



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.019

袁雪红, 高照良, 张翔, 等. 护坡植物根系分布及抗拉力学特性[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 117-123. YUAN Xue hong, GAO Zhao liang, ZHANG Xiang, et al. Distribution and mechanical characteristics of roots of slope protection plants[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 117-123. (in Chinese)

护坡植物根系分布及抗拉力学特性

袁雪红^{1,2}, 高照良^{1,3}, 张翔⁴, 杜捷³, 张小娟³

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了探讨草本植物根系固土的主要机制。以适宜的护坡植物白三叶、小冠花、黑麦草、早熟禾为研究对象, 对它们的根系分布特征和抗拉特性进行研究。结果表明: 随着土层深度的增加, 禾本科植物的根长密度以指数函数形式逐渐减少, 豆科植物的根长密度以多项式形式先增后减; 随着距主茎距离的增加, 禾本科植物根长密度逐渐减少, 豆科植物根长密度先增后减; 在根径 0.1~3 mm 范围内, 豆科植物平均抗拉力大于禾本科植物, 豆科植物的抗拉力与根径呈幂函数关系, 早熟禾和黑麦草的抗拉力与根径分别呈指数函数和对数函数关系; 四种植物根系抗拉强度均表现为随根径的增加而减小; 四种植物根系应力与应变关系表现为对数函数关系, 表现为非线性弹性特征; 根径相同时, 不同植物的应力表现为: 白三叶>小冠花>黑麦草>早熟禾。运用主成分分析法综合分析其护坡特性, 表现为豆科植物优于禾本科植物, 其中白三叶的护坡效益最好。

关键词: 草本植物; 根长密度; 抗拉强度; 应力; 主成分分析

中图分类号: S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0117-07

Distribution and mechanical characteristics of roots of slope protection plants

YUAN Xue hong^{1,2}, GAO Zhao liang^{1,3}, ZHANG Xiang⁴, DU Ji³, ZHANG Xiao juan³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China; 4. College of Water conservation and Architectural engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to reveal the mechanism of soil reinforcement by herb roots, we selected 4 typical hillslope protection plants, *Trifolium repens* L., *Coronilla varia* L., *Lolium perenne* L. and *Poa annua* L. to study the spatial distribution of root length density and tensile properties. The result showed: With the increase of the soil depth, the root length density (RLD) of gramineous plants gradually reduced in the form of exponential function, while the RLD of legumes first increased and then decreased, with a polynomial fitting curve. With the increase of the distance to the stem, RLD of gramineous plants decreased gradually, while RLD of legumes plants increased first and then decreased. In the roots diameter range of 0.1~3 mm, the average tensile resistance of leguminous plants was greater than that of the gramineae plants. Legume's root tensile resistance and root diameter showed a power function relationship, and the relationship between tensile resistance and diameter of Kentucky bluegrass and ryegrass was exponential function and logarithmic function relationship, respectively. The tensile strength of four species de

收稿日期: 2015-11-11 修回日期: 2016-04-06 网络出版时间: 2016-08-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160819.1503.009.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAD31B01)

Fund: “12th Five Year” National Science and Technology Support Program (2011BAD31B01)

作者简介: 袁雪红(1989-), 女, 河南商丘人, 主要从事工程建设区人为侵蚀过程研究。E-mail: 2391915047@qq.com

通讯作者: 高照良(1969-), 男, 河南灵宝人, 副研究员, 博士生导师, 主要从事农业水土工程和荒漠化防治方面研究。E-mail: gzl@ms.isw.ac.cn

creased with the increases of root diameter and their stress and strain showed a logarithmic function relationship, which illustrated that their roots were inelastic. At the same diameter, different plants showed variance with stress as ranked: White Clover > Crown vetch > Ryegrass > Kentucky bluegrass. Using the principal component analysis (PCA) to comprehensively analyze the characteristics of the plant to protect the slope, we could conclude that leguminous plants were better than gramineous plants and White Clover was the optimal in the four plants.

Key words: grass plant; root length density; tensile strength; strain; principal component analysis

黄土高原地区土质边坡土壤结构松散、植物根系缺乏,导致其抗冲性极差,极易发生崩塌、滑坡、泥石流等自然灾害^[1]。传统的土质边坡防护主要运用浆砌石及混凝土等工程措施,破坏了自然生态和谐^[2]。植物措施不仅可以稳固坡体、防止滑坡和崩塌,同时可以改善生态环境,因此近年来植物固坡越来越受欢迎^[3]。

植被主要通过根系的空间分布和力学特性及其与土壤之间的作用机制来提高土壤抗侵蚀性、抗冲性、抗剪切性等^[4]。吕春娟等^[5]研究表明根系在土体中延伸、穿插、交织分布,增强土层整体性,提高其抗冲性。国内外学者分别对乔木^[3]、灌木^[6]、草本^[7]进行研究,发现植物根系有很大的抗拉力,且抗拉力与根径存在幂函数关系。王萍花等^[8]建立了林木单根抗拉力学模型。大量研究^[9-11]表明抗拉强度与根径呈幂函数关系。Wu^[12]和 Waldron^[13]用力学机制模型阐明了根系平均抗拉强度和根系面积比对土壤侵蚀的影响。李勇等^[14-15]研究了乔灌草根系对土壤水力学及物理性质的影响,及根系提高土壤抗冲性作用的关系,建立了根系提高土壤抗冲机制的数学模型。刘国彬等^[16-17]研究发现根系生物力学特征在固结土壤和强化抗冲性上意义重大。刘秀萍等^[18]研究表明根系空间分布增强了土壤抗剪强度。Bischetti 等^[19]发现土壤抗剪强度与根系生物量之间呈线性关系, Mattie 等^[20]发现根系抗拉强度与土壤抗剪强度成正相关关系。

植被对边坡固持力的大小主要取决于根径、根长、抗拉力、抗拉强度等。多数学者从土壤理化性质、根系抗拉强度和根系生物量方面进行研究,而对根长密度、根系不同径级、以及根系的垂直和水平分布对护坡特性的影响研究较少。另外,人们对乔木、灌木的根系的力学特性研究较多,而对草本植物的研究较少。因此,本试验选取黄土高原常见的护坡植物白三叶、小冠花、黑麦草、早熟禾,对其根系的空间分布特征及抗拉特性进行研究。综合分析其护坡特性,筛选出适宜的护坡植物,为研究根系固土护坡的力学机理提供新的参考资料,也为当地护坡植物

的选择提供相关理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验样地概况

试验点位于中国科学院安塞水土保持综合试验站,地理坐标为 N36°51′29.52″, E109°19′22.06″,距延安市 30 km,海拔 1 068~1 309 m,属于属暖温带半干旱气候,年平均降雨量 500 mm,其中 60%集中在 7 月-9 月,年均气温 8.8℃,无霜期 160 d 左右。该区土壤主要为黄绵土,土地类型多样,地处黄土高原腹地,属典型黄土丘陵沟壑区。

1.2 试验设计和样品采集

根据当地的气候、植物资源、自然环境等状况,选择抗旱性、抗贫瘠性、抗逆性强、根系发达、植株矮小、生长迅速、自我繁殖能力强的多年生护坡植物作为研究对象,即主要有白三叶 (*Trifolium repens* L.)、小冠花 (*Coronilla varia* L.)、黑麦草 (*Lolium perenne* L.)、早熟禾 (*Poa annua* L.)。选择地势平坦,土壤质地均一,周围无高大乔木和建筑物处,设置 A、B、C、D、E 5 个试验小区,其中 E 为对照(裸露地)。在各区内进一步划分出 3 个 6 m × 4 m 的小区。于 2012 年 4 月 8 日同时撒播,播种前先平整土地,统一清除地面的砖块、石块。松动小区表土,均匀播种,表层覆大约 1 cm 的土轻轻压实,覆盖一层遮阳网,浇一定量水,使水分透过遮阳网渗透到土中,且完全湿润土壤。出苗后,掀去遮阳网,幼苗期,各区进行定期除草、浇水等常规管理保证其存活率。为保证试验条件一致,幼苗成活以后不再进行浇水,植株 1 m 范围之内没有其它植物干扰,且在清理杂草时尽量不破坏土壤结构。小区布设见图 1。

2012 年 10 月初,在试验小区中,选取长势良好,能代表整体水平且在直径 1 m 范围内没有其它杂草干扰的植株作为试验植株。以该植株为中心,用方形取样器分层、分距取样(规格分别为 10 cm × 10 cm × 10 cm 和 10 cm × 10 cm × 5 cm 两种取样器)。垂直深度为 0~10 cm 时,每 5 cm 取一层;

10~50 cm 时,每 10 cm 取一层,共取 6 层土样。在水平范围内,距植株 10 cm 和 20 cm 分别取样,共取 5 个剖面。取样时做好标记。

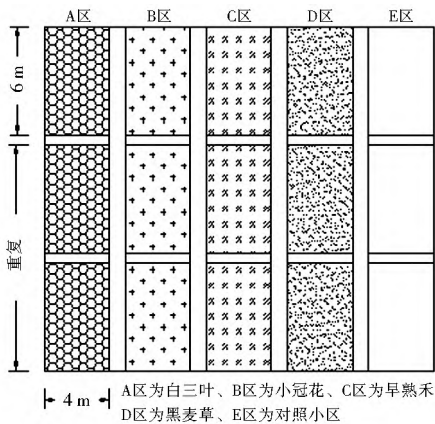


图 1 试验小区布设

Fig. 1 Layout of experimental plots

1.3 样品测定

样品带回实验室后进行洗根,并用根系扫描仪(LG-4800)和IPP图像分析软件对根系的各项指标(根长、根径等)进行测定分析。将待测植物根系按照<0.3 mm、0.3~0.5 mm、0.5~1.0 mm、1.0~1.5 mm、1.5~2.0 mm、>2.0 mm 七个径级进行分级,每一径级 15 根,每根长度为 6 cm,作为试验材料。在待测根系上每隔 1.5 cm 用细彩笔作标记,并用游标卡尺测量各处根径,每个标记处正交方向各测量 1 次,取平均值作为其根系直径。将待测根系按不同径级放入有标记的自封袋内,模拟取样地点的土壤温度和湿度进行保存,于 24 h 内进行拉力试验。拉力采用 HDE-500 电动单柱立式推拉力计测试台和 HG-200 数显拉力计模拟根系受拉作用,每 0.2 s 计数一次;用拉力仪测定根系拉断时的最大拉力(每 2 s 自动记录 1 次读数)。

1.4 数据处理与统计分析

运用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 软件对参数分别进行 LSD 差异性分析、主成分分析, Pearson 相关分析;运用 origin 进行作图。

根长密度(RLD)计算公式如下:

$$RLD = \frac{L}{V} \quad (1)$$

式中: L 为根长(mm); V 为土样体积(cm^3)。

根系极限抗拉强度(P)为

$$P = \frac{4F_{\max}}{\pi D^2} \quad (2)$$

$$\text{应力}(\delta): \delta = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (3)$$

式中: P 为根系极限抗拉强度(MPa); F_{\max} 为拉力仪

测得的最大拉力(N); D 为根系平均直径(mm); δ 为应力(MPa); F 为实时拉力(N)。

2 结果与分析

2.1 不同植物根长密度的空间分布

植物根系的空间分布影响着其固土效应。在 0~50 cm 土层中,四种植物的总根长密度表现为:黑麦草>早熟禾>白三叶>小冠花,总体表现为禾本科植物的总根长密度大于豆科植物。黑麦草在不同土层的根长密度显著大于其他几种植物。白三叶、黑麦草和早熟禾的根系主要集中在 0~10 cm 土层,根长密度分别是 10~20 cm 的 2.28 倍、3.98 倍和 5.65 倍,是 20~30 cm 土层的 3.09 倍、7.58 倍和 18.54 倍,是大于 30 cm 土层的 2.73 倍、7.98 倍和 16.11 倍。而小冠花的根系主要集中在 10~30 cm 土层,其根长密度分别是 0~10 cm、30~40 cm 和 40~50 cm 的 2.32 倍、3.26 倍和 4 倍(见表 1)。

表 1 四种草本植物的根长密度垂直分布参数

Tab. 1 The vertical distribution parameters of root length density of 4 typical herbaceous plants

植物种类	不同土层深度					
	0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm
白三叶	1.39a	1.64a	1.33a	0.98a	0.62a	0.49a
小冠花	0.20a	0.49a	0.85a	0.75a	0.49a	0.40a
黑麦草	12.50b	8.96b	5.38b	2.83b	1.73b	0.96b
早熟禾	9.58a	8.78a	3.25a	0.99a	0.72a	0.42a

注:表中不同小写字母表示同一土层不同草本类型之间差异显著($P < 0.05$)

禾本科植物的根长密度随土层深度的增加而减少,其拟合曲线为指数函数,与韩凤朋^[21]等对禾本科植物长芒草的研究结果相吻合;豆科植物的根长密度随土层深度的增加先增后减,其拟合曲线为多项式函数。

在水平方向上,白三叶、黑麦草和早熟禾的根系主要集中在距植株 0~5 cm 的范围内,分别占总根长密度的 43.63%、68.10% 和 53.73%。小冠花的根系主要集中在距植株 5~15 cm 范围内,占总根长密度的 39.70%。随着距植株距离的增加,禾本科植物的根长密度逐渐减少,而豆科植物无明显规律(见表 2)。

综合分析表明,豆科植物主根较深,侧根发达呈放射状。虽然禾本科植物的根长密度大于豆科植物,但根冠较小,生长较浅,不利于对深层水分和养分的吸收和利用。

表 2 四种草本植物的根长密度水平分布参数

Tab. 2 The horizontal distribution parameters of root length density of 4 typical herbaceous plants

植物种类	不同水平距离		
	0~ 5 cm	5~ 15 cm	15~ 25 cm
白三叶	2. 81a	1. 75a	1. 88a
小冠花	1. 01a	1. 30a	0. 89a
黑麦草	19. 60b	9. 51b	3. 27b
早熟禾	12. 76a	9. 94a	1. 05a

注: 不同小写字母表示同一土层不同草本类型之间差异显著($P < 0.05$)

2.2 根系的抗拉力、抗拉强度与根径的关系

在根径 0.1~ 3 mm 范围内, 豆科植物平均抗拉力是禾本科植物的 5 倍左右(见表 3)。四种植物抗拉力与根径呈正相关关系, 豆科植物根系的抗拉力与根径呈幂函数关系(见图 2), 与刘国彬等^[16]的研究结果一致; 早熟禾和黑麦草的抗拉力与根径分别呈指数函数和对数函数关系。

平均抗拉强度表现为: 白三叶(34. 49 MPa) > 黑麦草(15. 63 MPa) > 早熟禾(14. 24 MPa) > 小冠

表 3 四种草本植物抗拉力与根径的回归方程

Tab. 3 Regression equation between root tensile force and diameter of four kinds of herbaceous plants

植物种类	抗拉力 F/N	决定系数 R^2	平均直径/mm	平均抗拉力/N	平均抗拉强度/MPa
白三叶	$F = 22. 843D^{1. 7321}$	0. 947	$1. 1 \pm 0. 43$	$37. 46 \pm 6. 59$	$34. 49 \pm 10. 46$
小冠花	$F = 7. 0987D^{1. 5204}$	0. 962	$1. 6 \pm 0. 07$	$22. 3 \pm 9. 52$	$10. 68 \pm 9. 52$
早熟禾	$F = 0. 4697e^{2. 0936D}$	0. 876	$0. 8 \pm 0. 32$	$6. 22 \pm 4. 35$	$14. 24 \pm 4. 35$
黑麦草	$F = 2. 15\ln(D) + 4. 1983$	0. 833	$0. 6 \pm 0. 22$	$4. 72 \pm 9. 23$	$15. 63 \pm 8. 84$

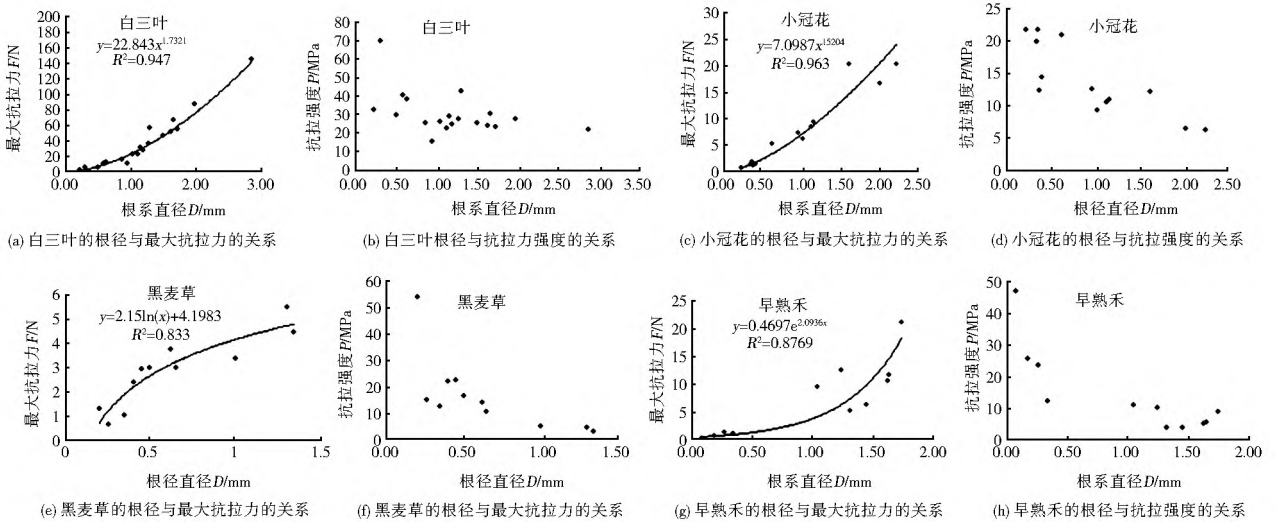


图 2 四种植物的力学特性分析

Fig. 2 Mechanical characteristics analysis of four kinds of plants

花(10. 68 MPa) (见表 3)。豆科和禾本科植物抗拉强度随着根径的增大而减小(见图 2), 说明根径越小抗拉强度越大, 与王阔等的研究结果一致^[22]。

2.3 应力和应变关系分析

应力与应变关系是对根系结构、变形、断裂理论以及根土复合体进行力学分析的主要依据之一。四种植物根系应力-应变曲线均表现为: 根系受拉初期, 随着应变的增加应力呈对数函数增长, 拟合方程为 $y = a \ln x + b$, 其中: a 表示在相同应力下应变变化率的大小, 反映了植物对于外力变化的敏感程度。四种植物根系应变的变化率表现为: 白三叶 > 小冠花 > 黑麦草 > 早熟禾(见表 4), 表明豆科植物对拉力的敏感性大于禾本科植物。

表 4 四种植物根系应力应变曲线参数

Tab. 4 Root parameters of stress strain curve of four kinds of plant

根径 D/mm	植物种类	应力与应变的回归方程	R^2
0. 22	白三叶	$y = 15. 173\ln(x) + 65. 798$	0. 916
	小冠花	$y = 7. 3909\ln(x) + 33. 609$	0. 968
	黑麦草	$y = 15. 172\ln(x) + 65. 799$	0. 962
	早熟禾	$y = 8. 2946\ln(x) + 35. 474$	0. 933
0. 31	白三叶	$y = 29. 106\ln(x) + 115. 35$	0. 952
	小冠花	$y = 5. 9387\ln(x) + 27. 599$	0. 977
	黑麦草	$y = 3. 7883\ln(x) + 16. 97$	0. 962
	早熟禾	$y = 4. 7036\ln(x) + 18. 086$	0. 920
1. 04	白三叶	$y = 11. 281\ln(x) + 48. 641$	0. 899
	小冠花	$y = 2. 1391\ln(x) + 11. 841$	0. 935
	黑麦草	$y = 0. 9517\ln(x) + 4. 066$	0. 958
	早熟禾	$y = 2. 9477\ln(x) + 12. 923$	0. 979

在相同的根径下,不同植物应力和应变的变化不同,相同的应变时应力大小表现为:白三叶>小冠花>黑麦草>早熟禾。四种植物应力-应变曲线的斜率渐减,应力与应变之间不符合胡克定律而是表现为非线性弹性特征。在根径为0.34 mm和1.04 mm时,禾本科植物与豆科植物差异显著,且均为白三叶的应力最大。这是由于植物种类的差异,决定组成结构差异,使根系力学性能存在差异^[23]。

2.4 主成分分析法对植物护坡效果评价

为了综合考虑其护坡效果,选取与植物护坡效益相关的指标如:抗拉力、抗拉强度、根径、根长密度、应变等,运用SPSS进行主成分分析。对数据进行标准化处理,得不同因素的相关系数矩阵(见表5)。

表5 不同指标的相关系数矩阵

Tab. 5 Correlation coefficient matrix of different specifications

相关	抗拉力	直径	抗拉强度	应变	根长密度 RLD
抗拉力	1.000	0.578	0.741	-0.797	-0.853
直径		1.000	-0.115	-0.949	-0.912
抗拉强度			1.000	-0.199	-0.298
应变				1.000	0.995
根长密度 RLD					1.000

由表5可以看出,所选指标中抗拉力与根径、抗拉强度有一定的相关性,即这些指标在信息上有重叠。而主成分分析法恰恰能够避免这一弊端,真实反映边坡植物的护坡效果。累积贡献率的大小体现了用主成分分析的可靠性。在提取特征值的过程中,前2个特征值均大于1,它们的累积贡献率达99.82%,根据大于85%原则,选取前两个因子作为主成分,进行综合评价可靠性较强。由因子荷载矩阵可以看出,第一主成分主要反映了抗拉力、根径的信息,第二主成分较好的反映抗拉强度信息,通过对成分荷载矩阵进行转换可得出系数及表达式。主成分表达式如下:

$$F_1 = 0.47x_1 + 0.45x_2 + 0.21x_3 - 0.51x_4 - 0.52x_5$$

$$F_2 = 0.36x_1 - 0.44x_2 - 0.80x_3 + 0.18x_4 + 0.09x_5$$

利用标准数据得主成分得分表见表6。

从表6可以看出各植物护坡效果的综合排序为:白三叶>小冠花>早熟禾>黑麦草。总体来说,豆科植物的护坡效益大于禾本科植物,且在豆科植物中白三叶的护坡效益大于小冠花。

表6 主成分得分

Tab. 6 The principal component scores

植物种类	第一主成分 F_1	排名	第二主成分 F_2	排名	综合得分	排名
白三叶	1.64	1	1.42	1	1.57	1
小冠花	1.62	2	-0.08	3	1.16	2
黑麦草	-2.08	4	0.21	2	-1.46	4
早熟禾	-1.17	3	-0.27	4	-0.93	3

3 讨论

大量研究证实,根系的垂直分布是植被与环境因子之间相互作用的结果^[24-25]。草本植物的根系绝大部分为周转较快的细根,能有效改善土壤的理化性质。李建兴等^[26]研究发现根系投影面积越大,固土能力越强。本研究发现豆科植物的投影面积大于禾本科,可知豆科植物的根系固土能力大于禾本科植物。李勇等^[27]研究发现,根密度越大,根系稳定土壤结构的绝对值越大,稳定土壤结构的有效性越大。本研究表明禾本科植物根长密度大于豆科植物,据此推断禾本科植物的固土效果大于豆科植物。因此,要确定豆、禾植物的固土效果,还需进一步研究根系投影面积和根长密度哪一因素起主导作用。

根系力学特性受很多因素的影响。本研究发现在根径0.1~3 mm范围内,豆科植物平均抗拉力是禾本科植物的5倍左右,而刘国彬等^[16]研究表明在根径范围为0.1~0.2 mm时,禾本科植物的平均抗拉力大于豆科植物。这可能是由于随着根系的增加豆科植物的抗拉力的增加速率大于禾本科植物,在根径范围增大时使豆科植物的平均抗拉力大于禾本科植物。因此,根系直径范围对植物的抗拉力有很大影响。大量研究表明根系的抗拉强度与根系纤维素的含量有关。Hu^[28]和朱海丽等^[29]认为细根纤维素含量很高,使其具有很大的抗拉强度。赵丽兵等^[30]对紫花苜蓿和马唐根的抗拉强度研究也发现,在维持根抗拉强度上纤维素的作用大于木质素。然而对于抗拉强度与根系纤维素含量的关系尚无明确定论,还需进一步研究。

4 结论

(1) 禾本科植物的根长密度随土层深度的增加以指数函数形式减少;豆科植物的根长密度随土层深度的增加以多项式形式先增后减。

(2) 在根径为0.1~3 mm范围内,豆科植物平均抗拉力是禾本科植物的5倍左右。豆科植物根系的抗拉力与根径呈幂函数关系,早熟禾和黑麦草的

抗拉力与根径分别呈指数函数和对数函数关系。平均抗拉强度表现为白三叶 34.49 MPa > 黑麦草 15.63 MPa > 早熟禾 14.24 MPa > 小冠花 10.68 MPa。

(3) 四种植物根系应力-应变曲线均表现为: 根系受拉初期, 随着应变的增加应力呈对数函数增长, 拟合方程为 $y = a \ln x + b$ 。四种植物根系应变变化率表现为: 白三叶 > 小冠花 > 黑麦草 > 早熟禾, 豆科植物对抗拉力的敏感性大于禾本科植物。

(4) 综合分析禾本科植物和豆科植物的护坡效益发现豆科植物优于禾本科植物, 且在豆科植物中, 白三叶优于小冠花。

参考文献(References):

- [1] 牛耀彬, 高照良, 刘子壮, 等. 工程堆积体坡面工程措施减流减沙效应的试验研究[J]. 南水北调与水利科技. 2015, 13(05): 862-866. (NIU Yaobin, GAO Zhaoliang, LIU Zizhuang, et al. Experimental study on the effects of slope surface of engineering accumulation on overland flow and sediment reduction [J]. South to north water transfers and water science & technology, 2015, 13(05): 862-866 (in Chinese))
- [2] 陈莉, 曾光辉, 程心意, 等. 浅议植被护坡的应用及发展[J]. 人民长江. 2007(09): 127-129. (CHEN Li, ZENG Guanghui, CHENG Xiuyi, et al. Application and development of vegetation slope protection[J]. Peoples of the Yangtze River, 2007(09): 127-129. (in Chinese))
- [3] 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. (LV Chunjuan, CHEN Lihua, ZHOU Shuo, et al. Root mechanical characteristics of different tree species[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(S1): 329-335. (in Chinese))
- [4] 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(01): 97-102. (CHENG Hong, XIE Tao, TANG Chun, et al. Overview of mechanism of plant roots improving soil reinforcement and slope stabilization[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(01): 97-102. (in Chinese))
- [5] 吕春娟, 白中科, 陈卫国, 等. 黄土区大型排土场植被根系的抗蚀抗冲性研究[J]. 水土保持学报. 2006, 20(2): 35-38, 143. (LV Chunjuan, BAI Zhongke, CHEN Weigu, et al. Study on anti-erosibility and anti-scourability of vegetation roots of large stack pile in loess area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 35-38, 143. (in Chinese))
- [6] 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性研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2008, 27(增刊2): 3445-3452. (ZHU Haili, HU Xiaosong, MAO Xiaoqing, Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in Loess area of Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(S2): 3445-3452. (in Chinese))
- [7] 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(01): 62-65. (CHENG Hong, YAN Chuansheng, LI Jianqing, et al. An experimental study on mechanic performance and mechanism of soil reinforcement by herb root system[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(01): 62-65. (in Chinese))
- [8] 王萍花, 陈丽华, 冀晓东, 等. 华北地区 4 种常见乔木根系抗拉强度的力学综合模型[J]. 北京林业大学学报. 2012, 34(01): 39-45. (WANG Pinghua, CHEN Lihua, JI Xiaodong, et al. Establishing an integrated mechanical model of root tensile strength taking four common arbor species in North China for example[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(01): 39-45. (in Chinese))
- [9] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报. 2006, 25(10): 2051-2057. (LI Shaocai, SUN Hailong, YANG Zhirong, et al. Mechanical characteristics of interaction between root system of plants and rock for rock slope protection[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2006, 25(10): 2051-2057. (in Chinese))
- [10] 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(09): 7-12. (ZHAO Libing, ZHANG Baogui. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of medicago sativa and digitaria sanguinalis[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(09): 7-12. (in Chinese))
- [11] 冯国建, 沈凡, 王世通. 护坡植物根系分布特征及抗拉强度研究[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版. 2013, 30(02): 115-118. (FENG Guojian, SHEN Fan, WANG Shitong, Study on distribution characteristic and tensile strength of slope engineering plant root[J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science, 2013, 30(02): 115-118. (in Chinese))
- [12] Wu T H. Investigation of landslides on Prince of Wales Island [R]. Columbus: Ohio State University (49), 1976.
- [13] Waldron L J. Shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977(41): 843-849.
- [14] 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(03): 11-18. (LI Yong, XU Xiaojin, ZHU Xiaomo, Plant roots and soil anti-scourability[J]. Journal of soil and water conservation, 1993, 7(03): 11-18. (in Chinese))
- [15] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性机制初步研究[J]. 中国科学: B 辑. 1992(03): 254-259. (LI Yong, XU Xiaojin, ZHU Xiaomo. The roots of plants in Loess Plateau to improve soil erosion resistance mechanism preliminary study[J]. Chinese Science, 1992, B(03): 254-259. (in Chinese))
- [16] 刘国彬, 蒋定生, 朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特征研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21-28. (LIU Guobin, JIANG Dingsheng, ZHU Xiaomo, Study on grasses root bio-mechanics in Loess Plateau[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1996, 2(3): 21-28. (in Chinese))
- [17] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 土壤侵

- 蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 93-96. (LIU Guo-bin. Study on soil anti-scourability and its mechanism of grassland on Loess Plateau[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 93-96. (in Chinese))
- [18] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 北京林业大学学报. 2006(05): 67-72. (LIU Xiu ping, CHEN Li hua, SONG Wei feng. Study on the shear strength of forest root loess composite[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006(05): 67-72. (in Chinese))
- [19] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root Strength and Root Area Ratio of Forest Species in Lombardy (Northern Italy)[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1-2): 11-22.
- [20] Mattia C, Bischetti G B, Gentile F. Biotechnical Characteristics of Root Systems of Typical Mediterranean Species [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1-2): 23-32.
- [21] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 农业工程学报. 2009, 25(02): 50-55. (HAN Feng peng, ZHENG Ji yong, ZHANG Xing chang. Plant root system distribution and its effect on slope land converted from farmland in the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(02): 50-55. (in Chinese))
- [22] 王阔, 黄晓乐. 根系-土复合体抗剪强度力学模型与实验分析[J]. 山西建筑. 2012, 38(06): 84-85. (WANG Kuo, HUANG Xiao le. Shear resistance mechanic model of root-soil composite and experimental analysis [J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(06): 84-85. (in Chinese))
- [23] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰, 等. 油松根系抗拉应力与应变全曲线试验研究[J]. 中国水土保持科学. 2006, 4(2): 66-70. (LIU Xiu ping, CHEN Li hua, SONG Wei feng, et al. Experimental on resistance to tensile stress and complete stress-strain curves of root system of Pinus tabulaeformis[J]. Science of Soil and Water Conservation. 2006, 4(2): 66-70. (in Chinese))
- [24] 廖兴其. 根系研究方法评述[J]. 世界农业. 1995(07): 23-24. (LIAO Xing qi. A review of the methods of root [J]. world agriculture, 1995(07): 23-24. (in Chinese))
- [25] 黄瑞冬. 植物根系研究方法的发展[J]. 沈阳农业大学学报. 1991(02): 164-168. (HUANG Rui dong. Development of methods of studying root systems [J]. Journal of Shenyang Agricultural University. 1991(02): 164-168. (in Chinese))
- [26] 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(10): 144-152. (LI Jian xing, HE Bing hui, CHEN Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2013(10): 144-152. (in Chinese))
- [27] 李勇, 武淑霞, 夏侯国风. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报. 1989, 4(02): 01-07. (LI Yong, WU Shu xia, XIAHOU Guo feng. Stabilization of soil structure by roots of artificial locust trees in purple soil region [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation. 1989, 4(02): 01-07. (in Chinese))
- [28] Hu X, Brierley G, Zhu H, et al. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(4): 668-686.
- [29] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J]. 农业工程学报. 2009, 25(05): 40-46. (ZHU Hai li, HU Xia song, MAO Xiao qing, et al. Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(05): 40-46. (in Chinese))
- [30] 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(09): 7-12. (ZHAO Li bing, ZHANG Bao gui. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of medicago sativa and digitaria sanguinalis [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(09): 7-12. (in Chinese))

(上接第 101 页)

- [17] 冯士刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151. (FENG Shi gang, AI Qian. Application of fast and elitist non-dominated sorting genetic algorithm in multi-objective reactive power optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 146-151. (in Chinese))
- [18] 黄晓敏, 雷晓辉, 王宇晖, 等. 基于 NSGA-II 的水文模型参数多目标优化研究[J]. 人民长江, 2012, 43(2): 16-21. (HUANG Xiao min, LEI Xiao hui, WANG Yu hui, et al. Study of multi-objective optimization of parameters of HYMOD model using NSGA-II algorithm [J]. Yangtze River, 2012, 43(2): 16-21. (in Chinese))
- [19] 金鑫, 王凌河, 赵志轩, 等. 水库生态调度研究的若干思考[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 22-32. (JIN Xin, WANG Ling he, ZHAO Zhi xuan, et al. Reflections on the research of ecological operation of reservoirs [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 22-32. (in Chinese))
- [20] 董哲仁, 孙东亚, 赵金勇. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 28-32. (DONG Zhe ren, SUN Dong ya, ZHAO Jin yong. Multi-objective ecological operation of reservoirs [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese))