试验研究

三峡库区紫色土坡耕地草本地埂植物根系分布及抗拉力学特征

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，四川 成都 610041）

摘　要：[目的] 探究三峡库区紫色土坡耕地 3 种草本地埂植物根系分布及抗拉特征，为揭示地埂植物根系固结地埂提供理论依据和数据支持。[方法] 以三峡库区自然恢复的蓑草、人工种植的韭菜和蚕豆这 3 种草本地埂植物根系为研究对象，对比分析其根系在不同地埂土壤深度的分布规律及根系抗拉特性。[结果] (1) 在 0—40 cm 深度土壤中 3 种草本地埂植物根系直径变化表现出：蚕豆根系＞韭菜根系＞蓑草根系。3 种草本地埂植物根系直径与地埂土壤的土层深度间服从指数函数关系。(2) 在 0—40 cm 地埂土层深度范围内，韭菜根系生物量与蓑草根系和蚕豆根系生物量之间存在显著性差异（$p<0.05$），韭菜和蚕豆地埂植物根系生物量随土层深度的增加而逐渐减小，蓑草地埂植物根系生物量随土层深度的增加先增加后减小。(3) 3 种草本地埂植物根系的单根平均抗拉力次序为蚕豆根系(10.53 N)＞蓑草根系(6.03 N)＞韭菜根系(4.51 N)，3 种地埂植物根系单根抗拉力与根径呈幂函数关系（$p<0.05$）。3 种地埂植物根系的抗拉强度表现为蓑草根系(45.91 MPa)＞蚕豆根系(18.02 MPa)＞韭菜根系(12.20 MPa)。(4) 3 种草本地埂植物根系黏聚力变化顺序为：蓑草根系(0.013 1 kPa)＞蚕豆根系(0.009 4 kPa)＞韭菜根系(0.005 5 kPa)且 3 种地埂植物根系黏聚力与土层深度呈指数函数关系（$p<0.01$）。[结论] 自然恢复的蓑草地埂在三峡库区较其他两种人工种植的地埂植物有更好的固结地埂效果，从而有效控制坡面土壤侵蚀和水土流失。草本植物固结地埂可为三峡库区坡耕地治理提供新思路。

关键词：三峡库区坡耕地；草本地埂植物；根系分布；根系抗拉特征；根系黏聚力

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2017)03-0001-06　　**中图分类号**：S157.4

文献参数：周 萍，文安邦，严冬春，等. 三峡库区紫色土坡耕地草本地埂植物根系分布及抗拉力学特征[J]. 水土保持通报，2017，37(3)：1-6. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.001；Zhou Ping, Wen Anbang, Yan Dongchun, et al. Roots distribution and tensile properties of herbages on hedge of sloping cultivated lands of purple soils in Three Gorges Reservoir region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 1-6. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.001

Roots Distribution and Tensile Properties of Herbages on Hedge of Sloping Cultivated Lands of Purple Soils in Three Gorges Reservoir Region

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

(*The Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*)

Abstract: [Objective] We aimed to illustrate the roots distribution and tensile properties of three herbages on the hedge of sloping cultivated lands of purple soils in Three Gorges Reservoir region, in order to supply the theory evidence and data supports for hedge consolidation with hedge plants. [Methods] One natural herbage, *Eulaliopsis binata*, and two artificial herbages, *Allium tuberosum* and *Vicia faba* were selected and their root distributions and root tensile properties in different soil depths were compared. [Results] (1) Diameters of the three herbages in 0—40 cm soil depth ranked as: *V. faba*＞*A. tuberosum*＞ *E. binata*. Exponential

收稿日期：2016-09-29　　**修回日期**：2016-10-19

资助项目：国家自然科学基金项目“土质地埂对紫色土坡耕地梯化过程的作用机理”(41671286)；中国科学院科技服务网络(STS)项目“三峡库区生态清洁小流域建设技术体系试验示范”(KFJ-SW-STS-175, KFJ-EW-STS-008)；国家重点研发计划课题“多因素影响下长江泥沙来源及分布变化研究”(2016YFC0402301)

第一作者：周萍(1981—)，女(汉族)，陕西省汉中市人，博士，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。

通讯作者：文安邦(1964—)，男(汉族)，重庆市忠县人，硕士，研究员，主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail：wabang@imde.ac.cn。

function can be used to described their relationship between their diameter and the distributed soil depth. (2) There existed obviously significant difference between the roots biomass of *A. tuberosum* and the root biomass of *V. faba* and *E. binata* in 0—40 cm soil depth($p<0.05$). Root biomass of *A. tuberosum* and *V. faba* were both decreased with the downward distribution in soil, but the root biomass of *E. binata* firstly increased then decreased with the increase of soil depth. (3) Mean root tensile force of the three hedge herbages ranked as: *V. faba*(10.53 N)>*E. binata*(6.03 N)>*A. tuberosum*(4.51 N). And mean root tensile force was found dependent in power function upon root dimeter($p<0.05$). Meanwhile, the rank of mean root tensile strength was *E. binata*(45.91 MPa)>*V. faba*(18.02 MPa)>*A. tuberosum*(12.20 MPa). (4) The mean root cohesion of the three herbages ranked as: *E. binata*(0.013 1 kPa) >*V. faba*(0.009 4 kPa)>*A. tuberosum*(0.005 5 kPa). And exponential relationship between mean root cohesion and soil depths was well fitted($p<0.01$). [Conclusion] The natural hedge herbage of *E. binata* had better performances in soil reinforcement and soil conservation in this region, which could be used to effectively conserve soil and water from the sloping lands. And the herbage reinforcement of the hedge is a new idea for sloping cultivated land harness in the Three Gorges Reservoir region.

Keywords: sloping cultivated lands in Three Gorges Reservoir region; herbage hedge plants; roots distribution; roots tensile properties; roots cohesion

近年来,植物措施被广泛应用于边坡防护、水土流失治理及生态防护等生态工程中[1]。植物根系可在土壤中形成交错密布的根系网络,根系对土体起到加筋作用,从而提高了土体的强度,达到固结土体的目的,有效发挥了植物的固土抗蚀作用[2]。植物根系可以改变土壤结构,增强土壤抗冲蚀性,提高土体的稳定性。植物根系加固土壤的力学原理研究始于19世纪80年代[3],当根土复合体受到剪切力时根土发生错动,根系通过根土界面的摩擦作用,把土中的剪应力转化成为根的拉应力,从而增强了根土复合体的抗剪强度,进而具有了固结土壤的能力。因此,根系与土体结合的紧密程度和根系抗拉阻力是固结土壤的关键因素[4]。近年来对根系固土研究主要集中在对根土界面摩阻特性和根土复合体抗剪强度上,宋维峰等[5]将摩擦阻力引入到根系与土体界面之间的相互作用,提出了根土界面摩擦系数的概念,杨亚川等[6]、刘国彬等[7]研究了草本植物根系的抗剪强度,其结果表明植物细根具有较强的抗拉力,张欣等[8]分析了柠条、沙柳等灌木根系对提高土体抗剪强度的作用。而针对植物根系抗拉力学特性的研究相对较少[9-10]。根系对土壤黏聚力的增强效应是评价根系固土能力的重要指标[11]。对植物根系抗拉强度的研究能较好地解释植物根系网络固土机理。但目前对紫色土坡耕地草本植物根系对地埂土壤的固结作用及影响因素的研究报道不多。因此,本文拟选取三峡库区坡耕地自然恢复地埂植物蓑草(*Eulaliopsis binata*)和人工种植地埂植物韭菜(*Allium tuberosum*)和蚕豆(*Vicia faba*)根系为研究对象,对3种草本植物根系分布特征及根系抗拉特征进行研究,以期为三峡库区坡耕地地埂植物筛选、坡耕地水土流失控制和坡耕地治理提供理论依据和数据支持。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区水土保持与环境研究站(107°3′—108°14′E, 30°03′—30°35′N)附近。该区属亚热带东南季风区,雨量充沛,年降水量1 100~1 400 mm,降水多集中在4—10月,占全年的70%以上;年日照时间1 327 h,太阳总辐射能347 kJ/m^2,无霜期340 d,年均温18.2 ℃,≥10 ℃的年积温5 891.4 ℃,相对湿度80%,海拔117~1 680 m。该区岩层为侏罗系沙溪庙组砂岩、粉砂岩和泥岩,以中性紫色土为主,三峡库区紫色土的土壤有机质含量均值为6.76 g/kg,全氮含量均值为0.98 g/kg,土壤pH值为7.66,阳离子交换率均值为32.82 cmol/kg。土壤容重为1.34 g/cm^3,土壤颗粒组成为2~0.2 mm粒径的土壤颗粒占13.53%,0.2~0.02 mm粒径占37.73%,0.02~0.002 mm粒径占30.38%,<0.002 mm粒径占18.36%。紫色土富含钾、钙、锰、铁等矿质元素,耕地土层厚度一般在0.3~0.6 m。该区域内土地利用方式有旱地、水田、林地等,坡面耕作方式以顺坡耕种为主,主要种植作物有玉米(*Zea mays*)、红薯(*Ipomoea batatas*)、黄豆(*Glycine max*)、花生(*Arachis hypogaea*)、柑橘(*Citrus reticulata*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择和样品采集 在踏查典型坡耕地坡面的基础上,根据典型性和代表性原则选择坡耕地地埂上生长的自然恢复地埂植物蓑草和人工种植地埂

植物韭菜和蚕豆为研究对象，采集这 3 种典型地埂植物根系样品，样品采集时间为 2015 年 7 月。选择健壮的植株去除植株的地上部分后，在每个样点用环刀沿着植株竖直向下取样。草本地埂植物的根系基本分布于 0—40 cm 土层范围，用环刀取样时每 10 cm 取 1 层土样，分 4 层取样。每个样点重复取样 3 次。将采集的样品摊于塑料布上，用镊子仔细把根系拣出、拣尽，并去除样品中其余杂质，然后将根系样品分别编号后保存于自封袋中带回实验室备用。

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。将新鲜坡耕地地埂植物蓑草、韭菜和蚕豆根系洗净后擦干，在实验室冰箱 4 ℃环境中冷藏保存并尽快测试，以保证根系材料的新鲜状态。在根系力学性质测定前，先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。根系抗拉试验采用试制的根系抗拉试验装置，抗拉强度 σ_e (MPa)由下式计算得到：

$$\sigma_e = P_{\max}/(\pi d^2/4) = 4P_{\max}/(\pi d^2) \quad (1)$$

式中：$P_{\max}$——根系的极限抗拉力(N)；d——在断裂处两端用游标卡尺测量根系的直径，取两者的平均值作为断裂处的根径 d(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　*根系黏聚力计算*　根系对土壤抗剪的增强作用采用当前国际上流行的 Wu 氏模型估算[3,12]。根据 Wu 氏模型，根系对土壤抗剪强度的增加值，即根系黏聚力(C_r，kPa)为：

$$C_r = 1.2 \times T_r(A_r/A_s) \quad (2)$$

式中：T_r——土壤剪切面上所有根系的平均抗拉强度(MPa)；A_s——根系在剪切面上的总横截面积(m^2)；A_s——土壤剪切面总面积(m^2)；A_r/A_s——根面积比(RAR)，即根系总横截面积与土壤剪切面总面积之比。

1.2.4　*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。统计分析皆在 SPSS 18.0 统计分析软件中进行。

2　结果与分析

2.1　3 种草本地埂植物根系直径在不同地埂土层深度分布特征

三峡库区坡耕地蓑草和韭菜地埂植物根系直径随着地埂土层深度的增加表现出先增大后减小的趋势，而蚕豆地埂植物根系的直径随着地埂土层深度的增加而逐渐减小。在 0—40 cm 深度的地埂土壤中，3 种草本地埂植物根系直径变化表现出：蚕豆根系＞韭菜根系＞蓑草根系。蚕豆根径平均值为 0.905 mm，韭菜根系平均值为 0.673 mm，蓑草根系根径平均值为 0.419 mm，可以看出人工种植的地埂植物根系较自然恢复的地埂植物根系粗。蓑草和韭菜地埂植物根系的直径在 0—20 cm 深度的地埂土壤中主要是较粗根系，而蚕豆地埂植物根系的直径在 0—10 cm 深度的地埂土壤中主要是较粗根系(图 1)。在 0—10 cm 土层中，蚕豆人工草本地埂植物根系的直径与韭菜和蓑草地埂植物根系的直径存在显著性差异($p<0.05$)，在 10—20 cm 深度的土层中，3 种地埂植物根系的直径间均存在显著性差异($p<0.05$)，而在 20—30 和 30—40 cm 深度的土层中，3 种地埂植物根系的直径间均不存在显著性差异($p>0.05$)。同时，3 种草本地埂植物根系的直径在地埂土壤的不同土层深度中均具有显著性差异($p<0.05$)。通过对 3 种草本地埂植物根系直径与地埂土壤的土层深度进行拟合分析，发现均遵从指数函数分布(表 1)，这与李建兴等[13]的研究结果一致。

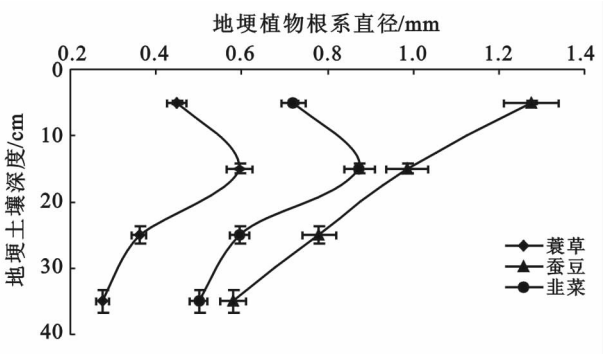


图 1　三峡库区 3 种草本地埂植物根系直径在地埂土壤中的分布特征

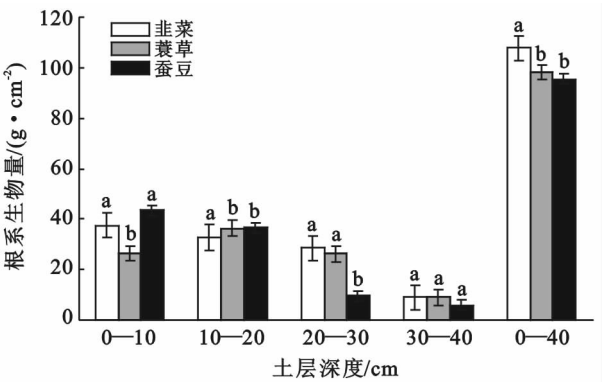
表 1　3 种草本地埂植物根系直径与地埂土壤深度关系

地埂植物类型	采样个数	地埂植物根系直径/mm		
		拟合方程	R^2	P
蓑草	40	$D=0.661\,9\ e^{-0.198H}$	0.607 3	＜0.05
蚕豆	42	$D=1.661\,6\ e^{-0.260H}$	0.997 8	＜0.05
韭菜	48	$D=0.952\,5\ e^{-0.148H}$	0.625 9	＜0.05

2.2　地埂植物根系生物量在不同地埂土层深度分布特征

植物根系在地埂土壤中的穿插、缠绕，根系与地埂土壤形成特殊的根—土复合体，能够增强地埂土壤的稳定性。根系形态决定了根系在土壤中的分布和效果[14]。如图 2 所示，在 0—40 cm 深度的地埂土壤中，人工种植的地埂植物韭菜和蚕豆根系生物量分别

为 107.74±1.74,95.52±1.16 g/m²,自然恢复的地埂植物蓑草根系生物量为 98.08±1.02 g/m²,显著性检验结果表明,在 0—40 cm 地埂土层深度范围内,韭菜根系生物量与蓑草根系和蚕豆根系生物量之间存在显著性差异($p<0.05$)。3 种草本地埂植物在不同地埂土层深度的根系生物量变化存在差异,韭菜和蚕豆地埂植物根系生物量表现为随着土层深度的增加而逐渐减小趋势,而蓑草地埂植物根系生物量随着土层深度的增加呈现出先增加后减小的趋势,在 10—20 cm 深度的地埂土壤中其根系生物量达到最大值。3 种草本地埂植物根系均为须根型,根系分布深度主要集中在 0—20 cm 土层深度范围内。在 0—10 和 10—20 cm 土层深度,3 种草本地埂植物根系生物量变化为:蚕豆根系>韭菜根系>蓑草根系,这主要是因为蚕豆属于豆科植物,蚕豆根瘤菌主要分布在 0—20 cm 深度土层,在 0—20 cm 深度土层蚕豆根系的生物量占总生物量的 83%。韭菜根系的根径较粗,其根系主要分布在 0—30 cm 深度的地埂土壤中。而蓑草根系生物量在 10—20 cm 深度的地埂土壤中所占比例最大。



注:不同小写字母表示同一地埂土壤深度不同草本地埂植物根系生物量在 $p<0.05$ 水平存在显著差异。

图 2 三峡库区 3 种草本地埂植物根系生物量分布特征

2.3 3 种草本地埂植物根系抗拉性能

根系固土力学性能离不开根系自身抗拉力学性能[15]。具有较大抗拉强度的根系将有助于提高植物对土壤的固结能力,对单根的生物力学性能研究是根系固土研究的基础,也是评价不同植物固土能力的重要指标。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。如图 3 所示,库区 3 种草本地埂植物根径范围为 0.23~1.42 mm,单根抗拉力范围为 1.9~16.70 N,3 种草本地埂植物根系的单根平均抗拉力次序为蚕豆根系(10.53 N)>蓑草根系(6.03 N)>韭菜根系(4.51 N),但在不同根径级内 3 种草本根系的抗拉力大小次序不尽相同。3 种地埂植物根系单根抗拉力与根径呈幂函数关系($p<0.05$),3 种草本地埂植物根系的单根抗拉力与根径的相关性都达到 0.97 以上。

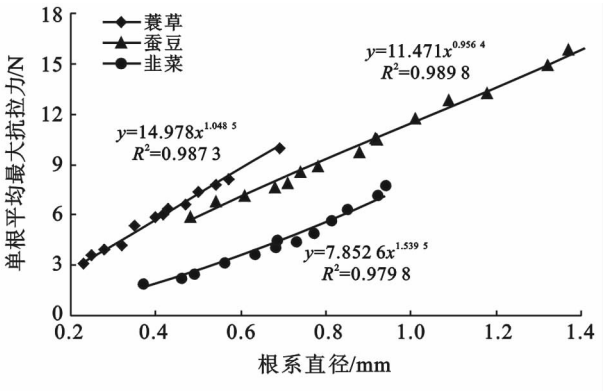


图 3 3 种地埂植物根系单根抗拉力与根径关系

如图 4 所示,3 种草本地埂植物根系的单根抗拉强度范围为 10.52~74.65 MPa,3 种地埂植物根系的抗拉强度表现为蓑草根系(45.91 MPa)>蚕豆根系(18.02 MPa)>韭菜根系(12.20 MPa)。蓑草根系的抗拉强度最高,主要是因为蓑草根径变化范围较小,为 0.23~0.61 mm,平均根径为 0.41 mm,韭菜根系由于含水量较高,因此单根抗拉强度较低。

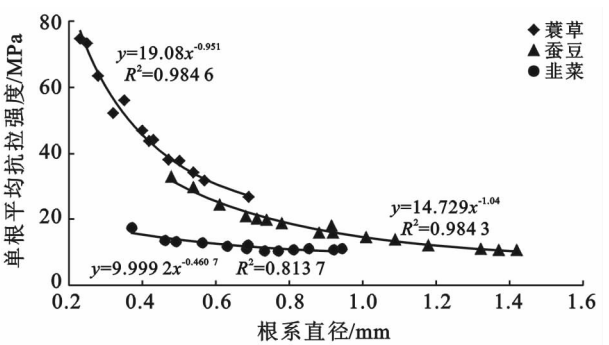


图 4 3 种地埂植物根系单根抗拉强度与根径关系

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,自然恢复的蓑草地埂的稳定性最高,其次为人工种植的蚕豆地埂和韭菜地埂。通过对 3 种草本地埂植物根系的直径与单根抗拉强度进行拟合分析,发现均服从幂函数分布规律($p<0.05$),且蓑草的蚕豆地埂植物根系的直径与单根抗拉强度的相关系数达到 0.98 以上,韭菜地埂植物根系的直径与单根抗拉强度的相关系数为 0.81。这表明,随着地埂植物根系直径的加粗,单根抗拉强度均呈递减趋势,自然恢复的蓑草地埂植物根系减小幅度最快,其次为蚕豆根系,减幅最小的为韭菜根系。

2.4　3 种草本地埂植物根系的黏聚力变化特征

根系面积比(root area ratio，RAR)即单位面积土体内根系面积所占比例。如图 5 所示，不同地埂土壤深度 3 种草本地埂植物根系比表面积随着地埂土壤深度的加深不断降低。在 0—40 cm 深度的地埂土壤深度范围内，3 种草本地埂之屋根系比表面积平均值变化为：蚕豆地埂(0.000 51)＞韭菜地埂(0.000 40)＞蓑草地埂(0.000 28)。这主要与地埂植物根系直径有关。通过对地埂植物根系比表面积与地埂土层深度进行拟合回归可知，3 种地埂植物根系面积比与土层深度呈指数函数关系($p<0.01$)。

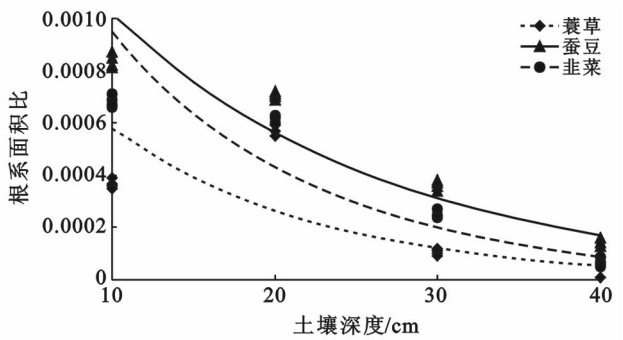
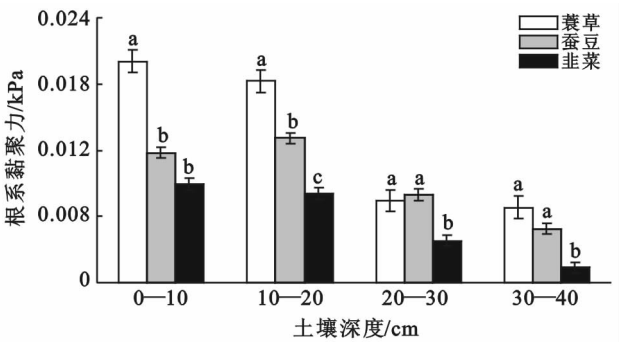


图 5　不同地埂土壤深度 3 种草本地埂植物根系比表面积特征

运用 Wu 氏模型估算了三峡库区 3 种草本地埂植物根系黏聚力，如图 6 所示，3 种草本地埂植物根系对土壤黏聚力的增强值变化顺序为：蓑草根系(0.013 1 kPa)＞蚕豆根系(0.009 4 kPa)＞韭菜根系(0.005 5 kPa)。自然恢复的蓑草地埂植物和人工种植的韭菜地埂植物最大根系黏聚力出现在土壤表层 0—10 cm 深度，并随着土层深度的增加而减小。人工种植的蚕豆地埂植物最大根系黏聚力出现在土壤表层 10—20 cm 深度，在 0—40 cm 土层深度范围内，蚕豆地埂植物根系黏聚力呈现出先增加后减小趋势。这可能是因为蚕豆在 0—10 cm 土层深度的根瘤菌占有一定比例，影响了根系黏聚力的测定。对不同土壤深度 3 种地埂植物根系黏聚力的显著性检验结果表明，在 0—10 cm 深度地埂土壤深度范围内，自然恢复的蓑草地埂植物根系的黏聚力与人工种植的蚕豆和韭菜地埂植物根系黏聚力存在显著差异($p<0.05$)，2 种人工种植的地埂植物根系黏聚力的差异不显著。在 10—20 cm 深度土层，3 种地埂植物根系的黏聚力均存在显著差异($p<0.05$)。而在 20—30 cm 深度和 30—40 cm 深度土层，韭菜地埂植物根系的黏聚力与蓑草和蚕豆地埂植物根系黏聚力之间存在显著差异($p<0.05$)，蓑草和蚕豆地埂植物根系黏聚力在这 2 个土层深度间的差异不显著。对 3 种草本地埂植物根系黏聚力与地埂土层深度进行拟合回归(表 2)可知，3 种地埂植物根系黏聚力与土层深度呈指数函数关系($p<0.01$)。



注：不同小写字母表示同一地埂土壤深度不同草本地埂植物根系黏聚力在 $p<0.05$ 水平存在显著差异。

图 6　不同地埂土壤深度 3 种草本地埂植物根系黏聚力特征

表 2　3 种草本地埂植物根系比表面积和黏聚力与土层深度关系

地埂植物类型	采样个数	根系比表面积(RAR)		根系黏聚力/kPa	
		拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
蓑草	40	$RAR=0.001\ 3\ e^{-0.078H}$	0.649 0	$Cr=0.032\ 8\ e^{-0.414H}$	0.865 7
蚕豆	42	$RAR=0.001\ 9\ e^{-0.069H}$	0.920 5	$Cr=0.019\ 3\ e^{-0.315H}$	0.820 1
韭菜	48	$RAR=0.002\ 1\ e^{-0.079H}$	0.876 4	$Cr=0.021\ 6\ e^{-0.637H}$	0.902 3

注：$p<0.01$。

3　讨论

紫色土是三峡库区的主要土壤类型，由于紫色土土层较薄，坡面水土流失严重。紫色土坡耕地的坡面上每隔一定间距有土质地埂的存在，土质地埂能有效减少坡耕地上方来水来沙，而地埂上生长的植物根系能够有效固结地埂。地埂植物发挥其固结土壤的作用主要是由于地下部的根系网络，但不同属种的植物由于遗传、生长特性、外界环境、土壤条件等差异，导致根系的形态特征、力学特性等相差较大，从而表现出不同的固土能力[16]。植物根系地下生物量越大，根系分布越深，植物的抗逆性也越强，保持水土能力就越强。随着耕作时间的逐年延长，土质地埂年复一年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，从而有效减少坡耕地水、土和养分流失[17]。

根系抗拉力学特性对于根系发挥固土力学能力非常重要，植物根系抗拉特性由多种因素决定，如植物种类、根系的构型、显微结构等及根系内部木质素、纤维素的排列和含量[18]等。已有研究表明，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[19]，这主要与草本植物根径较小有关。本研究中自然恢复的蓑草地埂植物根系直径虽小，但其单根抗拉强度及根系对土壤的黏聚力均较其他 2 种根径稍大的人工种植的地埂植物根系强。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切能力，这种增强作用主要是通过地埂植物根系增加了土壤的黏聚力来实现的，而植物根系对内摩擦角的影响很小。草本地埂植物根系可以显著增强对土壤的黏聚力，提高土壤的抗侵蚀能力，从而有效控制坡面土壤侵蚀和水土流失。三峡库区草本地埂植物根系发达，具有较强的抗拉强度，特别是自然恢复的蓑草地埂植物根系对地埂土壤的固结作用强于其他 2 种人工种植的地埂植物，蓑草地埂植物根系的抗拉强度为 45.91 MPa，较蚕豆根系和韭菜根系抗拉强度高 2～3 倍。蓑草地埂植物根系生长在地埂上，表现出较强的适应性，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。三峡库区草本地埂植物根系能够有效固结地埂，这可为该区坡耕地水土流失有效防治和坡耕地治理提供新思路。

本研究主要对三峡库区 3 种地埂植物的根系分布，根系生物量，单根抗拉力及抗拉强度进行了研究，由于草本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，且受根系分析软件等试验条件的限制，未进行草本地埂植物完整根系的特征分析。今后将对试验区内典型草本地埂植物完整根系特征这方面做进一步研究。

4 结 论

(1) 在 0—40 cm 深度土壤中 3 种草本地埂植物根系直径变化表现出：蚕豆根系＞韭菜根系＞蓑草根系。蓑草和韭菜地埂植物根系直径随地埂土层深度的增加先增大后减小，而蚕豆地埂植物根系直径随地埂土层深度的增加而逐渐减小。3 种草本地埂植物根系直径与地埂土壤的土层深度间服从指数函数关系。

(2) 在 0—40 cm 地埂土层深度范围内，韭菜根系生物量与蓑草根系和蚕豆根系生物量之间存在显著性差异($p<0.05$)，韭菜和蚕豆地埂植物根系生物量随土层深度的增加而逐渐减小，蓑草地埂植物根系生物量随土层深度的增加先增加后减小。

(3) 3 种草本地埂植物根系的单根平均抗拉力次序为蚕豆根系(10.53 N)＞蓑草根系(6.03 N)＞韭菜根系(4.51 N)，3 种地埂植物根系单根抗拉力与根径呈幂函数关系($p<0.05$)。3 种地埂植物根系的抗拉强度表现为蓑草根系(45.91 MPa)＞蚕豆根系(18.02 MPa)＞韭菜根系(12.20 MPa)。

(4) 3 种草本地埂植物根系黏聚力变化顺序为：蓑草根系(0.013 1 kPa)＞蚕豆根系(0.009 4 kPa)＞韭菜根系(0.005 5 kPa)且 3 种地埂植物根系黏聚力与土层深度呈指数函数关系($p<0.01$)。蓑草天然地埂植物根系对坡耕地地埂土壤的固结作用强于人工种植的蚕豆和韭菜地埂植物，蓑草地埂植物根系生长在地埂上，表现出较强的适应性，可为三峡库区坡耕地地埂植物筛选、坡耕地治理提供数据支持。

[参 考 文 献]

[1] Roering J J, Schmidt K M, Stock J D, et al. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003,40(2):237-253.

[2] 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.

[3] Wu T H, McKinnell Ⅲ W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16 (1):19-33.

[4] Martin D. Bioengineering techniques for stream bank restoration: A review of central European practices[C]. USA: Water shed Restoration Project Report, 1995:4-9.

[5] 宋维峰，陈丽华，刘秀萍. 根系与土体接触面相互作用特性试验[J]. 中国水土保持科学，2006，4(2)：62-65.

[6] 杨亚川，莫永京，王芝芳，等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报，1996，1(2)：31-38.

[7] 刘国彬，蒋定生，朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报，1996，2(3)：21-28.

[8] 张欣，姚喜军，刘静，等. 土壤孔隙水承压条件下 4 种根—土复合体抗剪特性[J]. 水土保持通报，2010，30(4)：22-26.

[9] 蒋坤云，陈丽华，杨苑君，等. 华北油松、落叶松根系抗拉强度与其微观结构的相关性研究[J]. 水土保持学报，2013，27(2)：8-12.

(下转第 14 页)

[参 考 文 献]

[1] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the word's ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1997,25(1):3-15.

[2] Daily G. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. California: Island Press, 1997.

[3] 董全.生态功益:自然生态过程对人类的贡献[J].应用生态学报,1999,10(2):233-240.

[4] 黄和平,杨劼,智颖飙.皇甫川流域封育植被土壤保持功能及服务价值研究[J].水土保持通报,2008,28(3):173-177.

[5] 王敏,阮俊杰,姚佳,等.基于 InVEST 模型的生态系统土壤保持功能研究:以福建宁德为例[J].水土保持研究,2014,21(4):184-189.

[6] 丁忠兵.论三江源地区的生态地位与可持续发展[J].青海社会科学,2006(2):45-50.

[7] 刘敏超,李迪强,温琰茂,等.三江源地区土壤保持功能空间分析及其价值评估[J].中国环境科学,2005,25(5):627-631.

[8] 包维楷,刘照光,刘庆.生态恢复重建研究与发展现状及存在的主要问题[J].世界科技研究与发展,2001,23(1):44-48.

[9] 於方,周昊,许申来.生态恢复的环境效应评价研究进展[J].生态环境,2009,18(1):374-379.

[10] 胡云锋,刘纪远,齐永青,等.内蒙古农牧交错带生态工程成效实证调查和分析[J].地理研究,2010,29(8):1452-1460.

[11] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等.青海三江源生态建设一期工程建设成效评估[J].地理学报,2016,71(1):3-20.

[12] 刘纪远,徐新良,邵全琴.近 30 a 来青海三江源地区草地退化的时空特征[J].地理学报,2008,63(4):364-376.

[13] 吴万贞,周强,于斌,等.三江源地区土壤侵蚀特点[J].山地学报,2009,27(6):683-687.

[14] 黄麟,邵全琴,刘纪远.近 30 a 来青海省三江源区草地的土壤侵蚀时空分析[J],地球信息科学学报,2011,13(1):12-21.

[15] 杜加强,贾尔恒,阿哈提,等.三江源区近 30 a 植被生长动态变化特征分析[J].草业学报,2016,25(1):1-12.

[16] 饶恩明,肖燚,欧阳志云,等.海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素[J].生态学报,2013,33((3):746-755.

[17] 吴秀芹,蔡运龙.土地利用/土地覆盖变化与土壤侵蚀关系研究进展[J].地理科学进展,2003,22(6):576-584.

[18] 赖敏,吴绍洪,戴尔阜,等.生态建设背景下三江源自然保护区生态系统服务价值变化[J].山地学报,2013,31(1):8-17.

[19] 徐新良,刘纪远,邵全琴,等.30 a 来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化[J].地理研究,2008,27(4):829-839.

[20] 黄从红,杨军.基于 InVEST 模型的生态系统服务功能研究[D].北京:北京林业大学,2014.

(上接第 6 页)

[10] 苑淑娟,牛国权,刘静,等.瞬时拉力下两个生长期 4 种植物单根抗拉力与抗拉强度的研究[J].水土保持通报,2009,29(5):22-26.

[11] 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.

[12] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. Soil Science, 1981,132(6):427-435..

[13] 李建兴,何丙辉,谌芸,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] Zhang Chaobo, Chen Lihua, Liu Xiuping, et al. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength[J]. Ecological Engineer, 2010,36(1):19-26.

[15] 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.

[16] 李勇,吴钦孝,朱显谟,等.黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究(Ⅰ):油松人工林根系对土壤抗冲性的增强效应[J].水土保持学报,1990,4(1):1-5.

[17] 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.

[18] 赵丽兵,张宝贵.紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J].农业工程学报,2007,23(9):7-12.

[19] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant and Soil, 2005,278(1):1-9.