

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.039

白芹菲, 王艳琪, 鲍玉海, 等. 黑龙滩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 Qinfei, WANG Yanqi, BAO Yuhai, 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.

## 黑龙滩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

白芹菲<sup>1,2</sup>, 王艳琪<sup>1,3</sup>, 鲍玉海<sup>1</sup>, 贺秀斌<sup>1</sup>, 罗鹏<sup>4</sup>, 韦杰<sup>2,5</sup>

(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. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中铁四川生态城投资有限公司, 四川 眉山 620500;

5. 重庆市三峡库区地表生态过程野外科学观测研究站, 重庆 401331)

**摘要:** [目的] 为阐明水库消落带不同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。[方法] 以川中丘陵区黑龙滩水库消落带人工恢复与自然恢复植被下的土壤为研究对象, 利用湿筛法测定分析土壤水稳性团聚体组成特征及其稳定性指标。[结果] 消落带土壤  $>0.25$  mm 水稳性大团聚体含量与未淹水对照相比降低 4.21%, 其中, 自然恢复植被下土壤水稳性大团聚体含量较对照下降 12.27%, 人工恢复植被下大团聚体含量较对照增加 3.84%; 不同植被恢复模式下土壤水稳性团聚体组成差异显著 ( $p < 0.05$ ), 人工恢复植被下土壤大团聚体含量 (69.48%) 显著高于自然恢复模式 (43.20%); 消落带土壤水稳性团聚体稳定性随水位高程增加而升高, 团聚体稳定性指标  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量 ( $R_{0.25}$ )、平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 人工恢复模式下均大于自然恢复模式, 团聚体分形维数 ( $D$ )、土壤可蚀性因子 ( $K$ ) 与团聚体破坏率 (PAD) 人工恢复模式小于自然恢复模式, 表明人工恢复模式下土壤水稳性团聚体稳定性、土壤抗蚀性高于自然恢复模式。[结论] 黑龙滩水库消落带在淹水后土壤团聚体稳定性下降, 但人工恢复模式能有效改善土壤团粒结构, 研究结果可为黑龙滩水库消落带土壤结构稳定性评价及植被恢复提供科学依据。

**关键词:** 川中丘陵区; 水库消落带; 植被恢复; 土壤水稳性团聚体; 团聚体稳定性

中图分类号: S152.4; S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)03-0168-09

## Effects of Vegetation Restoration Patterns on Soil Water-stable Aggregates Composition and Their Stability in the Water Level Fluctuation Zone of the Heilongtan Reservoir

BAI Qinfei<sup>1,2</sup>, WANG Yanqi<sup>1,3</sup>, BAO Yuhai<sup>1</sup>, HE Xiubin<sup>1</sup>, LUO Peng<sup>4</sup>, WEI Jie<sup>2,5</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China;

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

3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 4. Sichuan Ecological City

Investment Co. Ltd. of China Railway, Meishan, Sichuan 620500, China; 5. Chongqing Observation and Research Station of Earth Surface Ecological Processes in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** [Objective] This study aimed at elucidating the effects of different vegetation restoration modes on soil water-stable aggregates and stability in the water level fluctuation zone (WLFZ). [Methods] The characteristics of soil water-stable aggregates and their stability indexes were determined and analyzed by the wet sieve method on the soil under artificially and naturally restored vegetation in the WLFZ in the hilly region of central Sichuan Basin. [Results] The content of  $>0.25$  mm water-stable macroaggregates in WLFZ

收稿日期: 2023-12-28

修回日期: 2024-01-26

录用日期: 2024-02-22

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-28

资助项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目 (U2040207); 四川省中央引导地方科技发展专项 (2023ZYD0150); 四川省科技计划重点研发项目 (2022YFS0471)

第一作者: 白芹菲 (1998—), 女, 云南石屏人, 硕士研究生, 主要从事水库消落带生态修复研究。E-mail: bqinfei@163.com

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

http://stbxb.alljournal.com.cn

soils was 4.21% lower compared to unflooded area. The soil water stability macroaggregates content decreased by 12.27% under naturally restored vegetation and increased by 3.84% under artificially restored vegetation compared to unflooded area; With the rise of water elevations, the soil water stability macroaggregates content showed an increasing trend, the microaggregates content showed an overall decreasing trend, and the soil aggregate stability gradually increased with the rise of water elevations; The soil water-stable aggregates composition differed significantly ( $p < 0.05$ ) among the different restoration modes, and the soil water-stable aggregates particle size increased overall under the artificially restored vegetation, in which the content of soil water-stable macroaggregates under the artificially restored vegetation (69.48%) was significantly higher than that of the natural restoration mode (43.20%); With increasing flooding time, there was a decrease in soil in soil water-stable aggregates stability in the WLFZ, the values of  $R_{0.25}$ , MWD, and GMD in the artificial recovery mode were greater than those in the natural recovery mode, and the values of  $D$ ,  $K$ , and PAD were smaller than those in the natural recovery mode. Soil water-stable aggregates stability and soil erosion resistance were higher in the artificial restoration model than in the natural restoration model. [Conclusion] The soil aggregate stability of WLFZ decreased after inundation, but the artificial restoration mode could effectively improve the soil aggregate structure, and the results of the study can provide a scientific basis for the evaluation of soil structure stability and vegetation restoration of the WLFZ.

**Keywords:** hilly region of central Sichuan Basin; water level fluctuation zone; vegetation restoration; soil water-stable aggregates; aggregate stability

Received: 2023-12-28

Revised: 2024-01-26

Accepted: 2024-02-22

Online(www.cnki.net): 2024-04-28

土壤团聚体是土壤结构的基本单元<sup>[1]</sup>,是土壤生态系统的重要组成部分<sup>[2]</sup>,土壤水稳性团聚体作为反映土壤抗水蚀能力的关键指标之一,水稳性团聚体组成及其稳定性是评价土壤结构、土壤质量的重要参数,也是评价土壤可蚀性及植被恢复下土壤生态效益的重要参照<sup>[3]</sup>。目前,针对陆地生态系统土壤团聚体已有较为系统的研究<sup>[4]</sup>,在团聚体形成机制、团聚体测定方法、团聚体稳定性评价指标、团聚体与有机碳的关系、耕作方式对土壤团聚体的影响等方面成果颇丰,其中,植被恢复对土壤团聚体影响的研究热度不减、表现活跃,但对遭受周期性淹水一出露过程胁迫下的水库消落带土壤团聚体的相关研究正处于起步阶段<sup>[5]</sup>,初步探索性研究主要集中在消落带土壤团聚体组成变化、团聚体破碎机制、团聚体稳定性空间分异规律与关键驱动机制等方面<sup>[1-2,6]</sup>,而有关不同植被恢复后土壤水稳性团聚体响应的研究较为匮乏。水库消落带作为水陆交错区,是库岸缓冲带和库周生态廊道建设的重要场所<sup>[7]</sup>,水库蓄水运行后水位周期性大幅涨落,消落带土壤长期处于干湿交替、淹水浸泡等环境下,土壤团聚体结构和稳定性产生剧烈变化,引起土壤侵蚀等一系列地质生态环境问题<sup>[8]</sup>,影响消落带植被生长生存<sup>[9]</sup>,导致消落带植被物种组成和结

构极不稳定<sup>[10]</sup>,增加消落带生态功能退化的风险<sup>[11]</sup>。而植被恢复是控制消落带土壤侵蚀的一个重要途径,可通过增加地表覆被、改善土壤团粒结构等发挥固土护岸作用<sup>[12]</sup>。针对水库消落带严重的生态退化和土壤侵蚀,科学评价不同植被恢复模式对土壤团聚体稳定性的影响有助于消落带生态管理和治理策略的制定,是开展消落带土壤侵蚀控制、提升土壤生态系统综合服务功能的重要内容。

黑龙滩水库是川中丘陵区重要的水源型水库,具有灌溉、城镇生活及工业供水、防洪等功能。50余年的水库蓄水运行,导致水库消落带原生植被消亡演替、群落多样性降低,亟需科学开展植被重建,控制土壤侵蚀、提升消落带生态服务功能<sup>[8-13]</sup>。当前,针对黑龙滩水库等水源型水库的研究主要以水源地污染控制<sup>[14]</sup>、水质保护研究<sup>[15]</sup>为主,而对消落带植被恢复途径、土壤团聚体稳定性及植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响尚不多见,制约当前美丽河湖建设、水生态修复等工作的开展。本研究以黑龙滩水库自然植被恢复与人工植被恢复消落带为研究对象,对比分析消落带土壤水稳性团聚体组成及分形特征,剖析不同植被恢复模式对消落带土壤水稳性团聚体稳定性的影响,为水库消落带植被恢复重建工作提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黑龙滩水库位于四川省眉山市仁寿县境内的岷江支流岷江河上游,地处成都平原东南边缘(103°59′07″—104°06′35″ E, 30°00′10″—30°08′38″ N, 图 1),以灌溉、城镇生活及工业供水、防洪等功能为主,是川中丘陵区重要的水源型水库,水域面积 23.6 km<sup>2</sup>,最大蓄水 3.6 亿 m<sup>3</sup>,年水位最大变幅为 468~484 m,低水位出现在每年 6—7 月,随后开始蓄水至 10 月达到正常蓄水位,形成落差 16 m 的消落带<sup>[16]</sup>。研究区属中亚热带湿润季风气候区,年平均气温 17.2 °C,7 月平均气温 26.3 °C,1 月平均气温 7 °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。

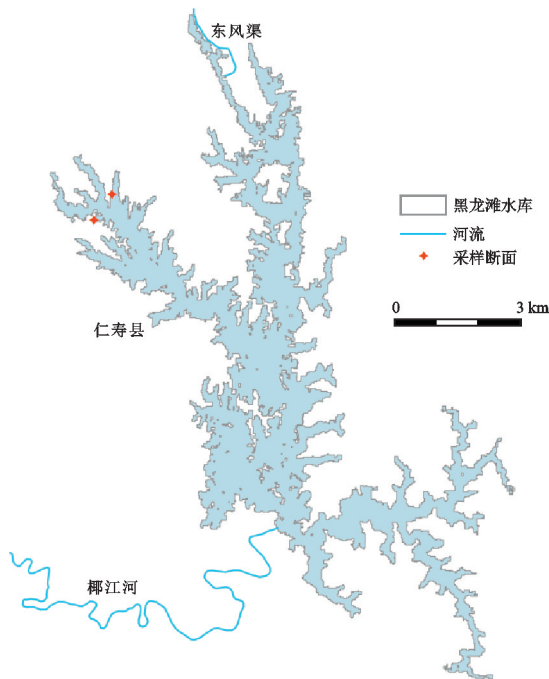


图 1 研究区域及采样位置

Fig. 1 Sketch map of study area and sampling sections

2023 年 6 月,对黑龙滩水库消落带植物群落进行调查发现,受淹水前人为清库和初期淹水影响,自然恢复消落带多以 1 年生草本植物为主,水位高程 475~478 m 优势植物群落为苘麻(*Abutilon theophrasti*) + 翅茎灯芯草(*Juncus alatus*) + 狗牙根(*Cynodon dactylon*); 478~481 m 为翅茎灯芯草 + 长芒稗(*Echinochloa caudata*); 481~484 m 为牛筋草(*Eleusine indica*) + 翅茎灯芯草,群落盖度 82%~100%。2019 年在黑龙滩水库库尾处选取部分自然恢复消落带采取种植“草本 + 木本”植物恢复模式进行人工恢复试点,人工恢复消落带以自然恢复消落带为基础,在人工干预前植物群落与自然恢复消落带一致,人工恢复模式下消落带 475~481 m 水位高程植

物群落以翅茎灯芯草为主要优势种,481~484 m 以翅茎灯芯草 + 狗牙根 + 木麻黄(*Casuarina equisetifolia*) + 中山杉(*Taxodium “Zhongshanshan”*)为主要优势植物群落,群落盖度 100%。

### 1.2 样地选取与样品采集

2023 年 6 月,在黑龙滩水库库尾选取自然恢复与人工恢复模式下土质消落带各 1 个,在水库水位高程 475~478, 478~481, 481~484 m 各布设 1 个 50 m 长的样带,消落带样地概况见表 1。在 484~487 m 设置 1 个未淹水对照样带,因样带内植物主要以草本植物为主,有少数乔木灌木出现在对照样地内,故样方设置主要以草本植物样方为主,在样带内每隔 20 m 设置 1 个样方(1 m × 1 m),在每个样方用五点采样法采集 0—10, 10—20 cm 土层散土样品 1 kg<sup>[17]</sup>,24 个样点共 48 个样品,装袋带回实验室研磨过筛后测定土壤理化性质。

表 1 不同水位高程样地概况

Table 1 Overview of sample plots with different elevations

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

### 1.3 土壤水稳性团聚体组成测定

水稳性团聚体粒径含量测定采用湿筛法<sup>[2]</sup>,将土壤样品带回实验室进行干筛后,对每个粒级含量进行称重,根据机械团聚体每个粒级所占的比重,将其按比例配制 50 g/份的湿筛土样 3 份,配置好的土样放于带有套筛的湿筛仪套筒中,套筛按孔径大小顺序放置,由上至下孔径依次为 5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm,沿筒壁加水没过套筛,样品浸润 5 min 后,设定振动频率为 30 r/min,振幅为 4 cm,振荡时间为 5 min,取出各套筛中剩余土样,烘干至恒重后进行称量,计算各级粒径比例并取均值,得到水稳性团聚体在土壤中的分布特征,即大团聚体(> 0.25 mm)与微团聚体(< 0.25 mm)含量及分布特征。

### 1.4 土壤水稳性团聚体稳定性指标计算

采用 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量( $R_{0.25}$ )、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体分形维数( $D$ )、土壤可蚀性因子( $K$ )和团聚体破坏率(PAD)来表征水稳性团聚体稳定性,其中  $R_{0.25}$ , MWD 和 GMD 值越大,  $D$ ,  $K$  与 PAD 越小,土壤团



聚体稳定性越好<sup>[2,18]</sup>。各指标计算公式为:

$$R_{0.25} = m_j / m \times 100\% \quad (1)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \times m_i}{m} \quad (2)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times \ln X_i}{m} \right] \quad (3)$$

$$D = 3 - \frac{\lg(w_i / m)}{\lg(X_i / X_{\max})} \quad (4)$$

$$K = 7.954 \times \left\{ 0.0017 + 0.0494 \exp \left[ (-0.5) \times \left( \frac{\lg GMD + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

$$PAD = \frac{W_d - W_w}{W_d} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $m_j$ 为 $>0.25$  mm 土壤水稳性大团聚体质量(g); $m$ 为各个土样总质量(g);第*i*级粒径大小的团聚体平均粒径为 $X_i$ (mm); $X_{\max}$ 为最大粒级土粒平均直径(mm); $n$ 指筛子数量;团聚体第*i*级的重量为 $m_i$ (g); $w_i$ 为粒径小于 $X_i$ 的土壤团聚体累计重量(g); $W_d$ 为 $>0.25$  mm 机械团聚体百分比含量(%); $W_w$ 为 $>0.25$  mm 水稳性团聚体百分比含量(%)。

### 1.5 数据分析

消落带不同水位高程水稳性团聚体组成及其差异采用单因素方差分析(ANOVA),土壤团聚体组成与稳定性指标间的 Pearson 相关分析,二者均在 SPSS 27 软件中进行;数据统计整理采用 Excel 2019 软件,相关图形采用 Origin 2021 软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同恢复模式下消落带水稳性团聚体组成

黑龙滩消落带土壤水稳性团聚体的分布见图 2。与未淹水对照组相比,消落带内 $>0.25$  mm 的大团聚体含量整体下降,从 60.55%下降至 56.34%, $<0.25$  mm 的微团聚体含量增加。自然恢复模式下,未淹水对照大团聚体含量为 55.47%,微团聚体含量 44.53%,消落带内大团聚体占比为 43.20%,微团聚体所占比例最高,为 56.80%,自然恢复模式下消落带内的大团聚体含量下降,微团聚体含量增加;人工恢复模式下,大团聚体含量未淹水对照为 65.64%,消落带为 69.48%,微团聚体在未淹水对照占比为 34.36%,高于消落带的 30.52%,人工恢复模式消落带大团聚体含量高于未淹水对照,微团聚体含量低于对照组,人工恢复模式下消落带团聚体稳定性增加。

从土层深度看,不同恢复模式 $>0.25$  mm 大团聚体含量总体表现为 0—10 cm 土层含量(58.31%)高于 10—20 cm 土层(54.37%)。其中,自然恢复模式

下,0—10 cm 土层大团聚体含量为 47.71%,高于 10—20 cm 土层的 38.69%,人工恢复模式大团聚体含量则为 10—20 cm 土层(70.05%)高于 0—10 cm 土层含量(68.92%),人工恢复模式不同土层大团聚体含量均高于自然恢复模式,2 个土层分别高 21.21%,31.36%。

总体来看,黑龙滩水库自然恢复植被下消落带土壤水稳性大团聚体含量较未淹水对照下降,人工恢复植被下水稳性大团聚体含量较未淹水对照增加,消落带各粒径的水稳性团聚体组成变化在土层间差异性不显著( $p>0.05$ ),在不同恢复模式间差异显著( $p<0.05$ )。人工恢复模式下土壤大团聚体含量较自然恢复模式增加,微团聚体含量较自然恢复模式减少,人工恢复促进水稳性大团聚体的形成,增加消落带土壤稳定性。

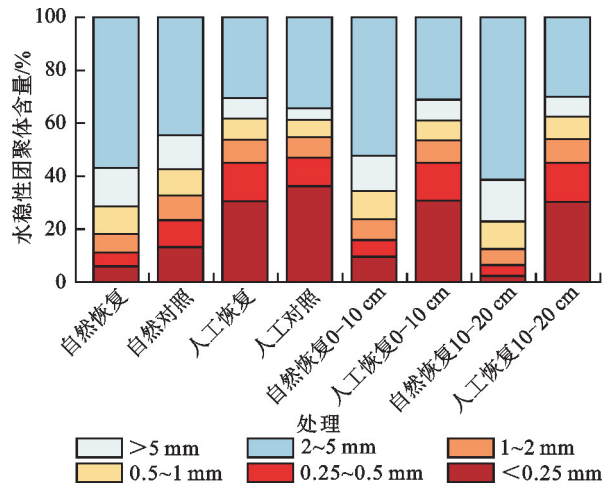


图 2 黑龙滩消落带不同恢复模式土壤水稳性团聚体组成  
Fig. 2 Water-stable aggregates composition of soils with different restoration modes in the WLFZ of Heilongtan

### 2.2 消落带水稳性团聚体分布特征

不同水位高程下,土壤水稳性团聚体含量差异显著( $p<0.05$ ,图 3)。消落带土壤中, $<0.25$  mm 的微团聚体含量随水位高程升高逐渐降低,由 44.95%降低至 40.42%,整体在 478~481 m 占比最大(45.6%), $>0.25$  mm 大团聚体在 481~484 m 处最多(59.58%)。与未淹水对照相比,消落带内高中低水位高程大团聚体平均降低 4.21%,消落带内 $>0.25$  mm 大团聚体含量随水位高程升高呈增加趋势,由 475~478 m 的 55.05%逐渐增加到 481~484 m 的 59.58%;微团聚体含量随水位高程升高逐渐降低,由 44.95%降低至 40.42%。消落带水位涨落对不同水位高程水稳性团聚体组成影响显著,大团聚体随淹水时长增加崩解为微团聚体的含量显著增加。

不同恢复模式下消落带水稳性团聚体粒径组成

差异显著( $p < 0.05$ ),人工恢复改变土壤水稳性团聚体组成,人工恢复模式下各水位高程的土壤大团聚体含量较自然恢复模式下均增加(表 2)。自然恢复模式下,土壤团聚体均以  $< 0.25$  mm 的微团聚体为主,微团聚体含量在 478~481 m 达到峰值(61.85%),随水位高程变化呈先增后减趋势,不同水位高程下含量差异显著( $p < 0.05$ ),其余粒径团聚体在 478~484 m 水位高程间差异不显著( $p > 0.05$ ),475~478 m 水位高程显著低于未淹水对照( $p < 0.05$ );人工恢复模式下,消落带内大团聚体含量在不同水位高程下较自然恢复均增加,从水位高程低至高分别增加 28.10%,32.49%,18.27%。

综上,黑龙江水库消落带土壤水稳性  $> 0.25$  mm 大团聚体粒径随水位高程上升含量增加, $< 0.25$  mm 的微团聚体含量随水位高程增加整体呈下降趋势,土壤稳定性随水位高程上升逐渐增加。不同恢复模式内,自然恢复模式主要以微团聚体为主,微团聚体含量比人工恢复

高 18.27%~32.49%,微团聚体所占比重高,表明其土壤团聚体较分散,人工恢复模式下土壤水稳性大团聚体含量增加,土壤团聚性较自然恢复模式有所增强。

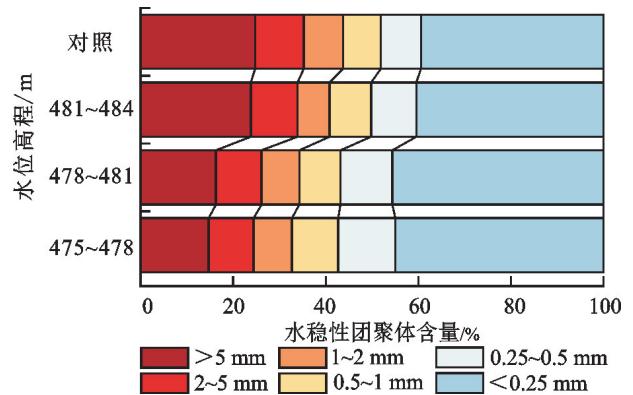


图 3 不同水位高程消落带与未淹水对照土壤水稳性团聚体含量

Fig. 3 Soil water-stable aggregates content at different water elevations in the WLFZ versus unflooded area control

表 2 不同恢复模式土壤水稳性团聚体粒径组成

Table 2 Particle size composition of soil water-stable aggregates in different restoration models

恢复模式	水位高程/m	$> 5$ mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	$< 0.25$ mm
自然恢复	475~478	1.49±1.33a	4.06±1.77a	7.21±2.50ab	11.20±3.61a	17.05±3.19a	59.00±9.77b
	478~481	5.16±7.02ab	4.58±2.57a	5.59±2.00a	8.58±2.36a	14.24±4.31a	61.85±9.04b
	481~484	11.37±9.96ab	6.91±1.26ab	8.04±1.63ab	11.77±1.73a	12.35±3.03a	49.56±12.10b
	对照	13.24±11.33b	10.17±4.82b	9.26±2.82b	9.90±1.57a	12.89±3.87a	44.53±13.23a
人工恢复	475~478	27.91±6.57a	15.37±6.95a	9.32±1.75bc	8.81±2.14b	7.68±1.06b	30.90±6.63a
	478~481	27.39±9.08a	15.11±4.74a	10.79±1.87c	9.16±1.10b	8.20±1.62b	29.36±7.92a
	481~484	36.25±6.63a	13.29±3.90a	5.81±1.31a	6.17±1.36a	7.18±1.23b	31.29±3.06a
	对照	36.24±18.49a	10.85±2.68a	7.68±1.31ab	6.48±0.85a	4.40±1.17a	34.36±20.47a

注:表中数据均为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同水位高程间水稳性团聚体含量差异显著( $p < 0.05$ )。

### 2.3 不同恢复模式下消落带水稳性团聚体稳定性分析

与未淹水对照相比,不同恢复模式下  $R_{0.25}$  变化趋势不同,MWD 与 GMD 变化趋势相似(图 4)。自然恢复模式下,消落带  $R_{0.25}$  为 19.08%~25.22%,整体低于未淹水对照的 27.74%,人工恢复模式下  $R_{0.25}$  为 34.36%~35.32%,变化幅度较小,消落带整体高于未淹水对照的 32.82%;MWD 和 GMD 随水位高程上升逐渐增大,与未淹水对照相比,自然恢复的 MWD、GMD 均较低,分别为 0.58~1.41,0.27~0.48 mm;人工恢复模式下 MWD、GMD 分别为 2.88~3.38,1.08~1.21 mm,均为自然恢复 2 倍,较自然恢复模式显著增加。人工恢复模式  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 整体高于自然恢复模式,土壤团聚体稳定性增加。

消落带 2 种模式的  $D$ 、 $K$ 、PAD 整体随水位高程升高逐渐降低。自然恢复  $D$  为 2.83~2.94,人工恢复为 2.65~2.70,人工恢复模式下  $D$  整体小于自然恢复;消落带人工恢复模式  $K$  较自然恢复减小,不同

水位高程分别减少 72.43%,71.63%,64.63%;PAD 消落带均大于未淹水地区,2 种不同恢复模式下 PAD 差异较大,自然恢复模式消落带值为 34.33%~44.26%,人工恢复模式为 14.86%~16.86%,自然恢复各水位高程值均为人工恢复模式 2 倍以上,人工恢复后消落带地区团聚体破坏率降低。结合  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、 $D$ 、 $K$  和 PAD 的变化特征来看,周期性水位变动降低土壤水稳性团聚体稳定性,稳定性随淹水时间增加而下降;人工恢复模式的团聚体稳定性、土壤抗蚀性高于自然恢复模式,人工恢复模式增加土壤水稳性团聚体的团聚性。

### 2.4 土壤水稳性团聚体含量与团聚体稳定性指标的相关性

$> 5$  mm 粒径的团聚体与 MWD 呈极显著正相关( $p < 0.01$ ,表 3),与  $R_{0.25}$  呈显著相关( $p < 0.05$ ),而与 PAD 呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),与  $K$  呈显著负相关( $p < 0.05$ ),与 0.25~0.5, $< 0.25$  mm 粒径团聚

体呈显著负相关( $p < 0.05$ ),说明  $> 5$  mm 粒径团聚体可作为该区土壤团聚体水稳性的重要阈值; $R_{0.25}$  与 MWD 呈显著正相关( $p < 0.05$ ),与  $K$ 、PAD 呈显著负相关( $p < 0.05$ );MWD 与 PAD 呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),与  $K$  呈显著负相关( $p < 0.05$ );GMD 与  $D$  显著负相关( $p < 0.05$ )。 $K$  与  $> 5$  mm 粒径团聚体呈极显著相关( $p < 0.01$ ),与  $0.25 \sim 0.5$ ,  $< 0.25$  mm

显著正相关, $K$  与 PAD 呈极显著相关( $p < 0.01$ )。或受样本数量与研究尺度限制, $0.5 \sim 2$  mm 粒径团聚体与  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、 $D$ 、 $K$  及 PAD 均未表现出相关性。表明土壤团聚体稳定性与  $> 5$  mm 粒径团聚体和  $< 0.25$  mm 粒径团聚体含量关系密切, $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、 $D$ 、 $K$  与 PAD 均能较好地表现出土壤水稳性团聚体的稳定性特征。

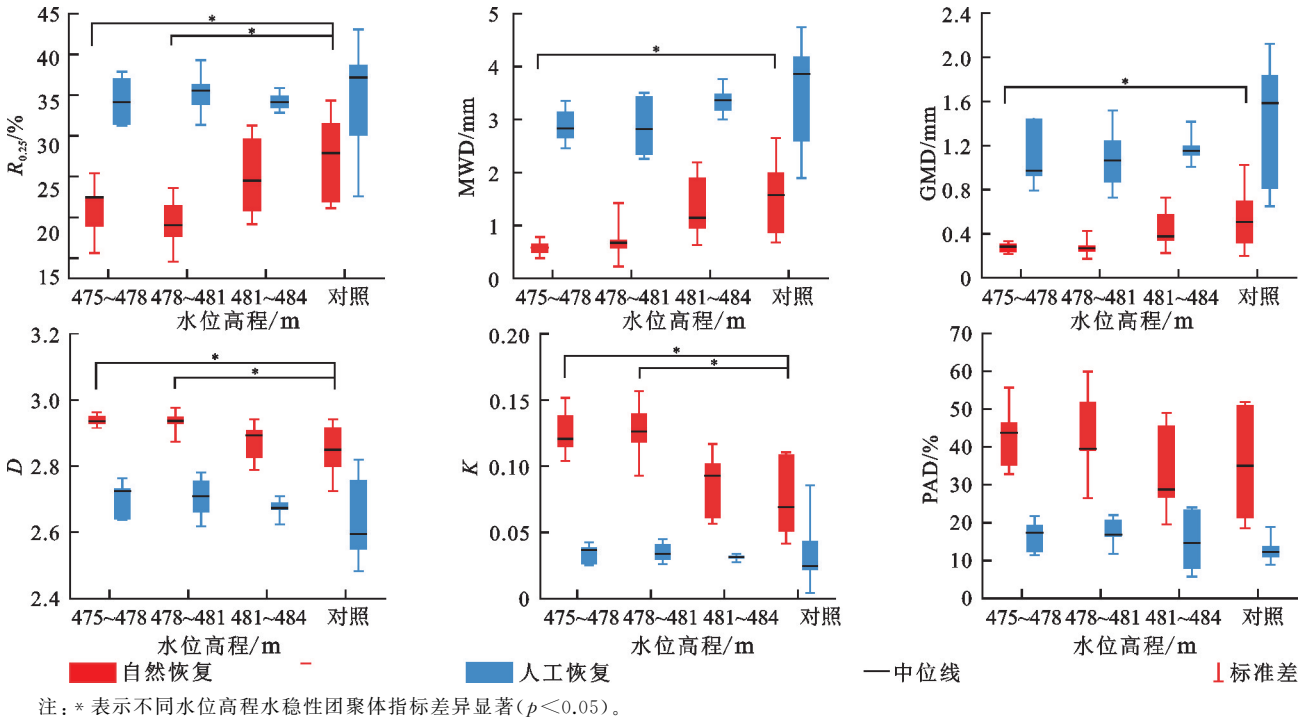


图 4 土壤水稳性团聚体稳定性指标沿水位高程的变化

Fig. 4 Changes in soil water-stable aggregates stability indicators along water elevations

表 3 各粒径水稳性团聚体含量与团聚体稳定性指标的相关性

Table 3 Correlation of water-stable aggregates content and aggregates stability indexes for each grain level

指标	$> 5$ mm	$2 \sim 5$ mm	$1 \sim 2$ mm	$0.5 \sim 1$ mm	$0.25 \sim 0.5$ mm	$< 0.25$ mm	$R_{0.25}$	MWD	GMD	$D$	$K$
$2 \sim 5$ mm	0.912										
$1 \sim 2$ mm	-0.371	0.040									
$0.5 \sim 1$ mm	-0.763	-0.868	-0.067								
$0.25 \sim 0.5$ mm	-0.963*	-0.971*	0.161	0.903							
$< 0.25$ mm	-0.976*	-0.905	0.313	0.656	0.916						
$R_{0.25}$	0.976*	0.905	-0.313	-0.656	-0.916	-1.000**					
MWD	1.000**	0.924	-0.344	-0.770	-0.967*	-0.979*	0.979*				
GMD	0.931	0.997**	-0.007	-0.835	-0.969*	-0.934	0.934	0.941			
$D$	-0.872	-0.996**	-0.131	0.861	0.947	0.873	-0.873	-0.885	-0.989*		
$K$	-0.988*	-0.845	0.491	0.666	0.911	0.973*	-0.973*	-0.984*	-0.873	0.794	
PAD	-0.996**	-0.897	0.392	0.709	0.941	0.989*	-0.989*	-0.996**	-0.921	0.855	0.994**

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

### 3 讨论

#### 3.1 淹水对土壤水稳性团聚体的影响

土壤水稳性团聚体含量有效地反映土壤抗侵蚀能力,其不同粒径配比可以衡量消落带淹水后土壤结构和质量的优劣<sup>[3]</sup>,淹水降低黑龙滩水库消落带土壤

水稳性团聚体稳定性。在消落带中, $> 0.25$  mm 的大团聚体在不同水位高程占比为  $54.40\% \sim 59.58\%$ ,与张淑娟等<sup>[19]</sup>研究三峡水库消落带得出的规律相同,三峡水库消落带土壤水稳性团聚体含量为  $10\% \sim 70\%$ 左右;与宋娇等<sup>[5]</sup>研究大桥水库消落带的规律有



偏差,大桥水库消落带水稳性团聚体主要以 $<3$  mm 粒径为主,几乎没有 $>5$  mm 的大团聚体;造成不同水库消落带水稳性团聚体含量偏差较大的原因可能是土壤类型差异,三峡水库与黑龙滩水库土壤均以紫色土为主,大桥水库土壤多以山地黄棕壤为主,紫色土较黄棕壤的成土速度快<sup>[20]</sup>,肥力条件好,土壤单位有机无机胶体黏结作用强,因此,以紫色土为主的水库消落带比黄棕壤为主的消落带团粒结构好,土壤稳定性高。2 种恢复模式消落带大团聚体含量均值(56.34%)低于未淹水对照(60.55%),水稳性团聚体的分形维数( $D$ )在不同恢复模式下的各个水位高程值域均较大(2.67~2.94),与三峡水库<sup>[21]</sup>、大桥水库<sup>[5]</sup>等消落带研究结果一致,表明消落带土壤整体容易遭受侵蚀,在开始人工恢复干预的 4 年时间里土壤稳定性有所增加但增幅不大,水淹破坏土壤孔隙中气泡,产生消散作用对消落带团聚体团聚结构造成影响<sup>[5]</sup>。

水位涨落对不同水位高程水稳性团聚体组成与分布影响明显<sup>[19]</sup>。消落带内高中低水位高程 $>0.25$  mm 的大团聚体含量均较未淹水对照降低,平均降低 4.21%,大团聚体随水位高程上升含量呈增加趋势,微团聚体含量变化趋势相反,水位高程越低含量越高,大团聚体在长时间的水淹下崩解为微团聚体。造成这一现象的原因可能是黑龙滩水库蓄水后,水库水位周期性变动,干湿交替促使消落带土壤团聚体中微裂纹的形成,土壤抗拉强度降低,易碎性增加,团聚体稳定性降低;另外,水库水体掏蚀与泥沙沉积破坏消落带土壤结构稳定,消落带土壤大团聚体崩解为微团聚体,加速土壤养分的释放与扩散,造成植被生长基质失稳<sup>[22]</sup>,导致消落带植被群落遭到严重破坏,群落多样性下降,植物根系及根系分泌物减少,对土壤团聚体的穿插与缠结作用降低<sup>[19]</sup>,在消落带土壤—植被互馈效应下,土壤团粒结构更容易遭到破坏。水稳性团聚体稳定性指标表明,2 种恢复模式下土壤团聚体稳定性均随水位高程上升而整体增加,土壤可蚀性( $K$ )与团聚体破坏率(PAD)随水位高程升高值降低,消落带土壤抗侵蚀能力随水位高程上升而增加,消落带低水位高程区由于淹水时间长,土壤基质不稳定导致植物生长受到限制,土壤侵蚀严重<sup>[19]</sup>,消落带不同水位高程所遭受的不同淹水时长、深度、频次影响土壤结构稳定性,水位的周期性变动通过改变团聚体间或团聚体内的孔隙结构,造成团聚体的收缩或膨胀,改变团聚体不同粒径的含量<sup>[23]</sup>。

### 3.2 不同恢复模式对消落带土壤水稳性团聚体的影响

植被作为消落带生态系统的主体,人工修复与重建消落带植被是消落带生态恢复的主要途径,消落带

植被恢复与土壤保持是相互促进的过程<sup>[24]</sup>。进行人工植被恢复后,黑龙滩水库消落带土壤水稳性团聚体稳定性有明显改善,水库蓄水后人工恢复模式下消落带较自然恢复模式的消落带 $>0.25$  mm 的大团聚体含量增加,由自然恢复模式的 38.15%~50.44%增加到 68.71%~70.64%,微团聚体含量比自然恢复减少 18.27%~32.49%。人工恢复模式下,消落带大团聚体含量在不同水位高程平均高于未淹水对照区 3.84%,自然恢复  $R_{0.25}$  低于人工恢复模式, $K$  与 PAD 高于人工恢复模式消落带,土壤抗侵蚀能力要高于自然恢复模式的消落带地区,说明人工恢复模式下消落带土壤水稳性与土壤抗侵蚀能力高于自然恢复模式,可能由于人工恢复模式下消落带植被盖度较高,植被覆盖的增加,降低水位涨落干湿交替的影响,盖度高的区域植物地下根系丰富,土壤中临时性胶结剂根系、真菌等增加,大团聚体在植物根系的物理缠绕下不易崩解,土壤固持力增强,消落带团聚体水稳性增强,有效防止根层土壤侵蚀<sup>[23]</sup>。

人工恢复模式对黑龙滩水库消落带地区的土壤质量恢复起到促进作用,与张钦弟等<sup>[25]</sup>对半干旱黄土区研究得出的结论相反,在黄土区自然恢复下土壤团聚体的稳定性最高,可能是因为淹水造成地表植被覆盖度降低,影响团聚体孔隙结构和微生物群落活动<sup>[23]</sup>,对消落带土壤稳定性影响较大。消落带内,人工恢复模式土壤稳定性比自然恢复高,植被恢复后消落带地表植被覆盖度提高,地下根系增加,从而增加土壤中天然有机质来源,促使土壤中大团聚体含量提高,同时,地表植被有效减少降雨及水库水位变动对土壤大团聚体的冲刷和破坏作用,说明库区植被恢复能有效改善土壤团粒结构提高土壤稳定性,对黑龙滩水库消落带地区的土地质量恢复起到促进作用。

相关分析显示,团聚体稳定性指标与 $>5$  mm 粒径的大团聚体含量相关性达极显著水平( $p < 0.01$ ),表明大团聚体占比对土壤结构稳定性起到很大作用<sup>[2]</sup>;  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、 $D$ 、 $K$  与 PAD 相互间呈极显著( $p < 0.01$ )或显著相关性( $p < 0.05$ ),说明其均是各粒径土壤水稳性团聚体稳定性的综合反应<sup>[2]</sup>。

## 4 结论

(1)黑龙滩水库蓄水后消落带内 $>0.25$  mm 水稳性大团聚体含量(56.34%)低于未淹水地区(60.55%),人工恢复植被下大团聚体含量高于自然恢复模式,各粒径的水稳性团聚体组成变化在土层间差异不显著( $p > 0.05$ ),在不同恢复模式间差异显著( $p < 0.05$ ),人工恢复模式促进土壤水稳性大团聚体的形成,增加消落带土壤稳定性。

(2) 2种恢复模式下土壤团聚体稳定性均随水位高程上升而整体增加。不同水位高程下,自然恢复模式主要以微团聚体为主,团聚体较分散;人工恢复模式植被下,大团聚体含量较自然恢复均增加,水位高程由低至高分别增加 28.10%, 32.49%, 18.27%, 人工恢复植被土壤团聚体稳定性较自然恢复模式增加。

(3) 消落带  $R_{0.25}$  低于未淹水对照,人工恢复模式整体高于自然恢复模式;MWD、GMD 随水位高程上升逐渐增大,人工恢复模式比自然恢复模式高 2 倍左右; $D$ 、 $K$ 、 $PAD$  均表现为人工恢复低于自然恢复模式;各水稳性团聚体的稳定性指标表明,团聚体稳定性、土壤抗蚀性未淹水地区高于消落带地区,淹水时间短的地区高于时间长的地区,人工恢复模式高于自然恢复模式, $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、 $D$ 、 $K$  及  $PAD$  均能较好地表现出土壤水稳性团聚体的稳定性特征。

#### 参考文献:

- [1] LI J Y, CHEN P, LI Z G, et al. Soil aggregate-associated organic carbon mineralization and its driving factors in rhizosphere soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 186: e109182.
- [2] CHENG Y T, XU G C, WANG X K, et al. Contribution of soil aggregate particle size to organic carbon and the effect of land use on its distribution in a typical small watershed on Loess Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: e110988.
- [3] HU F N, XU C Y, MA R T, et al. Biochar application driven change in soil internal forces improves aggregate stability: Based on a two-year field study[J]. *Geoderma*, 2021, 403: e115276.
- [4] ABIVEN S, MENASSERI S, CHENU C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability: A literature analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 1-12.
- [5] 宋娇, 郑晓岚, 鲍玉海, 等. 大桥水库消落带不同水位高程柳树林地土壤团聚体组成与分形特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 87-93.
- SONG J, ZHENG X L, BAO Y H, et al. Composition and fractal features of soil aggregates in willow forest lands at different elevations in the water level fluctuation zone of the daqiao reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 87-93.
- [6] WANG X X, SHAN K, HUANG P, et al. Response of soil aggregate stability to plant diversity loss along an inundation stress gradient in a reservoir riparian zone[J]. *Catena*, 2023, 233: e107472.
- [7] 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.
- [8] SU X L, POLVI L E, LIND L, et al. Importance of landscape context for post-restoration recovery of riparian vegetation[J]. *Freshwater Biology*, 2019, 64(5): 1015-1028.
- [9] 陈功, 李晓玲, 黄杰, 等. 三峡水库秭归段消落带植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2022, 42(2): 688-699.
- CHEN G, LI X L, HUANG J, et al. Characteristics of plant communities and their relationships with environmental factors in the water level fluctuation zone of the Zigui region of the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 688-699.
- [10] 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.
- [11] 鲍玉海, 贺秀斌, 钟荣华, 等. 三峡水库消落带植被重建途径及其固土护岸效应[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 171-174, 180.
- BAO Y H, HE X B, ZHONG R H, et al. Revegetation and its effects on soil reinforcement in the riparian zone of three-gorge reservoir[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 171-174, 180.
- [12] 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.
- [13] SU X L, WU S, LIND L, et al. The hydrochorous dispersal of plant propagules in a giant river reservoir: Implications for restoration of riparian vegetation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2022, 59(8): 2199-2208.
- [14] ZHOU Z Z, HUANG T L, LI Y, et al. Sediment pollution characteristics and in situ control in a deep drinking water reservoir[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 52: 223-231.
- [15] QI T, GUO R, DING S, et al. Contamination profile and risk assessment of per and polyfluoroalkyl substances in Guanting Reservoir, a former drinking water source with degraded water quality[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 55: e104176.
- [16] 施为光, 陈达平. 黑龙滩水库氮磷平衡与富营养化评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(2): 171-174.
- SHI W G, CHEN D P. Balance of N and P in the input and output in Heilongtan Reservoir with the assessment of its eutrophication[J]. *Resources and Environment in*



- the Yangtza Basin, 2002, 11(2): 171-174.
- [17] 孙荣, 袁兴中, 刘红, 等. 三峡水库消落带植物群落组成及物种多样性[J]. 生态学杂志, 2011, 30(2): 208-214.  
SUN R, YUAN X Z, LIU H, et al. Floristic composition and species diversity of plant communities along an environment gradient in drawdown area of Three Gorges Reservoir after its initial impounding to the water level of 156 M[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(2): 208-214.
- [18] SHENG M H, AI X Y, HUANG B C, et al. Effects of biochar 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: e165478.
- [19] 张淑娟, 贺秀斌, 鲍玉海, 等. 三峡水库消落带不同水位高程土壤团聚体变化特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 25-30.  
ZHANG S J, HE X B, BAO Y H, et al. Change characteristics of soil aggregates at different water levels in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 25-30.
- [20] HE X B, BAO Y H, NAN H W, et al. Tillagepedogenesis of purple soils in southwestern China[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 6(2): 205-210.
- [21] 郑晓岚, 杨玲, 宋娇, 等. 水库消落带土壤颗粒组成分形及其空间分异特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 66-71.  
ZHENG X L, YANG L, SONG J, et al. Fractal characteristics and spatial variation of soil particle composition in the reservoir riparian zone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 66-71.
- [22] 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.
- [23] 刘艳, 马茂华, 吴胜军, 等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J]. 土壤, 2018, 50(5): 853-865.  
LIU Y, MA M H, WU S J, et al. Soil aggregates as affected by wetting-drying cycle: A review[J]. Soils, 2018, 50(5): 853-865.
- [24] 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]. The Science of the Total Environment, 2019, 664: 841-850.
- [25] 张钦弟, 刘剑荣, 杨磊, 等. 半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9057-9068.  
ZHANG Q D, LIU J R, YANG L, et al. Effect of vegetation restoration on stability and erosion resistance of soil aggregates in semi-arid loess region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9057-9068.
- (上接第 167 页)
- [25] 吉林省水利厅. 吉林省水资源公报 2020[EB/OL]. 长春: 吉林省水利厅, [2021-10-27][2023-10-20]. <http://slt.jl.gov.cn/zwgk/szygb/202110/P020211203498418240484.pdf>.  
Department of Water Resources of Jilin Province. Jilin water resources bulletin 2020[EB/OL]. Changchun: Department of Water Resources of Jilin Province, [2021-10-27][2023-10-20]. <http://slt.jl.gov.cn/zwgk/szygb/202110/P020211203498418240484.pdf>.
- [26] 吉林省水利厅. 吉林省水资源公报 2022[EB/OL]. 长春: 吉林省水利厅, [2023-12-12][2023-12-20]. <http://slt.jl.gov.cn/zwgk/szygb/202312/P020231212317121419223.pdf>.  
Department of Water Resources of Jilin Province. Jilin water resources bulletin 2022[EB/OL]. Changchun: Department of Water Resources of Jilin Province, [2023-12-12][2023-12-20]. <http://slt.jl.gov.cn/zwgk/szygb/202312/P020231212317121419223.pdf>.
- [27] 胡小平, 廖亚君, 毛雨. 大食物观下我国粮食安全保障重点的研究[J]. 农村经济, 2023(7): 55-62.  
HU X P, LIAO Y J, MAO Y. Research on the key points of food security in China under the perspective of greater food[J]. Rural Economy, 2023(7): 55-62.
- [28] 周应恒, 李娜. “大食物观”与我国食物安全保障新思路[J]. 中国农业大学学报(社会科学版), 2023, 40(4): 147-158.  
ZHOU Y H, LI N. All-encompassing approach to food and new thinking of food security[J]. Journal of China Agricultural University(Social Sciences), 2023, 40(4): 147-158.
- [29] 杨富裕. 树立“饲草就是粮食”理念, 大力发展饲草产业[J]. 草地学报, 2023, 31(2): 311-313.  
YANG F Y. New concept “forage is a part of grains” to utmost spurring the development of forage industry[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(2): 311-313.