

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.042.

李宏斌, 张旭, 姚晨, 等. 陕北黄土区不同植物根系抗拉力学特性研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 122-129.

LI Hongbin, ZHANG Xu, YAO Chen, et al. Study on Root Tensile Mechanical Properties of Six Typical Plants in the Loess Area of Northern Shaanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 122-129.

陕北黄土区不同植物根系抗拉力学特性研究

李宏斌¹, 张旭^{2,3}, 姚晨¹, 杜峰^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 单根抗拉力学特性是植物发挥固土护坡作用的重要因素, 乡土植物分布广泛对区域固土护坡起主要作用, 研究比较不同植物单根抗拉力学特性, 对坡陡沟深、滑塌频发的黄土区护坡植物选择具有重要意义。 [方法] 以陕北黄土区的截叶铁扫帚、猪毛蒿、大针茅、铁杆蒿、芨蒿和细叶藎草 6 种常见乡土植物为研究对象, 通过室内单根拉伸试验, 比较分析了以上 6 种植物不同根径单根抗拉力、单根抗拉强度和单根延伸率等力学特性。 [结果] (1) 在根径范围内, 6 种植物单根抗拉力与根径呈幂函数形 ($y = ax^b, b > 0$) 正相关关系, 植物单根抗拉强度与根径呈幂函数形 ($y = ax^b, b < 0$) 负相关关系; 6 种植物单根延伸率随着根径的增加呈现出增大趋势, 但单根延伸率与根径之间未呈现出显著的相关性。(2) 在试验根径 0.05~0.60 mm 范围内, 植物种类对单根抗拉力、单根抗拉强度和单根延伸率的影响都达到显著水平, 6 种植物平均单根抗拉力关系为: 细叶藎草 (10.20 N) > 大针茅 (7.39 N) > 铁杆蒿 (6.87 N) > 芨蒿 (6.44 N) > 猪毛蒿 (6.34 N) > 截叶铁扫帚 (3.37 N); 平均抗拉强度关系为: 芨蒿 (148.44 MPa) > 铁杆蒿 (141.96 MPa) > 大针茅 (132.95 MPa) > 细叶藎草 (132.68 MPa) > 猪毛蒿 (115.07 MPa) > 截叶铁扫帚 (85.86 MPa); 平均单根延伸率关系为: 细叶藎草 (32.37%) > 猪毛蒿 (17.01%) > 大针茅 (13.60%) > 铁杆蒿 (13.15%) > 芨蒿 (13.09%) > 截叶铁扫帚 (6.98%)。 [结论] 细叶藎草根系的单根抗拉力学性能优于其他植物, 本研究结果可为陕北黄土区水土保持研究提供一定的科学依据。

关键词: 黄土区; 抗拉强度; 力学特性; 拉伸试验; 单根

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0122-08

Study on Root Tensile Mechanical Properties of Six Typical Plants in the Loess Area of Northern Shaanxi

LI Hongbin¹, ZHANG Xu^{2,3}, YAO Chen¹, DU Feng^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The tensile mechanical properties of a single root are the important factors for plants to play the role in soil consolidating and slope protection, the wide distribution of native plants plays a major role in regional soil consolidating and slope protection. It is of great significance to study and compare the tensile mechanical properties of different plant root systems for the selection of slope protection plants in loess areas with steep slopes, deep grooves and frequent landslides. [Methods] The six native plants (*Lespedeza cuneata*, *Artemisia scoparia*, *Stipa grandis*, *Artemisia sacrorum*, *Artemisia giraldii* and *Carex duriuscula* subsp. *stenophylloides*) in the loess region of northern Shaanxi were selected as the study samples. Through indoor single root tensile test, the mechanical properties of single root tensile force, single root

收稿日期: 2022-06-24

修回日期: 2022-07-14

资助项目: 国家自然科学基金 (42177458, 41771322); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504504)

第一作者: 李宏斌 (1992—), 男, 河南南阳人, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 1832929992@qq.com

通信作者: 杜峰 (1971—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持和群落生态的研究。E-mail: dufeng@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

tensile strength and single root extensile rate of the above six plants with different root diameters were compared and analyzed. [Results] (1) Within the root diameter range, with the increase of root diameter, the single root tensile forces and single root tensile strengths of 6 plant species followed the increase pattern of a power function ($y = ax^b, b > 0$) and the decrease pattern of a power function, respectively ($y = ax^b, b < 0$); moreover, the single root limit extensile rates of the 6 plant species increased with the increasing of the root diameter, but there was no significant correlation relationship between them. (2) In the range of 0.05~0.60 mm of root diameter, the influences of plant species on single root tensile force, single root tensile strength and single root extensile rate reached the significant level, and the average tensile forces of the six species decreased in the order: *Carex duriuscula* subsp. *Stenophylloides* (10.20 N) > *Stipa grandis* (7.39 N) > *Artemisia sacrorum* (6.87 N) > *Artemisia giraldii* (6.44 N) > *Artemisia scoparia* (6.34 N) > *Lespedeza cuneata* (3.37 N); the average tensile strength ranked as *Artemisia giraldii* (148.44 MPa) > *Artemisia sacrorum* (141.96 MPa) > *Stipa grandis* (132.95 MPa) > *Carex duriuscula* subsp. *Stenophylloides* (132.68 MPa) > *Artemisia scoparia* (115.07 MPa) > *Lespedeza cuneata* (85.86 MPa); the single root extensile rate was in order as *Carex duriuscula* subsp. *Stenophylloides* (32.37%) > *Artemisia scoparia* (17.01%) > *Stipa grandis* (13.60%) > *Artemisia sacrorum* (13.15%) > *Artemisia giraldii* (13.09%) > *Lespedeza cuneata* (6.98%). [Conclusion] The tensile mechanical properties of the single root of *Carex duriuscula* subsp. *Stenophylloides* are better than those of other plants. The results of this study can provide a certain scientific basis for the study of soil and water conservation in the loess area of northern Shaanxi.

Keywords: loess area; tensile strength; mechanical properties; tensile test; single root

黄土高原作为中华民族的重要发源地,在中国区域经济和社会发展中具有重要的地位。由于黄土高原特殊的地形和气候原因,水土流失成为制约黄土高原地区生态文明建设和社会经济可持续发展的主要环境问题^[1-4]。除表土流失外,坡体失稳坍塌是黄土高原水土流失的另一个主要形式,全国有近1/3的滑坡发生在黄土区^[5]。同时,随着经济的快速发展和基础设施的大规模建设,不可避免地会破坏原有地貌和植被,形成大量裸露边坡和人造边坡,这进一步增加了黄土高原地区坡体滑塌等灾害发生的风险^[6-7],因此提升黄土区坡体的稳定性对生态环境修复和基础设施建设具有重要的意义。

为了防止边坡发生失稳破坏,常用的护坡手段主要有两种,即工程防护和生物防护^[8]。其中工程防护措施虽然效果显著,但是使得边坡原有植被永远不能恢复,对生态造成永久性破坏^[9],而且随着时间的推移,工程材料老化,防护效果变差。相对于工程防护,生物防护是一种经济又环保的防护措施,植物茎叶可有效减轻雨水对边坡土体冲刷溅蚀,植物通过截留、蒸腾、渗透等水文、水力学作用可有效降低边坡土体孔隙水压力,从而有助于坡体稳定^[10];同时,植物通过“加筋”和“锚固”等根系力学作用与土壤结合形成根—土复合体来提高边坡坡体稳定性^[11-12]。尽管生物防护措施作为控制侵蚀和稳定边坡的一个有效手

段,在实践中也有广泛应用,但是缺少对生物防护较为系统和全面的科学认识。

坡体滑塌时,根—土复合体主要受重力分量的剪切力作用发生上下层间的剪切作用。当根—土复合体受到剪切作用力时,通过根—土界面摩擦力和黏聚力的共同作用将上层土体的剪应力转化为植物根系承受的拉应力,从而起到增强土体抗剪强度提升坡体稳定性的作用^[13-14]。有试验表明,不同植物根系类型^[15-16]和生长阶段^[17-18],根系的单根抗拉力学特性有较大变化,因而对根系固土护坡的影响效果不尽相同。单根抗拉力学特性是植物发挥抗剪增强作用的重要环节,可作为评价植物固土护坡作用的重要依据。植物单根抗拉力学特性常用单根抗拉力、单根抗拉强度和单根延伸率参数来描述^[10],3种力学性质在根系抗拉上具有相对独立性,又相互联系。单根抗拉力即为根系的最大抗拉力与根系直径相关,反映了根系抵抗外界拉伸作用的能力极限;单根抗拉强度即为根系径向单位截面积可承受的最大抗拉力,可以用来描述根系抵抗拉伸破坏的能力^[19];而单根延伸率反映了植物根系抵抗变形的能力^[17];根系的应力与应变关系结合弹性模量(单位延伸率下的抗拉强度)可以用来表征根系的弹塑性。作为固土护坡治理中的重要研究内容,植物单根抗拉力学特性在防治坡体失稳中的力学作用研究已引起广大学者的广泛关注,许

多学者开展了相关研究工作并取得了重要的研究成果。已有研究表明,单根抗拉力和单根抗拉强度与根径间关系密切,单根抗拉力随根径增大呈幂函数增大,单根抗拉强度随根径增大呈幂函数减小,且不同植物单根抗拉力和抗拉强度差异明显^[8,10,15-16,20-23]。尽管相关研究区域广泛、植物类型多样,为不同植物单根抗拉力学特性指标差异性评价和植物固土护坡提供了有力的数据支持,但是植物分布具有自然地理差异,因此有必要对特定区域广泛分布的常见乡土种进行单根抗拉力学特性等方面的固土性能测定,以筛选区域优异固土护坡植物。目前,国内外对植物根系力学特性的研究主要集中在植物单根力学特性指标与根径之间的关系上,对陕北黄土区常见乡土种单根抗拉力学特性指标差异性评价的研究较少。

因此,本研究选取截叶铁扫帚(*Lespedeza cuneata*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、大针茅(*Stipa grandis*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、茭蒿(*Artemisia giraldii*)和细叶藁草(*Carex duriuscula* subsp. *Stenophylloides*)6种陕北黄土区常见乡土种作为研究对象,通过单根拉伸试验,测定6种植物的单根抗拉力、单根抗拉强度和单根延伸率,分析其与根径之间的关系,比较其抗拉力学特性,以期为陕北黄土区大量的自然坡体和工程坡体固土护坡提供依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区高桥乡,该区海拔1000~1400 m,属于温带半湿润气候区向温带半干旱大陆性气候过渡区。研究区年平均气温7.7~10.6℃,年平均降水量为490.5~663.3 mm,且年内分布极为不均,区内60%~80%的降水主要集中在每年的6—8月份,且多以暴雨形式出现,年际变化大,年日照时数为2300~2570 h,全年无霜期157 d。区内地貌复杂多样,境内沟壑纵横、川道狭长、梁峁遍布,属典型黄土丘陵沟壑区,适宜于当地生长的优势草种有截叶铁扫帚、猪毛蒿、铁杆蒿、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、细叶藁草、大针茅、茭蒿等。

2 研究方法

2.1 根系采集

选择陕北黄土区常见乡土种截叶铁扫帚、猪毛蒿、铁杆蒿、大针茅、茭蒿和细叶藁草作为研究对象,对试验根系的采集于2021年7—8月间进行。根系采集采用人工挖掘的方法,首先将试验选定的植株周围的杂物去除,以减少非目标研究对象根系干扰,用铁锹小心地将根土复合体挖出,然后将根土复合体放

入自封袋中带回实验室。在实验室中将根系用清水洗净后,从中随机选取表面完好顺直且无其他分根系的单根,截取长度为8~10 cm的根段用于试验。为保证试验根系的新鲜将根系置于湿润自封袋中保存并于当天完成拉伸力学测定。由于过粗和过细的根在进行试验时难度较大并且根径小于1 mm的根系在缠绕固定土体、增强土体抗冲性作用相对显著^[24],因此在本试验中6种植物的根系直径均主要处于0.05~0.60 mm的范围内。

2.2 根系拉力测定

试验采用单根拉伸法,试验前用电子游标卡尺(精度0.01 mm)测量拟进行试验的单根直径,每个根段测量3个不同位置的直径,取其平均值为最终的单根直径;随后将单根夹持在上、下拉伸夹具之间,确保受拉长度统一为5 cm(根段保持自然顺直且不受力),而后匀速转动手轮使夹具以20 mm/min的加载速率向上移动,直至该单根被拉断为止。选取断裂破坏发生在根段中间位置或接近中间位置的情况作为有效试验数据。记录单根产生的最大形变和被拉断时所受的拉力即该根段所能承受的最大抗拉力。在试验中,为避免单根在受力时出现打滑或被夹具夹断的现象,在夹具两端粘贴软硅胶或纱布用于增加根系与夹具间的摩擦。本试验6种植物所测定的总根段数为1097个,成功355个,其中截叶铁扫帚61个,猪毛蒿69个,大针茅57个,铁杆蒿59个,茭蒿54个,细叶藁草55个。所用仪器为东莞市智取精密仪器有限公司生产的ZQ-21B型拉力试验机,拉力量程为0~200 N(精度0.5级,分度值0.001 N),测试行程为0~200 mm,位移标尺分度值0.01 mm。

根据试验得到的单根最大抗拉力,实测得到的根径和形变数据,可以计算出6种植物的单根抗拉强度和单根抗拉延伸率等单根抗拉力学特性数据。计算公式^[21]为:

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

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P 为根系抗拉强度(MPa); F 为最大抗拉力(N); D 为根段平均直径(mm); ϵ 为应变即单根延伸率(%); ΔL 为单根拉伸的伸长量(mm); L 为单根原始长度(mm),本研究中取值为50 mm。

2.3 数据处理与分析

影响根系抗拉力学特性的分类变量有植物种类,连续变量有根径大小。其中植物种类对最大抗拉力、抗拉强度和延伸率的影响采用单因素方差分析

(ANOVA)和多重比较(Tukey 法),连续变量根径大小对抗拉力学特性的影响使用幂函数拟合。差异显著性分析使用 SPSS 26.0 软件进行,拟合和绘图使用 Origin 9.8 进行。

3 结果与分析

3.1 单根抗拉力与根径的关系

在试验根径范围内,6种植物的单根抗拉力为 0.50~23.10 N,平均抗拉力为 6.70 N。通过单因素方差分析,可以发现不同植物种类的单根抗拉力之间存在显著差异($df=5, F=19.019, p<0.01$)(表 1)。6种植物平均单根抗拉力以细叶藁草最高(10.2 N),其次为大针茅(7.39 N)、铁杆蒿(6.87 N)、茭蒿(6.44 N)和猪毛蒿(6.34 N),而截叶铁扫帚最低(3.37 N)。在试验根径范围内,细叶藁草单根平均抗拉力最大,分别为大针茅、铁杆蒿、茭蒿、猪毛蒿和截叶铁扫帚的 1.38 倍、1.48 倍、1.58 倍、1.61 倍、3.03 倍。

对研究区 6 种植物单根抗拉力与根径之间的关系进行拟合分析,结果见图 1。由图 1 可知,6 种植物单根抗拉力随着根径增大而增大,且单根抗拉力与根径之间符合幂函数关系。截叶铁扫帚、猪毛蒿、大针茅、铁杆蒿、茭蒿和细叶藁草 6 种植物单根抗拉力与

根径之间的函数关系式分别是 $y=22.871x^{1.356}$ ($R^2=0.936$); $y=28.993x^{1.246}$ ($R^2=0.902$); $y=36.932x^{1.274}$ ($R^2=0.871$); $y=37.131x^{1.298}$ ($R^2=0.938$); $y=40.077x^{1.325}$ ($R^2=0.904$); $y=47.423x^{1.387}$ ($R^2=0.923$)。进一步研究可知,研究区 6 种植物的单根抗拉力随根径以幂函数方式增大,但递增幅度不同,细叶藁草单根抗拉力随根径增大的递增幅度最大,高于茭蒿、大针茅、铁杆蒿,其次是猪毛蒿,截叶铁扫帚递增幅度最小,其中茭蒿、大针茅和铁杆蒿的增幅比较接近,说明根径对细叶藁草单根抗拉力的影响较茭蒿、大针茅、铁杆蒿、猪毛蒿和截叶铁扫帚明显。

表 1 6 种植物单根抗拉力学特性试验结果

植物	平均单根抗拉力/N	平均单根抗拉强度/MPa	平均延伸率/%
截叶铁扫帚	3.37±2.36c	85.86±31.37c	6.98±2.58d
猪毛蒿	6.34±4.31b	115.07±54.97b	17.01±4.44b
大针茅	7.39±3.07b	132.95±47.69a	13.60±4.68c
铁杆蒿	6.87±4.31b	141.96±59.17a	13.15±2.81c
茭蒿	6.44±3.53b	148.44±47.59a	13.09±4.16c
细叶藁草	10.20±5.38a	132.68±47.18a	32.37±6.94a

注:表中数据为平均值±标准差;同一列不同小写字母表示 6 种植物平均单根抗拉力指标之间、平均单根抗拉强度指标之间及平均单根延伸率指标之间的差异显著性结果, $p<0.05$ 。

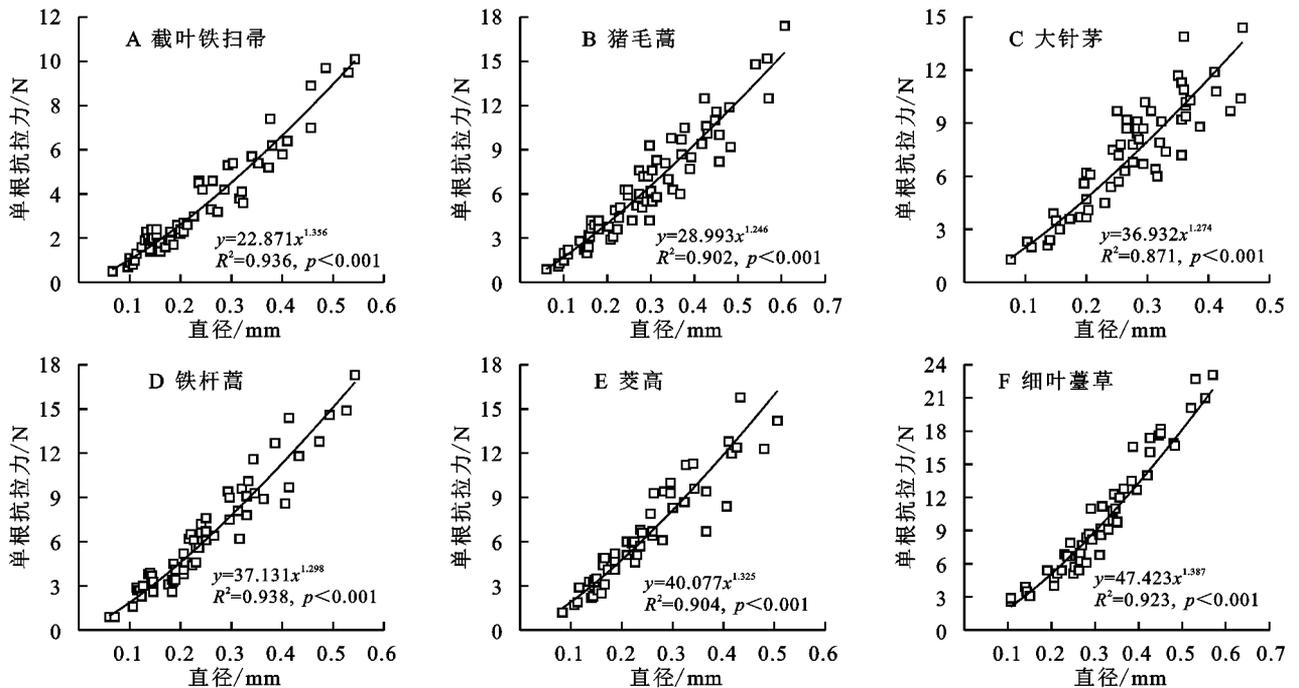


图 1 区内 6 种植物单根抗拉力与根径关系

3.2 单根抗拉强度与根径的关系

在试验根径范围内,6种植物的单根抗拉强度为 42.86~328.62 MPa,平均抗拉强度为 125.29 MPa。通过单因素方差分析,可以发现不同植物种类的单根抗拉强度之间存在显著差异($df=5, F=12.855, p<0.01$)(表 1)。6种植物平均抗拉强度以茭蒿最高(148.44

MPa),其次为铁杆蒿(141.96 MPa),大针茅(132.95 MPa),细叶藁草(132.68 MPa),猪毛蒿(115.07 MPa),而截叶铁扫帚最低(85.86 MPa)。在对植物单根抗拉强度进行随机取样测定条件下,茭蒿平均单根抗拉强度最大,分别为铁杆蒿、大针茅、细叶藁草、猪毛蒿和截叶铁扫帚的 1.05 倍、1.12 倍、1.12 倍、1.29 倍、1.73 倍。

图2所示为研究区6种植物单根抗拉强度与根径之间的关系曲线图。由图2可知,6种植物单根抗拉强度随着根径的增加而减小,通过拟合分析发现均服从幂函数分布规律,但不同植物根系的抗拉强度随根径增加而递减的程度不同。截叶铁扫帚、猪毛蒿、大针茅、铁杆蒿、茭蒿和细叶藁草6种植物单根抗拉强度与根径之间的函数关系式分别是 $y=29.119x^{-0.644}$ ($R^2=0.729$); $y=36.914x^{-0.753}$ ($R^2=0.845$); $y=47.023x^{-0.726}$ ($R^2=0.687$); $y=47.276x^{-0.702}$ ($R^2=0.802$); $y=50.819x^{-0.679}$ ($R^2=0.665$); $y=59.924x^{-0.619}$ ($R^2=0.771$)。进一步研究可知,6种植物的单根抗拉强度受根径影响较为显著。

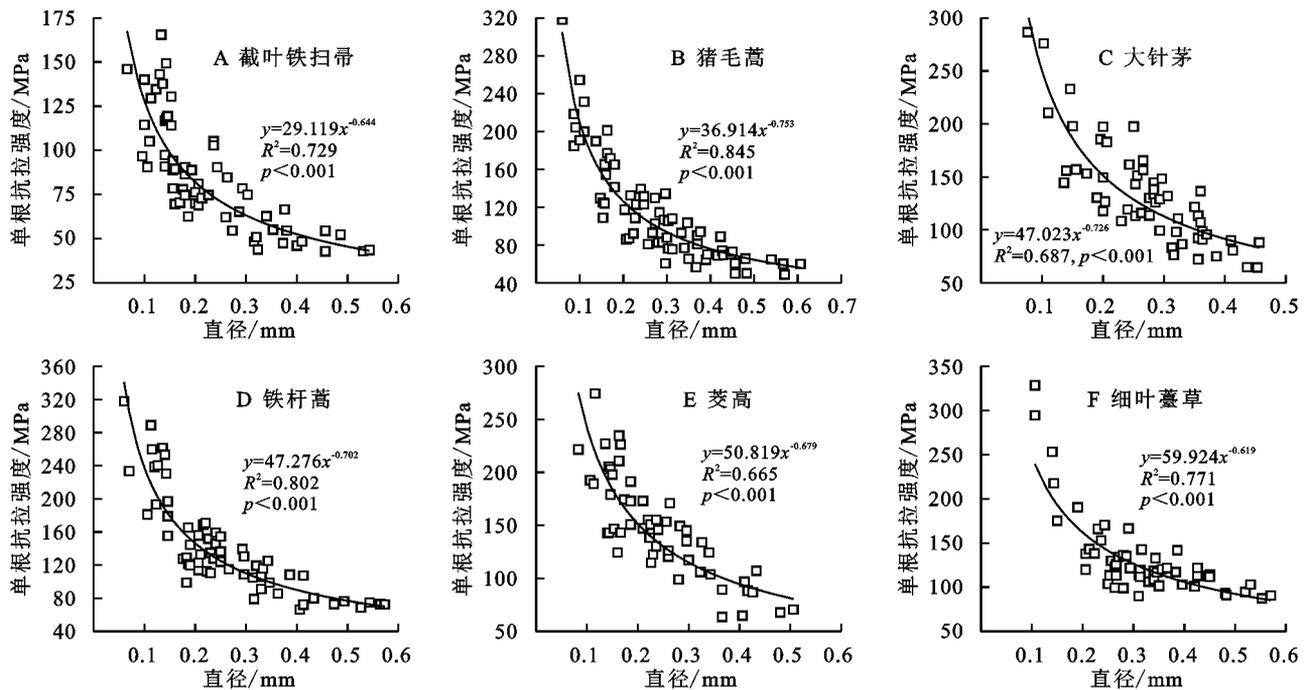


图2 区内6种植物单根抗拉强度与根径关系

3.3 单根延伸率与根径的关系

在试验根径范围内,6种植物的单根延伸率为4%~45.6%,平均延伸率为15.87%。通过单因素方差分析,可以发现不同植物种类的单根延伸率之间存在显著差异($df=5, F=212.191, p<0.01$)(表1)。6种植物平均单根延伸率以细叶藁草最大(32.37%),其次为猪毛蒿(17.01%),大针茅(13.60%),铁杆蒿(13.15%),茭蒿(13.09%),而截叶铁扫帚最小(6.98%)。在试验根径范围内,细叶藁草平均单根延伸率最大,其值分别为猪毛蒿、大针茅、铁杆蒿、茭蒿和截叶铁扫帚的1.90倍、2.38倍、2.46倍、2.47倍、4.64倍。

图3所示分别为研究区6种植物单根延伸率与根径之间的关系。由图3可知,截叶铁扫帚、猪毛蒿、大针茅、铁杆蒿、茭蒿和细叶藁草6种植物单根延伸率与根径之间未表现出较好的相关性,但仍表现出随着根径的增加而逐渐增大的变化规律,但递增幅度不同,该结果与刘亚斌^[22]、张玉^[25]等的研究结果一致。同时,当根

如图2F所示,细叶藁草的根径主要分布为0.2~0.4 mm,当根径小于0.2 mm时,单根抗拉强度随根径增加呈显著下降趋势,其单根抗拉强度为150~330 MPa,细叶藁草根径为0.1 mm时单根抗拉强度为249.23 MPa,是平均抗拉强度的1.88倍;当根径大于0.2 mm时,细叶藁草单根抗拉强度下降趋势减缓,且单根抗拉强度主要在150 MPa以下。同时,试验区其他5种植物的单根抗拉强度与根径的变化规律和细叶藁草相似。由此可知,根径相对较小的单根具有相对较大的单根抗拉强度,说明了根径相对较小的根具有相对较好的力学性能。

径小于0.2 mm时,研究区6种植物单根延伸率都有随根径增大而呈显著增大的趋势,当根径大于0.2 mm时,单根延伸率增加趋势减缓。此外,在任何根径下,细叶藁草的单根延伸率均大于截叶铁扫帚、猪毛蒿、大针茅、铁杆蒿和茭蒿,说明细叶藁草单根具有较好的延伸性,具有较强的抵抗土体变形的能力。

4 讨论

植物根系对加固土壤、提高坡体稳定性起着非常重要的作用,根系抗拉力学特性作为根系主要力学性质之一,其大小直接影响到根系的固土效果^[10]。因此,在相同的条件下,植物根系的抗拉力学性能越强,越有利于缓冲边坡土壤的剪应力,从而增加边坡的稳定性。本文分别对截叶铁扫帚、猪毛蒿、大针茅、铁杆蒿、茭蒿和细叶藁草6种常见乡土植物的单根抗拉力、单根抗拉强度和单根延伸率进行了测定,研究的6种乡土植物的根径级别主要处于0.05~0.60 mm的范围内。结

果表明在试验根径范围内细叶藁草的单根抵抗外部拉力作用的能力要优于大针茅、铁杆蒿、茭蒿、猪毛蒿和截叶铁扫帚,其单根平均抗拉力分别是其他 5 种植物的 1.38 倍、1.48 倍、1.58 倍、1.61 倍、3.03 倍;单根平均抗拉强度分别是其他 5 种植物的 0.99 倍、0.93

倍、0.89 倍、1.15 倍、1.55 倍;单根平均延伸率分别是其他 5 种植物的 2.38 倍、2.46 倍、2.47 倍、1.90 倍、4.64 倍。此外细叶藁草作为短根茎密丛性禾草,具有根系发达、分布密集的特征,因此可对研究区及其周边地区的边坡防护可以发挥出更大的贡献。

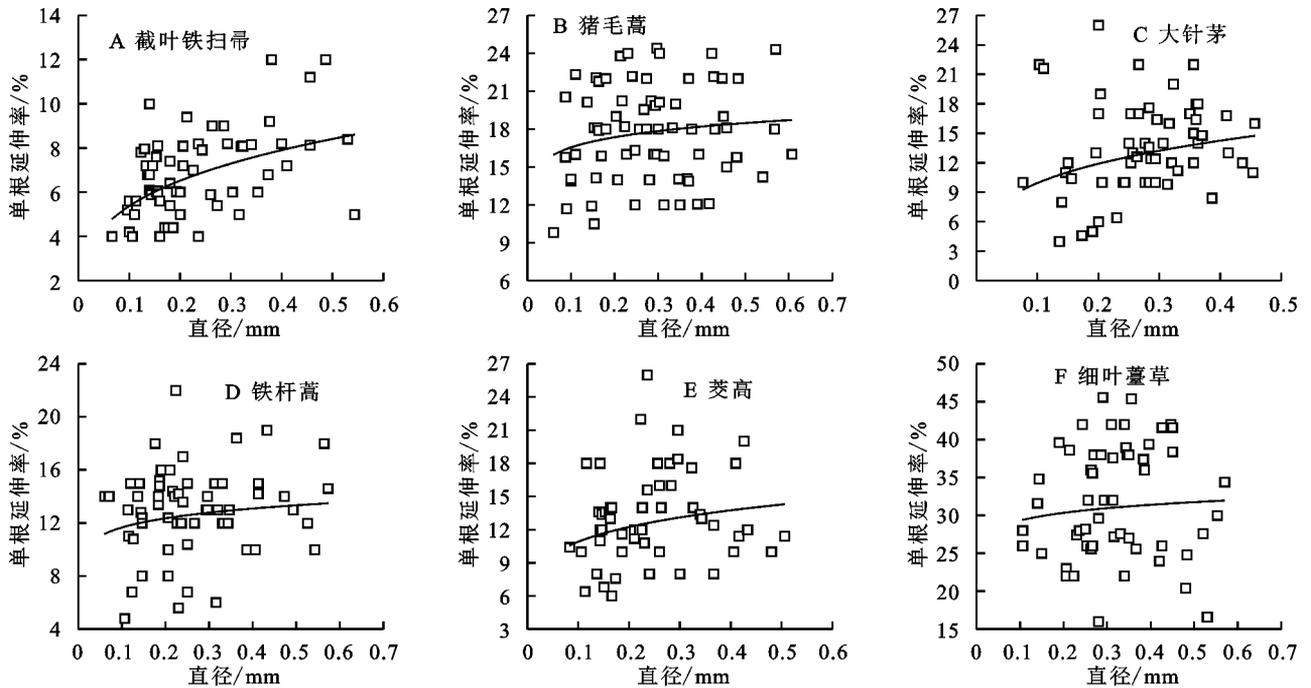


图 3 区内 6 种植物单根延伸率与根径关系

本研究通过对截叶铁扫帚、猪毛蒿、大针蒿、铁杆蒿、茭蒿和细叶藁草 6 种植物的拉伸试验发现植物单根抗拉力与根径之间呈幂函数正相关关系,植物单根抗拉强度与根径之间呈幂函数负相关关系,这与前人众多相关研究结论相一致^[10,19-22],说明根径是单根抗拉力和抗拉强度的重要影响因素,但是拟合函数的数值有所不同,这可能与植物种类、试验条件或者根系生长年龄期有关。很多研究表明植物单根抗拉力随着根径的增大而增大,单根抗拉强度随着根径的增大而减少^[20-23]。根系作为一种特殊的生物质材料,其拉伸力学性能总体上与径向材料构成在轴向上的材料力学表现有关。植物根系在径向上主要由皮层(含表皮层、韧皮层,形成层等)、芯部(初生、次生木质部、维管束,中柱或中柱鞘)和髓部组成,各部位木质素、纤维素、和水分含量各不相同,不同植物在不同生长时期各部位的组成也不尽相同,因此不同植物根系的力学性能表现各异。有研究表明^[21-23,26-27]:双子叶植物成熟根系有木质素含量较厚的芯部,具有较强的抗拉力学性能,而单子叶植物有纤维素含量较高的维管束和中柱鞘,具有较大的抗拉强度;植物根系随着生长年龄的增加,组织含水量下降,薄壁细胞吸收功能弱化,纤维化和木质化程度增加,根系的抗拉力学性能增加。从材料构成上,Hathaway 等^[28]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,而且与根系内部结构组分(纤维素、木质素和组织含水量)含量有关。韩立亮等^[29]对榆树(*Ulmus pumila*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和胡枝子(*Lespedeza bicolor*)的研究表明,这 4 种植物根系抗拉力随着纤维素的含量增大而增大,根系的纤维素含量与根径呈的正相关关系,因此 4 种植物根系抗拉力随着根径的增加而增加。赵丽兵等^[30]关于植物单根抗拉强度随根径的增加而减少这一特性的研究结果表明,紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和马唐(*Digitaria sanguinalis*)2 种草本植物根系纤维素含量随着根径增加而线性下降,而这 2 种植物的单根抗拉强度随着纤维素的增加而增大,因此这两种草本植物会出现单根抗拉强度随根径增加而减小的特性。上述研究结果对本项研究中 6 种陕北黄土区常见乡土种植物单根抗拉力随根径增加而增加、单根抗拉强度随着根径增加而降低的试验结果,具有一定程度的参考价值。

植物根系的单根延伸率同样受根系的生物质材料组成影响,但其随着根径增加而并不表现为单调增加或减少。理论上,植物组织含水量和纤维素含量对延伸率的影响表现都为单调降低,而木质素表现为单

调增加,三者共同作用的结果决定了根系延伸率的表现。但是,随着根径增加,组织含水量持续减少、纤维素和木质素含量变化使得根系延伸率随根径表现为单峰曲线,即根系延伸率随着根径的增加存在理论上的最大值。这或许可以解释单根延伸率在不同研究中的结果差异。本研究中,6种陕北黄土区常见乡土种植物单根延伸率与根径之间未呈现出显著的相关性,但单根延伸率均随根径增大呈现出增大的趋势,这与许多学者的研究不同^[27,31-32],而与刘亚斌等^[22]、张玉等^[25]的研究结果一致(单根延伸率与根径之间呈正相关关系)。从植物根系材料和根系微观结构方面研究可知,一方面前人^[27,31-32]研究中所用根系为根系粗大的乔灌木根系,而本研究所用根系为直径小于1 mm的细根,因而根系延伸率与根径间的相关性差异较大;另一方面,张玉等^[25]通过对华扁穗草(*Blasmus sinocompressus*)、线叶蒿草(*Kobresia capillifolia*)2种植物细根(<2 mm)微观结构的研究结果表明根系延伸率与纤维素含量呈正相关关系,而纤维素含量随根径增大而增多,因而会出现植物单根延伸率随根径增加而增大的趋势。本文中试验根系根径范围小于2 mm,因此随着根径的增加单根延伸率呈增大的变化趋势。

本研究对截叶铁扫帚、猪毛蒿、铁杆蒿、大针茅、芨芨草和细叶藎草6种陕北黄土区常见乡土种植物的单根抗拉力学特性进行了初步分析,结果表明细叶藎草单根抗拉力学特性优于其他几种植物。由于植物固土护坡效应与整株植物根系均有关,而本研究缺少上述6种乡土种植物根系分布形态的研究,所以有必要开展相关试验提取分析不同级别根—土界面的接触面积与接触角,结合植物根系单根抗拉力学特性分析计算根—土界面的黏聚力与静摩擦力,为进一步揭示陕北黄土区常见乡土种植物根系提高边坡稳定性的力学特性和固土护坡植物筛选提供理论依据。至于植物群落根系固土护坡能力可以从群落中所有植物的数量、大小占比以及根系水平垂直分布等方面结合根系单根抗拉力学特性进行推算,但是植物群落对于根系固土护坡有意义的是抗剪增强作用,而不是群落的抗拉拔作用,特别是对于灌木和草本植物,发生大风拉拔破坏的可能性非常小,但通过穿插、缠绕与土壤的相互作用,可以起到较强的抗剪增强作用。此外,根系的含水量、生长环境、生长年龄以及根系标距、拉伸速率等也是影响根系抗拉力学特性的重要因素,今后将对这些影响因素方面做进一步的研究。

5 结论

(1) 在试验根径范围内,6种植物的单根抗拉力随着根径的增加以幂函数形态增加,平均单根抗拉力从大到小依次为细叶藎草>大针茅>铁杆蒿>芨

蒿>猪毛蒿>截叶铁扫帚。

(2) 在试验根径范围内,6种植物的单根抗拉强度随着根径的增加以幂函数形态降低,平均单根抗拉强度从大到小依次为芨芨草>铁杆蒿>大针茅>细叶藎草>猪毛蒿>截叶铁扫帚。

(3) 在试验根径范围内,单根延伸率与根径之间未呈现出显著的相关性,但均随根径增大呈现出一定的增大趋势,6种植物的单根延伸率平均值从大到小依次为细叶藎草>猪毛蒿>大针茅>铁杆蒿>芨芨草>截叶铁扫帚。

因此,在本研究中细叶藎草根系的单根抗拉力学特性优于其他5种植物。本试验研究结果可为陕北黄土区的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] 山仑.从水土保持到水土资源高效利用[J].中国水利,2000(8):57.
- [2] 李永红,高照良.黄土高原地区水土流失的特点、危害及治理[J].生态经济,2011(8):148-153.
- [3] 穆兴民,徐学选,陈国良.黄土高原降雨量的地理地带性研究[J].水土保持通报,1992,12(4):27-32.
- [4] 彭建兵,王启耀,庄建琦,等.黄土高原滑坡灾害形成动力机制[J].地质力学学报,2020,26(5):714-730.
- [5] Zhou J X, Zhu C Y, Zheng J M, et al. Landslide disaster in the loess area of China[J]. Journal of Forestry Research, 2002,13(2):157-161.
- [6] 高德彬.公路黄土路堑高边坡稳定性研究[D].西安:长安大学,2008.
- [7] 梁亚红.黄土山区公路滑坡稳定性分析与防治研究[J].建材与装饰,2020(12):238-239.
- [8] 潘天辉,杜峰,王月.陕北黄土区护坡植物根系分布和抗剪增强分析[J].水土保持研究,2020,27(3):357-363,371.
- [9] 周跃.植被与侵蚀控制:坡面生态工程基本原理探索[J].应用生态学报,2000,11(2):297-300.
- [10] 苏雪萌,刘俊娥,周正朝,等.黄土丘陵区不同植物根系抗拉力学特性[J].水土保持研究,2019,26(3):259-264.
- [11] 张兴玲,胡夏嵩,毛小青,等.植物根系固土护坡力学机理研究现状与进展[J].人民黄河,2009,31(6):88-90,92.
- [12] 余芹芹,乔娜,胡夏嵩,等.植物根-土复合体固坡力学效应及模型研究现状与进展[J].中国水土保持,2011(7):51-54,69.
- [13] 曹波,曹志东,王黎明,等.植物根系固土作用研究进展[J].水土保持应用技术,2009(1):26-28.
- [14] 郑力文,刘小光,余新晓,等.油松根系直径对根—土界面摩擦性能的影响[J].北京林业大学学报,2014,36(3):90-94.
- [15] 刘子壮,高照良,杜峰,等.黄土高原高速公路护坡植物根系分布及力学特性研究[J].水土保持学报,2014,28(4):66-71.
- [16] 栗岳洲,付江涛,余冬梅,等.寒旱环境盐生植物根系固

- 土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1370-1383.
- [17] 童冉,陈庆标,周本智,等.毛竹和雷竹地下系统结构与生物力学性质[J].生态学报,2020,40(7):2242-2251.
- [18] 刘艳琦.5种植物两个生长期根系生物力学特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [19] 李宁,陈丽华,杨苑君,油松、华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J].北京林业大学学报,2015,37(12):77-84.
- [20] 杨路,杜峰,秦晶晶,等.黄土区3种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究[J].水土保持研究,2022,29(1):295-300,310.
- [21] 徐文秀,杨玲,鲍玉海,等.大型水库消落带2种典型耐淹草本植物单根抗拉力学特性[J].水土保持研究,2020,27(5):259-264,272.
- [22] 刘亚斌,李淑霞,余冬梅,等.西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J].农业工程学报,2018,34(15):157-166.
- [23] 王月,杜峰,周敏,等.陕北林草混交根土复合体抗剪强度研究[J].水土保持研究,2018,25(2):213-219.
- [24] 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.
- [25] 张玉,朱海丽,张珂,等.3种滨河植物单根抗拉特性与其微观结构关系[J].干旱区研究,2022,39(2):572-583.
- [26] 张乔艳,唐丽霞,廖华刚,等.多花木蓝根截面微观结构对其抗拉特性的影响[J].植物生态学报,2019,43(8):709-717.
- [27] 张乔艳,唐丽霞,潘露,等.基于根系化学组成的抗拉力学特性分析[J].南京林业大学学报:自然科学版,2020,44(1):186-192.
- [28] Hathaway R L, Penny D. Root strength in some *Populus* and *Salix* Clones[J]. New Zealand Journal of Botany, 1975,13:333-344.
- [29] 韩立亮,宋桂龙.护坡木本植物根系的力学特性及其与细胞壁成分的关系[J].北京林业大学学报,2015,37(11):120-127.
- [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(9):7-12.
- [31] 李长暄.林木单根力学性能及其影响因素研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [32] 张超波.林木根系固土护坡力学基础研究[D].北京:北京林业大学,2011.

(上接第114页)

- [16] 刘爽,王雅,刘海龙,等.晋西北不同土地恢复管理措施下土壤物理性状分析[J].植物营养与肥料学报,2019,25(2):235-244.
- [17] 邓继峰,丁国栋,李景浩,等.基于3种不同土壤粒径分级制度的毛乌素沙地樟子松林地土壤体积分形维数差异研究[J].西北林学院学报,2017,32(3):35-40.
- [18] 祝忆伟,张志铭,赵勇,等.不同林龄栓皮栎林下土壤颗粒分形及养分特征研究[J].河南农业大学学报,2017,51(5):634-639.
- [19] 甘凤玲,王涛,何丙辉,等.汶川震区不同植被下土壤组成及其分型特征[J].水土保持研究,2018,25(1):84-91.
- [20] 王卫华,龙小军.土壤粒径分布单重分形与孔隙单重分形[J].中国土壤与肥料,2018(4):55-59.
- [21] 罗雅曦,刘任涛,张静,等.腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):525-535.
- [22] 房莉,余健,方凤满,等.高潜水位矿区不同土地利用方式下复垦土壤颗粒与分形特征[J].金属矿山,2019(3):182-188.

(上接第121页)

- [30] 郭少壮,白红英,孟清,等.1980—2015年秦岭地区景观格局变化及其对人为干扰的响应[J].应用生态学报,2018,29(12):4080-4088.
- [31] 车娜.吸取秦岭“大教训”,划好守牢生态红线[N].中国自然资源报,2020-4-28(2).
- [32] 陈子娟,周廷刚,李洪忠,等.粤港澳大湾区湿地生态风险[J].水生态学杂志,2021,42(5):40-51.
- [33] 吴金鸿,杨涵,杨方社,等.额尔齐斯河流域湿地生态系统健康评价[J].干旱区资源与环境,2014,28(6):149-154.
- [34] 王鹏,赵微,柯新利.基于SRP模型的潜江市生态脆弱性评价及时空演变[J].水土保持研究,2021,28(5):347-354.
- [35] 甄江红,银山,刘果厚,等.草原文化遗址区景观格局变化及其生态风险评估:以元上都为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(12):159-165.