

三峡水库消落带泥沙淤积层水肥特性高程梯度分异

何平生^{1,2,3}, 李进林², 贺秀斌⁴, 唐强⁵, 吴胜军², 黄平²

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;

3. 中国科学院大学重庆学院, 重庆 400020; 4. 中国科学院、水利部成都山地灾害与

环境研究所, 成都 610299; 5. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要: [目的] 研究水库消落带泥沙淤积层的水肥特性高程梯度分异可为水库科学管理提供依据。[方法] 以三峡水库消落带为研究对象, 采集典型坡面不同高程位置淤积泥沙分层样品, 测试颗粒(黏粒、粉粒和砂粒)组成、养分物质(总有机碳、全氮和全磷)质量分数和质量含水率, 对比分析消落带不同高程位置泥沙的水肥特性差异。[结果] 1) 消落带淤积泥沙的颗粒较细, 中值粒径为 6.1~13.5 μm , 平均值为 8.7 μm , 不同高程位置的泥沙中值粒径差异不显著($p>0.05$)。淤积泥沙的颗粒组成以粉粒为主, 平均体积分数为 82.7%, 黏粒和砂粒的体积分数分别为 14.2% 和 3.1%。2) 消落带泥沙的平均总有机碳(TOC)、全氮(TN)和全磷(TP)分别为 18.82、1.24、0.75 g/kg, 碳氮磷生态化学计量比 C:N、C:P 和 N:P 分别为 15.25、25.26、1.68。泥沙养分物质随高程的整体变化趋势存在差异, 其中, TOC 和 TN 随高程的升高而显著增加($p<0.05$), TP 的变化趋势不明显。泥沙 C:P 和 N:P 随高程的升高而升高, 而 C:N 的变化趋势不显著($p>0.05$)。3) 消落带泥沙的平均质量含水率为 28.63%, 无显著的高程梯度分异($p>0.05$)。4) 消落带泥沙颗粒组成、养分物质和质量含水率在剖面内均呈高低交替成层的“纹理状”分布。[结论] 三峡水库消落带泥沙的养分物质质量分数存在明显的高程梯度分异, 而颗粒组成和质量含水率的空间分异不明显。

关键词: 泥沙淤积层; 水肥特性; 空间分异; 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)02-0209-09

Elevation-based Differentiation in Moisture and Nutrients of Sedimentary Layer in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir, China

HE Pingsheng^{1,2,3}, LI Jinlin², HE Xiubin⁴, TANG Qiang⁵, WU Shengjun², HUANG Ping²

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. Chongqing School, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400020, China; 4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China; 5. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] To investigate the elevation-based differentiation in moisture and nutrients of sedimentary layer in the water-level fluctuation zone (WLFZ) and provide a scientific basis for reservoir management. [Methods] The WLFZ of the Three Gorges Reservoir was selected as the research object and layered sample were collected from a representative slope. The particle size distribution, nutrient concentration, and moisture content were measured, and the differences in sediment properties at different elevations were analyzed. [Results] 1) The particles of the sediment in the WLFZ were relatively fine, with a median particle size ranging from 6.1 to 13.5 μm and an average of 8.7 μm . No significant difference in median particle size was observed among sediments at varying elevations ($p>0.05$). The

收稿日期: 2024-09-13

修回日期: 2024-11-12

录用日期: 2024-11-19

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-30

资助项目: 三峡水库消落区河库水动力环境下地质灾害活动规律与减灾对策研究(5000002024CC20004); 国家自然科学基金项目(42207411, U2040207, 42407417); 重庆市博士后研究项目特别资助

第一作者: 何平生(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: hepingsheng22@mails.ucas.ac.cn

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://stbxb.alljournal.com.cn

particle size distribution of the sediments was dominated by silt, with an average volume content of 82.7%, and the contents of clay and sand were 14.2% and 3.1%, respectively. 2) The mean total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) contents of the sediments in the WLFZ were 18.82, 1.24 and 0.75 g/kg, respectively. The stoichiometric ratios of carbon, nitrogen, and phosphorus (C:N, C:P, and N:P) were 15.25, 25.26 and 1.68, respectively. Significant differences were observed in the overall trends of nutrient content changes with elevation. Specifically, TOC and TN contents increased significantly with increasing elevation ($p < 0.05$), while TP content did not show a clear trend. The stoichiometric ratios of C:P and N:P in the sediments increased with increasing elevation, while the C:N ratio showed no significant trend ($p > 0.05$). 3) The average mass water content of the sediments in the WLFZ was 28.63%, and no significant elevation-based spatial differentiation was observed ($p > 0.05$). 4) The particle size distribution, nutrient content, and moisture content of sediments in the WLFZ were distributed in striated layers formed by alternating high and low values along the profile. [Conclusion] There is a significant elevation-based differentiation in the nutrient content of the sediments in the WLFZ of the Three Gorges Reservoir, but there is no significant spatial differentiation in particle composition and mass water content.

Keywords: sediments; properties of soil moisture and nutrients; spatial differentiation; water-level fluctuation zone; the Three Gorges Reservoir

Received: 2024-09-13

Revised: 2024-11-12

Accepted: 2024-11-19

Online(www.cnki.net): 2024-12-30

土壤水肥特性通过影响植物的营养策略、繁殖分配、竞争关系、生长发育等途径改变植物群落的组成、结构和功能,因此,土壤水肥均衡是生态系统稳定的重要保证^[1-2]。自然生态系统中,土壤水肥特性受土壤性质、植被覆盖、地形条件等多种因素的共同影响^[3-4]。其中,土壤细颗粒通过增强土壤对水分和养分物质的吸持而提高土壤对水肥蓄积能力。土壤养分和水分之间也存在相关影响,如土壤有机质可通过其黏结性改变土壤毛管孔隙度、有机胶体数量等途径调控土壤持水性、供水性、透水性和有效水^[4-6]。植被覆盖对土壤水肥特性具有双重影响,一方面,植被生长将消耗土壤的养分和水分;另一方面,植物覆盖能有效阻碍表层土壤水分蒸发,植物残体分解可向土壤输入养分物质^[6-8]。土壤性质的深度变化可能导致不同深度处土壤水肥特性存在差异,地形条件则通过调节物质迁移过程促进水肥重新分配,进而导致区域土壤水肥呈明显的空间分异^[9]。

水库消落带是指蓄水位周期性涨落而在水体与陆地间形成的水-陆交错区,具有稳定岸线、拦截坡面侵蚀泥沙和保障水质等功能^[10]。消落带土壤包括原生土和淤积泥沙,2类基质的理化性质存在明显差异。淤积泥沙是由高水位时期水体悬移质泥沙淤积形成,相比于原生土而言,具有细颗粒占比大、黏粒矿物种类多、物质吸附能力强、有机质质量分数高等特点,有利于土壤水肥保持^[11-12]。淤积泥沙的理化性质因物源组成和沉积过程的不同而存在空间分异,将导致淤积型消落带土壤水肥因地而异^[13-14]。消落带土壤的水分体

积分数在淹水期间处于饱和状态,并且在退水后的短时间内仍能保持较高的水分体积分数。消落带出露早期的植被覆盖度相对较低,将直接导致土壤水分大量蒸发,同时,植被生长还将不断消耗土壤的养分物质。因此,若水肥补给不足或不及时,将限制消落带适生植物的返青和发育。当消落带植被生长处于茂盛期时,土壤的水分和养分储量更是植物抗旱的重要保障。

三峡水库是山区河道型水库,其控制的长江上游流域是中国的主要侵蚀产沙区。三峡水库自蓄水以来,年平均泥沙拦截量为1.1亿t,其中,约5.7%的拦截泥沙淤积在水库的消落带^[15-16],导致土质消落带的水肥特性发生变化。厘清土质消落带水肥特性是制定消落带环境管理策略的重要基础。本文以三峡水库淤积型消落带为对象,研究淤积泥沙水肥特性在高程梯度和剖面深度的分布特征,为理解植被自然分布规律和植被人工恢复技术研发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点概况

本研究的采样点位于三峡水库干流中游段,行政区划隶属于重庆市忠县石宝镇。该河段地处库区西部的低山丘陵区,河道蜿蜒曲折且开阔平缓,被水库拦截的大部分泥沙沉积在此段。该河段两岸消落带的坡度相对较缓,且面积较大,因此,也是泥沙沉积的重要场所。采样点是以泥沙沉积为主的土质消落带,沉积厚度随消落带高程的增加而变薄,低高程处消落带的最大沉积厚度超过1 m。水库蓄水运行前,采样点处消落带为耕地,地块坡度多为5°~8°,土壤类型为紫色土,主

要种植作物有玉米(*Zea mays*)、红薯(*Ipomoea batatas*)等。退水后,沉积型消落带自然恢复的植被有苍耳(*Xanthium sibiricum*)、狼把草(*Bidens tripartite*)、草木犀(*Melilotus officinalis*)等一年生草本植物,还有狗牙根(*Cynodon dactylon*)、牛鞭草(*Hemarthria compressa*)、香附子(*Cyperus rotundus*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)等多年生草本植物^[17]。近年来,该处消落带实施人工植被重建工程,在海拔相对较高处种植落羽杉、池杉等乔木,海拔较低处以灌草为主。采样地的区域气候为暖湿亚热带东南季风区气候,年平均降水量为886~1 614 mm,大部分年降水量发生在5—9月,年平均气温和相对湿度分别为19.2℃和80%^[13-14,18]。区域土壤多为紫色泥岩等快速风化而形成的紫色土和人为长期耕作而形成的水稻土,还有少部分山地黄壤。

1.2 样品采集与处理

本研究的泥沙样品采集于2019年5月,采样期间的蓄水位已经消退至150 m以下。消落带出露后,选择典型坡面作为采样带,并采集淤积泥沙分层样品。首先,根据采样带的局部地形特征,分别在易沉积区选择5个不同高程的采样点。样品采集时,先清除表面植被,再开挖坡面至原生土层,然后采用容积为100 cm³、高为5 cm的环刀从上至下逐层采样(包括底层原生土样)。环刀样整理完成后立即用保鲜膜将其封装密实,放入配套的环刀盒内,以防止样品中的水分耗散。同时,每层采集200 g散样用于泥沙颗粒组成和养分物质测试。最后,分别在消落带高程为155、161、162、163、165 m处各开挖1个剖面,深度分别为120、50、35、25、20 cm。

1.3 样品测定与分析

淤积泥沙质量分数采用烘干法测定。首先,将样品从环刀中全部取出,放入已知重量的铝盒内称取样品鲜重;然后,将样品连同铝盒放置烘箱内,用110℃连续烘干24 h至恒重,待样品冷却后称得干重。根据烘干前后样品质量差得到质量含水率。

用于测试颗粒组成的样品先在室温条件下风干并去除杂质,然后研磨至全部通过直径为2 mm的筛。采用英国马尔文公司生产的MasterSizer-2000型激光粒度仪测定样品颗粒组成。首先称取0.5 g样品置于容积为500 mL的烧杯中,并加入10 mL浓度为30%的双氧水(H₂O₂)反应24 h后,将溶液加热至72℃。待冷却后,再加入5 mL浓度为10%的盐酸(HCl)反应2 h,再将溶液加热至72℃。待再次冷却后,加入去离子水至500 mL,搅匀静置12 h并去除上层清液,反复执行该步操作直到溶液呈中性。随后加入5 mL浓度

为0.05 mol/L的六偏磷酸钠[(NaPO₃)₆]进行分散处理。测试前,运用超声波分散处理60 s。每个样品自动测试3次并计算平均值。

采用德国Elementar公司生产的Vario MACRO Cube元素分析仪测试有机质和全氮。称取约0.5 g过0.25 mm的泥沙样品置于容积为50 mL的干燥离心管中,加入5 mL浓度为1 mol/L的HCl对样品进行酸化处理,反复该操作步骤直至完全去除样品中的无机碳。静止24 h后,用5 000 r/min的转速进行离心,并加入去离子水进行清洗,然后去除上清液。样品完全干燥后,准确称取50 mg包裹在元素分析锡箔纸内,同时,加入适量的三氧化钨(WO₃)作为氧化剂。待测样品放入元素分析仪的燃烧管中进行充分燃烧,分别根据燃烧生成的二氧化碳(CO₂)和氮氧化物(NO_x)浓度峰面积计算出样品中的TOC和TN。采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测试泥沙样品的TP。称取1 g过0.25 mm筛的样品置于聚四氟乙烯烧杯中,加入7 mL硝酸(HNO₃)和3 mL氢氟酸(HF)后,在微波消解炉中逐渐加热至190℃并保持约2 h,然后转移至温度为175℃的干锅内继续消解1 h。最后将冷却后的样品溶液转移至容量瓶中进行上机测试。

1.4 数据分析

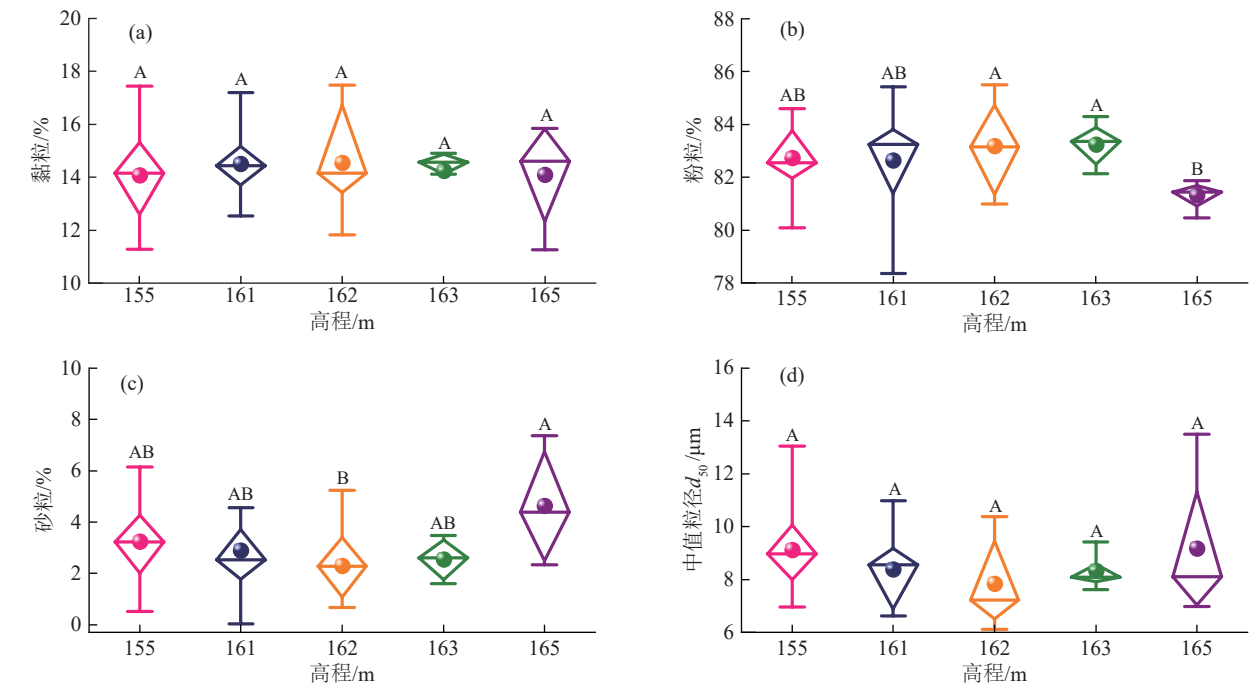
本研究运用Microsoft Excel软件对试验数据进行初步整理,运用IBM SPSS 26.0软件进行数理统计分析,运用Origin 2024软件绘图。采用非参数检验比较不同消落带高程位置泥沙理化性质间的差异,采用Pearson相关系数确定泥沙各理化特性指标间的相关性。

2 结果与分析

2.1 三峡水库消落带淤积泥沙的颗粒组成特征

三峡水库消落带泥沙颗粒主要由粉粒组成,体积百分比为78.4%~85.5%,平均值为82.7%,黏粒和砂粒质量分数相对较低,体积百分比分别为11.3%~17.5%和0~7.9%,平均值分别为14.2%和3.1%。消落带泥沙的中值粒径为6.1~13.5 μm,平均值为8.7 μm,说明三峡水库消落带泥沙的颗粒较细。从高程梯度分异来看,高程为155、161、162、163、165 m处泥沙的中值粒径分别为6.96~13.05、6.62~10.99、6.11~10.38、7.62~9.43、6.98~13.51 μm,且不存在显著性差异($p>0.05$) (图1)。消落带泥沙黏粒也不存在显著的高程梯度分异($p>0.05$),其在155、161、162、163、165 m处的平均体积百分比分别为14.06%、14.49%、14.52%、14.22%和14.08%。消落带泥沙的粉粒质量分数在高程为165 m处最低,且与高程162、163 m处泥沙差异显著($p<0.05$),而与高程为155、161 m处泥沙的差异不

显著。相反,消落带泥沙的砂粒质量分数在高程 165 m 处最高,与高程 162 m 处泥沙的差异显著,而与其余 4 个高程处泥沙的差异不显著($p>0.05$)。总体来看,消落带泥沙的质地较均匀,颗粒组成的高程梯度分异不明显。



注:箱线图的上下须表示上极限和下极限,菱形上下顶点表示上四分位数和下四分位数,中间横线表示中位数,中间点表示平均值;不同大写字母表示不同高程间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 消落带不同高程的泥沙颗粒组成和中值粒径

Fig. 1 The particle composition and median particle size of the sediments at different elevations in the water-level fluctuation zone

从不同深度来看(以高程为 155 m 处的 120 cm 深剖面为例,后文与此相同),消落带泥沙的粒度在剖面内呈粗颗粒与细颗粒交替成层的“纹理”状(图 2)。泥沙淤积剖面中的黏粒、粉粒和砂粒体积百分比的最高值分别出现在 35、110、5 cm 处,分别为 17.44%、84.59% 和 6.15%,中值粒径最大值出现在 10 cm 处,为 13.05 μm 。

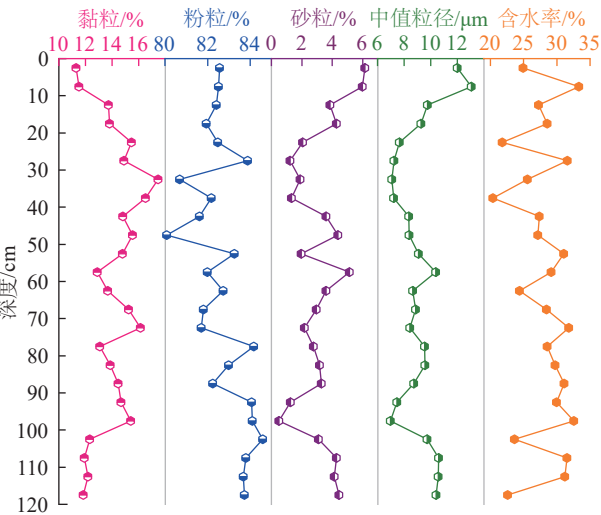


图 2 消落带泥沙粒度和质量含水率深度分布

Fig. 2 Depth distribution of granularity and water content of sediments in the water-level fluctuation zone

2.2 三峡水库消落带淤积泥沙质量含水率特征

三峡水库消落带泥沙的质量含水率为 20.42%~39.89%,平均值为 28.63%。从高程梯度分异来看,在消落带高程为 155、161、162、163、165 m 处泥沙(全剖面)的平均质量含水率分别为 28.08%、28.57%、29.47%、28.21% 和 31.17%,且任意 2 个高程位置间的泥沙含水率均不存在显著性差异($p>0.05$) (表 1)。说明消落带泥沙水分的空间异质性较弱。相比而言,消落带泥沙的表层(0~10 cm)质量含水率较高,在高程为 155、161、162、163、165 m 处分别为 29.14%、31.58%、32.56%、30.82% 和 35.69%。从深度分布来看,消落带泥沙的质量含水率在剖面内也呈“纹理状”分布(图 2)。

表 1 消落带不同高程的泥沙含水率统计描述

Table 1 Statistical description of water content of sediments at different elevations in the water-level fluctuation zone					
采样 高程/m	最大值/ %	最小值/ %	平均值±标准 误差/%	峰度 系数	偏度 系数
155	33.31	20.42	28.08±0.74A	-0.62	-0.58
161	33.46	24.95	28.57±0.69A	2.71	0.89
162	35.21	26.81	29.47±1.05A	3.64	1.78
163	32.26	25.30	28.21±1.20A	0.26	0.85
165	39.89	26.18	31.17±3.13A	1.00	1.28

总体来看,三峡水库消落带泥沙质量含水率在剖面深度为0~45、95~120 cm变化相对较明显,而在深度为45~95 cm变化相对较弱。

2.3 三峡水库消落带淤积泥沙养分及生态化学计量学特征

三峡水库消落带泥沙的总有机碳(TOC)相对较高,为12.74~45.20 g/kg,而全氮(TN)和全磷(TP)相对较低,分别为0.78~1.79、0.46~0.96 g/kg, TOC、TN和TP的平均质量分数分别为18.82、1.24、0.75 g/kg。消落带泥沙的C/N、C/P和N/P分别为9.80~25.25、17.17~52.08、1.03~3.05,平均值分别为15.25、

25.26、1.68。从高程梯度分异来看,消落带泥沙TOC和TN均随高程的升高呈增加趋势,高程为155、161、162、163、165 m处的泥沙TOC平均值分别为16.58、18.22、19.53、23.87、26.24 g/kg, TN平均值分别为1.16、1.22、1.25、1.41、1.53 g/kg(图3)。消落带泥沙TP随高程的变化趋势与TOC和TN不同,总体呈先增加后降低的趋势,在高程为155、161、162、163、165 m处的平均值分别为0.73、0.79、0.82、0.80、0.64 g/kg。消落带泥沙的C:N、C:P和N:P均随高程的升高而增加,C:P和N:P的变化趋势更明显,而任意2个采样高程位置间的泥沙C:N均没有显著性差异($p>0.05$)。

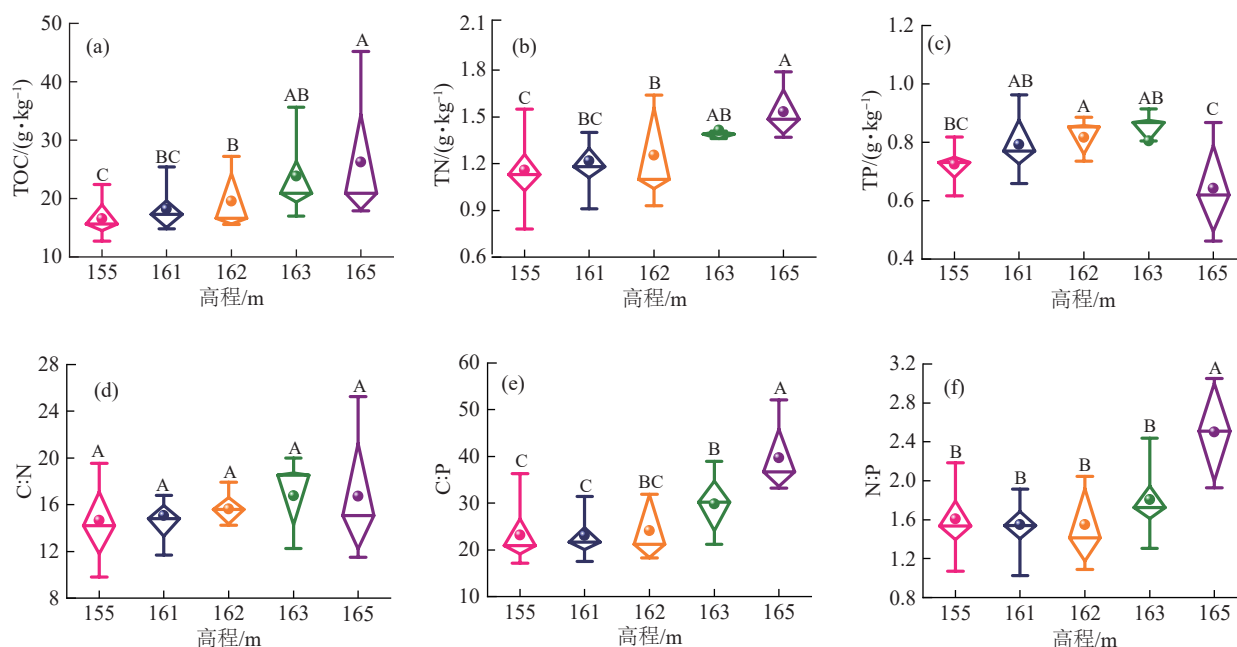


图3 消落带不同高程位置的泥沙TOC、TN和TP及其生态化学计量比

Fig. 3 The TOC, TN, and TP and their stoichiometric ratios of the sediments at different elevations in the water-level fluctuation zone

从深度分布来看,消落带泥沙TOC、TN和TP与其颗粒组成及水分体积分数相似,在剖面内呈“纹理状”分布,但变化趋势有所差异(图4)。总体上,在泥沙淤积剖面的0~30 cm深度内,TOC、C:P和N:P随深度的增加呈增加趋势,而TN和C:N的变化趋势不明显,TP则呈降低趋势。消落带泥沙的TOC、TN和TP及生态化学计量比在剖面的30~80 cm深度内无明显变化趋势,而80~120 cm深度内的趋势相对更加明显。

2.4 三峡水库消落带淤积泥沙理化性质的关系

三峡水库消落带泥沙的质量含水率与颗粒特性指标(黏粒、粉粒、砂粒和中值粒径)之间呈弱度相关,相关系数均 <0.3 ,说明消落带泥沙受其颗粒的影响较小(图5)。消落带泥沙TOC和TN与含水率呈中度正相关,相关系数分别为0.53和0.56($p<$

0.001),但与颗粒特性指标间的相关系数较低,也呈弱度相关。消落带泥沙TP与砂粒质量分数呈低度负相关,相关系数为 $-0.32(p<0.05)$,而与含水率及其余颗粒特性指标呈弱度相关。消落带淤积泥沙TOC和TN呈中度正相关,相关系数为0.66($p<0.05$),但TP与TOC和TN间呈弱度相关,说明TOC和TN可能存在相似的来源。泥沙C:N与TOC呈中度正相关,相关系数为0.68($p<0.05$),而与其他养分、颗粒特性和含水率间的相关性较弱。泥沙C:P与TOC间呈高度正相关,相关系数为0.85,与TN呈中度正相关,相关系数为0.61($p<0.05$)。泥沙N:P与TN呈中度正相关,相关系数为0.73,而与TP呈中度负相关,相关系数为 $-0.58(p<0.05)$ 。总体来看,三峡水库消落带泥沙的水肥特性与颗粒特性间不存在统计学意义的相关性。

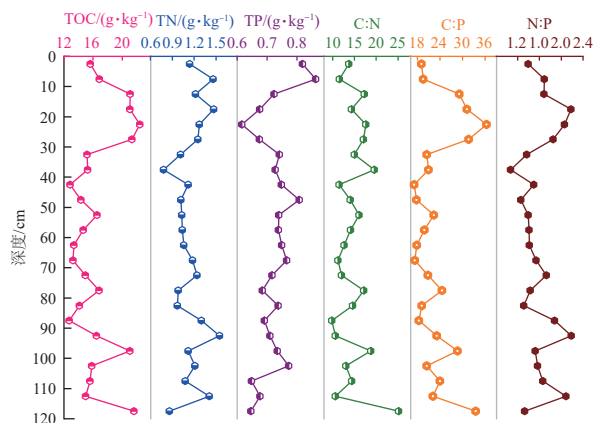
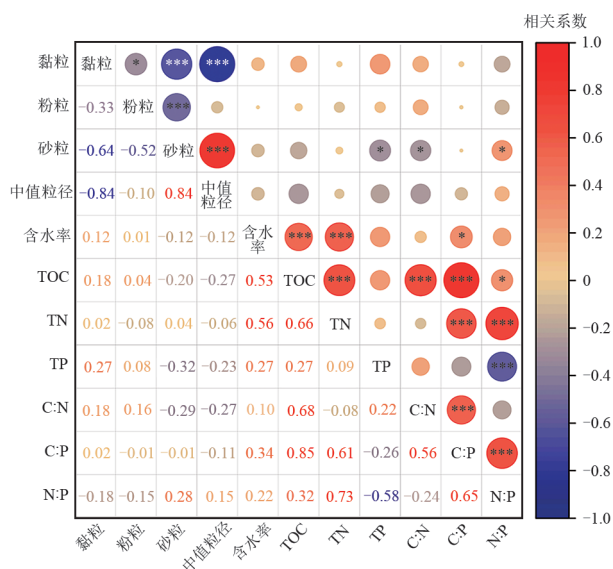


图4 消落带泥沙 TOC、TN 和 TP 及其生态化学计量比深度分布

Fig. 4 Depth distribution of TOC, TN, and TP and their stoichiometric ratios of sediments in the water-level fluctuation zone



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。

图5 消落带泥沙各理化特性间的相关系数

Fig. 5 Coefficients of the correlations between various physicochemical properties of sediments in the water-level fluctuation zone

3 讨论

3.1 三峡水库消落带淤积泥沙理化特性高程梯度分异的形成

三峡水库消落带淤积泥沙是由水体悬移质泥沙落淤形成的泥质沉积层,其理化特性有别于该地的原生土壤^[12,14,19]。本研究中,淤积泥沙主要存在于高程为 155~165 m 的中间段,是因为水库在低水位运行期间的冲刷强烈,导致以下段消落带土壤侵蚀为主,上段消落带尽管在水库高水位运行期间被淹没,但该期间的水体悬移质泥沙浓度低。当土壤侵蚀速率高于泥沙沉积速率时,泥沙沉积形成的土层也难以存留^[20-21]。因此,消落带的上段和下段存在裸露的

侵蚀迹地。消落带泥沙的颗粒组成没有明显的高程梯度分异特征(图 1),这是因为不同高程的淤积泥沙主要来自汛期的悬移质泥沙沉积,汛期远源泥沙经过沿程输移分选后粒度较细,而非汛期的近源泥沙沉积相对较少,且对消落带泥沙粒度的影响不明显^[11,22]。消落带泥沙淤积剖面中,粒度呈粗颗粒与细颗粒成层交替的“纹理状”,这是因为山区河流悬移质泥沙颗粒通常表现为“水大沙粗”的变化模式,不同水动力特征下的悬移质泥沙在消落带累计沉积形成明显的韵律结构^[13,22]。消落带淤积泥沙的质量含水率没有呈现明显的高程梯度分异,可能与泥沙的颗粒特性有关。通常情况下,土壤细颗粒质量分数越高,越有利于对水分的吸持^[23]。理论上,泥沙的颗粒特性没有明显的高程梯度分异,相同的环境条件下,其水分体积分数也没有高程梯度分异。本研究结果表明,消落带泥沙的含水率与其颗粒特性间无统计学意义的相关性,具体的原因还需要进一步研究(图 5)。本研究中,消落带泥沙 TOC 和 TN 存在显著的高程梯度分异,可能与淤积过程和泥沙与水体间的物质交换有关。消落带高程相对较高处的泥沙沉积速率低、沉积厚度薄,泥沙在非汛期与水体间的物质交换过程中可吸附较多的养分物质,相反,尽管高程相对较低处的泥沙沉积速率高,但汛期“干净泥沙”沉积时的稀释混合作用可使泥沙的养分物质较低^[13,24]。消落带泥沙 TP 随高程的变化与 TOC 和 TN 存在差异,整体趋势不明显。可能是 TP 与 TOC 和 TN 的来源存在差异所导致,其中,TP 主要是来源于吸附态,而 TOC 和 TN 主要来源于溶解态^[25]。本研究的采样地是有利于泥沙淤积的消落带缓坡地,泥沙的养分物质具有明显的高程梯度分异。三峡水库消落带淤积泥沙的养分物质地球化学循环过程复杂,且影响泥沙养分物质赋存的因素众多^[10,26]。因此,对于自然地理环境空间异质性较强的消落带而言,土壤水肥特性空间分布可能与本研究不同^[27]。

3.2 三峡水库消落带淤积泥沙与原生土壤养分特性的比较

三峡水库消落带土壤基质包括由河流悬移质泥沙沉积形成的淤积层和淹水以前存在的原生土,其中,原生土以紫色土和水稻土为主,还有少部分黄壤^[17]。整体来看,淤积层和原生土间的理化特性存在明显差异,已有研究^[19]表明,消落带高程为 155~165 m 处紫色土的黏粒、粉粒和砂粒占比分别为 $(12.98 \pm 1.01)\%$ 、 $(76.72 \pm 1.40)\%$ 和 $(10.30 \pm 2.40)\%$,说明原生土的粒度粗于泥沙,紫色土的 TOC、TN 和 TP 分别为 (8.48 ± 1.96) 、 (0.84 ± 0.11) 、 (0.74 ± 0.66) g/kg,说

明原生土壤的养分低于淤积泥沙,消落带土壤养分特性在周期性淹水的影响下发生显著变化^[28]。从侵蚀和沉积的视角来看,侵蚀型消落带土壤的颗粒粗且养分低可能是其本身为细颗粒和养分流失的“源”,相反,沉积型消落带则是细颗粒泥沙和养分物质的“汇”^[29]。就沉积型消落带而言,其下伏原生土的颗粒较粗、养分低可能与水库蓄水前的地表清理、蓄水初期的土壤侵蚀等因素有关。从高程梯度分异来看,消落带紫色土的粒度随高程的升高而变细,与泥沙不同,紫色土的TOC和TN随高程升高而增加,TP则呈降低趋势,与淤积泥沙相似^[19]。已有研究^[28]表明,消落带原生土壤的养分特性在淹水前不存在显著的高程梯度分异。淹水后,径流冲刷和波浪侵蚀是水库消落带土壤侵蚀的主要营力,在高水位运行期间,水流速度较缓、水面相对平静,侵蚀能力相对较弱,因此,消落带上部的细颗粒和养分流失相对较少^[20-21];相反,低水位运行期间的水流速度较快、水面不稳定,侵蚀能力相对较强,因此,消落带下部的细颗粒和养分流失相对较多。另一方面,消落带淹水深度的高程梯度分异在不同程度上改变土壤养分物质的迁移转化,使得原生土的养分出现空间分异。消落带原生土壤TP随高程的变化趋势与其TOC和TN不同,可能与土壤中磷的来源组成与转化方式有关^[30]。从深度分布来看,消落带淤积泥沙和原生土壤的养分物质均在表层中较高,可能存在2个方面的原因:一方面,消落带植物残体分解后的养分输入;另一方面,水体中养分物质向土壤迁移^[12]。总体来说,消落带泥沙与原生土间的肥力性质存在明显差异,但高程梯度分异特征具有相似性。相比原生土壤而言,消落带淤积泥沙可为植物生长提供较好的养分物质保障,意味着消落带泥沙淤积有利于植被在其出露期快速返青。适度的泥沙掩埋还可通过促进植物种子萌发出苗和分株发育,进而对消落带植被恢复起到积极作用^[31]。然而,消落带泥沙淤积层增厚对植物根系生长和茎秆出土产生的机械阻力不利于植被快速返青^[32]。

3.3 本研究的不足

本研究探讨三峡水库消落带泥沙淤积层水肥特性的高程梯度分异特征,并分析形成这种分异的原因。然而,本研究还存在不足。首先,消落带泥沙的质量含水率随区域气温、降雨、水位等环境因素的变化而变化。理论上,需要开展长期的定位观测才能阐明淤积泥沙的质量含水率在时间序列方面的变化过程。本研究只进行1次采样分析,尽管能满足特定条件下的空间分异研究,但不能全面表征消落带泥沙的含水率特

征。其次,消落带淤积泥沙的水肥特性的空间分异明显,需要开展全域尺度上的调查分析阐明空间分异特征。本研究以淤积型消落带为研究对象,只选取1个采样带,每个采样点也只开挖1个淤积剖面,虽能满足高程梯度分异研究,但不能体现空间分异特征。后续相关研究应拓展时空尺度,全面分析消落带泥沙淤积层水肥特性的时空分异规律及演变过程。

4 结论

1) 三峡水库消落带泥沙颗粒以粉粒为主,平均体积分数为82.7%,其次是黏粒和砂粒,平均体积分数分别为14.2%和3.1%。消落带不同高程位置泥沙间的粒度不存在显著性差异($p>0.05$),中值粒径为6.1~13.5 μm ,平均值为8.7 μm 。

2) 三峡水库消落带泥沙TOC、TN和TP平均值分别为18.82、1.24、0.75 g/kg,C:N、C:P和N:P分别为15.25、25.26、1.68。其中,TOC和TN随消落带高程的升高而显著增加($p<0.05$),TP的变化趋势不明显。

3) 三峡水库消落带泥沙的质量含水率为20.42%~39.89%,平均值为28.63%,不同高程位置间的泥沙质量含水率差异不显著($p>0.05$)。淤积泥沙颗粒组成、养分物质和质量含水率在剖面内均呈高值与低值交替成层的“纹理状”分布。

4) 三峡水库消落带泥沙的水肥特性与颗粒特性间的相关系数较低,不存在统计学意义上的相关性。

参考文献:

- [1] HU J W, YU H W, LI Y, et al. Variation in resource allocation strategies and environmental driving factors for different life-forms of aquatic plants in cold temperate zones[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 109(8): 3046-3059.
- [2] 刘慧丽,袁旭杰,刘秉儒,等.贺兰山不同海拔植物养分含量及化学计量特征[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(4): 107-116.
LIU H L, YUAN X J, LIU B R, et al. Nutrient composition and stoichiometric characteristics of plant species across different altitudes in Helan mountains[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(4): 107-116.
- [3] 谷裕,王金满,王洪丹,等.黄土区露天煤矿排土场植被恢复的水肥响应[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(12): 3233-3241.
GU Y, WANG J M, WANG H D, et al. Response of soil water and soil fertility to vegetation restoration in an opencast coal-mine in a loess area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(12): 3233-3241.
- [4] ZHAO Z M, SHEN Y X, WANG Q H, et al. The temporal stability of soil moisture spatial pattern and its influencing factors in rocky environments[J]. *Catena*, 2020,

- 187:e104418.
- [5] 杨振奇,秦富仓,李龙,等.砭砂岩区不同侵蚀程度表土多重分形特征与持水特性关系[J].土壤,2021,53(3):620-627.
- YANG Z Q, QIN F C, LI L, et al. Relationship between soil particle multifractals and water holding capacity under different erosion degrees in feldspathic sandstone region[J]. Soils, 2021, 53(3): 620-627.
- [6] LAL R. Soil organic matter and water retention[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(5): 3265-3277.
- [7] LV X H, TANG Q, HAN C, et al. Farmland abandonment and vegetation succession mediate soil properties but are determined by the duration of conversion[J]. Catena, 2024, 238: e107877.
- [8] 程汉亭,李勤奋,王晓敏,等.不同植被恢复策略对贵州喀斯特生态系统土壤渗透特性的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):110-116.
- CHENG H T, LI Q F, WANG X M, et al. Effects of different vegetation restoration strategies on soil penetrability of karst ecosystem in Guizhou Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 110-116.
- [9] 胡乐心,刘目兴,赵露,等.长江三峡山地集水区土壤水分空间变异特征[J].水土保持学报,2023,37(5):86-93.
- HU L X, LIU M X, ZHAO L, et al. Spatial variation characteristics of soil moisture in the Three Gorges Mountain Catchment area of the Yangtze River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 86-93.
- [10] BAO Y H, GAO P, HE X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir: A unique geomorphological unit[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 14-24.
- [11] LI J L, BAO Y H, WEI J, et al. Fractal characterization of sediment particle size distribution in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(9): 2028-2038.
- [12] 俞幸池,苏琴琴,谢姣姣,等.三峡水库消落带泥沙沉积强度影响因素的分析研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(11):2746-2754.
- YU X C, SU Q Q, XIE J J, et al. Factors influencing the sediment deposition in the water-level-fluctuating-zone along the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(11): 2746-2754.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] HUANG Y F, WANG J S, YANG M. Unexpected sedimentation patterns upstream and downstream of the Three Gorges Reservoir: Future risks [J]. International Journal of Sediment Research, 2019, 34(2): 108-117.
- [16] 任实,刘亮.三峡水库泥沙淤积及减淤措施探讨[J].泥沙研究,2019,44(6):40-45.
- REN S, LIU L. Sediment deposition and countermeasures in the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(6): 40-45.
- [17] XU W X, 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.
- [18] 饶洁,唐强,冯韞,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.
- [19] 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.
- [20] 鲍玉海,贺秀斌.三峡水库消落带土壤侵蚀问题初步探讨[J].水土保持研究,2011,18(6):190-195.
- BAO Y H, HE X B. Preliminary study on soil erosion at the water-level-fluctuating zone of the three-gorges reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(6): 190-195.
- [21] BAO Y H, TANG Q, HE X B, et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Hydrology Research, 2015, 46(2): 212-221.
- [22] 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.
- [23] 马生花,谢应忠,胡海英,等.荒漠草原2种典型群落类型下土壤含水量与土壤粒径分布的关系[J].中国水土保持,2019(7):61-65.
- MA S H, XIE Y Z, HU H Y, et al. The relationship of soil moisture and particle size distribution under the condi-

- tion of two typical community types of desert steppe[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019(7):61-65.
- [24] 张信宝,曹植菁,艾南山.溪洛渡水电工程拦沙对三峡水库富营养化潜在影响的初步研究[J].*长江流域资源与环境*, 2009, 18(2):170-174.
- ZHANG X B, CAO Z J, AI N S. Potential impact of sediment retaining by xiluodu hydropower project to the eutrophication of Three Gorges reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(2):170-174.
- [25] 罗专溪,朱波,汪涛,等.紫色土坡地泥沙养分与泥沙流失的耦合特征[J].*长江流域资源与环境*, 2008, 17(3):379-383.
- LUO Z X, ZHU B, WANG T, et al. Artificially simulated coupling characteristics of different sediment nutrient with sediment losses in slopeland of purple soil, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(3):379-383.
- [26] 王彬俨,文安邦,严冬春.三峡水库干流消落带泥沙沉积影响因素[J].*中国水土保持科学*, 2016, 14(1):12-20.
- WANG B Y, WEN A B, YAN D C. Factors influencing sedimentation in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(1):12-20.
- [27] 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.
- [28] 常超,谢宗强,熊高明,等.三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J].*自然资源学报*, 2011, 26(7):1236-1244.
- CHANG C, XIE Z Q, XIONG G M, et al. The effect of flooding on soil physical and chemical properties of riparian zone in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(7):1236-1244.
- [29] 郑晓岚,杨玲,宋娇,等.水库消落带土壤颗粒组成分及其空间分异特征[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.
- [30] 石孝洪.三峡水库消落区土壤磷素释放与富营养化[J].*土壤肥料*, 2004(1):40-42.
- SHI X H. Eutropication and phosphorus release of soil in drawdown area of Three Gorges reservoir[J]. *Soils and Fertilizers*, 2004(1):40-42.
- [31] 谢婷婷,刘明辉,袁中勋,等.不同泥沙埋深对几种一年生草本枯落物分解及养分动态特征的影响[J].*生态学报*, 2020, 40(21):7755-7766.
- XIE T T, LIU M H, YUAN Z X, et al. Effects of different simulative sediment depths on litter decomposition and nutrient dynamic change of several annual herbaceous plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21):7755-7766.
- [32] 李强.泥沙掩埋和干旱对三峡库区消落带狗牙根生长恢复的影响[J].*生态学报*, 2016, 36(1):200-208.
- LI Q. Influence of sand burial and drought on growth recovery of *Cynodon dactylon* in a water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1):200-208.
- [33] 李桂森.赣江山地丘陵荒地资源的特征与开发利用方向[J].*山地研究*, 1987, 5(3):161-167.
- LI G S. The characteristics of uncultivated land resources of Ganjiang mountain-hill region and the ways for development and utilization[J]. *Journal of Mountain Research*, 1987, 5(3):161-167.
- [34] 肖洋,张汶海,张颖.赣江中下游近60年水沙时空分布特征[J].*水文*, 2014, 34(6):86-92.
- XIAO Y, ZHANG W H, ZHANG Y. Spatial and temporal distribution characteristics of runoff and sediment discharge in middle and lower reaches of Ganjiang River in recent 60 years[J]. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(6):86-92.
- [35] 张卓佩,牛健植,樊登星,等.黄河中游多沙粗沙区土壤水蚀时空变化及动态驱动力分析[J].*水土保持学报*, 2024, 38(2):85-96.
- ZHANG Z P, NIU J Z, FAN D X, et al. Analysis of spatial and temporal evolution and dynamic driving force of soil water erosion in the middle reaches of the Yellow River in the rich and coarse sediment area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2):85-96.

(上接第208页)