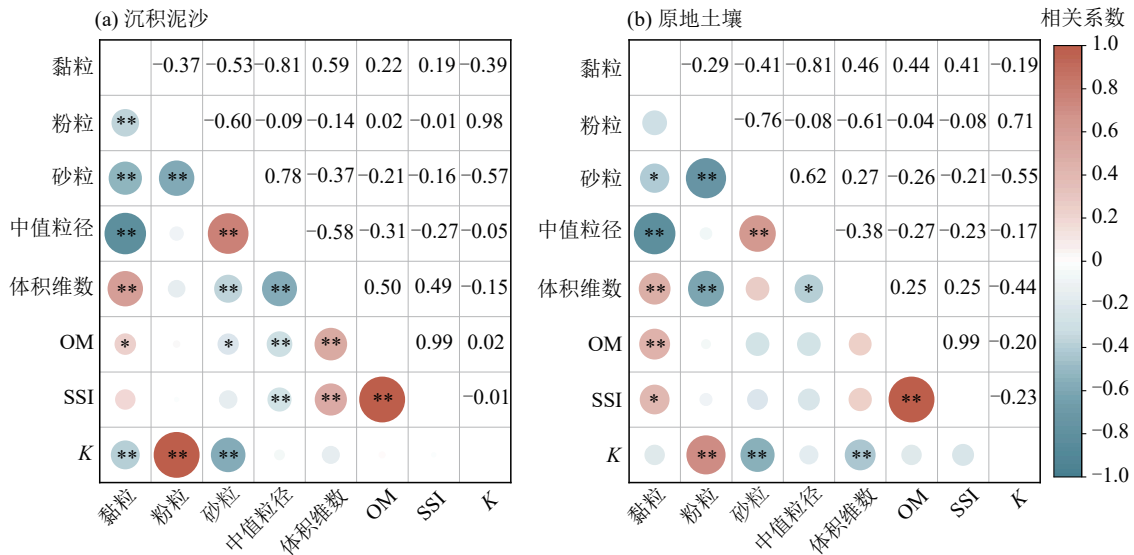


图 5 消落带沉积泥沙、原地土壤的可蚀性指标与理化性质相关性

Fig.5 Correlation between erodibility indices and physicochemical properties of sediment and in-situ soil in the water-level fluctuation zone

## 3 讨论

### 3.1 消落带泥沙和土壤可蚀性差异的主要原因

三峡水库消落带沉积泥沙与原地土壤间的可蚀性及其空间分布均存在差异, 是由内部因素(本身的理化性质)和外部因素(水力干扰)共同作用的结果。内部因素方面, 土壤基质的可蚀性受颗粒组成、有机质含量等理化性质的显著影响<sup>[12]</sup>。本研究表明, 消落带沉积泥沙的黏粉粒含量比原地土壤高, 具有更大的比表面积和更强的阳离子交换能力, 使得颗粒间的胶结更强, 且可吸附和携带更多的养分物质, 因此, 泥沙沉积层的 SSI 更高<sup>[13-14]</sup>。本研究中, 沉积泥沙和原地土壤的 SSI 与 OM 呈显著正相关, 可能是因为 OM 是影响土壤可蚀性的关键因子, 可通过改变孔隙度、渗透性和团聚体稳定性等途径增强土壤结构稳定性<sup>[15]</sup>。消落带沉积泥沙  $K$  显著高于原地土壤, 可能与颗粒特性有关。已有研究<sup>[16-17]</sup>表明, 土壤的黏粒和 OM 含量高可明显提升其抗蚀性能。然而, 消落带沉积泥沙的平均粉粒含量为 82.55%, 且  $K$  与粉粒

含量呈高度正相关(图 5), 高粉粒含量可能削弱黏粒和 OM 对抗蚀性的积极影响。外部因素方面, 尽管沉积型消落带表现为泥沙和养分物质积累, 但该过程处于周期性的动态变化中, 表现为既有沉积, 也有侵蚀, 最终呈净沉积。也导致消落带基质的理化性质存在类别间的差异。周期性的淹水扰动、快速的侵蚀与沉积扰动等使植被在泥沙沉积层难以稳定生长<sup>[18-20]</sup>, 植物根系对泥沙沉积层结构的改良效应较弱, 沉积泥沙的结构稳定性更多是依赖于其理化性质, 可能是沉积泥沙的可蚀性与其理化性质的相关性更显著的原因。综上所述, 消落带沉积泥沙和原地土壤的可蚀性存在显著性差异, 是基质的理化性质、沉积动态变化等内外因素共同作用的结果。

### 3.2 消落带泥沙和土壤可蚀性空间分异的主要原因

本研究发现, 消落带沉积泥沙的可蚀性在沿程方向上呈波动变化趋势(图 3), 可能是因为悬移质泥沙在河道型水库中的分选性沉积导致泥沙粒度发生改变<sup>[9]</sup>, 形成沉积泥沙粒度从上游至下游逐渐细化的

空间分布格局<sup>[21]</sup>,进而引起可蚀性的沿程变化。本研究中,原地土壤 SSI 的沿程波动变化更加剧烈,可能是因为相邻采样点之间成土母质、地形坡度、土地利用方式等存在差异。在支流、河口等特殊位置及其附近区域,由于水动力条件变化,往往出现可蚀性指数的明显波动,形成沿程分异格局中的特殊节点。高程梯度方面,消落带沉积泥沙 SSI 在高程为 165 m 处的值与高程 155、161、162 m 处存在显著差异(图 4),可能与泥沙沉积对养分富集的高程梯度分异有关。相比而言,水体悬移质泥沙的沉积速率在高海拔消落带较低,沉积层厚度较薄,泥沙在非汛期可通过吸附作用从水体中富集更多的养分物质<sup>[22]</sup>,进而使有机质含量较高。因此,消落带沉积泥沙的 SSI 随高程的升高而增加。原地土壤 SSI 在高程 172 m 处出现最大值,可能是因为局部微地形、植被群落或成土母质的共同影响。本研究发现,消落带基质的  $K$  随高程呈波动变化,可能是不同高程消落带的淹水时间、上覆水压力、干湿交替频率、水位变动幅度等均存在差异,通常情况下,消落带基质的抗侵蚀能力随着淹水和干湿交替强度的增加而降低<sup>[23]</sup>。因此,该类外部因素的共同作用也使消落带基质的理化特性产生空间分异<sup>[24]</sup>,进而导致可蚀性存在高程梯度分异。

### 3.3 本研究的不足与展望

本研究阐明三峡水库消落带沉积泥沙与原生土壤间的可蚀性及其空间分布的差异,并探讨形成该差异的主要原因。总体来看,消落带基质具有较高的侵蚀风险。未来库区水土保持治理中,应当将土质类消落带侵蚀防控作为重要内容之一,合理配置简易工程措施和生态措施,提高消落带基质的抗蚀性能。然而,本研究仍存在以下方面的不足。首先,三峡库区独特的水文节律导致消落带基质的可蚀性处于动态变化过程中,不同时间节点间的可蚀性大小及差异可能不同。本研究是基于单次采样分析的结果,尽管初步阐明消落带沉积泥沙与原地土壤间可蚀性的空间分异特征及差异,但未涉及到该差异的时空变化趋势,未来的研究中,可开展固定样方的长期定位观测,并尽可能地涉及不同植被覆盖条件下的演变过程。其次,本研究中的采样点布设未兼顾消落带的局部地形特征、立地条件等差异,也没有涉及支流消落带,可能导致对可蚀性空间分异特征的评估存在不确定性。总的来看,未来需进一步在全域尺度上系统布设固定观测网络并开展长期监测和试验分析,精细表征消落带沉积泥沙与原生土壤可蚀性的空间分异特征及其动态变化过程。

## 4 结论

1)消落带沉积泥沙的 SSI 指数平均值为 26.26%,显著高于消落带原地土壤的 15.06% ( $p < 0.01$ ),沉积泥沙的平均  $K$  为 0.046 65 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}$ )/(MJ·mm· $\text{hm}^2$ ),显著高于原地土壤的 0.045 90 ( $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}$ )/(MJ·mm· $\text{hm}^2$ ) ( $p < 0.05$ )。

2)消落带沉积泥沙和原地土壤的 SSI 在沿程方向上均呈波动变化趋势,相比而言,原地土壤 SSI 的沿程波动更加剧烈。沉积泥沙  $K$  的沿程变化趋势不明显,而原地土壤  $K$  具有区段性差异。

3)沉积泥沙 SSI 在高程梯度上随高程的升高而逐渐增加 ( $p < 0.05$ ),原地土壤的 SSI 随高程的升高呈先增加后减小趋势。沉积泥沙  $K$  随高程的变化趋势不明显,而原地土壤的  $K$  随高程的增加呈波动变化趋势。

### 参考文献:

- [1] 王玉石,武昱鑫,余新晓,等.北方农牧交错带植被恢复下坡向对土壤可蚀性的影响[J].中国水土保持科学,2025,23(2):116-126.  
WANG Y S, WU Y X, YU X X, et al. Effects of slope direction on soil erodibility under vegetation restoration in northern farming-pastoral ecotone[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(2): 116-126.
- [2] YANG F, WANG Y, CHAN Z L. Review of environmental conditions in the water level fluctuation zone: Perspectives on riparian vegetation engineering in the Three Gorges Reservoir [J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2015, 18(2): 240-249.
- [3] 杨玲,贺秀斌,鲍玉海,等.水库消落带不同海拔狗牙根草地土壤可蚀性研究[J].水土保持研究,2021,28(5):1-6.  
YANG L, HE X B, BAO Y H, et al. Soil erodibility of *Cynodon dactylon* grassland at different altitudes in the reservoir riparian zone [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 1-6.
- [4] SU X L, NILSSON C, PILOTTO F, et al. Soil erosion and deposition in the new shorelines of the Three Gorges Reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2017, 599: 1485-1492.
- [5] 饶洁,唐强,冯韫,等.三峡水库消落带生境特征与植被恢复模式[J].水土保持学报,2024,38(1):310-318.  
RAO J, TANG Q, FENG Y, et al. Habitat condition and vegetation restoration patterns in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 310-318.
- [6] 刘泉宏,湛芸,颜哲豪,等.紫色土区草篱根系对其根-土复合体抗剪和抗冲性能的影响[J].草业学报,2021,30(11):98-107.

- LIU X H, CHEN Y, YAN Z H, et al. The effects of grass hedgerow roots on shear strength and scouring resistance of root-soil complexes in the purple soil region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(11):98-107.
- [7] XIAO H, LIU D Y, GAO F, et al. Evaluating the influence of *Cynodon dactylon* on the wave force and wave erosion in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Ecological Engineering*, 2024, 202:e107233.
- [8] GUO P, XIA Z Y, LIU Q, et al. The mechanism of the plant roots, soil-reinforcement based on generalized equivalent confining pressure[J]. *PeerJ*, 2020, 8:e10064.
- [9] 段金宝, 李进林, 韦杰, 等. 三峡水库消落带沉积泥沙与土壤的养分特征差异[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(6):57-65.
- DUAN J B, LI J L, WEI J, et al. Differences in nutrient characteristics between deposited sediment and original soil in water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water*, 2025, 39(6):57-65.
- [10] 郑晓岚, 杨玲, 宋娇, 等. 水库消落带土壤颗粒组成分形及其空间分异特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1):66-71.
- ZHENG X L, YANG L, SONG J, et al. Fractal characteristics and spatial variation of soil particle composition in the reservoir riparian zone[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(1):66-71.
- [11] WANG G L, ZHOU S L, ZHAO Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4):545-550.
- [12] ZHANG B J, ZHANG G H, YANG H Y, et al. Soil erodibility affected by vegetation restoration on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. *Soil Research*, 2018, 56(7):712-723.
- [13] 唐强, 贺秀斌, 鲍玉海, 等. 三峡水库干流典型消落带泥沙沉积过程[J]. *科技导报*, 2014, 32(24):73-77.
- TANG Q, HE X B, BAO Y H, et al. Sedimentation processes in a typical riparian zone along the Yangtze mainstream of the Three Gorges Reservoir[J]. *Science and Technology Review*, 2014, 32(24):73-77.
- [14] SUN H Y, WU Y H, BING H J, et al. Available forms of nutrients and heavy metals control the distribution of microbial phospholipid fatty acids in sediments of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(6):5740-5751.
- [15] JIANG P F, DONG B J, HUANG G X, et al. Study on the sediment and phosphorus flux processes under the effects of mega dams upstream of Yangtze River[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 860:e160453.
- [16] ZHU P Z, FENG T, YANG L, et al. Biological soil crusts decrease soil erodibility of economic fruit forests land through its consolidation effect in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Catena*, 2024, 243:e108200.
- [17] 阎丹丹, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡水库蓄水后长江干支流及消落带泥沙颗粒特征分析[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4):289-292.
- YAN D D, BAO Y H, HE X B, et al. Particle size characteristics of sediment in draw down area of upper Yangtze River and its major tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4):289-292.
- [18] WANG Y J, CHEN F Q, ZHANG M, et al. The effects of the reverse seasonal flooding on soil texture within the hydro-fluctuation belt in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(1):109-115.
- [19] RAN Y G, MA M H, LIU Y, et al. Hydrological stress regimes regulate effects of binding agents on soil aggregate stability in the riparian zones[J]. *Catena*, 2021, 196:e104815.
- [20] 贺秀斌, 鲍玉海. 三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4):160-168.
- HE X B, BAO Y H. Research advances on soil erosion and ecological restoration in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(4):160-168.
- [21] 王彬俨, 严冬春, 文安邦, 等. 三峡水库干流消落带沉积泥沙粒径特征及其物源意义[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(9):1421-1429.
- WANG B Y, YAN D C, WEN A B, et al. Sediment particle size in riparian zone of the Three Gorges Reservoir and its implication on sources[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(9):1421-1429.
- [22] 何平生, 李进林, 贺秀斌, 等. 三峡水库消落带泥沙淤积层水肥特性高程梯度分异[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2):209-217.
- HE P S, LI J L, HE X B, et al. Elevation-based differentiation in moisture and nutrients of sedimentary layer in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2):209-217.
- [23] CHEN S Q, ZHANG G H, LUO Y F, et al. Soil erodibility indicators as affected by water level fluctuations in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Catena*, 2021, 207:e105692.
- [24] ZHU P Z, ZHANG G H, ZHANG B J. Soil saturated hydraulic conductivity of typical revegetated plants on steep gully slopes of Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2022, 412:e115717.