

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.032.

王艳琪, 白芹菲, 鲍玉海, 等. 黑龙江水库消落带不同植被恢复模式对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 281-289.

Wang Yanqi, Bai Qinfei, Bao Yuhai, et al. Effects of Different Vegetation Restoration Patterns on Soil Physical Properties in the Riparian Zone of the Heilongtan Reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 281-289.

黑龙江水库消落带不同植被恢复模式对 土壤物理性质的影响

王艳琪^{1,2}, 白芹菲^{1,3}, 鲍玉海¹, 禹妍彤^{1,2}, 罗鹏⁴, 贺秀斌¹

(1.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299; 2.中国科学院大学, 北京 100049;

3.重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 4.中铁四川生态城投资有限公司, 四川 眉山 620500)

摘要: [目的] 探究水库消落带不同植被恢复模式对土壤物理性质的影响, 为水库消落带的植被-土壤互馈关系研究与生态重建工作提供科学依据。 [方法] 以黑龙江水库消落带自然恢复和人工恢复植被样地为研究对象, 采集了不同海拔梯度和土层深度的土壤样品, 利用环刀法和干筛法对比分析了土壤容重、总孔隙度、机械稳定性团聚体等物理性质。 [结果] 人工恢复与自然恢复植被下 0—20 cm 土层的土壤物理性质差异显著 ($p < 0.05$), 其中人工恢复植被的土壤容重相较于自然恢复植被低 16.97%, 而土壤总孔隙度、饱和持水量和含水率相较于自然恢复植被分别增加 35.00%, 58.45% 和 117.63%; 人工恢复植被下土壤 > 5 mm 机械性团聚体含量显著高于自然恢复植被; 多因素方差分析表明, 恢复模式与水位高程的交互作用相较于其他交互作用对土壤物理性质的影响更为明显; 冗余分析 (RDA) 和相关性分析表明, 恢复模式是黑龙江水库消落带土壤物理性质空间分异的主控因素。 [结论] 人工植被恢复能够有效改善土壤物理性质, 建议在黑龙江水库消落带合理开展人工植被恢复, 改善土壤质量。

关键词: 水库消落带; 土壤物理性质; 冗余分析; 植被恢复模式

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0281-09

Effects of Different Vegetation Restoration Patterns on Soil Physical Properties in the Riparian Zone of the Heilongtan Reservoir

Wang Yanqi^{1,2}, Bai Qinfei^{1,3}, Bao Yuhai¹, Yu Yantong^{1,2}, Luo Peng⁴, He Xiubin¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences,

Chengdu 610299, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

4. Sichuan Ecological City Investment Co., Ltd., China Railway, Meishan, Sichuan 620500, China)

Abstract: [Objective] The objectives of this study are to explore the effects of different vegetation restoration patterns on soil physical properties in the reservoir riparian zone, and to provide a scientific basis for the study of vegetation-soil feeding and ecological reconstruction in the reservoir riparian zone. [Methods] The natural restoration and artificial restoration of vegetation in the riparian zone of the Heilongtan Reservoir were taken as the research object, soil samples with different altitude gradients and soil depths were collected. The physical properties of soil bulk density, total porosity, mechanical stability aggregates and other physical properties were compared and analyzed by core method and dry sieve method, respectively. [Results] There were significant differences in soil physical properties between artificial restoration and natural restoration vegetation in the 0—20 cm soil layer ($p < 0.05$), in which the soil bulk density of artificial

收稿日期: 2024-01-02

修回日期: 2024-01-24

资助项目: 四川省中央引导地方科技发展专项项目“周期性淹水条件下水库消落带典型草本根系对紫色土稳固作用机制”(2023ZYD0150)

第一作者: 王艳琪 (2000—), 女, 河北遵化人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: wangyanqi@imde.ac.cn

通信作者: 鲍玉海 (1981—), 男, 山东成武人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: byh@imde.ac.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

restoration vegetation was 16.97% lower than that of natural restoration vegetation, while the total porosity, saturated water holding capacity and moisture content of soil increased by 35.00%, 58.45% and 117.63%, respectively, compared with that of natural restoration vegetation. The content of >5 mm mechanical aggregates in soil under artificial restoration vegetation was significantly higher than that under natural restoration vegetation. Multivariate ANOVA showed that the interaction between restoration pattern and water level elevation had the most obvious impact on soil physical properties than other interactions. Redundancy analysis and correlation analysis showed that the restoration pattern was the main controlling factor for the spatial differentiation of soil physical properties in the riparian zone of the Heilongtan Reservoir. [Conclusion] Artificial vegetation restoration can effectively improve soil physical properties, and it is suggested to carry out artificial vegetation restoration reasonably in the riparian zone of the Heilongtan Reservoir to improve soil quality.

Keywords: reservoir riparian zone; soil physical properties; redundancy analysis; vegetation restoration pattern

土壤物理性质决定着土壤蓄水保肥的能力,是反映土壤质量状况与评估植被恢复效果的重要指标^[1]。大量研究表明,植被可以通过根系生长与分泌物生产、凋落物积累、降尘截获、改变土壤微生物甚至基岩风化过程从而影响土壤理化性质^[2],不同植物的生长演替过程通过改变土壤发育速率从而影响土壤水力特性^[3]。植被作为调控土壤侵蚀的关键因素,植被恢复驱动下的土壤理化性质变化也是土壤侵蚀阻力研究的重要内容之一^[4]。

水库消落带作为水陆生境交替变化剧烈的生态脆弱带^[5],其生境在周期性淹水—出露和干—湿交替作用下发生剧烈变化,尤其是高压淹水浸泡作用显著改变了消落带土壤的结构特征、力学特性、理化性质,导致土壤侵蚀强烈,生态缓冲功能退化^[6-7]。植被恢复是保育消落带土壤的重要措施,也是恢复退化生态系统的前提,成为当前消落带研究的重点方向之一^[8]。但水库消落带植被恢复相关研究主要集中在适生植物筛选和空间配置、植被群落特征、植被减蚀效应、植被对土壤养分及微生物群落的影响等方面,且主要集中在三峡水库、丹江口水库、金沙江下游水电站等水库消落带^[9-11],水库消落带不同植被恢复模式下土壤物理性质的对比观测较为缺乏。

黑龙滩水库作为眉山市重要的饮用水源地,关系着 8.07 万 hm^2 农田灌溉和近 300 万人口饮用水供给^[12]。目前针对黑龙滩水库的研究主要集中在水库水质、水环境、旅游资源等方面^[13],对黑龙滩水库消落带植被-土壤演变特征尚未形成系统研究。基于此,本文以黑龙滩水库典型的自然和人工植被恢复消落带为研究对象,分析不同植被恢复模式下土壤物理性质及其空间变化特征,对比研究植被恢复对消落带土壤物理性质的影响,以期在黑龙滩水库及类似地区水库消落带植被重建工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑龙滩水库位于四川省仁寿县境内的岷江支流锦江河上游,地处仁寿县西北部,位于成都平原的东南边缘($30^{\circ}00'10''$ — $30^{\circ}08'38''\text{N}$, $103^{\circ}59'07''$ — $104^{\circ}06'35''\text{E}$),是都江堰灌区一座以引蓄都江堰水源为主的大(2)型围蓄水库,以灌溉和生活用水为主,是眉山市重要的饮用水源地。水库集雨面积 185.5 km^2 ,水域面积约 23.6 km^2 ,多年平均径流量约 0.62 亿 m^3 ,最大库容 3.6 亿 m^3 ;水位变化范围为 468~484 m,形成了垂直落差 16 m 的水库消落带。由于消落带生境脆弱,为恢复和提升其生态缓冲和景观功能,近年来当地政府积极开展了探索性的消落带生态治理工作,但并未系统评估植被恢复所产生的水土保持效益。

研究区位于四川省眉山市仁寿县黑龙滩镇邱家堰—金沙湾库段,地处中亚热带湿润季风气候区,年平均气温 17.2 $^{\circ}\text{C}$,7 月均温 26.3 $^{\circ}\text{C}$,1 月均温 7 $^{\circ}\text{C}$;年平均降水量 1 036.5 mm,降水量偏高且集中,消落带土壤以紫色土、黄壤为主。2019 年,在研究区库尾原来自然恢复的消落带采取种植“草本+木本”植物恢复模式进行了人工恢复试点,人工恢复消落带在人工干预前植物群落与自然恢复消落带一致。试验样地土壤及植被类型概况见表 1。

1.2 土壤样品采集与处理

本试验选取黑龙滩镇黑龙滩水库消落带典型岸坡,坡度 $<3^{\circ}$,于 2023 年 6 月消落带退水后进行样品采集,当时水位为 475 m 左右,475~484 m 消落带出露水面。考虑到水文情况为逐级蓄水,将消落带按高程分为 3 个水位梯度:低水位区(475~478 m)、中水位区(478~481 m)、高水位区(481~484 m),并选取未淹水区作为对照样地(484~487 m)。设置 2 个采

样带,样带的植被恢复模式分别为自然恢复和人工恢复,每个水位高程设 3 个样地。0—20 cm 土层最能体现植被恢复对土壤物理性质的改善效果^[14],故本文将土层分为 0—10 cm 和 10—20 cm,选取多个采样点采集 0—10 cm,10—20 cm 土层的土壤样品。用体积为 100 cm³的环刀采原状土样,每块样地设 3

个重复,用于测定土壤容重、孔隙度、饱和持水量及含水率。每块样地用五点采样法采集散土样品 1 kg,将散土样品按照土壤自然结构轻轻剥成直径为 10 mm 左右的土块,挑除石块、粗根等杂物,自然风干后用于测定土壤团聚体各粒级团聚体含量组成,共采集 144 个环刀样和 48 个土样带回实验室。

表 1 试验样地土壤及植被类型概况

Table 1 Overview of soil and vegetation types in the sampling site

恢复模式	高程/m	主要植被类型	土壤类型	覆盖度/%	坡度/(°)
自然恢复	475~478	苘麻+翅茎灯芯草+狗牙根	紫色土	82~92	<3
	478~481	翅茎灯芯草+长芒稗	紫色土	100	<3
	481~484	牛筋草+翅茎灯芯草	紫色土	94~100	<3
	475~478	翅茎灯芯草	紫色土	100	<3
人工恢复	478~481	翅茎灯芯草	紫色土	100	<3
	481~484	翅茎灯芯草+狗牙根+木麻黄+中山杉	紫色土	100	<3

1.3 样品测定及指标计算

采用环刀法测定土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量以及含水率,本研究所涉及指标参照卫茂荣^[15]和邵明安等^[16]提出的方法测试与计算。

$$BD=\frac{G_4}{V}$$
(1)

$$TP=\frac{G_2-G-G_4}{V}\times 100\%$$
(2)

$$CP=\frac{G_3-G-G_4}{V}\times 100\%$$
(3)

$$AFP=TP-CP$$
(4)

$$SM=\frac{G_2-G-G_4}{G_4}\times 100\%$$
(5)

$$MC=\frac{G_1-G_4}{G_4}\times 100\%$$
(6)

式中:BD 为土壤容重(g/cm³);TP 为总孔隙度(容积%);CP 为毛管孔隙度(容积%);AFP 为非毛管孔隙度(容积%);SM 为饱和持水量(重量%);MC 为土壤含水率(重量%);G 为环刀重(g);G₁ 为环刀内鲜土重(g);G₂ 为浸水 12 h 后带土环刀重(g);G₃ 为排水 2 h 后带土环刀重(g);G₄ 为环刀内干土重(g);V 为环刀体积(cm³)。

采用沙维诺夫干筛法测定土壤机械稳定性团聚体组成,将 10 mm 小土块均匀铺开在牛皮纸上放于阴凉通风处,待其自然风干后,通过孔径依次为 5,2,1,0.5,0.25 mm 组成的套筛,对每个粒级含量进行称重,从而计算出>5,2~5,1~2,0.5~1,0.25~0.5,<0.25 mm 共 6 个粒级土壤机械稳定性团聚体含量。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2021 进行数据统计处理;消落带不同

水位高程土壤物理性质指标的差异性分析采用单因素方差分析(ANOVA)和多重比较(LSD 法, $p<0.05$),植被恢复、水位高程、土层深度两两及三者交互作用对土壤物理性质的影响采用多因素方差分析,上述数理统计均由 SPSS 25.0 软件完成;土壤物理性质指标与环境影响因子相关性分析使用 Person 法,由 Origin 2024 软件完成;冗余分析(RDA)及绘图采用 Canoco 5 软件进行;其他图件均采用 Origin 2024 软件绘制。

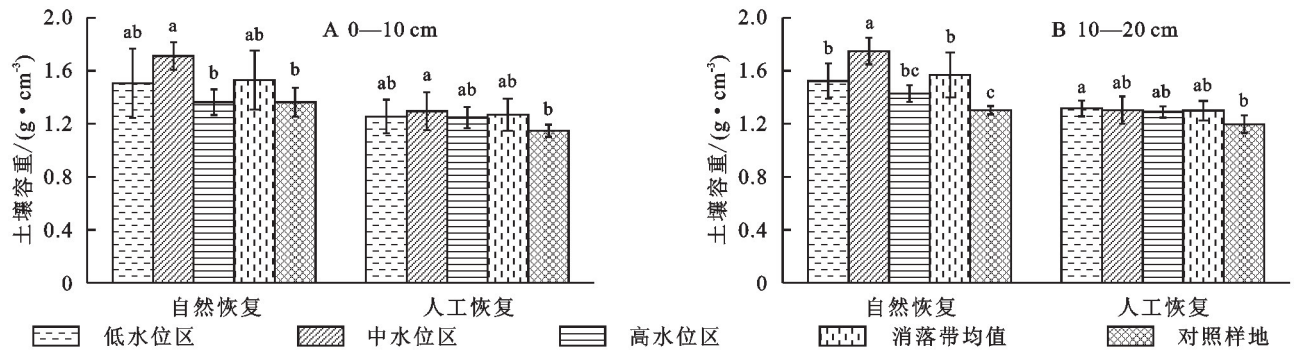
2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式土壤容重的变化

如图 1 所示,与未淹水对照样地相比,消落带内的土壤容重整体增大,从 1.25 g/cm³ 增大到 1.42 g/cm³,且随水位高程升高呈先增大后减小的趋势。自然恢复和人工恢复模式下,消落带内的低中高水位区土壤容重相较于未淹水对照分别平均增加了 16.02% 和 9.49%,均差异显著($p<0.05$);0—20 cm 土层的土壤容重均随着土层深度的增加而略有增大,但 0—10 cm 与 10—20 cm 土层间无显著性差异($p>0.05$)。总体来看,人工恢复模式的消落带平均土壤容重较自然恢复模式减小了 16.97%,差异显著($p<0.05$)。

2.2 不同植被恢复模式土壤孔隙度的变化

由表 2 可知,消落带内的毛管孔隙度整体上与总孔隙度规律相同,非毛管孔隙度与之规律相反;消落带内的平均毛管孔隙度占平均总孔隙度的 96.35%,而平均非毛管孔隙度只占 3.65%。消落带土壤总孔隙度和非毛管孔隙度与未淹水对照样地相比,均无显著性差异($p>0.05$),其中,消落带内的总孔隙度整体增大,从 43.59% 增大到 44.42%,随水位高程升高呈先减小后增大的趋势;而非毛管孔隙度整体减小,从 3.26% 减小到 1.62%,随水位高程升高呈先增大后减小的趋势。



注:不同小写字母表示植被恢复模式下不同水位高程和未淹水对照间差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同植被恢复模式下土壤容重随水位高程的变化

Fig. 1 Soil bulk density of different vegetation restoration patterns changed with the water level elevations

消落带 0—20 cm 土层土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均随着土层深度的增加而减小,但土壤总孔隙度、毛管孔隙度变化在土层间差异不显著($p>0.05$),而非毛管孔隙度变化差异显著($p<0.05$)。其中,与 0—10 cm 土层相比,消落带内 10—20 cm 土层

的土壤非毛管孔隙度减小了 13.79%。

总体来看,消落带人工恢复模式下土壤孔隙度指标与自然恢复模式下的相比差异显著($p<0.05$),其中,土壤总孔隙度增大了 35.00%,而非毛管孔隙度减小了 32.97%。

表 2 不同植被恢复模式下土壤孔隙度随水位高程的变化

Table 2 Soil porosity of different vegetation restoration patterns changed with the water level elevations

模式	海拔/m	土层/cm	总孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%
自然植被恢复	475~478	0—10	39.65(7.82) ^a	1.70(0.58) ^b	37.95(7.79) ^a
		10—20	40.39(3.88) ^a	1.68(0.72) ^b	38.70(3.88) ^a
		均值	40.02(6.18) ^A	1.69(0.65) ^B	38.33(6.17) ^A
	478~481	0—10	34.65(3.14) ^a	2.39(0.53) ^b	32.26(3.17) ^{ab}
		10—20	32.24(4.09) ^b	1.95(0.46) ^b	30.28(3.81) ^b
		均值	33.45(3.84) ^B	2.17(0.54) ^B	31.27(3.64) ^B
	481~484	0—10	40.09(2.39) ^a	2.20(0.84) ^b	37.90(2.55) ^{ab}
		10—20	39.82(2.66) ^{ab}	1.73(1.68) ^b	38.10(2.40) ^{ab}
		均值	39.96(2.53) ^{AB}	1.96(1.35) ^B	38.00(2.48) ^{AB}
	484~487	0—10	36.13(4.90) ^a	6.73(2.13) ^a	29.40(6.01) ^b
		10—20	33.21(5.01) ^b	4.52(2.04) ^a	28.69(6.05) ^b
		均值	34.67(4.75) ^B	5.62(2.20) ^A	29.04(5.52) ^B
人工植被恢复	475~478	0—10	50.91(2.72) ^{ab}	1.83(4.08) ^a	49.08(4.08) ^{ab}
		10—20	49.54(2.11) ^a	1.25(0.50) ^{ab}	48.30(1.94) ^a
		均值	50.23(2.53) ^A	1.54(1.68) ^A	48.69(3.22) ^B
	478~481	0—10	49.91(4.39) ^b	1.25(4.08) ^a	48.65(4.04) ^b
		10—20	52.29(4.70) ^a	1.55(0.52) ^a	50.75(4.71) ^a
		均值	51.10(4.70) ^A	1.40(0.49) ^A	49.70(4.51) ^{AB}
	481~484	0—10	52.48(2.28) ^{ab}	1.08(2.10) ^a	51.40(2.10) ^{ab}
		10—20	51.10(1.18) ^a	0.85(0.21) ^b	50.25(1.08) ^a
		均值	51.79(1.94) ^A	0.97(0.31) ^A	50.83(1.77) ^{AB}
	484~487	0—10	53.74(1.63) ^a	0.85(1.43) ^a	52.89(1.43) ^a
		10—20	51.30(1.41) ^a	0.94(0.30) ^b	50.36(1.55) ^a
		均值	52.52(1.95) ^A	0.90(0.29) ^A	51.62(1.95) ^A

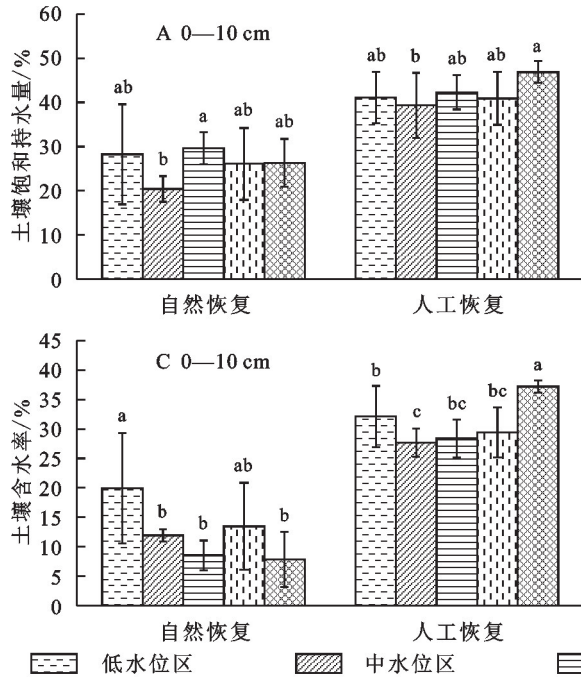
注:括弧中数据为标准差(SD);不同小写字母表示植被恢复模式下同土层不同海拔间差异显著,不同大写字母表示植被恢复模式下不同海拔间均值差异显著($p<0.05$)。

2.3 不同植被恢复模式土壤饱和持水量和含水率的变化

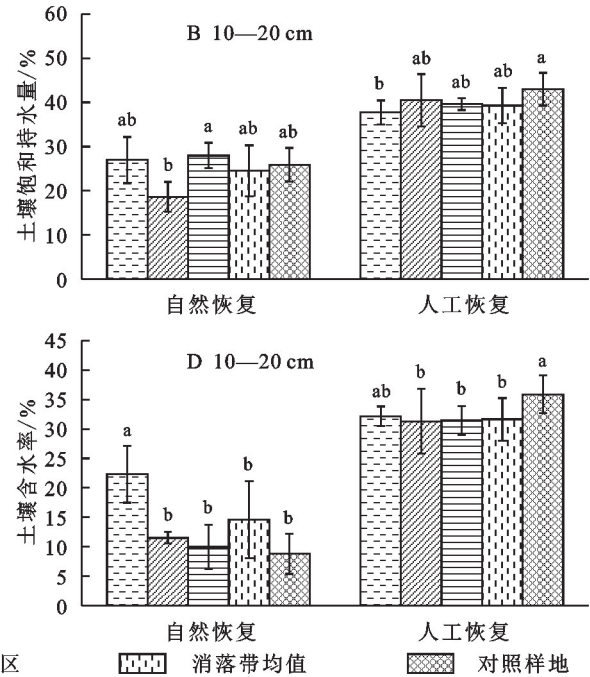
如图 2 所示,与未淹水对照样地相比,消落带内

的土壤饱和持水量和含水率整体减小,从 35.53%,22.44%减小到 32.71%,22.27%;饱和持水量随水位高程升高先减小后增大,而含水率呈减小趋势。

消落带0—20 cm 土层土壤饱和持水量随土层深度的增加而减小,含水率与之相反;但土壤饱和持水量变化在土层间差异不显著($p>0.05$),而含水率变化差异显著($p<0.05$)。



总体来看,消落带人工恢复模式下土壤饱和持水量、含水率与自然恢复模式下的相比差异显著均差异显著($p<0.05$),土壤饱和持水量和含水率分别增大了58.45%,117.63%。



注:不同小写字母表示植被恢复模式下不同水位高程和未淹水对照间差异显著($p<0.05$)。

图2 不同植被恢复模式下土壤饱和持水量和含水率随水位高程的变化

Fig. 2 Soil water retention and soil water content of different vegetation restoration patterns changed with the water level elevations

2.4 不同植被恢复模式土壤机械稳定性团聚体组成的变化

如图3所示,除 <0.25 mm的微团聚体含量外,消落带内 >5 mm的大粒径团聚体、2~5 mm的中粒径团聚体、0.25~2 mm的小粒径团聚体含量与未淹水对照样地相比,均差异显著($p<0.05$),其中大、小粒径团聚体含量分别减少了6.54%,8.15%;而中粒径、微团聚体含量分别增加了30.34%,1.11%。小粒径、微团聚体含量随水位高程升高呈减少趋势,而大、中粒径团聚体呈增加趋势。

消落带各粒径的机械稳定性团聚体组成变化在土层间差异显著($p<0.05$),其中,与0—10 cm土层相比,消落带内10—20 cm土层的大、中粒径团聚体含量分别增加了40.49%,10.09%,而小粒径、微团聚体含量分别减小了24.80%,30.31%。

总体来看,消落带人工恢复模式下土壤机械稳定性团聚体组成与自然恢复模式下的相比差异显著($p<0.05$),其中,大粒径、微团聚体含量在0—10 cm,10—20 cm土层分别增大了121.77%,7.50%和2.43%,86.14%,而中、小粒径团聚体含量0—10 cm,10—20 cm土层分别减小了3.50%,22.29%与48.53%,17.44%。

2.5 环境因子对土壤物理性质影响的多因素方差分析

由表3可知,恢复模式($F=362.58$)和水位高程($F=25.75$)对含水率的变化影响最为明显,而土层深度对 >5 mm的大粒径团聚体含量变化影响最为明显($F=6.85$);恢复模式的F值均大于水位高程和土层深度,因此,恢复模式对土壤物理性质的影响最为明显。

除非毛管孔隙度和大粒径、小粒径、微团聚体含量外,恢复模式与水位高程的交互作用对其他土壤物理性质的变化均影响显著($p<0.05$);而恢复模式与土层深度的交互作用只对0.25~2 mm的小粒径团聚体含量的变化影响显著($p<0.05$)。

2.6 影响土壤物理性质的主控因子

恢复模式、土层深度和水位高程的总解释率为46.3%。其中,恢复模式的解释率达38.6%,即恢复模式是黑龙滩水库消落带土壤物理性质空间变化的主控因素(图4),贡献了土壤物理性质83.3%的变异($p<0.01$),而土层深度和水位高程贡献度分别为9.7%和7.0%。具体来说,恢复模式与总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、含水率呈极显著正相关关系,与容重、非毛管孔隙度、0.5~2 mm粒径团聚体含量呈极显著负相关关系($p<0.01$);恢复模式与 >5 mm的大粒径

团聚体含量显著正相关,与 2~5 mm,0.25~0.5 mm 的粒径团聚体现著负相关($p<0.05$)(图 5)。水位高程升高导致 2~5 mm 的中粒径团聚体含量极显著增加($p<0.01$);土层深度增加导致>5 mm 的大粒径团聚体含量显著增加($p<0.05$)。此外,土壤物理性质之间相互影响。其中,总孔隙度、毛管孔隙度、饱和

持水量、含水率和大粒径团聚体含量的降低均导致 0.25~2 mm 小粒径团聚体含量极显著增加($p<0.01$),而容重减小会使其极显著减少($p<0.01$);除中粒径、微团聚体外,土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度和饱和持水量与其他物理性质均相关性显著($p<0.05$),而含水率只与微团聚体含量相关性不显著。

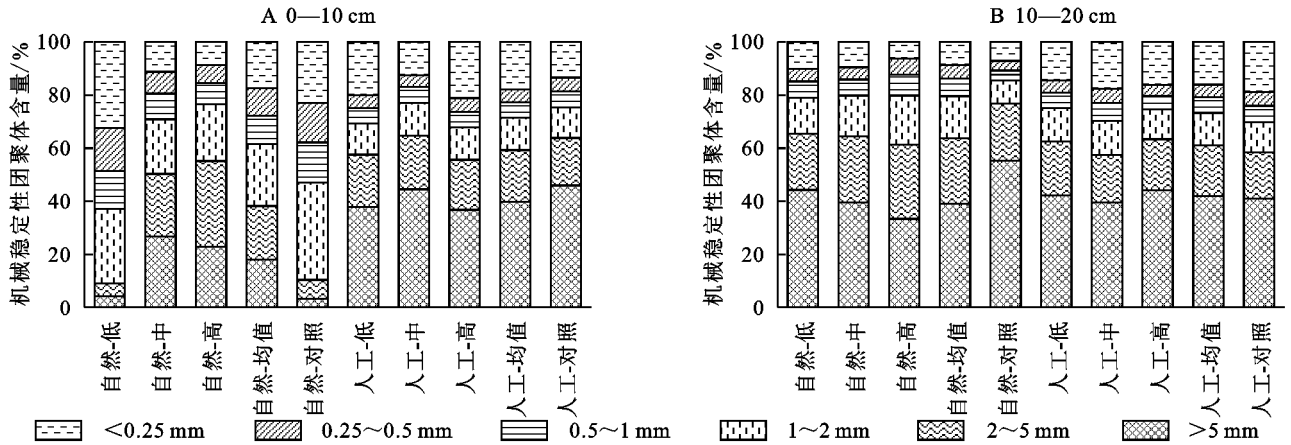


图 3 不同植被恢复模式下土壤机械稳定性团聚体组成随水位高程的变化

Fig. 3 Composition of soil mechanical stable aggregates of different vegetation restoration patterns changed with the water level elevations

表 3 环境因子对土壤物理性质影响的多因素方差分析

Table 3 Multivariate ANOVA on the influence of environmental factors on soil physical properties

土壤物理 性质	恢复模式		水位高程		土层深度		恢复模式× 水位高程		恢复模式× 土层深度		水位高程× 土层深度		恢复模式×水位 高程×土层深度	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
容重	110.87	0.00 *	18.29	0.00 *	2.39	0.13	12.90	0.00 *	0.00	0.97	0.13	0.88	0.21	0.81
总孔隙度	287.56	0.00 *	7.90	0.00 *	0.24	0.62	8.39	0.00 *	0.12	0.73	0.09	0.91	1.91	0.15
非毛管孔隙度	10.75	0.00 *	0.91	0.41	1.52	0.22	1.67	0.19	0.12	0.74	0.19	0.83	0.94	0.40
毛管孔隙度	312.92	0.00 *	9.16	0.00 *	0.03	0.85	9.26	0.00 *	0.07	0.80	0.05	0.96	1.38	0.26
饱和持水量	183.16	0.00 *	8.03	0.00 *	2.13	0.15	6.62	0.00 *	0.00	0.98	0.35	0.71	0.49	0.61
含水率	362.58	0.00 *	25.75	0.00 *	3.79	0.06	10.88	0.00 *	0.41	0.52	0.12	0.89	1.14	0.32
团聚体含量	>5 mm	7.70	0.01 *	0.28	0.76	6.85	0.02 *	0.14	0.87	3.84	0.06	0.76	0.48	0.54
	2~5 mm	9.03	0.01 *	8.18	0.00 *	0.45	0.51	10.54	0.00 *	0.84	0.37	2.92	0.07	2.43
	1~2 mm	30.38	0.00 *	0.16	0.85	5.40	0.03 *	0.48	0.63	5.83	0.02 *	0.24	0.79	1.09
	0.5~1 mm	10.07	0.00 *	0.23	0.79	4.37	0.05 *	0.29	0.75	4.37	0.05 *	0.77	0.47	1.96
	0.25~0.5 mm	7.57	0.01 *	0.74	0.49	5.56	0.03 *	0.67	0.52	4.40	0.05 *	1.44	0.26	1.87
	<0.25 mm	4.06	0.06	1.18	0.33	2.18	0.15	1.47	0.25	0.59	0.45	1.37	0.27	0.41

注: * 表示 $p<0.05$ 。

3 讨论

整体来看,随水位高程降低,土壤容重增大、总孔隙度呈减小趋势,非毛管孔隙度多变为毛管孔隙度。消落带淹水时间随水位高程增加而减少,研究表明淹水会导致消落带土壤变得紧实少孔,持水能力和排水能力下降^[17]。消落带整体土壤非毛管孔隙度占总孔隙度的比例均低于 10%,说明土壤通气度较差^[18];而长期淹水会使多数植被无法生存^[7],因此高水位区的毛管孔隙度相对较高,持水能力较强,团聚体结构较好。

土壤性质对恢复方式变化的响应随恢复模式和土

层深度的不同而变化^[19]。本研究结果表明消落带土壤容重随土层深度增加而增加,但差异不显著,黄河流域也有相似的研究结果^[20];各海拔土壤孔隙度、饱和持水量主要随土层增加而减小,而含水率主要随土层深度增加而增加,这可能是由于消落带植被以浅根性的一年生草本植物为主^[21],植被利用的水分主要来自浅层土壤,导致浅层土壤的含水率较低;而浅层根系较发达,故土壤持水性较好,饱和持水量较高^[22]。土壤表层会有更多枯枝落叶等凋落物分解以及腐殖质积累,使得土壤疏松多孔,土壤容重相对较低,而孔隙度相对较高^[23]。恢复模式变化对机械稳定性团聚体

的改善也主要体现在 0—10 cm 土层,10—20 cm 土层的变化并不显著($p<0.05$)。植被对土壤特性的改善作用随着土层的加深而逐渐减弱^[24]。

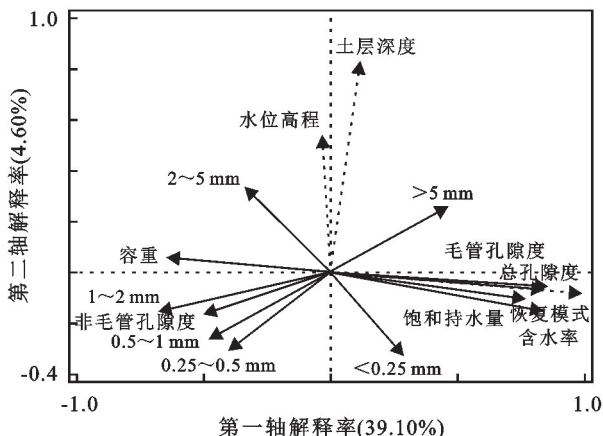
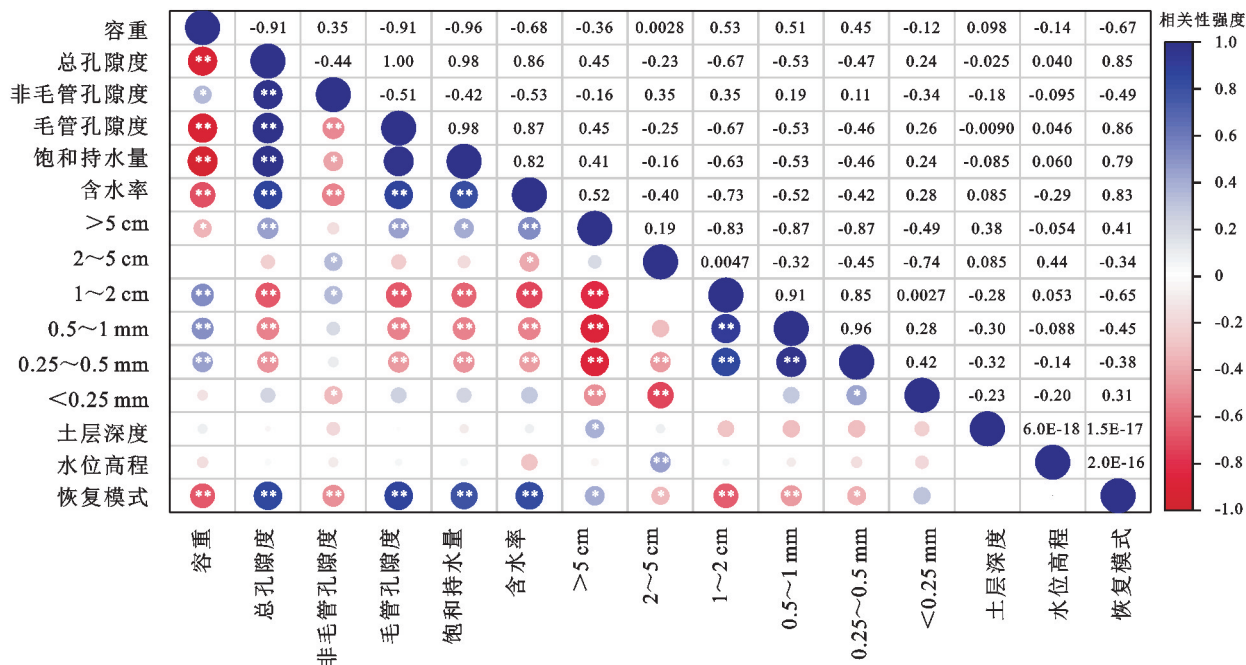


图 4 通过 RDA 分析的黑龙江水库消落带土壤物理性质受环境影响因子排序

Fig. 4 Ordination diagrams generated by RDA analysis of the effect of environmental factors under the riparian zone of the Heilongtan Reservoir

本研究表明,植被恢复模式对土壤物理性质有重要影响。人工恢复植被的土壤较自然恢复植被具有较好的物理性质,主要体现在土壤容重低,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量及含水率较高,且机械稳定性团

聚体结构组成较好。这是由于人工恢复植被均为消落带优势种,植被覆盖度较高,且根系相对较发达。植物根系有助于形成团聚体,增加土壤毛管孔隙度,而土壤容重随之逐渐减小^[25]。毛管孔隙度的大小决定了土壤持水能力的大小^[26],饱和持水量是土壤持水能力的决定性因素^[27],说明人工恢复模式有效提高了土壤的持水能力。机械稳定性团聚体的数量分布受到地域差异的影响不显著^[28],即受到气候、坡度等外界因素影响较小,可以更加突出植被恢复模式变化对土壤结构的影响。人工恢复模式下土壤大粒径团聚体含量较自然恢复模式显著增加,而 >5 mm 的大粒径团聚体对各团聚体粒级之间的力学稳定性贡献较大^[29],即大粒径团聚体含量越多,机械性团聚体越稳定。人工恢复后的团聚体含量分布情况随团聚体粒级减小而含量呈先减小后增加的趋势,即“V”型趋势,且 >5 mm 的大粒径团聚体最高而 $0.25\sim0.5$ mm 粒径团聚体最低,与 Oades^[30] 研究结果一致。但人工恢复植被的土壤非毛管孔隙度相较于自然恢复植被减小,可能是由于人工恢复模式时间较短,土壤会由于自然重力作用而下沉,更多细小土壤颗粒通过多种途径增加毛管孔隙,但还未形成由于土壤腐殖质增多、植物根系腐烂等增加非毛管孔隙度的现象。



注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

图 5 黑龙江水库消落带土壤物理性质及环境影响因子相关性

Fig. 5 Correlation between soil physical indicators and environmental factors

以上说明有效合理的植被恢复可以降低土壤容重、增加孔隙度、改善土壤结构,因此土壤质量得以提高。有研究表明,在植被恢复初期,人工恢复对土壤物理性质的改善优于自然恢复,这与本研究结果一致;然而,从

长远来看,自然恢复优于人工恢复^[1]。然而自然恢复模式的消落带因受水力侵蚀,人为践踏、扰动等的影响,使得其恢复弹性受到破坏,导致土壤性状不稳定,且自然植被恢复时间较短,不足以恢复到原有的土壤状态^[27];

因此,前期需要通过人工选取消落带优势种进行植被恢复,从而有效改善土壤特性、提高土壤质量。

4 结论

(1) 土壤物理性质受植被恢复模式的影响显著($p>0.05$),主要表现为人工恢复植被较自然恢复植被土壤容重较低,土壤孔隙度、饱和持水量及含水率较高,且机械稳定性团聚体结构组成较好。

(2) 植被恢复模式对土壤物理性质的影响主要体现在土壤表层(0—10 cm),影响效果会随土层深度增加而减弱;土壤物理性质随消落带水位高程升高表现更为良好。

(3) 多因素方差分析表明,恢复模式和水位高程对含水率变化的影响最为明显,而两者相较于其他交互作用对土壤物理性质的影响最为明显;RDA 分析和相关性分析表明,恢复模式是黑龙滩水库消落带土壤物理性质变化的主控因素。

综上所述,从土壤性状恢复的角度出发,人工植被恢复是黑龙滩水库消落带较为适宜的植被恢复模式,植被恢复能够消减研究区消落带干湿交替环境对土壤物理性质的恶劣影响。可见植被恢复对消落带的生态修复具有重要影响,且合理开展人工植被恢复能够进一步促进消落带土壤结构的改善,对水土保持工作做出实质性建设。目前,黑龙滩水库消落带植被恢复对土壤化学性质、结构稳定性等的研究较为缺乏,以及对植被与土壤的耦合机制研究还较少涉及,未来应进一步对该区域地上地下植被和土壤进行深入研究,为消落带植被恢复与重建提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Li J, Li Z B, Guo M J, et al. Effects of vegetation restoration on soil physical properties of abandoned farmland on the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018,77(5):205.
- [2] Molefe R R, Amoo A E, Babalola O O. Communication between plant roots and the soil microbiome; involvement in plant growth and development[J]. *Symbiosis*, 2023,90(3):231-239.
- [3] Gutiérrez-Jurado H A, Vivoni E R, Harrison J B J, et al. Ecohydrology of root zone water fluxes and soil development in complex semiarid rangelands[J]. *Hydrological Processes*, 2006,20(15):3289-3316.
- [4] 张光辉.植被恢复背景下土壤侵蚀研究需要加强的内容[J].*中国水土保持*,2020(9):76-79.
Zhang G H. Research contents of soil erosion under the background of vegetation restoration[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2020(9):76-79.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 李娜泽,邓玥,施凤宁,等.水库消落带研究进展[J].*湿地科学*,2019,17(6):689-696.
Li S Z, Deng Y, Shi F N, et al. Research progress on water-level-fluctuation zones of reservoirs: A review[J]. *Wetland Science*, 2019,17(6):689-696.
- [9] 李丽娟,李昌晓,陈春桦,等.三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征[J].*环境科学*,2020,41(6):2898-2907.
Li L J, Li C X, Chen C H, et al. Root activities of re-vegetated plant species regulate soil nutrients and bacterial diversity in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2020,41(6):2898-2907.
- [10] 孙龙,卢涛,孙涛,等.金沙江下游典型库区消落带植被恢复模式[J].*生态学报*,2023,43(2):826-837.
Sun L, Lu T, Sun T, et al. Vegetation restoration pattern of water-level-fluctuation zone in two cascaded reservoirs in the lower Jinsha River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(2):826-837.
- [11] 刘瑞雪,陈龙清,史志华.丹江口水库水滨带植物群落空间分布及环境解释[J].*生态学报*,2015,35(4):1208-1216.
Liu R X, Chen L Q, Shi Z H. Spatial distribution of plant communities and environmental interpretation in the riparian zone of Danjiangkou Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(4):1208-1216.
- [12] 任彬斌.黑龙滩水库泄放生态流量的困难与思考[J].*四川水利*,2023,44(1):112-114.
Ren B B. Difficulties and considerations of releasing ecological flow in Heilongtan Reservoir[J]. *Sichuan Water Resources*, 2023,44(1):112-114.
- [13] 王美琴,郝晓丹,冷雪.黑龙滩水库水质状况及富营养状态评价[J].*节能*,2020,39(4):132-134.
Wang M Q, Xi X D, Leng X. Evaluation of water quality and eutrophication status of Heilongtan Reservoir[J]. *Energy Conservation*, 2020,39(4):132-134.
- [13] 王美琴,郝晓丹,冷雪.黑龙滩水库水质状况及富营养状态评价[J].*节能*,2020,39(4):132-134.

- Wang M Q, Xi X D, Leng X. Evaluation of water quality and eutrophication status of Heilongtan Reservoir[J]. *Energy Conservation*, 2020,39(4):132-134.
- [14] Gu C J, Mu X M, Gao P, et al. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019,19(2):716-728.
- [15] 卫茂荣.一次取样连续测定土壤物理性质的方法[J].*辽宁林业科技*,1990(1):56-57,49.
- Wei M R. A method for continuously measuring the physical properties of soil in a single sampling[J]. *Liaoning Forestry Science and Technology*, 1990(1):56-57,49.
- [16] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- Shao M A, Wang Q J, Huang M B. *Soil Physics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [17] 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.
- [18] 宫渊波,麻泽龙,陈林武,等.嘉陵江上游低山暴雨区不同水土保持林结构模式水源涵养效益研究[J].*水土保持学报*,2004(3):28-32,36.
- Gong Y B, Ma Z L, Chen L W, et al. Research on effects of water conservation in different types of water and soil conservation forest in low hill heavy rain area of upper reach of Jialing River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004(3):28-32,36.
- [19] Jiang X J, Chen C F, Zhu X A, et al. Use of dye infiltration experiments and HYDRUS-3D to interpret preferential flow in soil in a rubber-based agroforestry systems in Xishuangbanna, China[J]. *Catena*, 2019,178:120-131.
- [20] 王永杰.山西沿黄河流域植被恢复模式对土壤物理性质的影响[J].*温带林业研究*,2020,3(4):47-51.
- Wang Y J. Effects of vegetation restoration patterns on soil physical properties along the Yellow River in Shanxi Province[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2020,3(4):47-51.
- [21] 窦文清,贾伟涛,张久红,等.三峡水库消落带植被现状、适生策略及生态修复研究进展[J].*生态学杂志*, 2023,42(1):208-218.
- Dou W Q, Jia W T, Zhang J H, et al. Research progress of vegetation status, adaptive strategies and ecological restoration in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023,42(1):208-218.
- [22] Oba G, Vetaas O R, Stenseth N C. Relationships between biomass and plant species richness in arid-zone grazing lands[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2001,38(4):836-845.
- [23] 陈闻.毛乌素沙地不同人工植被措施对土壤性质的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- Chen W. Effects of Different Artificial Vegetation Measures on Soil Properties in Mu Us Sand Land[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [24] Li J J, Zhang Y, Han L W, et al. Tenacissoside H exerts an anti-inflammatory effect by regulating the nf-kb and p38 pathways in zebrafish[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018,83:205-212.
- [25] 沈晶玉,周心澄,张伟华,等.祁连山南麓植物根系改善土壤抗冲性研究[J].*中国水土保持科学*,2004(4):87-91.
- Shen J Y, Zhou X C, Zhang W H, et al. Effects of plant root system on the anti-scourability of soil in the south of Qilian Mountain[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004(4):87-91.
- [26] 李红,范素芳,张光灿,等.黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性[J].*水土保持通报*,2010,30(1):27-30.
- Li H, Fan S F, Zhang G C, et al. Characteristics of soil water-holding and soil porosity under different tree species after conversion of cropland to forest in the loss hilly region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010,30(1):27-30.
- [27] 郭静淳.三峡库区消落带植被恢复期土壤理化性质特征研究[D].重庆:西南大学,2017.
- Wu J C. Study on Soil Physical and Chemical Properties During Vegetation Restoration Period in the Hydro-Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [28] 张保华.长江上游典型区域森林土壤结构体形成和稳定性机制分析[J].*聊城大学学报:自然科学版*,2007(1):12-17.
- Zhang B H. Study on aggregate formation and stability mechanism of forests soil in typical region of upper reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Liaocheng University: Natural Science Edition*, 2007(1):12-17.
- [29] Sheng M H, Ai X Y, Huang B C, et al. Effects of bio-char additions on the mechanical stability of soil aggregates and their role in the dynamic renewal of aggregates in slope ecological restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2023,898:165478.
- [30] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management [J]. *Plant and Soil*, 1984,76(1):319-337.