

三峡水库消落带草本植物对若干土壤物理性质的影响

钟荣华^{1,2}, 吕发友^{3,4}, 鲍玉海³, 贺秀斌³

(1. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091; 2. 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650091; 3. 中国科学院 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; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为明确三峡水库消落带典型草本植物对土壤物理性质的影响,在三峡腹地忠县石宝镇消落带选取牛鞭草(*Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf et C. E. Hubb.)、扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa* (L. f.) R. Br.)、双穗雀稗(*Paspalum paspaeoides* (Michx.) Scribn.)和自然恢复草地狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.),以裸地为对照,对比研究了 4 种典型草地土壤容重(Bulk density, BD)、颗粒组成(Soil particle composition, SPC)、磁化率(Soil magnetic susceptibility, SMS)和抗剪强度(Soil shear strength, SSS)等土壤物理性质的差异。结果表明:三峡水库消落带植物及其根系的存在对土壤容重、土壤体积磁化率、颗粒组成和抗剪强度有重要影响。裸地的土壤容重重要显著高于 4 种草地,但表层土壤体积磁化率要弱于草地;草地与裸地的土壤颗粒组成无明显差异;植物根系可以显著增强土壤抗剪强度,其中牛鞭草地 0—10 cm 和 10—20 cm 层土壤粘聚力分别比裸地增加 319.81% 和 46.89%,而狗牙根草地的增加幅度分别为 17.69%(0—10 cm)和 43.13%(10—20 cm)。研究结果可以为三峡水库消落带植被恢复和水土保持提供一定依据。

关键词:土壤物理性质; 草本植物; 消落带; 三峡水库

中图分类号: S152.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0017-06

Impacts of Several Grasses on Soil Physical Properties in the Riparian Zone of Three Gorges Reservoir

ZHONG Ronghua^{1,2}, LYU Fayou^{3,4}, BAO Yuhai³, HE Xiubin³

(1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China; 3. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To understand the impacts of herbaceous plants on soil physical properties, soils in the riparian zone of Three Gorges Reservoir (TGR) with different plant covers (*Hemarthria altissima*, *Hemarthria compressa*, *Paspalum paspaeoides* and *Cynodon dactylon*) were investigated. With bare area as the control, bulk density (BD), soil particle composition (SPC), soil magnetic susceptibility (SMS) and soil shear strength (SSS) were determined. The results showed that grasses and their roots had significantly influence on soil physical properties. In this investigation, the BD in bare land was significantly higher ($p < 0.01$) than the grasslands while the SMS of 0—20 cm layer in bare area (mean $1.272 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$) was weaker than grasslands (mean $1.765 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$). Soil grain size in bare area and grasslands is different but not significant. Plant roots can significantly enhance soil shear strength. The soil cohesion in 0—10 cm and 10—20 cm soil layer of *H. altissima* land increased by 319.81% and 46.89%, respectively, compare to the bare ground. And the rate of soil cohesion increment in *C. dactylon* land was 17.69% in 0—10 cm layer and 43.13% in 10—20 cm layer correspondingly. The results will be useful for revegetation and soil conservation in the riparian zone of TGR.

Keywords: soil physical properties; herbaceous plants; riparian zone; Three Gorges Reservoir

三峡工程是迄今世界上已建最大的水利枢纽工程,其完全运行后形成总库容 393 亿 m^3 ,形成总面积达 1 084 km^2 的人工湖泊。水库水位的季节性涨落

在其三峡库周最低水位线至最高水位线之间形成周期性出露地表的一段水陆生态系统交错地带,即水库消落带^[1]。按照三峡水库调度计划,在每年 5 月末或

6 月初维持防洪汛限水位 145 m, 10 月开始逐渐升高水位直至 175 m, 并于次年 4—6 月回落直至最低水位, 从而在库周形成垂直高差达 30 m、总面积近 349 km² 的消落带^[2]。消落带是三峡库区的重要缓冲带, 其生态环境的健康是库岸稳定和水库安全运行的重要保障^[3]。三峡水库水位的反季节调节生成的消落带由于水位高差大(30 m), 淹没时间长(超过半年), 导致消落带植被退化、消亡^[4-5], 土壤侵蚀与泥沙淤积过程强烈^[6-8], 土壤退化严重^[9-10], 地貌演化剧烈^[11], 进而威胁水库安全运行和库区生态环境健康。因此, 恢复消落带植被、控制土壤侵蚀是保障三峡水库安全运行和库岸稳定的必然选择^[12]。

近些年, 为了控制三峡水库消落带土壤侵蚀和面源污染, 恢复消落带景观, 各有关单位及科研人员在三峡水库消落带分别尝试进行了多种人工恢复和自然恢复相结合的植被恢复方案。众所周知, 植物具有重要的水土保持效应, 通过植物冠层的截流、枯枝落叶层的涵水功能及保护作用可以有效地削弱降雨径流侵蚀, 同时通过根系在土体中交错、穿插等来固持土壤, 改善或增强土壤渗透性、含水率、剪切强度等物理性质, 与地上部分共同发挥水土保持效应^[13-17]。那么消落带植被的恢复又将对土壤理化性质造成怎样的影响呢? 当前, 尽管已有众多研究探讨了周期性水淹一出露过程对三峡消落带土壤理化性质的影响^[4, 18-19], 而对于消落带植被对土壤物理性质的改变则关注较少。因此, 本文选取三峡水库腹地忠县石宝镇消落带坡度 $<8^\circ$ 、坡向类似的三种人工恢复草本及近似自然恢复消落带草本狗牙根为对象, 研究不同草本覆盖下消落带土壤物理性质的差异, 以期对三峡水库消落带的植被重建和水土保持提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

石宝镇地处重庆市东北部三峡库区腹地(107°32′—108°14′E, 30°03′—30°35′N), 隶属忠县, 距离县城 32 km。境内溪河纵横, 山地起伏, 属典型的丘陵地貌, 出露岩层为侏罗纪沙溪庙砂页岩, 分布有紫色土、黄壤、黄棕壤、石灰土和水稻土等土壤类型, 以紫色土为主, 土地利用类型以旱地、水田、林地等为主^[20]。该区域地处暖湿亚热带东南季风区, 四季分明, 降水充足, 年均降雨量 1 150 mm, 日照充足, 年均温 19.2℃^[13]。三峡消落带地形起伏较大, 易风化岩层出露较多, 淹水前多为旱地和水稻田, 因夏季降雨多且集中, 加之库水、波浪冲刷剧烈, 水土流失极其严重^[6]。由于水库运行前期的人为清库和初期水淹的影响, 消落带内原生植被早

已消亡殆尽, 形成以次生植被(主要是草本植物和灌丛)和弃耕地为主的植被类型^[20]。

1.2 样地设置及采样

于 2013 年 5 月中旬消落带退水后, 在石宝镇共和村消落带 172~174 m 高程处分别选择牛鞭草(*H. altissima*)、扁穗牛鞭草(*H. compressa*)、双穗雀稗(*P. paspaeoides*)三种人工恢复草和自然恢复狗牙根(*C. dactylon*)4 条消落带样带。其中三种人工恢复草本种植于 2007 年, 自三峡水库首次蓄水达到 175 m 后(2010 年 10 月), 经受了 3 a 的周期性淹没和暴露, 长势良好, 覆盖度均在 90% 以上; 自然恢复杂草主要优势种群为狗牙根, 覆盖度 90% 以上。各样带地形地貌类似, 均为平缓坡地, 土壤类型为紫色土, 土壤质地主要为壤质黏土。四种草本类型各选取 1 5 m×20 m 样带, 四条样带相邻。在各样带选择缓坡($<8^\circ$)按 S 型曲线选取 4 个样点采样。

其中用于土壤物理性质分析的采集表层样(30 cm 以内), 在不破坏土壤自然分层的条件下每 10 cm 采一个分层样, 在土壤自然分层处优先按自然分层采样。采样时尽量是土块不受到挤压, 并剥去土块表面与土铲直接接触而变形的部分, 分别采集普通环刀样(100 cm³)用于土壤容重和水分测定, 每层取 3 个重复, 共采集 144 个环刀样带回实验室; 采集散土样, 每个样品采集 1 kg 左右, 然后将样品置于塑料盒(袋)中, 共采集 48 个土样带回实验室, 及时将土样掰成小块, 清除石砾、枯枝落叶、根系及其他杂物, 自然风干; 将风干土样全部过 2 mm 的, 供粒径分析备用。再在四条草本植物样带周边随机选取地形地貌相似的 5 个裸地样点, 每个样点同样分层取样至 30 cm 深, 测定容重环刀样每层 3 个重复, 共采集 45 个环刀样; 袋装样将 5 个样点各层土壤合为一个样, 每层三个重复共采集裸地土壤袋装散土样品 9 个。将样品去除杂质后编号, 装封口袋带回实验室分析。

狗牙根和牛鞭草地同时采集室内直剪试验环刀样。用于抗剪试验的土样采集: 南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪配套的环刀(底面积 30 cm², 高 2 cm)分层采集土壤表层样(20 cm 以内), 每 10 cm 采一分层样, 按照剪切仪的要求四个样为一组, 故每层取四个重复样, 采取同层多点混合取样, 每样区取 3 个重复, 共采集 120 个环刀样、30 组试样, 带回实验室供测试用。

1.3 土壤物理力学测定

本研究中各土壤物理性质测定方法如下: 容重采用环刀法测定; 颗粒组成采用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪测定; 磁化率采用捷克 ZH 公司

SM—30型磁化率仪现场测定其体积磁化率;抗剪强度将上述剪切仪的环刀样品带回实验室后,分别在 50,100,150,200 kPa 4 级荷载、量力环率定系数为 1.695 kPa/0.01 mm 的条件下,采用 ZJ 型应变控制式直剪仪进行快剪试验,测定土样的抗剪强度指标(内摩擦角 ϕ 和粘聚力 c)。

2 结果与分析

2.1 土壤容重差异

四种草地和裸地土壤容重(Bulk density, BD)随土层深度的变化见图 1。总体上,在 0—30 cm 土层中,随着土层深度的增加,土壤容重增大;两种牛鞭草地的 BD 要高于狗牙根和双穗雀稗草地,而裸地的各土层容重均要显著高于四种草地 ($T = -7.02, p < 0.01$);平均容重为裸地 (2.25 g/cm^3) > 牛鞭草地 (2.08 g/cm^3) > 扁穗牛鞭草地 (2.05 g/cm^3) > 狗牙根草地 (1.90 g/cm^3) > 双穗雀稗草地 (1.87 g/cm^3)。当然,不同土层中,不同土地利用的土壤容重大小顺序不一。在表层土壤(0—10 cm)中,除双穗雀稗草地土壤容重高于狗牙根地外,其余与平均容重大小顺序相同;10—20 cm 土层中,BD 大小次序与平均容重一致,当然 2 种牛鞭草地的 BD 差异较小、狗牙根和双穗雀稗地的 BD 大小基本一致;20—30 cm 土层中则是除扁穗牛鞭草地容重高于牛鞭草地外,其他与平均容重大小次序一致。

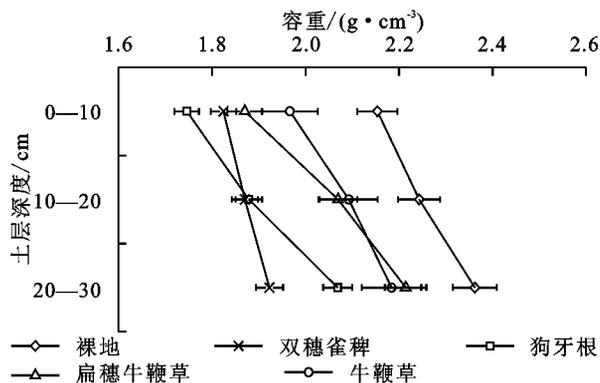


图 1 不同覆盖类型下土壤容重的剖面变化

2.2 土壤颗粒组成变化

四种草本覆盖下土壤颗粒组成及其中值粒径 (Median size) 见图 2。根据美国土壤粒级分类标准 (USDA), 5 种土地类型的土壤质地均属粉壤土。图 2 显示, 尽管牛鞭草地土壤沙砾含量较其他四种土地利用类型土壤要高, 但五种土地利用土壤不同土层间的中值粒径无显著差异 ($F = 0.29, p = 0.75$), 不同土地利用类型间土壤的中值粒径差异亦不显著 ($R^2 = 7.70, p = 0.10$)。值得注意的是, 裸地的中值粒径随着土层的加深逐渐降低。总体上, 四种草本覆盖下土

壤颗粒组成无明显差异。

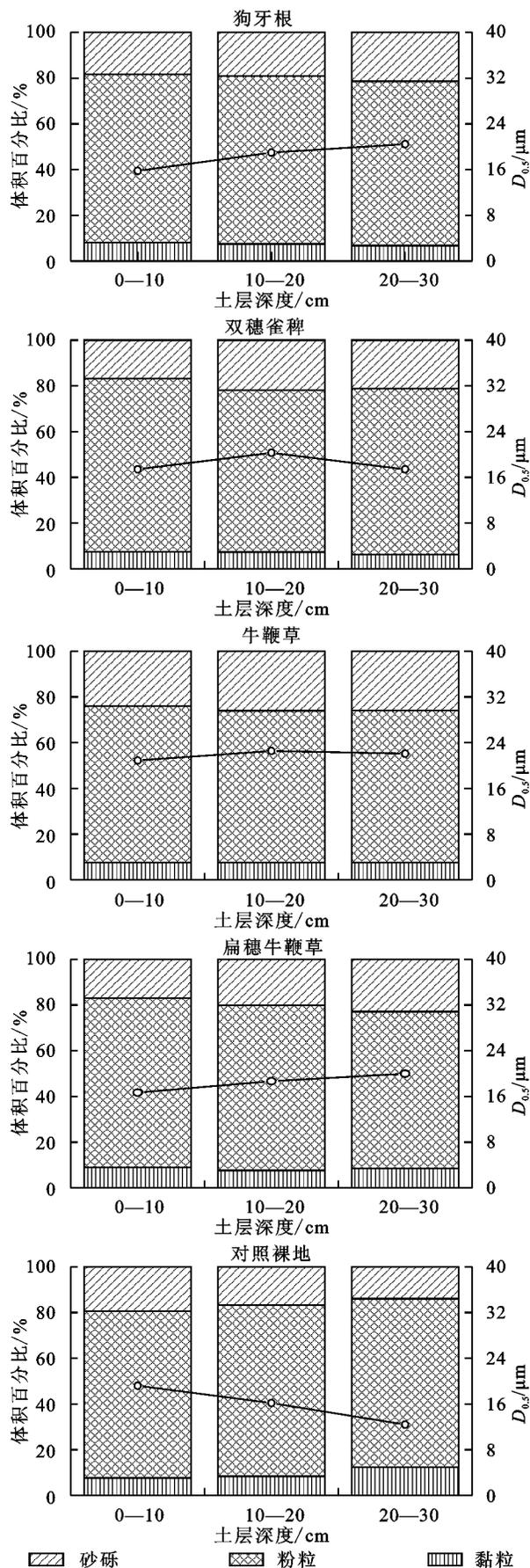


图 2 不同覆盖类型下土壤颗粒组成及中值粒径 ($D_{0.5}$) 变化

2.3 土壤体积磁化率

四种草本覆盖下土壤磁化率随土层深度的变化见图 3。0—10 cm 和 10—20 cm 土层中,裸地 SMS(分别为 1.532×10^{-7} , 1.011×10^{-7} m^3/kg) 小于草地(平均分别为 2.257×10^{-7} , 1.273×10^{-7} m^3/kg),而 20—30 cm 土层中则要高于草地(裸地 2.526×10^{-7} m^3/kg ,草地平均 1.300×10^{-7} m^3/kg)。总体上,除裸地磁化率随土层深度先减少后增加外,四种草地覆盖下土壤体积磁化率都随土层深度增加而下降;其中牛鞭草和双穗雀稗 2 种草地的磁化率变化基本一致,而狗牙根和扁穗牛鞭草 2 种草地的上层(0—10 cm)土壤体积磁化率要显著高于另外 2 种草地,这可能与这两种草地上层土壤(0—10 cm)的黏粒含量较高有关(图 2),因为土壤磁化率往往与土壤黏粒含量呈正相关^[19]。裸地表层(0—10 cm)土壤磁化率要低于四种草地,而扁穗牛鞭草和狗牙根草地的表层土壤磁化率则要显著高于其他 2 种草地和裸地。

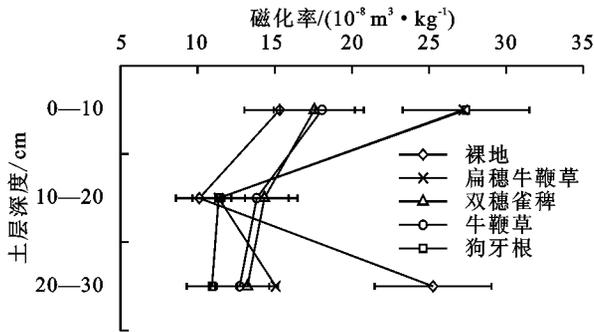


图 3 不同覆盖类型下土壤体积磁化率随土层深度的变化

2.4 对土壤抗剪强度的影响

土壤抗剪强度是反映土壤抗侵蚀性能的重要参数,其大小与土壤容重、含水量、颗粒组成等土壤物理特性和土壤中根系分布状况有重要关系^[17]。先前研究显示,狗牙根匍匐生长,地上部分较发达,而牛鞭草则直立生长,地上和根系均发达^[20]。因此,本研究在消落带采集地形地貌相似、盖度均为 95% 以上的两种不同类型草地(狗牙根、牛鞭草)和裸地的剪切环刀样带回实验室进行直剪试验,分析根系对土壤抗剪强度的影响,结果如图 4 和图 5 所示,牛鞭草和狗牙根地土壤抗剪强度和粘聚力均要高于裸地,不同垂直压力条件下,2 种草地的抗剪强度都要高于裸地,其中牛鞭草地抗剪强度又要明显高于狗牙根地;牛鞭草地 0—10 cm 和 10—20 cm 层土壤粘聚力(C)分别比裸地增加 319.81% 和 46.89%,而狗牙根草地对比裸地土壤粘聚力的增加幅度分别为 17.69%(0—10 cm) 和 43.13%(10—20 cm)。因三种土地类型的采样点相邻,根据实地调查情况及前人的相关研究,所有样地的土壤物理性质差异较小,可视为同质,因此土壤粘聚力的增加主要由根系的存在差异导致。同时,根

系的存在对土壤内摩擦角(ϕ)也有增强效应。如图 5 所示,与裸地相比,除狗牙根草地 10—20 cm 土层外,有根系土壤内摩擦角都明显增大,其中尤以牛鞭草地土壤内摩擦角增大极为显著(0—10 cm, $T=75.00$, $p<0.001$; 10—20 cm, $T=118.68$, $p<0.001$)。

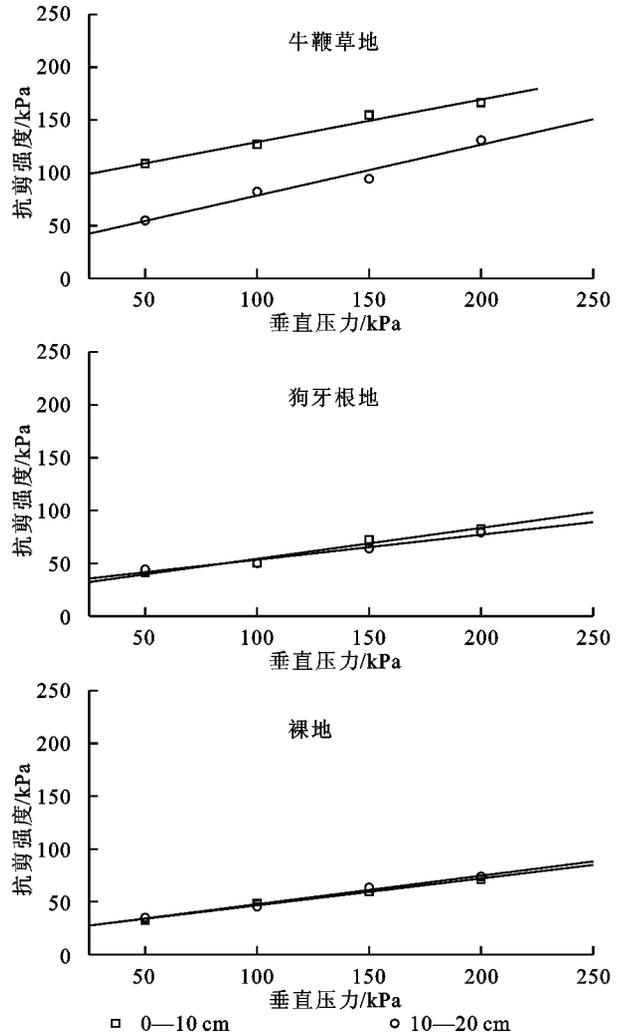


图 4 不同覆盖下土壤抗剪强度与垂直压力关系曲线

3 讨论

植物及其根系对土壤物理力学性质有重要影响^[17]。本研究结果显示草地的土壤容重要显著低于裸地,而抗剪强度则要显著高于裸地;裸地表层土的砂粒含量要高于草地,黏粒含量则要低于草地,因而表层土壤的体积磁化率也要低于草地。这些结果与国内外众多研究结果类似^[15,21-24],说明植物及其根系确实可以显著地改变土壤的物理特性,进而增强土壤抗侵蚀能力。总体上,牛鞭草地粗颗粒部分比例较其他土地类型要高,但没有显著差异,这可能与牛鞭草的地下根系发达有关,根系的存在会增加土壤孔隙度,促进土壤水稳性团聚体的形成,土壤颗粒发生粗化。牛鞭草虽然地上部分同样发达,但是因其直立生长,茎秆底层枝叶稀少,地

表除了直立生长的牛鞭草茎秆外,无其他植物覆盖。裸地和牛鞭草地的表层(0—10 cm)砂粒含量相比其他三种草地要高,可能与这两种土地类型的土壤表层细颗粒部分在江水、波浪淘蚀和降雨径流冲刷下极易冲走,从而使表层土壤发生粗化;而其他草本植物地上部分覆盖层厚,可以防止表层土壤被冲刷侵蚀,大部分粗颗粒仍然可以保留有关。尽管裸地和草地的土壤机械组成并没有明显差异(图2),但裸地的土壤容重要显著高于草地(图1),这可能与不同土地利用类型土壤的有机质含量、水分含量等差异有关,同时草地土壤中丰富的根系穿插分布不同程度上增加了土壤的孔隙度,进而降低了土壤容重。值得注意的是,本研究

采集样品的土壤容重最低都在 1.75 g/cm^3 以上,最高可达 2.36 g/cm^3 ,这些结果要显著高于前人在三峡水库消落带的研究结果^[9-10,18],容重基本为 $1.4 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ 。这主要是由于三峡水库消落带经过长时间水淹浸泡一落干暴露的干湿交替循环后,土壤被压实,表层细颗粒土被冲刷所致。而牛鞭草和狗牙根两种草本的根系均能提高土壤抗剪强度,但是两者的效率却有明显差异,这可能是由两种草地根系的分布差异及根系抗拉性能差异所致。根据作者对此区域根系的研究结果^[20],牛鞭草地的根系密度要显著高于狗牙根地,尤其是在0—10 cm土层中,因此,牛鞭草地的抗剪强度整体上要强于狗牙根地。

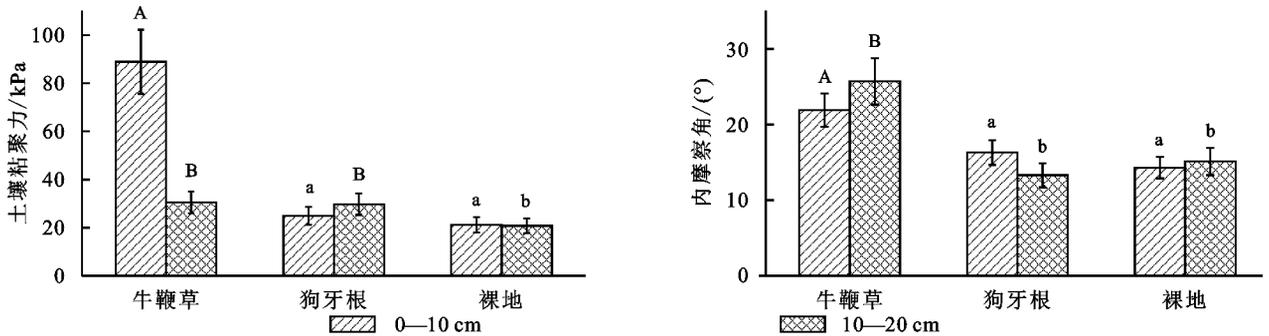


图5 根系对土壤抗剪强度的增强效果

总体上,本研究认为恢复消落带进行草本植物确实可以一定程度上改善土壤物理性质,增强土壤抗侵蚀能力。当然,三峡水库消落带面积巨大,且不同库段消落带类型、土壤、地貌、植被恢复模式等差异较大,植物对消落带土壤理化的影响也不尽相同。日后需充分考虑不同恢复模式、地貌特征和土壤类型等因素,以期更全面的理解消落带植被恢复对土壤理化特性的影响。

4 结论

三峡水库消落带草本植物对土壤容重、土壤体积磁化率和抗剪强度有重要影响,对颗粒组成影响不明显。裸地的土壤容重要显著高于四种草地,平均容重为裸地(2.25 g/cm^3)>牛鞭草地(2.08 g/cm^3)>扁穗牛鞭草地(2.05 g/cm^3)>狗牙根草地(1.90 g/cm^3)>双穗雀稗草地(1.87 g/cm^3);裸地和四种草地的土壤颗粒组成无显著差异;对照裸地表层土壤体积磁化率也要弱于草地,狗牙根和扁穗牛鞭草2种草地的上层(0—10 cm)土壤体积磁化率要显著高于另外2种草地。根系可以显著增强土壤抗剪强度,其中牛鞭草地0—10 cm和10—20 cm层土壤粘聚力分别比裸地增加319.81%和46.89%,而狗牙根草地对比裸地土壤粘聚力的增加幅度分别为17.69%(0—10 cm)和43.13%(10—20 cm)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Zhong Ronghua, He Xiubin, Bao Yuhai, et al. Estimation of soil reinforcement by the roots of four post-dam prevailing grass species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir, China [J]. Journal of Mountain Science, 2016,13(3):508-521.
- [3] 高进长,鲍玉海,贺秀斌,等. 三峡库区消落带分区固土护岸模式[J]. 世界科技研究与发展,2014,36(6):623-628.
- [4] Ye Chen, Zhang Kerong, Deng Qi, et al. Plant communities in relation to flooding and soil characteristics in the water level fluctuation zone of the three gorges reservoir, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013,20(3):1794-1802.
- [5] Zhang Zhiyong, Wan Chenyan, Zheng Zhiwei, et al. Plant community characteristics and their responses to environmental factors in the water level fluctuation zone of the three gorges reservoir in china [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013,20(10):7080-7091.
- [6] 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.
- [7] Bao Yuhai, Tang Qiang, He Xubin, et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Hydrology Research, 2015,46(2):212-221.
- [8] Tang Qiang, Bao Yuhai, He Xubin, et al. Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian

- zone of the three gorges reservoir, china[J]. Science of the Total Environment, 2014,479/480:258-266.
- [9] Ye Chen, Cheng Xiaoli, Zhang Quanfa. Recovery approach affects soil quality in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China; implications for revegetation[J]. Environmental Sciences and Pollution Research, 2014, 21(3):2018-2031.
- [10] 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.
- [11] 张信宝. 关于三峡水库消落带地貌变化之思考[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3):1-4.
- [12] Yuan Xinzong, Zhang Yuewei, Liu Hong, et al. The littoral zone in the three gorges reservoir, china: Challenges and opportunities[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(10):7092-7102.
- [13] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡水库消落带 4 种草本根系抗拉特性及根系粘聚力[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4):188-194.
- [14] Adhikari A R, Gautam M R, Yu Zhongbo, et al. Estimation of root cohesion for desert shrub species in the lower colorado riparian ecosystem and its potential for streambank stabilization[J]. Ecological Engineering, 2013, 51:33-44.
- [15] Zhou Zhengchao, Shangguan Zhouping. Soil anti-scourability enhanced by plant roots[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47(6):676-682.
- [16] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3):11-18.
- [17] 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):98-104.
- [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] 朱宏伟, 贺秀斌, 唐强, 等. 三峡库区消落带土壤在周期蓄水影响下的磁性变化[J]. 科技导报, 2012, 30(9):22-26.
- [20] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡库区消落带几种草地根系分布及土壤养分变化[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2):151-157.
- [21] Burylo M, Hudek C, Rey F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous manly slopes (Southern Alps, France) [J]. Catena, 2011, 84(1/2):70-78.
- [22] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2008, 305(1/2):207-226.
- [23] Wu T H. Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(3):259-274.
- [24] 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10):144-152.



(上接第 6 页)

- [20] Liu X X, Jef V, An Z S, et al. Grain size of Lake Qinghai sediments; Implications for riverine input and Holocene monsoon variability[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016, 449:41-51.
- [21] 邓智瑞, 何青, 邢超锋, 等. 长江口北槽柱状沉积物粒度分布特征及沉积环境指示意义[J]. 海洋科学, 2016, 40(1):112-122.
- [22] 李小妹, 严平, 吴伟, 等. 克里雅河中下游流域地表沉积物的粒度与化学元素空间分布[J]. 地理科学, 2016, 36(8):1269-1276.
- [23] 杨明义, 田均良. 坡面侵蚀过程定量研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6):649-653.
- [24] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar, a study in the significance of grain-size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1):3-26.
- [25] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. Journal of Geology, 1922, 30:377-392.
- [26] Zhang X B, Higgitt D L, Walling D E. A preliminary assessment of the potential for using Caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China[J]. Hydrological Sciences Journal, 1990, 35(3):243-252.
- [27] 孙喜军. 黄土高原水蚀风蚀交错带土壤侵蚀速率的⁷Be 和¹³⁷Cs 示踪研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [28] 张威, 潘少明, 张克新, 等. 中国大陆 Cs-137 背景值研究[J]. 地理学报, 2015, 70(9):1477-1490.
- [29] 张平仓. 水蚀风蚀交错带风水两相侵蚀的时空特征研究:以神木六道沟小流域为例[D]. 陕西杨凌:中国科学院水利部水土保持研究所, 1997.
- [30] 张平仓, 唐克丽. 六道沟流域有效水蚀风蚀能量及其特征研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2):32-40.
- [31] 魏振海, 董治宝, 胡光印, 等. 若尔盖盆地沙丘形成分布影响因素探讨[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6):1035-1042.
- [32] 葛云龙, 逯径铁, 廖保方, 等. 辫状河相储集层地质模型:“泛连通体”[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(5):77-79.