

三峡水库消落带紫色土物理性质对反复淹水作用的响应

吕发友^{1,2}, 唐 强¹, 张淑娟^{1,2}, 贺秀斌¹, 鲍玉海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:为探明三峡水库土质消落带土壤物理性质对反复淹水的响应,选取消落带代表性土壤紫色土,以 180 m 处未淹水土壤为对照,分析了土壤基本物理性质在消落带上的分布规律及其对淹水的响应规律。结果表明:表层土的基本物理性质对淹水响应最为强烈。随水位高程增加,土壤容重逐渐降低,最大降幅 16.42%;淹水后土壤容重显著增加,最大增幅达 38.42%。孔隙率整体呈先降低后增高的趋势,在 160 m 处出现最小值 40.77%;淹水后孔隙率显著降低,最大降幅达 35.10%。颗粒组成呈低水位段粗、高水位段细,表层粗、下层细的特征分布;随水位高程增加,粗颗粒(砂粒)的体积百分比和中值粒径均减小,降幅分别为 40.47%和 52.99%;淹水后砂粒含量和中值粒径均显著增加,最大增幅达 91.60%和 141.72%。同一时期黏聚力在消落带以先增高后降低的趋势分布,最大变化幅度达 195.76%,淹水前后黏聚力最大变化幅度达 163.24%;内摩擦角的分布随水位高程变化较小,淹水前后内摩擦角最大变化幅度达 54.42%。本文研究结果可为消落带土壤侵蚀机理研究和科学防治提供参考。

关键词:三峡水库;消落带;紫色土;物理性质;反复淹水

中图分类号:S151.9⁺2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0276-06

Response of Purple Soil Physical Properties to Repeated Water Flooding in Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir

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

(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: The purple soil of Three Gorges Reservoir region water-level fluctuation zone was selected to explore the response of soil physical properties to repeated flooding. The distribution pattern of soil physical properties and their response to water flooding were analyzed and compared with the non-flooded soil at 180 m. Soil samples were collected in two layers of 10 cm each for analysis. The results showed that the strongest influence on the topsoil was observed due to flooding. The soil bulk density decreased with an increase in elevation of water level, and the maximum decrease in the soil bulk density was 16.42%. After impounding, the soil bulk density increased significantly, and the maximum increase in soil bulk density was 38.42%. The soil porosity reached to the lowest point (40.77%) at 160 m. Flooding significantly reduced the porosity, and it reached its lowest point of 35.10%. The grain composition became coarser with the decrease of the water elevation level and soil layer. With the increase of elevation of the water level, percentage volume of coarse particles gradually decreased for the two layers, and decreased by 40.47% and 52.99%, respectively. Flooding had positive effects on the percent volume of sand and median diameter, and the maximum value of sand increased by 91.60% and 141.72% for the two layers, respectively. The cohesion presented the uni-modal curve along the water-level fluctuation during the same period, the maximum amplitude of variation was 195.76%. Flooding resulted in the increase of soil cohesion, the maximum variation was 163.24%. There was no significant distinction in internal friction angle with elevation changes. Flooding altered the in-

收稿日期:2017-02-26

修回日期:2017-04-15

资助项目:国家自然科学基金项目(41571278);中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-SW-STS-175);中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(2013&2016)

第一作者:吕发友(1990—),男,四川中江人,硕士研究生,主要从事消落带土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:fayoul@163.com

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

ternal friction angle, and its maximum value reached to 54.42%. The results of the present study can be used as the references for analyzing the mechanism of soil erosion and controlling the soil erosion.

Keywords: Three Gorges Reservoir; water-level fluctuation zone; physical properties; repeated flooding

三峡水库先后经过3次试验性蓄水(156 m, 172 m 和 175 m)后,在库岸周边形成了垂直落差30 m、面积349 km²的消落带^[1-7]。受水位调度节律影响,水库水位每年在145~175 m间周期性涨落,消落带在长期的反复淹水一出露和干—湿交替过程中,消落带水文、植被等条件在短时间内发生突变^[6,8-12]。消落带生境的剧烈改变对其水陆交替生态系统带来巨大变化,而土壤物理性质是反映消落带这一变化的重要指标。

有关消落带土壤物理性质对水库蓄水的响应规律,国内外学者已开展了一些探索性研究。已有研究表明,三峡水库周期性蓄水条件下,水土相互作用过程主要包括以下两个方面:其一,冬季高压淹水浸泡作用,在此阶段,库水对消落带土体的压缩固结、软化和泥化等作用将显著改变结构特征,期间还伴随着库水对土体中可溶成分的长期溶蚀、冲刷以及离子交换等作用,这将导致土壤颗粒组成和孔隙率发生变化,同时促进土体的压缩固结、软化、泥化进程^[13-15];其二,在一个水位涨落周期(一年)内,消落带土壤至少经过一次干湿交替,多次循环后土体将发生不可逆的性质变化和结构损伤^[16-17]。程瑞梅等^[18]对三峡水库消落带淹水区段土壤物理性质的分析表明,淹水后消落带土壤的容重增加、孔隙度减少;康义等^[11]对三峡库区消落带土壤物理性质的定位监测结果表明,消落带土壤容重逐年增长,田间持水量和孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度)逐年减小,同时与未受库水影响区域相比,受库水影响区域的土壤容重增长率、土壤最大持水量和孔隙度的衰减率都更大,并且各土层间的土壤物理性质指标间存在显著性差异。

总之,三峡水库消落带在库水理化、力学作用的共同影响下,土壤容重、颗粒组成、孔隙结构和抗剪强度参数等指标都将发生显著变化,并可能在多次作用后达到相对稳定的状态^[19-20]。但三峡水库独特的调度方式,使得不同水位高程的消落带土壤在水中浸泡和出露时间不同,遭受反复淹水作用存在以海拔为主要因素的分异梯度,这将导致消落带土壤物理性质在空间和时间上具有较高的变异性^[18],但三峡水库消落带形成时间较短,现有研究尚未对这一规律作出系统性的阐述。本文通过对三峡库区消落带重庆忠县段紫色土的系统采样分析,对比未受库水影响的消落带紫色土(175 m 以上),旨在研究三峡水库自2006

年首次蓄水后,周期性反自然洪枯节律涨落的库水对消落带土壤物理性质的影响,揭示经过多次淹水胁迫后消落带土壤物理特性的空间分异规律,为消落带水土特征及土壤侵蚀机理研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区中游重庆市忠县石宝镇(107°32′—108°14′E, 30°03′—30°35′N)。该区地处新华夏构造体系第三隆起带及其与大巴山弧形褶皱带交汇处,属典型的中低山丘陵地貌。地质组成以紫色泥岩和砂岩、泥灰岩和灰岩为主,土壤以紫色土为主,伴有黄壤、黄棕壤和水稻土等,主要土地利用类型有旱地、水田、草地和林地等^[21-22]。研究区属暖湿亚热带季风气候区,年均气温17~19℃,年均降水量1 045~1 140 mm,年均相对湿度为77.6%,年均温较同纬度其他地区高^[23-24]。消落带出露期天气炎热潮湿,多大雨、暴雨,伴有伏旱。水库正常运行后消落带植被主要有—年生和多年生草本植物^[24-25]。受三峡水库“蓄清排浑”年调度方式的影响,水库水位于每年汛期前(5月末)降至防洪限制水位145 m,汛期后(10月初)开始逐步蓄水至175 m以便通航发电,次年2—6月再次逐步回落。三峡水库年水位变化曲线(2006—2016)见图1。

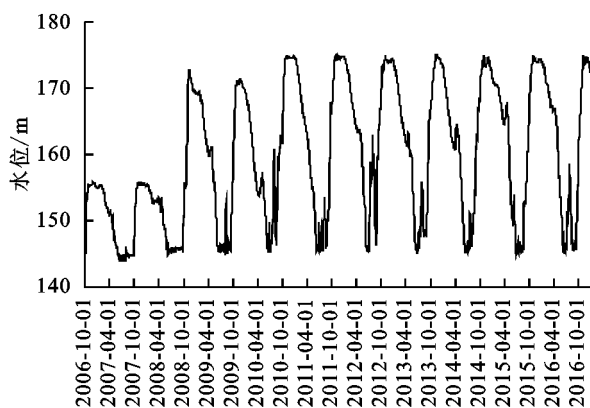


图1 2006—2016年三峡水库年水位变化曲线

1.2 土壤样品采集

2016年9月三峡水库蓄水前,在研究区石宝镇共和村土质消落带进行土壤样品采集。沿消落带海拔从下到上每隔5 m设置一个采样点,以此标准设置的采样点的水位高程依次是150 m, 155 m, 160 m, 165 m, 170 m, 175 m 和 180 m(对照组)。各采样点坡度平缓(<3°)、淹水前均为旱地、淹水后均恢复为

覆盖度 90% 以上的狗牙根 (*Cynodon dactylon* L. Pers.) 草地, 为研究不同土层深度紫色土物理特性对反复淹水的响应规律, 采样时清除上覆沉积泥沙, 从沙土分界面开始逐层取样, 每 10 cm 为一层, 每个采样点取两个土层样 (0—10 cm, 10—20 cm)。

在各采样点分别挖土壤剖面, 按 0—10 cm, 10—20 cm 分层取样, 包括: (1) 普通环刀样 3 个 (100 cm³), 用于测定容重、干密度、含水率; (2) 普通环刀样 5 个 (直径 6.18 cm、高 2 cm、体积 60 cm³), 4 个用于直剪, 1 个备用; (3) 散土样 1 kg, 用于测定粒径组成等。将采集的原状土样密封保存, 散土样自然风干碾细过 2 mm 土壤筛备用。

1.3 物理性质测定

本文中土壤各物理力学性质指标测定如下: 土壤容重、质量含水率用环刀法测定; 比重用比重瓶法测定; 孔隙率由比重 ρ_s 和容重 ρ_d , 通过推导公式 $n=1-\rho_d/\rho_s$ 得到^[25]; 颗粒组成通过 Mastersizer2000 激光粒度仪测定; 抗剪强度参数 (黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ) 通过 ZJ 四联动直剪仪进行测定。

1.4 数据整理和统计分析

数据整理和统计分析用 Excel 和 Origin 8.1 软件完成, 显著性检验用 SPSS 19.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 反复淹水对土壤容重的影响

消落带土壤容重随水位高程分布情况见图 2。总体看来, 土壤容重随土层深度的增加而增大, 相对于表土层 (0—10 cm), 对照组的层间土壤容重增长率 (34.68%) 明显高于消落带土壤 (0.76%~25.54%, 平均增长率 11.50%), 淹水前后容重层间差异的单因素方差分析结果表明, 对照组和消落带土壤容重的层间变化的差异显著, 可见周期性淹水能有效减小消落带土壤容重的层间差异。随水位高程的增加, 10—20 cm 层土壤容重以一阶线性函数的趋势降低 ($y=3.18-0.01x$, $R^2=0.847$), 最大降幅达 16.42%, 0—10 cm 层土壤容重分布具有一定波动性, 无明显拟合规律, 但总体趋势相同, 波动的原因可能是表土层受人类活动和植被根系等的干扰相对较大; 与对照组相比, 除 175 m 采样点 0—10 cm 层外, 各土层的土壤容重均有所增大, 最大增长百分比分别为 38.42% (160 m, 0—10 cm 层) 和 12.54% (155 m, 10—20 cm 层), 可见淹水对表土层土壤容重的影响更为明显。

2.2 反复淹水对土壤孔隙率的影响

不同高程消落带土壤孔隙率随水位高程分布情况见图 3。总体看来, 库水作用下, 表层 (0—10 cm)

土壤孔隙率的响应程度强于 10—20 cm 层, 孔隙率分布范围为 40.77%~62.82%, 且表层土壤的孔隙率普遍大于 10—20 cm 土层 (160 m 和 165 m 点除外), 这可能是由于下层土成土时间更早, 固结度更高, 表层土受人类活动干扰、植被根系和干湿交替作用等的影响更剧烈所致。随水位高程增加, 0—10 cm 土层的孔隙率先减小后增大, 在 160 m 处出现极小值 40.77%; 10—20 cm 层土壤孔隙率随高程增加呈增长趋势, 孔隙率变化范围为 42.32%~49.31%。除 175 m 采样点 10—20 cm 层外, 消落带土壤的孔隙率均低于对照组, 最大降幅达 35.10% (160 m, 0—10 cm 层), 这表明周期性淹水促进了消落带土壤的固结过程, 水位高程越低, 消落带土体所受库水压力越大、作用时间越长, 固结度越高, 孔隙率越小; 水位高程越高, 消落带土体受库水压力越小、时间越短, 固结度越低, 孔隙率越大; 150~160 m 水位高程段消落带土体在 0—10 cm 层孔隙率与 160~175 m 高程段变化趋势相反的原因可能是由于相对于固结过程中的压力作用, 此段消落带表土层受库水浸泡等作用的影响更大, 在库水浸泡过程中, 低水位段消落带土壤浸泡时间更长, 库水溶解和波浪冲刷过程带走了表土中的大量细土颗粒所致。

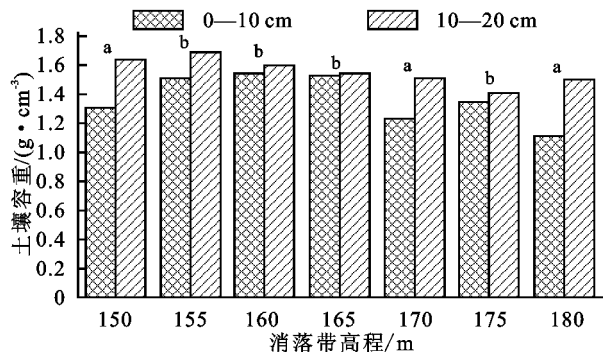


图2 不同高程消落带土壤容重变化

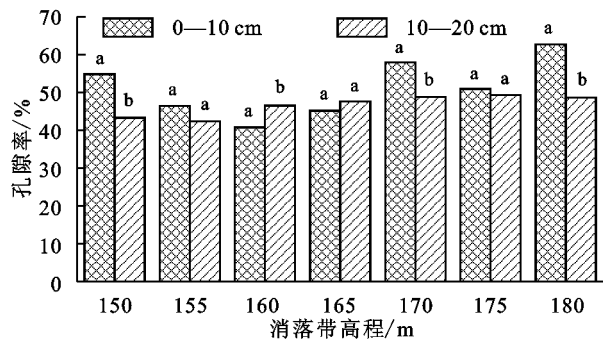


图3 不同高程消落带孔隙率分布

2.3 反复淹水对土壤颗粒组成的影响

不同水位高程消落带的土壤颗粒组成及其中值粒径 (Median size) 见图 4。颗粒组成以粉粒和砂粒为主, 除 150 m 采样点表层土以外, 粉粒体积百分比

均超过 50%，根据国际土壤质地分级标准，所选采样带的土壤质地均为粉砂质壤土。未受周期性淹水影响的 180 m 处的消落带土壤，黏粒体积百分比为 3.26%~4.05%，粉粒体积百分比为 66.56%~67.79%，砂粒体积百分比为 28.16%~30.19%，中值粒径介于 10.29~10.91 μm ；经历过 6 次周期性淹水的 175 m 处的消落带土壤，黏粒体积百分比为 2.99%~3.34%，粉粒体积百分比为 62.58%~65.22%，砂粒体积百分比为 31.45%~34.43%，中值粒径介于 11.20~12.40 μm ；经历过 8 次周期性淹水的 160~170 m 间的消落带土壤，黏粒体积百分比为 1.98%~4.05%，粉粒体积百分比为 53.04%~61.71%，砂粒体积百分比为 34.93%~44.98%，中值粒径介于 12.35~17.03 μm ；经历过 10 次周期性淹水一出露后的 150~155 m 间的消落带土壤，黏粒体积百分比

为 1.46%~3.33%，粉粒体积百分比为 40.70%~56.54%，砂粒体积百分比为 40.18%~57.84%，中值粒径介于 14.34~26.38 μm 。

消落带土壤颗粒组成整体上以低水位高程段较粗、高水位高程段较细、表土层颗粒较粗、10—20 cm 土层颗粒较细的特征分布。随水位高程增加，各土层黏粒和粉粒的体积百分比均有所增加，砂粒体积百分比降低，消落带上不同土层深度土壤中砂粒体积百分比降低幅度分别达 40.47%和 21.74%，但均高于未淹水段，最大增长率达 91.60%和 42.67%；中值粒径逐渐降低，0—10 cm 土层的变化趋势显著强于 10—20 cm 层 ($p<0.05$)，消落带上不同土层深度土壤中砂粒体积百分比降低幅度分别达 52.99%和 21.84%，但均高于未淹水段，最大增长率分别达 141.72%和 39.26%。

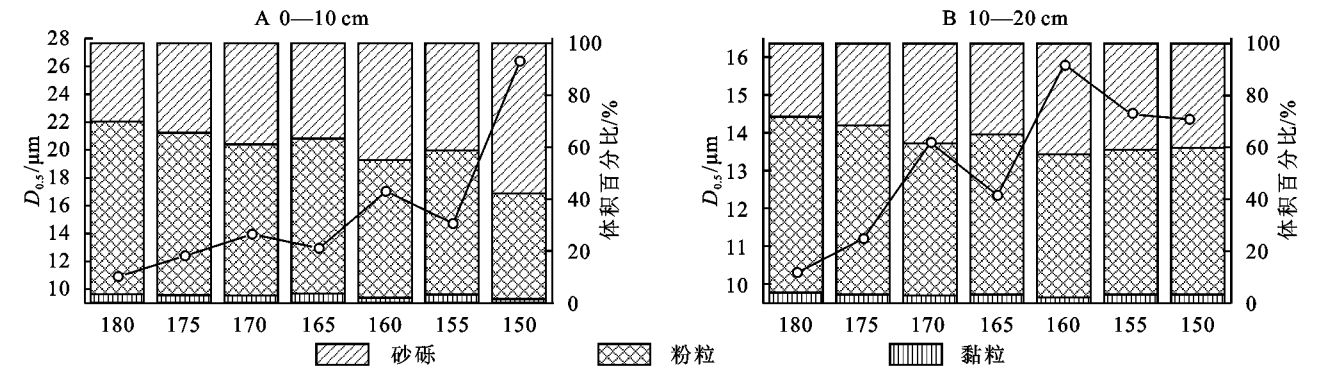


图 4 不同水位高程段消落带土壤颗粒组成及其中值粒径

2.4 反复淹水对土壤抗剪强度的影响

同一时期消落带土壤抗剪强度参数随高程分布见图 5。总体看来，周期性淹水对 0—10 cm 土层抗剪强度参数 c 、 ϕ 的影响显著大于 10—20 cm 土层 ($p<0.05$)；160~180 m 水位高程段(0~8 次淹水)土体抗剪强度参数 c 、 ϕ 的响应极为强烈，150~160 m 水位高程段(10 次淹水)的消落带土壤，抗剪强度参数值渐趋稳定。随土层深度增加，黏聚力无明显变化规律，但 10—20 cm 层的土壤黏聚力均大于同一采样点处表土层(0—10 cm)黏聚力；随着消落带水位高程的降低，黏聚力分布呈先升高后降低的趋势，与对

照组相比，淹水明显增大了土壤的黏聚力，最多分别增加了 163.24% (0—10 cm, 160 m 处) 和 195.76% (10—20 cm, 165 m 处)。随水位高程变化，内摩擦角的分布相对较稳定，消落带上两土层的内摩擦角分布范围分别为 12.9°~29.6°和 16.4°~21.6°，但消落带上各采样点的内摩擦角均低于同层对照组土壤，最大降低百分比分别为 54.42% (0—10 cm, 170 m 处) 和 33.06% (10—20 cm, 165 m 处)；随土层深度的增加，相同水位高程处土壤的内摩擦角明显降低 (170 m 处除外)，两土层间内摩擦角差最多达 13.2°。

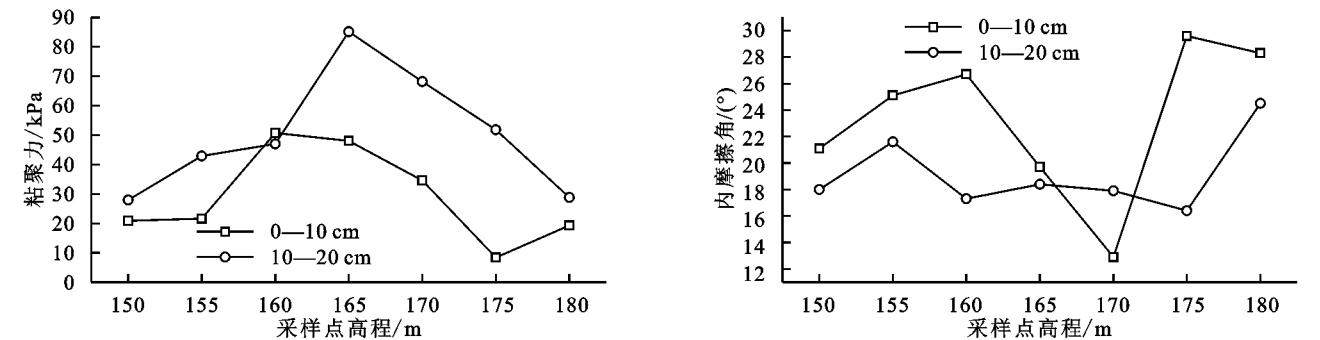


图 5 不同水位高程消落带土壤抗剪强度参数

3 讨论

三峡消落带在库水周期性高压浸泡^[14]、干湿交替^[10,26-27]等作用下,土壤的物理力学性质会发生相应的变化^[13,28]。由于消落带不同高程段所受库水的主要作用方式和程度不同,因此不同水位高程消落带土壤的物理特性分布有一定的差异。实测结果显示,库水对消落带土壤容重、孔隙率、机械组成和抗剪强度参数的影响程度随土层深度递减,本文以与消落带土壤侵蚀关系最密切的表土层(0—10 cm)为例,分别用150 m和155 m两采样点的平均值、160~170 m采样点的平均值代表消落带底部和中间段的各性质指标,按淹水周期将所选样带(150~180 m)分为四段,按水位高程从下到上依次为:2006年开始淹水的底部消落带(150~155 m);2008年开始淹水的中间段(160~170 m);2010年开始淹水的上部消落带(175 m)和未淹水段消落带(180 m)。对不同水位高程消落带土壤的物理特性讨论如下:

三峡消落带上,淹水次数最多(10 a)、周期最长(每年超过8个月)、受水压力影响最大的底部消落带,其土壤具有组成颗粒最粗(砂粒含量为49.56%)、土壤容重较大(1.41 g/cm³,仅略低于中间段)、孔隙率较低(50.63%,仅略高于中间段)。这可能与库水作用密切相关,一方面由于消落带长期浸泡于库水中,库水对消落带土体的溶蚀、冲刷等作用可能带走大量细小颗粒而导致其组成颗粒变粗;另一方面可能是在淹水一落干形成的干湿交替作用和淹水期的库水压力作用下,土体中孔隙被压缩固结、土骨架间连接更加紧密,加之细颗粒胶结形成更稳定的团聚体而出现容重较大、孔隙率较低的现象^[14-15,17-20]。

三峡消落带上,中间段消落带土体的孔隙率最小、容重最大,分别为47.96%和1.43 g/cm³,砂粒体积含量占比40.17%,仅低于底部消落带土体。中间段消落带受库水浸泡时间相对较短,因库水浸泡而溶蚀带走的细小颗粒较少,颗粒级配较好,在库水的压密固结过程中,细颗粒填充了土骨架间的空隙而出现孔隙率较底部消落带更小、容重更大的情况。

三峡消落带上,上部消落带土壤容重最小(1.35 g/cm³)、孔隙率最大(50.89%),颗粒组成中砂粒含量最低(34.43%)。该段消落带淹水周期少、淹水时间较短而细粒含量相对较多,土颗粒级配较差,同时由于固结过程中的水压力作用小,最终导致该段土体的孔隙率最大、容重最小。

未淹水段消落带的土壤容重和砂粒含量最小,分别为1.42 g/cm³,30.19%,同时孔隙率最大(62.71%),这

说明三峡水库周期性淹水带走了土体中的细颗粒,同时水压力和干湿交替等作用促进了土体固结,使土体内孔隙减少而容重有所增加^[29-30]。

消落带土壤粒径分布低水位高程段粗、高水位高程段细的特征,与杜高赞2009年的研究结论^[3]相反,这可能是由于随着消落带淹水周期的增加,水压力和干湿交替等对消落带土壤的影响程度逐渐凸显所致。下部消落带受库水浸泡时间更长、压力更大、干湿交替次数更多,在这些作用共同影响下,一方面土体内部的黏粒、粉粒等细小颗粒和易溶盐被库水溶解、冲刷带走;另一方面,细颗粒在周期性的干湿交替和压力作用下更易结合成稳定的团聚体,也将导致低水位高程段消落带颗粒粗、高水位高程段消落带颗粒细的结果。

土壤抗剪强度由粘聚力和内摩擦角表征,由于影响其参数的因素较多^[20,32-33](矿物成分、有机质、含水率等),尤其对含水率极为敏感。同一时期不同水位高程段土壤的质量含水率差异极大(采样时实测消落带土壤质量含水率为18.99%~37.03%),因此抗剪强度参数在消落带上的无明显的分布规律,本文数据仅能表示同一时期、不同水位高程段消落带上土壤抗剪强度的分布特征。采样期消落带0—10 cm层土壤粘聚力分布情况为中间段(44.42 kPa)>底部消落带(21.24 kPa)>未淹水段(19.26 kPa)>上部消落带(8.36 kPa),内摩擦角的分布情况恰与之相反,分别是上部消落带(29.60°)>未淹水段(28.30°)>底部消落带(23.10°)>中间段(19.77°)。

4 结论

(1) 三峡水库周期性蓄水条件下,消落带上表土层土壤受人为扰动、植被根系、地表径流等的影响较深层土更大,消落带土壤容重、孔隙率、机械组成和抗剪强度参数对淹水作用的响应程度随土层深度增加而递减。

(2) 淹水前后消落带土壤的基本物理性质存在显著差异。随水位高程增加,消落带土壤(150~175 m段)受淹水周期、淹水时间和水压力的影响均减小,对库水作用响应最强烈的表土层(0—10 cm)的土壤:容重逐渐降低,最大降幅达16.42%,但均高于未淹水段(180 m),淹水后土壤容重最大增长率达38.42%;孔隙率整体呈先降后增的趋势,在160 m处出现最小孔隙率40.77%,且淹水后的土壤孔隙率均低于未淹水段,最大降低幅度达35.10%;粒径分析表明采样带土壤属于粉砂质壤土,颗粒组成呈低水位段粗、高水位段细,表层粗、底层细的特征分布;随水位高程增加,消落带土壤中粗颗粒(砂粒)体积百分含量逐渐减少,最大降

幅达 40.47%,但均高于未淹水段,淹水后土壤砂粒体积含量最大增幅达 91.60%;中值粒径逐渐减小,最大降幅为 52.99%,但均大于未淹水段,淹水后中值粒径最大增幅达 141.72%;同一时期黏聚力随水位高程增高以先增高后降低的趋势分布,最大变化幅度达 195.76%,淹水前后黏聚力最大变化幅度达 163.24%,内摩擦角沿水位高程的分布变化较小,淹水前后内摩擦角最大变化幅度达 54.42%。

参考文献:

- [1] Li B, Yuan X, Xiao H, et al. Design of the dike-pond system in the littoral zone of a tributary in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Ecological Engineering*, 2011,37(11):1718-1725.
- [2] Xu X B, Tan Y, Yang G S. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013,124(9):115-125.
- [3] Xu X, Tan Y, Yang G S, et al. Impacts of China's Three Gorges Dam Project on net primary productivity in the reservoir area[J]. *Sci Total Environ*, 2011,409(22):4656-4662.
- [4] 艾丽皎,吴志能,张银龙. 水体消落带国内外研究综述[J]. *生态科学*, 2013,32(2):259-264.
- [5] 刁承泰,黄京鸿. 三峡水库水位涨落带土地资源的初步研究[J]. *长江流域资源与环境*, 1999,8(1):75-80.
- [6] 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.
- [7] 唐强,贺秀斌,鲍玉海,等. 三峡水库干流典型消落带泥沙沉积过程[J]. *科技导报*, 2014,32(24):73-77.
- [8] 聂立水,李吉跃,戴伟. 北京西山油松栓皮栎混交林的土壤水分特征[J]. *林业科学*, 2007,43(S1):43-47.
- [9] 黄志刚,李锋瑞,曹云,等. 南方红壤丘陵区杜仲和油桐人工林水土保持效应的比较[J]. *林业科学*, 2007,43(8):8-14.
- [10] 鲍玉海,贺秀斌. 三峡水库消落带土壤侵蚀问题初步探讨[J]. *水土保持研究*, 2011,18(6):190-195.
- [11] 康义,郭泉水,程瑞梅,等. 三峡库区消落带土壤物理性质变化[J]. *林业科学*, 2010,46(6):1-5.
- [12] Bao Yuhai, Gao Peng, He Xiubin. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir: A unique geomorphological unit [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015,150:14-24.
- [13] 邓华锋,李建林. 库水位变化对库岸边坡变形稳定的影响机理研究[J]. *水利学报*, 2014,45(S2):45-51.
- [14] 何晓英,唐红梅,陈洪凯,等. 周期性浸泡下三峡库区松散土体微观特性分析[J]. *重庆交通大学学报:自然科学版*, 2010(3):445-449,483.
- [15] 吕海波,曾召田,赵艳林,等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. *岩土力学*, 2009,30(12):3797-3802.
- [16] 万勇,薛强,吴彦,等. 干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究[J]. *岩土力学*, 2015,36(10):2815-2824.
- [17] 李妍,彭义. 干湿循环条件下紫色土抗剪强度与膨胀率研究[J]. *西南师范大学学报:自然科学版*, 2015,40(4):70-73.
- [18] 程瑞梅,王晓荣,肖文发,等. 三峡库区消落带水淹初期土壤物理性质及金属含量初探[J]. *水土保持学报*, 2009,23(5):156-161.
- [19] 刘宏泰,张爱军,段涛,等. 干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J]. *水利水运工程学报*, 2010(4):38-42.
- [20] 龚琰. 干湿循环作用下红黏土的变形和强度特性研究[D]. 湖南湘潭:湖南科技大学, 2015.
- [21] Bao Y H, Tang Q, He X B, et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Hydrology Research*, 2015,46(2):212-221.
- [22] Ye C, Li S, Zhang Y, et al. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of hazardous materials*, 2011,191(1):366-372.
- [23] 雷波,杨春华,杨三明,等. 基于 GIS 的长江三峡水库消落带生态类型划分及其特征[J]. *生态学杂志*, 2012,31(8):2082-2090.
- [24] 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.
- [25] 卢志军,李连发,黄汉东,等. 三峡水库蓄水对消落带植被的初步影响[J]. *武汉植物学研究*, 2010,28(3):303-314.
- [26] 林俊杰,杨振宇,刘丹,等. 干湿交替下三峡支流消落带沉积物粒径组成及氮分布特征[J]. *土壤学报*, 2016,53(3):602-611.
- [27] 查小春,贺秀斌. 土壤物理力学性质与土壤侵蚀关系研究进展[J]. *水土保持研究*, 1999,6(2):99-105.
- [28] 曹玲,罗先启. 三峡库区千将坪滑坡滑带土干—湿循环条件下强度特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2007,28(S1):93-97.
- [29] 魏海云,詹良通,陈云敏. 高饱和度土的压缩和固结特性及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2006,28(2):264-269.
- [30] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. *岩土工程学报*, 2014,36(2):201-272.
- [31] 杜高赞,高美荣. 三峡库区典型消落带土壤粒径分布及分形特征[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2011, (1):47-50.
- [32] 倪九派,高明,魏朝富,等. 干湿循环条件下重庆地区三种土壤抗剪强度的动态变化[J]. *土壤学报*, 2013,50(6):1090-1101.
- [33] 肖杰,杨和平,王兴正,等. 南宁外环膨胀土抗剪强度非线性特征及影响因素分析[J]. *中国公路学报*, 2014,27(10):1-8.