

黄土丘陵区不同植物根系抗拉力学特性

苏雪萌¹, 刘俊娥^{1,2}, 周正朝^{1,2}, 李秋嘉¹, 赵富王¹

(1. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710062; 2. 陕西师范大学 地理学国家级实验教学示范中心, 西安 710062)

摘要: 植被对于黄土丘陵区的生态修复和物源稳定具有重要意义, 其中植物根系抗拉力学特性是影响植物护坡的主要因素。为了研究黄土丘陵区植物根系抗拉特性, 以黄土丘陵区3种典型植物种群[狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、苔草(*Carex lanceolata* Boott)]为研究对象, 采用野外采样、室内试验与实验分析相结合的方法, 探究了3种植物根系抗拉力学特性。研究表明: (1) 根长一定时, 3种植物的最大抗拉力随着根径的增加而增加, 单根极限抗拉强度随着根径的增大而减小; 而根径一定时, 根系的极限抗拉强度随根长的增大而减少; 弹性模量值随着根径和根长增长呈下降趋势。 (2) 3种植物根系平均最大抗拉力关系为狼牙刺(12.135 N) > 苔草(11.194 N) > 铁杆蒿(9.168 N); 平均极限抗拉强度为铁杆蒿(15.718 MPa) > 苔草(15.486 MPa) > 狼牙刺(6.457 MPa); 平均弹性模量分别为铁杆蒿(2.900 N/mm) > 狼牙刺(1.698 N/mm) > 苔草(1.003 N/mm)。结果表明这3种植物中铁杆蒿根系的固土能力最好, 在选择最为适宜的水土保持物种时可以优先考虑。研究结果可为黄土丘陵区水土保持研究提供一定的科学依据。

关键词: 植物根系; 抗拉力; 抗拉强度; 弹性模量; 黄土高原

中图分类号: S157.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0259-06

Root Tensile and Mechanical Properties of Three Typical Plants in the Loess Hilly Region

SU Xuemeng, LIU June^{1,2}, ZHOU Zhengchao^{1,2}, LI Qiujia¹, ZHAO Fuwang¹

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. National

Demonstration Center for Experimental Geography Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Plant roots play an important role in slope stability in the loess hilly region. And tensile mechanical properties of plant roots are the main factors affecting slope protection of plant. Based on field sampling and indoor simulation experiment and laboratory analysis, the tensile mechanical properties of three typical plants roots (*Sophora viciifolia*, *Artemisia gmelinii*, *Carex lanceolata* Boott) in the hilly area of the Loess Plateau were studied. The results showed that: (1) with certain root length, the maximum root tensile strength of the three plants decreased with root diameter increasing; within certain root diameter, the maximum root tensile strength decreased with increase of root length. In addition, the elastic modulus decreased with increase of both root diameter and length; (2) the average maximum tensile resistance of the three species decreased in the order; *Sophora viciifolia* (12.135 N) > *Carex lanceolata* Boott (11.194 N) > *Artemisia gmelinii* (9.168 N); the average tensile strength ranked as the sequence, *Artemisia gmelinii* (15.718 MPa) > *Carex lanceolata* Boott (15.486 MPa) > *Sophora viciifolia* (6.457 MPa); the average elastic modulus decreased in order, *Artemisia gmelinii* (2.900 MPa/mm) > *Sophora viciifolia* (1.698 MPa/mm) > *Carex lanceolata* Boott (1.003 MPa/mm). According to the results, *Artemisia gmelinii* has the best ability of soil fixation and slope protection among the studied three species, which can be a suitable species to maintain soil and water. The results provide the data basis for slope protection and soil and water conservation with vegetation on the Loess Plateau.

Keywords: roots; stress-strain curve; tensile resistance; elastic modulus ; Loess Plateau

黄土高原是我国土壤侵蚀最为严重的地区之一^[1-3]。根据“中国水土流失与生态安全综合科学考察”,黄土高原总面积 64 万 km²,土壤侵蚀面积达 39 万 km²^[4]。而研究表明植被恢复建设是最常用的水土保持措施,植被能拦截降雨、减少降雨侵蚀力,其根系也可以改善土壤理化性质,增强土壤结构,提高土壤抗侵蚀能力^[5-6]。早在 20 世纪 30 年代, Holch (1931 年)首次提出有关不同森林植被根系对坡面稳定影响,之后对根系固土功能、防止地表冲刷及增加坡面抗滑能力等方面逐渐开始研究^[7-11]。近年来植物固坡措施已经在国内外得到广泛应用^[12],其中植物单根抗拉特性是根系生物力学特性的重要组成部分,也是研究植物固土抗滑的基础;但根系研究有着一定程度的复杂性,即使是单根抗拉也还存在着许多问题亟待解决,包括试验方法、影响因素等。有学者通过对根径、根长、含水率等植物自身影响因素^[13-14]以及加载方式、速率、植物采伐时间等试验因素^[15-16]进行研究均得到不同的结论。目前主要从室内单根抗拉和野外原位群根抗拔 2 方面^[7]来研究根系抗拉力学特征,其中李光莹等^[17]对黄河源区高寒草地植物的根系的研究,赵丽兵等^[18]对紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和马唐(*Digitaria ciliaris*)两种草本植物根系的研究,陆桂红等^[19]对泥石流源区典型草本植物根系的研究,钟荣华等^[20]对三峡水库消落带草本植物根系的研究,肖宏彬等^[21]对贫瘠土壤环境下的香根草(*Chrysopogon zizanioides*)根系的研究结果不同程度地表明:根系抗拉力与直径呈显著的幂函数正相关关系;根系抗拉强度与直径呈显著的负相关关系,与根的纤维素含量呈正相关关系等。先后已有研究探讨黄土高原不同植物根系对土壤抗侵蚀性能的影响^[22],但是对黄土高原不同植物根系特征与植物根系抗拉力学特性方面研究较少。在不同条件下,不同植物抗拉特性还存在较大差别^[23]。

因此,本研究以黄土丘陵区 3 种典型植物:狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、苔草(*Carex lanceolata* Boott),通过运用工程力学基础理论研究不同植物根系抗拉力学特性,探析植物根系在固坡保土增强土体稳定性的作用机理,以期为黄土高原丘陵区水土保持固土护坡植物筛选研究提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于黄土高原丘陵区的陕西省延安市

安塞区县南沟(109°17′42″E,36°42′25″N),平均海拔为 1 266 m。该区属于温带半湿润气候区向温带半干旱大陆性气候过渡区,多年年平均气温 8.8℃,多年年平均降水量为 505.3 mm,年内降水主要集中在 7 月、8 月、9 月份^[24]。土壤类型为黄绵土,土质疏松,遇水易崩解破碎,水土流失严重。自 90 年代开始该区实行大规模退耕还林还草工程,本研究区分布大量自然恢复植被,主要植被类型有铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等^[25]。

1.2 研究方法

1.2.1 根系采集 于 2017 年 10 月在安塞区县南沟流域选取具有代表性植物种群(狼牙刺、铁杆蒿、苔草)的坡面作为研究样地(表 1)。在每种植物种群的坡面按“S”形选取 5 株高度、覆盖面积相近的植物,并分层采集根系;为避免出现不同程度的误差,统一规定采样剖面深为 30 cm,分为 3 层,每层高为 10 cm,长和宽分别为 15 cm。每层以根为中心用卷尺测量根土复合体的标准长宽高,为避免根土复合体造成机械损伤,只用铲子将整个根土复合体铲出,然后将根土复合体放入自封袋中,带回实验室放入 4℃低温冰箱中进行保存。

表 1 不同植被种群样地信息

植被种群 类型	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	盖度/ %	恢复 年限/a
狼牙刺	1266	40	阳坡	72%	老荒坡
铁杆蒿	1266	15	阴坡	33%	10
苔草	1107	35	阴坡	60%	老荒坡

1.2.2 根系拉力测定 本试验单根根径采用根系分析软件进行测定,测定的根径为单根的平均根径作为该根段的根径。所有单根测定完成后按其根径的径级大小划分为:径级 I($0.000 < D \leq 0.700$ mm)、径级 II($0.700 \text{ mm} < D \leq 1.000$ mm)、径级 III($1.000 \text{ mm} < D \leq 1.300$ mm)和径级 IV($D > 1.300$ mm)。在 4 个径级范围内分别设计 5 种不同标距,即待测根系长度(50 mm,75 mm,100 mm,125 mm,150 mm),采用微机控制电子万能材料试验机(上海松顿 LDM-1)对植物根系进行匀速拉伸试验,测定抗拉力、抗拉强度、变形特性等参数。试验时,首先调整万能材料试验机标距与试验设计中的根系设定长度一致,考虑仪器固定根系时所用夹头要占据一定根系长度,实际根系长度相比测定长度多约 30 mm。将根系两端固定夹紧后,以 10 mm/min 的速度进行匀速定速度拉伸直到

根系被完全拉断为止。在 5 种标距下,3 种植物根系总根数为 900 根,由于试验根系若在夹口处断裂则视为试验失败数据作废,根系仅在夹口之间中间位置断裂记为成功,所以总计成功根数为 360 根,总成功率为 38.3%。

根系的抗拉力学特性主要由抗拉力、抗拉强度、变形特性等方面来反映。通过万能材料试验机可直接导出根系断裂时的最大抗拉力及最大变形量。由于根系根径、测量标距已知,可以计算出根系的抗拉强度、弹性模量等参数。计算公式:

$$P=\frac{4F}{\pi D^2}$$
(1)

$$E=\frac{\sigma}{\epsilon}$$
(2)

$$\epsilon=\frac{\Delta L}{L}$$
(3)

式中: P 为单根抗拉强度(MPa); F 为在计算最大抗拉强度时最大抗拉力,在计算应力时为抗拉力(N); D 为根系平均根径(mm); E 即为弹性模量; σ 为应力 N (极限应力 σ 数值与抗拉强度 P 值相等); ϵ 为应变即延伸率; ΔL 为单根拉伸是的伸长量(mm); L 为单根的原始长度,本研究试验中称为标距(mm)。

1.2.3 数据处理与分析 进行分析之前对数据进行正态性检验与方差齐性检验。用 Excel 2010 进行数据处理和图表绘制,采用 SPSS 20.0 对 5 种标距下根径与抗拉力、根径与抗拉强度之间的关系进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 最大抗拉力与根径和根长的关系

从根径的统计结果来看,铁杆蒿和苔草的根系主要处于 0.4~1.5 mm 的范围内,而本试验中狼牙刺的根系主要处于 0.4~2.6 mm 的范围内,三者的平均直径分别为 1.443 mm,1.043 mm 和 0.978 mm。由于过粗和过细的根在进行单根抗拉试验时的难度较大,试验失败率太高;因此本试验舍弃这些数据,主要选取根径分布范围内的所得数据进行分析 and 比较(图 1)。

3 种植物的平均最大抗拉力次序为:狼牙刺(12.135 N)>苔草(11.194 N)>铁杆蒿(9.168 N)。整体来看,3 种植物根系在各标距范围内抗拉力无显著性差异。3 种植物根系的抗拉力均随直径增大呈幂函数增大(图 1),狼牙刺根系极限抗拉力与根径的回归 $R^2>0.6$,其中标距 75 mm, R^2 拟合度最高;苔草根系极限抗拉力与根径的回归系数 $R^2>0.55$,其中标距 150 mm, R^2 拟合度最高;铁杆蒿极限抗拉力与根径的回归系数 $R^2>0.4$,其中标距 75 mm, R^2 拟合度最高。

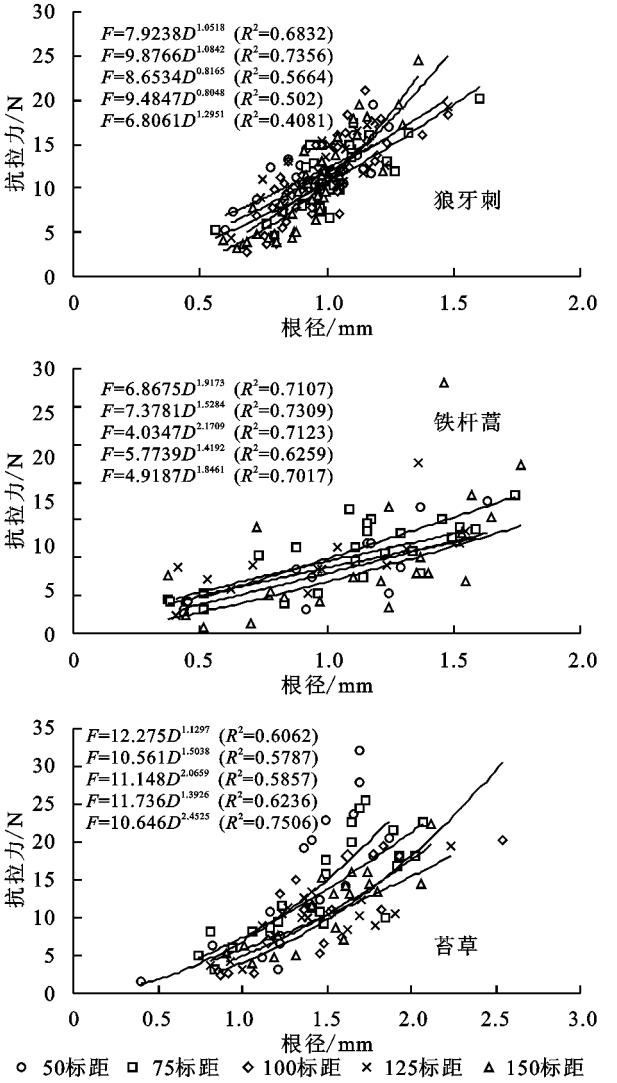


图 1 3 种不同植物根系抗拉力与直径的关系曲线

在不同径级下,3 种植物根系最大抗拉力随着径级的增大而逐渐增大。其中,铁杆蒿在径级 I 与其他径级间的最大抗拉力有显著性差异,苔草在径级 I 和 II 与径级 III 和 IV 之间有显著性差异,狼牙刺在径级 II 与径级 I, III, IV 之间分别存在显著差异,其余各径级间无显著性差异。同一径级不同物种根系抗拉力差异性不显著,铁杆蒿根系抗拉力均显著大于其他两种植物根系(表 2)。

2.2 极限抗拉强度与根径和根长的关系

3 种植物的平均抗拉强度值分别为:铁杆蒿(15.718 MPa)>苔草(15.486 MPa)>狼牙刺(6.457 MPa),其中铁杆蒿的抗拉强度值范围为 0.719~94.930 MPa;苔草的抗拉强度值范围为 3.118~36.923 MPa;狼牙刺的抗拉强度范围为 2.436~16.464 MPa,各个数据在直径段内分布比较集中,主要集中在径级 II、径级 III 区间(表 2)。径级 I~IV,3 种植物根系极限抗拉强度随着径级的增大而逐渐减小。同一物种群,狼牙刺根系径级 II 与其他各径级的极限抗拉强度有显著差异性,铁杆

蒿根系径级Ⅱ与其他各径级的极限抗拉强度有显著差异,苔草根系径级Ⅰ与其余根径有显著差异,其余各径级间差异不显著(表 2)。同一径级不同物种,狼牙刺分别与铁杆蒿和苔草存在显著差异,其余物种间差异不显著(表 2)。

表 2 不同径级下不同植物根系最大抗拉力和最大抗拉强度

植物名称	径级/mm	F/N	P/MPa
狼牙刺	Ⅰ	1.654±0.042Ac	10.962±0.137Ab
	Ⅱ	8.271±0.180Abc	16.464±0.282Aa
	Ⅲ	13.790±0.279Ab	11.985±0.177Ab
	Ⅳ	32.234±0.569ABa	9.071±0.148Ab
铁杆蒿	Ⅰ	17.391±0.399Ab	94.930±2.369Ba
	Ⅱ	29.538±0.772Ba	68.123±1.896Bb
	Ⅲ	33.733±0.717Aa	33.820±0.736Bc
	Ⅳ	33.119±0.721Aa	19.756±0.416Bc
苔草	Ⅰ	7.887±0.129Ac	36.923±0.346Ca
	Ⅱ	15.417±0.292Bb	31.871±0.492Bb
	Ⅲ	21.103±0.717Ba	21.176±0.295Cb
	Ⅳ	24.535±0.268Ba	12.94±0.330ABb

注:(1)小写字母表示同一物种不同径级间存在差异显著($p<0.05$);(2)大写字母表示同一径级不同物种间存在差异显著($p<0.05$);(3)径级Ⅰ($0.000<D\leq0.700$ mm)、径级Ⅱ($0.700\text{ mm}<D\leq1.000$ mm)、径级Ⅲ($1.000\text{ mm}<D\leq1.300$ mm)和径级Ⅳ($D>1.300$ mm)。

通过 SPSS 20.0 软件进行回归分析,3 种植物单根极限抗拉强度与根径均在双侧水平上显著相关,3 种植物根系的抗拉强度均随直径增大呈幂函数减小(图 2),狼牙刺根系极限抗拉强度与根径的回归系数 $R^2>0.51$,其中标距 150 mm, R^2 拟合度最高;铁杆蒿极限抗拉强度与根径的回归系数 $R^2>0.18$,其中标距 125 mm, R^2 拟合度最高;苔草根系极限抗拉力与根径的回归系数 $R^2>0.52$,其中标距 75 mm, R^2 拟合度最高(图 2)。

2.3 植物弹性模量

试验中通过根系拉断后软件得出的原始标距和断后标距值计算应变变量,以此可以计算得出 3 种植物在各标距组的弹性模量(表 3)。在同一物种间,不同标距的弹性模量没有显著性差异。在同一标距下,仅有标距为 50 mm 和 100 mm 的铁杆蒿分别与狼牙刺和苔草存在显著差异,其余各标距下物种间无显著性差异(表 3)。

3 种植物平均弹性模量分别为:铁杆蒿(2.900 N/mm) $>$ 狼牙刺(1.698 N/mm) $>$ 苔草(1.003 N/mm),在标距 50,75,100 mm 中,3 种植物的弹性模量均随着标距的增加而减小,且每个标距组内,弹性模量均存在铁杆蒿 $>$ 狼牙刺 $>$ 苔草的关系。在标距 125,150 mm 中,3 种植物的弹性模量均表现为标距

125 mm 的弹性模量大于标距 150 mm 的弹性模量。由应变量的计算结果可以看出,在标距越大即根系越长的情况下,根被拉伸的越长。由表 3 可以看出,3 种植物的弹性模量与抗拉力和抗拉强度不同,铁杆蒿的弹性模量是苔草的 2.7 倍,是狼牙刺的 1.7 倍,而三者的抗拉强度、抗拉力只有 1~2 倍,且狼牙刺和苔草的计算结果非常接近,弹性模量计算结果受应变值的影响很大。

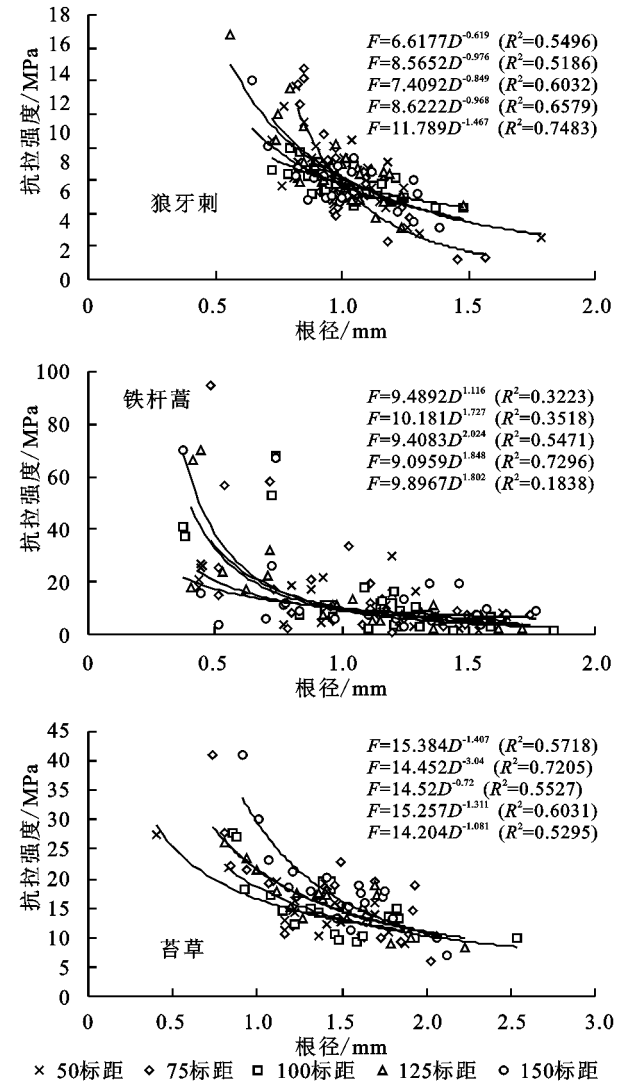


图 2 3 种不同植物根系抗拉强度与直径的关系

表 3 不同标距下植物根系弹性模量表

标距/mm	狼牙刺/ (N·mm ⁻¹)	铁杆蒿/ (N·mm ⁻¹)	苔草/ (N·mm ⁻¹)
50	2.323±0.374Aa	4.340±0.391Ba	1.413±0.090Aa
75	1.964±0.143ABa	2.768±0.334Ba	1.202±0.089Aab
100	1.313±0.085Aa	2.517±0.260Ba	0.736±0.035Aa
125	1.501±0.103ABa	2.434±0.230Ba	0.902±0.119Aab
150	1.390±0.128ABa	2.442±0.297Ba	0.761±0.099Aa

注:大写字母表示同一标距下不同物种间存在差异显著($p<0.05$);小写字母表示同一物种间不同标距下存在差异显著($p<0.05$)。

3 讨论

根系抗拉性能是其主要力学性质之一,其大小直接影响根系的固土效应。不同标距对单根抗拉强度表现结果显著不同,反映了在不同宽度的土壤剪切带内根系对固土抗滑能力有显著差别。本研究表明从3种植物抗拉力的情况来看,狼牙刺比其他2种植物更能承受拉力作用,在植物根系中,根系最大抗拉力与根径关系呈现正相关关系,即根径越大,最大抗拉力越大,其中根系极限抗拉力的拟合函数表示为 $F_{\max}=\alpha D^{\beta}$, α, β 为经验系数且 $\alpha, \beta > 0$ 。其中从相关系数来看,3种植物根系极限抗拉力与根径相关系数都在0.4以上,狼牙刺>苔草>铁杆蒿,均表现幂函数关系,这与前人研究的紫花苜蓿^[18]、香根草^[21]、欧洲山毛榉^[26]等其他乔灌木、草本植物研究结果一致,但是在数值上有所不同。分析其原因可能是由于试验条件或者根系生理年龄期的影响,所以在考虑根系形态特征的同时,也要考虑根系年龄结构对根系抗拉力的影响。Hathaway等研究发现,无论是草本植物还是乔灌木植物,根系的抗拉力和直径之间的关系不仅反映了断裂力学中的尺度效应,而且与纤维素或者木质素含量有关。而前人研究中所用根系多以生长茂盛根系粗大的乔灌木,其根径与本研究中的材料差异较大,从而根系力学性质的大小差异较大。

3种植物单根抗拉强度随着根径的增加而逐渐减小,研究表明植物的抗拉强度均与根径呈幂函数的负相关关系,不受植物种类影响;但是不同植物之间的抗拉强度值仍然有着很大差距,其中铁杆蒿和苔草的抗拉强度值相差不大,二者的抗拉强度值是狼牙刺的2.4倍。这可能由于不同植物根系在不同深度的土壤理化性质不同,所以不同植物根系空间分布存在差异^[27-29]。3种植物根系抗拉强度随着根径增加呈幂函数减少,其他学者对柠条^[23]、锦鸡儿^[23]、落叶松^[30]、白桦^[30]等乔灌木根系抗拉强度的试验研究表明,根径与抗拉强度基本呈幂函数或指数函数减少趋势,这与本研究结果相一致。由此可知,大多数情况下,草本植物与粗大的乔灌木根系抗拉力学特性是一致的,但是在小的根径范围内,由于试验条件的限制或者根系生理年龄期的影响,可能出现抗拉强度不稳定的情况,需区别对待。

试验研究表明,在不同标距下根系的抗拉强度显著不同,反映了不同宽度的土壤剪切带内根固土抗滑能力的差别。3种植物的抗拉强度随着标距的增加

而逐渐减小,这是可能由于随着根系标距的增加进而缺陷增多的概率就会相应增加,所以就会降低其抗拉强度^[31]。由于弹性模量为应力与应变的比值,应变量即为根的拉伸量,试验结果显示3种植物随着标距的增加而减小,铁杆蒿具有较大的极限弹性模量,说明同样的外界加载条件,根径、根长较小的根系对外界拉力的缓冲能力比根径、根长较大的根系缓冲能力大,根径、根长较小的根系又具有较强的极限抗拉强度。这也正是直根、短根增强土壤抗蚀、抗冲性的机理所在。这与欧阳前超^[32]研究土石山区草本植物的弹性模量研究结果相一致,但是其白喜草平均弹性模量与本文铁杆蒿的数据相差较大,这可能由于植物种类或者根系生理年龄不一致。但是,无论草本植物还是乔灌木都可以说明根系刚度越大,越不容易发生变形,对固持土壤作用效果越突出。

4 结论

(1) 在各根径范围内,3种植物的单根极限抗拉力随着直径的增大均已幂函数递增,单根极限抗拉力从大到小顺序表现为狼牙刺>苔草>铁杆蒿,抗拉力受直径的影响较大。

(2) 在根径的范围内,3种植物单根极限抗拉强度随根径的增大均以幂函数递减,单根极限抗拉强度从大到小顺序表现为铁杆蒿>苔草>狼牙刺。铁杆蒿的固土性能明显优于苔草和狼牙刺。

(3) 3种植物在各自研究的径级范围内,根系的弹性模量随着根径和根长的增大呈下降趋势。3种植物单根极限弹性模量均值从大到小依次为铁杆蒿>狼牙刺>苔草。

因此,在本研究的3种植物中铁杆蒿根系的固土能力最优,在水土保持固土护坡植物筛选研究中可以优先考虑。本试验研究结果可为黄土丘陵区植物固土护坡以及水土保持研究提供科学依据。

参考文献:

- [1] 李强,刘国彬,许明祥,等. 黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 105-112.
- [2] 高海东,李占斌,李鹏,等. 基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1503-1515.
- [3] Fu B J, Liu Y, Lv Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. Ecological Complexity, 2011, 8

- (4):284-293.
- [4] 刘国彬,李敏,上官周平,等. 西北黄土区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):16-21.
 - [5] 王青杵,王改玲,石生新,等. 晋北黄土丘陵区不同人工植被对水土流失和土壤水分含量的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(4):71-79.
 - [6] 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.
 - [7] 解明曙. 林木根系固坡力学机制研究[J]. 水土保持学报,1999,4(3):7-14.
 - [8] 李勇,武淑霞,夏侯国凤. 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,1998,4(2):2-8.
 - [9] Twardowski Z J. Daily dialysis: is this a reasonable option for the new millennium? [J]. Nephrol Dial Transplant, 2001,16(7):1321-1324.
 - [10] Tosi M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy) [J]. Geomorphology, 2007,87(4):268-283.
 - [11] Genet M, Stokes A, Fourcaud T, et al. The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest [J]. Ecological Engineering, 2010,36(3):265-275.
 - [12] 郭晓朦,黄茹,何丙辉,等. 不同水土保持林草措施对三峡库区土壤理化性质的影响[J]. 草业科学,2016,33(4):555-563.
 - [13] Chaobo Z, Xia Z, Jing J, et al. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants [J]. Catena, 2019, 172:140-147.
 - [14] 陈丽华,余新晓,宋维峰,等. 林木根系固土力学机制[M]. 北京,中国科学出版社,2012.
 - [15] 杨维西,赵廷宁,李生智,等. 人工刺槐林采伐后根系固土作用的衰退状况[J]. 水土保持学报,1990,4(1):6-10.
 - [16] 左志严,格日乐,乌仁图雅,等. 内蒙古中西部3种乡土植物根系抗拉力学特性的对比研究[J]. 水土保持通报,2015,35(2):52-63.
 - [17] 李光莹,虎啸天,李希来,等. 黄河源玛沁地区高寒草地植物固土护坡的力学效应[J]. 山地学报,2014,32(5):550-560.
 - [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] 陆桂红,欧国强,杨顺,等. 泥石流源区典型草本植物根系抗拉试验[J]. 山地学报,2014,32(6):725-731.
 - [20] 钟荣华,鲍玉海,贺秀斌,等. 三峡水库消落带4种草本植物根系抗拉力学特性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.
 - [21] 肖宏彬,赵亮,李珍玉,等. 香根草根系的分布形态及抗拉强度试验研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(3):6-10.
 - [22] 李建兴,何丙辉,湛芸,等. 不同护坡草本植物根系分布特征及其对土壤抗剪强度影响[J]. 农业工程学报,2013,29(10):144-152.
 - [23] 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(S2):3445-3452.
 - [24] 严方晨,焦菊英,曹斌挺,等. 黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性:以坊塌流域为例[J]. 应用生态学报,2016,27(1):64-72.
 - [25] Fu B J, Zhang Q J, Chen L D, et al. Temporal change in land use and its relationship to slope degree and soil type in a small catchment on the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2006,65(1):41-48.
 - [26] Bischetti G B, Chiaradia E A, Epis T, et al. Root cohesion of forest species in the Italian Alps[J]. Plant and Soil, 2009,324(1):71-89.
 - [27] 黄林,王峰,周立江,等. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系[J]. 生态学报,2012,32(19):6110-6119.
 - [28] 葛芳红,周正朝,刘俊娥,等. 黄土丘陵区4种典型植物根系分布特征及对土壤分离速率的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(6):164-169.
 - [29] 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(S):329-335.
 - [30] 陈丽华,及金楠,冀晓东,等. 林木根系基本力学性质[M]. 北京:科学出版社,2012:24-25.
 - [31] Zhang Chaobo, Chen Lihua, Jiang Jing, et al. Effects of gauge length and strain rate on the tensile strength of tree roots[J]. Trees, 2012,26(5):1577-1584.
 - [32] 欧阳前超,魏杨,周霞,等. 土石山区护坡草本植物根系抗拉力学特性[J]. 中国水土保持科学,2017,15(4):35-41.