

三峡水库消落带不同水位高程土壤团聚体变化特征

张淑娟^{1,2}, 贺秀斌¹, 鲍玉海¹, 唐 强¹

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所

山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为探究三峡水库消落带水位周期性涨落对土壤团聚体组成及稳定性的影响,采集消落带不同水位高程 150 m, 155 m, 160 m, 165 m, 170 m 和 175 m 的表层土壤,以未淹水高程 180 m 的表层土壤为对照,采用干筛法与湿筛法对土壤团聚体组成和稳定性进行了分析。结果表明:(1) 7 个水位高程土壤中 >0.25 mm 的非水稳性和水稳性团聚体含量分别占 95% 以上和 63.60% 以上; >5 mm 的非水稳性和水稳性团聚体含量均随水位高程降低显著降低,最大降幅分别为 19.71% 和 85.20%; <0.25 mm 的非水稳性和水稳性团聚体含量均随水位高程的降低呈增加的趋势,最大增幅分别为 289.97% 和 402.97%。(2) >0.25 mm 水稳性团聚体含量随着水位高程的降低显著降低,由 180 m 的 92.75% 逐渐降低到 150 m 的 63.60%; 平均重量直径和几何平均直径均随着水位高程的降低显著降低,降幅分别为 3.31%~66.43% 和 5.81%~81.35%; 分形维数介于 2.41~2.73, 随着水位高程的降低而增加; 与 180 m 土壤相比,消落带内土壤团聚体破碎率随着水位高程的降低而增加,增幅分别为 4.73%, 24.49%, 54.22%, 78.55%, 169.26% 和 463.51%。(3) 团聚体稳定性指标与土壤颗粒组成、容重和有机碳含量均显著或极显著相关,其中 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径与有机碳具有极显著正相关关系,分形维数和团聚体破碎率与有机碳极显著负相关。三峡水库消落带水位周期性涨落显著改变了团聚体的组成和稳定性,随水位高程的降低,团聚体稳定性显著降低,研究结果可为三峡水库消落带土壤侵蚀研究提供科学依据。

关键词:土壤团聚体; 稳定性; 水位高程; 消落带; 三峡水库

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)01-0025-06

Change Characteristics of Soil Aggregates at Different Water Levels in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir

ZHANG Shujuan^{1,2}, HE Xiubin¹, BAO Yuhai¹, TANG Qiang¹

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the effects of the periodic water-level fluctuation on soil aggregate composition and stability in the Three Gorges Reservoir, the topsoil samples were collected at different water levels of 150 m, 155 m, 160 m, 165 m, 170 m and 175 m in the water-level fluctuation zone and at the elevation of 180 m from the bank uplands where soil was used as a control since it was not subjected to inundation. The present study used dry and wet sieving methods to analyze the composition and stability of soil aggregate. The results showed that: (1) the content of >0.25 mm air-dried aggregates and water-stable aggregates at seven water levels accounted for more than 95% and 63.60%, respectively; the content of >5 mm air-dried aggregates and water-stable aggregates significantly decreased with the decrease of water levels, and the maximum reductions were 19.71% and 85.20%, respectively; the content of <0.25 mm air-dried aggregates and water-stable aggregates significantly increased with the decrease of water levels, and the maximum increases were 289.97% and 402.97%, respectively; (2) the content of >0.25 mm water-stable aggregates decreased significantly with the decrease of water levels, decreasing gradually from 92.75% of 180 m to 63.60% of 150 m;

收稿日期: 2020-03-13

修回日期: 2020-04-12

资助项目: 国家自然科学基金“三峡消落带土壤结构变化与抗剪强度响应机理”(41771321); “三峡水库消落带泥沙沉积动态变化及其对水文节律的响应”(41771320); “三峡水库消落带草本植物根系形态结构变化及土壤抗蚀性能响应”(41977075)

第一作者: 张淑娟(1989—), 女, 山东单县人, 博士研究生, 主要从事土壤结构与水土保持研究。E-mail: zsj0816@126.com

通信作者: 贺秀斌(1967—), 男, 陕西镇安人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: xiubinh@imde.ac.cn

mean weight diameter and geometric mean diameter decreased significantly with the decrease of water levels, and the decreased ranges were 3.31%~66.43% and 5.81%~81.35%, respectively; fractal dimension was between 2.41~2.73, which increased with the decrease of water levels; compared with soil at 180 m, the percentage of aggregate destruction in the water-level fluctuation zone increased by 4.73%, 24.49%, 54.22%, 78.55%, 169.26% and 463.51% with the decrease of water levels, respectively; (3) the aggregate stability indexes were significantly or extremely significantly related to soil particle composition, bulk density, and soil organic carbon; >0.25 mm water-stable aggregate content, mean weight diameter, and geometric mean diameter had the significantly positive correlation with soil organic carbon, while fractal dimension and the percentage of aggregate destruction were significantly negatively correlated with organic carbon. It can thus be deduced that the periodic water-level fluctuation of the Three Gorges Reservoir significantly changed aggregate composition and stability. With the decrease of water levels, soil aggregate stability decreased significantly. This research can provide a basis for the study of soil erosion in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir.

Keywords: soil aggregate; stability; water level; water-level fluctuation zone; Three Gorges Reservoir

土壤团聚体是土壤的基本结构单元,其大小分布和稳定性影响着土壤的孔隙性、渗透性和可蚀性,反映了土壤结构的优劣,决定着土壤肥力的高低,是评价土壤质量的重要指标,也是影响土壤侵蚀的重要因子^[1-2]。国内很多学者在西北黄土高原、亚热带红壤区和西南山地等区域,研究了不同土地利用方式、植被类型、耕作方式、水保措施及干湿交替等对团聚体特征的影响等^[3-7],但有关三峡水库消落带水位周期性涨落引起的长时间、反季节性的极端干湿交替对土壤团聚体组成及稳定性影响的研究相对较少。三峡水库消落带 72% 为土质消落带,紫色土为该区域的主要土壤类型,结构水稳性很差,遇水极易分散、崩解,为易蚀性土壤^[8]。在周期性水位涨落引起的极端反季节性高压淹水与高温出露交替影响下,加之消落带出露期又是库区雨热集中期,消落带环境条件发生剧变,土壤组成和结构,特别是土壤团聚体特征改变,引起土壤养分的迁移和土壤可蚀性的变化,导致土壤侵蚀加剧。当前针对三峡水库消落带的研究主要集中在土壤理化性质、土壤侵蚀、泥沙淤积、土地利用与植被重建等方面^[9-12],而针对三峡水库消落带土壤团聚体变化特征的研究尚不多见。基于此,本文以三峡水库消落带典型土壤紫色土为研究对象,采用干筛法和湿筛法研究消落带不同水位高程土壤团聚体组成,分析消落带长时间、反季节性的高压淹水浸泡与高温落干出露交替变化对团聚体组成和稳定性的影响,以期消落带土壤侵蚀的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区腹地重庆市忠县石宝镇库段(107°32'—108°14'E, 30°03'—30°35'N),地势较为

平坦,属典型的丘陵地貌。区域内气候属于亚热带季风气候,年均气温 18.2℃,年均降水量 1 172.1 mm,雨热同期,降雨多集中在 5—9 月^[13]。区域内出露岩层为第四系残积土层及侏罗系中统沙溪庙组砂泥岩,紫色土为该区域的主要土壤类型,在中国土壤系统分类中属于正常新成土,结构水稳性很差,遇水极易分散、崩解,为易蚀性土壤^[8]。受人为清库和初期淹水的影响,消落带植被以一年生和多年生草本植物为主,植被类型主要为狗牙根(*Cynodon dactylon*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、双穗雀稗(*Paspalum paspaloides*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、牛鞭草(*Hemarthria altissima*)和苍耳(*Xanthium sibiricum*)等^[13]。

1.2 土壤样品采集与处理

在忠县石宝镇共和村选取典型岸坡,于 2016 年 9 月水库蓄水前进行采样。为降低土地利用、土壤类型、地形地貌对研究结果的影响,本文选取生境类型相似的紫色土样带采集土壤样品,样带内的土地利用在人为清库前均为旱地、淹水后为以狗牙根为主的草地。土壤样品采集点分别布设在水位高程 150 m, 155 m, 160 m, 165 m, 170 m, 175 m 和 180 m, 采集 0—20 cm 的表层土壤,其中以未淹水高程 180 m 的土壤作为对照,样地概况见表 1。每个样点采集 3 块大小为 10×10×10 cm 的原状土块,放于样品盒内,用于团聚体组成分析;用环刀(体积为 100 cm³)采集原状土样品用于测定土壤容重;采用五点法采集 1 kg 土壤样品并混合均匀,带回实验室。采集的原状土块沿土壤自然结构轻轻剥成直径为 10—12 cm 的小土块,挑去其中的石块和粗根等杂物,自然风干后用以测定土壤团聚体的组成;采集的混合土壤在自然风干后,进行研磨和过筛,用于土壤理化性质分析。

表 1 不同水位高程样地概况

高程/m	淹水 年限/a	年淹水 时间/d	最大淹水 深度/m	土地 利用	土壤 类型	主要植被 类型	覆盖度/%	坡度/(°)
150	10	297	25.05	草地	紫色土	狗牙根、空心莲子草	63	5~9
155	10	257	20.05	草地	紫色土	狗牙根、空心莲子草	63	4~8
160	8	224	15.05	草地	紫色土	狗牙根、双穗雀稗、苍耳	66	4~7
165	8	172	10.05	草地	紫色土	狗牙根、双穗雀稗、苍耳、马唐	67	4~7
170	8	116	5.05	草地	紫色土	狗牙根、牛鞭草、马唐、苍耳	69	4~7
175	6	3	0.05	草地	紫色土	狗牙根、牛鞭草、马唐、苍耳	70	3~5
180	0	0	0	草地	紫色土	狗牙根、牛鞭草、马唐、苍耳	72	3~5

注:淹水年限是指从开始淹水(2006 年)至采样年(2016 年)的年限。

1.3 样品测定与指标计算

土壤理化性质采用常规方法测定,其中土壤颗粒组成采用 MasterSize 2000 型激光粒度分析仪测定,根据美国制划分标准进行划分,即砂粒为 0.05~2 mm,粉粒为 0.002~0.05 mm,黏粒为<0.002 mm;土壤容重用环刀法测定;土壤有机碳用元素分析仪测定。采样点土壤基本理化性质见表 2。

表 2 不同水位高程土壤基本理化性质

高程/m	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	容重/(g·cm ⁻³)	有机碳/(g·kg ⁻¹)
150	24.98±7.75	72.65±6.76	2.37±0.42	1.53±0.15	3.63±1.13
155	21.8±1.33	75.76±1.38	2.43±0.29	1.60±0.12	4.69±0.42
160	20.25±0.88	76.49±0.82	3.25±0.09	1.57±0.07	7.91±0.87
165	13.54±0.58	83.02±0.66	3.44±0.09	1.54±0.12	9.24±0.92
170	16.16±0.2	80.94±0.14	2.90±0.10	1.37±0.17	7.93±0.92
175	10.32±0.63	86.52±0.45	3.16±0.19	1.42±0.10	10.56±1.22
180	8.17±0.81	88.18±0.44	3.65±0.43	1.26±0.26	12.59±1.51

土壤团聚体采用干筛法和湿筛法分别测定非水稳定性团聚体和水稳定性团聚体含量^[14]。根据湿筛法测定的水稳性团聚体组成结果,计算出>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)和团聚体的破坏率(PAD)等常用指标来表征团聚体稳定性,其中 $R_{0.25}$,MWD 和 GMD 越大, D 和 PAD 越小,表示土壤团聚度越高,团聚体稳定性越好^[3,7]。各指标计算公式如下,其中分形维数采用杨培岭等^[15]推导的公式计算:

$$R_{0.25} = m_j / m \times 100 \% \tag{1}$$

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

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

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

$$PAD = \frac{W_d - W_w}{W_d} \times 100 \% \tag{5}$$

式中: m_j 为>0.25 mm 水稳定性大团聚体的风干质量(g); m 为样品总质量(g); X_i 是第 i 粒级的平均直径(mm); n 为筛子的数量; m_i 为第 i 粒级的团聚体重量

(g); w_i 为直径小于 X_i 的累积重量(g); X_{\max} 为最大粒级土粒平均直径(mm); W_d 为>0.25 mm 干筛团聚体百分含量(%); W_w 为>0.25 mm 湿筛团聚体百分含量(%)。

1.4 数据分析

采用 SPSS 19.0 软件中的单因素方差分析(ANOVA)和多重比较(LSD 法, $p<0.05$)对消落带不同水位高程土壤团聚体组成和稳定性指标的差异性进行分析,采用 Person 法对团聚体指标和土壤理化性质指标进行相关分析,采用 Origin 2016 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 土壤非水稳性团聚体分布特征

不同水位高程土壤非水稳定性团聚体组成见图 1。7 个水位高程土壤团聚体均以>0.25 mm 的大团聚体为主,占总量的 95%以上。土壤非水稳性团聚体组成的 6 个粒级中,>5 mm 的团聚体含量(63.55%~79.15%)最大。与对照组 180 m 的土壤相比,消落带内>5 mm 的非水稳性团聚体含量平均降低了 13.90%,5~2 mm,2~1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm 和<0.25 mm 的非水稳性团聚体含量则分别增加了 19.06%,70.13%,112.34%,238.42%和 181.28%。消落带内>5 mm 的非水稳性团聚体含量随水位高程的降低而降低,最大降幅为 19.71%;2~1 mm 的非水稳性团聚体含量随水

位高程降低呈增加的趋势,由 180 m 的 4.31% 增加到 150 m 的 8.56%;0.5~0.25 mm 的团聚体随水位高程的降低表现为先增加后降低,最大值为 160 m 的 4.02%;消落带内<0.25 mm 的微团聚体含量随着

水位高程的降低整体呈增加的趋势,增幅为 9.74%~289.97%。表明周期性的淹水一出露显著影响了土壤非水稳性团聚体组成,部分大粒径团聚体崩解为小粒径团聚体或微团聚体,水位高程越低,变化越显著。

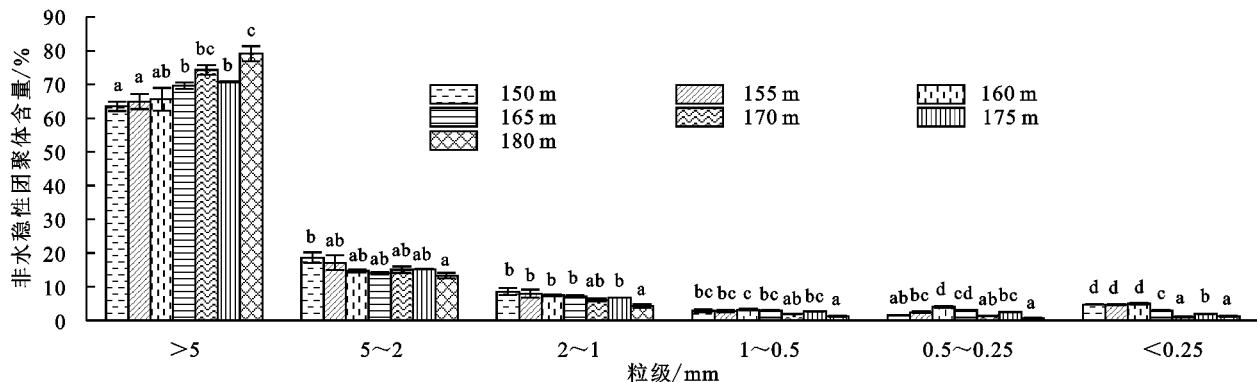


图 1 不同水位高程土壤非水稳性团聚体组成

2.2 土壤水稳性团聚体分布特征

不同水位高程土壤水稳性团聚体的分布见图 2。7 个水位高程土壤中>0.25 mm 的水稳性大团聚体占总量的 63.60% 以上。土壤水稳性团聚体组成的 6 个粒径中,150 m 土壤中<0.25 mm 的微团聚体含量最大,为 36.40%,其余 6 个水位高程土壤中>5 mm 的水稳性团聚体含量最大,为 32.38%~77.35%。与对照组 180 m 的土壤相比,消落带内>5 mm 的水稳性团聚体含量平均降低了 33.41%,5~2 mm,2~1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm 和<0.25 mm 的水稳性团聚体含量则分别增加 48.02%,132.71%,193.53%,236.81%和 120.57%。消落带内>5 mm 的水稳性团聚体含量随着水位高程的

降低显著降低($p<0.05$),由 175 m 的 72.35% 逐渐降低到 150 m 的 11.45%。消落带内 5~2 mm 水稳性团聚体含量随水位高程变化表现为中水位高程(160~165 m)含量最低,高水位高程(170~175 m)含量次之,低水位高程(150~155 m)含量最高。消落带内 2~1 mm 和 1~0.5 mm 水稳性团聚体含量随水位高程变化均表现为高水位高程<中水位高程<低水位高程。0.5~0.25 mm 和<0.25 mm 水稳性团聚体含量均随着水位高程的降低而增加,最大增幅分别为 701.39%和 402.97%。表明周期性水位涨落对水稳性团聚体组成影响显著,随着水位高程的降低,大团聚体崩解为微团聚体的含量显著增加。

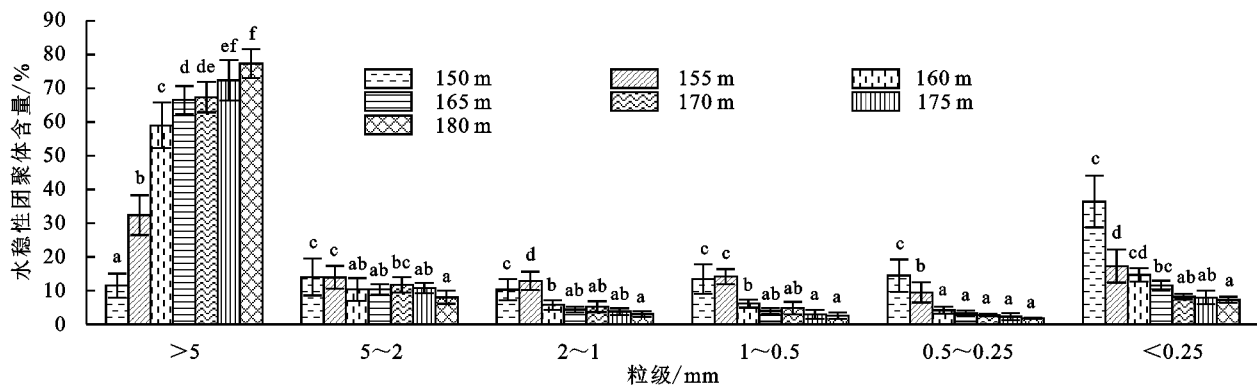


图 2 不同水位高程土壤水稳性团聚体组成

2.3 土壤团聚体稳定性变化特征

不同水位高程土壤团聚体稳定性指标见表 3。与对照组 180 m 的土壤相比,消落带内>0.25 mm 的水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)分别降低了 9.43%,24.45%和 36.31%,团聚体分形维数(D)和团聚体破坏率(PAD)分别增加 4.95%和 132.24%。消落带内 $R_{0.25}$ 随着水位高程的降低显著降低,由 175 m 的 92.05% 逐渐

降低到 150 m 的 63.60%;消落带内 MWD 和 GMD 降幅分别为 3.31%~66.43%和 5.81%~81.35%,随着水位高程的变化,MWD 和 GMD 均表现为 180 m>175 m>170 m>165 m>160 m>155 m>150 m,且不同水位间差异显著($p<0.05$)。 D 介于 2.41~2.73,随着水位高程的降低显著增加。PAD 在 160 m 及以上水位高程间差异不显著($p>0.05$),与 180 m 的土壤相比,消落带内 PAD 随着水位高程的降低而增

加,增幅分别为 4.73%,24.49%,54.22%,78.55%,169.26%和 463.51%。表明周期性的水位涨落显著降低了土壤团聚体的稳定性,淹水时间越长,团聚体越不稳定。

表 3 不同水位高程土壤团聚体稳定性指标

高程/m	$R_{0.25}/\%$	MWD/mm	GMD/mm	D/mm	PAD/%
150	63.60±7.65a	1.42±0.28a	0.61±0.19a	2.73±0.07c	33.36±8.18c
155	82.75±4.87b	2.46±0.28b	1.32±0.29b	2.54±0.08b	15.94±0.76b
160	85.38±1.98bc	3.48±0.22c	2.11±0.25c	2.55±0.03b	10.57±1.27a
165	88.03±1.73c	3.81±0.18d	2.53±0.25d	2.52±0.03b	9.13±1.27a
170	91.80±0.79d	3.91±0.14de	2.83±0.14e	2.42±0.03a	7.37±0.44a
175	92.05±1.99d	4.09±0.24ef	3.08±0.39ef	2.41±0.05a	6.20±2.11a
180	92.75±0.94d	4.23±0.13f	3.27±0.21f	2.41±0.04a	5.92±0.67a

注:同一列不同小写字母表示不同水位团聚体稳定性指标差异显著($p<0.05$,LSD)。

2.4 土壤团聚体稳定性与理化性质相关分析

由团聚体稳定性指标与土壤颗粒组成、土壤容重和有机碳的相关性分析可知(表 4),团聚体的 5 个稳定性指标与土壤理化性质之间均具有显著或极显著的相关性($p<0.05$ 或 $p<0.01$)。 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径与砂粒含量、容重之间显著或极显著负相关,而与粉粒、黏粒、有机碳之间具有显著或极显著正相关关系。分形维数、结构破碎率则相反,与土壤砂粒含量、容重之间呈显著或极显著正相关,而与粉粒含量、黏粒含量、有机碳含量之间具有显著或极显著负相关关系。表明土壤颗粒组成、容重和有机碳对土壤团聚体稳定性具有显著影响。

表 4 土壤团聚体稳定性指标与土壤理化性质相关分析

指标	砂粒	粉粒	黏粒	容重	有机碳
$R_{0.25}$	-0.802**	0.810**	0.587*	-0.561*	0.785**
MWD	-0.807**	0.808**	0.677**	-0.657*	0.884**
GMD	-0.824**	0.827**	0.664**	-0.735**	0.923**
D	0.764**	-0.775**	-0.531*	0.691**	-0.854**
PAD	0.803**	-0.808**	-0.629*	0.548*	-0.788**

注:* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关;自由度为 41。

3 讨论

三峡水库消落带水位周期性涨落导致不同水位高程土壤的淹水浸泡时间、淹水深度、水柱压力、干湿交替频率和幅度等具有差异(表 1),显著影响了土壤非水稳性和水稳性团聚体组成。本研究发现,与非消落带 180 m 土壤相比,消落带内 $>5\text{ mm}$ 的非水稳性和水稳性团聚体含量显著降低,其余 5 个粒级的非水稳性和水稳性团聚体含量显著增加;随着水位高程的降低, $>5\text{ mm}$ 的非水稳性团聚体和水稳性团聚体均显著降低,而 $<0.25\text{ mm}$ 的非水稳性团聚体和水稳性团聚体均显著增加。表明三峡水库消落带周期性水位涨落使得部分大粒径团聚体崩解为小粒径团聚体或微团聚体,且随着水位高程降低,变化幅度增大,这

可能与消落带水位快速升降引起的团聚体崩解有关。陆铸畴等^[16]研究表明三峡库区消落带土壤团聚体的破坏主要是由土壤孔隙中的气泡爆破产生的消散作用引起的。紫色土结构水稳性极差,在淹水过程中,水分迅速进入团聚体内部挤压空气造成团聚体内部压强增大从而发生崩解,随着水位高程的降低,淹水深度和时间增加,水压力增大,干湿交替更加频繁,紫色土软化和泥化程度增大,土壤粘结力降低,促进团聚体水化,增强消散作用,导致大粒径团聚体破碎为小粒径团聚体的含量增加。本研究表明,150 m 水稳性团聚体含量变化最为显著,可能是因为 150 m 处水位较低,除受周期性水位涨落影响外,还受波浪和行船引起的涌浪的影响,土壤结构破坏程度大,淹水过程中团聚体更易崩解。

三峡水库消落带水位周期性涨落对土壤团聚体稳定性影响显著。本文研究发现, $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径均随着水位高程的降低而降低,而分形维数和团聚体破碎率则随着水位高程的降低呈增加的趋势。表明团聚体稳定性随着水位高程的降低显著降低,而陆铸畴等^[16]研究结果则表明,消落带中间高程团聚体最稳定,低水位高程团聚体稳定性最差,这种差异可能与研究区的植被组成、有机质含量、土地利用和研究方法等不同有关。干湿交替主要通过影响团聚体孔隙结构和微生物群落活动,进而影响团聚体的胀缩和胶结剂的稳定性,改变团聚体水稳性^[6]。本文中团聚体稳定性随着水位高程的降低而显著降低,可能是因为受淹水时间、淹水深度、干湿交替频率和强度的影响,消落带不同水位高程植物生长、动物及微生物活动和土壤性质等发生变化,进而影响土壤团聚体稳定性。随着水位高程的降低,淹水时间和淹水深度增加,植被的生长期变短,植被的多样性和覆盖度降低(表 1),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,土壤团聚体更易分散。消落带动物如蚯蚓

和蚂蚁等的排泄物和挖掘洞穴等活动可影响团聚体的形成和稳定性,微生物群落活动通过影响团聚体胶结剂的分解和合成,改变土壤团聚体稳定性^[6]。三峡水库消落带土壤环境因子如温度、湿度和氧气等随着淹水时间和淹水深度的增加而发生变化,造成消落带土壤动物及微生物活动随着水位高程降低而受到限制,影响土壤团聚体稳定性。土壤理化性质中,有机胶结剂土壤有机质和无机胶结剂土壤黏粒对于团聚体的稳定性具有重要作用。本研究表明消落带土壤团聚体稳定性与土壤黏粒和有机碳之间均具有显著或极显著相关性(表4),但与黏粒相比,团聚体稳定性与有机碳之间的相关性更为显著,主要是因为本研究中土壤黏粒含量极低(表2),对团聚体的胶结作用较弱,该区域主要以有机碳的胶结作用为主。土壤有机质作为一种重要的胶结物质,不仅可以增强团聚体之间的粘结力,而且土壤有机质在团聚体周围形成疏水表面层,可以减缓土壤湿化速率,降低消散作用,提高团聚体稳定性^[17]。本文中土壤有机碳随着水位高程的降低显著降低(表2),导致消散作用强度随着水位高程降低而增强,团聚体稳定性降低。本文通过对消落带不同水位高程的团聚体特征进行分析,揭示了消落带水位周期性涨落对团聚体组成和稳定性的影响,今后应加强其影响机制的研究。

4 结论

(1) 7个水位高程土壤团聚体组成均以 >0.25 mm的大团聚体为主, >0.25 mm的非水稳性和水稳性团聚体含量分别占95%以上和63.6%以上; >5 mm的非水稳性和水稳性团聚体含量均随水位高程降低而降低; <0.25 mm的非水稳性和水稳性团聚体含量均随水位高程的降低整体呈增加的趋势。表明三峡水库消落带水位周期性涨落下部分大粒径团聚体崩解为小粒径团聚体或微团聚体,水位高程越低,变化越显著。

(2) >0.25 mm水稳性团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径均随着水位高程的降低显著降低;分形维数和破碎率随着水位高程的降低显著增加。表明三峡水库消落带水位周期性涨落降低了团聚体的稳定性,团聚体稳定性随水位高程的降低而降低。

(3) 团聚体稳定性指标与土壤颗粒组成、容重和有机碳含量均显著或极显著相关,其中 >0.25 mm水稳性团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径与有机碳极显著正相关,分形维数和团聚体破碎率则与有机碳极显著负相关。

参考文献:

- [1] 林培松,高全洲.不同土地利用方式下紫色土结构特性变化研究[J].水土保持研究,2010,17(4):134-138.
- [2] Bernard B, Eric R. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels [J]. Catena, 2002,47(2):133-149.
- [3] 李娟,韩霁昌,陈超,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):248-253,259.
- [4] 李燕燕,刘亮英,张志坚,等.亚热带红壤区自然恢复草地转换为人工林后对土壤团聚体有机碳周转的影响[J].水土保持学报,2019,33(11):80-85.
- [5] 韩加强,高晓飞,路炳军,等.水保措施对褐土水稳性大团聚体的影响研究[J].水土保持研究,2012,19(6):54-57.
- [6] 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.
- [7] 江仁涛,李富程,沈淦涛.川西北高寒草地退化对土壤团聚体组成及稳定性的影响[J].水土保持研究,2018,25(4):36-42.
- [8] He X B, Bao Y H, Nan H W, et al. Tillage pedogenesis of purple soils in Southwestern China [J]. Journal of Mountain Science, 2009,6(2):205-210.
- [9] 吕发友,唐强,张淑娟,等.三峡水库消落带紫色土物理性质对反复淹水作用的响应[J].水土保持研究,2018,25(1):276-281.
- [10] Bao Y H, He X B, Wen A B, et al. Dynamic changes of soil erosion in a typical disturbance zone of China's Three Gorges Reservoir [J]. Catena, 2018,169:128-139.
- [11] Tang Q, Bao Y H, He X B, et al. Flow regulation manipulates contemporary seasonal sedimentary dynamics in the reservoir fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Science of the Total Environment, 2016,548:410-420.
- [12] 汤显强,吴敏,金峰.三峡库区消落带植被恢复重建模式探讨[J].长江科学院院报,2012,29(3):13-17.
- [13] Zhang S J, Tang Q, Bao Y H, et al. Effects of seasonal water-level fluctuation on soil pore structure in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Journal of Mountain Science, 2018,15(10):107-121.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [15] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [16] 陆铸畴,包忻怡, Liu X,等.应用 Le Bissonnais 法研究三峡库区消落带土壤水稳性团聚体稳定性[J].灌溉排水学报,2018,37(5):115-120.
- [17] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,41(4):618-623.