

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.017 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.017

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 Jinbao, LI Jinlin, WEI Jie, 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 Conservation, 2025, 39(6):57-65.

## 三峡水库消落带沉积泥沙与土壤的养分特征差异

段金宝<sup>1,2</sup>, 李进林<sup>2</sup>, 韦杰<sup>1,3</sup>, 唐强<sup>4</sup>, 贺秀斌<sup>5</sup>, 黄平<sup>2</sup>, 吴胜军<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.西南大学地理科学学院,重庆 400715; 5.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610299)

**摘要:** [目的] 揭示三峡水库消落带沉积泥沙与原地土壤间的养分特征差异,为消落带生态修复及管理提供科学依据。[方法] 以三峡水库土质消落带为研究对象,采集沉积泥沙和原地土壤样品,测试颗粒组成和养分物质(总有机碳 TOC、全氮 TN 和全磷 TP)含量,使用加权求和法计算沉积泥沙和土壤的综合养分指数(CNI),对比分析沉积泥沙与土壤间的养分特征差异。[结果] 1)消落带沉积泥沙的中值粒径( $d_{50}$ )和平均值分别为 5.57~10.29、8.54  $\mu\text{m}$ ,显著小于土壤的 10.97~19.57、15.67  $\mu\text{m}$  ( $p<0.01$ )。消落带沉积泥沙颗粒在水库河道沿程方向具有明显细化的趋势,而土壤颗粒组成的空间分异不明显。2)消落带沉积泥沙的 TOC、TN 和 TP 质量分数平均值分别为 11.34、1.83、0.63 g/kg,其中,TOC 和 TN 质量分数显著高于土壤的 4.23、0.73 g/kg ( $p<0.01$ ),而 TP 质量分数不存在显著性差异。消落带沉积泥沙的 C:N、C:P 和 N:P 分别为 6.26、18.50、2.96,其中,C:P 和 N:P 显著高于土壤的 3.23、1.65 ( $p<0.01$ ),而 C:N 不存在显著性差异。3)消落带沉积泥沙与土壤的综合养分指数存在显著差异( $p<0.01$ ),其中,沉积泥沙综合养分指数平均值为 0.50,属于 III 级水平,土壤的综合养分指数平均值为 0.28,属于 IV 级水平。4)消落带沉积泥沙的养分特征与其颗粒组成显著相关,而土壤的养分特征与其颗粒组成没有统计学意义的相关性。[结论] 三峡水库消落带沉积泥沙与土壤之间的养分特征存在显著性差异,侵蚀和淤积是这种差异的主要驱动因素。

**关键词:** 沉积泥沙; 原地土壤; 养分特征; 消落带; 三峡水库

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0057-09

## Differences in Nutrient Characteristics Between Deposited Sediment and Original Soil in Water-Level Fluctuation Zone of Three Gorges Reservoir

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

(1.School of Geography and Tourism, 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.School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 5.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610299, China)

**Abstract:** [Objective] To reveal the differences in nutrient characteristics between deposited sediment and native soil within the water-level fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir, thereby providing a scientific basis for ecological restoration and management of the WLFZ. [Methods] Taking the silty WLFZ of the Three Gorges Reservoir as the study area, samples of deposited sediment and native soil were collected to analyze particle composition and nutrient contents, including total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP). A comprehensive nutrient index (CNI) was calculated for both sediment and soil samples using

收稿日期:2025-04-15 修回日期:2025-06-04 录用日期:2025-06-24 网络首发日期(www.cnki.net):2025-08-04

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(42207411,42371071,42307461);重庆市博士后出站留(来)渝资助项目;重庆市两江新区出站博士后科研经费支持项目

第一作者:段金宝(2000—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:jnbao\_D@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

the weighted sum method, and their differences in nutrient characteristics were comparatively analyzed. [Results] 1) The median particle diameter ( $d_{50}$ ) of deposited sediment in WLFZ ranged from 5.57 to 10.29  $\mu\text{m}$  with an average value of 8.54  $\mu\text{m}$ , significantly smaller than those of native soil, which were 10.97 – 19.57  $\mu\text{m}$  and 15.67  $\mu\text{m}$  ( $p < 0.01$ ). Along the longitudinal direction of reservoir channel, the sediment particles exhibited a pronounced fining trend, while the spatial variation in soil particle composition was not significant. 2) The average mass fractions of TOC, TN, and TP in deposited sediment of the WLFZ were 11.34, 1.83, and 0.63 g/kg, respectively. Among them, TOC and TN mass fractions were significantly higher than those in native soil (4.23 and 0.73 g/kg) ( $p < 0.01$ ), while the TP content showed no significant difference. The C:N, C:P, and N:P ratios of sediment were 6.26, 18.50, and 2.96, respectively. Among them, the C:P and N:P ratios were significantly higher than those of soil (3.23 and 1.65) ( $p < 0.01$ ), while the C:N ratio exhibited no significant difference. 3) Significant differences were observed in the CNI between deposited sediment and soil in the WLFZ ( $p < 0.01$ ). Among them, the average CNI of the deposited sediment was 0.50, classified as Grade III, while that of the soil was 0.28, classified as Grade IV. 4) The nutrient characteristics of deposited sediment in the WLFZ were significantly correlated with its particle composition, while no statistically significant correlation was observed between the nutrient characteristics and particle composition of soil. [Conclusion] There are significant differences in nutrient characteristics between deposited sediment and soil in the WLFZ of the Three Gorges Reservoir, with erosion and deposition processes being the main driving factors for these differences.

**Keywords:** deposited sediment; original soil; nutrient characteristics; water-level fluctuation zone; Three Gorges Reservoir

Received: 2025-04-15

Revised: 2025-06-04

Accepted: 2025-06-24

Online(www.cnki.net): 2025-08-04

水库消落带是指蓄水位周期性涨落而形成的水陆交错区,也是生态脆弱带和敏感带,重建消落带生态系统是保障水库可持续运行的有效途径<sup>[1]</sup>。消落带土壤基质的养分是其植被恢复与生态系统稳定性的基础保障<sup>[2]</sup>。河道型水库的特殊水文节律将对其消落带土壤基质养分特性产生深远影响<sup>[3]</sup>。因此,研究水库消落带土壤基质的养分特征对理解消落带生态系统演变过程、制定生态保护政策、研发生态治理措施、筛选适生植被等均具有重要意义。

目前,关于水库消落带土壤基质养分演变的驱动力及机理有3种认识。第1种是消落带土壤基质的养分含量及其空间分布主要是受水库蓄水位波动的影响<sup>[4]</sup>。总体上,高海拔消落带的淹水时间短、出露时间长,有利于基质养分物质的保持<sup>[5]</sup>。相反,低海拔消落带因受到更高频次和更长时间的淹水影响,土壤养分物质流失相对强烈,赋存的养分物质相对较少<sup>[6]</sup>。因此,消落带土壤基质的养分在海拔梯度上呈现明显的空间分异。然而,这种观点强调水力扰动对消落带基质养分的影响,但未解释水体中悬移质泥沙沉积的影响。第2种是消落带基质的养分状况受植被群落特征及分布格局的影响<sup>[7]</sup>。消落带植被枯落物及残体是土壤基质的重要养分来源<sup>[8]</sup>。通常,不同海拔及不同河段位置的植被分布格局不

同,不同植被群落间的凋落物和生物量也不同,消落带基质的养分由此存在差异<sup>[9]</sup>;另一方面,消落带植被生长也将影响基质养分的含量特征、转化过程、赋存形态等,也将改变消落带基质养分的空间分布格局<sup>[10]</sup>。此观点关注到消落带基质与植被间的相互作用,但未排除局部微地形变化效应的影响。第3种是消落带土壤侵蚀和泥沙沉积对基质养分含量及空间分布具有重要的调控作用<sup>[11]</sup>。侵蚀型消落带在径流冲刷、波浪侵蚀等多重营力的作用下,其养分物质随土壤侵蚀而流失,土壤侵蚀强度的空间分异导致土壤养分的空间分异<sup>[12]</sup>。相反,淤积型消落带的基质养分水平可能随富含养分的远源泥沙沉积而提高,也可能因消落带上坡或内部侵蚀泥沙沉积而没有明显变化<sup>[13-14]</sup>。可能导致侵蚀型消落带与淤积型消落带间的土壤基质养分水平、分布格局等存在差异。

三峡水库消落带在土壤侵蚀与泥沙淤积的影响下形成2种完全不同的基质,其在养分特征方面的差异直接决定生态修复方式的选择和修复措施的成效。然而,目前关于三峡水库消落带基质养分的研究均将所有基质视为土壤,未明确区分泥沙沉积层与原地土壤间的差异,既不利于山区河道型水库消落带生态演变过程的深入认识,也不利于水库消落带的水土保持与生态保育。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,分析基质养分物质的沿程分布及泥沙沉积层与原地土壤间的差异,结果可为消落带水土保持生态修复提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点概况

三峡水库是山区河道型水库,其回水区总长约为660 km,其中,涪陵至坝址(秭归)河段为常年回水区,涪陵至库尾(江津)河段为变动回水区。三峡水库的“蓄清排浑”运行调度模式导致库周形成垂直落差为30 m,总面积约为349 km<sup>2</sup>的水库消落带。消落带的岩土组构可大致分为岩质消落带、土质消落带和土石混合消落带。本研究的所有采样点均分布在常年回水区的土质消落带,涉及的土壤类型主要包括紫色土、山地黄壤和水稻土,其中,山地黄壤和水稻土的比例较低。三峡水库土质消落带既存在土壤侵蚀,也存在泥沙沉积。因此,除原生土壤外,消落带的基质还有水体悬移质泥沙落淤形成的泥沙淤积层。消落带的自然植被主要有苍耳(*Xanthium sibiricum*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)等草本植物,消落带海拔相对较高处的人工植被有落羽杉(*Taxodium distichum*)、池杉(*Taxodium ascendens*)等乔木。

### 1.2 样品采集

本研究以三峡水库的常年回水区(涪陵至坝前)为研究对象,相比于同时具有河道属性(汛期)和水库属性(非汛期)的变动回水区,常年回水区具有完全的水库属性。采样时间为2022年8月的低水位期间。水库蓄水位消落后,选取沉积型消落带和侵蚀型消落带采集沉积泥沙和土壤样品(图1)。消落带泥沙淤积和土壤分布均具有明显的沿程空间分异,因此,相邻2个采样区并非等距离分布,而是在泥沙淤积相对强烈或者原地土壤存留较多的河段较为密集,否则相对较少。样品采集时,在选定的采样区按“S”形布设5个采样点,参照《水土保持试验规程》(SL 419—2007)<sup>[15]</sup>和已有研究<sup>[2]</sup>结果,通过颗粒的质感、色调、剖面中的纹理等区分沉积泥沙和土壤样品。采集沉积泥沙样品时,先人工去除地上植被,再采集不包含侵入体的纯净样品,混合均匀后装进密封袋保存。采集土壤样品时,若采样点为侵蚀迹地,则直接采集,若表面覆盖泥沙,则需要先去除淤积层,然后再采集土壤。最终,共采集50个沉积泥沙样品,22个土壤样品。

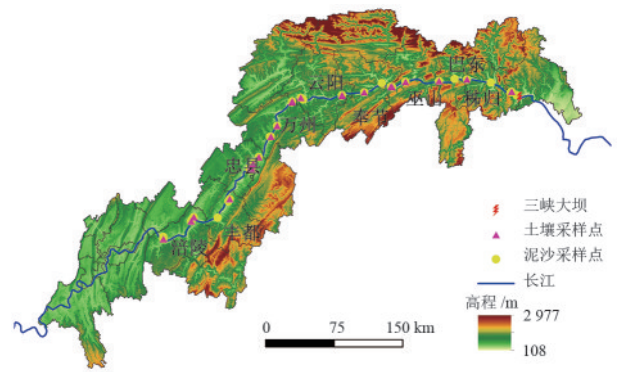


图1 采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites

### 1.3 测试分析

消落带沉积泥沙和土壤样品均在室温条件下风干,再研磨至全部通过孔径为2 mm的尼龙网筛。运用“四分法”从已过2 mm筛的样品中取出1/4,继续研磨至全部通过孔径为0.25 mm的尼龙网筛。采用Mastersizer 2000激光粒度分析仪测试颗粒组成,样品前处理方法见文献[16]。上机测试时,每个样品自动测试3次,并计算平均值作为结果。测试结果输出后,对数据质量进行检查,当遮光度值低于20%且加权残差值低于3时,认为测试结果合格。采用Vario MACRO Cube元素分析仪测试有机碳(TOC)和全氮(TN),样品前处理方法和测试流程见文献[4]。土壤全磷(TP)测定参照《森林土壤磷的测定》(LY/T 1232-2015)<sup>[17]</sup>,采用浓硫酸-高氯酸酸融-钼锑抗比色法测定。

### 1.4 综合养分指数

本研究采用加权求和法计算综合养分指数(CNI),该指数兼顾不同养分指标(TOC、TN、TP)的水平,已在评价土壤质量状况和退化程度方面得到广泛应用,CNI的取值为0.1~1.0,该值越接近1.0,说明肥力越好。本研究考虑到基质综合养分水平的区分度,并按照文献[18]中的等级划分方法,将消落带土壤与沉积泥沙养分水平划分为5个等级,分别是高(I级,  $CNI \geq 0.8$ )、较高(II级,  $0.6 \leq CNI \leq 0.8$ )、中等(III级,  $0.4 \leq CNI \leq 0.6$ )、较低(IV级,  $0.2 \leq CNI \leq 0.4$ )和低(V级,  $CNI \leq 0.2$ )。综合养分指数的计算公式为:

$$CNI = \sum_{i=1}^n N_i C_i \quad (1)$$

式中:CNI为综合养分指数;*i*为指标序数;*N<sub>i</sub>*为第*i*个评价指标的隶属度值;*C<sub>i</sub>*为第*i*个评价指标的权重;*n*为评价指标的数量。

本研究运用熵权法确定每个指标的权重,并利用隶属度函数计算每个指标的得分<sup>[19]</sup>。选出各指标

的最大值( $b$ )和最小值( $a$ ),若该指标与综合养分呈正相关时,选正函数式(2),呈负相关时则选反函数式(3)计算。本研究中的 TOC、TN 和 TP 均是正向指标。

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \leq a \end{cases} \quad (2)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \leq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a > x > b \\ 0 & x \geq a \end{cases} \quad (3)$$

计算各指标的信息熵、差异系数和权重的计算公式为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (5)$$

$$h_i = 1 - H_i \quad (6)$$

$$C_i = \frac{h_i}{\sum H_i} \quad (7)$$

式中: $H_i$ 为第  $i$  个指标的熵值; $p_{ij}$ 为第  $i$  个样本在第  $j$  个指标上的比重; $x_{ij}$ 为第  $i$  个样本在第  $j$  个指标上的标准化值; $h_i$ 为差异系数; $m$ 为计算样本数量。

## 1.5 数据分析

考虑到泥沙分选性沉积在距离相对较近的采样区之间的效果不明显,因此,分析沿程分布特征时,将距离较近的采样点数据进行平均,最终混合形成 9 个泥沙和土壤点位数据。消落带沉积泥沙与土壤间的理化性质为彼此独立的样本,因此,运用 2 个独立样本  $t$  检验分析二者间的差异是否存在统计学意义上显著性。运用 Pearson 相关系数分析颗粒特性与养分特性之间的关系。数据整理在 Microsoft Office 2019 软件中完成,数理统计分析在 SPSS 25.0 软件中完成,绘图在 Origin 2021 软件中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积泥沙与土壤颗粒组成的差异

沉积泥沙和土壤颗粒的粉粒含量较高,体积占比分别为 80.9%~84.23%、73.05%~83.38%,平均值分别为 82.55%、78.58%(图 2)。相比而言,黏粒和砂粒的含量较少,其在沉积泥沙中的占比分别为 12.17%~15.89%、1.71%~5.23%,平均值分别为 14.17%、3.29%,在土壤中的占比分别为 7.47%~14.12%、4.07%~17.12%,平均值分别为 11.19%、10.23%。总体来看,沉积泥沙与土壤的颗粒组成存

在显著差异( $p < 0.01$ ),中值粒径分别为 5.57~10.29、10.97~19.57  $\mu\text{m}$ ,平均值分别为 8.54、15.67  $\mu\text{m}$ (图 3),说明沉积泥沙的粒度比土壤更细,颗粒组成更均匀。从沿程变化的总体趋势来看,三峡水库消落带沉积泥沙呈现出明显的沿程细化趋势。具体来看,沉积泥沙的黏粒、粉粒和砂粒含量在涪陵采样点(最上游)处分别为 12.55%、82.22%、5.23%,而在秭归采样点(最下游)处分别为 13.76%、83.53%、2.73%,中值粒径在涪陵和秭归分别为 10.18、5.57  $\mu\text{m}$ 。然而,土壤颗粒组成的沿程变化趋势与沉积泥沙相反,总体上呈变粗趋势。相比而言,土壤颗粒在涪陵至奉节段的变粗趋势更明显。具体来看,土壤的砂粒含量从涪陵采样点处的 4.77% 增加到奉节采样点处的 17.12%,而黏、粉颗粒含量从涪陵处的 14.12%、81.11% 降低到奉节处的 9.83%、73.05%,中值粒径则从 12.90  $\mu\text{m}$  增加到 19.57  $\mu\text{m}$ (图 2)。

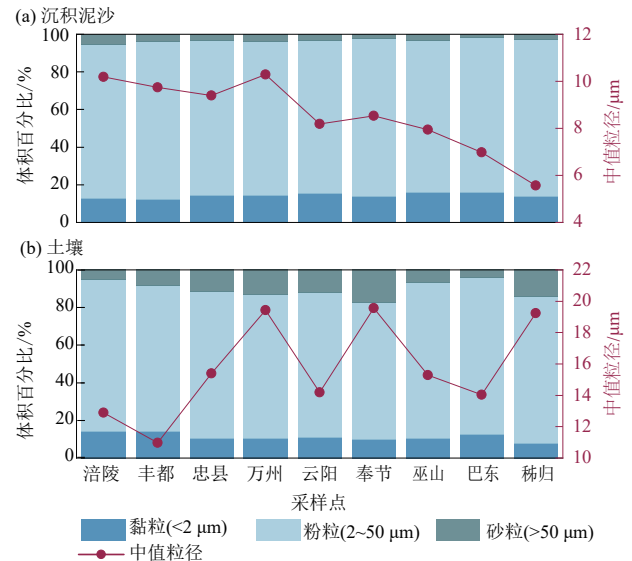


图 2 沉积泥沙和土壤的颗粒组成

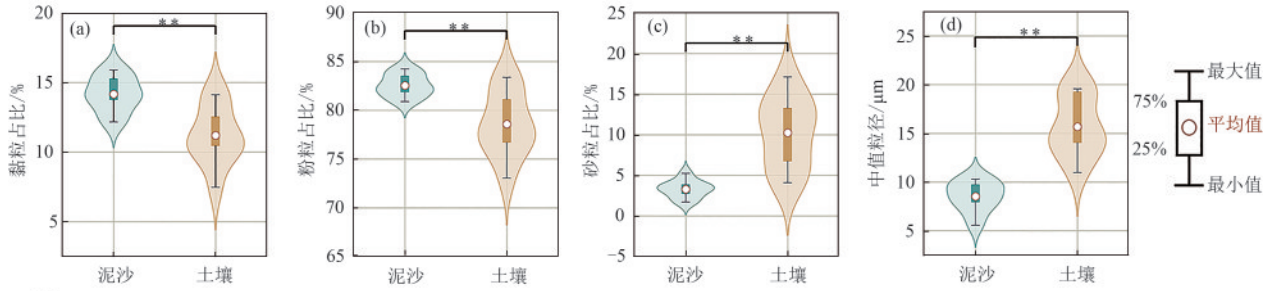
Fig.2 Particle composition of deposited sediments and soils

### 2.2 沉积泥沙与土壤的养分含量差异

由图 4 可知,沉积泥沙 TOC 和 TN 的质量分数分别为 9.66~12.5、1.54~2.30 g/kg,平均值分别为 11.34、1.83 g/kg,显著高于消落带土壤的 1.74~7.49、0.45~1.21 g/kg,其平均值分别为 4.23、0.73 g/kg( $p < 0.01$ )。沉积泥沙和土壤的 TP 质量分数大致相当,分别为 0.52~0.88、0.28~1.50 g/kg,平均值分别为 0.63、0.55 g/kg。从化学计量比来看,沉积泥沙的 C:P 和 N:P 分别为 13.18~23.86、2.22~3.74,平均值分别为 18.50、2.96,显著高于土壤的 4.30~18.65、0.51~2.79,平均值分别为 9.23、1.65( $p < 0.01$ )。沉积泥沙与土壤 C:N 没有显著性差异,分别为 5.38~7.66、3.56~8.53,平均值分别为 6.26、5.82。说明消落带土壤侵蚀和泥沙沉积对养分的含量存在明显影响,而对 C:N 的影响

不明显。从沿程空间分布来看,沉积泥沙 TP 质量分数总体上呈现从上游至下游增加趋势,奉节至秭归段的均值高于涪陵至奉节段,分别为 0.70、0.57 g/kg,相比而言,TOC 和 TN 质量分数的沿程变化趋势不明显(图 5a)。土壤 TOC、TN 和 TP 质量分数在距离大坝较近的河段相对较高,而整体的变化趋势不明显

(图 5b)。整体来看,沉积泥沙 C:N、C:P 和 N:P 沿程方向呈先增后减再增的变化趋势,其中,C:P 的这种趋势更加明显。涪陵至云阳段的土壤 C:N 为 5.22,低于云阳至秭归段的 6.31,而 C:P 和 N:P 分别为 9.80、1.89,高于云阳至秭归段的 7.83、1.27。说明土壤 C:N、C:P 和 N:P 的波动更剧烈、沿程趋势不明显。



注:\*\*表示沉积泥沙和土壤间各指标显著差异( $p < 0.01$ )。下同。

图 3 沉积泥沙与土壤的颗粒组成差异

Fig.3 Differences in particle composition between deposited sediments and soils

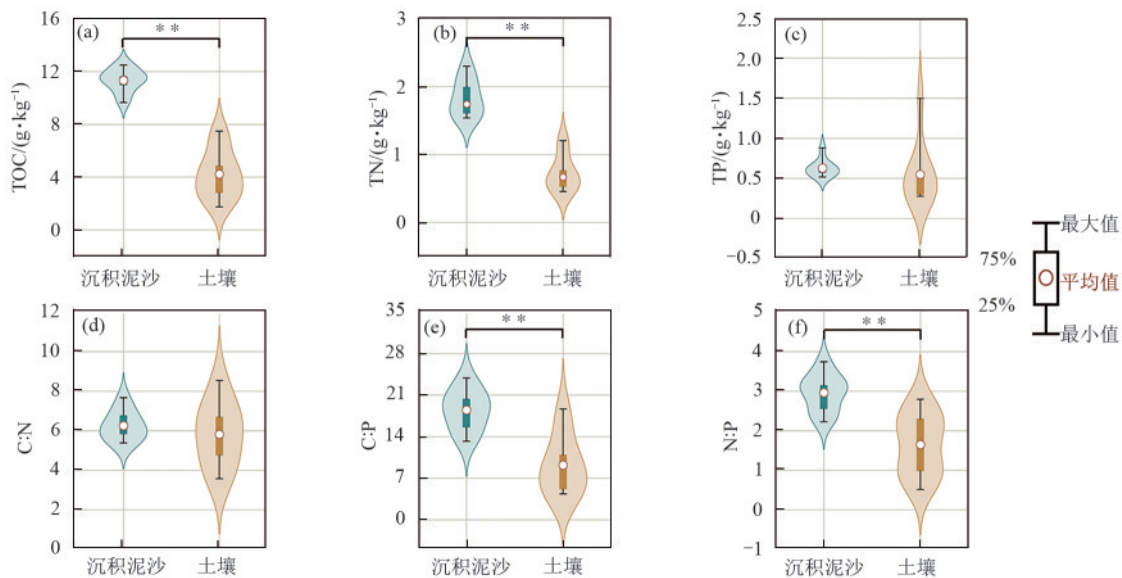


图 4 沉积泥沙与土壤的 TOC、TN 和 TP 含量及计量比差异

Fig.4 Differences in TOC, TN, and TP contents and their stoichiometric ratios between deposited sediments and soils

(a) 沉积泥沙

TOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	10.99	11.62	12.34	11.51	11.45	9.66	11.60	10.39	12.50
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.74	1.99	1.61	1.65	1.94	1.58	2.16	1.54	2.30
TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.59	0.64	0.52	0.53	0.58	0.62	0.88	0.69	0.62
C:N	6.31	5.83	7.66	6.98	5.90	6.10	5.38	6.75	5.43
C:P	18.58	18.30	23.86	21.80	19.90	15.57	13.18	15.00	20.30
N:P	2.94	3.14	3.11	3.12	3.38	2.55	2.45	2.22	3.74

涪陵 丰都 忠县 万州 云阳 奉节 巫山 巴东 秭归

(b) 土壤

TOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.81	4.59	3.02	4.30	2.78	4.84	1.74	7.49	6.49
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.59	0.69	0.51	1.21	0.53	0.67	0.45	1.12	0.76
TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.30	0.30	0.28	0.50	0.54	0.72	0.41	0.40	1.50
C:N	4.75	6.61	5.92	3.56	5.25	7.25	3.84	6.68	8.53
C:P	9.29	15.15	10.87	8.58	5.14	6.73	4.30	18.65	4.34
N:P	1.96	2.29	1.84	2.41	0.98	0.93	1.12	2.79	0.51

涪陵 丰都 忠县 万州 云阳 奉节 巫山 巴东 秭归

注:图中圆形面积和颜色深浅表示同一指标不同采样点值的大小。

图 5 沉积泥沙和土壤养分含量及其化学计量特征

Fig.5 Nutrient contents and their stoichiometric characteristics of deposited sediments and soils

### 2.3 沉积泥沙与土壤综合养分指数的差异

沉积泥沙与土壤的综合养分指数间存在显著差异( $p < 0.01$ ),分别为 0.35~0.61、0.11~0.60,平均值分别为 0.50、0.28(表 1)。从养分等级差异来看,沉积泥沙的养分为Ⅲ级,而土壤的养分为Ⅳ级,说明沉积泥沙的养分状况优于原地土壤。从沿程空间分布

表 1 消落带沉积泥沙和土壤综合养分指数

Table 1 Comprehensive nutrient index of deposited sediments and soils in water-level fluctuation zone

样品类型	涪陵	丰都	忠县	万州	云阳	奉节	巫山	巴东	秭归	平均值
沉积泥沙	0.51	0.49	0.61	0.52	0.51	0.50	0.44	0.60	0.35	0.50A
土壤	0.15	0.50	0.60	0.32	0.43	0.14	0.13	0.11	0.13	0.28B

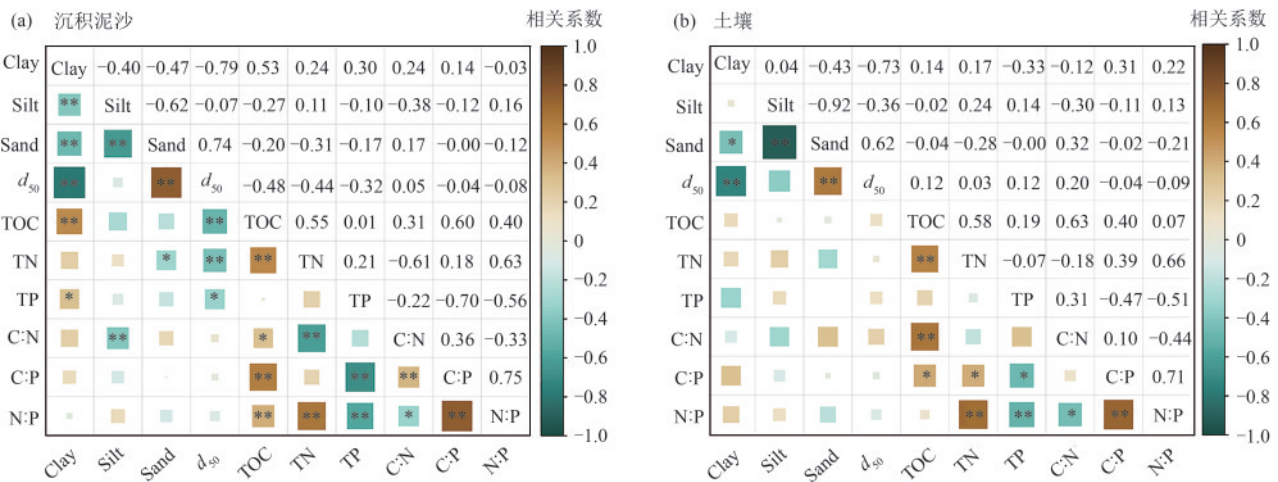
注:同列不同大写字母表示沉积泥沙和土壤间显著性差异( $p < 0.01$ )。

### 2.4 沉积泥沙和土壤养分与颗粒组成间的关系

由图 6 可知,沉积泥沙 TOC 和 TP 质量分数与黏粒质量分数呈显著正相关,相关系数分别为 0.53( $p < 0.01$ )、0.30( $p < 0.05$ ),而与中值粒径间呈显著负相关,相关系数分别为 -0.48、-0.44( $p < 0.01$ )。沉积泥沙 TN 含量与黏粒含量呈弱度正相关,相关系数低于 0.3,而与中值粒径呈显著负相关,相关系

来看,沉积泥沙的综合养分指数呈沿程降低趋势,但这种趋势不显著。土壤的综合养分指数最高值和最低值分别出现在忠县和巴东采样点,分别为 0.60、0.11。从变化幅度来看,土壤养分等级在 V 级到Ⅲ级间变化,这比沉积泥沙在Ⅳ级到Ⅲ级间变化更剧烈。

数 -0.32( $p < 0.05$ )。说明沉积泥沙的养分受其细颗粒组分的影响较大,相比而言,对 TOC 和 TN 的影响大于 TP。从沉积泥沙各养分指标间的关系来看,消落带沉积泥沙 TOC 与 TN 质量分数间呈显著正相关,相关系数为 0.55( $p < 0.01$ ),但 TP 与 TOC、TN 质量分数间相关性不显著。说明沉积泥沙的 TOC 和 TN 可能具有相同的来源。



注:\*表示  $p < 0.05$ ; \*\*表示  $p < 0.01$ 。

图 6 消落带沉积泥沙和土壤的理化性质指标间相关性

Fig.6 Correlation coefficients between various physiochemical properties of deposited sediments and soils in the water-level fluctuation zone

沉积泥沙的生态化学计量比中,除了 C:N 与粉粒呈显著负相关外( $p < 0.01$ ),其余计量比与泥沙颗粒间的关系不显著。土壤养分物质质量分数及其生态化学计量比与颗粒组成间均无显著的统计学相关性。从土壤各养分指标间的关系来看,TOC 与 TN 质量分数呈极显著正相关,相关系数为 0.58( $p < 0.01$ ),而 TP 质量分数与 TOC 和 TN 质量分数间相关性不显著,这与沉积泥沙各养分指标间的关系一致。总体来看,消落带沉积泥沙的养分特征与其颗粒组成间的相关性更紧密。

## 3 讨论

### 3.1 沉积泥沙与土壤间养分特征差异的形成原因

本研究表明,三峡水库消落带沉积泥沙与土壤间的养分质量分数存在显著差异( $p < 0.05$ ),这与何平生等<sup>[4]</sup>和饶洁等<sup>[20]</sup>的研究结果相似。消落带沉积泥沙与土壤间的养分特征差异主要由泥沙沉积的养分富集效应和土壤侵蚀的养分流失效应共同驱动。长江上游流域侵蚀泥沙是三峡水库沉积泥沙的主要来源,占比约为 87%<sup>[21]</sup>。其中,来源于坡面表层侵蚀的泥沙本身就具有相对较高的养分物质含量<sup>[22]</sup>。这些入库悬移质泥沙在河道型水库中的分选性沉积过

程导致沉积泥沙粒度在沿程方向具有明显的细化趋势(图2)。相比而言,消落带沉积泥沙的颗粒更细,因此具有相对较大的比表面积和较高的表面电荷,可以吸附和携带更多的养分物质<sup>[23-24]</sup>。本研究表明,消落带沉积泥沙的养分质量分数与其颗粒组成间具有显著的相关性(图6),说明泥沙输移和沉积过程对养分具有富集作用。然而,消落带沉积泥沙养分的沿程分布与其颗粒组成的沿程分布并不完全一致(图2和图5),说明悬移质泥沙分选性沉积不是河道型水库消落带泥沙养分沿程分布的决定性因素,沉积泥沙表面物理化学特性、泥沙与水体间的物质交换过程等可能也具有重要影响<sup>[25-26]</sup>。本研究表明,消落带土壤的养分物质质量分数显著低于沉积泥沙,其主要原因可能是消落带土壤侵蚀过程所导致的养分流失。三峡水库消落带的土壤以紫色土为主,其成土速度较快,但抗蚀性较弱<sup>[27]</sup>。侵蚀型消落带表层土壤在波浪、径流、崩塌等营力的作用下逐步剥离,土壤养分物质也随之流失。已有研究<sup>[1,28]</sup>表明,三峡水库长江干流典型土质消落带在早期的平均侵蚀模数可高达54 050 t/(km<sup>2</sup>·a),这是三峡库区坡耕地土壤侵蚀模数的16倍。此外,消落带侵蚀迹地遗留土壤的颗粒较粗(图2),这既不利于在淹没期从周围水体中吸附养分物质,也不利于保持本身的养分物质。综上所述,土壤侵蚀和泥沙沉积作为重塑河道型水库消落带景观的驱动力,二者间的“对立”作用造就消落带不同基质间的养分特性差异。

### 3.2 沉积泥沙与土壤养分特征差异对生态修复的启示

消落带退化生态系统修复是保障水库生态安全的重要途径。目前,科研单位和政府部门围绕适物种选择、植物恢复等实施诸多消落带生态修复工程项目。从长时间尺度来看,这些生态修复项目的效果也不尽相同<sup>[29]</sup>。总体来看,影响消落带生态修复效果的因素主要有2个方面:一方面是周期性淹水对消落带生境的影响;另一方面,则是消落带基质的稳定性和养分特征<sup>[13,27]</sup>。侵蚀型消落带的基质不稳定、养分含量低,给植被定植和生长带来巨大挑战<sup>[30-31]</sup>。这也是尽管侵蚀型消落带高海拔段的淹水强度较低、淹水时间较短,但仍然无植被覆盖的主要原因。因此,依靠人工直接恢复侵蚀型消落带植被,从而达到恢复生态系统的目的几乎不可能实现<sup>[29]</sup>。针对侵蚀型消落带生态修复,需要研发经济投入低的简易工程措施稳固有限的土壤,在此基础上,引入适物种。相比而言,淤积型消落带的基质稳定、养

分充足,有利于植被生长和繁殖<sup>[32]</sup>。这也是尽管淤积型消落带的低海拔段淹水强度较高、淹水时间较长,但自然植被在退水后仍能快速返青的主要原因。针对淤积型消落带生态修复,总体上遵循“适度人工干扰”原则<sup>[21]</sup>。因此,除了对景观的美感有特殊要求外,大部分淤积型消落带可以不实施任何工程治理和植被恢复措施,自然演替即可<sup>[32]</sup>。综上所述,三峡水库消落带生态修复需要对消落带进行分类分区,建议在技术可行和经济可行的条件下优先修复侵蚀型消落带。

### 3.3 本研究的不足

本研究探讨了三峡水库消落带沉积泥沙与土壤之间的养分特征差异,并分析形成这种差异的原因和对消落带生态修复的启示。然而,本研究仍存在不足。首先,消落带土壤侵蚀和泥沙沉积的强度、基质的物理化学性质等均随高程的变化而变化,这导致基质的养分特征也存在高程梯度分异。本研究重点关注沉积泥沙和土壤在水库沿程方向的空间变化趋势,但未剔除采样点高程的影响。其次,消落带基质的养分特征是处于动态变化过程中,不同的时间节点呈现出的含量及差异可能不同。本研究基于1次采样分析的结果,探讨了沉积泥沙与土壤间养分特征的差异,但未注意到这种差异的时序变化过程,未来的研究中,可开展长期的定位观测。最后,三峡水库消落带幅员面积大,局部的地形特征、立地条件等差异明显,本研究中的采样点布设未兼顾到各种情形,也没有涉及支流消落带,给本研究的结果带来不确定性。未来需进一步开展更范围内的固定样方监测,精细表征消落带沉积泥沙与土壤养分间的差异及其动态变化过程。

## 4 结论

1)沉积泥沙与土壤间的颗粒特性存在显著性差异,其中,泥沙的砂粒含量和中值粒径分别为3.29%、8.54 μm,均显著低于土壤的10.2%和15.67 μm( $p < 0.01$ )。

2)沉积泥沙与土壤间的养分特性存在显著差异,土壤的TOC、TN质量分数为4.23、0.72 g/kg、C:P和N:P分别为9.23、1.65( $p < 0.01$ )。沉积泥沙的TOC、TN质量分数分别为11.34、1.83 g/kg,C:P和N:P分别为18.50、2.96,均显著高于土壤。然而,沉积泥沙与土壤间的TP质量分数和C:N的差异不显著。

3)沉积泥沙的养分指数为0.50,属于Ⅲ级水平,这显著高于土壤养分指数的0.28(Ⅳ级水平)( $p < 0.01$ ),整体上看,沉积泥沙养分质量分数高于土壤。

4)沉积泥沙养分质量分数与其颗粒组成显著相

关,而消落带土壤的养分质量分数与其颗粒组成间不存在统计学意义上的相关性。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 禹妍彤,鲍玉海,吕佼容,等.三峡水库消落带不同水位高程土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].长江流域资源与环境,2023,32(12):2558-2567.  
YU Y T, BAO Y H, LV J R, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus at different elevations in water level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(12): 2558-2567.
- [3] 孙阔,袁兴中,王晓锋,等.三峡水库消落带土壤养分含量及生态化学计量特征[J].长江流域资源与环境,2023,32(2):403-414.  
SUN K, YUAN X Z, WANG X F, et al. Characteristics soil nutrient content and ecological stoichiometry in the littoral zone of the Three Gorges Reservoir area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(2): 403-414.
- [4] 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.
- [5] 张志永,程郁春,程丽,等.三峡库区万州段消落带植被及土壤理化特征分析[J].水生态学杂志,2016,37(2):24-33.  
ZHANG Z Y, CHENG Y C, CHENG L, et al. Characteristics of vegetation and soil in the water level fluctuation zone of the Wanzhou region of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(2): 24-33.
- [6] 梅渝,黄平,王鹏,等.水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响[J].环境科学,2024,45(5):2715-2726.  
MEI Y, HUANG P, WANG P, et al. Effects of water level fluctuations and vegetation restoration on soil prokaryotic microbial community structure in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2715-2726.
- [7] 许丽雯,张跃伟,蹇陈,等.三峡库区消落带狗牙根及土壤生态化学计量特征的空间分异及相关性[J].水土保持学报,2025,39(1):249-261.  
XU L W, ZHANG Y W, JIAN C, et al. Spatial differentiation and correlation of ecological stoichiometric characteristics of *Cynodon dactylon* and soil in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 249-261.
- [8] 常超,谢宗强,熊高明,等.三峡库区不同植被类型土壤养分特征[J].生态学报,2009,29(11):5978-5985.  
CHANG C, XIE Z Q, XIONG G M, et al. Characteristics of soil nutrients of different vegetation types in the Three Gorges Reservoir area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5978-5985.
- [9] 任庆水,马朋,李昌晓,等.三峡库区消落带落羽杉(*Taxodium distichum*)与柳树(*Salix matsudana*)人工植被对土壤营养元素含量的影响[J].生态学报,2016,36(20):6431-6444.  
REN Q S, MA P, LI C X, et al. Effects of *Taxodium distichum* and *Salix matsudana* on the contents of nutrient elements in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6431-6444.
- [10] 黄茹,黄林,李杰,等.三峡库区不同植被恢复措施下土壤养分评价[J].云南农业大学学报(自然科学版),2016,31(2):328-334.  
HUANG R, HUANG L, LI J, et al. The evaluation of soil nutrient on different restoration measures in Three Gorges Reservoir region[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2016, 31(2): 328-334.
- [11] BAO Y H, GAO P, HE X. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir: A unique geomorphological unit[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 14-24.
- [12] TANG Q, COLLINS A L, WEN A B, et al. Particle size differentiation explains flow regulation controls on sediment sorting in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1114-1125.
- [13] YE C, CHEN C R, BUTLER O M, et al. Spatial and temporal dynamics of nutrients in riparian soils after nine years of operation of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 664: 841-850.
- [14] 葛士林,黄国鲜,任倩慧,等.鄱阳湖水沙与氮磷输移过程及滞留效应研究[J].环境科学研究,2024,37(2):346-358.  
GE S L, HUANG G X, REN Q H, et al. Study on transport processes and retention effects of water, suspended sediment, nitrogen and phosphorus in Poyang Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(2): 346-358.
- [15] 中华人民共和国水利部.水土保持试验规程:SL 419—2007.[S].北京:北京科文图书业信息技术有限公司,

- 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Test specification of soil and water conservation: SL 419—2007. [S]. Beijing: Beijing Kewen Information Technology Co., Ltd., 2008.
- [16] LI J L, He X B, WEI J, et al. Multifractal features of the particle-size distribution of suspended sediment in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2021, 36(4): 489-500.
- [17] 国家林业局. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232-2015. [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- State Forestry Administration. Determination of total phosphorus in forest soil: LY/T 1232-2015. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [18] 赵博超, 王雪婷, 窦广玉, 等. 马铃薯淀粉加工废水还田利用对土壤养分及重金属的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(5): 666-671.
- ZHAO B C, WANG X T, DOU G Y, et al. Effect of returning potato starch processing wastewater on nutrients and heavy metals in soils [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 666-671.
- [19] 沙晓玮, 武昱鑫, 贾国栋, 等. 冀北山地植被恢复对不同坡位土壤可蚀性与养分的影响 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 11-19.
- SHA X W, WU Y X, JIA G D, et al. Effects of vegetation restoration on soil erodibility and nutrients at different slope sites in northern Hebei Mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 11-19.
- [20] 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.
- [21] TANG Q, BAO Y H, HE X B, et al. Flow regulation manipulates contemporary seasonal sedimentary dynamics in the reservoir fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 548: 410-420.
- [22] 耿华杰, 郑粉莉, 莫帅豪, 等. 典型黑土区农业流域土壤侵蚀—沉积对土壤养分和酶活性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 47-53.
- GENG H J, ZHENG F L, MO S H, et al. Effects of soil erosion-deposition on soil nutrients and enzyme activities in an agricultural watershed of Chinese mollisol region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 47-53.
- [23] SUN H, WU Y, 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.
- [24] 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.
- [25] ZHANG Y J, XU Y, ZHANG N Y, et al. Measured and predicted floc size of cohesive sediment in the presence of microalgae [J]. *Water Research*, 2025, 268: e122519.
- [26] 肖洋, 陆奇, 成浩科, 等. 泥沙表面特性及其对磷吸附的影响 [J]. *泥沙研究*, 2011, 36(6): 64-68.
- XIAO Y, LU Q, CHENG H K, et al. Surface properties of sediments and its effect on phosphorus adsorption [J]. *Journal of Sediment Research*, 2011, 36(6): 64-68.
- [27] XU W, YANG L, BAO Y H, et al. Soil anti-scourability enhanced by herbaceous species roots in a reservoir water level fluctuation zone [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(2): 392-406.
- [28] BAO Y H, HE X B, WEN A B, et al. Dynamic changes of soil erosion in a typical disturbance zone of China's Three Gorges Reservoir [J]. *Catena*, 2018, 169: 128-139.
- [29] 陈忠礼, 冯源, 朱姿涵, 等. 水库消落带植物生态学研究热点: 以三峡水库为例 [J]. *草业科学*, 2024, 41(8): 1909-1923.
- CHEN Z L, FENG Y, ZHU Z H, et al. Review of research hotspots on plant ecology of the water level fluctuation zones of reservoirs: A case study of the Three Gorges Reservoir [J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(8): 1909-1923.
- [30] 饶洁, 段丁琪, 唐强, 等. 三峡水库消落带植被高程梯度分异及其对生境胁迫的响应 [J]. *生态学报*, 2023, 43(16): 6649-6660.
- RAO J, DUAN D Q, TANG Q, et al. Vegetation differentiation along elevation gradient in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir and its response to habitat stressing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6649-6660.
- [31] 张信宝. 关于三峡水库消落带地貌变化之思考 [J]. *水土保持通报*, 2009, 29(3): 1-4.
- ZHANG X B. Thinking about geomorphologic evolution of slopes in hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(3): 1-4.
- [32] 席颖, 陈婧怡, 纪道斌, 等. 三峡库区消落带生态环境影响研究进展 [J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2024, 70(1): 1-6.
- XI Y, CHEN J Y, JI D B, et al. Research progress on eco-environmental impact of the water level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2024, 70(1): 1-6.