

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.046.

经又亮, 杨苑君, 王忠良, 等. 3种耐旱耐瘠护坡植物根系形态及抗拉特性[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 163-169, 178.

Jing Youliang, Yang Yuanjun, Wang Zhongliang, et al. Study on Root Morphology and Tensile Characteristics of Three Kinds of Drought-Tolerant Plants for Slope Protection[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 163-169, 178.

3种耐旱耐瘠护坡植物根系形态及抗拉特性

经又亮¹, 杨苑君¹, 王忠良², 李建兴³, 段青松¹, 王建文⁴

(1. 云南农业大学 水利学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201;

3. 中国电建集团昆明勘察设计院有限公司, 昆明 650051; 4. 云南省滇中引水工程建设管理局, 昆明 650224)

摘要: [目的] 探究耐旱耐瘠护坡植物的根系形态及抗拉特性, 为边坡生态修复植物选用配置提供依据。[方法] 在云南省大理市滇中引水项目区弃渣场边坡上选择戟叶酸模(*Rumex hastatus* D.)、车桑子(*Dodonaea viscosa* L.)和地瓜藤(*Ficus tikoua* Bur.) 3种植物, 通过整株挖掘法获得根系样品, 使用Epson12000XL扫描仪在500 dpi下进行灰度扫描, 用WinRhizo(Pro.2019)根系分析系统对根系形态参数进行分析, 并使用万测牌微机控制时万能试验机进行单根拉伸试验。[结果] (1) 戟叶酸模和车桑子根系形态呈三角形, 而地瓜藤呈抛物线形, 戟叶酸模和车桑子根径小于2 mm的长度占比最大, 大于4.5 mm根径的长度占比次之。(2) 3种植物平均抗拉力车桑子最大、戟叶酸模次之、地瓜藤最小, 平均抗拉强度地瓜藤最大, 戟叶酸模次之, 地瓜藤拥有良好抵抗抗变形的能力, 其极限延伸率与杨氏模量优于其余两种植物。[结论] 从根系形态看, 戟叶酸模和车桑子的固土护坡能力高于地瓜藤, 从抗拉特性看地瓜藤虽抗拉力较弱, 但抗拉强度高, 抵抗变形能力强, 3种植物在固土护坡方面根系形态及抗拉特性各有优势, 可根据边坡特点及部位有针对性地选用配置。

关键词: 护坡植物; 根系形态; 力学特性; 耐旱耐瘠

中图分类号: S157; S781.25

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0163-07

Root Morphology and Tensile Characteristics of Three Kinds of Drought-Tolerant Plants for Slope Protection

Jing Youliang¹, Yang Yuanjun¹, Wang Zhongliang², Li Jianxing³, Duan Qingsong¹, Wang Jianwen⁴

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201,

China; 3. China Power Construction Group Kunming Survey Design Institute, Kunming 650051, China;

4. Yunnan Central Water Diversion Project Construction Administration Bureau, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore and examine the root morphology and tensile properties of drought resistant and barren slope protection plants, and to provide a basis for the selection and configuration of slope ecological restoration plants. [Methods] Three kinds of plants, *Rumex hastatus* D., *Dodonaea viscosa* L. and *Ficus tikoua* Bur., were selected on the slope of the slag dump in the middle Yunnan diversion project area of Dali City, Yunnan Province. The root samples were obtained by the whole plant excavation method, and the gray scale scanning was carried out under 500 dpi in the Epson12000XL scanner. The root morphological parameters were analyzed by the WinRhizo (Pro.2019) root analysis system, and the single root tensile test was carried out by the universal testing machine controlled by the microcomputer of Wan Ce brand. [Results] (1) The root morphology of *Rumex hastatus* D. and *Dodonaea viscosa* L. was triangular, while that of *Ficus tikoua* Bur. vine was parabolic. The length of *Rumex hastatus*

收稿日期: 2023-12-24

修回日期: 2024-01-25

资助项目: 云南省滇中引水工程建设管理局“云南省滇中引水工程水土保持关键技术研究”(DZYS-ZH-STBC-SJ-001)

第一作者: 经又亮(2000—), 男, 云南省楚雄人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 2197786566@qq.com

通信作者: 王建文(1971—), 男, 云南省宣威人, 高级工程师, 研究方向为水土保持与环境保护。E-mail: 401724040@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

D. and *Dodonaea viscosa* L. root diameter less than 2 mm was the largest, followed by the length of root diameter greater than 4.5 mm. (2) The average tensile strength of the three plants was the largest for *Dodonaea viscosa* L., followed by *Rumex hastatus* D., and the smallest for *Ficus tikoua* Bur., and the average tensile strength was the largest for *Ficus tikoua* Bur., followed by *Rumex hastatus* D. The *Ficus tikoua* Bur. possessed a good resistance to deformation, and its ultimate elongation and Young's modulus were better than those of the remaining two plants. [Conclusion] From the view of root morphology, *Rumex hastatus* D. and *Dodonaea viscosa* L. have higher capacity of soil stabilization than *Ficus tikoua* Bur. From the view of tensile characteristics, although *Ficus tikoua* Bur. has weaker tensile strength, it has high tensile strength and strong resistance to deformation, and the three plants have their own advantages in root morphology and tensile characteristics in soil stabilization and slope protection, and they can be selected and configured according to the characteristics of the slopes and the positions of the slopes in a targeted way.

Keywords: slope protection plant; root morphology; mechanical property; drought-tolerant and barren

植物护坡能改善生态环境、减少水土流失、涵养水源,是一种经济环保有效的边坡防护措施,具有不可替代的重要作用^[1]。植物根系穿插在土壤中对土体有加筋锚固作用^[2],其固土能力与根系的抗拉特性和根系的分布形态相关^[3]。有学者研究得出在相同环境中植物根系形态参数根量、根径、根长等会有所不同,该差异会影响固土能力^[4-5]。不同形态植物根系边坡的安全系数:指数型>三角形>均布形>抛物线形^[6-7],根系形态会显著影响土壤结构特性,尤其是根径小于1 mm的细根拥有更大的根表面积,可以与土壤形成更大的表面粗糙度和提升土壤凝聚力,从而起到更好的土壤加固效果^[8]。抗拉特性是评价固土能力的重要指标,近年来的研究表明,根径与抗拉力、抗拉强度的关系,由于植物的不同存在非线性相关^[9]、线性相关^[10]、无相关性^[11];杨氏模量与极限延伸率可以评价根系固土能力强弱,在受拉过程中极限延伸率越小、弹性模量越大的根系,能产生较小的变形却能发挥出较大的固土效果^[12]。

随着国家对生态环境保护和修复的重视,越来越多的植物应用在生态护坡中,戟叶酸模、车桑子、地瓜藤由于具有耐旱耐瘠,适应性强的特点,在边坡防护中广泛应用,在滇中引水工程的弃渣场、边坡上就大量种植。3种植物目前对车桑子的研究较多,主要集中在其抗旱机理^[13]、种群特征^[14]以及对土壤环境的影响等^[15]方面,对其固土护坡机理的研究主要报道了根系能提高土体的抗剪强度^[16],对戟叶酸模的研究主要集中在生态修复中的应用^[17],地瓜藤的研究主要在其抗旱性^[18]和淹水特性等^[19]方面,对3种植物根系形态及抗拉特性研究尚未见报道。研究3种植物根系形态及抗拉特性,从根系形态及抗拉特性角度分析3种植物的根系固土能力,为边坡生态修复植物选用配置提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省大理州大理市海东滇中引水弃渣场边坡(25°84'35"N,100°27'88"E),海拔1 975.00 m,属于喀斯特地貌,大片岩石裸露在土体外,土壤以红壤、黄棕壤土为主,属中亚热带冬干夏湿低纬高原季风气候,干旱少雨,光热条件充足,热量丰富,立体气候较明显。多年平均气温15.40℃,无霜期305 d,年平均降雨量565.00 mm。

1.2 试验植物

戟叶酸模(*Rumex hastatus* D.)属灌木,产云南大部分地区、四川及西藏东南部,生长在海拔300~2 700 m地区,耐贫瘠,耐干旱,具有极强的有性和无性繁殖能力,其根系细且长可以深入地下,能穿过坡体浅层的松散风化层,从而锚固到深处较稳定的岩土层上,对坡面上的土壤有很好的防止侵蚀和锚固作用,是生态修复的先锋植物^[20]。车桑子(*Dodonaea viscosa* L.)无患子科车桑子属灌木或小乔木,生长在海拔300~2 800 m的荒坡及疏林中,在我国西南部、南部至东南部广为分布,拥有极强的生命力,对温度要求较低,耐干旱、耐贫瘠、根系发达,四季均可种植,是一种优良的护坡植物。地瓜藤(*Ficus tikoua* Bur.)桑科多年生落叶藤本,生长在海拔250~3 000 m的高程上,常附有须状不定根,具有较好的有性和无性繁殖能力,耐干旱,亦耐贫瘠,对土壤要求不严,以肥沃、疏松的夹砂土上最易生长,常生长在道路边坡。戟叶酸模、车桑子、地瓜藤在边坡生长现状如图1所示。

1.3 研究方法

1.3.1 根系采样 2023年7月初采样,3种植物分别选取长势较为均匀的3株作为标准株,采用挖掘法用小铲、镊子、小刷子等工具由外往里、由浅到深逐次

挖掘,直到整株根系完全取出。将 3 种植物连根带土放入保鲜袋中,到实验室后放入清水中浸泡,随后用软毛刷顺根系生长方向仔细清除根系上的泥土,清洗完后将根系放入 4℃ 冷藏冰箱储存备用。

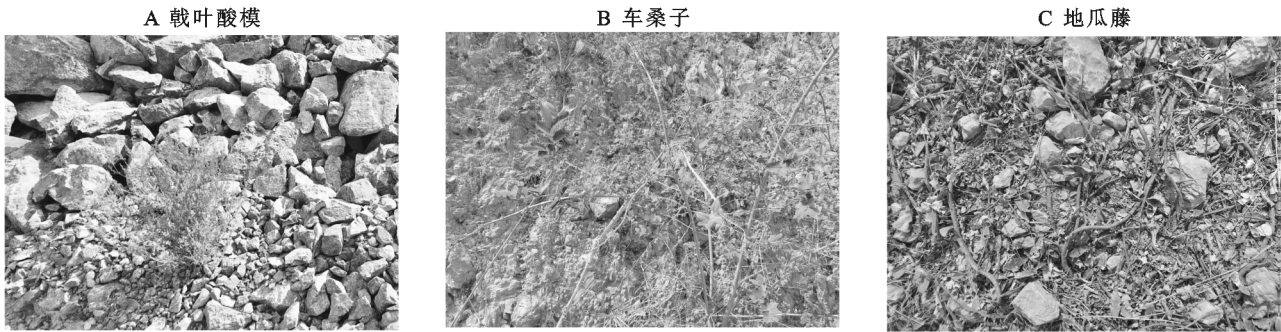


图 1 3 种植物在边坡生长现状
Fig. 1 Growth status of three plants in slope

1.3.2 根系形态结构参数测定 3 种植物根系发达, Epsom12000XL 扫描仪无法将整株根系完全扫描,故将 3 种根系做好标记用剪刀剪切分段扫描,将分段根系置于洁净的高透扫描盘中,用毛刷轻轻拨开根系,使根系最大限度地延展在盘中,在 500dpi 下进行灰度扫描,用 WinRhizo 根系分析系统分析根系形态指标,最后将同一植物的根系数据进行叠加。

1.3.3 植物根系抗拉力学性能试验 参照杨苑君^[21]的研究,植物根系抗拉力学性能试验以 100 mm 标距,对挖取的每种植物样本选取顺直、无损伤的根系进行拉伸试验,用电子数显游标卡尺测量根系的上、中、下部的直径,求取三处平均值作为植物单根直径,在云南农业大学力学实验室用万测牌微机控制万能试验机进行单根抗拉试验。试验前,在试验机夹具两端缠绕橡胶带以增强根系与夹具间摩擦力,调整下夹具的间距调至 100 mm,夹紧根系。拉伸时速率控制在 10 mm/min,根系只有在根中间 2/3 段发生断裂时测得的数据有效。根系力学指标及计算方法^[12]如下:

$$T_r=4F/\pi D^2$$

(1)

$$\epsilon=\Delta L/100\times 100\%$$

(2)

$$E_r=200F/\pi D^2\Delta L$$

(3)

式中: T_r 为根系抗拉强度(MPa); F 为根系最大抗拉力(N); D 为根系直径(mm); ϵ 为极限延伸率(%),即根系纵向应变; ΔL 为根系拉断时的伸长量(mm);100 为拉伸根系原长,即标距(mm); E_r 为杨氏模量(MPa)。

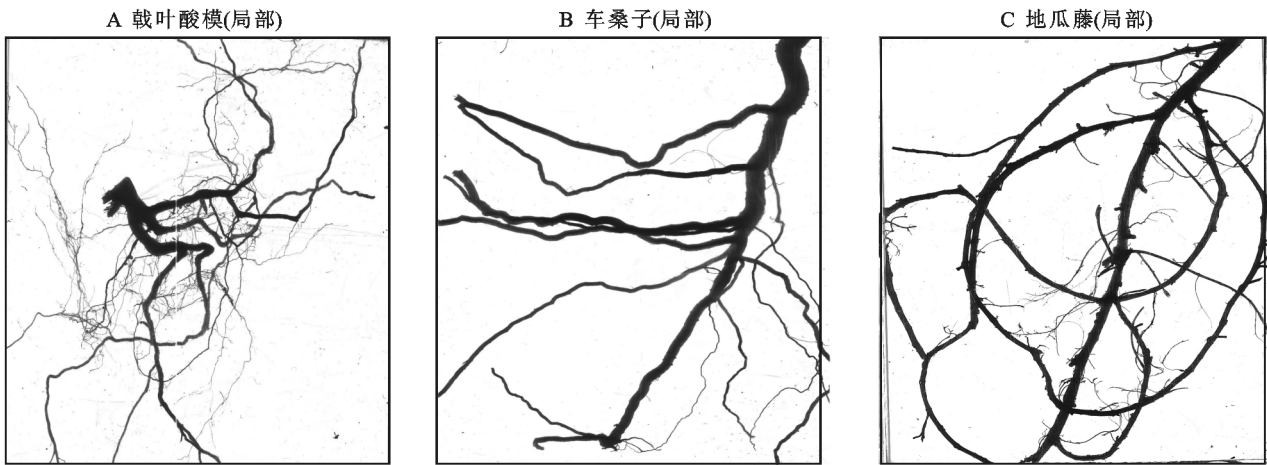
1.4 数据统计与分析

采用 Origin 2022 pro 软件绘图,采用 SPSS 27.0.1 软件 Duncan 新复极差法进行差异显著性分析,Microsoft Excel 2021 软件进行数据叠加、整理和回归分析。

2 结果与分析

2.1 3 种植物根系形态特征

如图 2 所示,3 种植物根系灰度扫描局部图像所示,戟叶酸模与车桑子植物主侧根明显,根系发达呈三角形,地瓜藤茎上附有抛物线形须状不定根,3 种植物根系均生长良好,无病虫害。



注:地瓜藤图片中粗的为茎,细的为根。

图 2 3 种植物根系局部扫描图
Fig. 2 Local root scan of three plant species

从表 1 可以看出,根系平均直径戟叶酸模最大,车桑子次之,地瓜藤最小,3 种植物根系平均直径存在显著差异。根总长车桑子最大,戟叶酸模次之,地瓜藤最小,地瓜藤与另 2 种植物根总长存在显著差异。

根表面积与根体积均为戟叶酸模最大,车桑子

次之,地瓜藤最小;地瓜藤与另 2 种植物的根表面积差异极显著、根体积差异显著。地瓜藤的平均直径、根总长、根表面积、根体积分别是戟叶酸模的 0.29 倍、0.28 倍、0.21 倍、0.20 倍,是车桑子的 0.51 倍、0.19 倍、0.25 倍、0.39 倍。

表 1 3 种植物根系形态指标

Table 1 Root morphological indexes of three plant species

植物种类	平均直径/mm	根总长/cm	根表面积/cm ²	根体积/cm ³
戟叶酸模	2.82±0.64a	476.96±179.71B	435.97±97.75A	35.16±13.70A
车桑子	1.62±0.60b	715.89±184.31A	349.85±46.37A	18.40±20.98A
地瓜藤	0.83±0.09c	137.21±70.63C	89.56±28.14B	7.28±3.66B

注:表中数据为平均值±标准差,不同小写字母、大写字母分别表示指标间差异显著、极显著($p<0.05$, $p<0.01$)。

目前植物根系径级分级还未形成统一标准,本研究根据实际分为将根径分为 0~0.5 mm,以 0.5 mm 为标距逐级递增至 4.5 mm,大于 4.5 mm 10 个径级对根系的长度、表面积、体积进行分析,如图 3 所示。地瓜藤根径在 0~2.47 mm 范围内,细根多无粗根;0~1.5 mm 根径的根表面积占总量的比例为车桑子(22.99%)>地瓜藤(19.77%)>戟叶酸模(8.3%),大

于 4.5 mm 根径的根表面积占总量的比例为戟叶酸模(71.69%)>车桑子(36.56%)>地瓜藤(0%);从根体积上看,3 种植物随着根径的增大根体积占比增大;从根长度占比上看,3 种植物细根长度占比最大,戟叶酸模和车桑子 0~2 mm 根径的长度占比最大(57.18%~67.09%),大于 4.5 mm 根径的长度次之(8.13%~26.07%)。

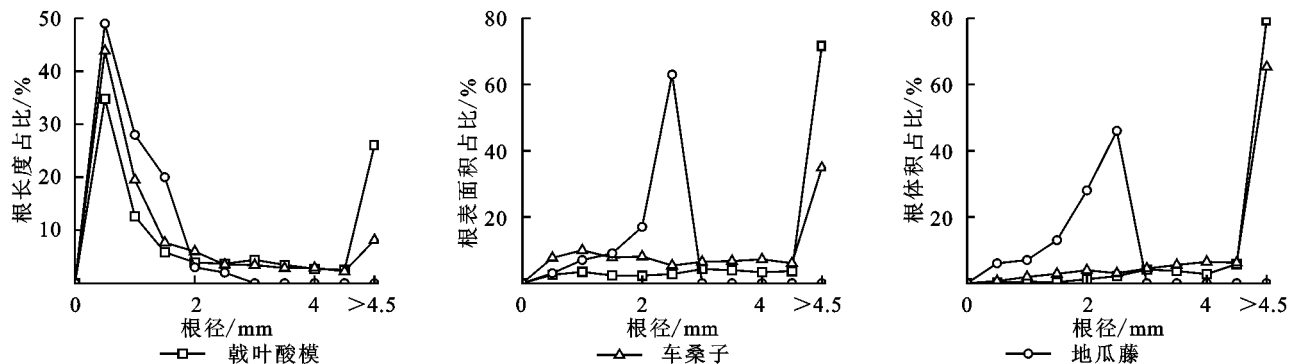


图 3 3 种植物不同径级根系指标占总量比例特征

Fig. 3 Characteristics of the ratio of root indexes of different diameter classes to total amount of three plants

2.2 3 种植物抗拉力与抗拉强度

戟叶酸模和车桑子根系拉伸试验成功各 40 根、地瓜藤成功拉伸 30 根,拉伸成功率车桑子(72.72%)>戟叶酸模(64.51%)>地瓜藤(41.23%),受试根系直径在 0.23~9.19 mm 之间,根系平均抗拉力依次为车桑子(83.68 N)>戟叶酸模(61.19 N)>地瓜藤(21.43 N)。根系抗拉强度范围 1.20~83.07 MPa,平均抗拉强度依次为地瓜藤(33.83 MPa)>戟叶酸模(15.75 MPa)>车桑子(7.49 MPa)。

3 种植物根系抗拉力与抗拉强度和根系直径关系见图 4。3 种植物根系抗拉力随根系直径的增大而增大、抗拉强度随根系直径的增大而减小,当根径大于 3 mm 时 3 种植物抗拉力与根茎拟合曲线均较为离散。3 种植物根系直径与抗拉力和抗拉强度拟合函数见表 2,车桑子、地瓜藤根系直径与抗拉强度的拟合效果不理想。

2.3 3 种植物极限延伸率与杨氏模量

由表 3 可知 3 种植物平均极限延伸率表现为地瓜藤(8.3%)>车桑子(7.64%)>戟叶酸模(6.86%),且地瓜藤与其他植物存在显著差异($p<0.05$);杨氏模量均值地瓜藤(204 MPa)>车桑子(150 MPa)>戟叶酸模(62 MPa),且戟叶酸模与其他植物存在显著差异。戟叶酸模和车桑子杨氏模量与根系直径存在幂函数关系,但地瓜藤两者间无明显的线性关系(见图 5)。

3 讨论

根系形态对植物固土护坡作用的影响。植物根系的遗传信息是影响根系形态的最重要因素之一^[22-23],此外气候条件、土壤类型、养分含量、地形地貌等环境变化也是影响根系形态的因素。根长度、根体积、根表面积反映了植物对环境的适应能力^[9]。根

系数目以及单根长度决定着根系长度,而根系直径、数目、长度决定着根系表面积和体积,从本研究上看地瓜藤细根较多,与戟叶酸模和车桑子相比缺少粗根,说明地瓜藤从形态上对边坡的稳定效果相对较差。现有研究表明植物吸收养分主要依靠细根,而营养物质的储存则依靠粗根^[24]。同时植物细根主要发

挥对土体网结的能力,而粗根主要发挥自身固定和土体“加筋”的作用^[25]。从本研究灌木根长度占比上看,灌木根径小于 2 mm 时长度占比最大,大于 4.5 mm 根径时长度占比次之,这进一步反映出两种灌木均是优良的耐干旱、耐贫瘠、对边坡水土保持生态修复较好的植物^[26]。

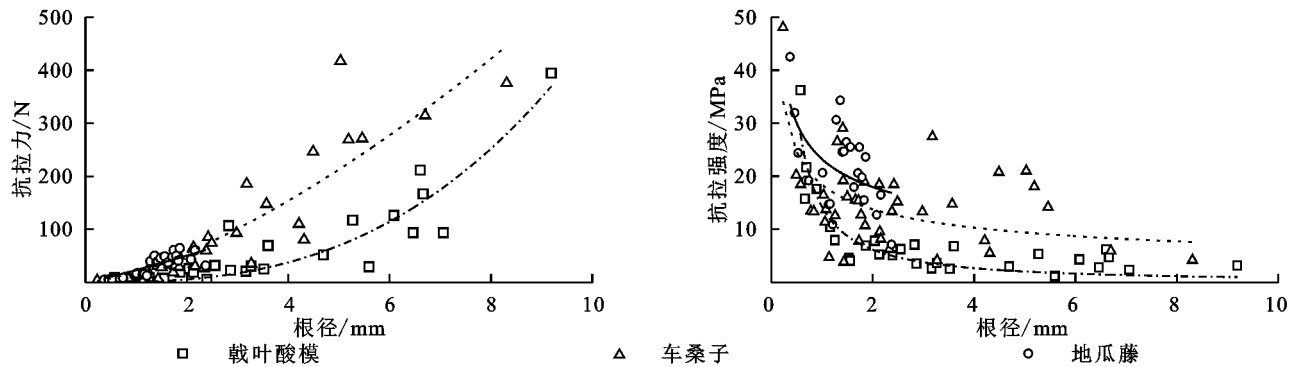


图 4 3 种植物根系抗拉力、抗拉强度与直径关系

Fig. 4 Characteristics of root tensile strength and tensile strength changing with diameter of three plants

表 2 3 种植物根系抗拉力、抗拉强度与直径的拟合函数

Table 2 Regression equations of root tensile and tensile strength changes with diameter of three kinds of plants

植物种类	抗拉力			抗拉强度		
	拟合方程	R^2	p	拟合方程	R^2	p
戟叶酸模	$F=0.82D^{2.74}$	0.83	<0.01	$T_r=14.24D^{-1.21}$	0.81	<0.01
车桑子	$F=20.41D^{1.45}$	0.81	<0.01	$T_r=18.41D^{-0.436}$	0.27	<0.01
地瓜藤	$F=23.27D^{1.09}$	0.68	<0.01	$T_r=23.10D^{-0.38}$	0.29	<0.01

注:表中 F 为根的抗拉力, D 为根径, T_r 为根的抗拉强度。

表 3 3 种植物根系极限延伸率与杨氏模量参数

Table 3 Root limit elongation and Young's modulus parameters of the three plants

植物种类	极限延伸率/%		杨氏模量/MPa				
	范围	均值	范围	均值	拟合方程	R^2	p
戟叶酸模	2.61~14.49	6.86±2.98b	9.34~366.34	62±76.64C	$E_r=113.11D^{-1.66}$	0.73	<0.01
车桑子	2.68~19.43	7.64±4.57b	10.81~417.26	150±83.45B	$E_r=176.87D^{-0.66}$	0.59	<0.01
地瓜藤	2.41~23.43	8.30±0.48a	36.13~326.47	204±78.20A	$E_r=221.19D^{-0.07}$	0.01	<0.01

注:表中 D 为根径, E_r 为根的杨氏模量。

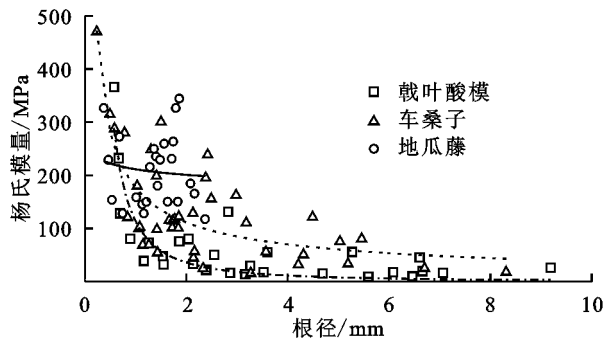


图 5 3 种植物根系杨氏模量随直径的变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of Young's modulus with diameter of three plant roots

根系抗拉性能对植物固土护坡作用的影响。根系抗拉性能是评价根系固土能力的重要指标^[21,25],根径是影响抗拉力和抗拉强度的关键因素,本研究

中 3 种植物抗拉力随根径的增大而增大,抗拉强度则与之相反,戟叶酸模与车桑子抗拉力、抗拉强度、杨氏模量与根径之间存在幂函数关系,这与近年来学者研究结果相一致^[9,25]。杨氏模量与极限延伸率反映了根系抵抗变形能力的强弱,根径与根长度是影响其根系变形因素之一,二者值越大,极限延伸率均值越大,杨氏模量的均值也就越大^[9,27]。植物根系的化学性质、水分、微观结构也会影响其抗拉性能^[28],本研究发

现灌木植物抗拉力与抗拉强度拟合时,根径越小数值越接近拟合线,根径越大数值离拟合线越离散,这可能是由于细根木质素、纤维素、半纤维素和含水量差异变化不大,而粗根作为营养物质的储存器官其化学物质变化差异过大所引起的。此外车桑子、地瓜藤抗拉强度幂函数拟合不理想,这可能是与新老根差异所应

起的,新根由于木质化程度不高导致抗拉强度较低,而老根随着时间的增长根内的化学物质不断积累,导致木质化程度高抗拉强度大^[28]。

3 种植物在护坡中的应用,从根系形态看,车桑子与戟叶酸模呈三角形,地瓜藤形态呈抛物线形,在边坡中三角形根系对土体的稳定性优于抛物线形根系^[9],因此车桑子与戟叶酸模根系稳固边坡的能力更强,但地瓜藤的茎贴地生长,对坡体表面土体起到网结作用,因此该植物也具有较好的护坡效果。从抗拉特性上看,当边坡出现滑坡、崩塌时,土体中根系的拉伸特性可以降低甚至抵消重力带来的影响,从而发挥固土作用。平均极限延伸率地瓜藤显著高于其他 2 种植物,且杨氏模量均值地瓜藤高于其他植物,说明地瓜藤与其他两种植物相比拥有更好的抵抗变形的能力,但抗拉力和抗拉强度低。乔灌木相结合治理模式能起到短期效益与长期效益相结合,既满足护坡要求同时也兼顾生物多样性应大力倡导应用^[29];刘武江等^[30]研究也发现混播植物的根系固土能力要优于单播。戟叶酸模与车桑子在耐旱耐瘠的砂砾石中都能很好生长,地瓜藤在土壤含水率相对较高、养分较好的土壤中长势更好;同时边坡土体大多具有上部颗粒粗,下部颗粒细、含水量和营养成分相对高的特点,因此在实际配置应用中,在边坡上部可以戟叶酸模为主、混播车桑子,中部戟叶酸模和车桑子混播,下部种植地瓜藤。

4 结 论

(1) 车桑子与戟叶酸模形态呈三角形,而地瓜藤呈抛物线形,3 种植物根径小于 2 mm 时长度占比均最大,大于 4.5 mm 根径长度占比次之。

(2) 3 种植物平均抗拉力车桑子最大,戟叶酸模次之,平均抗拉强度地瓜藤最大,戟叶酸模次之,地瓜藤拥有良好抵抗形变的能力,其极限延伸率与杨氏模量优于其余两种植物。

(3) 结合边坡特点和植物特性提出 3 种植物在边坡的配置模式:上部以戟叶酸模为主、混播车桑子,中部戟叶酸模和车桑子混播,下部种植地瓜藤。

总的来说,从根系形态看,戟叶酸模和车桑子的固土护坡能力高于地瓜藤,从抗拉特性看地瓜藤虽抗拉力较弱,但抗拉强度高,抵抗变形能力强,3 种植物在固土护坡方面根系形态及抗拉特性各有优势,可根据边坡特点及部位有针对性地选用配置。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 吴宏伟.大气—植被—土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1-47.
- [3] Zhong R H, He X B, Bao Y H, et al. Estimation of soil reinforcement by the roots of four post-dam prevailing grass species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir, China[J]. Journal of Mountain Science, 2016,13(3):508-521.
- [4] Ji J N, Kokutse N, Genet M, et al. Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability: A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2012,92:139-154.
- [5] 谢祥荣,陈正发,朱贞彦,等.根土复合体力学效应及其模型构建研究进展与展望[J].水土保持学报,2023, Xie X R, Chen Z F, Zhu Z Y, et al. Research progress and prospect of mechanical effects and model construction of root-soil complex[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023:
- [6] 张攀,徐永福,武孝天.植物根系吸水对边坡稳定性的影响[J].长江科学院院报,2020,37(8):120-125,136.
- [7] 吴宏伟,周超,张帅,等.状态相关非饱和土力学理论及应用[J].中国科学:技术科学,2023,53(10):1728-1746.
- [8] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Effect of root architecture on structural stability and erodibility of topsoils during concentrated flow in hilly Loess Plateau [J]. Chinese Geographical Science, 2015,25(6):757-764.
- [9] 黄广杰,段青松,李建兴,等.三江并流区水库消落带 5 种草本根系形态及抗拉特性[J].水土保持研究,2022,29(3):389-395.
- [10] Huang G J, Duan Q S, Li J X, et al. Root morphology and tensile characteristics of five kinds of herbs in reservoir fluctuating zone of three parallel rivers [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):389-395.

- [10] 胡晶华,刘静,白璐翼,等.沙柳直根抗拉特性对循环荷载的响应[J].干旱区研究,2022,39(3):900-907.
Hu J H, Liu J, Bai L Y, et al. Straight root tensile properties of *Salix psammophila* in response to cyclic loading[J]. Arid Zone Research, 2022,39(3):900-907.
- [11] 田佳,刘耀辉.华北地区几种常用边坡绿化植物的根系力学特性研究[J].中国水土保持,2007(10):34-36.
Tian J, Liu Y H. Mechanics characteristic of root system of some plants commonly used for slope afforestation in North China Region[J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(10):34-36.
- [12] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Effects of root dehydration on biomechanical properties of woody roots of *Ulex europaeus*[J]. Plant and Soil, 2018,431(1):347-369.
- [13] 赵琳,郎南军,温绍龙,等.云南干热河谷4种植物抗旱机理的研究[J].西部林业科学,2006,35(2):9-16.
Zhao L, Lang N J, Wen S L, et al. A study on drought resistance mechanism of four kinds of plants in dry and hot valley of Yunnan Province[J]. Journal of West China Forestry Science, 2006,35(2):9-16.
- [14] 张琴,刘利文,李俊清,等.云南干热河谷区裸地植被恢复过程中车桑子的种群特征[J].西南农业学报,2016,29(9):2234-2238.
Zhang Q, Liu L W, Li J Q, et al. Characteristics of *Dodonaea viscosa* population regenerated in abandoned cropland of Yunnan dry-hot valleys[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016,29(9):2234-2238.
- [15] 杨青,段旭,赵洋毅,等.干热河谷典型林草植被根系分泌物特征及对土壤环境因子的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(7):53-60.
Yang Q, Duan X, Zhao Y Y, et al. Characteristics of root exudates of typical forest and grass vegetation in dry and hot valley and their response to soil environmental factors[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022,50(7):53-60.
- [16] 杨永红,刘淑珍,王成华,等.含根量与土壤抗剪强度增加值关系的试验研究[J].水土保持研究,2007,14(3):287-288,291.
Yang Y H, Liu S Z, Wang C H, et al. Experimental research on the relation between increasing value of shearing strength with root system[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(3):287-288,291.
- [17] 刘月莉.四川甘洛铅锌矿区植被生态调查及重金属超富集植物的筛选[D].四川雅安:四川农业大学,2008.
Liu Y L. An Ecological Survey on Vegetation and Screening of Heavy Metal Hyperaccumulator at Ganluo Lead/Zinc Mine Area in Sichuan Province[D]. Ya'an, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2008.
- [18] 卢炜丽,陈奇伯,黄鹏飞,等.金沙江金安桥水电站废弃地植被恢复研究[J].中国水土保持,2011(2):58-61.
Lu W L, Chen Q B, Huang P F, et al. Vegetation rehabilitation of abandoned areas of Jin'anqiao hydroelectric plant of Jinsha River[J]. Soil and Water Conservation in China, 2011(2):58-61.
- [19] 王海锋,曾波,李娅,等.长期完全水淹对4种三峡库区岸生植物存活及恢复生长的影响[J].植物生态学报,2008,32(5):977-984.
Wang H F, Zeng B, Li Y, et al. Effects of long-term submergence on survival and recovery growth of four riparian plant species in Three Gorges Reservoir Region, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008,32(5):977-984.
- [20] 杨波,张光飞,周睿,等.戟叶酸模种子萌发对光照和温度的响应[J].种子,2014,33(10):9-11.
Yang B, Zhang G F, Zhou R, et al. Responses of *Rumex hastatus* to light and different temperature in seed germination[J]. Seed, 2014,33(10):9-11.
- [21] 杨苑君.华北典型乔木根系抗拉及土壤抗剪性能研究[D].北京:北京林业大学,2016.
Yang Y J. Study on Tensile Properties of Root System and Soil Shear Properties of Typical Trees in North China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [22] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007,104(27):11192-11196.
- [23] 汪雪,刘晓静,王静,等.紫花苜蓿-燕麦连续间作下根系及土壤养分时空变化特征[J].应用生态学报,2023,34(10):2683-2692.
Wang X, Liu X J, Wang J, et al. Temporal-spatial variations of root and soil nutrient under continuous intercropping of alfalfa and oat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(10):2683-2692.
- [24] 田卓,何建华,张帅普,等.南方典型红壤丘陵区泡桐幼苗根系的空间分布特征[J].西南农业学报,2023,36(10):2200-2209.
Tian Z, He J H, Zhang S P, et al. Root spatial distribution characteristics of *Paulownia* seedlings in typical red soil hilly region in Southern China[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023,36(10):2200-2209.
- [25] 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):11-22.

- characteristics of soil moisture dynamics in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(4): 515-519.
- [27] 邱扬,傅伯杰,王军,等.黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J].应用生态学报,2001,12(5):715-720.
- Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture content on the Loess Plateau, China and its relation to influencing factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 715-720.
- [28] 杜康,张北赢.黄土丘陵区不同土地利用方式土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2020,27(6):72-76.
- Du K, Zhang B Y. Characteristics of soil moisture variation in different types of land uses in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 72-76.
- [29] 唐敏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):765-774.
- Tang M, Zhao X N, Gao X D, et al. Characteristics of soil moisture variation in different land use types in the hilly region of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 765-774.
- [30] 姚雪玲,杨国靖,王帅,等.黄土丘陵沟壑区不同深度土壤水分对降雨的响应及其稳定性[J].干旱区地理,2021,44(2):507-513.
- Yao X L, Yang G J, Wang S, et al. Soil moisture response and stability to rainfall in different depths in Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 507-513.
- [31] Yu Z B, Carlson T N, Barron E J, et al. On evaluating the spatial-temporal variation of soil moisture in the Susquehanna River Basin [J]. Water Resources Research, 2001, 37(5): 1313-1326.
- [32] Wang C, Fu B J, Zhang L, et al. Soil moisture-plant interactions: An ecohydrological review[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1): 1-9.
- [33] Hsu H, Lo M H, Guillo B P, et al. Relation between precipitation location and antecedent/subsequent soil moisture spatial patterns[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(12): 6319-6328.
- [34] 王正安,邸利,王彦辉,等.六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分对降雨的响应[J].干旱区资源与环境,2018,32(4):144-151.
- Wang Z A, Di L, Wang Y H, et al. Response of soil moisture to rainfalls in a semi-arid larch forest in Liupan Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(4): 144-151.

(上接第169页)

- [26] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍.林木根系固土的理论基础[J].水土保持通报,2008,28(6):180-186.
- Song W F, Chen L H, Liu X P. Review of theories of soil reinforcement by root system in forest[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6): 180-186.
- [27] 冯旭环,周璐,熊伟,等.大渡河干热河谷区本土优势灌木植物根系的抗拉力学特性及其影响因素研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(7):159-169.
- Feng X H, Zhou L, Xiong W, et al. Tensile mechanical properties of the roots of the native shrubs and herbs in the dry-hot valley of Dadu River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(7): 159-169.
- [28] 吕春娟.乔木根系抗拉力学特性及其与化学成分关系[D].北京:北京林业大学,2013.
- Lü C J. Tensile Properties of Tree Roots and Their Relationship with Chemical Composition[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [29] 杜文志,陈超群,庞学勇,等.我国道路边坡植被修复的研究进展[J].应用生态学报,2023,34(12):3437-3446.
- Du W Z, Chen C Q, Pang X Y, et al. Research progress on vegetation restoration of road slopes in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(12): 3437-3446.
- [30] 刘武江,赵赓柯,段青松,等.不同播种方式草本植物土壤团聚体特征及对根系固土力的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):25-31,38.
- Liu W J, Zhao Y K, Duan Q S, et al. Effects of different sowing patterns of herbs on soil aggregates characteristics and consolidating soil ability of roots[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 25-31, 38.