

喀斯特地区马尾松人工林根系抗拉与抗折的力学特性

张晨¹, 彭语童¹, 张建利¹,

杨涛¹, 古宇航¹, 溥丽华¹, 曹阳², 赵卫权²

(1.贵州民族大学生态环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2.贵州省山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 探究马尾松(*Pinus massoniana*)根系抗拉、抗折力学特性和应力—应变特征, 充实乔木根系力学特性, 以为马尾松种植区固持土壤、防治水土流失提供参考。[方法] 以马尾松 0~1, 1~2, 2~3, 3~4, >4 mm 根径根系为研究对象, 使用 STS5000 万能拉力机进行单根试验, 分析不同根径根系马尾松抗拉与抗折力学特性及应力—应变特征。[结果] 马尾松单根抗拉力和单根抗折力随根径增加均符合 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 方程, R^2 分别为 0.91, 0.69; 抗拉强度和抗折强度随根径增加均符合 $y = ax^{-b}$ 方程, R^2 分别为 0.50, 0.35; 根系抗拉延伸率、根系抗拉弹性模量和根系抗折弹性模量随根径增加均符合 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 方程, R^2 分别为 0.17, 0.22, 0.18; 根系抗折延伸率与根系径级无明显相关性; 马尾松根系抗拉与抗折“应力—应变”曲线表现出弹性变形、弹塑性变形、应变硬化及断裂破坏 4 个阶段, 抗拉“应力—应变”曲线和抗折“应力—应变”曲线在弹塑性变形阶段有不同的变化趋势; 抗拉与抗折断裂阶段有周皮断裂与整体断裂两种断裂模式, 两种断裂模式受根系周皮与维管组织影响均有两种断裂类型。[结论] 马尾松 <3 mm 根径根系抗折力学性能优于抗拉力学性能, >3 mm 根系根径抗拉力学性能优于抗折力学性能。马尾松种植于坡面等地区可以有效增强土壤的抗蚀能力。

关键词: 喀斯特地区; 抗拉力学特性; 抗折力学特性; 弹性模量; 应力—应变特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0074-10

中图分类号: S157.1, Q947.6

文献参数: 张晨, 彭语童, 张建利, 等. 喀斯特地区马尾松人工林根系抗拉与抗折的力学特性[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 74-83. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.009; Zhang Chen, Peng Yutong, Zhang Jianli, et al. Tensile and flexural properties of single roots of *Pinus massoniana* in karst regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 74-83.

Tensile and Flexural Properties of Single Roots of *Pinus Massoniana* in Karst Regions

Zhang Chen¹, Peng Yutong¹, Zhang Jianli¹,

Yang Tao¹, Gu Yuhang¹, Pu Lihua¹, Cao Yang², Zhao Weiquan²

(1. College of Eco-environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Institute of Mountain Resources of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] The tensile and flexion mechanical properties and stress-strain characteristics of roots of *Pinus massoniana* were studied to enrich the mechanical properties of tree roots, in order to provide a reference for soil stabilization and soil erosion prevention in planting areas of *Pinus massoniana*. [Methods] The 0—1, 1—2, 2—3, 3—4 and >4 mm root diameter roots of *Pinus massoniana* were taken as the research object. STS5000 universal tensile machine was used to conduct single root test to analyze the tensile and flexion mechanical properties and stress-strain characteristics of different root diameter roots of *Pinus massoniana*. [Results] Both the tensile strength and flexural strength of a single root of *Pinus massoniana* increased with increasing root diameter in accordance with the polynomial relationship of $y = ax^3 + bx^2 + cx$

收稿日期: 2023-10-07

修回日期: 2023-12-08

资助项目: 贵州省科技计划项目“FAST 周边异质生境生态修复模式研究与示范”(黔科合支撑[2021]一般 460 号); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般 200 号, 黔科合支撑[2023]一般 151 号); 贵州科学院省级科研专项(黔科院科专合字[2023]03 号); 贵州科学院创新产业研究启动基金(黔科院 C 字[2021]1 号); 贵州省科学技术基金项目(黔科合基础 ZK[2023]一般 157), 贵州民族大学科研基金项目[(2022)YB13]

第一作者: 张晨(1998—), 男(汉族), 山西省霍州市人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特退化生态系统修复。Email: zc570241717@163.com.

通信作者: 张建利(1981—), 男(汉族), 甘肃省庆阳市人, 博士, 副教授。主要从事喀斯特石漠化生态修复研究。Email: zhangjl-z@163.com.

+ d , having respective R^2 values of 0.91 and 0.69. Both the tensile strength and flexural strength decreased with the increasing root diameter according to $y = ax^{-b}$, having respective R^2 values of 0.50 and 0.35. The root tensile elongation rate increased with increasing root diameter according to the equation $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ($R^2 = 0.17$), while the root flexural elongation rate had no significant correlation with increasing root diameter. Both the tensile elastic modulus and flexural elastic modulus of the root system decreased with increasing root diameter according to $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$, having respective R^2 values of 0.22 and 0.18. The root tensile and flexural stress-strain curves of *Pinus massoniana* showed four stages: elastic deformation, elastic-plastic deformation, strain hardening, and peripheral (fracture) failure. The tensile stress-strain curve generally showed an “upward convex” shape, while the bending stress-strain curve generally showed a “downward concave” shape. The tensile and flexural fracture stages were divided into peripheral fracture and overall fracture modes, both of which were influenced by the peripheral and vascular tissues and had two types of fracture. [Conclusion] The flexural mechanical properties of the root system of *Pinus massoniana* with a root diameter of <3 mm were superior to the tensile mechanical properties, while the tensile mechanical properties of roots with diameters of >3 mm were superior to the flexural mechanical properties. Planting *Pinus massoniana* in slope areas can effectively increase soil erosion resistance.

Keywords: karst area; tensile mechanical properties; flexural mechanical properties; elastic modulus; stress-strain characteristics

中国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一^[1]。《全国水土保持规划》(2015—2030 年)指出,中国水土流失面积 2.95×10^6 km²,占陆地面积的 30.7%,严重的水土流失导致土壤质量下降,影响生态环境,严重制约了社会经济的可持续发展^[2]。因此,合理实施水土保持措施,有助于提高生态系统稳定性,促进经济发展^[3]。

近年来,在水土保持方面越来越重视植物的作用^[4]。一方面,植物地上部分可以截挡降雨、径流,发挥缓冲作用,弱化水流侵蚀强度;另一方面,植物根系通过缠绕固结、分泌物胶结、膨压作用等形成“根—土”复合体,通过根—土接触面的摩擦力,发挥根系力学特性,增加土体抗剪强度、抗蚀能力,并且植物根系增强土壤抗蚀性的作用远高于地上部分^[5-9]。目前国内学者对于根系抗拉力学特性研究居多。苏雪萌等^[10]通过对黄土丘陵区 3 种草本植物根系抗拉力学特性研究发现,植物根系抗拉力随根径的增加呈幂函数正相关,植物根系抗拉强度和弹性模量随根径的增加逐渐降低;石川等^[11]通过对青藏高原东北部黄土区灌木柠条锦鸡儿单根抗拉力学特性研究发现根系周皮断裂和整体断裂模式下,单根抗拉力随根径的增大分别呈指数函数和幂函数增长趋势,单根抗拉强度、弹性模量和极限延伸率随根径增大而降低;吕春娟等^[4]通过对 5 种乔木根系单根拉伸试验发现,5 种乔木根系抗拉力和直径间存在显著的幂函数关系,油松和白桦根系抗拉强度随根径增大以幂函数递减,蒙古栎、落叶松和榆树根系的抗拉强度随直径增大以对数函数递减。目前对于根系的抗折力学特性研究仅

集中于灌木植物,李雪松^[12]、张欣等^[13]研究发现灌木植物根系抗折力随根径的增加均呈幂函数增长趋势,抗折强度随根径的增加呈幂函数减小趋势。在实际土壤环境中,植物根系受到来自不同方向作用力干扰,根系力学特性综合作用响应环境变化,需要更加全面地研究植物根系力学特性。马尾松(*Pinus massoniana*)是中国亚热带地区广泛分布的主要造林和本土树种,具有高生存能力和一定的经济价值,不仅在植被恢复中发挥着关键作用而且亚热带森林自然资源有着重要地位^[14-16],但是目前对马尾松根系力学特性的少之又少,马尾松在水土保持中的作用尚未可知。

综上所述,本文选取马尾松为研究对象,通过单根试验探究不同径级根系马尾松抗拉与抗折力学特性,剖析拉力和折力力学特性下“应力—应变”特征,定量分析马尾松根系力学特性以及马尾松根系在外力作用下的变形特征,分析马尾松种植区土壤稳定性特征,寻找适合发挥马尾松力学特性的种植区域,以期对马尾松固持土壤、防治水土流失提供参考价值。

1 材料与方 法

1.1 研究区基本概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区贵州民族大学生态环境工程学院实验基地($26^{\circ}22'33''N, 106^{\circ}37'28''E$),属于亚热带季风湿润气候,年平均气温 15.2 °C,年均日照时数 $1\ 214.6$ h,相对湿度 85% ,年均降雨量 $1\ 178$ mm 具有昼夜温差大,冬无严寒,夏无酷暑,雨量充沛,雨热同季的特点^[17]。土壤情况见表 1。

表 1 马尾松种植区土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of *Pinus massoniana* planting area

土壤粒径			容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	pH 值	有机质/ %	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
砂粒	粉粒	黏粒							
65.62%	27.20%	7.18%	1.17	16.59	6.44	0.650	0.693	0.107	1.496

1.2 根系的采集

根系采集在 2023 年 6 月。采用完全挖掘法采集试验基地内 9 株长势良好的 3 a 生马尾不同径级的根系。将表皮无明显损伤的根系制成 80~100 mm 长的根段,等分 6 个部分,做 5 个记号,使用游标卡尺依次测量 5 个记号处根径取平均值作为根系直径,按照 0~1,1~2,2~3,3~4,>4 mm 根系径级分别装入自封袋中编号,共计 724 根,置于 4 °C 冰箱储存备用。

1.3 试验方法

试验采用 STS5 000 万能拉力机测定,精度 0.01 N。根系两端预留 20 mm 长度为夹持段。由于夹具位置处存在应力集中导致根系夹断的现象,在试验中对根系夹持段缠绕聚酯纤维防护。抗拉试验使用上下夹具固定根系使其轴向受拉,以 10 mm/min 的加载速度测定不同径级根系的抗拉力学特性。抗折试验将根系两端用左右夹具水平固定,在根段中部同样施加 10 mm/min 的加载速度测定不同径级根系抗折力学特性。为保证根系断裂是由拉力、折力而非其他因素导致,仅选择断裂处位于根系中点或距中点不超过 15 mm 的位置作为有效数据^[18]。

根系“应力—应变”关系曲线由拉力机内置程序自动计算生成并记录。根系强度、延伸率和弹性模量采用以下公式计算^[12,19-20]。

强度公式为:

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

延伸率公式为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

弹性模量公式:

$$E_{0.4} = \frac{\sigma_{0.4}}{\varepsilon_{0.4}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P 为根系抗拉(折)强度(MPa); σ 为应力 N(MPa),其在数值上与抗拉(折)强度相等^[21]; F 为根系极限抗拉(折)力(N); D 为根系平均直径(mm); ε 为根系抗拉(折)线性应变即延伸率; Δl 为根系在拉力(折力)作用下的伸长量(mm); l 为根系的原始长度(mm); $E_{0.4}$ 为弹性模量,其表征根系抵抗弹性形变能力(MPa)。一般而言,植物根系弹性极限为强度极

限的 50%~70%。本文弹性模量取 40% 极限应力、应变时的割线模量^[20]。

1.4 数据分析

采用 Excel 进行数据整理,使用 IBM SPSS Statistics 26 进行不同径级根系抗拉、抗折力学特性相关性分析(Pearson)和方差分析(ANOVA),通过回归分析马尾松抗拉、抗折力学特性与根径的耦合关系。

2 结果与分析

2.1 马尾松根系抗拉力学特性和抗折力学特性

马尾松根系抗拉力学特性和抗折力学特性见表 2。马尾松根系抗拉力分别为 6.47 N(0~1 mm), 17.32 N(1~2 mm), 36.15 N(2~3 mm), 70.99 N(3~4 mm), 196.61 N(>4 mm), 0~1 mm 与 1~2 mm 根径根系抗拉力差异不显著($p > 0.05$), 0~1 mm, 1~2 mm 与 2~3 mm, 3~4 mm、>4 mm 根径抗拉力差异显著($p < 0.05$)。马尾松根系抗拉力随根径增加而增大,马尾松根系抗拉力与根径符合 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ($R^2 = 0.91$) 方程(图 1)。马尾松根系抗折力分别为 13.80 N(0~1 mm), 25.03 N(1~2 mm), 53.06 N(2~3 mm), 83.10 N(3~4 mm), 108.68 N(>4 mm), 0~1 mm 和 1~2 mm 根系抗折力差异不显著($p > 0.05$), 0~1 mm, 1~2 mm 与 2~3 mm, 3~4 mm, >4 mm 根系抗折力差异显著($p < 0.05$)。由图 2 可知,马尾松根系抗折力随根径增加而增大,抗折力与根径符合 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ($R^2 = 0.69$) 方程。由结果可知马尾松 <4 mm 根系抗折力大于抗拉力,>4 mm 根系抗拉力大于抗折力。

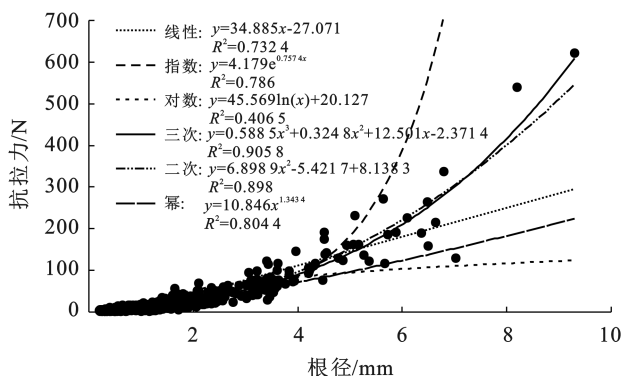


图 1 马尾松根系根径—抗拉力线性拟合

Fig.1 Linear fitting of root diameter tensile strength of *Pinus massoniana* roots

表 2 马尾松根系抗拉和抗折力学特性

Table 2 Tensile and flexural mechanical properties of *Pinus massoniana* roots

根径/mm	抗拉力/N	抗折力/N	抗拉强度/MPa	抗折强度/MPa	抗拉延伸率/%	抗折延伸率/%	抗拉弹性模量/MPa	抗折弹性模量/MPa
0~1	6.47±0.25 ^A	13.80±2.21 ^A	26.00±1.53 ^A	33.39±5.0 ^A	0.01±0.00 ^A	0.02±0.01 ^A	2 072.90±167.39 ^A	1 967.87±503.81 ^A
1~2	17.32±0.76 ^A	25.03±1.44 ^A	10.21±0.38 ^B	14.60±0.72 ^B	0.03±0.01 ^{AB}	0.26±0.15 ^A	840.75±128.79 ^B	580.57±101.69 ^B
2~3	36.15±1.77 ^B	53.06±2.77 ^B	8.15±0.39 ^B	11.70±0.60 ^B	0.05±0.01 ^C	0.05±0.01 ^A	381.86±34.23 ^B	413.53±107.91 ^B
3~4	70.99±3.97 ^C	83.10±8.88 ^C	7.77±0.40 ^B	6.73±0.77 ^B	0.05±0.01 ^C	0.14±0.09 ^A	319.06±51.95 ^B	170.26±88.96 ^B
>4	196.61±25.30 ^D	108.68±17.87 ^D	7.69±0.42 ^B	2.71±0.12 ^B	0.08±0.02 ^D	0.05±0.03 ^A	217.45±58.51 ^B	96.58±36.67 ^B

注:大写字母不同表示根径间的存在显著性差异, $p < 0.05$ 。

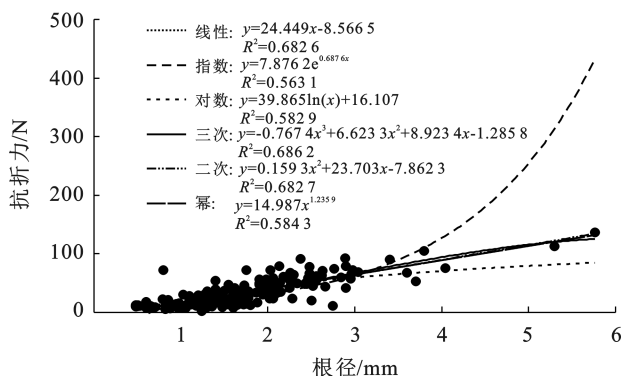


图 2 马尾松根系根径—抗折力拟合曲线
Fig.2 Fitting curve of root diameter bending resistance of *Pinus massoniana* roots

马尾松根系抗拉强度分别为 26.00 MPa(0~1 mm), 10.21 MPa(1~2 mm), 8.15 MPa(2~3 mm), 7.77 MPa(3~4 mm), 7.69 MPa(>4 mm), 0~1 mm 根径根系抗拉强度显著大于>1 mm 根径($p < 0.05$), 1~2, 2~3, 3~4, >4 mm 根系抗拉强度差异不显著($p > 0.05$)。抗拉强度随根径增加而降低, 马尾松根系抗拉强度与根径符合 $y = ax^{-b}$ ($R^2 = 0.50$) 方程(图 3)。马尾松根系抗折强度分别为 33.39 MPa(0~1 mm), 14.60 MPa(1~2 mm), 11.70 MPa(2~3 mm), 6.73 MPa(3~4 mm), 2.71 MPa(>4 mm), 0~1 mm 与 1~2, 2~3, 3~4, >4 mm 根径抗折强度差异显著($p < 0.05$)。根系抗折强度随根径的增加逐渐降低, 马尾松根系抗折强度与根径符合 $y = ax^{-b}$ ($R^2 = 0.35$) 方程(图 4)。由结果可知马尾松<3 mm 根径根系抗折强度大于抗拉强度, >3 mm 根径根系抗拉强度大于抗折强度。

根系延伸率反映根系抵抗土体滑坡的能力^[20]。由表 2 可知, 马尾松不同径级根系抗拉延伸率分别为 0.01%(0~1 mm), 0.03%(1~2 mm), 0.05%(2~3 mm), 0.05%(3~4 mm), 0.08%(>4 mm), 0~2 mm 与 >2 mm 根径根系抗拉延伸率差异显著($p < 0.05$), 2~4 mm 与 >4 mm 根径根系延伸率差异显著($p < 0.05$)。由图 5 可知, 马尾松根系延伸率随根径增加逐渐增大, 马尾松根系抗拉延伸率与根径符合 $y =$

$ax^3 + bx^2 + cx + d$ ($R^2 = 0.17$) 方程。由表 2 可见, 马尾松根系抗折延伸率分别为 0.02%(0~1 mm), 0.26%(1~2 mm), 0.05%(2~3 mm), 0.14%(3~4 mm), 0.05%(>4 mm)。由图 6 可知, 马尾松根径与抗折延伸率间无明显相关性, 但总体上表现出随根径的增大, 抗折延伸率增大的趋势。

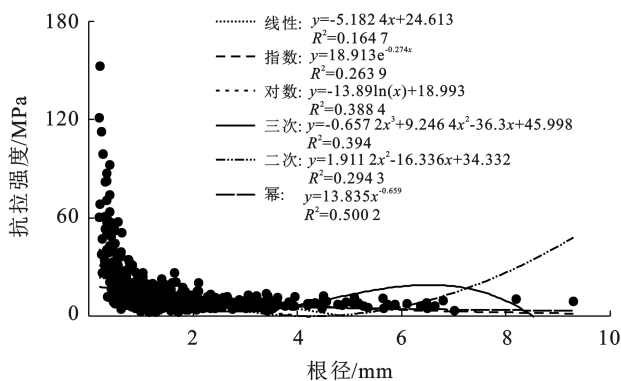


图 3 马尾松根系根径—抗拉强度拟合曲线
Fig.3 Fitting curve of root diameter tensile strength of *Pinus massoniana* roots

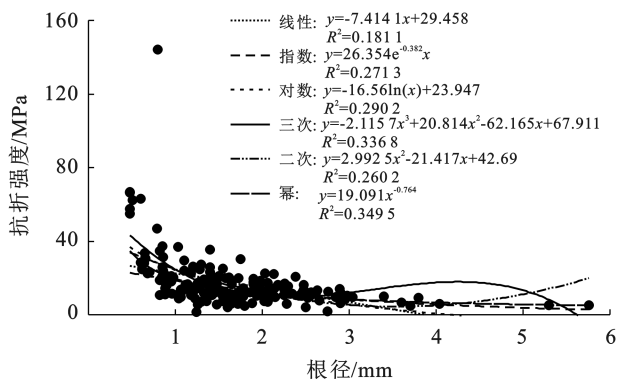


图 4 马尾松根系根径—抗折强度拟合曲线
Fig.4 Fitting curve of root diameter to flexural strength of *Pinus massoniana* roots

植物根系抗拉弹性模量可以用来表征根系的弹塑性^[22]。由表 2 可知, 马尾松根系抗拉弹性模量为 2 072.90 MPa(0~1 mm), 840.75 MPa(1~2 mm), 381.86 MPa(2~3 mm), 319.06 MPa(3~4 mm), 217.45 MPa(>4 mm), 0~1 mm 与 >1 mm 根径根系抗拉弹性模量差异显著($p < 0.05$), 1~2 mm, 2~3 mm,

3~4 mm, >4 mm 根径抗拉弹性模量差异不显著 ($p > 0.05$)。由图 7 可知, 马尾松根系抗拉弹性模量随根径增加而降低, 符合 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ($R^2 = 0.22$) 方程。马尾松根系抗折弹性模量分别为 1 967.87 MPa (0~1 mm), 580.57 MPa (1~2 mm), 413.53 MPa (2~3 mm), 170.26 MPa (3~4 mm), 96.58 MPa (>4 mm), 0~1 mm 与 >1 mm 根径根系抗折弹性模量差异显著 ($p < 0.05$), 1~2 mm, 2~3 mm, 3~4 mm, >4 mm 根径抗折弹性模量差异不显著 ($p > 0.05$)。

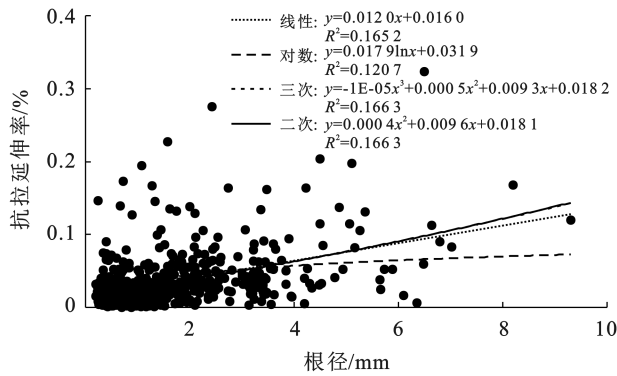


图 5 马尾松根系根径—抗拉延伸率拟合曲线
Fig.5 Fitting curve of root diameter tensile elongation of *Pinus massoniana* roots

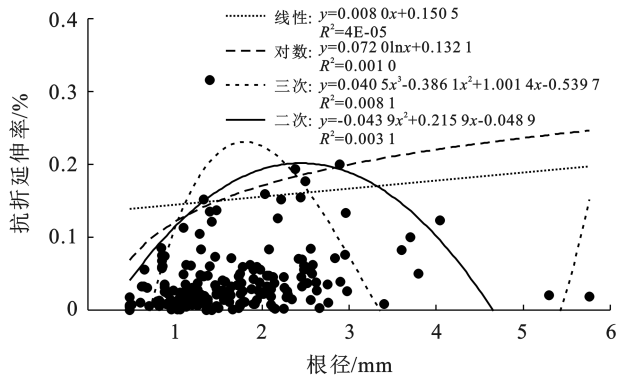


图 6 根径—抗折延伸率拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of root diameter to flexural elongation

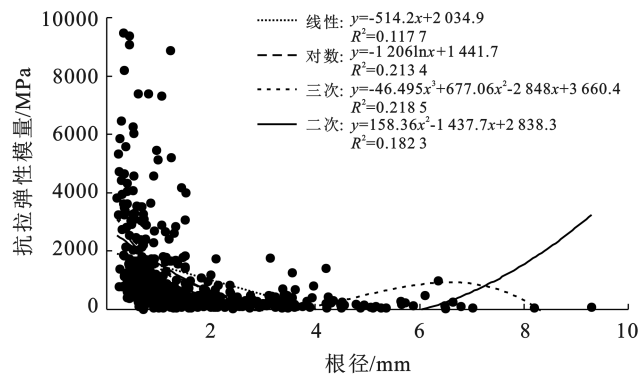


图 7 马尾松根系根径—抗拉弹性模量拟合曲线
Fig.7 Fitting curve of root diameter-tensile elastic modulus of *Pinus massoniana* roots

由图 8 可知, 马尾松根系抗折弹性模量随根径增加而降低, 马尾松根系抗折弹性模量与根径符合 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ($R^2 = 0.18$) 方程。马尾松根径越小, 弹性模量越大, 根系刚度越大, 在外界拉力作用下不易发生变形, 有利于控制小幅度土体变形; 根径越大, 弹性模量越小, 根系对土体大范围变形有更强的缓冲作用。

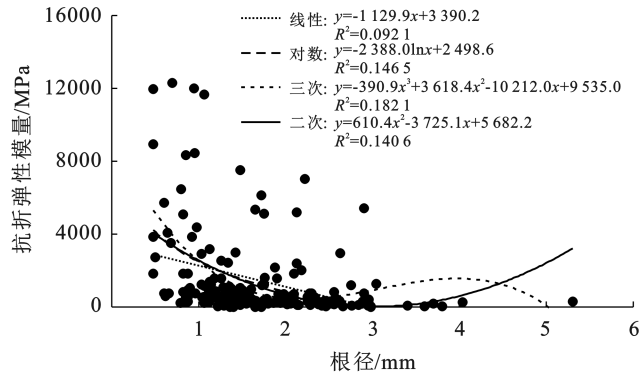
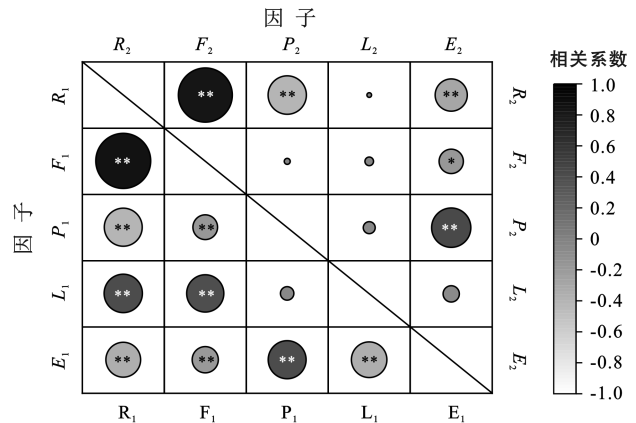


图 8 马尾松根系根径—抗折弹性模量拟合曲线
Fig.8 Fitting curve of root diameter-flexural elastic modulus of *Pinus massoniana* roots

2.2 马尾松根系力学特性与根径

马尾松根径与抗拉、抗折力学特性相关性分析见图 9。马尾松根径与抗拉力、抗折力、抗拉延伸率呈极显著正相关关系 ($p < 0.01$), 与抗拉强度、抗折强度、抗拉弹性模量、抗折弹性模量呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$)。根系径级与抗折力呈极显著正相关关系 ($p < 0.01$), 与抗折强度、抗折弹性模量呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$)。结果表明, 根径是影响根系抗拉力学特性的主要影响因素之一。



注: * 表示相关性显著 ($p < 0.05$), ** 表示相关性极显著 ($p < 0.01$); R_1 表示受拉力根径; F_1 表示抗拉力; P_1 表示抗拉强度; L_1 表示抗拉延伸率; E_1 表示抗拉弹性模量; R_2 表示受折力根径; F_2 表示抗折力; P_2 表示抗折强度; L_2 表示抗折延伸率; E_2 表示抗折弹性模量。

图 9 马尾松根径与力学特性的相关性分析
Fig.9 Correlation analysis between root diameter and mechanical properties of *Pinus massoniana*

2.3 马尾松根系“应力—应变”曲线特征

如图 10—11 所示,马尾松根系拉伸过程可分为弹性形变、弹塑性形变、应变硬化和断裂 4 个阶段。在拉伸初期,根系进入弹性形变阶段。弹性形变阶段根系应力、应变呈线性增加,卸去拉伸力作用后,根系形态可恢复至受拉变形前的初始状态,内部未产生残余变形和残余应力。之后根系进入弹塑性形变阶段,应力、应变逐渐呈“上凸”形非线性变化,该阶段根系存在弹性形变和塑性变形。随着应变的增加,根系进入应变硬化阶段,该阶段根系进行塑性变形,根系发生不可逆变形。应力硬化阶段结束时根系到达拉应力峰值,进入断裂阶段。根据马尾松根系周皮和次生维管组织不同受力状态,可分为周皮断裂和整体断裂

两种断裂模式。在根系周皮断裂模式中,马尾松根系周皮先发生断裂,周皮和次生维管组织相对滑移距离逐渐增大,两者间剪切力逐渐降低,直至试验结束。在周皮断裂模式中,部分根系“应力—应变”曲线在断裂阶段呈锯齿状波动,这是由于应变硬化阶段根系发生了局部破坏,并不断产生应力集中的现象导致。在马尾松根系整体断裂模式中,马尾松根系周皮和次生维管组织同时发生断裂,拉应力骤降。一部分周皮组织尚未完全断裂,产生应力集中现象,产生一个峰值点。两种断裂模式中,整体断裂的马尾松根系有着较大的应变,这是由于在整体断裂模式下,马尾松根系周皮和次生维管组织同时承受拉伸力,使得根系可以承受较大的变形。

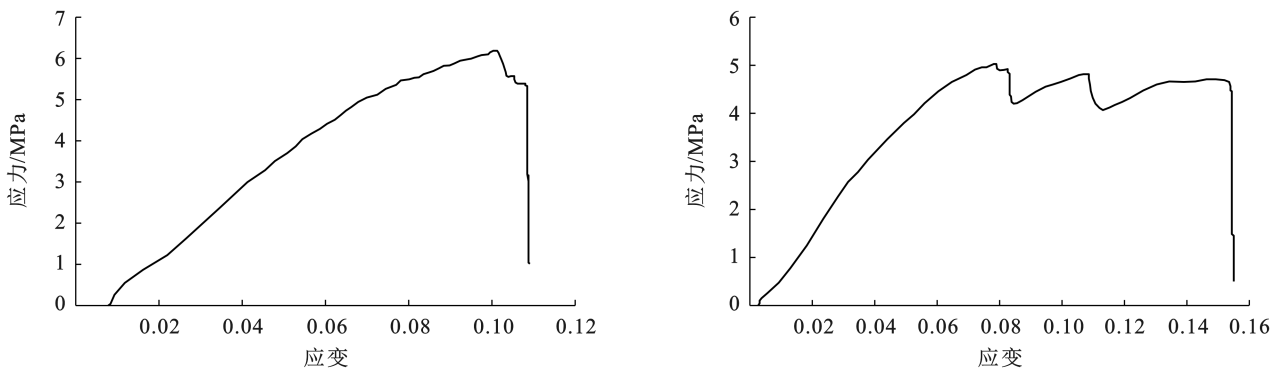


图 10 马尾松根周皮的抗拉试验的应力与应变曲线

Fig.10 Stress and strain curves of root pericarpus of *Pinus massoniana* plantation in tensile tests

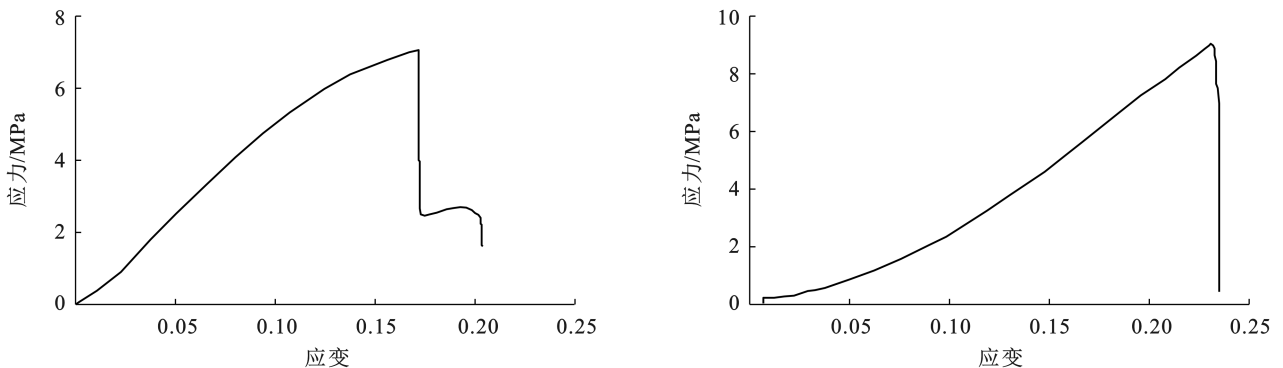


图 11 马尾松根整体的抗拉试验的应力与应变曲线

Fig.11 Stress and strain curves of whole root of *Pinus massoniana* in tensile test

马尾松根系抗折“应力—应变”曲线如图 12,图 13 所示。马尾松根系抗折过程分为弹性形变、弹塑性形变、应变硬化及断裂 4 个阶段。根系受折力初期进入弹性形变阶段,“应力—应变”曲线呈线性变化,根系发生弹性形变;根系弹塑性形变阶段呈“下凹”形非线性变化,在该阶段根系包含弹性形变和塑性变形;随折力的作用根系进入应变硬化阶段,“应力—应变”曲线呈线性变化,应力快速增加,根系发生不可逆

塑性变形至根系开始断裂。根据马尾松根系各组织受力状态不同,可分为周皮断裂和整体断裂两种断裂模式。周皮断裂根据断裂方向不同分为两种断裂类型(图 12)。一部分根系从施力点相对方向发生断裂,“应力—应变”曲线峰值点位于锯齿段起始位置,一部分根系沿施力方向发生折断,“应力—应变”曲线峰值出现在锯齿段中部。两种不同断裂模式是由于根系对折力的敏感程度不同导致。根系抗折整体断

裂模式(图 13),断裂阶段根系周皮与次生维管组织同时发生断裂,该阶段“应力—应变”曲线发生跌落,应力骤降。然而该阶段周皮或次生维管组织存在局

部连接现象,其局部连接断裂在“应力—应变”曲线上出现小幅度上升,随着应变的持续进行,之后全部断裂。

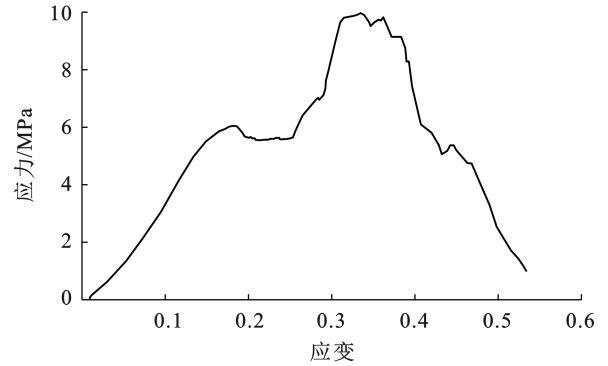
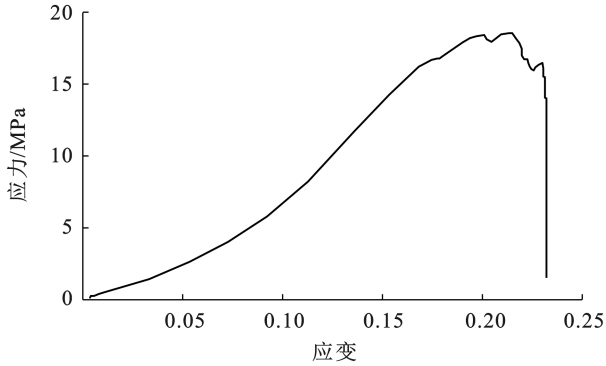


图 12 马尾松根周皮的抗折试验的应力与应变曲线

Fig.12 Stress and strain curves of root pericarpus of *Pinus massoniana* in flexural test

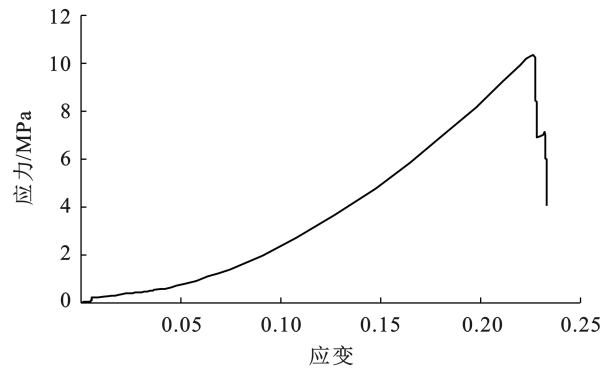
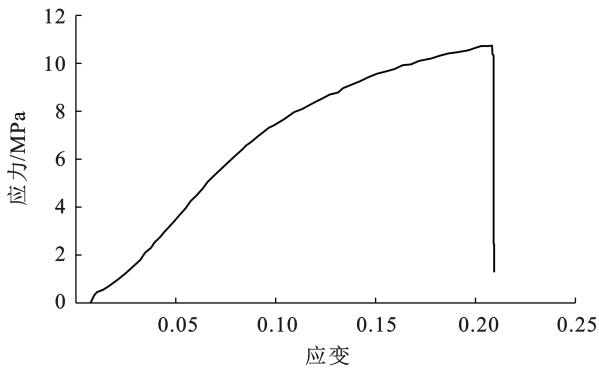


图 13 马尾松根整体抗折的应力与应变曲线

Fig.13 Stress and strain curves of whole root of *Pinus massoniana* in flexural test

3 讨论

土壤剪应力通过“根—土”界面的摩擦传递至根系纤维,使根系调动其抗拉能力,所以根系抗拉能力大小对土壤稳定性有直接影响^[21, 23]。在实际土体坍塌位移时,土壤与石块对根产生径向作用力,从而导致根产生径向损伤^[12],马尾松根的抗拉力和抗折力随根径的增加而增大,其符合 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 方程。这与前人关于抗拉力与根径耦合研究结果不同,李雪松等^[12]、李宏斌等^[22]和吕春娟等^[4]的研究表明,抗拉力与根径呈幂函数关系;与 Tosi M.^[24]的研究结果相似,抗拉力与根径符合二次多项式。目前关于根系抗折力研究较少,且与前人关于抗折力与根径呈幂函数正相关关系的结果不同^[12, 25]。其原因可能是不同植物种类其内含物含量不同所致,吕春娟等^[26]、王争贤等^[27]发现植物根系的纤维素、半纤维素和木质素含量影响植物根系的力学特性。抗拉强度是衡量植物根系对土壤加固能力的重要指标^[18],抗

折强度反映根系抵抗外界径向作用力的能力^[13, 24]。抗拉强度和抗折强度与根径之间呈幂函数负相关关系,这与前人的研究结论一致^[28-29]。

根系抗折弹性模量和延伸率是衡量根系变形能力的重要指标^[21]。马尾松根系抗拉力、抗折延伸率随根径的增大而逐渐增加,这与李宏斌等^[22]、刘亚斌等^[19]的研究结果类似。马尾松的抗拉、抗折弹性模量与根径呈负相关关系,与王萍花等^[20]、苏雪萌等^[10]的研究结果类似。根系的延伸率越大,则根系的弹性越好,抵抗塑性变形的能力越强;根系的弹性模量越大,则根系的刚度越大,其抵抗弹性形变的能力越强^[28]。马尾松粗根弹性模量较低,在土体发生滑移、坍塌时粗根系的弹性形变有较强的缓冲作用;由于细根弹性模量较大,在土体小程度滑移时发挥拉应力作用,有效控制土体变形,但细根有一定的脆性,难以维持大范围的土体滑移^[11]。

当根系受到来自不同方向的外力作用时,周皮和次生维管组织的受力模式导致应力和应变发生不同

的变化,这与李雪松等^[12]人的研究结果类似。在拉伸断裂过程中,马尾松根系周皮断裂和整体折断模式表现出两种类型,这是因为马尾松根系周皮和次生维管组织间的力学特性不同导致。如果周皮和次生维管组织同时达到各自的极限强度,根系以整体断裂模式发生破坏;而当周皮先达到抗拉强度,则单根发生周皮断裂破坏^[11]。在径向断裂过程中,不同的马尾松根系直径的周皮和次生维管组织间细胞结构排列紧密程度不同,导致对应力和应变的敏感程度不同,发生同时断裂或依次断裂^[30]。在轴向拉伸和径向折断的实验中,未发现次生维管组织先断裂的情况,这可能是由于次生维管组织的抗拉、抗折特性优于周皮,或周皮与次生维管组织的受力和变形不均有关,具体原因有待进一步研究。

马尾松根系发达,同时根系分泌物促进根系与土壤结合,形成微团聚体,进而提高了土壤的稳定性^[7]。土壤产生随机失稳或滑移时,植物根系与土壤剪切面呈不同的角度,根系承受轴向拉力和径向折力^[13]。马尾松 0~3 mm 根系在土体中水平分布较广,由于细根抗折强度较好且抗拉、抗折的延伸率较低,可有效减小土体的滑动,更有利于提高土壤顺坡向的稳定性^[11]。马尾松 >4 mm 的根系深入深层土壤^[17],具有较大的抗拉、抗折力,可承受较大的土壤滑移。因此,马尾松对土壤侵蚀具有较强的抵抗力,适宜种植在具有土体坍塌位移风险的边坡。

4 结论

(1) 马尾松单根抗拉力和抗折力随根径增加均符合 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$, R^2 分别为 0.91, 0.69 增长;抗拉强度与抗折强度随根系增加径级符合 $y = ax^{-6}$ 降低, R^2 分别为 0.50, 0.35;根系抗拉延伸率随根径增加符合 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ($R^2 = 0.17$) 增加,根系抗折延伸率随根径增加无明显相关性;根系抗拉与抗折弹性模量随根径增加符合 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$, R^2 分别为 0.22, 0.18。研究发现马尾松 <3 mm 根系根径抗折力学特性优于抗拉力学特性, >3 mm 根系根径抗拉力学特性优于抗折力学特性。

(2) 马尾松根系抗拉“应力—应变”曲线总体呈“上凸”形,根据马尾松根系周皮和次生维管组织不同受力状态,可分为周皮断裂和整体断裂两种断裂模式。抗折“应力—应变”曲线总体呈“下凹”形,根系对折力的敏感程度可分为周皮断裂与整体断裂模式。

研究发现马尾松 <3 mm 根系根径抗折力学特性优于抗拉力学特性, >3 mm 根系根径抗拉力学特性优于抗折力学特性, <3 mm 马尾松根系其刚度较

大,可以控制土体大范围变形,所以马尾松可以优先考虑植于径向折力较大的山坡等地。本试验研究结果充实乔木根系力学特性,以及为马尾松固土护坡以及水土保持研究提供科学依据。

参考文献 (References)

- [1] 张宇婷,肖海兵,聂小东,等.基于文献计量分析的近30年国内外土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(4):797-810.
Zhang Yuting, Xiao Haibing, Nie Xiaodong, et al. Evolution of research on soil erosion at home and abroad in the past 30 year: Based on bibliometric analysis [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(4):797-810.
- [2] 欧阳帅,项文化,陈亮,等.南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制[J].水土保持学报,2021,35(5):1-9.
Ouyang Shuai, Xiang Wenhua, Chen Liang, et al. Regulation mechanisms of forest vegetation restoration on water and soil erosion in mountainous and hilly area of Southern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):1-9.
- [3] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017,31(5):1-8.
Peng Xudong, Dai Quanhou, Li Changlan. Research progress on the process and mechanism of soil water loss or leakage on slope in southwest karst of China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(5):1-8.
- [4] 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.
Lyu Chunjuan, Chen Lihua, Zhou Shuo, et al. Tensile properties of roots of different trees [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(Suppl.1):329-335.
- [5] 杨锐婷,格日乐,郝需婷,等.不同类型土壤—柠条根系复合抗剪力学特性的比较[J].土壤通报,2021,52(4):821-827.
Yang Ruiting, Ge Rile, Hao Xuting, et al. Comparison of composite shear mechanical properties of different types of soil-like *Caragana korshinskii* root [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021,52(4):821-827.
- [6] 王贵荣,王凯,袁林,等.紫花苜蓿根系—砂土复合体力学特性[J].西安科技大学学报,2023,43(1):99-108.
Wang Guirong, Wang Kai, Yuan Lin, et al. Mechanical properties of alfalfa root-soil composite [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(1):99-108.
- [7] 郑文娇,韦杰,唐强,等.紫色土埂坎根—土复合体土水特性与抗剪强度[J].水土保持学报,2023,37(4):75-82.

- Zheng Wenjiao, Wei Jie, Tang Qiang, et al. Soil-water characteristics and shear strength of root-soil composites from purple-soiled bunds [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 75-82.
- [8] SYildiz A, Graf F, Rickli C, et al. Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus [J]. *CATENA*, 2018, 166: 98-113.
- [9] 钟荣华, 贺秀斌, 鲍玉海, 等. 狗牙根和牛鞭草的消浪减蚀作用 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 133-140.
- Zhong Ronghua, He Xiubin, Bao Yuhai, et al. Role of *Cynodon dactylon* L. and *Hemarthria altissima* in wave attenuation and erosion control [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 133-140.
- [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.
- Su Xuemeng, Liu June, Zhou Zhengchao, et al. Root tensile and mechanical properties of three typical plants in the loess hilly region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3): 259-264.
- [11] 石川, 梁燊, 刘亚斌, 等. 青藏高原东北部黄土区灌木柠条锦鸡儿单根抗拉力学特性研究 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 184-192.
- Shi Chuan, Liang Shen, Liu Yabin, et al. Research on tensile resistance characteristics of single root of *Caragana korshinskii* Kom. in loess region of Northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 184-192.
- [12] 李雪松, 刘静, 王博, 等. 黑沙蒿直根的材料力学特性研究 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 353-358.
- Li Xuesong, Liu Jing, Wang Bo, et al. Study on the material mechanical properties of straight roots of *Artemisia ordosica* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 353-358.
- [13] 张欣, 刘静, 郑永刚, 等. 4 种植物直根抗折力和抗折强度的研究 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 338-342.
- Zhang Xin, Liu Jing, Zheng Yonggang, et al. Study on the anti-fracture mechanical properties of four kinds of straight roots [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 338-342.
- [14] 聂坤, 徐明, 文春玉, 等. 黔中地区不同林龄马尾松群落细根功能性状及其异速生长关系 [J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(6): 10-17.
- Nie Kun, Xu Ming, Wen Chunyu, et al. Fine root functional traits and its allometric growth relationship of *Pinus massoniana* forests between different stand ages in Central Guizhou [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(6): 10-17.
- [15] 曾林辉, 周蕾, 寇亮, 等. 基于生长测量仪监测的亚热带地区马尾松多时间尺度径向变化及其与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2023, 43(16): 6637-6648.
- Zeng Linhui, Zhou Lei, Kou Liang, et al. Dendrometer-derived radial variations of *Pinus massoniana* at multiple time scales and its response to environmental factors in subtropical region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6637-6648.
- [16] 肖欣, 韩天一, 欧阳勋志. 天然马尾松林细根生物量分布及其与土壤理化性质相关性研究 [J]. *西部林业科学*, 2015, 44(3): 61-67.
- Xiao Xin, Han Tianyi, Ouyang Xunzhi. Fine root biomass distribution and its relationship with soil in *Pinus massoniana* natural forest [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2015, 44(3): 61-67.
- [17] 宁晓波, 项文化, 方晰, 等. 贵阳花溪区石灰土林地土壤重金属含量特征及其污染评价 [J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 2169-2177.
- Ning Xiaobo, Xiang Wenhua, Fang Xi, et al. Heavy metal concentrations and pollution assessment of limestone forests in Huaxi District, Guiyang City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2169-2177.
- [18] 蒋坤云, 陈丽华, 杨苑君, 等. 华北油松—落叶松根系抗拉强度与其微观结构的相关性研究 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 8-12.
- Jiang Kunyun, Chen Lihua, Yang Yuanjun, et al. Relationship between tensile strength and selected anatomical features of two different conifer species' roots in North China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 8-12.
- [19] 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.
- Liu Yabin, Li Shuxia, Yu Dongmei, et al. Experiment on single root tensile mechanical properties of typical herb species in loess region of Xining Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 157-166.
- [20] 王萍花, 陈丽华, 冀晓东, 等. 4 种常见乔木单根拉伸的应力应变曲线分析 [J]. *水土保持通报*, 2012, 32(3): 17-22.
- Wang Pinghua, Chen Lihua, Ji Xiaodong, et al. Analysis of stress-strain curves for four common arbor root systems [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(3): 17-22.
- [21] 冯旭环, 周璐, 熊伟, 等. 大渡河干热河谷区本土优势灌草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 Xuhuan, Zhou Lu, Xiong Wei, 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.
- [22] 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.
- [23] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength [J]. Plant and Soil, 2008,305(1):207-226.
- [24] 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.
- [25] 崔天民,格日乐,杨锐婷,等.内蒙古中西部3种典型乡土植物根系抗折力学特性[J].水土保持学报,2021,35(2):138-143. Cui Tianmin, Ge Rile, Yang Ruiting, et al. Root anti-fracture and mechanical properties of three typical native plants in Central and Western Inner Mongolia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(2):138-143.
- [26] 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. Lü Chunjuan, Chen Lihua. Relationship between root tensile mechanical properties and its main chemical components of typical tree species in North China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(23):69-78.
- [27] 王争贤,格日乐,崔天民,等.固沙先锋树种沙柳枝条力学特性及其影响因素[J].中国农业大学学报,2021,26(11):84-96. Wang Zhengxian, Ge Rile, Cui Tianmin, et al. Mechanical properties of the branches of *Salix psammophila* and its influencing factors [J]. Journal of China Agricultural University, 2021,26(11):84-96.
- [28] 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. Huang Guangjie, Duan Qingsong, Li Jianxing, 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.
- [29] 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. Ouyang Qianchao, Wei Yang, Zhou Xia, et al. Root tensile properties of the herbaceous plants for slope protection in earth-rocky mountain area, Northern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017,15(4):35-41.
- [30] 刘鹏飞,刘静,朱宏慧,等.4种植物生长旺盛期侧根分支处与相邻上级直根抗折特性的差异[J].应用生态学报,2016,27(1):33-39. Liu Pengfei, Liu Jing, Zhu Honghui, et al. Difference of anti-fracture mechanical characteristics between lateral-root branches and adjacent upper straight roots of four plant species in vigorous growth period [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(1):33-39.