

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.02.033

CSTR:32310.14.stbcb.2026.02.033

冯韫,唐源,饶洁,等.三峡水库消落带不同植被类型和坡位的土壤性状分异特征[J].水土保持学报,2026,40(2):150-158.

FENG Yun, TANG Yuan, RAO Jie, et al. Differentiation characteristics of soil properties under different vegetation types and slope positions in water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 150-158.

三峡水库消落带不同植被类型和坡位的 土壤性状分异特征

冯韫¹, 唐源¹, 饶洁¹, 唐强¹, 李进林², 韦杰³, 贺秀斌⁴

(1.西南大学地理科学学院,重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站,重庆400715;

2.中国科学院重庆绿色智能技术研究院,重庆400714; 3.重庆师范大学地理与旅游学院,

重庆401331; 4.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] 探究三峡水库消落带植被和侵蚀对土壤性状分异的复合影响。 [方法] 选取人工恢复的狗牙根和牛鞭草群落、自然恢复的混合草本群落,针对不同坡位(上坡侵蚀、中坡过渡和下坡沉积)采集土壤分层样品,测定团聚体组成、抗剪强度和土壤基本理化性质,解析土壤性状分异特征,明确关键影响因子。 [结果] 1)人工植被恢复显著改善土壤性状。狗牙根和牛鞭草的团聚体稳定性指标(MWD、GMD)、抗剪强度指标(c 、 φ)、土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)均显著大于自然草本。2)侵蚀作用导致土壤性状空间分异显著。上、中坡团聚体破碎严重,土壤颗粒分选困难。GMD、MWD最小值为上、中坡;中坡土壤黏聚力(c)降至最小,上坡土壤内摩擦角(φ)显著高于其余坡位;SOC、TN最小值和土壤体积质量(BD)最大值均出现在中坡。3)土壤理化性质与土壤团聚体稳定性和抗剪特性具有显著相关性($p < 0.01$)。SOC、 > 0.25 mm团聚体和TN是影响土壤团聚体稳定性关键土壤因子;SOC、 > 0.25 mm团聚体对 c 影响显著,土壤粒径组成对 φ 影响较大,土壤抗剪强度的提高主要通过增大 c 来实现。 [结论] 三峡水库消落带土壤性状受侵蚀作用呈现显著空间分异特征,合理人工植被恢复能有效改善土壤结构。

关键词: 团聚体; 抗剪强度; 生态恢复; 消落带; 三峡水库

中图分类号: S152.4; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0150-09

Differentiation Characteristics of Soil Properties under Different Vegetation Types and Slope Positions in Water-Level Fluctuation Zone of Three Gorges Reservoir

FENG Yun¹, TANG Yuan¹, RAO Jie¹, TANG Qiang¹, LI Jinlin², WEI Jie³, HE Xiubin⁴

(1.Chongqing Jinfo Mountain Karst Ecosystem National Observation and Research Station, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2.Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3.School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 4.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China)

Abstract: [Objective] To investigate the combined effects of vegetation and erosion on the differentiation of soil properties in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. [Methods] Artificially restored *Cynodon dactylon* and *Hemarthria altissima* communities and a naturally restored mixed herbaceous community were selected. Stratified soil samples were collected from different slope positions (upper slope with erosion, middle slope as transition, and lower slope with deposition). Soil aggregate composition, shear strength, and basic physicochemical properties were measured to analyze the differentiation characteristics of soil properties and identify the key influencing factors. [Results] 1) Artificial vegetation restoration significantly improved soil

收稿日期: 2025-09-24

修回日期: 2025-11-13

录用日期: 2025-11-19

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305203); 西南大学先导计划创新团队项目(SWU-XDJH202306)

第一作者: 冯韫(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: fyun0404@163.com

通信作者: 唐强(1985—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与生态修复研究。E-mail: qiangtang@swu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

properties. The aggregate stability indicators (mean weight diameter, MWD; geometric mean diameter, GMD), shear strength indicators (cohesion, c ; internal friction angle, φ), soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in *Cynodon dactylon* and *Hemarthria altissima* communities were significantly greater than those of the natural herbaceous community. 2) Erosion caused significant spatial differentiation in soil properties. Aggregates were severely fragmented and soil particles were sorted on the upper and middle slopes. The minimum values of GMD and MWD were observed on the upper and middle slopes. c reached its minimum on the middle slope, while φ on the upper slope was significantly higher than that at other slope positions. The minimum values of SOC and TN, as well as the maximum value of bulk density (BD), all occurred on the middle slope. 3) Soil physicochemical properties were significantly correlated with soil aggregate stability and shear characteristics ($p < 0.01$). SOC, >0.25 mm aggregates, and TN were the key soil factors affecting soil aggregate stability. SOC and >0.25 mm aggregates had a significant influence on c , while soil particle size composition exerted a greater influence on φ . The improvement of soil shear strength was mainly achieved by increasing c . [Conclusion] Soil properties in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir show significant spatial differentiation characteristics due to erosion, and appropriate artificial vegetation restoration can effectively improve soil structure.

Keywords: soil aggregates; shear strength; ecological restoration; water-level fluctuation zone; Three Gorges Reservoir

Received: 2025-09-24

Revised: 2025-11-13

Accepted: 2025-11-19

Online(www.cnki.net): 2026-01-08

三峡库区是长江上游重要的生态屏障和国家级水土流失重点治理区,水库蓄水运行后形成垂直落差达 30 m 的水库消落带。水库消落带是水域和陆地生态系统的过渡带,受水文涨落和坡面径流的复合驱动而呈现典型的结构与功能梯度^[1]。水库消落带是库岸缓冲带和库周生态廊道,发挥固土护岸、拦沙截污、径流调节、生物多样性维持等诸多关键生态功能^[2];同时也是生态脆弱区和敏感带,已成为流域景观内物质循环、信息传输等最活跃且最不稳定的区域。

土壤是水库消落带的重要结构和功能单元。然而,高频次、长时间的极端淹水导致消落带土壤结构劣化,土壤侵蚀加剧,表层土壤颗粒流失、养分淋溶损耗,土壤结构和功能受损严重;同时,消落带生境破碎化加剧,原有陆生植被快速消亡,适物种发生逆向演替,生物多样性降低,显著改变土壤基质环境^[1]。因此,有效改善消落带土壤环境对稳固库岸和提升土壤生态系统综合服务功能具有重要意义。土壤团聚体稳定性和抗剪强度作为土壤性状的重要物理指标,是土壤结构和力学性质的直观反映,对于评价土壤抗侵蚀能力及植被恢复下土壤生态效益具有重要参考价值。目前针对水库消落带土壤团聚体或抗剪强度等单一物理或力学特性,基于土壤类型^[3]、土地利用方式^[4]、植被配置^[5]等对土壤结构的塑造作用,宏观系统分析团聚体组成及分异规律、团聚体稳定性及影响因素^[6],并深入剖析团聚体破碎过程及驱动机制^[7]等;同

时,结合原位采样与室内模拟试验^[8-10],揭示土壤抗剪性能变化特征,并探究土壤结构及性质对其影响。

水库消落带面临剧烈土壤侵蚀及其引发的生态结构与功能退化双重挑战,开展土壤基质环境监测为提升水库消落带生态功能奠定基础,对保障重大水电工程生态安全和维持河流健康等极具科学价值和现实意义。然而,当前缺乏消落带植被恢复和侵蚀视角下土壤性质多要素对土壤团聚体稳定性及抗剪强度影响的综合理解。因此,本研究以三峡水库自然恢复植被与人工恢复植被消落带为研究对象,聚焦不同植被恢复类型与侵蚀对土壤环境的协同调控作用,定量刻画不同坡位土壤理化性质、土壤团聚体及抗剪强度等多要素分异特征,剖析上覆植被差异和侵蚀运移作用对消落带土壤性状的影响,以期三峡水库消落带土壤侵蚀治理、生态恢复重建工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡水库中游重庆市忠县石宝镇(30°03'~30°35'N, 107°32'~108°14'E),属于低山丘陵区(图 1a)。气候以亚热带湿润季风型气候为主,年平均气温 18.2 °C,年降水量 1 100~1 400 mm,且多集中在夏季(5—9月)。相对湿度和无霜期分别为 70%~80% 和 340 d^[11]。消落带土壤母质由侏罗纪沙溪庙组紫色泥岩发育而生,结构水稳性差,遇水极易

崩解和侵蚀。紫色泥岩的风化产物紫色土是典型土壤类型。消落带现有植被主要包括狗牙根、牛鞭草、

苍耳和鬼针草等一年生和多年生草本植物^[12]。该地区地形起伏平缓,坡度 $7^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。

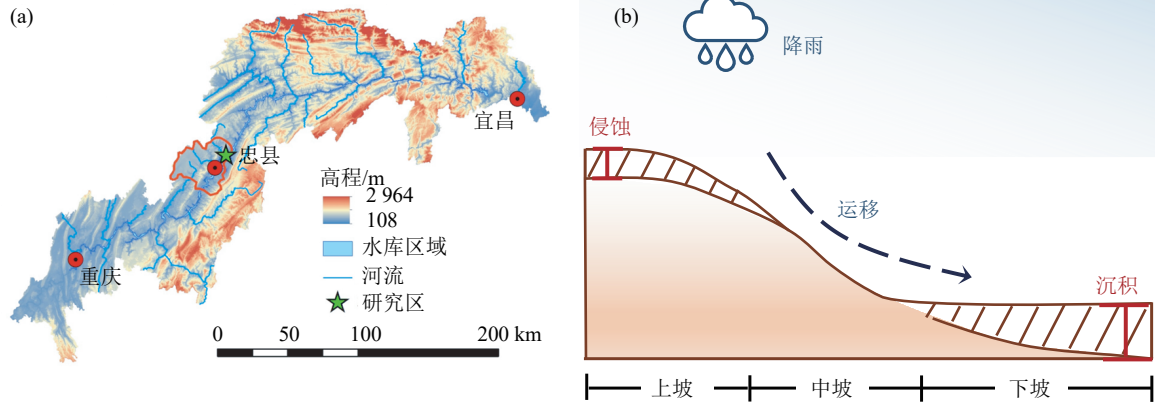


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

1.2 样品采集

野外调查和土样采集于2024年8月完成。选取3种植被类型:人工恢复单一优势群落草本狗牙根、牛鞭草和自然生长共优群落草本进行采样,每种植被类型均设置3条重复样带。根据典型斜坡样带的坡度、土壤质地类型、颜色差异和地表形态,划分出上坡、中坡和下坡3个坡位(表1)。其中,上坡以侵蚀

作用为主导,中坡多为过度运移,下坡以沉积作用为主(图1b)。

各采样单元设置 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方,去除表层沉积物和凋落物后,分层采集 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30\text{ cm}$ 原地土壤样品,用于土壤理化性质和团聚体分析。各采样点均采集原状土用于抗剪强度测定、环刀样用于土壤体积质量测定。

表1 不同坡位样地概况

Table 1 Overview of sample plots at different slope positions

坡位	累计淹水时长/d	平均淹水深度/m	最大淹水深度/m	含水率/%	坡度/ $(^{\circ})$	土壤类型
上坡	72	2.53	4.75	17.19 ± 1.10	$7\sim 8$	紫色土
中坡	154	4.81	9.75	19.40 ± 2.65	$5\sim 7$	紫色土
下坡	227	7.41	14.75	31.56 ± 2.55	$4\sim 6$	紫色土

注:水文数据由单个运行周期内三峡水库逐日水位数据计算得出,水位数据收集自长江水文网;含水率数据为平均值±标准差。

1.3 分析测试

土壤样品移除植物根系、砾石和其他杂物,在室温下自然风干,过 2 mm 筛以测定土壤粒径,过 0.15 mm 筛以测定土壤有机碳、全氮和全磷。其中,土壤粒度分布采用马尔文2000激光粒度分析仪(Malvern Instruments Ltd., Malvern, 英国)测定,土壤有机碳和全氮采用元素分析仪测定^[13],土壤全磷采用钼锑抗比色法^[14], 105°C 下烘干土样至恒重以测定土壤体积质量^[15],土壤团聚体采用湿筛法测定水稳性团聚体含量^[16]。抗剪强度采用智龙科技全自动四联直剪仪进行剪切试验,测定土壤黏聚力(c)和土壤内摩擦角(φ)指标,四级垂向载荷设定为 50 、 100 、 200 、 300 kPa ,剪切位移为 5 mm ,剪切速率为 0.8 mm/min 。

1.4 指标计算

平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)计算公式为:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

式中: n 为粒级数; X_i 为第 i 级团聚体平均粒径,mm; W_i 为第 i 级团聚体平均重量,g。

1.5 统计分析

采用单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)和最小显著差异分析($p < 0.05$)对不同植被类型和坡位的土壤特性差异进行检验,计算皮尔逊相关系数以量化土壤团聚体及力学特征与土壤理化性质之间的关系。使用SPSS 22.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, 美国)和Origin 9.0 (Origin Lab, Hampton, MA, 美国)软件进行相关性分析、主成分分析与图形绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体组成及稳定性

从表2可以看出,土壤团聚体质量分数及稳定性在不同植被类型和坡位分异明显。

表2 土壤团聚体质量分数
Table 2 Content of soil aggregates %

植被类型	坡位	>0.25 mm	0.053~0.25/mm	<0.053 mm
狗牙根	上坡	68.25±1.06	17.92±0.60	13.83±0.51
	中坡	64.36±1.36	27.53±0.40	8.11±1.11
	下坡	62.21±2.89	24.87±1.79	12.92±1.11
牛鞭草	上坡	66.92±2.92	21.08±2.02	12.00±1.03
	中坡	58.99±2.79	31.67±1.75	9.34±1.13
	下坡	70.60±1.84	16.56±1.61	12.84±0.62
自然草本	上坡	46.96±1.88	35.06±1.51	17.99±0.70
	中坡	36.88±0.56	49.54±0.19	13.58±0.60
	下坡	39.85±1.27	37.38±0.41	22.77±1.38

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

整体而言,相较于自然草本>0.25 mm团聚体质量分数(41.23%),狗牙根和牛鞭草分别提升

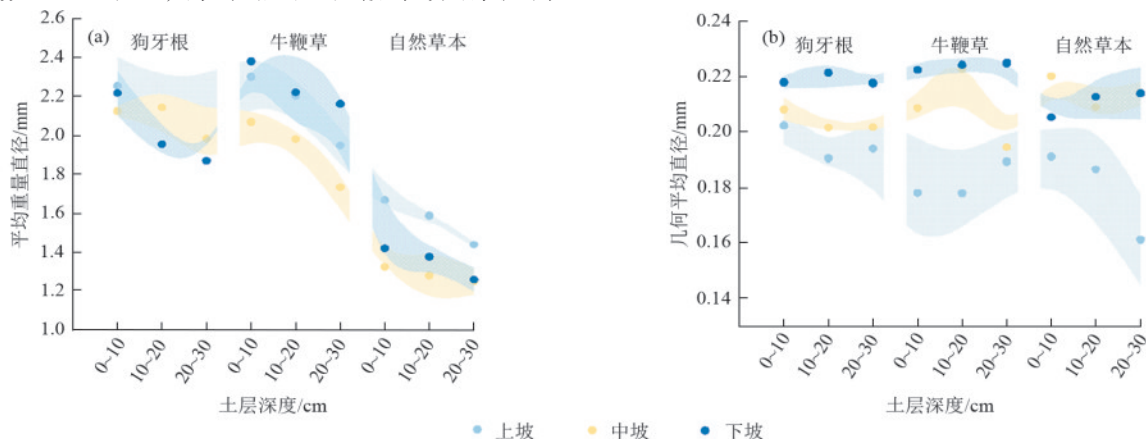


图2 土壤团聚体稳定性指标

Fig.2 Stability indicators of soil aggregates

2.2 土壤抗剪强度

土壤黏聚力(c)为22.55~83.92 kPa,表层土壤最大。对于不同坡位,狗牙根表层土、牛鞭草和自然草本土壤 c 最小值均为中坡,最大值为上坡。狗牙根10~20、20~30 cm土层为上、中坡大于下坡(图3)。综合来看,狗牙根土壤 c 最大(68.70 kPa),牛鞭草次之(51.77 kPa),自然草本最小(38.37 kPa)。土壤内摩擦角(φ)为10.23°~29.82°,狗牙根(19.59°)和牛鞭草(19.41°)大于自然草本(19.09°)(图3b)。表层土(0~10 cm)大于其他土层,上坡显著高于中、下坡。

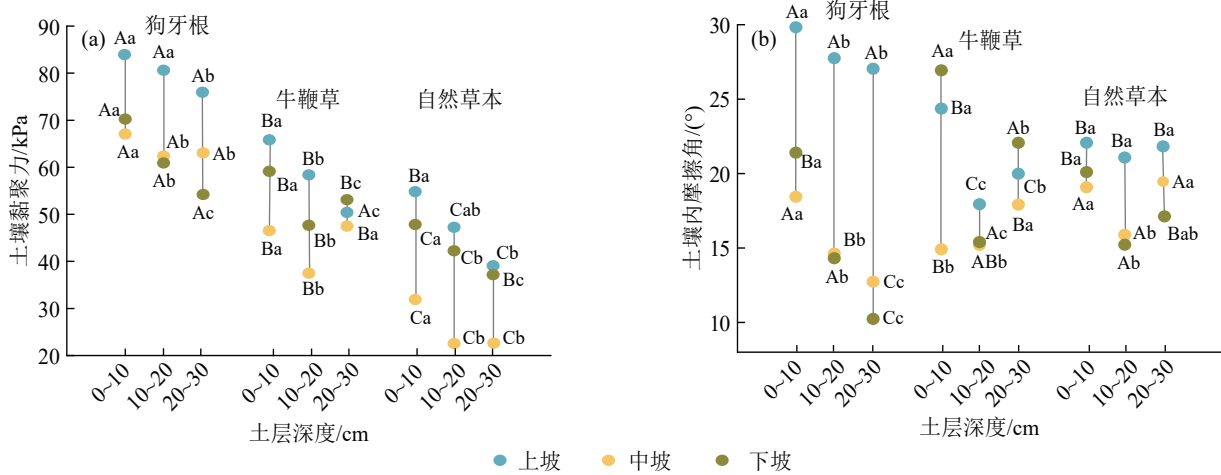
2.3 土壤理化性质

土壤理化性质在不同植被类型和坡位之间分异显著(图4)。土壤有机碳(SOC)为6.63~25.08 g/kg,表层土(0~10 cm)最高(图4a)。总体为狗牙根(17.53 g/kg)>牛鞭草(16.34 g/kg)>自然草本

23.71%、24.27%,表明人工恢复促进大团聚体形成。<0.053 mm团聚体在中坡最低,>0.25、0.053~0.025 mm团聚体总质量分数呈相反趋势。平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)整体变化分别为1.24~2.38、0.32~0.80 mm,表土显著高于深层土壤(图2)。狗牙根表层土MWD最小值为中坡,上坡略大于下坡,其余土层均表现为上、中坡显著大于下坡。牛鞭草和自然草本MWD最小值均在中坡,其中牛鞭草上坡小于下坡,自然草本土坡显著大于下坡。对于GMD,各植被类型上、中坡较下坡显著降低。其中,狗牙根上、中坡分别下降10.68%、6.94%,牛鞭草上、中坡分别下降18.86%、6.82%,以及自然草本土坡下降14.75%、中坡增加1.79%。

综合来看,牛鞭草MWD平均值最高(2.11 mm),狗牙根次之(2.09 mm),自然草本最低(1.40 mm)(图2a)。GMD变化类似,表现为牛鞭草(0.68 mm)>狗牙根(0.67 mm)>自然草本(0.40 mm)(图2b)。

(10.30 g/kg)。对于不同坡位,各植被类型SOC最小值均在中坡。其中,狗牙根上坡比下坡高27.66%,牛鞭草和自然草本土坡较下坡均有所下降,分别降低42.84%和49.65%。总氮(TN)为0.74~1.60 g/kg,随土层加深而递减(图4b)。从坡位来看,狗牙根上、中坡较下坡TN均有所下降,分别减小5.26%、17.54%,最小值在中坡(0.94 g/kg);牛鞭草TN最大值在下坡(1.25 g/kg),上坡平均降低13.60%,中坡降低15.2%;自然草本土、中坡TN比下坡分别增加30.86%、1.23%,下坡TN最低(0.81 g/kg)。综合来看,TN质量分数依次为牛鞭草(1.05 g/kg)>狗牙根(1.13 g/kg)>自然草本(0.90 g/kg)。总磷(TP)随坡位和土层变化无显著规律(图4c),不同植被类型TP表现为狗牙根(1.90 g/kg)>牛鞭草(1.07 g/kg)>自然草本(0.80 g/kg)。



注:图中不同大写字母表示同一土层不同植被类型间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示不同土层同一植被类型间差异显著($p < 0.05$)。

图3 土壤抗剪强度

Fig.3 Soil shear strength

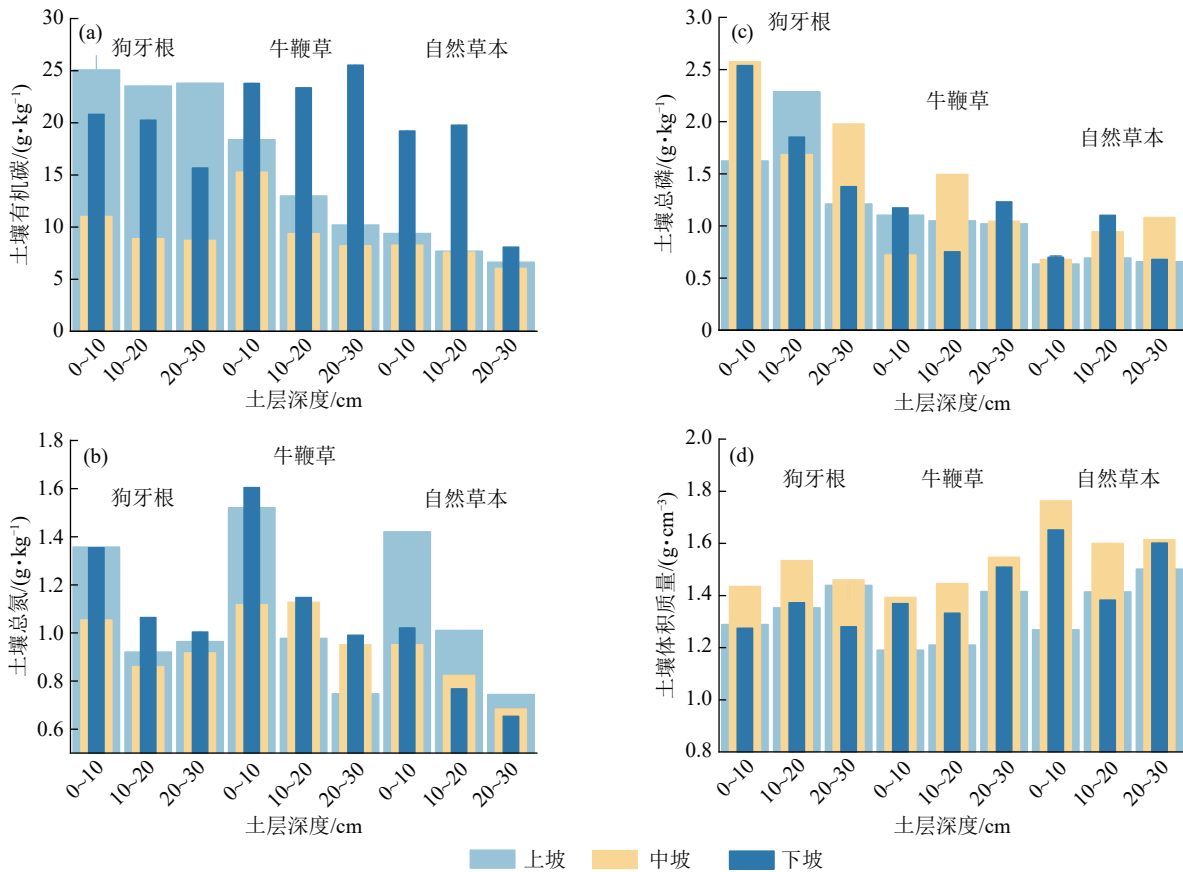


图4 土壤基本理化性质

Fig.4 Basic physicochemical properties of soil

土壤体积质量(BD)为1.19~1.76 g/cm³(图4d),表土低于深层土壤。自然草本 BD 最大(1.38 g/cm³),狗牙根次之(1.37 g/cm³),牛鞭草最小(1.53 g/cm³)。对于不同坡位,最大值均在中坡。

各植被类型的粉粒(Silt)占比均在50%以上,牛鞭草和自然植被粉粒含量较高(表3)。上、中坡砂粒(Sand)含量较高,黏粉粒(Silt,Clay)在下坡富集,可归因于侵蚀土壤颗粒的沉积。

2.4 相关性分析与主成分分析

土壤理化性质与土壤团聚体特征的相关性分析结果(图5a)表明,SOC(0.62)、TN(0.6)、>0.25 mm 团聚体(0.99)与MWD呈极显著正相关($p < 0.01$),与TP(0.42)呈显著正相关($p < 0.05$)。BD(-0.67)、Sand(-0.92)、0.053~0.25 mm 团聚体(-0.94)、<0.053 mm 团聚体(-0.65)与MWD呈极显著负相关($p < 0.01$)。GMD与SOC(0.61)、TN(0.52)、>0.25 mm

团聚体(0.98)呈极显著正相关($p < 0.01$),与 TP(0.45)呈显著正相关($p > 0.05$),与 BD(-0.60)、Sand(-0.90)、0.053~0.25 mm 团聚体(-0.86)、<0.053 mm 团聚体(-0.76)呈极显著负相关($p < 0.01$),与 Clay(-0.39)呈显著负相关($p < 0.05$)。

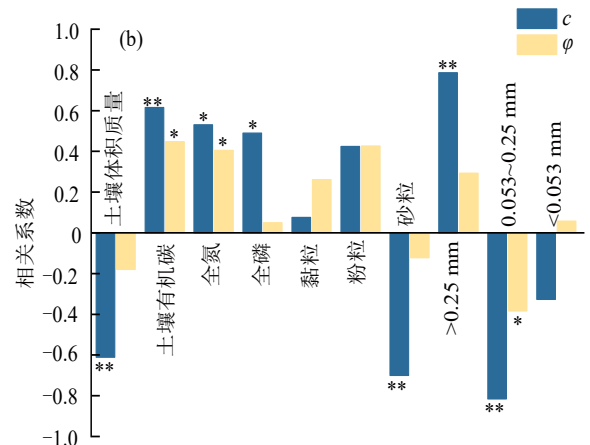
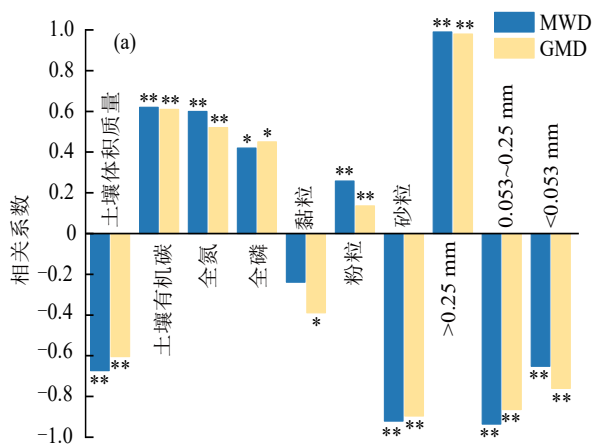
土壤理化性质与土壤抗剪强度的相关性分析结果(图 5b)表明, c 与 SOC(0.62)、TN(0.53)、>0.25 mm 团聚体(0.79)呈极显著正相关($p < 0.01$),与 TP(0.49)、Silt(0.42)显著正相关($p < 0.05$); φ 与 BD(-0.61)、Sand(-0.70)、0.053~0.25 mm 团聚体(-0.82)呈极显著负相关($p < 0.01$),与 SOC(0.45)、TN(0.41)、Silt(0.43)呈显著正相关($p < 0.05$),与 0.053~0.25 mm 团聚体(-0.38)呈显著负相关($p < 0.05$)。主成分分析表明, $KMO > 0.6$, Bartlett 检验 $p < 0.05$, 前 2 个主成分累计方差贡献率 79.52%, PCA 1 贡献率 45.28%, PCA 2 贡献率 34.24%。综合分析可知, PCA 1 主要反映土壤性质对 MWD、GMD 和 c 的影响, SOC(0.83)、>0.25 mm 团聚体(0.79)、0.053~

0.25 mm 团聚体(-0.91)和 BD(-0.81)权重系数较大,绝对值均 >0.70; PCA 2 反映土壤性质对 φ 的影响, <0.053 mm 团聚体(0.96)、Clay(0.91)和 Sand(-0.73)权重系数较大(图 6)。土壤抗剪强度的变化,主要通过影响 c 来实现。

表 3 消落带坡面土壤粒径组成

Table 3 Particle size composition of soil on slope of water-level fluctuation zone %

植被类型	坡位	黏粒	粉粒	砂粒
狗牙根	上坡	17.21±0.33	72.68±0.52	10.11±0.19
	中坡	11.57±0.42	59.92±0.53	28.51±0.17
	下坡	17.24±0.60	73.66±0.87	9.09±0.27
牛鞭草	上坡	16.60±0.42	73.52±0.80	9.88±0.47
	中坡	11.45±0.83	59.16±0.74	29.37±0.16
	下坡	16.49±0.57	72.50±0.81	11.01±0.25
自然草本	上坡	18.98±0.12	69.42±0.80	11.60±0.69
	中坡	12.92±0.30	61.21±0.73	25.87±0.44
	下坡	20.62±0.53	73.27±0.86	6.11±0.43



注: *表示显著相关($p < 0.05$); **表示极显著相关($p < 0.01$)。

图 5 土壤团聚体和抗剪特性与土壤理化性质的相关性

Fig.5 Correlations of soil aggregates and shear characteristics with soil physicochemical properties

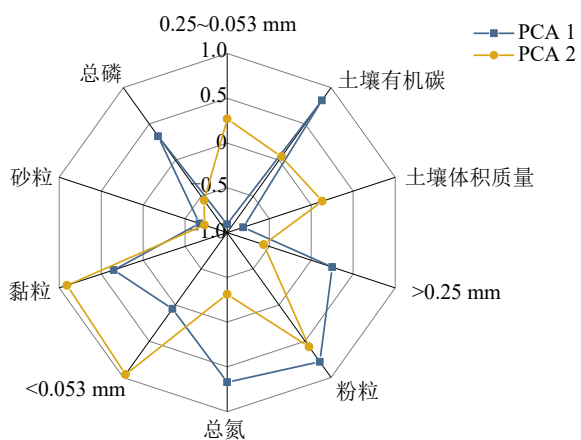


图 6 前 2 个主成分载荷

Fig.6 Loading plot of first two principal components

3 讨论

3.1 植被对消落带土壤性状的影响

土壤团聚体稳定性决定团聚体被破坏和分离的难易程度,衡量土壤结构和质量的优劣,人工植被恢复显著提升土壤团聚体稳定性和抗剪强度。人工恢复植被较自然草本>0.25 mm 团聚体质量分数明显增加,由自然草本的 36.88%~46.96% 增至 58.99%~70.60%(表 2)。由于人工恢复植被盖度较高,植物地下根系丰富,土壤中胶结剂、真菌等含量增加,一方面可促进新团聚体形成;另一方面,团聚体在根系物理缠绕下不易崩解,增强土壤固持力。表层土壤具有较高 MWD 和 GMD(图 2),且随土层加深而减小,是由于表层土壤具有较高的大团聚体质量分数和 SOC 浓度^[17]。

土壤抗剪强度体现土壤抵抗降水及径流的剪切能力^[18],是岸坡稳定性和土壤侵蚀的重要指示指标。上坡 c 较大可归因于植被盖度和 SOC、TN;一方面消落带上部盖度高可增加土壤有机物质以凋落物和根系分泌物等形式输入,根系分泌物倾向于附着在土壤颗粒表面,通过范德华力促进土壤颗粒与根系间的黏结^[19-20],降低土壤侵蚀和养分流失风险,利于微生物活动和氮矿化^[21];另一方面, SOC、TN 较高,使得颗粒间胶结作用和吸引力增大。随土层加深,土壤接近母质层,土壤颗粒以原生矿物为主,植被根系、有机质降低,导致 c 、 ϕ 随土层加深而减小。自然草本土壤抗剪强度明显低于人工恢复植被,除自然草本土壤有机质输入和根系固结较少外,在径流和波浪冲刷反复作用下,土壤裂隙反复发育及闭合使得孔隙增加,导致土壤由紧密结构逐渐向疏松多孔结构发展。

3.2 侵蚀对消落带土壤性状的影响

土壤团聚体和抗剪特性在不同坡位的分异主要通过地表径流侵蚀过程实现。坡面上中部地形较陡,受雨滴打击和径流冲刷,侵蚀强烈。下坡地形和缓,受沉积主导,可作为侵蚀作用的参考。 >0.25 mm 团聚体质量分数在中坡降至最低,由于降雨侵蚀和水体淘蚀使大团聚体破碎,同时消落带中部受到频繁干湿交替作用,促使土壤团聚体涨缩形成更多裂纹,土壤结构劣化。土壤性状分异主要受土壤颗粒在不同坡位的分布变化影响(表 3)。本研究中,黏、粉粒质量分数自上坡到中坡逐渐降低、而后到下坡逐渐升高,砂粒质量分数呈现相反趋势。雨滴撞击为土壤颗粒的位移创造先决条件^[22],上坡土壤受到雨滴撞击而被冲散为独立小颗粒。降水在坡面汇集形成径流并沿坡向下移动,上部侵蚀物质也随之发生位移。径流优先运输细小颗粒,黏粉粒随侵蚀物质发生输移并富集养分^[23]。消落带下坡沉积区具有较高 BD,与受波浪压实作用、高水位条件下覆盖层沉积物的压实和黏粉粒进入孔隙有关^[24](图 4d)。

土壤团聚体稳定性在各坡位呈显著差异,受侵蚀主导的上、中坡较低,沉积为主的下坡具有较高数值(图 2)。由于坡面土壤在侵蚀过程中,侵蚀部位受外力破坏,引起团聚体机械破坏,土壤团聚效应减弱^[24],团聚体崩解且土壤颗粒发生迁移。同时,消落带频繁的干湿交替循环会刺激微生物活动,导致作为团聚体胶结剂的 SOC 损失^[25],并且干燥时不能完全恢复土壤团聚体稳定性至初始水平。消落带坡面

下部坡度减缓、地形平坦,具有较强“汇”功能,土壤颗粒及元素在此沉积,利于形成新团聚体^[26]。较长水淹时间导致的厌氧环境使得微生物活性降低可能在较低坡位产生更多土壤有机质^[27-28]。

对于土壤抗剪强度来说,侵蚀区域受雨水冲刷和重力作用导致细颗粒流失,残留土壤以粗砂粒为主,有机质含量低, c 值下降(图 3a)。下坡坡度较缓,易接受上坡搬运而来的细颗粒和有机质,土壤质地黏重。上坡土壤粗颗粒残留较多导致土体 ϕ 增大^[29](图 3b)。消落带岸坡水体停留时间沿坡位自上而下呈递增趋势,坡面中下部在受到径流作用的同时还受到波浪冲刷,土壤矿物在反复浸泡和冲刷过程中出现软化,造成土壤 ϕ 逐渐减小。

3.3 研究展望

三峡水库消落带核心区扰动为周期性水淹和雨季洪峰扰动,导致不同坡位土壤侵蚀速率和水动力条件不同,极端水文事件短期内显著改变土壤性质,影响土壤团聚体稳定性和抗剪强度。本文基于非汛期静态数据开展,关注土壤侵蚀发生后的整体性状分异,未进一步解析水库运行周期内单个水文事件对土壤性状分异的影响机制及其时序变化响应过程,后续可开展动态水文事件影响观测,精细化表征消落带不同植被类型和坡位土壤性状分异及其动态变化过程。

4 结论

1)人工植被恢复显著改善土壤性状。人工恢复草本 >0.25 mm 团聚体较自然草本有所增加,具有较高 MWD 和 GMD, c 、 ϕ 显著大于自然草本, SOC、TN、TP 均大于自然草本。

2)侵蚀作用导致团聚体机械破坏及土壤颗粒分选,土壤性状空间分异显著。上、中坡团聚体破碎严重,残留土壤以粗颗粒为主,黏粉粒下坡沉积,表层土壤受侵蚀作用影响显著。GMD、MWD 最小值为上、中坡; c 值在中坡降至最低,上坡 ϕ 值显著高于其余坡位; SOC、TN 最小值和 BD 最大值均在中坡。表土的 SOC、TN、团聚体稳定性和抗剪强度均大于深层土。

3)土壤理化性质与土壤团聚体稳定性和抗剪特性具有显著相关性($p < 0.01$)。影响土壤团聚体稳定性的关键土壤因子为 SOC、 >0.25 mm 团聚体和 TN; SOC、 >0.25 mm 团聚体对 c 影响显著,土壤粒径组成对 ϕ 影响较大,土壤抗剪强度的提高主要通过增大 c 来实现。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] RAN Y G, WU S J, ZHU K, et al. Soil types differentiated their responses of aggregate stability to hydrological stresses at the riparian zones of the Three Gorges Reservoir [J].Journal of Soils and Sediments,2020,20(2):951-962.
- [4] ZHU K, RAN Y G, MA M H, et al. Ameliorating soil structure for the reservoir riparian: The influences of land use and dam-triggered flooding on soil aggregates[J].Soil and Tillage Research,2022,216:e105263.
- [5] 胡宏宇,张靖,刘莹,等.三峡水库消落带优势植物不同配置对土壤结构稳定性的影响[J].生态学报,2025,45(6):2710-2722.
HU H Y, ZHANG J, LIU Y, et al. Soil structure stability impacted by the different configurations of dominant plant species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir[J].Acta Ecologica Sinica,2025,45(6):2710-2722.
- [6] 白芹菲,王艳琪,鲍玉海,等.黑龙江水库消落带植被恢复模式对土壤水稳性团聚体组成及其稳定性的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):168-176.
BAI Q F, WANG Y Q, BAO Y H, et al. Effects of vegetation restoration patterns on soil water-stable aggregates composition and their stability in the water level fluctuation zone of the Heilongtan Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):168-176.
- [7] NSABIMANA G, BAO Y H, HE X B, et al. Soil aggregate stability response to hydraulic conditions in water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J].Catena,2021,204:e105387.
- [8] 郑晓岚,鲍玉海,贺秀斌,等.周期性淹水对水库消落带根土复合体抗剪性能的影响[J].水土保持学报,2023,37(5):111-120.
ZHENG X L, BAO Y H, HE X B, et al. Effects of periodic flooding on shear resistance of root-soil composite in the water-level fluctuation zone [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(5):111-120.
- [9] MAO J H, ZHANG J X, CHEN F Q. Performance of soil-root system of *Setaria viridis* community in soil reinforcement and slope protection on the water-level-fluctuation belt in the Three Gorges Reservoir region [J]. Advanced Materials Research,2013,773:794-799.
- [10] KANG J C, WEI J, GAN F L, et al. Shear strength of purple topsoil under different land uses in the Three Gorges Reservoir area, China[J].Mountain Research and Development,2021,41(3):1-11.
- [11] TANG Q, BAO Y H, HE X B, et al. Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J].Science of the Total Environment,2014,479:258-266.
- [12] 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.
- [13] 王巧环,任玉芬,孟龄,等.元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳[J].分析试验室,2013,32(10):41-45.
WANG Q H, REN Y F, MENG L, et al. Simultaneous determination of total nitrogen and organic carbon in soil with an elemental analyzer[J].Chinese Journal of Analysis Laboratory,2013,32(10):41-45.
- [14] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1983.
Agricultural Chemistry Professional Committee of the Soil Science Society of China. Conventional analytical methods for soil agricultural chemistry [M].Beijing: Science Press,1983.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Methods for determining soil physical properties [M].Beijing: Science Press,1978.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科技出版社,1981.
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical analysis [M].Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Press,1981.
- [17] OADES J M, WATERS A G. Aggregate hierarchy in soils [J]. Australian Journal of Soil Research,1991,29(6):815-828.
- [18] 张爱国,李锐,杨勤科.中国水蚀土壤抗剪强度研究[J].水土保持通报,2001,21(3):5-9.
ZHANG A G, LI R, YANG Q K. Study on soil anti shearing intensity of water erosion in China [J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2001,21(3):5-9.
- [19] WALIA M K, DICK W A. Selected soil physical properties and aggregate-associated carbon and nitrogen as influ-

- enced by gypsum, crop residue, and glucose [J]. *Geoderma*, 2018, 320: 67-73.
- [20] WANG H, ZHANG G H, LI N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2018, 325: 18-27.
- [21] 王传盈, 王凯月, 王浩然, 等. 黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征 [J]. *环境科学*, 2024, 45(3): 1674-1683.
- WANG C Y, WANG K Y, WANG H R, et al. Nutrients and ecological stoichiometry characteristics of typical wetland soils in the lower Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(3): 1674-1683.
- [22] WU Y Y, OUYANG W, HAO Z C, et al. Assessment of soil erosion characteristics in response to temperature and precipitation in a freeze-thaw watershed [J]. *Geoderma*, 2018, 328: 56-65.
- [23] 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 Conservation*, 2025, 39(6): 57-65.
- [24] YAO Y F, KONG W B, WANG Z, et al. Distribution of soil physical and hydraulic properties between erosion and deposition topographies in five small catchments from north to south on the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2023, 222: e106891.
- [25] SHI P, VAN OOST K, SCHULIN R. Dynamics of soil fragment size distribution under successive rainfalls and its implication to size-selective sediment transport and deposition [J]. *Geoderma*, 2017, 308: 104-111.
- [26] DONG L B, LI J W, ZHANG Y, et al. Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 302: e113985.
- [27] ZHANG X X, GREGORY A S, WHALLEY W R, et al. Relationship between soil carbon sequestration and the ability of soil aggregates to transport dissolved oxygen [J]. *Geoderma*, 2021, 403: e115370.
- [28] HARUNA S I. Spatial and fractal characterization of selected soil nutrients along a catena [J]. *Catena*, 2021, 204: e105443.
- [29] RASTI A, ADARMANABADI H R, PINEDA M, et al. Evaluating the effect of soil particle characterization on internal friction angle [J]. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2021, 14(1): 129-138.
- [30] 贾莲莲, 李占斌, 李鹏, 等. 降雨过程对地表糙度的影响 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 30-33.
- JIA L L, LI Z B, LI P, et al. The course rainfall effect on surface roughness [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 30-33.
- [31] 李陶陶. 降雨过程中地表糙度与细沟侵蚀的关系研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- LI T T. Relationship between soil surface roughness and rill erosion in the process of rainfall [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.
- [32] 蒋发辉, 钱泳其, 郭自春, 等. 基于Meta分析评价东北黑土地保护性耕作与深耕的区域适宜性: 以作物产量为例 [J]. *土壤学报*, 2022, 59(4): 935-952.
- JIANG F H, QIAN Y Q, GUO Z C, et al. Evaluating the regional suitability of conservation tillage and deep tillage based on crop yield in the black soil of northeast China: A meta-analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(4): 935-952.

(上接第149页)