

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.03.025

王鹏, 冉义国, 梅渝, 等. 周期性水位波动对三峡水库消落带土壤有机碳含量和密度的影响. 土壤, 2024, 56(3): 672–680.

# 周期性水位波动对三峡水库消落带土壤有机碳含量和密度的影响<sup>①</sup>

王 鹏<sup>1,2,3</sup>, 冉义国<sup>2\*</sup>, 梅 渝<sup>1,2,3</sup>, 马茂华<sup>2</sup>, 黄 平<sup>2</sup>, 吴胜军<sup>2</sup>

(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 400714)

**摘 要:** 为探究水位波动对三峡水库消落带土壤有机碳的影响, 在三峡水库消落带采集和测定了受不同水淹强度影响的石灰土、紫色土、黄壤及其植物样品, 并运用 Kruskal-Wallis 非参数检验和基于冗余分析的典范分析等方法进行了研究。结果表明: 周期性水淹增加了石灰土和紫色土的有机碳含量和密度, 但降低了黄壤的有机碳含量和密度。此外, 石灰土的有机碳分布还受地上生物量、土壤 pH 和土层深度的影响, 紫色土的有机碳分布还受土层深度和地上生物量的影响, 而黄壤的有机碳含量和密度则与地上生物量、土层深度和地下生物量有关。总之, 周期性水位波动对消落带土壤有机碳影响深刻, 但土壤类型分异了有机碳对水位波动的响应。

**关键词:** 三峡水库; 消落带; 土壤有机碳; 有机碳密度

**中图分类号:** S151.9 **文献标志码:** A

## Effects of Periodic Water-level Fluctuations on Soil Organic Carbon Content and Density in Riparian Zone of Three Gorges Reservoir

WANG Peng<sup>1,2,3</sup>, RAN Yiguo<sup>2\*</sup>, MEI Yu<sup>1,2,3</sup>, MA Maohua<sup>2</sup>, HUANG Ping<sup>2</sup>, WU Shengjun<sup>2</sup>

(1 School 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 400714, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of water level fluctuation on soil organic carbon in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir, lime soil, purple soil and yellow soil samples and their plant samples affected by different flooding intensities were collected and tested, and Kruskal-Wallis non-parametric test and canonical analysis based on redundancy analysis were used for investigation. The results showed that periodic flooding increased the organic carbon contents and densities of calcareous soil and purple soil, but decreased the organic carbon content and density of yellow soil. In addition, the distribution of organic carbon in calcareous soil was also affected by aboveground biomass, soil pH and soil depth. The organic carbon in purple soil was also affected by soil depth and aboveground biomass, while the organic carbon content and density in yellow soil were related to aboveground biomass, soil depth and underground biomass. In short, periodic water level fluctuations have a profound impact on soil organic carbon in the hydro-fluctuation belt, but soil types differentiate the response of organic carbon to water level fluctuations.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; Water-level fluctuation zone; Soil organic carbon; Organic carbon density

土壤是地球上最大且周转最慢的碳库, 对碳循环有巨大影响, 全球 1 m 深度的土壤中有有机碳储量约为 1 400 ~ 1 500 Gt, 约为大气或陆地植被碳库的 3 倍<sup>[1]</sup>。

土壤有机碳是评估土壤质量和健康的关键指标, 对土壤保护与修复、生态系统服务功能以及全球气候变化等有直接或间接的影响<sup>[2-3]</sup>。

①基金项目: 国家自然科学基金青年项目(42207374)、中国科学院特别研究助理项目(2022&2023)和重庆市自然科学基金面上项目(2022NSCQ-MSX3032)资助。

\* 通讯作者(ranyiguo@cigit.ac.cn)

作者简介: 王鹏(1998—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳周转研究。E-mail: wangpeng21@mails.ucas.ac.cn

水库消落带是指在水库周围因水库水位消涨而周期性出露和淹没的区域,具有水域和陆地双重属性<sup>[4]</sup>,是流域景观内生物地球化学过程最为活跃的区域,也是全球碳循环研究的热点。三峡水库消落带是我国面积最大的水库消落带,每年都经历着“冬水夏陆”的生境交替,扮演着“碳源”和“碳汇”双重角色<sup>[5]</sup>。由于周期性水位波动,消落带土壤处于厌氧和好氧交替环境,这对消落带土壤有机碳形成和稳定产生重要影响。有研究表明,淹水后厌氧环境会降低土壤微生物活性,减弱土壤有机碳分解,增加土壤有机碳的累积<sup>[6]</sup>。然而,也有研究发现,淹水后可能会促进土壤有机碳分解,降低土壤有机碳的含量<sup>[7]</sup>。此争议可能与消落带淹水时长以及土壤特性有关。因此,本研究选取三峡水库消落带主要土壤类型紫色土、石灰土和黄壤为研究对象,探讨周期性水位波动对消落带土壤有机碳含量及密度的影响,以期为全国水库消落带土壤有机碳储量的核算提供基础资料和科学参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于三峡水库重庆段(107°27' E ~ 109°46' E, 29°50' N ~ 31°02' N)。该区域属于亚热带湿润季风气候,年平均气温 20.3 °C,年均降水量 1 287 mm。该区域跨越川鄂峡谷和川东丘陵,地质结构包含侏罗系红色碎屑岩类以及古生代、中生代碳酸盐类地层等,主要土壤类型有紫色土、黄壤和石灰土,占总面积的 80%<sup>[8]</sup>。三峡水库于 2010 年开始实施“冬蓄夏排”模式,每年 9 月和次年 6 月分别进行蓄水和排水,形成了水位涨落幅度达 30 m 的消落带。

### 1.2 试验设计与样品采集

根据三峡水库的水文节律,以 10 m 为间隔设定水淹胁迫等级,划分强(145 ~ 155 m 高程,年均淹水 287 d)、中(155 ~ 165 m 高程,年均淹水 237 d)、弱(165 ~ 175 m 高程,年均淹水 113 d)水淹胁迫区,以及未被水淹胁迫影响的对照区(175 ~ 180 m 高程,年均淹水 0 d),共 4 个区间。根据三峡水库蓄水前库区土壤类型分布特征,选择巫山、万州、云阳、奉节、忠县、丰都、涪陵 7 个采样点(涵盖石灰土、黄壤和紫色土),在各水淹强度下随机选定 6 个 1 m×1 m 的样方,在样方内贴地割取 0.5 m×0.5 m 植物地上部分,用直径为 7 cm 的环刀采集 0 ~ 20 cm 土层植物地下部分。同时,通过挖掘剖面,采集 0 ~ 20(表层)、20 ~ 40(亚表层)、40 ~ 60 cm(深层)深度的全土、团聚体和

容重样品,共得到 504 份样品,其中,容重样品采集采用环刀法。具体采样方法参考张甘霖和李德成<sup>[9]</sup>的方法。

### 1.3 样品处理及指标测定

植物地上生物量和地下生物量采用称重法测定<sup>[10]</sup>:将带回的植物地上样品置于 65 °C 烘箱烘至恒重,称重得到植物地上生物量;植物地下样品在实验室中过 1 mm 的筛网去除土壤,分离其中的植物根系并用去离子水洗净后装入信封,置于 65 °C 烘箱烘至恒重,称重得到地下生物量。土壤 pH 采用土水质量比为 1 : 2.5 的比例浸提,并用 pH 计(FE 20, Mettler Toledo, USA)测定;土壤温度、土壤含水率与电导率采用 WET 三参数仪(Saardi, UK)测定<sup>[11]</sup>;土壤容重采用环刀法测定。

土壤有机碳含量采用总有机碳分析仪(Multi N/C 3100, Analytikjena, Germany)测定,土壤有机碳密度(t/hm<sup>2</sup>)按照公式(1)计算<sup>[12]</sup>,其中容重样品中基本没有石砾,故未考虑石砾作为有机碳密度估算的修正因子。

$$S_i = SOC_i \times BD_i \times T_i \times 10^{-1} \quad (1)$$

式中: $i$  代表 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层; $S_i$  代表第  $i$  层土壤有机碳密度(t/hm<sup>2</sup>); $SOC_i$  代表第  $i$  层土壤有机碳含量(g/kg); $BD_i$  代表第  $i$  层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $T_i$  代表第  $i$  层土壤厚度(cm); $10^{-1}$  是单位换算系数。

### 1.4 数据处理及分析

采用 Excel 2021 进行数据整理,利用 SPSS 27 进行非参数检验(Kruskal-Wallis Test)比较不同水淹胁迫强度和不同深度土壤有机碳含量和密度等指标的差异,并利用 R 程序的 Rdacca.hp 包<sup>[13]</sup>进行基于冗余分析的典范分析明确不同类型土壤有机碳含量和密度的主导因素,采用 Origin 2021 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 三峡水库消落带植物生物量及土壤基本理化特性

由表 1 可知,随着水淹胁迫强度的增加,石灰土、黄壤和紫色土 3 种土壤类型的植物地上生物量均值分布趋势相同,均呈现“Λ”型分布,最大值分别为:941.61、1 029.37 和 1 300.09 g/m<sup>2</sup>,均出现在中度水淹胁迫下。黄壤和紫色土的地下生物量均值也呈现“Λ”型分布,最大值分别为:2 159.4 和 1 677.42 mg/m<sup>2</sup>,而石灰土的地下生物量均值随着水淹胁迫强度的增加而增加,最大值为 1 173.24 mg/m<sup>2</sup>。

表 1 植物生物量

土壤类型	胁迫强度	地上生物量(g/m <sup>2</sup> )	地下生物量(mg/m <sup>2</sup> )
石灰土	强	624.17 ± 133.34	1 173.24 ± 568.4
	中	941.61 ± 139.55	705.67 ± 437.89
	弱	583.19 ± 338.56	327.77 ± 343.78
	无	—	236.20 ± 172.44
黄壤	强	701.83 ± 225.50	2 019.07 ± 1 245.86
	中	1 029.37 ± 265.58	2 159.4 ± 1 732.95
	弱	986.86 ± 458.69	771.93 ± 583.89
	无	299.47 ± 78.37	609.73 ± 829.54
紫色土	强	595.39 ± 217.79	516.1 ± 489.59
	中	1 300.09 ± 423.38	588 ± 659.81
	弱	1 156.85 ± 1 009.65	1 677.42 ± 2 214.43
	无	372.97 ± 108.99	1 227.73 ± 1 524.27

注：表中数据均为均值 ± 标准差，下同。

由表 2 可知，三峡水库消落带土壤呈现弱碱性(7.06 ~ 8.56)，总体上 3 种类型土壤 pH 随深度的增加而升高，且除对照区外，均随着水淹胁迫强度的增加而减小。石灰土的容重随深度增加而上升，随水淹胁迫强度的增强而下降；黄壤的容重随深度增加而上升与石灰土一致，表层土壤容重随着水淹胁迫强度的增强而下降，亚表层和深层土壤容重从中度水淹胁迫至

对照呈现上升趋势；紫色土的容重随着水淹胁迫强度的增强先降低后升高。石灰土温度随着水淹胁迫强度的增加先下降后上升；黄壤和紫色土相似，除对照区外，均呈现随着水淹胁迫强度的增加而减小。石灰土的电导率呈现随着水淹胁迫强度的增加先上升后下降再上升的趋势；黄壤和紫色土类似，呈现出随着水淹胁迫强度的增加先下降后上升的趋势。

表 2 土壤基本理化性质

土壤类型	胁迫强度	土层深度(cm)	温度(°C)	电导率(mS/cm)	含水率(%)	pH	容重(g/cm <sup>3</sup> )
石灰土	强	0 ~ 20	29.90 ± 3.97	0.21 ± 0.16	19.93 ± 8.03	7.52 ± 0.18	1.17 ± 0.11
		20 ~ 40	29.69 ± 4.01	0.19 ± 0.19	19.22 ± 11.26	7.56 ± 0.15	1.20 ± 0.12
		40 ~ 60	29.76 ± 3.82	0.19 ± 0.14	18.73 ± 8.24	7.64 ± 0.17	1.29 ± 0.04
	中	0 ~ 20	32.47 ± 4.77	0.11 ± 0.10	14.14 ± 5.67	7.84 ± 0.09	1.18 ± 0.05
		20 ~ 40	32.11 ± 4.55	0.10 ± 0.05	13.78 ± 2.07	7.95 ± 0.09	1.27 ± 0.11
		40 ~ 60	32.05 ± 4.49	0.11 ± 0.06	14.17 ± 2.38	7.99 ± 0.08	1.43 ± 0.09
	弱	0 ~ 20	28.58 ± 2.41	0.24 ± 0.14	21.73 ± 9.60	8.26 ± 0.18	1.31 ± 0.13
		20 ~ 40	28.53 ± 2.34	0.29 ± 0.19	21.75 ± 9.12	8.32 ± 0.13	1.46 ± 0.17
		40 ~ 60	28.84 ± 2.23	0.31 ± 0.14	23.00 ± 5.37	8.31 ± 0.09	1.51 ± 0.09
	无	0 ~ 20	32.03 ± 3.94	0.19 ± 0.07	19.28 ± 3.87	8.10 ± 0.31	1.42 ± 0.17
		20 ~ 40	32.67 ± 2.60	0.23 ± 0.14	20.31 ± 6.30	7.97 ± 0.23	1.48 ± 0.13
		40 ~ 60	32.56 ± 2.53	0.28 ± 0.22	21.29 ± 6.72	7.96 ± 0.38	1.48 ± 0.12
黄壤	强	0 ~ 20	30.70 ± 1.91	0.15 ± 0.13	14.57 ± 6.13	7.06 ± 0.51	1.15 ± 0.09
		20 ~ 40	30.87 ± 1.87	0.09 ± 0.06	14.68 ± 5.54	7.23 ± 0.42	1.37 ± 0.11
		40 ~ 60	30.58 ± 1.76	0.15 ± 0.08	15.43 ± 4.08	7.43 ± 0.40	1.45 ± 0.12
	中	0 ~ 20	33.63 ± 6.49	0.09 ± 0.05	11.33 ± 2.82	7.75 ± 0.36	1.22 ± 0.07
		20 ~ 40	33.60 ± 6.48	0.09 ± 0.05	12.08 ± 2.86	7.85 ± 0.34	1.35 ± 0.15
		40 ~ 60	33.51 ± 6.43	0.12 ± 0.05	14.94 ± 4.54	7.99 ± 0.30	1.40 ± 0.13
	弱	0 ~ 20	35.11 ± 4.54	0.10 ± 0.07	11.90 ± 3.44	8.21 ± 0.19	1.24 ± 0.14
		20 ~ 40	34.89 ± 4.56	0.14 ± 0.15	11.60 ± 5.49	8.38 ± 0.15	1.40 ± 0.10
		40 ~ 60	34.74 ± 4.42	0.14 ± 0.14	12.15 ± 5.44	8.45 ± 0.10	1.41 ± 0.09
	无	0 ~ 20	33.79 ± 2.80	0.22 ± 0.14	18.32 ± 8.20	8.52 ± 0.09	1.48 ± 0.09
		20 ~ 40	31.13 ± 9.32	0.29 ± 0.32	16.60 ± 8.85	8.56 ± 0.10	1.51 ± 0.12
		40 ~ 60	34.07 ± 2.54	0.33 ± 0.28	19.73 ± 8.94	8.51 ± 0.07	1.57 ± 0.11

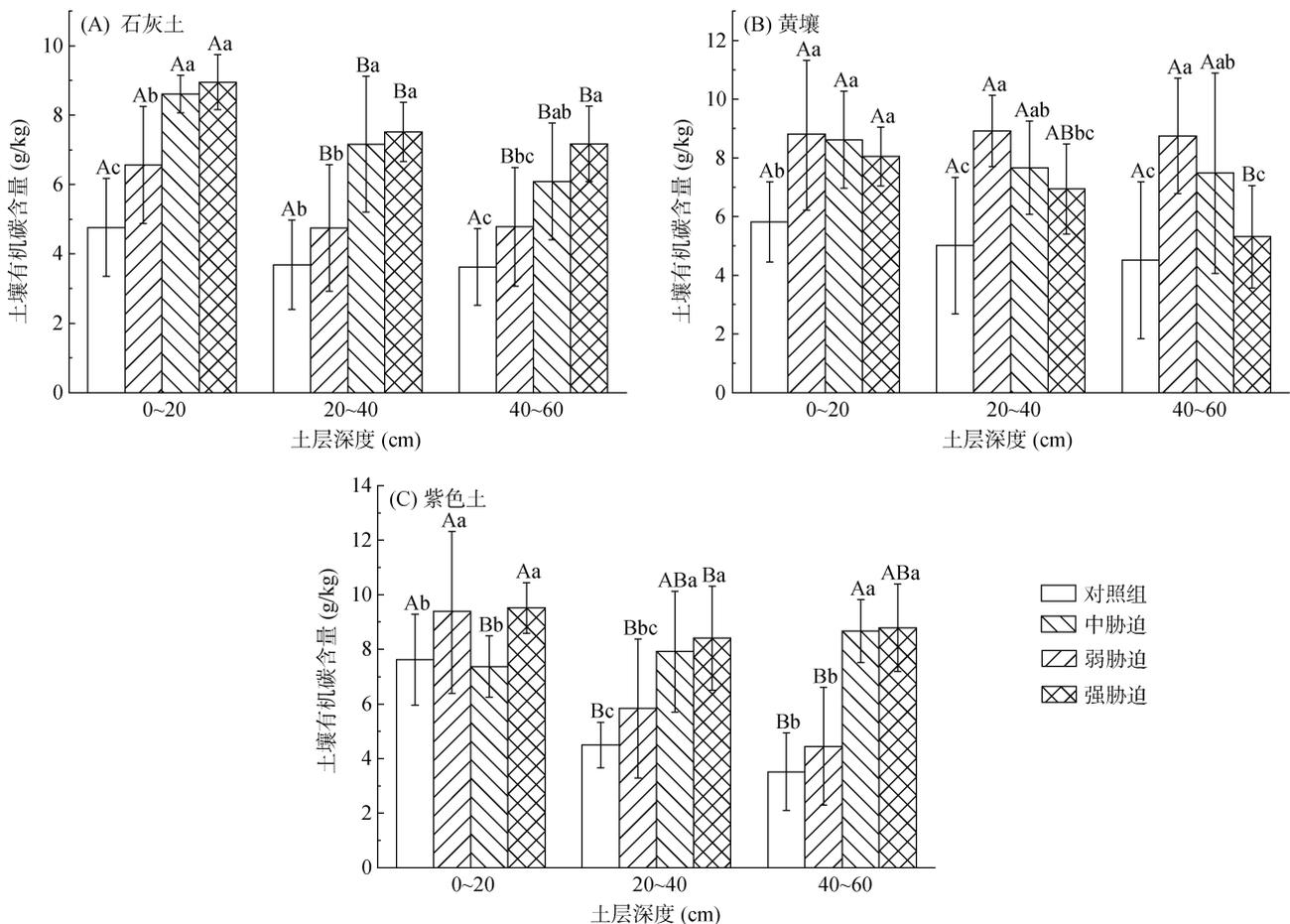
续表 2

土壤类型	胁迫强度	土层深度(cm)	温度(°C)	电导率(mS/cm)	含水率(%)	pH	容重(g/cm <sup>3</sup> )
紫色土	强	0~20	28.27 ± 1.17	0.38 ± 0.21	26.37 ± 7.73	7.28 ± 0.36	1.32 ± 0.04
		20~40	28.09 ± 1.11	0.33 ± 0.15	23.72 ± 7.78	7.33 ± 0.30	1.26 ± 0.13
		40~60	27.90 ± 1.08	0.30 ± 0.13	23.80 ± 4.84	7.43 ± 0.25	1.28 ± 0.10
	中	0~20	30.70 ± 2.65	0.27 ± 0.27	18.18 ± 8.09	7.65 ± 0.33	1.21 ± 0.11
		20~40	30.56 ± 2.62	0.12 ± 0.13	13.01 ± 6.20	7.71 ± 0.28	1.23 ± 0.08
		40~60	30.34 ± 2.62	0.15 ± 0.08	15.86 ± 3.43	7.79 ± 0.21	1.20 ± 0.11
	弱	0~20	35.30 ± 2.63	0.09 ± 0.10	14.33 ± 6.67	8.09 ± 0.19	1.26 ± 0.20
		20~40	34.96 ± 2.44	0.16 ± 0.11	17.34 ± 5.82	8.26 ± 0.21	1.45 ± 0.18
		40~60	34.77 ± 2.41	0.24 ± 0.14	22.29 ± 8.66	8.24 ± 0.23	1.54 ± 0.18
	无	0~20	34.18 ± 3.11	0.20 ± 0.18	18.77 ± 10.68	7.76 ± 0.67	1.42 ± 0.14
		20~40	34.05 ± 2.99	0.20 ± 0.15	20.18 ± 8.26	7.82 ± 0.69	1.58 ± 0.06
		40~60	33.89 ± 2.85	0.29 ± 0.15	24.26 ± 8.03	7.90 ± 0.59	1.63 ± 0.08

2.2 周期性水位波动下不同类型土壤中有有机碳含量和密度的分布特征

由图 1 可知，石灰土各层土壤以及紫色土亚表层和深层土壤的有机碳含量随水淹胁迫强度的增强而增加，而黄壤的有机碳含量则呈现相反的趋势。随着水淹胁迫的增强，石灰土表层土壤有机碳含量由 4.76 g/kg 升高至 8.95 g/kg，亚表层土壤有机

碳含量由 3.68 g/kg 升高至 7.52 g/kg，深层土壤有机碳含量由 3.62 g/kg 升高至 7.17 g/kg。在强水淹胁迫和中等水淹胁迫下，表层和亚表层的石灰土有机碳含量显著高于弱水淹胁迫和对照区(P<0.05)。随着土壤深度的增加石灰土的有机碳含量减少，且表层有机碳含量显著高于其他土层(P<0.05) (图 1A)。黄壤在水淹胁迫下的有机碳含量均显著高于对照区(P<0.05)，且



(图中不同小写字母表示同一土层不同水淹胁迫强度间差异显著(P<0.05)，不同大写字母表示同一水淹胁迫强度下不同土层间差异显著(P<0.05)；下同)

图 1 三种土壤类型在不同水淹条件下的土壤有机碳含量

随着胁迫强度的增加而减少。在同一水淹胁迫强度下,黄壤的有机碳含量随土层深度的增加而减少(图 1B)。紫色土有机碳含量随水淹胁迫强度的变化较为特殊,表层含量分别为 7.62、9.40、7.36、9.52 g/kg;亚表层和深层有机碳含量变化相似,表现出随着水淹胁迫的增强而增加,分别为 4.50、5.83、7.91、8.41 g/kg 和 3.52、4.45、8.67、8.79 g/kg(图 1C)。3 种土壤类型的有机碳含量在深度上的分布规律存在差异,但整体上呈现随着深度的增加而下降的趋势。

研究区石灰土的有机碳密度在各土层随水淹胁迫强度增强而增加,表层、亚表层和深层分别为

13.35 ~ 20.82、10.65 ~ 18.05 和 10.62 ~ 18.00 t/hm<sup>2</sup>(图 2A)。黄壤的有机碳密度随着水淹胁迫的增强整体呈现下降的趋势,且随着土层深度的增加这种趋势更加明显(图 2B),其有机碳密度的峰值表层出现在中度水淹胁迫强度下,亚表层和深层出现在弱水淹胁迫强度下,峰值分别为 21.00、23.96、20.91 t/hm<sup>2</sup>。紫色土的有机碳密度变化则更复杂,表层的有机碳密度有所波动,变化范围为 19.33 ~ 25.32 t/hm<sup>2</sup>,而亚表层和深层的有机碳密度随水淹胁迫强度增强而增加,与石灰土的变化趋势相似,分别为 13.68 ~ 20.87 和 10.48 ~ 21.30 t/hm<sup>2</sup>(图 2C)。

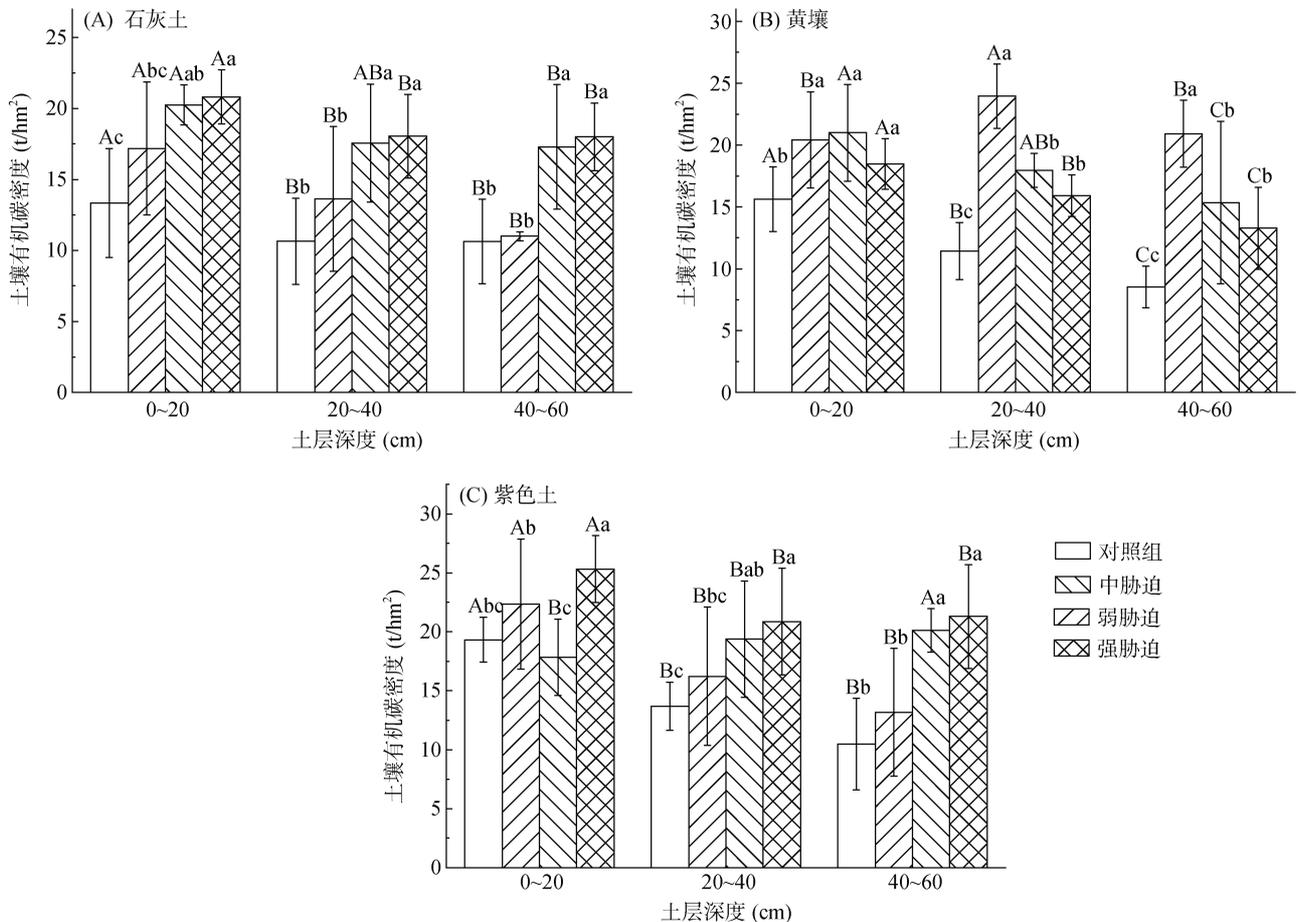


图 2 三种土壤类型在不同水淹条件下的土壤有机碳密度

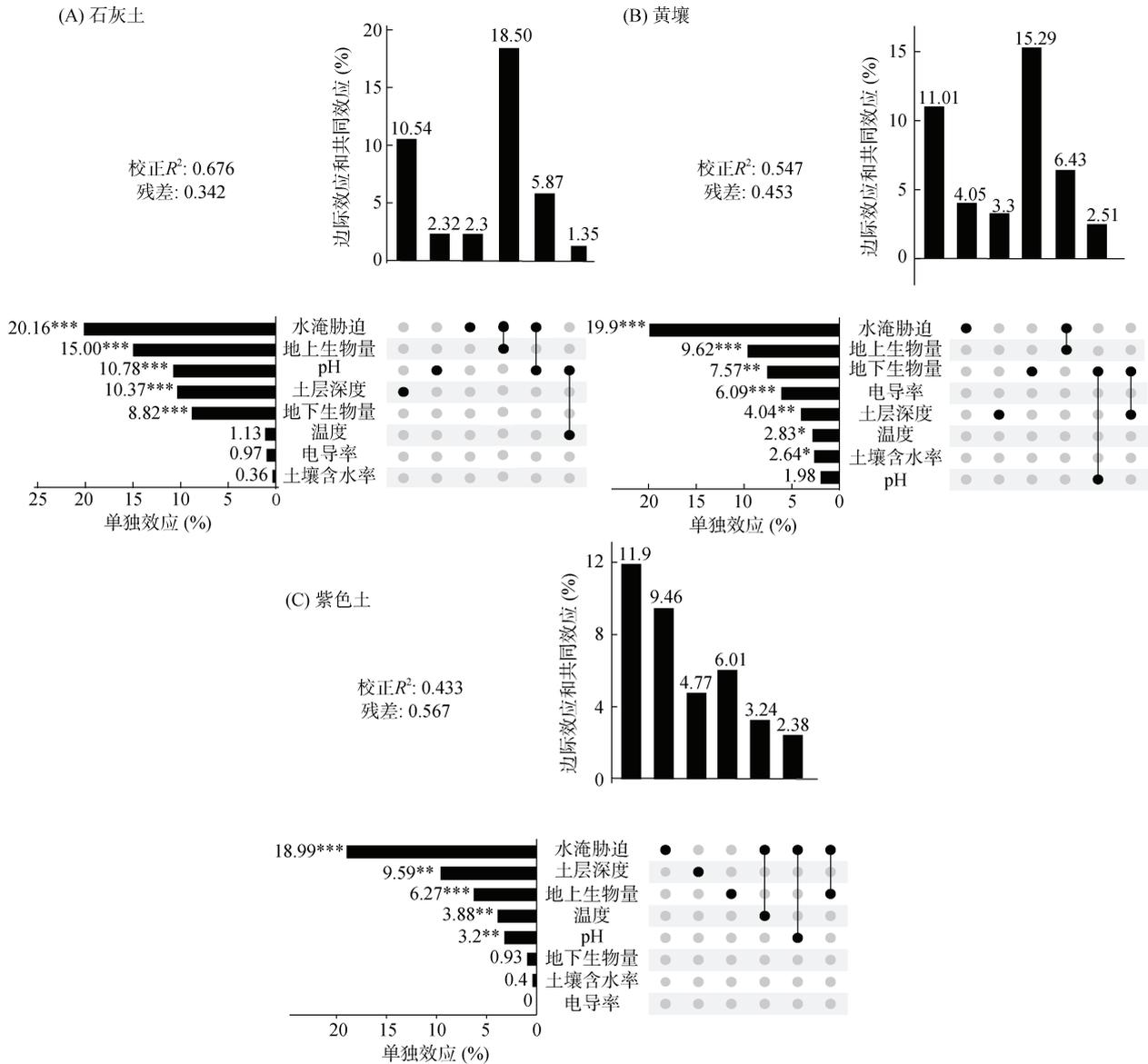
### 2.3 三峡水库消落带土壤有机碳含量和密度的主导因素

根据 RDA(冗余分析)结果,水淹胁迫、地上生物量、土层深度和 pH 是主导石灰土、黄壤和紫色土有机碳含量变化的主要环境因子。石灰土的有机碳含量被 8 个环境因子共同解释了 67.6%(校正  $R^2 = 0.676$ ) 的变异。各因子单独效应的相对重要性排序依次为水淹胁迫(20.16%)、地上生物量(15.00%)、pH(10.78%)、土层深度(10.37%)、地下生物量(8.82%)、温度

(1.13%)、电导率(0.97%)、土壤含水率(0.36%)。其中,水淹胁迫与地上生物量具有较大的共同效应(18.50%)(图 3A)。黄壤的有机碳含量由 8 个因子共同解释了 54.7%(校正  $R^2=0.547$ ) 的变异。各因子单独效应的相对重要性排序依次为水淹胁迫(19.9%)、地上生物量(9.62%)、地下生物量(7.57%)、电导率(6.09%)、土层深度(4.04%)、温度(2.83%)、土壤含水率(2.64%)、pH(1.98%),水淹胁迫与地上生物量具有较大的共同效应(15.29%)(图 3B)。紫色土的有机碳含量被 8 个环

境因子共同解释了 43.3%(校正  $R^2 = 0.433$ )的变异。各因子单独效应的相对重要性排序依次为水淹胁迫(18.99%)、土层深度(9.59%)、地上生物量(6.27%)、

温度(3.88%)、pH(3.2%)、地下生物量(0.93%)、土壤含水率(0.4%)，水淹胁迫和地上生物量具有最大的共同效应(6.01%)(图 3C)。



(变差分解和层次分割分析结果使用 Up Set 图来呈现，左侧柱形图为各因子的单独效应(来自层次分割)，其值等同于该因子的边际效应加上与其他因子的共同效应的平均分配值；右侧点阵图中，每行对应一个因子，对于每一列，孤立黑点表示各因子的边际效应，多点间连线表示这些因子间的共同效应，各组分解释的变差百分比(来自变差分解)展示在上方柱形图中；图中\*、\*\*、\*\*\*分别表示在  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$  水平影响显著。由于 Up set 图较大，本文中保留全部单独效应结果，保留边际效应和共同效应结果的排序前 3 位。下同)

图 3 8 个因子对土壤有机碳含量的相对重要性

图 4 显示，影响石灰土、黄壤和紫色土有机碳密度的主要环境因子为水淹胁迫、地上生物量、土层深度和 pH。石灰土有机碳密度被 8 个环境因子共同解释了 56.6%(校正  $R^2 = 0.566$ )的变异，其中影响较大的因子是水淹胁迫(17.68%)、地上生物量(11.86%)、土层深度(8.04%)、pH(7.40%)、地下生物量(6.61%)。水淹胁迫与植物地上生物量具有较大的共同效应(16.90%)(图 4A)。黄壤有机碳密度被 8 个环境因子共同解释了 68.4%(校

正  $R^2 = 0.684$ )的变异，单独效应和边际效应均显示水淹胁迫与土层深度影响较大，解释率分别为 39.01%、12.28% 和 31.65%、13.27%。此外，水淹胁迫与植物地上生物量具有较大的共同效应(15.33%)(图 4B)。紫色土有机碳密度被 8 个环境因子共同解释率为 42.7%(校正  $R^2 = 0.427$ )的变异，单独效应和边际效应解释率排序相同，水淹胁迫、土层深度和地上生物量，解释率分别为 19.57%、11.86%、4.54%(图 4C)。

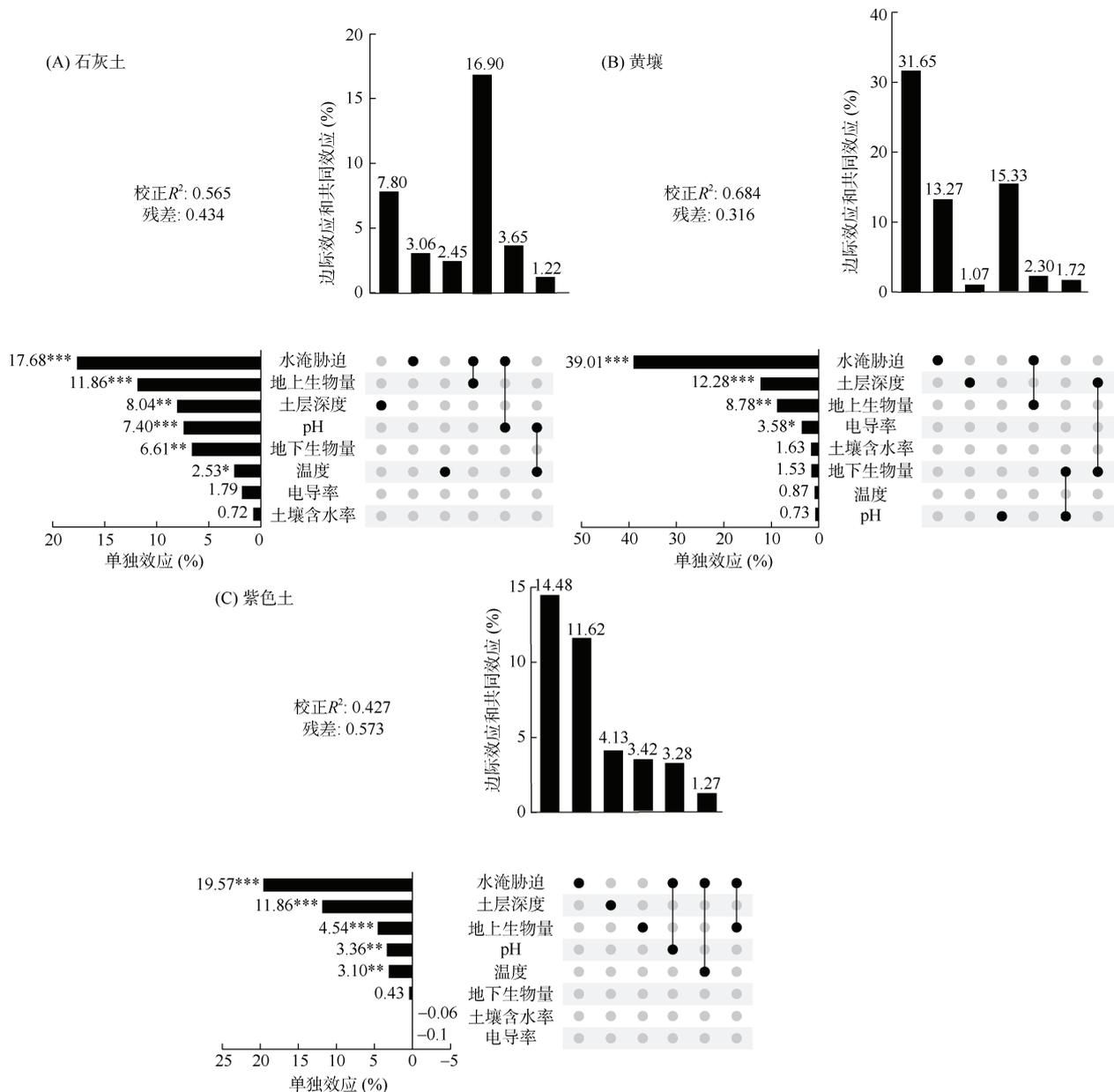


图 4 8 个因子对土壤有机碳密度影响的相对重要性

### 3 讨论

准确揭示水位波动对消落带土壤有机碳含量与密度的影响是核算消落带有机碳储量的重要前提,可为水库大坝科学管理提供理论参考。本研究结果表明,三峡水库周期性水位波动对消落带土壤有机碳含量和密度产生了深刻影响,不同历史土壤类型对水位波动的响应存在差异,其中水淹胁迫增加石灰土和紫色土有机碳含量和密度,有利于其有机碳的积累,但不利于黄壤有机碳的积累。此外,根据本研究 RDA 结果,3 种土壤类型的有机碳含量和密度还受到其他不同因素的影响。尽管如此,本研究结果与预期假设

一致,水淹胁迫是影响 3 种土壤类型有机碳含量和密度的共同主导因素,但不同土壤类型其影响机制存在差异。

植物是土壤有机碳的主要来源,其以残体等形式将碳输入土壤,进而提升土壤有机碳含量<sup>[14]</sup>。消落带植物群落的分布在水淹胁迫梯度下遵循“中度胁迫”假说<sup>[15]</sup>。本研究中,随着水淹胁迫强度的降低(或高程升高),植物生物量呈现“Λ”形变化,即先增加后减少。水淹胁迫在一定程度上可以促进植物生长,增加生物量,进而提高土壤有机碳含量,而水淹胁迫强度降低到一定程度后,其他环境因素可能限制植物生长,使生物量减少,进而影响土壤有机碳含量<sup>[16]</sup>。

本研究中,随着水淹胁迫强度的增加,石灰土的有机碳含量及密度表现上升趋势,并显著高于对照区。其影响因素包括水淹胁迫、生物量、pH和土层深度,与辛志远和夏建国<sup>[17]</sup>的研究结果一致,这可能是由于土壤类型以及历史土地利用的差异所引起。石灰土的形成时间相对较短,许多性质受母岩影响较大,表现为弱碱性且富含钙、镁等金属离子<sup>[18]</sup>。在这种钙质丰富的土壤中,细菌、放线菌等微生物活跃,从而可加速有机质分解并与钙、镁等离子结合形成生物富钙作用<sup>[19]</sup>,促进有机碳的累积。同时,碳酸钙在水中有一定的溶解性,当雨水或地表水渗透到石灰土时,碳酸钙会逐渐溶解,从而导致土壤结构和稳定性的部分损失<sup>[20]</sup>。三峡水库消落带多为斜坡地势,受到周期性水位波动和降雨的影响,高海拔区域会受到侵蚀<sup>[21]</sup>,这会导致土壤颗粒和有机碳源从高海拔向低海拔区域迁移,造成高海拔区域土壤有机碳含量和密度降低,而低海拔区域有机碳含量和密度相应增加<sup>[22]</sup>。此外,在水淹条件下,土壤中的氧气含量会减少,好氧微生物的活性会降低,造成土壤中的有机碳降解和矿化速率降低,使有机质分解速度减缓,有机碳得以积累<sup>[23]</sup>。因此,随着水淹胁迫的增强,土壤有机碳含量和密度的增加趋势更加明显。

紫色土在三峡水库消落带分布最广,该类土壤的有机碳含量和密度的变化趋势总体上与石灰土类似,表现为随着水淹胁迫的增强,土壤有机碳含量和密度呈现增加的趋势,表明周期性淹水在样点尺度上具有增加紫色土有机碳含量的功能。然而,这一趋势与蓄水初期(2011年)的观察结果相反<sup>[24]</sup>,在蓄水初期,水淹胁迫下紫色土有机碳含量显著低于对照区。这一结果表明,经过十多年的周期性水位波动,三峡水库消落带土壤有机碳含量和密度得到了显著提高。另外,本研究中,紫色土对照区表层土壤有机碳密度较高,这可能与其土地利用有关。此外,三峡水库消落带紫色土有机碳含量和密度还受到植物地上生物量和土层深度的影响。

与石灰土和紫色土相反,黄壤随着水淹胁迫的增强有机碳含量和密度先增加后下降,与樊晶晶等<sup>[25]</sup>研究结果相似,在较深土层中趋势更加显著。黄壤中的有机碳含量和密度主要受水淹胁迫、土层深度、地上生物量和地下生物量的影响。水淹胁迫和地上生物量对土壤有机碳含量有显著的共同效应,可能是通过改变地上群落组成和植物生物量直接影响土壤有机碳的含量。同时,相较于石灰土,黄壤更高的植物覆盖度和植物生物量有助于抵抗土壤侵蚀,进而减少有

机碳的流失<sup>[21]</sup>。黄壤的团聚体稳定性与有机碳含量和密度的分布规律相一致,在水淹胁迫增强的条件下,黄壤的团聚体平均几何直径和稳定性指数呈下降趋势<sup>[26]</sup>。团聚体对有机碳的包裹减弱了微生物对有机碳的分解,而团聚体稳定性的降低导致有机碳的暴露和矿化速度的增加,从而导致有机碳含量随着水淹胁迫的增强而减少。

总之,本研究强调了不同土壤类型在水淹胁迫下有机碳动态变化的差异性,以及生态系统因素(如植物生物量、团聚体稳定性等)和水淹胁迫对土壤有机碳含量的共同影响,这为更全面地理解和预测三峡水库消落带土壤有机碳的动态变化,以及提出相应的土壤和水源保护策略提供了重要的理论基础。

## 4 结论

三峡水库运行十余年显著影响了消落带土壤有机碳含量及密度,其影响效应和机制在不同土壤类型下存在较大差异。其中,水淹胁迫显著增加了石灰土和紫色土的有机碳含量和密度,但降低了黄壤的有机碳含量和密度。周期性水淹是土壤有机碳形成与稳定的主导因素。此外,石灰土中影响有机碳积累的主要因素还包括地上生物量、pH和土层深度,紫色土中还包括土层深度和地上生物量,黄壤中则为土层深度、地上生物量和地下生物量。

## 参考文献:

- [1] 张斌,张福韬,陈曦,等.土壤有机质周转过程及其矿物和团聚体物理调控机制[J].土壤与作物,2022,11(3):235-247.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [3] 潘根兴,周萍,李恋卿,等.固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J].土壤学报,2007,44(2):327-337.
- [4] 吕明权,吴胜军,陈春娣,等.三峡消落带生态系统研究文献计量分析[J].生态学报,2015,35(11):3504-3518.
- [5] 冉义国.三峡水库消落带土壤团聚体稳定特征及主导机制[D].北京:中国科学院大学,2021.
- [6] Ritchie J C, McCarty G W. <sup>137</sup>Cesium and soil carbon in a small agricultural watershed[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 69(1/2): 45-51.
- [7] Jia B, Niu Z Q, Wu Y N, et al. Waterlogging increases organic carbon decomposition in grassland soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2020, 148: 107927.
- [8] 温兆飞,吴胜军,陈吉龙,等.三峡库区农田面源污染典型区域制图及其研究现状评价[J].长江流域资源与环境,2014,23(12):1684-1692.

- [9] 张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [10] 王采娥, 黄梅, 王文银, 等. 三江源区高寒坡地退化植物群落多样性和地上生物量沿海拔梯度的变化特征[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3640-3655.
- [11] 李文娟, 朱凯, 冉义国, 等. 土地利用与反季节水位波动影响下土壤活性有机碳的组分特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 178-183+192.
- [12] Li Y Q, Chen Y P, Wang X Y, et al. Improvements in soil carbon and nitrogen capacities after shrub planting to stabilize sand dunes in China's horqin sandy land[J]. Sustainability, 2017, 9(4): 662.
- [13] 刘尧, 于馨, 于洋, 等. R 程序包“Rdacca.hp”在生态学数据分析中的应用: 案例与进展[J]. 植物生态学报, 2023, 47(1): 134-144.
- [14] Cleveland C C, Townsend A R, Taylor P, et al. Relationships among net primary productivity, nutrients and climate in tropical rain forest: A pan-tropical analysis[J]. Ecology Letters, 2011, 14(12): 1313-1317.
- [15] Escobedo V M, Rios R S, Alcayaga-Olivares Y, et al. Disturbance reinforces community assembly processes differentially across spatial scales[J]. Annals of Botany, 2021, 127(2): 175-189.
- [16] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands[M]. 5th ed. New York: Wiley, 2015.
- [17] 辛志远, 夏建国. 瀑布沟水库消落带土壤有机碳空间分布特征[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2020, 18(6): 90-98.
- [18] 朱书法, 刘丛强, 陶发祥, 等. 贵州喀斯特地区棕色石灰土与黄壤有机质剖面分布及稳定碳同位素组成差异[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 169-173.
- [19] 李龙波, 刘涛泽, 李晓东, 等. 贵州喀斯特地区典型土壤有机碳垂直分布特征及其同位素组成[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 241-247.
- [20] Heil D, Sposito G. Organic matter role in illitic soil colloids flocculation: I. counter ions and pH[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(5): 1241-1246.
- [21] 邓杨, 刘志强, 钟荣华, 等. 澜沧江糯扎渡水库消落带土壤侵蚀特征研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 495-502.
- [22] 李晓晴, 王伟, 操瑜, 等. 水库消落带碳氮输移转化研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(5): 881-889.
- [23] 曾奕. 黄土丘陵区侵蚀环境下的流域土壤有机碳动态变化及其影响机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [24] 贾国梅, 牛俊涛, 席颖. 三峡库区消落带湿地土壤有机碳及其组分特征[J]. 土壤, 2015, 47(5): 926-931.
- [25] 樊晶晶, 慈恩, 连茂山, 等. 三峡水库不同高程消落区水分变化对土壤有机碳的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 120-127.
- [26] 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.