青藏高原东北部 4 种灌木主根和侧根抗拉力学特性比较

周林虎[1], 胡夏嵩[1,2], 刘昌义[1], 徐志闻[1], 许 桐[1], 申紫雁[1]

(1. 青海大学 地质工程系, 青海 西宁 810016; 2. 中国科学院 青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008)

摘 要: [目的] 开展青藏高原东北部黄土区 4 种灌木植物主根和侧根抗拉力学强度试验,探讨主根和侧根抗拉力学特性关系,为深入研究植物根系固土护坡力学机理提供参考。[方法] 选取西宁盆地长岭沟流域作为研究区,对生长期为 3 a 的柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、中宁枸杞(*Lycium chinense*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)和霸王(*Sarcozygium xanthoxylon*)4 种优势灌木主根和侧根进行室内单根拉伸试验,确定其主根和侧根抗拉力、抗拉强度和杨氏模量及其与根径之间的关系;在此基础上,进一步分析了 4 种灌木主根和侧根根径、抗拉力、抗拉强度和杨氏模量之间的关系。[结果] 柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王主根抗拉力分别为侧根的 28.45,13.21,11.01,7.35 倍,主根抗拉强度分别为侧根的 0.67,1.17,0.68,1.22倍,主根杨氏模量分别为侧根的 2.00,2.39,2.82,2.48 倍。[结论] 4 种灌木植物主根抗拉力均显著大于侧根;柠条锦鸡儿和白刺主根抗拉强度小于侧根,而中宁枸杞和霸王主根抗拉强度大于侧根;4 种灌木植物主根杨氏模量显著大于侧根,说明其主根相对于侧根不易发生形变,对边坡浅层稳定性贡献亦显著于侧根。

关键词: 青藏高原; 灌木植物; 主根; 侧根; 抗拉强度; 杨氏模量

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2019)03-0093-08 **中图分类号**: S154.4, S157

文献参数: 周林虎, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 青藏高原东北部 4 种灌木主根和侧根抗拉力学特性比较[J]. 水土保持通报,2019,39(3):93-100. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.016; Zhou Linhu, Hu Xiasong, Liu Changyi, et al. Comparison of tensile resistance properties of main roots and lateral roots among four shrub species in Northeast Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(3): 93-100.

Comparison of Tensile Resistance Properties of Main Roots and Lateral Roots Among Four Shrub Species in Northeast Qinghai-Tibet Plateau

Zhou Linhu[1], Hu Xiasong[1,2], Liu Changyi[1], Xu Zhiwen[1], Xu Tong[1], Shen Ziyan[1]

(1. *Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xi'ning, Qinghai* 810016, *China*; 2. *Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xi'ning, Qinghai* 810008, *China*)

Abstract: [Objective] The tensile strength tests were carried out of the main roots and lateral roots of four shrub species in the loess area of Northeast Qinghai-Tibet Plateau, and the relationship between mechanical properties of main roots and lateral roots was discussed, which provided a reference for investigating the mechanical mechanism of plant roots in stabilizing soils and slopes. [Methods] The drainage area of Changlinggou in Xining Basin was selected as the studying area, and the tensile force, tensile strength, Young's modulus were measured by laboratory single root tensile test of four three-year-old shrub species(*Caragana korshinskii*, *Lycium chinense*, *Nitraria tangutorum* and *Sarcozygium xanthoxylon*). Then the relationship between root diameter, tensile force, tensile strength and Young's modulus of main roots and lateral roots of four species was further analyzed. [Results] The tensile forces of main roots of *C. korshinskii*, *L. chinense*,

收稿日期:2019-02-13 **修回日期**:2019-03-18

资助项目:国家自然科学基金项目"植物降盐效应及其增强土体抗剪强度机理"(41572306);中国科学院"百人计划"资助项目(Y110091025);青海省自然科学基金项目"青海柴达木盆地盐湖区盐生植物改良土地盐渍化机理研究"(2014-ZJ-906)

第一作者:周林虎(1995—),男(汉族),青海省民和县人,硕士研究生,研究方向为地质灾害及其防治。E-mail:18997295192@163.com。

通讯作者:胡夏嵩(1965—),男(汉族),河南省开封市人,博士,教授,主要从事环境岩土工程与地质工程等方面的教学与研究。E-mail:huxiasong@tsinghua.org.cn。

N. tangutorum and *S. xanthoxylon* were 28.45, 13.21, 11.01 and 7.35 times of lateral roots, the tensile strengths of main roots were 0.67, 1.17, 0.68 and 1.22 times of lateral roots, and the Young's moduluses of main roots were 2.00, 2.39, 2.82 and 2.48 times of lateral roots, respectively. [Conclusion] The tensile forces of main roots were significantly higher than lateral roots for four shrub species. The tensile strengths of main roots of *C. korshinskii* and *N. tangutorum* were lower than lateral roots, while the tensile strengths of main roots of *L. chinense* and *S. xanthoxylon* were higher than lateral roots. The Young's moduluses of main roots were significantly higher than lateral roots for four species, it showed that the main roots were not easy to deform in comparison with the lateral roots, and the contribution of main roots to the stability of the shallow slope is significantly higher than lateral roots.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; shrub plant; main root; lateral root; tensile strength; Young's modulus

国内外大量研究结果表明,植被护坡力学效应包括浅层根系加筋作用、垂直深根锚固作用和侧根斜向牵引作用[1-7],植物根系抗拉力学特性可作为评价根系力学效应的重要力学性质[8-9]。左志严等[10]通过对生长于内蒙古中西部地区,生长期为 4 a 的柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)根系进行单根拉伸试验,指出 3 种植物单根极限抗拉力随根径的增加而增大,单根极限抗拉强度随根径的增加而减小,且 2 者之间呈幂函数负相关关系。欧阳前超等[11]对生长于山西土石山区的黑麦草(*Lolium perenne*)、香根草(*Vetiveria zizanioides*)和百喜草(*Paspalum notatum*)3 种草本根系进行单根抗拉力学试验,结果表明其平均极限抗拉强度关系表现为百喜草(116.226 MPa)>黑麦草(50.839 MPa)>香根草(49.650 MPa),并指出百喜草的固土性能明显优于黑麦草和香根草。田佳等[12]通过对种植于宁夏盐池县高沙窝林场,生长期为 5 a 的花棒(*Hedysarum scoparium*)和沙柳(*Salix cheilophila*)根系进行单根拉伸试验,指出花棒和沙柳根系单根最大拉力、抗拉强度和杨氏模量均与根径之间呈幂函数关系。Capilleri 等[13]对生长于意大利西西里岛地区的芦笋(*Asparagus officinalis*)根系进行了室内单根拉伸试验,结果表明其抗拉强度为 2.5~8.0 MPa,并指出其可有效提高边坡稳定性。Abdi 等[14]对生长于伊朗北部德黑兰地区的欧洲鹅耳枥(*Carpinus betulus*)根系进行单根拉伸试验,结果表明其根径为 0.3~4.5 mm 时,抗拉强度为 11.72~62.20 MPa,且 2 者之间呈幂函数关系。由以上相关研究结果可知,有关植物根系抗拉力学特性方面的研究主要是对其主根抗拉力学特性的研究,即已有的研究更多的表现在植物主根对边坡土体的加筋和锚固作用,而有关植物侧根抗拉力学特性及其与主根抗拉力学特性对比等方面,均有待于进一步开展深入研究。

青藏高原因其地处特殊的地理位置,成为中国典型的生态脆弱区,其生态环境的保护建设与人类经济社会和谐发展,对中华民族乃至全球未来发展有着特殊的作用和意义[15]。近年来,随着青藏高原东北部地区基础设施建设与资源开发力度和规模的不断加大和提升,人类工程活动在一定程度上导致了对高原资源盲目和不合理开发利用,使得本来就十分脆弱且极不稳定的高原环境承受着愈来愈沉重的压力,进而引发大规模水土流失、土地沙漠化、泥石流和滑坡等地质灾害,且呈现出逐步恶化的变化趋势[16-17]。这种高原生态环境的逐步恶化,对当地经济建设和社会发展带来了影响,且一定程度构成了较严重的潜在威胁,因此开展青藏高原东北部地区生态环境的保护具有重要的现实意义。基于以上实际情况,本项研究对青藏高原东北部黄土区 4 种生长期为 3 a 的优势灌木主根和侧根进行了单根拉伸试验,分析 4 种灌木主根和侧根抗拉力学特性关系,以期为深入研究植物根系固土护坡力学机理提供参考。

1 研究区概况

本项研究自建试验区位于青藏高原东北部的西宁盆地长岭沟流域,其地理坐标为东经 101°42′,北纬 36°36′,海拔为 2 315~2 570 m[9]。试验区边坡坡度为 30°,属于自然土质边坡,坡向向南,土质类型为粉土。该区属寒冷半干旱高原大陆性气候,多年平均气温为 5.6 ℃,年均降水量为 386.2 mm,蒸发量为 1 762.8 mm[18],降水主要集中在每年 6~9 月份,占全年降水量 70%~80%左右,且多以暴雨和阵雨形式出现,具有历时短、强度大和降雨集中等特点[19-20]。该区域植被类型是以针茅、蒿类为主的草原植被,主要植物有长芒草(*Stipa bungeana*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、马先蒿(*Pedicularis resupinata*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、赖草(*Leymus secalinus*)和灌木亚菊(*Ajania fruticulosa*)等,零星分布有能形成群落的甘蒙锦鸡儿(*Caragana opulens*)灌丛、鬼剑锦鸡儿(*Caragana jubata*)灌丛,伴生有白刺、北方枸杞和沙棘等灌木植物[21-23]。

2　材料与方法

2.1　试验材料

根据研究区寒冷半干旱气候条件,本项研究筛选出柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王 4 种灌木植物作为试验对象,其生长特征以及水土保持特性主要表现如下:

(1) 柠条锦鸡儿为豆科、锦鸡儿属灌木植物,根系发达,具有较强的耐旱能力和抗逆性,可作为人工植被建植的主要优良灌木植物,亦是北方地区水土保持和治沙造林的先锋植物[24]。

(2) 中宁枸杞为茄科、枸杞属灌木植物,根系粗长而发达,具有耐旱、耐寒、耐贫瘠和耐盐碱等特点,且在干旱荒漠区仍能正常生长[25]。

(3) 白刺为蒺藜科、白刺属灌木植物,其根系发达、再生能力强、抗逆性强、耐干旱盐碱,是优良的防风固沙灌木种,可在防治风沙危害、改良荒漠化土壤和保持生态平衡中起到重要作用[26]。

(4) 霸王为蒺藜科、霸王属灌木植物,其主根粗壮但相对不发达,侧根较为发达,长度超过主根数倍[20];具有抗风沙、耐干旱的特点,可作为植被恢复的先锋物种[27]。

2.2　试验方法

2.2.1　*试验装置*　本项研究对区内 4 种灌木植物根系拉伸试验采用 HY-0580 型电子万能材料试验机(图 1)。该实验仪器主要由数据采集系统和工作系统 2 部分组成,其主要工作原理为:通过工作系统中的力和位移传感器记录试验过程中试样所受到的抗拉力和伸长量,然后传输至数据采集系统,通过与试验机相匹配的计算机软件对数据进行自动处理后,即可得到相应的单根最大抗拉力和伸长量,同时绘制出单根抗拉力和伸长量之间的关系曲线。



a 万能材料试验机　　b 单根拉伸试验

图 1　单根力学强度实验设备和单根拉伸试验

2.2.2　*取样方法*

(1) 野外试验区原位挖掘采集试样。在试验区采集试样时,为有效确保根系完整性,将原位挖掘出的植株移放至试样盆内,并及时带回实验室。

(2) 清洗根—土复合体试样。将根—土复合体试样采用清水冲洗干净,并选取其中顺直且表面完好的根系作为试验根系。

(3) 侧根剪切。将复合体试样中所清洗出的根系侧根用剪刀剪下,并统计侧根数量和根径。

2.2.3　*单根拉伸试验方法*　本项试验中,4 种灌木主根根长为 130～980 mm,侧根根长为 54～280 mm,故将主根拉伸标距设定为 100 mm,侧根拉伸标距设定为 50 mm。在室内开展单根拉伸试验时,采用游标卡尺分别在根段上部、中部和下部 3 个不同部位测量其根径,并取其平均值作为该根段的根径,当一组单根拉伸试验结束后,将根径值输入与试验机相匹配的计算机软件 AnyTest Professional 中,该软件通过对试验数据进行分析处理,即可绘制出抗拉力值—变形关系曲线。

在单根抗拉试验过程中,为有效避免根系在夹具中发生滑动现象,采用在上、下两夹具夹头两端粘贴胶片、缠绕和增加柔性物质的方法来增大根系与夹具之间的摩擦力[28]。选取断裂破坏发生在根系中部或接近中部的试验结果作为有效试验结果,若根系在两端发生断裂,则不计入有效数据,重新进行拉伸试验。

区内 4 种灌木植物单根抗拉强度计算公式如下[20]:

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

式中:P——单根抗拉强度(MPa);F——单根最大抗拉力(N);D——根径(mm),D 包括 D_1 和 D_2,D_1 为主根根径,D_2 为侧根根径。

区内 4 种灌木植物的杨氏模量计算公式如下[29]:

$$E_r=\frac{4FL_0}{\pi D^2 \Delta L} \tag{2}$$

式中:E_r——杨氏模量(MPa);F——单根最大抗拉力(N);D——根径(mm);L_0——根系原长(mm);ΔL——根系最大伸长量(mm)。

3　结果与分析

3.1　4 种灌木主根和侧根抗拉力及其与根径之间关系

本项试验中,柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王其主根根径分别为 1.26～4.93,1.62～6.07,2.1～6.41,2.16～5.23 mm,其中白刺主根平均根径均大

于其他 3 种灌木，即分别为霸王、中宁枸杞和柠条锦鸡儿的 1.12，1.15，1.38 倍；4 种灌木主根平均抗拉力由大至小依次为柠条锦鸡儿(248.95 N)＞中宁枸杞(236.55 N)＞霸王(226.08 N)＞白刺(190.10 N)，柠条锦鸡儿主根抗拉力与中宁枸杞和霸王差异性相对不显著，而与白刺抗拉力差异性相对较为显著，即柠条锦鸡儿平均单根抗拉力分别较中宁枸杞、霸王和白刺大 12.40，22.87，58.85 N(表 1)。

表 1 试验区 4 种灌木主根抗拉力 F_1 及其与根径 D_1 之间拟合方程

植物名称	平均根径 D_1/mm	平均抗拉力 F_1/N	回归方程	相关指数 R^2
柠条锦鸡儿	3.02±1.10	248.95±79.39	$F_1=103.02D_1^{0.81}$	$R^2=0.866\ 5$
中宁枸杞	3.63±1.16	236.55±49.85	$F_1=109.21D_1^{0.61}$	$R^2=0.844\ 4$
白 刺	4.18±1.28	190.10±71.81	$F_1=33.92D_1^{1.20}$	$R^2=0.845\ 0$
霸 王	3.75±0.91	226.08±46.33	$F_1=78.35D_1^{0.81}$	$R^2=0.903\ 8$

注：①该表中平均根径和平均抗拉力均采用平均值($\bar{x}$)±标准差(s)的写法，其中每种灌木植物主根样本数(n)=20。②该表中 4 个拟合方程显著性水平，$p<0.01$。D_1 为主根根径。下同。

4 种灌木单根抗拉力随着根径增加呈增大的变化趋势，且其抗拉力与根径之间呈幂函数正相关关系(图 2)，该结果与李贺鹏等[30]对生长于浙江南部地区的檵木(*Loropetalum chinensis*)、鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*)和香港黄檀(*Dalbergia millettii*)3 种灌木，以及 Yang 等[31]对生长于河北省武道河林场的白桦(*Betula platyphylla*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和落叶松(*Larix gmelinii*)4 种乔木根系抗拉力与根径之间关系的研究结果一致。

此外，柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王其单根最大抗拉力分别为 402.56，342.54，345.67，320.83 N，所对应根径分别为 4.93，6.07，6.10，5.03 mm，反映出在主根根径相同条件下，柠条锦鸡儿主根抗拉力显著大于其他 3 种灌木。

由区内 4 种灌木侧根抗拉力值及其与根径之间拟合方程(表 2)可知，霸王侧根根径和平均抗拉力相对显著于其他 3 种灌木，其侧根平均抗拉力分别为中宁枸杞、白刺和柠条锦鸡儿的 1.72，1.78，3.20 倍；4 种灌木侧根抗拉力与根径呈幂函数正相关关系，这与主根抗拉力与根径之间关系表现出一致性规律。

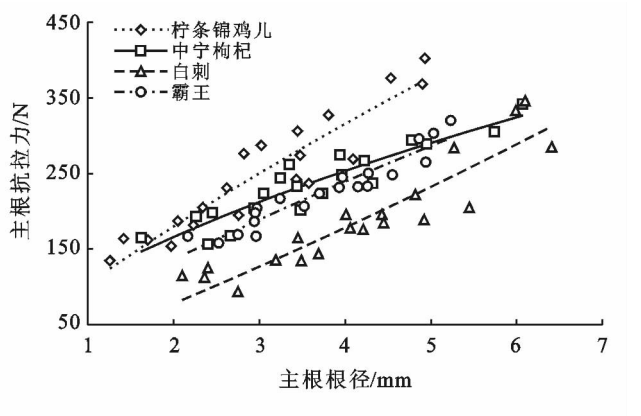


图 2 试验区 4 种灌木主根抗拉力与根径之间的关系

表 2 试验区 4 种灌木侧根抗拉力 F_2 及其与根径 D_2 之间拟合方程

植物名称	平均根径 D_2/cm	平均抗拉力 F_2/N	回归方程	相关指数 R^2
柠条锦鸡儿	0.43±0.22	8.75±6.33	$F_2=27.87D_2^{1.52}$	$R^2=0.952\ 1$
中宁枸杞	0.94±0.52	17.91±14.44	$F_2=16.85D_2^{1.74}$	$R^2=0.989\ 9$
白 刺	1.10±0.50	17.26±8.57	$F_2=15.77D_2^{0.98}$	$R^2=0.855\ 8$
霸 王	1.44±0.51	30.76±16.73	$F_2=15.11D_2^{1.74}$	$R^2=0.964\ 3$

注：D_2 为侧根根径。下同。

由区内 4 种灌木侧根抗拉力值与根径之间关系曲线(见图 3)可知，4 种灌木侧根抗拉力随着根径增加呈显著增大的变化规律，但其递增幅度表现出较显著的差异性，表现在柠条锦鸡儿、中宁枸杞和霸王 3 种灌木侧根抗拉力递增幅度呈不断增大的变化规律，而白刺侧根抗拉力递增幅度则未表现出显著变化趋势，这说明白刺侧根抗拉力受根径影响程度不及其他 3 种灌木。

在此需要说明的是，因 4 种灌木根系抗拉力相对较大，且根段被上、下两夹具夹持较紧，试验中存在着 2 种现象：根段表皮与夹具间发生滑移和根段在与上、下夹具相接触位置发生断裂。以上这 2 种现象的存在，使得 4 种灌木的单根拉伸试验有效率下降，表现在直至获得 20 组主根抗拉力有效数据时，柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王所重复的试验次数分别为 47，39，32，36 次，该结果反映出根系抗拉力愈大，其拉伸试验的有效率愈小；相应地，柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王的侧根获得至 20 组有效拉伸数据时，所重复的试验次数分别为 22，27，25，29 次，由此结果分析可以得出侧根的拉伸试验有效率显著大于主根的有效率。

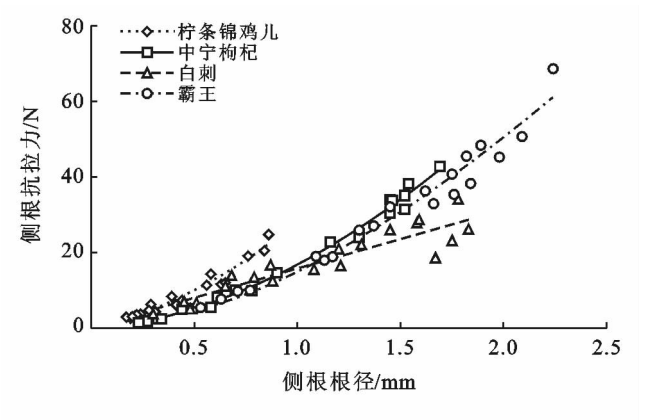


图 3　试验区 4 种灌木侧根抗拉力与根径之间的关系

3.2　4 种灌木主根和侧根抗拉强度及其与根径之间关系

由区内 4 种灌木主根抗拉强度及其与根径之间拟合方程(表 3)可知,柠条锦鸡儿主根平均抗拉强度显著大于其他 3 种灌木,即分别为中宁枸杞、霸王和白刺的 1.50,1.94,2.89 倍,同时这也一定程度地反映出柠条锦鸡儿主根对边坡土体的垂直锚固作用显著于其他 3 种灌木;4 种灌木主根抗拉强度与根径之间呈幂函数负相关关系,且其相关指数均为0.94以上,该研究结果与蒋坤云[32]对生长于河北木兰围场地区的万花木(*Myripnois dioica*)、锦带花(*Weigela florida*)等 5 种灌木植物根系抗拉强度与根径之间关系研究结果表现出一致性规律。

表 3　试验区 4 种灌木主根抗拉强度及其与根径之间拟合方程

植物名称	平均根径 D_1/cm	平均抗拉强度 P_1/MPa	回归方程	相关指数 R^2
柠条锦鸡儿	3.02±1.10	43.54±25.57	$P_1=150.18D_1^{-1.34}$	$R^2=0.965\ 1$
中宁枸杞	3.63±1.16	27.74±15.60	$P_1=161.80D_1^{-1.53}$	$R^2=0.965\ 3$
白 刺	4.18±1.28	15.06±6.00	$P_1=66.54D_1^{-1.13}$	$R^2=0.945\ 7$
霸 王	3.75±0.91	22.46±7.86	$P_1=116.22D_1^{-1.32}$	$R^2=0.954\ 2$

由区内 4 种灌木主根抗拉强度与根径之间关系曲线(图 4)可知,在 4 种灌木主根根径相同条件下,柠条锦鸡儿主根抗拉强度相对较大,中宁枸杞和霸王次之,白刺相对较小;随着主根根径增加,4 种灌木主根抗拉强度递减幅度表现出逐渐减小的变化趋势,即表现在当主根根径小于 3 mm 时,抗拉强度随根径增加呈现出急剧减小的变化规律,当根径大于 3 mm 时,抗拉强度随根径增加其递减幅度逐渐减小,最后趋于平缓状态。

由表 4 可知,柠条锦鸡儿侧根抗拉强度显著大于其他 3 种灌木,即柠条锦鸡儿侧根平均抗拉强度分别较中宁枸杞、白刺和霸王高 41.31,42.79,46.71 MPa,同时亦反映出柠条锦鸡儿侧根对区内边坡土体斜向牵引作用相对显著于其他 3 种灌木;另外,4 种灌木侧根其抗拉强度与根径之间具有显著的幂函数负相关关系,这与其主根抗拉强度和根径之间的关系一致。

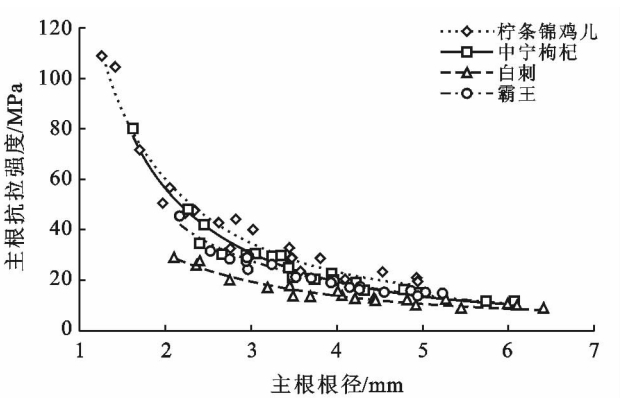


图 4　试验区 4 种灌木主根抗拉强度与根径之间的关系

表 4　试验区 4 种灌木侧根抗拉强度及其与根径之间拟合方程

植物名称	平均根径 D_2/cm	平均抗拉强度 P_2/MPa	回归方程	相关指数 R^2
柠条锦鸡儿	0.43±0.22	65.10±25.83	$P_2=29.29D_2^{-0.75}$	$R^2=0.866\ 8$
中宁枸杞	0.94±0.52	23.79±5.20	$P_2=21.66D_2^{-0.28}$	$R^2=0.812\ 6$
白 刺	1.10±0.50	22.31±11.61	$P_2=20.17D_2^{-0.78}$	$R^2=0.862\ 9$
霸 王	1.44±0.51	18.39±3.24	$P_2=20.17D_2^{-0.36}$	$R^2=0.828\ 0$

由区内 4 种灌木侧根抗拉强度与根径之间关系曲线(图 5)可知,霸王侧根根径相对较大,中宁枸杞和白刺次之,柠条锦鸡儿侧根根径相对较小;此外,随着根径的增加,白刺与中宁枸杞和霸王侧根抗拉强度递减幅度表现出显著差异性,即当侧根根径小于 0.9 mm 时,白刺侧根抗拉强度显著大于中宁枸杞和霸王,而当侧根根径大于 0.9 mm 时,白刺侧根抗拉强度则小于中宁枸杞和霸王,即随着侧根根径增加,白刺抗拉强度递减幅度较中宁枸杞和霸王显著。

3.3　4 种灌木主根和侧根杨氏模量及其与根径之间关系

由表 5 可知,4 种灌木主根在拉伸过程中,其平

均伸长量(ΔL_1)由大至小依次为:中宁枸杞(5.66 mm)>柠条锦鸡儿(4.56 mm)>白刺(2.88 mm)>霸王(2.74 mm),由此可得出,4 种灌木主根根系被拉断时的最大伸长率分别为 5.66%,4.56%,2.88%和 2.74%,即相对于其他 3 种灌木,中宁枸杞主根表现出相对较显著的伸长特性;此外,霸王和柠条锦鸡儿杨氏模量差异性相对不显著,而与中宁枸杞和白刺差异性较显著,即霸王主根平均杨氏模量为柠条锦鸡儿、白刺和中宁枸杞的 1.10,2.13,2.53 倍,这说明霸王和柠条锦鸡儿主根刚度较大,抵抗变形的能力显著于其他 2 种灌木。

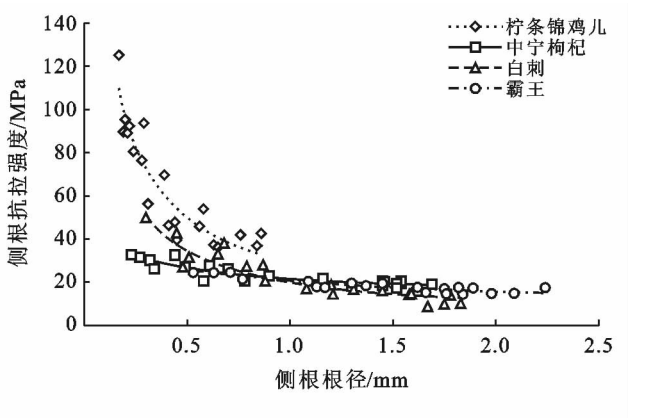


图 5 试验区 4 种灌木侧根抗拉强度与根径之间的关系

表 5 试验区 4 种灌木主根杨氏模量及其与根径之间拟合方程

植物名称	平均根径 D_1/cm	平均伸长量 ΔL_1/mm	平均杨氏模量 E_{r1}/MPa	回归方程	相关指数 R^2
柠条锦鸡儿	3.02±1.10	4.56±1.56	1 057.21±711.31	$E_{r1}=3\,423.55D_1^{-1.22}$	$R^2=0.742\,2$
中宁枸杞	3.63±1.16	5.66±2.01	460.87±138.74	$E_{r1}=1\,099.76D_1^{-0.68}$	$R^2=0.620\,1$
白 刺	4.18±1.28	2.88±0.84	546.07±284.96	$E_{r1}=2\,613.24D_1^{-1.14}$	$R^2=0.692\,3$
霸 王	3.75±0.91	2.74±1.58	1 163.61±739.27	$E_{r1}=9\,473.18D_1^{-1.71}$	$R^2=0.580\,4$

注:①该表中平均根径、平均位移和平均杨氏模量均采用平均值($\bar{x}$)±标准差(s)的写法,其中每种灌木植物主根样本数(n)=20;②主根拉伸试验标距为 100mm;③该表中 4 个拟合方程显著性水平 $p<0.01$。

由 4 种灌木主根杨氏模量与根径之间关系曲线(图 6)可知,其主根杨氏模量随着根径增加表现出减小的变化规律,且 2 者之间呈幂函数负相关关系,该结果与田佳等[12]对花棒和沙柳 2 种灌木,以及及金楠等[33]对刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)2 种乔木根系杨氏模量与根径之间关系的研究结果一致。

表 6 为区内 4 种灌木侧根杨氏模量及其与根径之间拟合方程,由表 6 可知,霸王侧根拉断时的伸长量显著小于其他 3 种灌木,即柠条锦鸡儿、中宁枸杞和白刺侧根伸长量分别为霸王的 1.74,1.76 和1.76倍;同时,柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王侧根伸长率分别为 12.82%,13.00%,12.98%,7.38%,这说明 4 种灌木侧根伸长率显著大于主根,反映出 4 种灌木侧根伸长特性较主根显著。此外,柠条锦鸡儿侧根杨氏模量相对最大,霸王次之,白刺和中宁枸杞相对较小,这与其主根杨氏模量大小关系表现出不一致性变化规律。

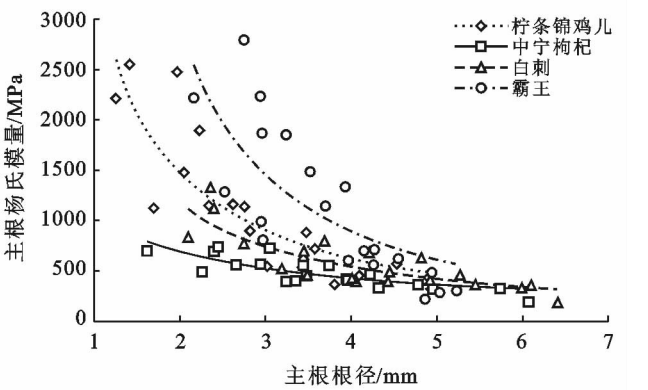


图 6 试验区 4 种灌木主根杨氏模量与根径之间的关系

表 6 试验区 4 种灌木侧根杨氏模量及其与根径之间拟合方程

植物名称	平均根径 D_2/cm	平均伸长量 ΔL_2/mm	平均杨氏模量 E_{r2}/MPa	回归方程	相关指数 R^2
柠条锦鸡儿	0.43±0.22	6.41±1.37	529.48±237.57	$E_{r2}=220.39D_2^{-0.81}$	$R^2=0.795\,7$
中宁枸杞	0.94±0.52	6.50±1.14	192.59±70.33	$E_{r2}=162.17D_2^{-0.47}$	$R^2=0.793\,6$
白 刺	1.10±0.50	6.49±1.83	193.32±128.21	$E_{r2}=168.67D_2^{-0.92}$	$R^2=0.794\,0$
霸 王	1.44±0.51	3.69±0.62	259.74±83.82	$E_{r2}=299.39D_2^{-0.61}$	$R^2=0.758\,5$

注:①该表中平均根径、平均位移和平均杨氏模量均采用平均值($\bar{x}$)±标准差(s)的写法,其中每种灌木植物主根样本数(n)=20;②侧根拉伸试验标距为 50 mm;③该表中 4 个拟合方程显著性水平 $p<0.01$。

由 4 种灌木侧根杨氏模量与根径之间关系曲线(图 7)可知,侧根杨氏模量与根径之间呈幂函数负相关关系,且其平均相关指数为 0.79,显著高于主根杨氏模量与根径之间幂函数相关指数(0.66),这说明侧根杨氏模量与根径之间的幂函数关系显著于主根。

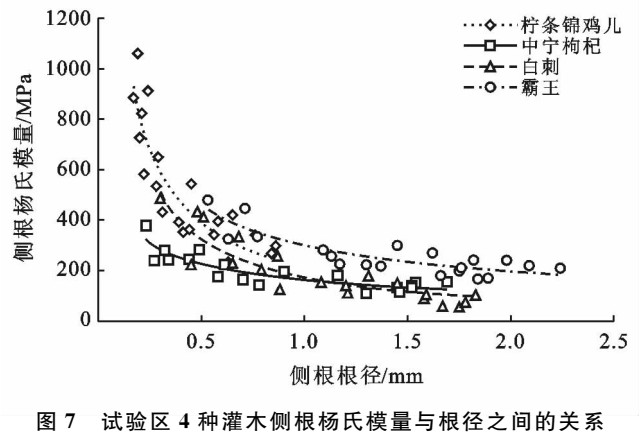


图 7　试验区 4 种灌木侧根杨氏模量与根径之间的关系

3.4　4 种灌木主根和侧根根径、抗拉力、抗拉强度和杨氏模量差异性分析

由区内 4 种灌木主根和侧根根径、抗拉力、抗拉强度和杨氏模量关系(表 7)可知,4 种灌木主根根径、抗拉力和杨氏模量均显著大于侧根,而抗拉强度则表现出不一致变化规律,即柠条锦鸡儿和白刺主根抗拉强度小于侧根,而中宁枸杞和霸王主根抗拉强度大于侧根;4 种灌木主根和侧根根径、抗拉力比值由大至小依次为柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王,这说明 4 种灌木抗拉力与根径具有一致性变化规律。此外,4 种灌木主根和侧根抗拉强度比值为 0.67～1.22,说明其主根和侧根抗拉强度之间差异性相对较小;4 种灌木主根和侧根杨氏模量比值为 2.00～2.82,说明主根刚度显著于侧根,相对于侧根不易发生形变,对边坡稳定性贡献亦显著于侧根。

表 7　试验区 4 种灌木主根和侧根根径、抗拉力、抗拉强度和杨氏模量关系

植物名称	根径比值(D_1/D_2)	抗拉力比值(F_1/F_2)	抗拉强度比值(P_1/P_2)	杨氏模量比值(E_{r1}/E_{r2})
柠条锦鸡儿	6.96	28.45	0.67	2.00
中宁枸杞	3.87	13.21	1.17	2.39
白 刺	3.79	11.01	0.68	2.82
霸 王	2.60	7.35	1.22	2.48

注:该表中 D_1,F_1,P_1 和 E_{r1} 代表主根根径、抗拉力、抗拉强度和杨氏模量值;D_2,F_2,P_2 和 E_{r2} 代表侧根根径、抗拉力、抗拉强度和杨氏模量值。

4　结 论

(1) 试验区 4 种灌木中,柠条锦鸡儿主根和侧根抗拉强度均大于其他 3 种灌木,说明柠条锦鸡儿垂直深根锚固作用和侧根斜向牵引作用均显著于其他 3 种灌木;

(2) 4 种灌木主根抗拉力显著大于侧根,即柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王主根抗拉力分别为侧根的 28.45,13.21,11.01,7.35 倍,且抗拉力与根径之间呈幂函数关系;

(3) 柠条锦鸡儿和白刺主根抗拉强度小于侧根,而中宁枸杞和霸王主根抗拉强度大于侧根,即柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王主、侧根抗拉强度比值分别为 0.67,1.17,0.68,1.22;

(4) 4 种灌木主根杨氏模量均大于侧根,即柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王主根杨氏模量分别为侧根的 2.00,2.39,2.82,2.48 倍,说明其主根刚度显著于侧根,相对于侧根不易发生形变,对边坡浅层稳定性贡献亦显著于侧根。

[参 考 文 献]

[1] Gary D H, Andrew T L. Biotechnical slope protection and erosion control[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982.

[2] 付江涛,李光莹,虎啸天,等.植物固土护坡效应的研究现状及发展趋势[J].工程地质学报,2014,22(6):1135-1146.

[3] Simon A, Collison A J C. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002,27(5):527-546.

[4] 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.

[5] 夏旖琪.草类根系根土复合体的强度和渗透特性及对边坡稳定性的影响[D].长沙:长沙理工大学,2017.

[6] Danjon F, Fourcaud T, Bert D. Root architecture and windfirmness of mature *Pinus pinaster*[J]. New Phytologist, 2005,168(2):387-400.

[7] Coppin N J, Richards I G. Use of Vegetation in Civil Engineering[M]. London: Butterworths, 1990.

[8] 雷相科,张雪彪,杨启红,等.植物根系抗拉力学性能研究进展[J].浙江农林大学学报,2016,33(4):703-711.

[9] 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.

[10] 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):52-57,63.

[11] 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.

[12] 田佳,曹兵,及金楠,等. 防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性[J]. 农业工程学报,2014,30(23):192-198.

[13] Capilleri P P, Motta E, Raciti E. Experimental study on native plant root tensile strength for slope stabilization[J]. Procedia Engineering, 2016,158(4):116-121.

[14] Abdi E, Majnounian B, Rahimi H, et al. Distribution and tensile strength of Hornbeam (*Carpinus betulus*) roots growing on slopes of Caspian Forests, Iran[J]. Journal of Forestry Research, 2009,20(2):105-110.

[15] 罗春燕,吴楚,芦光新,等. 三江源区植物根—土复合体的抗拉拔力特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究,2014,21(5):260-271.

[16] 孙凤环,梅淑敏,胡泉宗. 青藏高原生态地质环境调查与探究[J]. 中国西部科技,2015,14(8):92-96.

[17] 曾业隆,周全,江栗,等. 基于遥感与 GIS 的青藏高原典型电网工程生态环境敏感性分析[J]. 中国环境科学,2017,37(8):3096-3106.

[18] 孙恺. 西宁盆地地下热水循环机制与资源评价[D]. 西安:西北大学,2015.

[19] 杨芳,刘露. 青海东部干旱发生规律及其变化趋势[J]. 干旱区研究,2012,29(2):284-288.

[20] 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.

[21] 胡志勇. 以西宁市长岭沟小流域为例浅析城郊型水土保持[J]. 青海水利,2002(2):33-35.

[22] 李小玲. 浅析西宁市生态环境质量评价[J]. 青海环境,2004,14(3):128-130.

[23] 王占林. 青海高原高山灌木林植被特点及主要类型[J]. 防护林科技,2014(12):34-37.

[24] 程杰,刘永辉,田瑛. 宁夏半干旱区柠条锦鸡儿灌木林生长特征[J]. 水土保持通报,2016,36(1):332-336.

[25] 钱学射,张卫明,金久宁,等. 枸杞的健康保健功用和合理开发利用[J]. 中国野生植物资源,2014,33(3):62-69.

[26] 王宁. 白刺资源及开发前景[J]. 陕西林业科技,2000(1):17-18.

[27] 张琳琳. 长期大风对霸王根系分布的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2014.

[28] 张云伟,惠尚,卜晓磊,等. 3 种散生竹的单根抗拉力学特性[J]. 林业科学,2013,49(7):183-187.

[29] 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(1/2):347-369.

[30] 李贺鹏,岳春雷,赵广琦,等. 中亚热带常绿阔叶林中主要灌木根系力学特性[J]. 西北林学院学报,2010,25(5):33-36.

[31] Yang Yuanjun, Chen Lihua, Li Ning. Effect of root moisture content and diameter on root tensile properties [J]. PLoS ONE, 2016,11(3):1-17.

[32] 蒋坤云. 植物根系抗拉特性的单根微观结构作用机制[D]. 北京:北京林业大学,2013.

[33] 及金楠,吴智阳,姚安坤. 林木根系单根的生物力学特性[J]. 福建农林大学学报:自然科学版,2012,41(2):140-144.