

# 三峡库区4种库岸边坡的植被根系固土效应研究

徐少君<sup>1</sup>, 类淑桐<sup>2</sup>, 曾波<sup>3</sup>

(1. 河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003; 2. 临沂大学 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 山东 临沂 276005; 3. 西南大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:**选择三峡库区无植被、草丛、灌丛及林木覆盖的4种边坡,测量了土壤表层(0—15 cm)的抗冲和抗蚀增强值,并以10 cm为单位分层获取了土壤表层(0—50 cm)的根长密度、根系生物量、土壤含水量、田间持水量、抗剪强度等指标。结果表明:(1)灌丛边坡的抗冲与抗蚀增强值均最大,显著高于草丛和林木边坡;灌丛边坡的抗剪强度值较大,裸地在10—20 cm的土层急骤增大,然后随土层深度逐渐减小,林地在最深层有着最大值。(2)3种有植被覆盖边坡的根系均集中在30 cm的表层,根长密度随着土层深度而减小;草丛和灌丛的根生物量在各层间变化不明显,林木根生物量随土层加深而迅速减小;(3)裸地的土壤含水量随着土层深度而急剧增加,林木则呈相反趋势,草丛和灌丛的变化较为平缓;灌丛的田间持水量在各层间基本保持一致,草丛和林木随着土层的加深而降低,裸地的表层田间持水量较大;(4)灌丛边坡的土体最稳定,各指标在土壤各层间较为稳定,林木和草丛边坡也有一定的稳定性,无植被覆盖的边坡稳定性最差。

**关键词:**土壤固持力;抗冲增强值;抗蚀增强值;抗剪强度;根长密度;土壤含水量

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)02-0119-05

## Stability of Root-Fixed Soil on 4 Different Slopes in the Three Gorges Reservoir Region

XU Shaojun<sup>1</sup>, LEI Shutong<sup>2</sup>, ZENG Bo<sup>3</sup>

(1. Forestry College, He'nan University of Science and Technology, Luoyang, He'nan 471003, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Environmental Conservation in Shandong Province, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China; 3. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** In this experiment, four slopes with different vegetation covers in the Three Gorges Reservoir banks, slope without vegetation (NS), slope with grass (GS), slope with shrub (SS) and slope with forest (FS), were selected. Anti-erodibility and anti-erosion of 0—15 cm layer, as well as root length density (RLD), root biomass (RB), soil water content (SWC), field capacity (FC), anti-shearing strength (ASS) of every 10 cm soil layer were measured. The results showed that: (1) the enhanced anti-erodibility and anti-erosion value in SS were both significantly higher than those of GS and FS. ASS of the NS increased, the maximum was found at the 10—20 cm layer, and then decreased with the increase of soil depth, while that of the FS increased with the increase of soil depth; (2) the roots of the 3 types of vegetation mainly distributed in 0—30 cm layer, and RLD decreased with the increase of soil depth; the biomass of the GS and the SS changed a little among soil layers, while that of the FS decreased with the increase of soil depth; (3) the SWC of the BS increased significantly with soil depth, while that of the FS was to the contrary; the SWC of the GS and the SS changed slowly with the increase of soil depth; the FC of the SS remained stable among layers, while that of the FS and the GS decreased with the increase of soil depth; the FC of the BS decreased with the increase of soil depth, the maximum occurred at surface layer; (4) the SS had the largest soil stability, and the largest anti-erosion, anti-shearing strength, anti-penetration strength; a bit of stability was also observed in the GS and the FS, while the worst stability occurred in the NS.

**Keywords:** soil stability; anti-erodibility; anti-erosion; anti-shearing strength; root length density; soil water content

三峡水库成库后,受大坝调水的影响,在库区两岸边坡会形成垂直最高达 30 m 的消落区,消落区原有的植被由于无法适应高强度的水淹而退化,甚至死亡,从而造成景观质量和生态效应的恶化,给库区带来水土流失、边坡崩塌、生态恶化等一系列问题,利用生态恢复学原理,采取在库岸边坡的消落区人工构建植被,是保护三峡库区生态环境的重要措施之一<sup>[1-2]</sup>。

植被对边坡土壤的稳定作用,除了通过地上部分减缓雨水和地表径流对土壤的溅蚀和冲蚀之外,还主要表现另两个方面:植被通过“土壤—植被—大气”连续体,吸收并蒸腾土壤中的多余水分;植被通过地下的根系增强土壤的稳定能力<sup>[3-4]</sup>。有研究表明,土壤含水量过多,其稳定性大为降低,而植被象水泵一样可通过蒸腾作用,将土壤的水分散发到空气中,同时其枯落层通过涵水作用,从而共同调节土壤中的水分,使土壤的含水量保持在合理的水平,起到提高土壤稳定的作用<sup>[3,5]</sup>。植物根系,特别是细根能缠绕、穿插土体,配合根系的分泌物或死根形成的有机质,促进土粒的团聚体的形成,从而提高了土体对地表径流的抗冲作用和增强了土体受水浸泡时的抗分散、悬浮能力,这两种能力被分别称为土壤抗冲性和抗蚀性<sup>[4]</sup>。此外,根系在土体的穿插、盘结,能够象混凝土中的钢筋一样,提高土壤的抗剪切能力,从而起到减少浅层土体受到剪切力破坏而出现滑坡、坍塌的可能性,进一步起到了稳固土体、保护边坡重要作用<sup>[6-7]</sup>。因此,除了直接通过对原状土的冲刷和浸泡以明确土壤的抗冲能力和抗蚀能力,以及在实验室内对根土复合体进行剪切试验之外,获取植物根系在土壤中的分布特征、根土复合体的含水量和现场便携式测量根土复合体的抗剪切强度,均是间接反映植物根系对土体固持力增强效应的重要指标<sup>[3,8]</sup>。

野古草、牛鞭草和甜根子草等草本耐水淹植物被认为是构建消落区的最佳物种,秋华柳、疏花水柏枝等小灌木,及一些林木也被认为是库区构建植被的潜在物种<sup>[9-11]</sup>,但在库区边坡如何配制物种以最大的发挥其保持水土及改良土体稳定性的生态效应还没有研究的先例,因此本试验选取现存于库区较为常见的几种植被覆盖的边坡类型:水淹后无植被存在的边坡,退水后的草丛边坡,消落区上缘的灌丛及林木边坡做为研究样地,希望对其有关指标:土壤抗冲性、土壤抗蚀性、土壤抗剪强度、土壤含水量、田间持水量、根长密度等进行分层(10 cm)研究,试图明确以下两

个问题:(1) 不同植被覆盖类型边坡土体的抗冲性、抗蚀性、抗剪强度和根系分布、土壤含水量、田间持水量等特征如何?(2) 哪种植被类型的根系对边坡土体的固持力增强效应更好?从而为三峡库区边坡的耐水淹植被构建提供参考。

## 1 试验区概况与试验方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于重庆市忠县的三峡库区生态恢复与综合治理技术与示范区(30°25'N,108°07'E)内,取样地点距离长江中心河道约 3.5 km,属汝溪河下游段的库区边坡,海拔 145~185 m,土质为黄黏土,坡度约为 12°~15°。根据三峡水库蓄水方案,从 2012 年起,每年 10 月份至第二年 5 月份左右水库蓄水至 175 m,而 5 月份至 10 月份降至 145 m 的防洪水位(2006—2012 年冬季最高蓄水至 156 m),因此三峡水库完全蓄水后库岸边坡要经历冬季的水淹和夏季雨水的冲刷。

为最大限度的消除取样时各样地受雨水和露水的影响,在天气连续晴朗 5 d 以后的 2008 年 6 月 5—8 日,每天上午 8 时开始,一天内仅完成一个样地的取样和测量工作,4 个样地历时 4 d,天气均为晴天。选择的样地边坡分别为裸地(NS)、空心莲子草—苍耳草丛,盖度>80%(GS)、黄荆—盐肤木灌丛,盖度>80%(SS)、白栎—青冈林木丛,盖度>95%(FS),高程分别在 145,150,165,185 m,坡度较为一致,其中,裸地和草丛边坡已经经历过 2 次蓄水至 156 m 的冬季水淹,草丛的优势物种空心莲子草和苍耳从出水开始计有 1 个多月的生长时间,林木样地的土质较薄,底层为风化的岩层。

### 1.2 研究方法

1.2.1 抗冲性和抗蚀性 利用根钻(Eijkkelkamp Agrisearch Equipment Model 15.01)与挖壕沟相结合的方法,从样地的土壤表层取根土复合体的土柱,钻取前先去土壤表层的枯落物或茎叶,竖直向下钻取。土柱的直径为 8 cm,高 15 cm,每一样地取 10 个,5 个用于抗冲试验,5 个用于抗蚀试验。抗冲与抗蚀指标的获取分别采用改进的原状土冲刷法和抗崩解装置,分别用抗冲性增强值( $E_v$ )和抗蚀性增强值( $C_v$ )来表征<sup>[12]</sup>。 $E_v = (C_r - C_0) / C_0$ ,  $C_r$  为含根土柱的抗冲刷系数,  $C_0$  为空白对照,  $(C_r - C_0)$  则表示由于根系存在而使土壤冲刷系数增加的值,那么  $E_v$  值的意义就是由于土壤中根系的存在而使土壤抗冲性增

加的倍数。抗蚀性增强值的计算公式为  $C_v = (V_r - V_0)/V_0$ ,  $V_0$  为无根系土柱的崩解速率(崩解单位含饱和水土重所需的时间),  $V_r$  表示含根土柱的崩解速率,土壤抗蚀增强值用字母  $C_v$  表示,  $C_v$  值的意义就是由于根系的存在而使土柱抗崩解能力增强的倍数。

1.2.2 抗剪强度 使用现场叶片测试仪(Eijkkelkamp Agrisearch Equipment Model 15.05),结合挖壕沟的方法,分层(10 cm)测量土壤的抗剪强度。

1.2.3 根长密度与根生物量 利用根钻,配合挖壕沟的方法,分层取得高 10 cm,直径 8 cm 的土柱,用清水冲洗出所有的根系,利用根系分析系统(WinRHIZO Pro, 2004c),在扫描分辨率 200 dpi 下,分析根系的总长度,从而得到根长密度,然后将根系在 80℃ 条件下烘 72 h,用电子天平称重,得到根系生物量,每个样地 5 个重复。

1.2.4 土壤含水量 利用环刀分层(10 cm)取土的方法测量土壤含水量。其中土壤持水量(SWC)的计算公式为:  $[(\text{土壤鲜重} - \text{土壤干重}) / \text{土壤鲜重}] \times 100\%$ ;田间持水量(FC)的计算公式为:  $[(\text{含饱和水鲜重} - \text{土壤干重}) / \text{含饱和水鲜重}] \times 100\%$ 。用电子天平获取含环刀的鲜土重。将带土样的环刀置于滤纸上,放于平底水盆内,加水至环刀上缘 0.5 cm 处,放置 12~14 h,空去多余的重力水,称取后可获得含饱和水土壤重量。最后利用烘箱在 105℃ 条件下烘 24 h,获取土壤干重,每层土壤 5 个重复。

2 结果与分析

2.1 3 种边坡土壤的抗冲性与抗蚀性

3 种不同边坡的植被根系对土壤的抗冲性和抗蚀性均有一定的增强效应,但增强效应的程度不同,其中灌丛土壤的抗冲性和抗蚀性增强值都最大,分别达到了 10.13,5.42,与其他两个植被类型土体之间有极显著差异( $p < 0.001$ );其次为林地土体的根系的

抗冲性,增强值为 1.19,但和草丛土体之间没有显著差异;另外,抗蚀性增强值在林地和草丛土体之间也没有显著差异,增强效应不明显(图 1)。

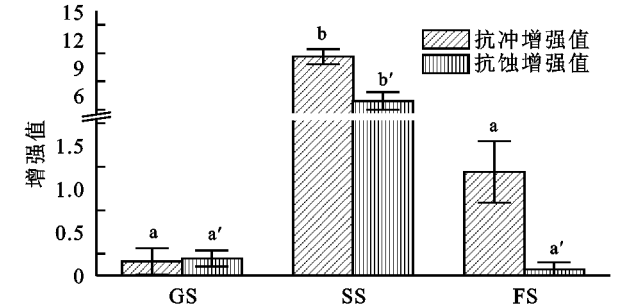


图 1 3 种边坡表层(15 cm)土壤抗侵蚀增强值

土壤抗冲性及抗蚀性主要取决于土壤本身的理化性质,但植物根系可以通过改变土壤的理化性质而增强土壤的抗冲性和抗蚀性<sup>[6]</sup>。一方面,植物根系通过缠绕和包围土体而达到抵抗水流的冲蚀而提高抗冲性,另一方面,根系的细根深入土粒之内,释放分泌物,从而增加了水溶性颗粒,提高了其抗蚀能力<sup>[4,6]</sup>。本试验中,土壤为粘性较强的黄土,本身粘结程度较高,根系对土壤理化性质的改变可能没有普通土质明显。相对而言,林木和灌丛对土壤的作用时间较长,其改善作用应该较为明显。本研究中灌丛由于有较多的细根而草丛的根系较少(图 2),因而在抗冲性和抗蚀性都显著高于其他两种植被覆盖的边坡。通常情况下,林木有着生物量较大的根系和更大的横向和纵向分布空间,穿插缠绕土体的潜能较大,能够较好的抵抗水流的冲蚀<sup>[13]</sup>。然而在本研究中,林木覆盖边坡的抗冲性增强效应并不十分明显,可能是根钻的直径相对于林木土体取样来说有点偏小,影响了土体的原有结构,造成了抗冲与抗蚀能力的下降。研究中对林木覆盖的边坡取样时,发现其表层土体有较多的腐殖质,而较多的腐殖质利于土壤团聚体的形成,土体中团聚体的增多,能显著的增加土壤的抗侵蚀能力<sup>[14]</sup>。

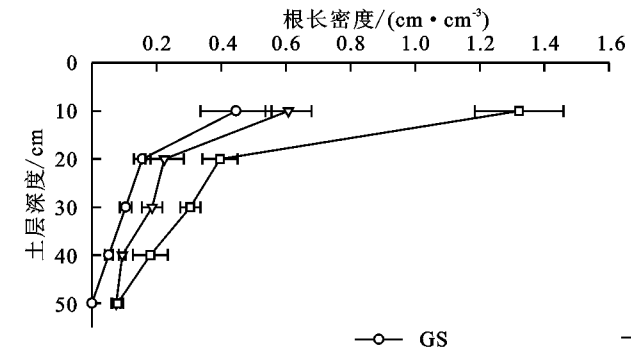


图 2 3 种边坡表层根长密度和生物量

2.2 3 种边坡的根长密度与根系生物量

3 种边坡根土复合体的根长密度,在土壤中的垂

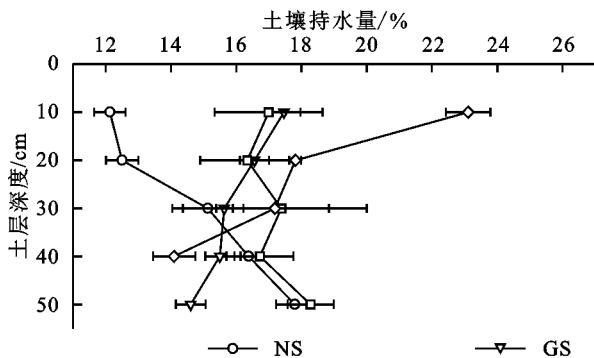
直分布变化趋势一致,都是随着土层的加深而减小,并且在土壤表层的 0—10 cm 分面有最大的根长密

度,均显著高于其他层( $p < 0.05$ );草丛和灌丛的根系生物量都较少,在各层间的分布较相近,而林木各层之间变化较大,0—30 cm 分布最多,而在 30—50 cm 分布较小,接近草丛和灌丛(图 2)。

已有的研究成果表明,植物根系的分布,随着土层的加深而逐渐降低,且大多都集中分布在表层 30 cm,根系生物量的分布也呈这种规律<sup>[15]</sup>。本试验的结果也显示出这种规律,即根长密度和根系生物量也随着土层加深呈递减趋势。本研究中的草丛样地中,草本植物主要为库区水位回落后恢复生长的空心莲子草,其特点是地上部分较发达,而节间生长的不定根不发达;样地中的苍耳为一年生的草本,也在其生长的初期,也并未形成发达的根系,根量也较少。灌丛的根系的生物量较多,其根长密度的均值比草丛的大,但其生物量与草丛的生物量均值间差别不明显,仅在土体 20—30 cm 处的分布多于前者,说明灌丛土体的细根较草丛的多。林木的主根较为发达,根长密度和根量最大,细根的数量也较多。在取样时发现林木所处的土质层较薄,35 cm 以下基本为母质层,土质坚硬,分布的根量在此层急剧减少,根系生物量已经和草丛和灌丛接近。总之,林木有着最大的根长密度和根生物量,灌丛次之,但有较多的细根,而草丛土体的根系并不发达。已有的研究表明,根系提高土体因持力的关键有效因素是细根<sup>[4,6,12-13]</sup>,这也意味着在本研究中,灌丛和林木边坡应该有着较好的土体固持力。

### 2.3 4 种边坡土壤的含水量

4 种边坡土壤的含水量垂直变化趋势明显:裸地



的土壤持水量随着土层的深度逐渐增大,特别是 10—50 cm 的土层变化显著,林木的土壤持水量则出现相反的趋势,即随着土层加深而降低,草丛和灌丛的持水量变化较为相近,各土层间的变化不明显。就土壤表层 10 cm 的土壤持水量而言,林木最大,为 23.11%,草丛和灌木较小,分别为 17.46% 和 16.99%,裸地最小,仅为 12.13%。草丛和林木的田间持水量变化较为一致,都随土层加深而减小,裸土则是先减小再增大,拐点在 10—20 cm 的土层,灌丛各土层间田间持水量基本一致,变化不明显(图 3)。

土壤的水分对植物根系的生长和分布有直接的影响,同时植物根系的生长也会对土壤环境,包括土壤水分的含量也会产生反作用,而土壤各层中相对稳定的含水量是表征土壤边坡稳定的重要参数之一<sup>[3,5]</sup>。图 3 的结果显示,灌丛边坡的土壤水分含量在土层之间变化并不明显,说明灌丛边坡土壤各层之间的理化性质较为接近,加之根系的作用,能使其保持在一个较为稳定的水分含量水平,因而利于土体的稳定。试验中,林木表层的腐殖质较为发达,与其他 3 种边坡土壤类型相比,土壤含水量较高,田间持水量也最高,但因其土质较薄,所以土壤含水量和田间持水量随着土层的变化幅度较大。草丛植被有较发达的地上部分,盖度很大( $> 80\%$ ),能形成较好的微生境,所以土层的土壤含水量变化不大。裸地土壤表层无植被覆盖,土壤表层水分易于蒸发,所以土壤中的含水量随土层加深急剧减小。

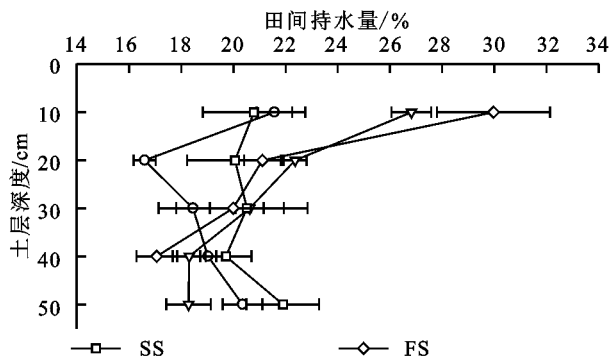


图 3 4 种边坡的土壤含水量

从图 4 可以看出,裸地的土壤持水量与田间持水量相比,尽管变化趋势较一致,但它样各层之间差值变化较大,特别是表层 0—10 cm 之间最大,0—20 cm 次之,然后才逐渐趋于较稳定;而灌丛和林木的土壤含水量与田间持水量之间的差值,在各层间较一致。

由此可以推测,裸地的表层有较大的吸水潜能,但由于无植被作用,其土壤含水量保持在一个较低的水平,如果受雨水或水库水淹的作用,其表层极易积累大量的水分,不能及时通过植被的蒸发而降低水分

含量,因而其稳固能力较低。林地和灌丛则不同,各层之间的土壤含水量和田间持水量之间的变化趋势一致,说明根系对土壤水分的调控作用十分明显,这种特征十分利于土体边坡的稳定。

### 2.4 4 种边坡的土壤抗剪强度

4 种边坡的土壤抗剪强度变化趋势各不一样,总体来说,草丛的变化特点较为明显,与其他 3 种植被类型覆盖的边坡相比,各层的抗剪强度均较小,且垂直变化幅度不大;林木类型边坡的抗剪强度,在各层

间(0—30 cm)变化较小,但其深层的值最大;相对而言灌丛的抗剪强度在各层的值均较大;裸地的抗剪强度在整个土层变化幅度最大,在 10—20 cm 的值达到最大,然后随土层加深而大幅减小(图 5)。

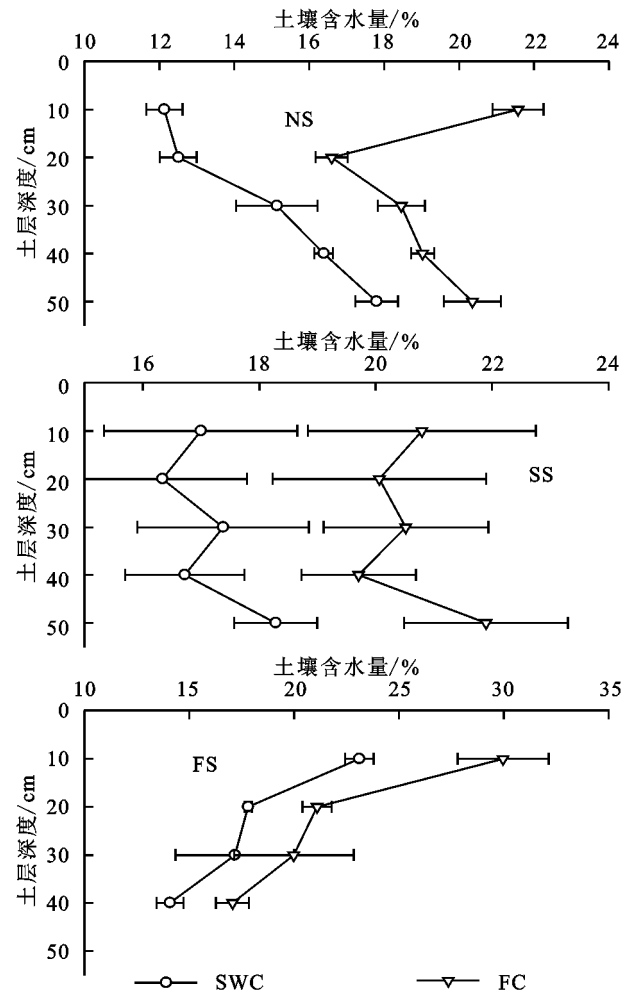


图 4 3 种边坡的土壤持水量和田间持水量对比

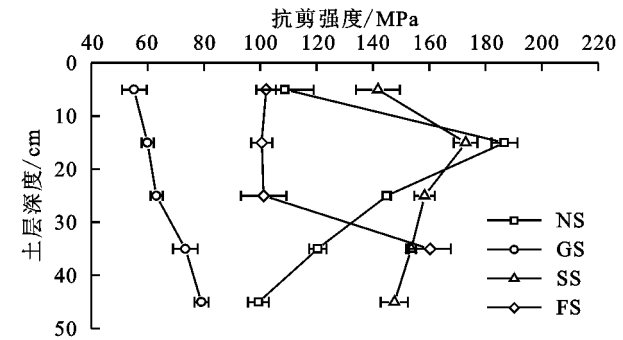


图 5 4 种不同植被边坡抗剪强度

影响土体抗剪强度的因素很多,土壤的理化性质,如土质的类型、团聚体的含量、水分的含量等和根系的增强作用等<sup>[3,13]</sup>,当主要考虑根系和水分对土壤抗剪强度的影响时,较大的根长密度、较多的细根量和相对较低的土壤含水量利于提高土壤的抗剪强度。本研究中测量了边坡土壤的含水量和土体中根系特征,当仅考虑这两个影响土体抗剪强度的主要因素时,裸地边坡的抗

剪切仅与土壤的含水量相关,而其较低的水量提高了土壤的抗剪能力;草丛边坡空心莲子草由于经历了冬季水淹,可能恢复生长的时间较短(1 个多月),不定根较细胞而且短,难以穿插而形成稳定土体的网络结构,因而对增强土壤的抗剪强度贡献不明显,又由于有高于裸地边坡的含水量,所以表现出最小的抗剪强度。灌丛的含水量低于林木,也有相对较大的根长密度,所以根系网络缠绕土体的潜能应该较强,因而有着较高的抗剪强度能力;林木覆盖的边坡有最大的根长密度,因而有发达的根系网络,但土壤的含水量较高,两者的共同作用的结果使它并没有表现出较高的抗剪强度。

3 结论

综上所述,灌丛边坡有低于林木的含水量,有显著的土壤抗冲和土壤抗蚀能力,有较多的细根和较大根长密度,也有较大的土壤抗剪强度,实测的抗冲性和抗蚀性也是最强的;林木有最大的土壤含水量,最多的根系分布,而草丛有着较少的根量,有着最小的抗剪强度。因此,灌丛边坡的植被根系对土壤固持力的增强作用最为明显,应该能在植被构建中能发挥最优的保持水土、稳定边坡土体的生态效应。林木根系也有较好的提高土壤固持力的效果,考虑到对库区通航的影响,可以种植在较高的地段,以充分发挥其植冠和茎干的截留及其枯落物的较强涵养水源的重要作用。在本研究中草丛的根系未能表现出较好的稳固土体的作用,可能与其优势物种空心莲子草的根系特点有关,但考虑到空心莲子草是耐水淹物种,经历高强度水淹出水后仍能迅速的恢复生长<sup>[16]</sup>,因而也应关注其对库岸边坡积极的生态恢复效应。

参考文献:

[1] 戴方喜,许文年,陈芳清. 对三峡水库消落区生态系统与其生态修复的思考[J]. 中国水土保持,2006(12):6-8.

[2] Mitsch W J. Ecological engineering—the 7—year itch. [J]. Ecological Engineering, 1998,10:119-138.

[3] Osman N. Parameters to predict slope stability—soil water and root profiles[J]. Ecological Engineering, 2006,28:90-95.

[4] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):34-37,117.

[5] Fan C C. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content[J]. Ecological Engineering, 2008,33:157-156.

[6] 熊燕梅,夏汉平,李志安,等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J]. 应用生态学报,2007,18(4):895-904.

[7] 鄢朝勇,叶建军,韦书勇. 植被对边坡浅层稳定的影响[J]. 水土保持研究,2007,14(1):24-28.

[8] 沈慧,姜凤岐,杜晓军. 水土保持林土壤改良效益评价研究[J]. 生态学报. 2000,20(5):753-758.

- [2] 王英,曹明奎,陶波,等.全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J].地理研究,2006,25(6):1031-1040.
- [3] 李红梅,周天军,宇如聪.近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J].大气科学,2008,32(2):358-370.
- [4] 孙林海,陈兴芳.南涝北旱的年代气候特点和形成条件[J].应用气象学报,2003,14(6):641-647.
- [5] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):3-8.
- [6] 王绍武,龚道溢,叶瑾琳,等.1880年以来中国东部四季降水量序列及其变率[J].地理学报,2000,55(3):281-293.
- [7] Schneider U, Becker A, Finger P, et al. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014,115(1-2):15-40.
- [8] Krueger O, Schenk F, Feser F, et al. Inconsistencies between long-term trends in storminess derived from the 20CR reanalysis and observations [J]. Journal of Climate, 2013,26(3):868-874.
- [9] Wang X L, Feng Y, Compo G P, et al. Is the storminess in the Twentieth Century Reanalysis really inconsistent with observations? A reply to the comment by Krueger et al. (2013b)[J]. Climate Dynamics, 2014,42(3/4):1113-1125.
- [10] Qian C, Zhou T. Multidecadal variability of North China aridity and its relationship to PDO during 1900—2010[J]. Journal of Climate, 2014,27(3):1210-1222.
- [11] 王芬,曹杰,李腹广,等.多套格点降水资料在云南及周边地区的对比[J].应用气象学报,2013,24(4):472-483.
- [12] 孙风华,杨素英,任国玉.东北地区降水日数、强度和持续时间的年代际变化[J].应用气象学报,2007,18(5):610-618.
- [13] 贺伟,布仁仓,熊在平,等.1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J].生态学报,2013,33(2):519-531.
- [14] 梁军,张胜军,石小龙,等.2010年8月8—10日辽东半岛暴雨过程的中尺度特征分析[J].高原气象,2012,31(5):1320-1331.
- [15] 姜晓艳,刘树华,马明敏,等.东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析[J].地理研究,2009,28(2):354-362.
- [16] 冯新,王新,王元.东北地区汛期降水与全球大洋海温异常关系的 SVD 分析[J].热带气象学报,2006,22(4):367-373.
- [17] 丁婷,陈丽娟,崔大海.东北夏季降水的年代际特征及环流变化[J].高原气象,2015,34(1):220-229.
- [18] 唐蕴,王浩,严登华,等.近50年来东北地区降水的时空分异研究[J].地理科学,2005,25(2):172-176.
- [19] 孙力,安刚,丁立,等.中国东北地区夏季降水异常的气候分析[J].气象学报,2000,58(1):70-82.
- [20] Wan H, Zhang X, Zwiers F W, et al. Effect of data coverage on the estimation of mean and variability of precipitation at global and regional scales[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013,118(2):534-546.
- [21] 濮冰,王绍武,朱锦红.中国东部四季降水量变化空间结构的研究[J].北京大学学报:自然科学版,2007,2(5):620-629.
- [22] 朱艳峰,陈隆勋,宇如聪.中国气候异常变化与 ENSO 准四年循环的联系分析[J].热带气象学报,2003,19(4):345-356.
- [23] 潘静,李崇银,顾薇.太阳活动对中国东部夏季降水异常的可能影响[J].气象科学,2010,30(5):574-581.
- [24] 曹永强,刘佳佳,高璐.近54年来辽西北地区降水与太阳黑子关系研究[J].地理科学,2015,35(8):1027-1032.

~~~~~

(上接第123页)

- [9] 李娅,曾波,叶小齐,等.水淹对三峡库区岸生植物秋华柳(*Salix variegata* Franch.)存活和恢复生长的影响[J].生态学报,2008,28(5):1923-1930.
- [10] 王勇,吴金清,陶勇,等.三峡库区消涨带特有植物疏花水柏枝(*Myricaria laxiflora*)的自然分布及迁地保护研究[J].武汉植物学研究,2003,21(5):415-422.
- [11] 李昌晓,钟章成.模拟三峡库区消落带土壤水分变化条件下落羽杉与池杉幼苗的光合特性比较[J].林业科学,2005,41(6):28-34.
- [12] 徐少君,曾波,类淑桐,等.三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应[J].土壤学报,2011,48(1):160-167.
- [13] 陆桂红,杨顺,王钧,等.植物根系固土力学机理的研究进展[J].南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(2):151-156.
- [14] 吴彦,刘世全,付秀琴,等.植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(1):45-49.
- [15] 崔浪军,梁宗锁,韩蕊莲,等.沙棘—杨树混交林生物量、林地土壤特性及其根系分布特征研究[J].林业科学,2003,39(6):1-7.
- [16] 王海锋,曾波,李娅,等.完全水淹条件下空心莲子草的生长、存活及出水后的恢复动态研究[J].武汉植物学研究,2008,26(2):147-152.