

模拟岩质边坡条件下 11 种护坡植物单根抗拉特性研究

杨爽¹, 陈济丁², 孔亚平², 陶双成², 伍红燕¹, 李金波¹, 宋桂龙^{1,3*}

(1. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083; 2. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 3. 国家林业草原运动场与护坡草坪工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要:【目的】筛选岩质坡面条件下具备优良单根抗拉性能的植物, 为植被修复中植物种类选择及配置提供基础力学数据。【方法】模拟 45° 岩质边坡条件, 以 11 种常用护坡植物(沙打旺、紫花苜蓿、胡枝子、马棘、紫穗槐、柠条、荆条、盐肤木、欧李、黄刺玫、酸枣)为研究对象, 通过拉拔试验结合单因素方差分析探究 11 种护坡植物单根抗拉特性种间差异, 通过回归分析得出植物根系抗拉特性指标与根径的相关关系。【结果】1) 11 种植物单根平均抗拉力表现为: 荆条 > 酸枣 > 柠条 > 马棘 > 紫花苜蓿 > 紫穗槐 > 黄刺玫 > 胡枝子 > 欧李 > 沙打旺 > 盐肤木; 单根平均抗拉强度表现为: 荆条 > 柠条 > 马棘 > 紫穗槐 > 黄刺玫 > 紫花苜蓿 > 酸枣 > 欧李 > 沙打旺 > 胡枝子 > 盐肤木; 单根平均极限延伸率表现为: 紫穗槐 > 欧李 > 柠条 > 马棘 > 荆条 > 紫花苜蓿 > 酸枣 > 沙打旺 > 胡枝子 > 黄刺玫 > 盐肤木。4 个径级的比较中, 柠条在径级 I 和 II 与荆条在径级 III 和 IV 的单根抗拉力、抗拉强度与极限延伸率表现均较高, 盐肤木单根抗拉力、抗拉强度与极限延伸率均较小。2) 11 种植物单根抗拉力与根径均呈正相关的幂函数关系; 抗拉强度方面, 胡枝子与盐肤木根系抗拉强度与根径呈负相关的指数函数关系, 除荆条与酸枣无显著相关关系, 其余植物表现为负相关的幂函数关系; 极限延伸率方面: 欧李、荆条与酸枣拟合曲线为负相关的幂函数, 黄刺玫、柠条与紫花苜蓿呈正相关指数函数关系, 其余 5 种植物无明显的函数关系。【结论】在岩质坡面的立地条件下, 综合具备高单根抗拉力、抗拉强度与极限延伸率的荆条与柠条为护坡最优选择植物。

关键词: 护坡植物; 单根抗拉力; 抗拉强度; 根系延伸率; 模拟边坡

中图分类号: S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2025)01-0136-11

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2025.01.016



植被恢复是裸露坡面生态修复最主要的技术方式^[1-2]。植物主要通过地上部分与根系起到稳定边坡的作用^[3]。植被地上部茎叶可以有效减缓雨滴对坡面的冲刷, 降低雨水侵蚀, 其根系改善坡面土壤物理结构的同时, 通过吸收土壤水分减小坡体土壤孔隙水压, 并通过深入土体中的轴根与须根起到锚固和加筋

作用, 提高坡体稳定性^[4-6], 由此可见根系的护坡作用较为显著。

在植物护坡效果的研究中, 植物单根常作为固土的基本功能单元, 是开展相关研究的出发点。在植物根系与土壤颗粒交错缠绕形成的根—土复合体中, 根系通过施加静态和动态应力, 有效改变复合体的黏聚力与内摩擦角, 从而显著提升其抗剪强度, 实现固土护坡的目的^[7-8]。其力学原理在于, 当根—土复合体受到剪切力发生相对滑动时, 土体所受的剪应力通过摩擦转变为根系的拉应力^[9], 根系所受拉应力大于植物根系最大抗拉力时, 根系会发生形变最终断裂, 根—土复合体遭到破坏^[10-11]。该过程与其单根抗拉

收稿日期: 2024-02-29; **修回日期:** 2024-04-29

基金资助: 国家重点研发计划(2021YFB2600100)

作者简介: 杨爽(1998-), 女, 内蒙古通辽人, 硕士生研究生。E-mail: Visper_ys@163.com

*通信作者, 研究方向为草坪科学与技术、植被恢复理论与技术。E-mail: syihan@163.com

特性密切相关,植物的单根抗拉力与抗拉强度大小可直接反映根系材料受力潜能^[12],极限延伸率较大的植物根系可以增大与土体的接触面积,从而充分发挥根系与土体的协同作用,提升土体强度^[13-14]。因此,单根抗拉力、单根抗拉强度与单根极限延伸率是量化植物根系加固能力的关键指标^[15-16],常作为评价植物固坡效果和抗侵蚀作用的有效指标。单根抗拉特性的主要影响因素集中在植物种类、根径与根系生长期等^[17-19]。针对植物种类对根系抗拉特性影响的研究表明,不同植物种类的根系力学特性存在差异^[20-22]。刘昌义等^[23]研究表明,相同生长条件下柠条较霸王与白刺表现出较高的抗拉强度。王程等^[24]对比了 6 种植物根系抗拉特性,发现矮蒿与高山嵩草平均单根抗拉力较大。魏艳等^[25]发现在 0~2.0 mm 根径范围中紫花苜蓿根系极限延伸率与拉巴豆无显著性差异。有关根系抗拉特性与根径相关关系的研究中,学者普遍认为根系抗拉力和抗拉强度与根径呈幂函数关系^[26-28],极限延伸率与根径呈指数或幂函数关系,但也有部分研究认为,植物根系抗拉力与抗拉强度和根径的相关关系呈现不同的函数关系^[29]。研究显示,植物单根抗拉特性的种间差异是立地条件与植物自身对环境的适应性导致的,坡度等地形因素是影响植物根系形态结构及根系力学性质的重要因素^[30-33]。因此,岩质坡面特定立地条件下护坡植物单根力学抗拉特性的研究十分必要。

现有研究大多为基于水平立地条件下不同植物间单根力学抗拉特性的对比,针对岩质坡面的特定立

地条件,对植物单根抗拉特性种间差异的相关研究较少。笔者以通过资料查询和调研优选出的 11 种常用护坡植物为研究对象,模拟 45°岩质边坡的生长环境,探究 11 种植物单根抗拉特性的种间差异,筛选出岩质坡面上具备优良单根抗拉性能的植物。同时通过探讨植物根径与根系抗拉力、抗拉强度以及根系延伸率的相关性,充分了解 11 种护坡植物的单根抗拉特性随根径增大变化特征,为护坡植物的科学筛选与配置提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于北京市门头沟区军庄镇,地理坐标为 39°59′27.79" N, 116°05′3.74" E,属于中纬度大陆性季风气候。研究区域年平均气温为 11.7℃,年平均日照 2 373.9 h,年均降水量为 528.7 mm,且主要集中在 7—9 月,年蒸发量 1 632 mm,年平均风速 1.8 m/s。

1.2 供试材料

根据文献查阅及前期调研,优选出 11 种抗逆性及适应性较强的常用护坡植物(表 1)。其中紫花苜蓿来自克劳沃生态科技有限公司,其余植物种子均来自北京千年大地草业生态科技开发有限公司。采用湿法客土喷播技术进行建植,采用京礼高速公路边坡填方用土,其余材料配比为:草炭添加量为 30%(v/v),高吸水性树脂(Super absorbent polymer, SAP) 270 g/m³,聚丙烯酰胺(Polyacrylamide, PAM) 270 g/m³,缓释复合肥 200 g/m³,均匀混合,喷播厚度为 10 cm。

表 1 供试植物
Table 1 Test plants

名称	科	植物种	生活型
沙打旺(SDW)	豆科	<i>Astragalus adsurgens</i>	草本
紫花苜蓿(MX)	豆科	<i>Medicago sativa</i>	
胡枝子(HZZ)	豆科	<i>Lespedeza bicolor</i>	
马棘(MJ)	豆科	<i>Indigofera pseudotinctoria</i>	
紫穗槐(ZSH)	豆科	<i>Amorpha fruticosa</i>	
柠条(NT)	豆科	<i>Caragana korshinskii</i>	灌木
荆条(JT)	马鞭草科	<i>Vitex negundo</i>	
盐肤木(YFM)	漆树科	<i>Rhus chinensis</i>	
欧李(OL)	蔷薇科	<i>Cerasus humilis</i>	
黄刺玫(HCM)	蔷薇科	<i>Rosa xanthina</i>	
酸枣(SZ)	鼠李科	<i>Ziziphus jujuba</i>	

1.3 试验设计

试验模拟45°岩质边坡,通过客土喷播技术建立生长基质。设置2.0 m×1.0 m×0.2 m规格的种植槽11个,槽内底层铺设不规则青石板模拟岩质坡面,将种植槽倾斜至45°。每个种植槽内采用隔板平均分为6个小区。于4月9日进行播种,除欧李选用10 cm左右高的扦插苗进行栽植外,其余植物均采用种子播种育苗,播后采用混合基质进行覆盖并铺设无纺布。采用微喷技术进行浇水,浇水频率从出苗期间每天2次,降至1个月后每周2次,每次按实际情况浇水5~10 min。期间进行间苗,最终每个小区保留1株标准一致的植株,每个种植槽保留6个植株作标准株。

1.4 指标测定与计算

根系取样于11月进行,调查前2 h浇水浸湿模拟

边坡方便挖掘。利用铲子、刷子等工具挖掘取样,将根系装入泡沫箱带回实验室进行根径的测量与单根拉拔试验。选取长度10 cm左右且粗细均匀的根段,采用游标卡尺测定3个等分点,取平均值作为根段直径(D)。单根拉伸试验采用欧阳前超等^[34]的方法,利用WDW-100E微机控制电子式万能试验机(济南试金集团),对11种植物的799个根段进行拉伸,拉伸标距设定为5 mm,拉伸速度为10 mm/min。为防止根系被夹具破坏而影响试验结果,在根系两端缠绕2 cm医用胶带。为确保根系的断裂是由于拉应力造成的,本试验认定在夹具中间或接近中间处断裂根系为有效根样,取根系破坏时的拉应力为单根抗拉力,成功根系样本数与成功率见表2。

表2 11种植物测定根样数及成功率

Table 2 Root sample numbers and success rates of 11 plants

植物名称	OL	HZZ	YFM	MJ	ZSH	HCM	JT	SZ	NT	SDW	MX
试验根数/个	71	79	96	68	92	63	45	45	49	88	103
有效根数/个	33	38	42	33	41	32	26	31	27	31	47
成功率/%	46.5	48.1	43.8	48.5	44.6	50.8	57.8	68.9	55.1	35.2	45.6

根系力学参数的计算方法为:

单根抗拉强度T采用下列公式计算:

$$T = \frac{4F}{\pi D^2}$$

式中:T为单根抗拉强度(MPa);F为单根断裂时的抗拉力(N);D为单根根径(mm)。

根系极限延伸率ε采用下列公式计算:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

式中:ε为单根极限延伸率(%);L₀为根系原长(mm);ΔL为单根极限根长增长量(mm)。

在对11种植物根系力学特征差异分析中,根据左志严等^[35]根径为0~3 mm的细根为植物发挥固土及抗蚀功能的主体的结论,本研究为保持一致,结合拉伸结果,取11种植物共有根径范围0~2.30 mm,按直径大小以0.6 mm为一级划分为4个径级:径级Ⅰ(0<D≤0.60 mm)、径级Ⅱ(0.60<D≤1.20 mm)、径级Ⅲ(1.20<D≤1.80 mm)和径级Ⅳ(1.80<D≤2.30 mm),在4个径级中分别进行比较。

1.5 数据处理

数据采用Excel 2019录入,采用SPSS 26.0软件对数据统计分析,对不同植物相同径级根系力学特征进行单因素方差分析,对同种植物进行根径与力学特征进行单因素方差分析与回归分析。采用Origin 2021绘图。

2 结果与分析

2.1 11种护坡植物单根抗拉力

11种植物0~2.30 mm根样的单根平均抗拉力由大到小为:荆条>酸枣>柠条>马棘>紫花苜蓿>紫穗槐>黄刺玫>胡枝子>欧李>沙打旺>盐肤木(表3)。由单根抗拉力范围可知,荆条最大值(167.08 N)为盐肤木最大值(10.23 N)的16倍。4个径级比较发现,径级Ⅰ(图1-A)中11种植物单根抗拉力差距较小,在径级Ⅱ(图1-B)、Ⅲ(图1-C)和Ⅳ(图1-D)中逐渐拉开差距。其中,柠条在径级Ⅰ、Ⅱ中单根抗拉力最大,在径级Ⅱ中与荆条显著大于其他植物(P<0.05)。在径级Ⅲ和Ⅳ中荆条单根抗拉力为最大,且显著大于其他植物(P<0.05)。盐肤木单根抗拉力在

各个径级的比较中均为最小,盐肤木、胡枝子与沙打旺在径级Ⅲ与Ⅳ中显著弱于除欧李外的其他植物

($P<0.05$)。马棘、黄刺玫、酸枣与紫花苜蓿在各个径级的单根抗拉均差异不显著。

表 3 11 种护坡植物单根抗拉力范围与平均抗拉力

Table 3 Single root tensile force range and average tensile force of 11 slopeprotection plantsroot

植物名称	根径范围/mm	抗拉力范围/N	平均抗拉力/N
OL	0.46~2.13	4.00~48.07	15.83
HZZ	0.54~2.26	5.00~33.21	17.59
YFM	0.42~2.30	2.00~10.23	5.90
MJ	0.41~2.28	5.00~122.91	30.89
ZSH	0.31~2.22	4.00~80.67	25.31
HCM	0.37~2.26	4.00~71.19	22.21
JT	0.39~2.30	5.00~167.08	71.28
SZ	0.40~2.23	4.00~104.00	35.61
NT	0.35~2.30	5.00~98.65	33.68
SDW	0.53~2.20	6.00~23.88	14.79
MX	0.44~2.10	4.00~70.81	28.96

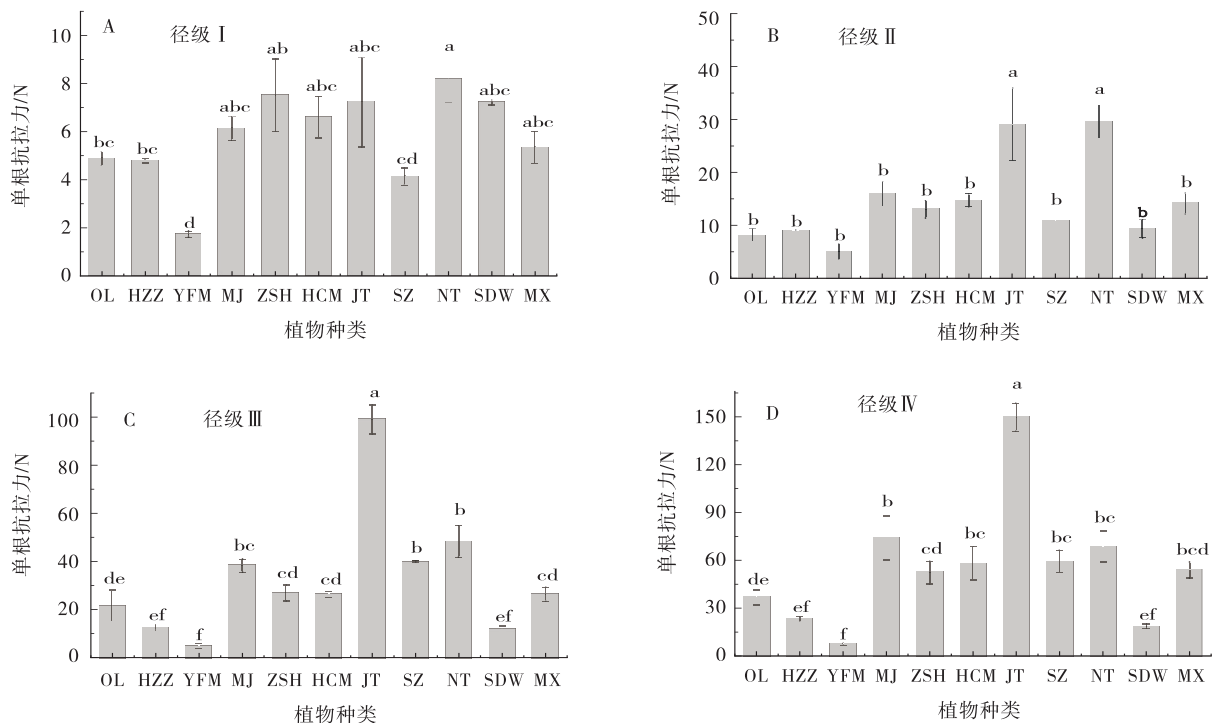


图 1 11 种护坡植物不同径级根系的单根抗拉力

Fig. 1 Single root tensile force in each diameter class of 11 slopeprotectionplantsroot

注:不同字母表示同一径级不同植物间单根抗拉力差异显著($P<0.05$)。

2.2 11 种护坡植物单根抗拉强度差异特征

11 种植物 0~2.30 mm 根样平均抗拉强度从大到小依次为:荆条>柠条>马棘>紫穗槐>黄刺玫>紫花苜蓿>酸枣>欧李>沙打旺>胡枝子>盐肤木,荆条的平均抗拉强度为最小的盐肤木的 10 倍(表 4)。荆条径级Ⅲ和Ⅳ根系抗拉强度最高,且显著高于其他 10 种植物($P<0.05$),柠条在径级Ⅰ和Ⅱ中的抗拉强度分别与紫穗槐和荆条显著高于其他 9 种植物

($P<0.05$)。盐肤木在 4 个径级中抗拉强度均为最低,在径级Ⅳ中显著低于其他 10 种植物($P<0.05$),马棘、黄刺玫、酸枣与紫花苜蓿在各个径级的抗拉强度均不存在显著性差异($P>0.05$)(图 2)。

2.3 11 种护坡植物极限延伸率差异特征

11 种植物 0~2.30 mm 根样平均极限延伸率由大到小表现为:紫穗槐>欧李>柠条>马棘>荆条>紫花苜蓿>酸枣>沙打旺>胡枝子>黄刺玫>盐肤木,

表 4 11 种护坡植物根系抗拉强度范围与平均抗拉强度

Table 4 Root tensile strength range and average tensile strength of 11 slopeprotectionplantsroot

植物名称	根径范围/mm	抗拉强度范围/Mpa	平均抗拉强度/Mpa
OL	0.46~2.13	7.14~26.49	17.48
HZZ	0.54~2.26	6.19~21.36	9.77
YFM	0.42~2.30	0.94~15.88	4.95
MJ	0.41~2.28	11.98~37.28	26.09
ZSH	0.31~2.22	6.37~60.20	25.57
HCM	0.37~2.26	8.59~37.22	25.49
JT	0.39~2.30	25.25~75.24	49.50
SZ	0.40~2.23	11.24~32.66	20.00
NT	0.35~2.30	16.75~74.87	44.36
SDW	0.53~2.20	4.00~32.65	10.56
MX	0.44~2.10	9.31~34.05	21.04

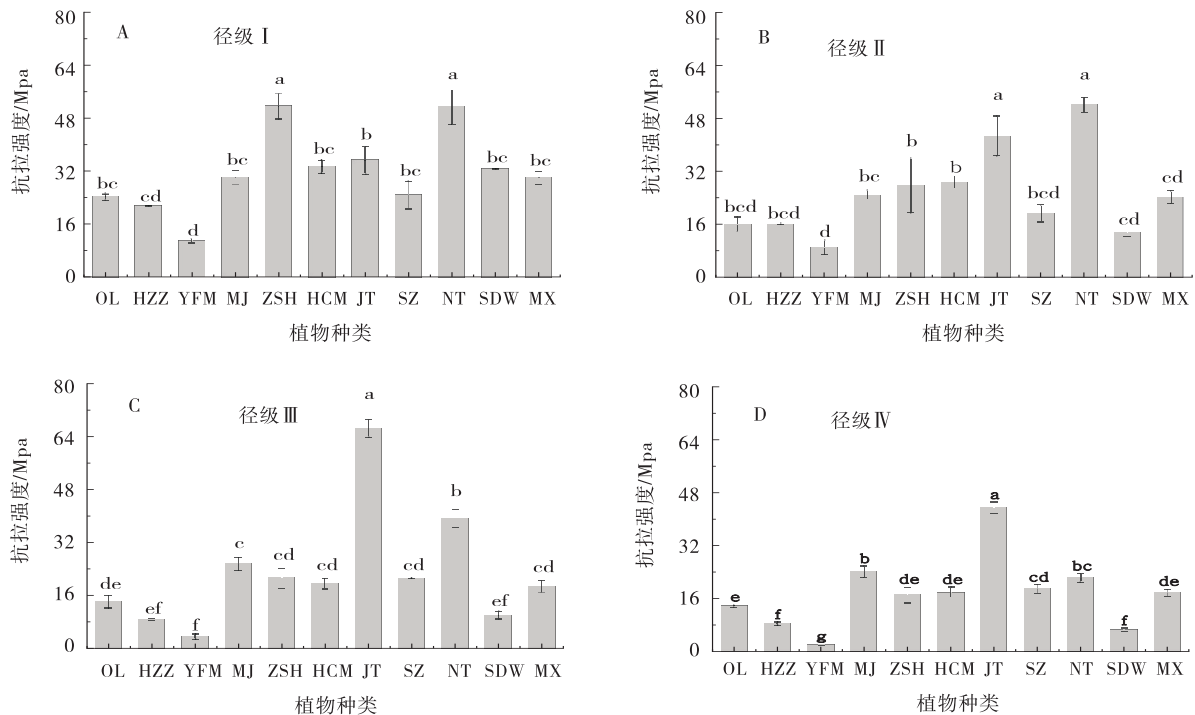


图 2 11 种护坡植物不同径级根系的抗拉强度

Fig. 2 Tensile strength in each diameter class of 11 slopeprotectionplantsroot

注:不同字母表示同一径级不同植物间抗拉强度差异显著($P<0.05$)。

平均极限延伸率最大的紫穗槐为盐肤木的 10 倍(表 5)。径级 I (图 3-A)中欧李的极限延伸率最大且显著大于其他 10 种植物($P<0.05$)。径级 II (图 3-B)中欧李与柠条的极限延伸率显著大于其他 9 种植物($P<0.05$)。径级 III (图 3-C)中柠条的极限延伸率最大且显著大于其他 10 种植物($P<0.05$)。而径级 IV (图 3-D)中荆条、柠条与紫花苜蓿的极限延伸率显著大于其他 8 种植物($P<0.05$),即荆条、柠条与紫花苜蓿在 1.80~2.30 mm 直径的根系具有更好的延伸性。胡枝子、盐肤木与沙打旺在径级 III 与 IV 的根系极限延伸率

较低,延伸性较差。

2.4 11 种护坡植物根系抗拉特征与根径回归关系

11 种植物单根抗拉力与根径间均呈正相关的幂函数关系,拟合优度除盐肤木外均在 0.9 以上,呈显著的拟合效果,且均在 $\alpha=0.01$ 的水平(双侧)上显著相关(图 4)。单根抗拉力与根径之间的关系可以反映断裂力学中的尺度效应,11 种植物单根抗拉力均随直径的增大而增大,但在有效根径段内分布于增大幅度具有一定差异,随根径与单根抗拉力回归曲线,增幅最小为盐肤木(图 4-A),增幅最大为荆条(图 4-B)。

表 5 11 种护坡植物根系极限延伸率范围与平均极限延伸率

Table 5 Ultimate elongation range and average ultimate elongation of 11 slopeprotection plantsroot

植物名称	根径范围/mm	极限延伸率范围/%	平均极限延伸率/%
OL	0.46~2.13	3.63~19.53	13.72
HZZ	0.54~2.26	0.25~9.08	4.35
YFM	0.42~2.30	1.48~6.36	3.20
MJ	0.41~2.28	6.53~14.56	10.79
ZSH	0.31~2.22	4.04~15.83	30.24
HCM	0.37~2.26	0.94~7.98	3.89
JT	0.39~2.30	1.20~18.99	9.09
SZ	0.40~2.23	3.88~14.30	8.63
NT	0.35~2.30	2.50~24.44	12.22
SDW	0.53~2.20	3.29~8.86	5.18
MX	0.44~2.10	2.39~20.41	9.01

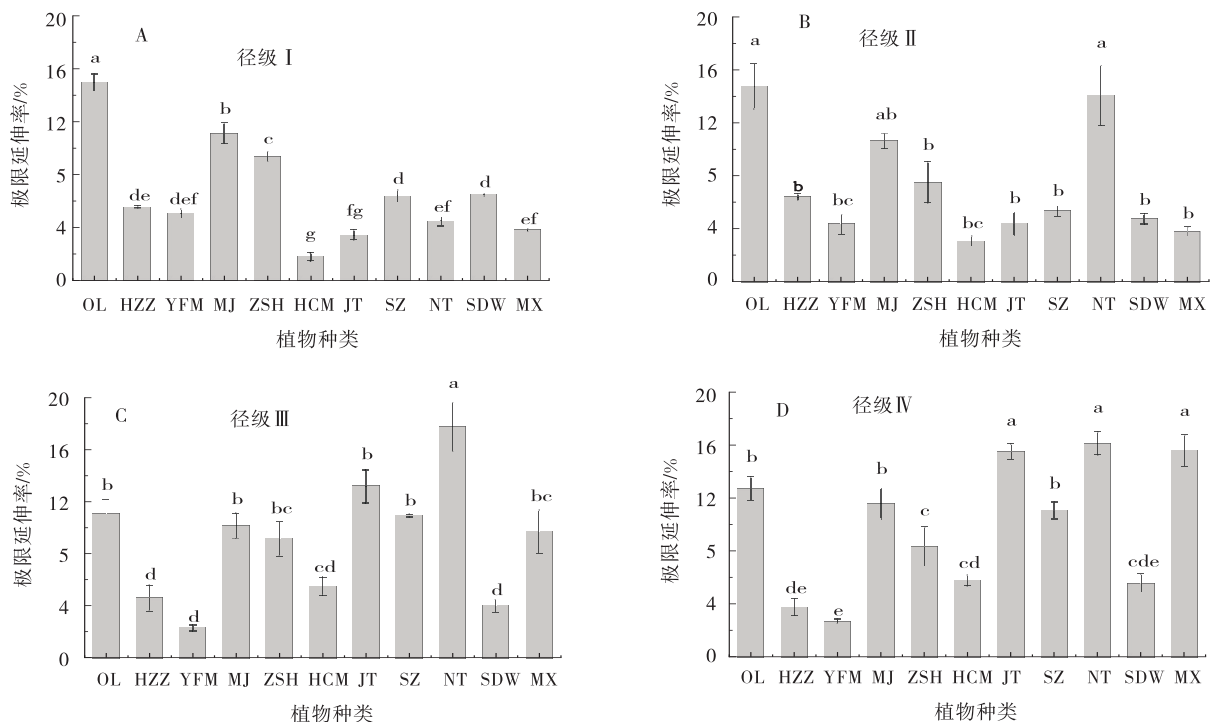


图 3 11 种护坡植物不同径级的极限延伸率

Fig. 3 Ultimate elongation in each diameter class of 11 slopeprotection plantsroot

注:不同字母表示同一径级不同植物间极限延伸率差异显著($P<0.05$)。

11 种植物的根系抗拉强度随根径的增大呈不断减小且降幅逐渐平缓的趋势,但 11 种植物抗拉强度与根径的拟合函数不相同,受植物种类影响较大(图 5)。其中胡枝子与盐肤木根系抗拉强度与根径呈指数函数关系表现出极显著相关性($P<0.01$)(图 5-A)。荆条与酸枣根系抗拉强度与根径间不具有明显相关关系(图 5-B)。其余植物的根系抗拉强度与根径的相关关系表现为负相关的幂函数(函数表达式为 $y=ar^{-b}$),拟合程度较好($R^2>0.5$),且抗拉强度大植物的幂函

数拟合方程满足 a 值较大而 b 值较小的规律。

根系极限延伸率与根径的回归关系中,欧李(图 5-A)、荆条(图 5-B)与酸枣拟合曲线为幂函数,拟合效果良好($R^2>0.5$)且呈显著性相关($P<0.01$),其中欧李根系极限延伸率随根径的增大而减小,荆条与酸枣根系极限延伸率随根径的增大而增大。黄刺玫、柠条与紫花苜蓿根系极限延伸率随根径的增大而变大,其回归关系均呈正相关指数函数分布,相关系数均大于 0.5,且具有显著相关性($P<0.01$)。胡枝子、盐肤木、

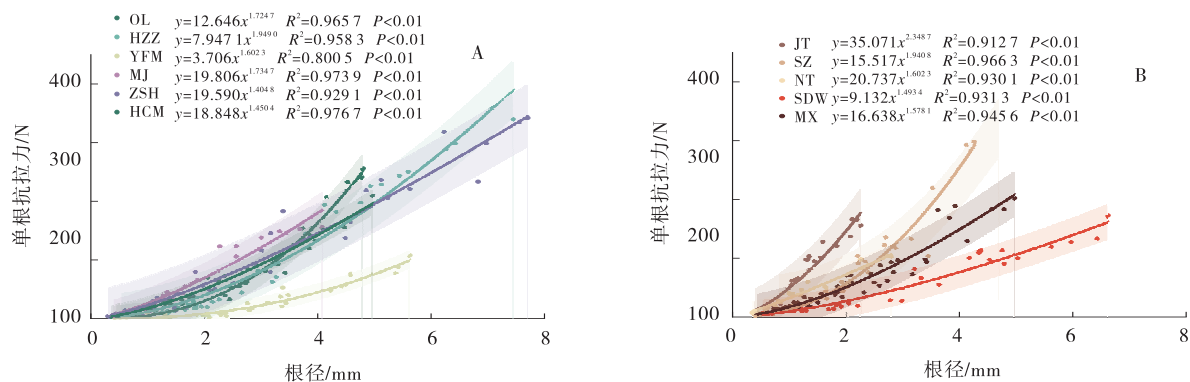


图4 11种护坡植物单根抗拉力与根径回归关系曲线

Fig. 4 Regression relationship curve of single root tensile force and diameter of 11 slopeprotectionplantsroot

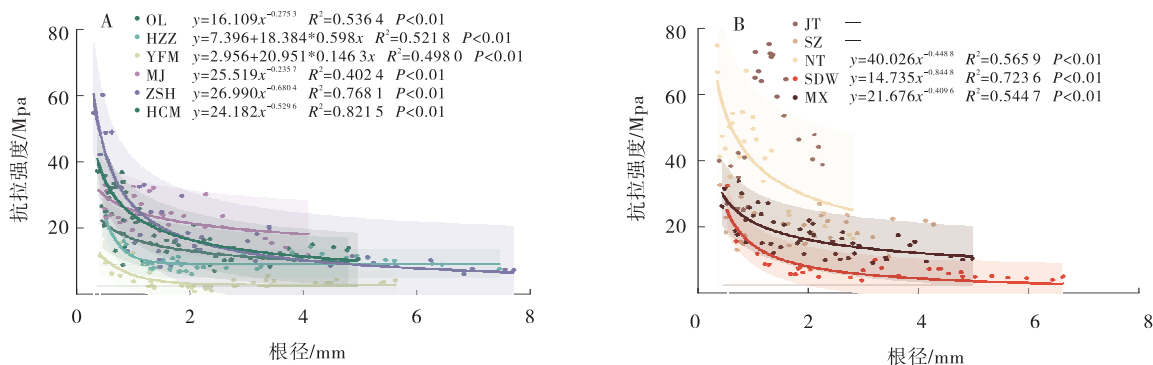


图5 11种护坡植物抗拉强度与根径回归关系曲线

Fig. 5 Regression relationship curve of tensile strength and diameter of 11 slopeprotection plants root

马棘、紫穗槐与沙打旺5种植物根系极限延伸率与根径无明显的函数关系,其中盐肤木与紫穗槐趋势平缓

略显上升外,其余3种植物呈现随根径增大先升高后降低的趋势。

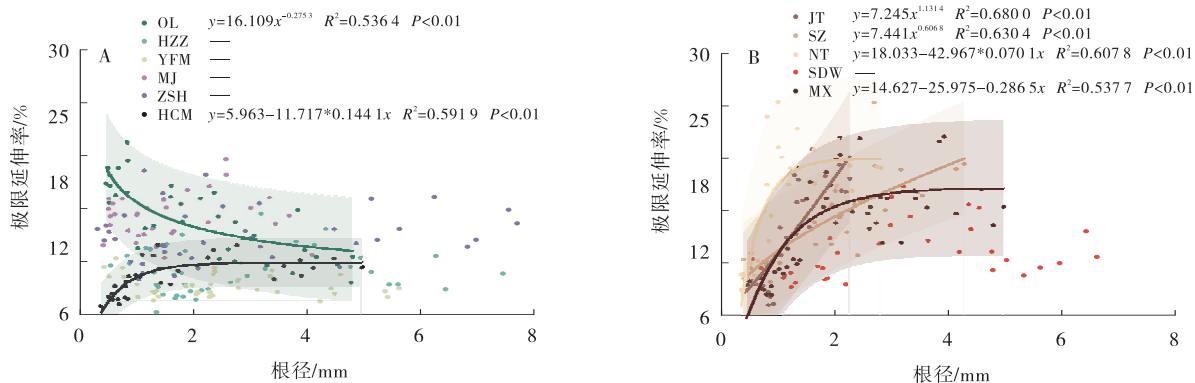


图6 11种护坡植物根系极限延伸率与根径回归关系曲线

Fig. 6 Regression relationship curve of ultimate elongation and diameter of 11 slopeprotection plants root

3 讨论

根系抗拉特性是植物显著改变土体抗剪强度、提高边坡稳定性的因素之一。当土体受到剪切力时,作为弹性材料的根系可以在土体中经弹性形变最终断裂,起到缓冲作用,明显增强土体的抗剪切能力^[36-37]。植物单根抗拉力与抗拉强度越大代表植物对边坡破坏力的抵抗能力越强。在不同植物根系单根抗拉力

试验中发现,不同植物的单根抗拉力、抗拉强度与极限延伸率存在显著差异。单根抗拉力方面,柠条在径级Ⅱ中与荆条显著大于其他植物,荆条在径级Ⅲ和Ⅳ中显著大于其他植物。抗拉强度方面,荆条径级Ⅲ和Ⅳ根系抗拉强度最高且显著高于其他10种植物,柠条在径级Ⅰ和Ⅱ中的抗拉强度和荆条显著高于其他9种植物。极限延伸率方面,柠条在径级Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ均显著大于其他植物,荆条则在径级Ⅳ的根系极限延伸率

较好。整体来看,荆条与柠条单根抗拉特性优于其他植物,可以得出荆条与柠条具备较强的护坡能力的结论。另外,在不同根径范围中11种植物差异性表现不同,例如马棘、黄刺玫、沙打旺与紫花苜蓿与紫穗槐单根抗拉力在径级Ⅰ中与荆条不存在显著性差异,但在径级Ⅱ、Ⅲ与Ⅳ中抗拉力显著低于荆条;紫穗槐的抗拉强度在0~0.6 cm径级中最大且显著大于除柠条外的其他9种植物,在径级Ⅱ、Ⅲ与Ⅳ中与欧李、黄刺玫与酸枣并无显著性差异;紫花苜蓿在径级Ⅰ、Ⅱ与Ⅲ中极限延伸率均较低,而在径级Ⅳ中与荆条与柠条显著大于其他植物。相关研究显示这种径级间的差异性不同是由于不同根径根系内部结构与不同化学成分含量变化引起的。吕春华等^[38]认为根系的力学特性受到基因表达、内部结构等因素的影响。叶超等^[39]的研究显示单根抗拉力与纤维素、综纤维素含量呈显著负相关,与木纤比呈显著正相关关系;抗拉强度则均与纤维素、综纤维素含量显著正相关,与木质素含量、木纤比显著负相关。因此,不同径级的内部结构及化学成分含量规律与由此产生的抗拉特性响应有待进一步深入研究。

植被抗拉特性与根系直径关系的研究中,Chen等^[40]和毛正军等^[41]研究结果表明根系直径是影响单根抗拉力与抗拉强度最主要的因素。根系抗拉特性与根径的回归分析显示,11种植物单根抗拉力均随根径的增大呈幂函数趋势增大,该结果与肖海等^[5]的香根草根系最大抗拉力随根径的增大呈现幂函数关系增大结果一致。试验结果表明,胡枝子与盐肤木根系抗拉强度与根径呈负相关的指数函数关系,荆条与酸枣的根系抗拉强度与根径不存在明显的相关性,这一结果与王程等^[24]、徐文秀等^[42]的抗拉强度随根径的增大呈现幂函数关系减小的结论不同;根系极限延伸率与根径的回归分析中,欧李、荆条与酸枣拟合曲线为幂函数,而黄刺玫、柠条与紫花苜蓿根系极限延伸率与根径回归关系为呈正相关指数函数,胡枝子、盐肤木、马棘、紫穗槐与沙打旺5种植物根系极限延伸率与根径无明显的函数关系,表明不同种植物极限延伸率与根径的相关关系存在差异。这种差异可能是由于根系在生长过程中受外界环境因素影响造成的,本实验基于模拟45°岩质坡面,根系形态及结构由于生长环

境的不同而发生变化^[43-45]。

4 结论

1) 11种植物单根平均抗拉力由大到小为:荆条>酸枣>柠条>马棘>紫花苜蓿>紫穗槐>黄刺玫>胡枝子>欧李>沙打旺>盐肤木。径级Ⅰ中11种植物单根抗拉力差距较小,在径级Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ中逐渐拉开差距。其中,柠条在径级Ⅰ和Ⅱ中显著大于其他10种植物($P<0.05$),荆条在径级Ⅲ和Ⅳ中显著大于其他10种植物($P<0.05$);11种植物单根平均抗拉强度由大到小为:荆条>柠条>马棘>紫穗槐>黄刺玫>紫花苜蓿>酸枣>欧李>沙打旺>胡枝子>盐肤木,荆条、紫穗槐与柠条在径级Ⅰ和Ⅱ中的抗拉强度最高,荆条在径级Ⅲ和Ⅳ根系抗拉强度最高;11种植物单根平均极限延伸率由大到小为:紫穗槐>欧李>柠条>马棘>荆条>紫花苜蓿>酸枣>沙打旺>胡枝子>黄刺玫>盐肤木,极限延伸率在径级Ⅰ、Ⅱ中欧李优于其他10种植物,径级Ⅲ中柠条优于其他10种植物,而径级Ⅳ中荆条、柠条与紫花苜蓿表现优于其余植物。盐肤木单根抗拉力、抗拉强度与极限延伸率值均较小,抵抗外力能力较弱且容易断裂。

2) 单根抗拉力与根径的回归关系中,11种植物均呈正相关的幂函数关系,随根径与单根抗拉力回归曲线增幅最大为荆条,增幅最小为盐肤木;抗拉强度与根径的回归关系中,荆条与酸枣不存在明显相关关系,胡枝子与盐肤木根系抗拉强度与根径呈现负相关的指数关系,其余植物抗拉强度与根径呈现负相关的幂函数关系,9种植物根径—抗拉强度曲线随根径增大,减小幅度的均变缓;极限延伸率与根径的回归关系中,欧李、荆条与酸枣拟合曲线为负相关的幂函数,黄刺玫、柠条与紫花苜蓿根系极限延伸率呈正相关指数函数分布,胡枝子、盐肤木、马棘、紫穗槐与沙打旺5种植物根系极限延伸率与根径无明显的函数关系。

3) 结合11种植物四个径级的抗拉特性比较和与根径的回归分析,在岩质坡面的植被修复中,具备高抗拉力、抗拉强度与极限延伸率的荆条和柠条为护坡优选植物。

参考文献:

[1] 徐华,袁海莉,王歆宇,等. 根系形态和层次结构对根土复

- 合体力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 926—935.
- [2] 钟彩尹, 李鹏程, 马滔, 等. 根—土复合体的三轴试验及其强度分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 97—104.
- [3] 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(1/2): 1—9.
- [4] 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.
- [5] 肖海, 张千恒, 夏振尧, 等. 拉拔作用下护坡植物香根草根系的力学性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 91—97.
- [6] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1171—1177.
- [7] Han J, Zhao J, Wei J, *et al.* Influence of shrub root combinations and spacing on slope stability: study case at the Yongding River flooding regime, Langfang, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(46): 69599—69617.
- [8] Wang X, Hong M, Huang Z, *et al.* Biomechanical properties of plant root systems and their ability to stabilize slopes in geohazard-prone regions[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 189: 148—157.
- [9] Docker B B, Hubble T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species[J]. Geomorphology, 2008, 100(3/4): 401—418.
- [10] Schwarz M, Cohen D, Or D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles[J]. Journal of Geophysical Research—Earth Surface, 2010, 115: F04035.
- [11] Schwarz M, Preti F, Giadrossich F, *et al.* Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy)[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(3): 285—291.
- [12] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报, 2002(5): 20—23.
- [13] 惠尚, 张云伟, 刘晶, 等. 丛生竹根系抗拉力学特性[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 65—70.
- [14] 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.
- [15] Mao Z, Wang Y, McCormack M L, *et al.* Mechanical traits of fine roots as a function of topology and anatomy[J]. Annals of Botany, 2018, 122(7): 1103—1116.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 吕春娟, 陈丽华. 华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 69—78.
- [19] 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(2): 3445—3452.
- [20] Capilleri P P, Cuomo M, Motta E, *et al.* Experimental Investigation of Root Tensile Strength for Slope Stabilization[J]. Indian Geotechnical Journal, 2019, 49(6): 687—697.
- [21] 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.
- [22] 周林虎, 徐志闻, 周国英, 等. 青藏铁路沱沱河段取土场草本根系力学强度试验[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1353—1361.
- [23] 刘昌义, 胡夏嵩, 赵玉娇, 等. 寒旱环境草本与灌木植物单根拉伸试验强度特征研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 1—10.
- [24] 王程, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 黄河源区六种草本植物根系抗拔力特征及其影响因素研究[J]. 草地学报, 2023, 31(1): 157—165.
- [25] 魏艳, 刘有斌, 刘泉宏, 等. 紫色土区拉巴豆和紫花苜蓿根—土复合体抗剪性能研究[J]. 草业学报, 2023, 32(8): 82—90.
- [26] 熊寿德, 段青松, 方雪峰, 等. 三江并流区水电站消落带适生草本植物根系固土能力[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 7210—7221.
- [27] 许桐, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 柴达木盆地4种盐生植物根系力学特性及根—土复合体抗剪强度研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 101—110.
- [28] 郑江坤, 张鸽, 曾倩婷, 等. 弃渣场边坡草本植物根系力学及土壤抗冲性特征[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(6): 59—66.
- [29] 付江涛, 赵吉美, 刘昌义, 等. 坡位对优势植物分布与根

- 系力学特性影响[J]. 草地学报, 2023, 31(7): 1—16.
- [30] Li Q, Shi X, Wu Q. Exploring suitable topographical factor conditions for vegetation growth in Wanhuigou catchment on the Loess Plateau, China: A new perspective for ecological protection and restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 158: 106053.
- [31] Vergani C, Chiaradia E A, Bischetti G B. Variability in the tensile resistance of roots in Alpine forest tree species[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 46: 43—56.
- [32] 黄灏峰, 徐洪雨, 宋桂龙. 不同坡向边坡胡枝子和柴穗槐根系的生长差异[J]. 草原与草坪, 2013, 33(4): 58—62.
- [33] 徐洪雨, 王英宇, 宋桂龙, 等. 华北土石山区公路边坡常见植物根系地下分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 51—58.
- [34] 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.
- [35] 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—57.
- [36] Huang M, Sun S, Feng K, *et al.* Effects of *Neyraudia reynaudiana* roots on the soil shear strength of collapsing wall in Benggang, southeast China[J]. *Catena*, 2022, 210: 105883.
- [37] Zhang C, Zhou X, Jiang J, *et al.* Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. *Catena*, 2019, 172: 140—147.
- [38] 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(1): 329—335.
- [39] 叶超, 郭忠录, 蔡崇法, 等. 5种草本植物根系理化特性及其相关性[J]. 草业科学, 2017, 34(3): 598—606.
- [40] Chen Y, Tang H, He B, *et al.* Root tensile strength of terrace hedgerow plants in the karst trough valleys of SW China: Relation with root morphology and fiber content[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(4): 677—686.
- [41] 毛正君, 耿咪咪. 紫花苜蓿根系抗拉力学特性及其影响因素研究[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 235—246.
- [42] 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.
- [43] Arnone E, Caracciolo D, Noto L V, *et al.* Modeling the hydrological and mechanical effect of roots on shallow landslides[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(11): 8590—8612.
- [44] Wang X, Ma C, Wang Y, *et al.* Effect of root architecture on rainfall threshold for slope stability: variabilities in saturated hydraulic conductivity and strength of root—soil composite[J]. *Landslides*, 2020, 17(8): 1965—1977.
- [45] 李金波, 伍红燕, 赵斌, 等. 模拟边坡条件下常见护坡植物苗期根系构型特征[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10131—10141.

Study on single root tensile properties of 11 kinds of slope protection plants under simulated rock slope conditions

YANG Shuang¹, CHEN Ji-ding², KONG Ya-ping², TAO Shuang-cheng²,

WU Hong-yan¹, LI Jin-bo¹, SONG Gui-long^{1,3*}

(1. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China; 3. Engineering and Technology Research Center for Sports Field and Slope Protection Turf, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The purpose of this experiment is to screen out plants with excellent single root tensile properties under rock slope conditions, and to provide a theoretical basis for the selection and configuration of plant species in vegetation restoration. [Method] In order to provide a theoretical basis for slope vegetation restoration, the

45° slope was simulated, and 11 kinds of commonly used ecological restoration plants (*Astragalus adsurgens*, *Medicago Sativa*, *Lespedeza bicolor*, *Indigofera pseudotinctoria*, *Amorpha fruticosa*, *Caragana korshinskii*, *Vitex negundo*, *Rhus chinensis*, *Cerasus humilis*, *Rosa xanthina*, *Ziziphus jujuba*) were selected through data query and investigation as the research objects to explore their single root mechanical properties. The difference of single root tensile properties of 11 kinds of slope protection plants was explored by pull-out test combined with one-way analysis of variance. The correlation between root tensile strength, root elongation and root diameter was analyzed by regression analysis. 【Result】 1) The order of average tensile force of single root of 11 plants was as follows: *Vitex negundo* > *Ziziphus jujuba* > *Caragana korshinskii* > *Echinops latifolia* > *Medicago sativa* > *Amorpha fruticosa* > *Rosa xanthina* > *Lespedeza bicolor* > *Cerasus humilis* > *Astragalus adsurgens* > *Rhus chinensis*. The order of average tensile strength of single root was as follows: *Vitex negundo* > *Caragana korshinskii* > *Echinops latifolia* > *Amorpha fruticosa* > *Rosa xanthina* > *Medicago sativa* > *Zizyphus jujuba* > *Cerasus humilis* > *Astragalus adsurgens* > *Lespedeza bicolor* > *Rhus chinensis*. The order of average ultimate elongation of single root was as follows: *Amorpha fruticosa* > *Cerasus humilis* > *Caragana korshinskii* > *Echinops* > *Vitex negundo* > *Medicago sativa* > *Zizyphus jujuba* > *Astragalus adsurgens* > *Lespedeza bicolor* > *Rosa xanthina* > *Rhus chinensis*. In the comparison of the four diameter classes, the single root tensile force, tensile strength and ultimate elongation of *Caragana korshinskii* in diameter classes I and II and *Vitex negundo* in diameter classes III and IV were higher, and the single root tensile force, tensile strength and ultimate elongation of *Rhus chinensis* were smaller; 2) There was a positive correlation power function relationship between the single root tensile force and root diameter of 11 plants. Except that there was no significant correlation between root tensile strength and root diameter of *Vitex negundo* and *Ziziphus jujuba* ($P > 0.05$), the root tensile strength of *Lespedeza bicolor* and *Rhus chinensis* decreased exponentially with the increase of root diameter, and the correlation between root tensile strength and root diameter of other plants showed a negative correlation power function. In terms of ultimate elongation: The fitting curves of *Cerasus humilis*, *Vitex negundo* and *Zizyphus jujuba* were negatively correlated power functions. The ultimate elongation of *Rosa xanthina*, *Caragana korshinskii* and *Medicago sativa* roots was positively correlated exponential function distribution. There was no obvious functional relationship between the ultimate elongation and root diameter of *Lespedeza bicolor*, *Rhus chinensis*, *Hippophae rhamnoides*, *Amorpha fruticosa* and *Astragalus adsurgens*. 【Conclusion】 Under the site conditions of rock slope, *Vitex negundo* and *Caragana korshinskii* with high single root tensile force, tensile strength and ultimate elongation are the optimal selection plants for slope protection, and *Rhus chinensis* is not recommended.

Key words: slope protection plants; tensile force; tensile strength; ultimate elongation; simulated slope

(责任编辑:刘建荣)