

三峡库区紫色土坡耕地草本植物根系固结地埂的土力学机制

周萍, 文安邦, 严冬春, 史忠林, 龙翼

(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)

摘要: 为揭示三峡库区紫色土坡耕地草本植物根系对地埂土壤固结作用的土力学机制, 选取库区3种草本地埂植物为研究对象, 对3种地埂植物根系的分布特征及抗拉性能进行研究, 并分析3种地埂土壤的抗冲性和抗剪强度。研究表明, 紫花苜蓿、蓼草、桂牧一号的根系总生物量分别为 (79.37 ± 1.26) , (97.99 ± 1.66) , (71.76 ± 1.96) g/m², 紫花苜蓿根系在0—10 cm土层分布最多, 蓼草主要根系分布深度集中在10—20 cm, 桂牧一号根系分布在0—30 cm土层深度范围内呈现出递增的趋势, 在30—40 cm土层深度根系含量不到10%。3种草本地埂植物根系的平均抗拉力为桂牧一号(7.93 N) > 蓼草(6.03 N) > 紫花苜蓿(5.40 N), 3种地埂植物根系单根抗拉力与根径呈幂函数关系, 蓼草地埂植物根系的单根抗拉力与根径的相关性最高。3种地埂植物根系的抗拉强度表现为蓼草根系(45.91 MPa) > 紫花苜蓿根系(19.68 MPa) > 桂牧一号根系(15.28 MPa)。3种不同草本地埂植物根系间的抗拉力和抗拉强度差异达到显著水平($P < 0.05$)。3种植物地埂土壤的抗冲性变化为蓼草地埂(85.28 L/(min · g)) > 紫花苜蓿(69.47 L/(min · g)) > 桂牧一号(60.86 L/(min · g)), 蓼草地埂土壤的抗冲性与紫花苜蓿和桂牧一号间存在显著差异($P < 0.05$)。3种草本植物地埂土壤的抗剪强度顺序为蓼草地埂(115.49 kPa) > 紫花苜蓿(91.73 kPa) > 桂牧一号(75.14 kPa)。结果表明, 蓼草地埂在三峡库区具有较好的固埂防蚀效果, 在三峡库区坡耕地固结地埂土壤中发挥重要作用。三峡库区草本植物固结地埂可为三峡库区坡耕地整治提供新思路。

关键词: 三峡库区; 坡耕地地埂; 草本植物根系; 固土力学作用

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0085-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.01.015

The Mechanics of Soil Reinforcement by Root on the Hedge of the Sloping Cultivated Lands of Purple Soils in the Three Gorges Reservoir Region

ZHOU Ping, WEN Anbang, YAN Dongchun, SHI Zhonglin, LONG Yi

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences,

The Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chengdu 610041)

Abstract: Aimed to reveal the mechanics of the soil reinforcement by root on the hedge of the sloping cultivated lands of purple soils in the Three Gorges Reservoir region, chosen three herbage hedge plants as the objects of this study. The root distribution and tensile strength of the three herbage hedge plants in the Three Gorges Reservoir region were compared. The results showed that the root biomass of *Medicago sativa*, *Eulaliopsis binata* and *Pennisetum americanum* × *P. purpureum* were (79.37 ± 1.26) g/m², (97.99 ± 1.66) g/m² and (71.76 ± 1.96) g/m², respectively. And the main root of *Medicago sativa* distributed in the 0 to 10 cm soil depth, the main root of *Eulaliopsis binata* distributed in the 10 to 20 cm soil depth and the main root of *Pennisetum americanum* × *P. purpureum* distributed deeper, in the 20 to 30 cm soil depth. The order of the average tensile resistance of the three herbage root were: *Pennisetum americanum* × *P. purpureum* (7.93 N) > *Eulaliopsis binata* (6.03 N) > *Medicago sativa* (5.40 N). There existed the power function relationship between the tensile resistance and root diameter, and there existed the highest correlation of *Eulaliopsis binata* roots. Meanwhile, the order of the tensile strength of the three herbage root were: *Eulaliopsis binata* (45.91 MPa) > *Medicago sativa* (19.68 MPa) > *Pennisetum americanum* × *P. purpureum* (15.28 MPa). There existed obviously significant difference of the tensile resistance and tensile strength among the

收稿日期: 2016-09-14

资助项目: 中国科学院科技服务网络(STS)项目(KFJ-SW-ST5-175, KFJ-EW-ST5-008); 国家自然科学基金项目(41671286); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402301)

第一作者: 周萍(1981—), 女, 陕西汉中, 人, 副研究员, 主要从事坡耕地土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zp09@imde.ac.cn

通信作者: 严冬春(1981—), 男, 湖北宜昌, 人, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: yan_dongchun@163.com

three herbage roots ($P < 0.05$). The order of the soil anti-scourability of the three herbage hedges were *Eulaliopsis binata* ($85.28 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{g})$) $>$ *Medicago sativa* ($69.47 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{g})$) $>$ *Pennisetum americanum* $\times$ *P. purpureum* ($60.86 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{g})$), and there existed obviously significant difference among the soil anti-scourability of the herbage hedges ($P < 0.05$). While the value of the soil shear strength had the similar order. However, there did not existed obviously significant difference among the soil shear strength of the herbage hedges ($P > 0.05$). The results showed that the *Eulaliopsis binata* hedge had better soil reinforcement and soil conservation in this region. And the herbage reinforced the hedges was a new idea for the sloping cultivated lands harnessing in the Three Gorges Reservoir region.

Keywords: Three Gorges Reservoir region; hedge of sloping cultivated lands; herbage roots; soil reinforcement mechanics by root

水土流失造成土地表层侵蚀、边坡失稳和养分损失,已经成为中国重大生态环境问题。“中国水土流失与生态安全综合科学考察”研究表明,全国土壤侵蚀总面积 357 km^2 , 占国土面积的 37% , 年均土壤侵蚀量达到 45 亿 t , 约占全球土壤侵蚀总量的 $1/5$ 。长江上游年均土壤侵蚀量 16 亿 t , 三峡库区是我国生态环境的脆弱区, 又是长江上游重点水土流失片区之一^[1], 三峡库区水土流失面积占库区土地总面积的 66.1% , 长江来沙量的 $60\% \sim 78\%$ 源于坡耕地^[2]。三峡库区坡耕地广泛分布着紫色砂页岩风化形成的初育土, 抗蚀性差, 土壤侵蚀强烈, 这不仅造成土层变薄、土地退化、土地生产力下降、农民生活贫困和生态环境恶化, 而且对中下游的水生态安全和三峡等水电工程安全运行造成严重威胁。

植物根系能有效防治土壤侵蚀, 能将土壤颗粒粘结起来, 也能将板结的土体分散, 并通过根系自身的腐解和转化合成腐殖质, 使土壤具有良好团聚结构和孔隙状况。在稳定土壤结构、防治土壤侵蚀等方面发挥的作用超过植物地上部分。植物根系因物种不同, 其根系形态结构特征不同; 根系生长的环境条件不同, 根系的发育、分布规律以及所发挥的固土改土能力也不同。植物根系固土已成为当前生态环境领域研究的热点。在水土流失区, 根系能使植物固定于土壤中, 使整个植株维持重力平衡, 根系的生长状况制约甚至很大程度上决定着植物地上部分的生长。植物根系可以改变土壤结构, 增强含根土壤的抗蚀性、抗冲性, 提高土体的稳定性。影响根系固土的力学因子主要集中于根—土复合体抗剪特性、根系抗拉特性以及根—土界面摩阻特性等^[3]。目前国内外对植物根系固土、护坡方面的研究, 主要集中在植物根系的力学效应方面。言志信等^[4]阐明了草本植物加固边坡的力学原理, 程洪等^[5]实测了几种草本植物的根系抗拉强度。已有研究对土壤抗冲性的研究主要集中在土壤抗冲性的形成机制方面, 特别是在植物根系与土壤抗冲性^[6]、土壤抗冲性的力学机制^[7]等方面, 且研究区域主要集中在黄

土高原地区, 也有少量文献探讨了三峡库区消落带植物根系对土壤抗侵蚀性能的影响^[8]。植物地埂在三峡库区坡耕地水土保持效益提高方面起到重要作用, 但目前针对坡耕地地埂植物根系固土效益及坡耕地地埂土壤抗冲性研究较少。因此, 本文选取三峡库区坡耕地经济效益较高的地埂植物紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、桂牧一号 (*Pennisetum americanum* $\times$ *P. purpureum*) 和库区坡耕地自然恢复良好的地埂植物菵草 (*Eulaliopsis binata*) 根系为研究对象, 对 3 种草本植物根系固结地埂土壤的土力学机制进行研究, 以期对三峡库区坡耕地土壤侵蚀减少、水土保持效益发挥和三峡库区坡耕地整治提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市忠县三峡库区水土保持与环境研究站 ($107^{\circ}3' - 108^{\circ}14'E$, $30^{\circ}03' - 30^{\circ}35'N$) 附近, 海拔 $117 \sim 1\,680 \text{ m}$, 属亚热带东南季风区山地气候, 年降水量 $1\,100 \sim 1\,400 \text{ mm}$, 降水多集中在 4—10 月, 占全年的 70% 以上^[7], 年日照时数 $1\,327 \text{ h}$, 太阳总辐射能 $347 \text{ kJ}/\text{m}^2$, 无霜期 340 d , 年均温 18.2°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温 $5\,891.4^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 80% 。该区岩层为侏罗系沙溪庙组砂岩、粉砂岩和泥岩, 主要土壤类型为中性紫色土, 土壤有机质为 $6.76 \text{ g}/\text{kg}$, 全氮 $0.98 \text{ g}/\text{kg}$, 阳离子交换率 $32.82 \text{ cmol}/\text{kg}$, pH 值为 $6.77 \sim 7.12$ 。该区域主要种植作物有玉米 (*Zea mays*)、红薯 (*Ipomoea batatas*)、黄豆 (*Glycine max*) 和柑橘 *Citrus reticulata* 等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择和样品采集 在踏查典型流域的基础上, 根据典型性和代表性原则选择草本植物固结地埂的坡面为研究对象, 样品采集时间为 2015 年 7 月 (表 1)。在 0—40 cm 深度按照每 10 cm 间隔采集原状土壤, 按 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 土层用铝制饭盒取原状土后在室内测定根系性质、原状地埂土壤的抗冲性和抗剪强度。

表 1 取样坡面基本特征

样地编号	地埂植物	坡长/m	坡度/(°)	地埂高度/cm	土壤类型
坡面 1	紫花苜蓿	18	15	15	紫色土
坡面 2	蓼草	20	15	15	紫色土
坡面 3	桂牧一号	23	15	15	紫色土

1.2.2 根系力学性质测定 为了探究地埂植物根系的力学性质,进行了地埂植物单根的抗拉试验。挖取新鲜坡耕地地埂植物紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、蓼草(*Eulaliopsis binata*)和桂牧一号(*Pennisetum americanum*×*P. purpureum*)根系洗净后擦干,在实验室冰箱 4℃环境中冷藏保存备用。在根系力学性质测定时用游标卡尺在待测的根段上选取 3 个部位分别测量其根径,取其平均值作为该根段的根径。根系抗拉试验采用自制的根系抗拉试验装置,抗拉强度 σ_e (MPa)的计算为:

$$\sigma_e = 4 P_{\max} / (\pi d^2)$$

式中: $P_{\max}$ 为根系的极限抗拉力(N); d 为断裂处两端根系直径的平均值(mm)。为了消除夹持力对根系抗拉力学性质的影响,本研究去除根系抗拉试验装置夹持器附近断裂的根系抗拉力值。

1.2.3 地埂土壤抗冲性测定 土壤抗冲性是指土壤抵抗径流机械破坏和推移的能力,主要与土壤物理性质和外在的生物因素有关。本研究采用水槽冲刷原状土试验进行地埂土壤的抗冲性测试。用单位面积上所需冲刷力的大小来评价土壤的抗冲性,计算公式为:

$$M = (G_1 - G_2) / Q$$

式中: M 为冲刷模数(g/L); Q 为冲刷所用水量(L); G_1 、 G_2 为冲刷前、冲刷后的土样重量(g)。

1.2.4 地埂土壤抗剪强度测定 采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪进行剪切试验,设置 50,100,150,200 kPa 4 个荷载等级,剪切速率为 0.1 mm/min,剪切位移为 5 mm,测定 3 种草本植物地埂土壤的抗剪强度。计算公式为:

$$\mu = \sigma + \text{tg}\theta \times F$$

式中: μ 为土壤的抗剪强度; σ 和 θ 分别为粘聚力和内摩擦角(°); F 为作用在剪切面上的法向应力。

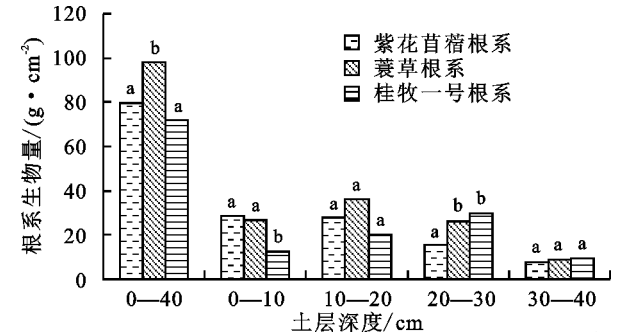
1.2.5 数据统计分析 对试验数据采用单因素方差分析(ANOVA) 检验不同植物类型地埂土壤及不同土层地埂土壤抗冲性及抗剪强度的差异。试验数据在 SPSS 18.0 统计分析软件中进行。

2 结果与分析

2.1 坡耕地地埂植物根系分布特征

坡耕地植物根系在地埂土壤中的穿插、缠绕能够增强地埂土壤的稳定性。根系形态决定了根系加固作用在土壤中的分布和效果^[9]。从图 1 可以看出,紫花苜蓿、蓼草、桂牧一号草本地埂植物的根系总生物量分别为

(79.37±1.26),(97.99±1.66),(71.76±1.96) g/m²,3 种草本地埂植物的根系均为须根型,根系分布深度较浅,主要集中在 10—40 cm 土层深度范围内,这对地埂土壤有较好的固结作用。不同土层深度根系生物量的变化表现为随着土层深度的增加,紫花苜蓿根系生物量呈现出递减趋势,紫花苜蓿根系在 0—10 cm 土层分布最多,占根系总生物量的 35.75%,蓼草主要根系分布深度较紫花苜蓿深,主要集中在 10—20 cm 深度土层范围内,这一土层深度内根系生物量占蓼草根系总生物量的 37.21%,其次为 0—10 cm 深度土层根系生物量占蓼草总生物量的 26.98%。而桂牧一号根系分布在 0—30cm 土层深度范围内呈现出递增的趋势,在 20—30cm 土层深度根系生物量最高,占桂牧一号根系总生物量的 40.79%,而在 30—40 cm 土层深度根系生物量不到 10%。



注:图中标有不同小写字母表示地埂植物根系生物量之间存在显著差异(P<0.05)。

图 1 三峡库区不同草本地埂植物根系分布特征

2.2 地埂植物根系抗拉性

根系固土力学性能离不开根系自身抗拉力学性能,根系发挥抗拉性能,对周围土壤的斜向牵引效应是植物根系抗蚀护坡力学效应的重要组成部分^[10]。地埂植物根系通过与土壤相互作用发挥自身的抗拉强度,从而达到固持土壤,维持埂坎稳定性的效果。本试验研究紫花苜蓿根系、蓼草根系和桂牧一号根系的抗拉性能,测得的 3 种地埂植物根径范围为 0.20~1.20 mm,抗拉力范围为 1.60~13.00 N(图 2),根据公式算得抗拉强度范围为 8.49~74.65 MPa(图 3)。3 种草本地埂植物根系的平均抗拉力次序为桂牧一号(7.93 N)>蓼草(6.03 N)>紫花苜蓿(5.40 N)。3 种地埂植物根系单根抗拉力与根径呈幂函数关系,蓼草地埂植物根系的单根抗拉力与根径的相关性最高。3 种地埂植物根系的抗拉强度表现为蓼草根系(45.91 MPa)>紫花苜蓿根系(19.68 MPa)>桂牧一号根系(15.28 MPa)。蓼草根系的抗拉强度最高,主要是因为蓼草根径变化范围较小,0.23~0.61 mm,平均根径为 0.41 mm,蓼草根系单根的平均抗拉力较桂牧一号低 23.93%,较紫花苜蓿高 11.90%。而桂牧一号虽然单根抗拉力较大,但由于其根径较粗,根径变化范围为 0.49~1.20 mm,平均

根径为 0.81 mm,因此桂牧一号抗拉强度为 3 种地埂植物根系最小值。经显著性检验,3 种不同草本地埂植物根系间的抗拉力和抗拉强度差异达到显著水平($P<0.05$)。从试验结果可知,地埂植物根系的抗拉强度越强,越有利于缓冲埂坎土壤的下滑力,提高根系固土能力,从而增加地埂的稳定性。因此,蓼草地埂土壤的稳定性最高,其次为紫花苜蓿和桂牧一号地埂。

通过对三峡库区坡耕地 3 种地埂植物根系单根抗拉力与根径的相关性分析(表 2)可知,蓼草、紫花苜蓿和桂牧一号根径与单根的抗拉力之间存在幂函数关系($P<0.05$)。而蓼草、紫花苜蓿地埂植物根系单根抗拉强度与根径之间存在幂函数关系,桂牧一号地埂植物根系单根抗拉强度与根径之间存在指数函数关系($P<0.05$)。

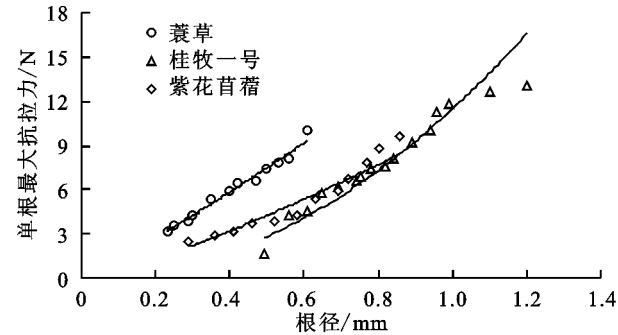


图 2 三峡库区 3 种地埂植物根系单根抗拉力与根径关系

2.3 坡耕地植物地埂土壤的抗冲性

植物根系可直接和间接地改变土壤结构,增强土壤的抗侵蚀能力^[11]。地埂植物错综复杂的根系能显

著改善地埂土壤的物理性状,增强土壤入渗能力,有效固结土粒,增强土壤结构稳定性和提高土壤的抗蚀性^[12]。三峡库区 3 种植物地埂土壤的抗冲性变化为:蓼草地埂(85.28 L/(min·g))>紫花苜蓿(69.47 L/(min·g))>桂牧一号(60.86 L/(min·g)),显著性检验结果表明,蓼草地埂土壤的抗冲性与紫花苜蓿和桂牧一号地埂土壤抗冲性间存在显著差异($P<0.05$)(图 4)。这主要是因为蓼草植物根系生物量较大,且蓼草根系主要分布在 0—20 cm 深度地埂土壤中,使得蓼草根系对地埂土壤的固结作用较其它 2 种地埂植物根系强。植物地埂能够提高土壤的抗冲能力,这主要是因为植物地埂土壤中植物根系对土壤有一定的固结作用。土壤根系对土壤抗冲性具有增强的效应已经被国内外诸多学者验证^[11]。而且根系的活动还可以改善土壤的物理性质,根系的分泌物及其死亡分解后所形成的腐殖质又能作为土壤团粒的胶结剂,团聚土粒,形成稳定的团粒,有利于提高土壤的抗冲能力^[12]。

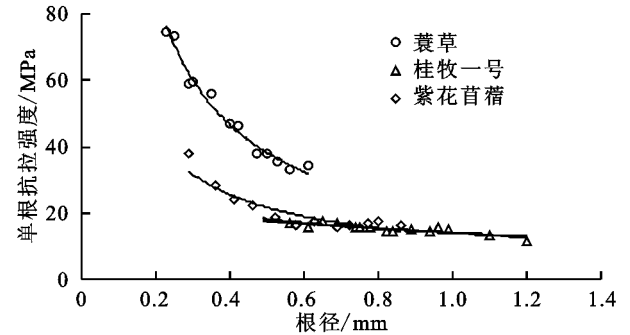
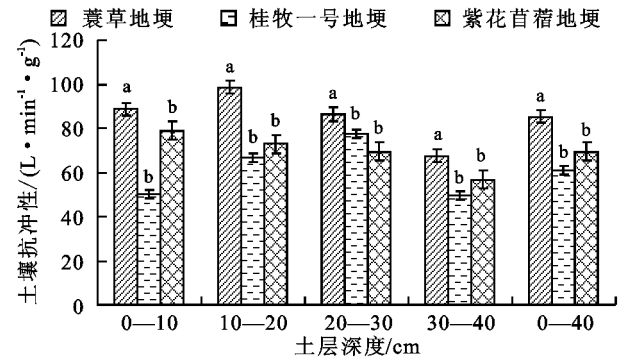


图 3 三峡库区 3 种地埂植物根系单根抗拉强度与根径关系

表 2 三峡库区 3 种草本地埂植物根系抗拉性能与根径关系

地埂植物类型	抗拉力/N			抗拉强度/MPa		
	拟合方程	R^2	P	拟合方程	R^2	P
蓼草	$F=16.154D^{1.1093}$	0.9855	<0.05	$Tr=20.578D^{-0.891}$	0.9776	<0.05
紫花苜蓿	$F=10.211D^{1.2646}$	0.9435	<0.05	$Tr=13.007D^{-0.735}$	0.8495	<0.05
桂牧一号	$F=11.475D^{2.0195}$	0.8893	<0.05	$Tr=22.611D^{-0.485}$	0.7317	<0.05



注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

图 4 不同土层深度 3 种草本植物地埂土壤抗冲性特征

2.4 植物地埂土壤的抗剪强度

土壤抗剪强度是土壤抗性的量度指标,其值越大,土壤边坡抵抗径流的剪切破坏能力也就越强。含

根土壤的破坏形式主要是土壤的剪切破坏,因此选择三峡库区 3 种草本植物地埂土壤进行抗剪强度测试,地埂土壤的抗剪强度试验结果(图 5)表明:3 种草本植物地埂土壤的抗剪强度变化范围为 75.14~115.49 kPa,草本植物地埂土壤的抗剪强度顺序为:蓼草地埂(115.49 kPa)>紫花苜蓿(91.73 kPa)>桂牧一号(75.14 kPa),3 种草本植物地埂土壤在 10—30 cm 深度土层范围内有较高的抗剪强度。草本植物地埂土壤的抗剪强度分布土层浅,这主要与地埂植物根系分布深度有关,草本地埂植物的根系分布深度较浅,主要集中在 40 cm 土层以上,根系能够显著增大土体抗剪强度。从而使得地埂土壤的稳定性提高,减少了降雨及坡面径流对地埂的冲刷和崩塌。通过显著性分析可得,蓼草、桂牧一号和紫花苜蓿 3 种草本植物地埂土

壤的抗剪强度在 0—10 cm 土层深度,桂牧一号与蓼草和紫花苜蓿地埂土壤抗剪强度达到显著性差异水平($P < 0.05$),在 10—20 cm 土层深度,蓼草与桂牧一号和紫花苜蓿地埂土壤的抗剪强度存在显著差异,而在 20—30 cm 深度土层、30—40 cm 深度土层和 0—40 cm 深度土层,3 中植物地埂土壤抗剪强度间差异未达到显著性水平($P > 0.05$)。这主要是因为 3 种地埂植物根系的地下生物量分布较浅,根系对地埂土壤抗剪强度有较强的影响有关。

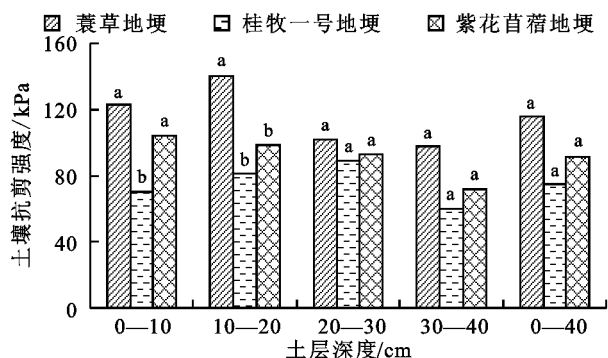


图5 三峡库区3种草本地埂土壤抗剪强度比较

3 讨论

紫色土是指发育于亚热带和热带地区紫色砂页岩母质土壤,是三峡库区的主要土壤类型。三峡库区紫色土大多数坡耕地的坡面上每隔一定间距都有土质植物地埂的存在,植物地埂能有效减少坡面上方的来水来沙,而地埂上的植物根系又能起到很好的固结地埂土壤作用,使得坡耕地抗侵蚀能力提高,坡面水土保持效益明显。草本植物根系在地埂土壤中的分布具有一定的水平幅度和垂直深度,其横向生长和纵向生长可在地埂土壤内部形成根系网络,使根系系统相互交错,增加了地埂土壤抵抗流水冲刷的能力^[11]。随着耕作时间的逐年延长,草本植物地埂可有效拦截坡耕地上方来水来沙,逐渐改变坡面微地形,逐步减小坡度,梯化坡地,从而有效控制坡耕地水、土和养分流失^[13]。

根系抗拉力学特性对于根系发挥固土力学能力非常重要,众多研究者对根系抗拉力学特性进行了广泛的研究,尤其对根系抗拉力学特性的影响因素进行了深入研究。植物根系的抗拉特性由多种因素决定,如植物种类、根系的形态、分布特征等。已有研究结果表明,草本植物根系平均抗拉强度与乔木、灌木根系的差距不大,有的甚至高于乔木灌木,例如乔木油松、白桦,灌木柠条、锦鸡儿、白刺^[14]根系的平均抗拉强度明显小于草本植物根系的平均抗拉强度,这与草本植物根径较小有关^[15]。因此,从稳定浅层土体角度来看,草本植物根系相比乔木和灌木具有一定的固结土壤优势,且草本植物地上部分生物量较小,高度适中,对坡地作物的遮阴及干扰较乔木和灌木小,适

宜生长在埂地上,起到良好的固埂防蚀作用。

本研究分析了3种草本地埂植物根系生物量在 0—40 cm 土层内的分布规律,阐明了3种草本地埂植物根系的垂直分布格局。土壤抗冲性、抗剪强度是衡量土壤抗侵蚀能力大小的主要影响因子,对草本植物地埂土壤的抗冲性和抗剪强度的研究有助于揭示地埂植物根系的水土保持作用机理。三峡库区紫色土草本地埂植物根系的存在显著提高了土体的抗剪强度,这种增强作用主要是通过增加黏聚力来实现的。已有研究表明,根土复合体的抗剪强度随含根量的增加而增大,但当含根量达到一定值时,根土复合体的强度增加并不明显,即存在最佳含根量区域。草本地埂植物根系可以显著提高地埂土壤抗剪强度,增强土壤的抗侵蚀能力,从而有效减少水土流失。

三峡库区草本地埂植物根系发达,具有较强的抗拉强度,草本植物根土复合体的抗冲性和抗剪强度的增加,可有效减少坡面土壤侵蚀和水土流失,更好地发挥稳定和固结地埂作用,可为三峡库区坡耕地整治提供新思路。

4 结论

三峡库区3种草本地埂植物紫花苜蓿、蓼草、桂牧一号根系总生物量分别为 (79.37 ± 1.26) , (97.99 ± 1.66) , (71.76 ± 1.96) g/m²,紫花苜蓿根系在 0—10 cm 土层分布最多,蓼草主要根系分布深度较紫花苜蓿深,主要集中在 10—20 cm 深度土层范围内。而桂牧一号根系分布在 0—30 cm 土层深度范围内呈现出递增的趋势,在 30—40 cm 土层深度根系含量不到 10%。

3种地埂植物的根径范围为 0.20~1.20 mm,平均抗拉力次序为桂牧一号(7.93 N) > 蓼草(6.03 N) > 紫花苜蓿(5.40 N),3种地埂植物根系单根抗拉力与根径呈幂函数关系,蓼草地埂植物根系的单根抗拉力与根径的相关性最高。3种地埂植物根系的抗拉强度表现为蓼草根系(45.91 MPa) > 紫花苜蓿根系(19.68 MPa) > 桂牧一号根系(15.28 MPa)。经显著性检验,3种不同草本地埂植物根系间的抗拉力和抗拉强度差异达到显著水平($P < 0.05$)。

3种植物地埂土壤的抗冲性变化为:蓼草地埂(85.28 L/(min·g)) > 紫花苜蓿(69.47 L/(min·g)) > 桂牧一号(60.86 L/(min·g)),显著性检验结果表明,蓼草地埂土壤的抗冲性与紫花苜蓿和桂牧一号地埂土壤抗冲性间存在显著差异($P < 0.05$)。其抗剪强度变化范围为 75.14~115.49 kPa,草本植物地埂土壤的抗剪强度顺序为:蓼草地埂(115.49 kPa) > 紫花苜蓿(91.73 kPa) > 桂牧一号(75.14 kPa),3种草本植物地埂土壤的抗剪强度在 0—40 cm 深度土层间的差异未达到显著性水平($P > 0.05$)。

本研究主要对地埂植物的根系分布、根系生物量、根系形态进行了研究,由于地埂植物根系大多为须根系,因此完整的地埂植物根系较难获得,且由于地埂植物根系分析软件等试验条件的限制,未进行地埂植物完整的根系形态特征分析。今后应加强地埂植物根系特征的系统性研究。且土壤水分作为一个重要因素,既影响根系的生长、分布,也影响着植物根系固土力学性能的发挥,其影响机理较为复杂多变,这也是今后研究的主要内容。

参考文献:

- [1] 滕明君,曾立雄,肖文发,等. 长江三峡库区生态环境变化遥感研究进展[J]. 应用生态学报,2014,25(12):3683-3693.
- [2] 王玉宽,文安邦,张信宝. 长江上游重点水土流失区坡耕地土壤侵蚀的¹³⁷Cs 法研究[J]. 水土保持学报,2003,17(2):77-80.
- [3] Bourrier F, Kneib F, Chareyre B, et al. Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots[J]. Ecological Engineering, 2013, 61(12):646-657.
- [4] 言志信,宋杰,蔡汉成,等. 草本植物加固边坡的力学原理[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(2):30-34.
- [5] 程洪,颜传盛,李建庆,等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究,2006,13(1):62-65.
- [6] 黎建强,张洪江,陈奇伯. 长江上游不同植物篱系统土壤抗冲、抗蚀特征[J]. 生态环境学报,2012,21(7):1223-1228.
- [7] 徐少君,曾波. 三峡库区 5 种耐水淹植物根系增强土壤抗侵蚀效能研究[J]. 水土保持学报,2008,22(6):13-18.
- [8] 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.
- [9] Zhang C B, Chen L H, Liu Y P, et al. Tri-axial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(1):19-26.
- [10] 程洪,谢涛,唐春,等. 植物根系力学与固土作用机理研究综述[J]. 水土保持通报,2006,26(1):97-102.
- [11] 万利,王震洪,杨成波. 生态修复区不同植物群落的根系固土力学机理[J]. 农业工程学报,2009,25(10):278-283.
- [12] 陈明霞,查轩. 生草覆盖和植物篱措施对红壤坡地土壤侵蚀调控效应研究[J]. 亚热带资源与环境学报,2009,14(1):32-37.
- [13] 周萍,文安邦,张信宝,等. 植物固结地埂的水土保持功能探析[J]. 人民长江,2012,43(7):81-84.
- [14] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊 2):3445-3452.
- [15] 吕春娟,陈丽华,周硕,等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊 1):329-335.
- [3] 王云琦,王玉杰,张洪江,等. 重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(3):40-45.
- [4] Tang X F, Zhao Y G. Effects of Moisture Content on the Shear Strength of a Compacted Clay[J]. Metal Materials & Metallurgy Engineering, 2009, 48(8):246-252.
- [5] 姚军,吴发启,宋娟丽,等. 黄土高原沟壑区坡耕地表层土壤抗剪强度影响因素分析[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(3):236-239.
- [6] 李云鹏,王云琦,王玉杰,等. 重庆缙云山不同林地土壤剪切破坏特性及影响因素研究[J]. 土壤通报,2013,44(5):1074-1080.
- [7] 廖红建,李涛,彭建兵. 高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究[J]. 岩土力学,2011,32(7):1939-1944.
- [8] 杨永红,刘淑珍,王成华. 土壤含水量和植被对浅层滑坡土体抗剪强度的影响[J]. 灾害学,2006,21(2):50-54.
- [9] 倪九派,袁天泽,高明,等. 土壤干密度和含水率对 2 种紫色土抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(3):72-77.
- [10] 李贵圆. 冻融作用对黑土、棕壤团聚体水稳性影响对比研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2012.
- [11] 李婧. 土壤有机质测定方法综述[J]. 分析试验室,2008,27(增刊 1):154-156.
- [12] 席永慧. 土力学与基础工程[M]. 上海:同济大学出版社,2006.
- [13] 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.
- [14] 闫建梅,何丙辉,田太强,等. 川中丘陵区不同土地利用方式对土壤质量的影响[J]. 灌溉排水学报,2015,34(10):73-76.
- [15] 郑子成,张锡洲,李廷轩,等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. 农业机械学报,2014,45(5):125-130.

(上接第 84 页)