

反复施加拉剪组合力对小叶锦鸡儿直根材料力学特性的影响

李瑞燊¹, 刘静¹, 王博², 张欣³, 胡晶华¹, 苏慧敏¹, 白璐翼¹, 王多民⁴

(1.内蒙古农业大学, 呼和浩特 010019; 2.内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010;

3.水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010010; 4.内蒙古阿拉善盟气象局, 内蒙古阿拉善盟 737300)

摘要:以1~5 mm小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)直根为研究对象, 采用TY 8000 伺服式强力机研究50次加载(荷载为试验根极限抗拉剪组合力的70%)对其材料力学特性的影响。结果表明: 承受50次加载后, 试验根极限力—径向位移曲线斜率大于对照根; 试验根极限抗拉剪组合力及其强度显著高于对照根($p < 0.05$)。反复加载后试验根抗拉剪组合力—根径的函数关系、抗拉剪组合强度—根径的函数关系均与对照根相似, 仍分别呈幂函数正相关、幂函数负相关。随着根径由1~2 mm增至4~5 mm, 试验根极限抗拉剪组合力由对照根的1.26倍增至1.34倍。随着加载次数的增加, 试验根径向位移增量减小。

关键词:小叶锦鸡儿; 直根; 拉剪组合力; 反复加载; 变形

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0121-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.018

Effects of Repeated Combined Tension and Shear Forces on Mechanical Properties of *Caragana microphylla* Root Materials

LI Ruishen¹, LIU Jing¹, WANG Bo², ZHANG Xin³,

HU Jinghua¹, SU Huimin¹, BAI Luyi¹, WANG Duomin⁴

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019; 2. The Inner Mongolia Autonomous Region

Forestry Science Research Institute, Hohhot 010010; 3. Institute of Water Resource for Pasture Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot 010010; 4. Alashan League Meteorological Bureau, Alashan League, Mongolia 737300)

Abstract: Taking the 1 ~ 5 mm straight roots of *Caragana microphylla* as the research object, the effects of 50 times of loading (70% of the ultimate tensile-shear combined force of the test roots) on the mechanical properties were studied using TY 8000 servo-type strength machine. The results showed that the slope of the ultimate force-radial displacement curve of the test roots was larger than that of the control after 50 times of loading, and the ultimate tensile-shear combined force and strength of the test roots were significantly higher than those of the control roots ($p < 0.05$). After repeated loading, both the function relationship between the combined tensile and shear forces and diameters and the function relationship between the combined tensile and shear strength and diameters of the test roots were similar to those of the control, but still showed a positive and a negative power function correlation, respectively. With the increase of root diameters from 1 ~ 2 mm to 4 ~ 5 mm, the ultimate tensile-shear combined force of test roots increased from 1.26 to 1.34 times of the control. With the increase of loading times, the increment of radial displacement of test root decreased.

Keywords: *Caragana microphylla*; straight-roots; shear-tension combined force; repeated loading; deformation

植物根系能有效防治水土流失, 其作用类似于在土壤中打入“铆钉”, 与土壤形成根—土复合体, 有效提高土壤抗蚀能力^[1]。根系锚固植被、固持土壤的作用主要取决于根系的材料力学特性, 包括变形^[2]、极

限力和强度^[3]等。目前, 根系材料力学特性的研究主要集中于轴向单次拉力作用下直根的极限力、极限强度, 均认为根抗拉力、抗拉强度随植物种而异^[4]; 随根径增加极限力增大而强度减小^[5]。直根的轴向变形特征

收稿日期: 2019-03-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(51364043); 内蒙古科技计划项目(201802107)

第一作者: 李瑞燊(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 1909089904@qq.com

通信作者: 刘静(1958—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱、半干旱地区水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: ljing58@126.com

也有部分报道^[6],认为轴向拉力作用下根具有弹塑性特征。单次拉剪组合力作用下根系的极限材料力学特征仅有本课题组对黑沙蒿^[7]、沙柳等灌木^[8]的研究报道。现有研究成果在一定程度上诠释了根—土复合体承受单次荷载时根系的固土力学机制。但是,大风等侵蚀营力使植物地上部分受到反复的拉拔力,并传递到各级根系^[9],基于根系分布的空间异质性,部分根系反复承受轴向拉力,部分根系反复承受拉剪组合力。穆枫等^[10]、吕春娟^[11]、盖小刚^[12]采用金属材料疲劳试验的方法,研究反复拉伸对油松(*Pinus tabulaeformis*)等乔木直根抗拉力和抗拉强度的影响,但反复拉伸后根的变形特性未见研究报道。本文以干旱、半干旱地区典型水土保持树种小叶锦鸡儿为研究对象,研究反复施加拉剪组合力对直根极限力、极限强度、变形特性的影响,以期诠释根系在大风等循环荷载作用下的固土力学机制,进一步充实根系持续固土理论体系。本研究也为防风抗蚀植被建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古伊金霍洛旗与陕西省榆林市大柳塔镇交界处,地理坐标:110°05′—110°30′E,39°27′—39°15′N。该地区自然条件恶劣,土地贫瘠,多为沙壤土,年均风速 3.5 m/s,大风日数约 28~45 d,年降水量约为 396.8 mm,多集中于 9 月,太阳辐射充足,年蒸发量约 2 311.2 mm。当地煤矿资源丰富,开采造成的地面塌陷、滑移加剧该地区水土流失,使生态环境更加脆弱。该地区主要水土保持树种包括小叶锦鸡儿、北沙柳(*Salix cheilophila*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、中国沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等旱生灌木植物。

1.2 试验根采集与制备

在土地较平整的试验区选择样地,随机选取 30 株小叶锦鸡儿测算株高、冠幅、地径,分别取均值作为选取标准株的依据(株高:(0.68±0.09)m;冠幅:(0.88±0.14)m²;地径:(1.43±0.26)cm)。挑选与标准株各指标相近的植株采集根系,为了防止植物死亡,各试验株采用局部挖掘法采集根径符合试验要求的部分根系,将其装入容器带回实验室。试验在采样后 7 天内完成以保证试验根的活性^[13]。

挑选长势顺直、根径 1~5 mm 的直根,每条试验根总长 8 cm,试验部分长 4 cm,两端各留出 2 cm 夹持部分(图 1),用游标卡尺(精度为 0.01 mm)在试验段 A、B 端和中间点 O 分别进行根径测量,每个断面用十字交叉法测量 2 次,取平均作为该点根径,将 3

个断面的根径取平均作为试验根径级划分的依据。试验分 1~2,2.5~3.5,4~5 mm 3 个径级,每个径级制备 30 条试验根。由于单次荷载条件下,极限抗拉剪组合力—根径拟合曲线是完成本研究的基础,每个径级单次荷载的极限抗拉剪组合力试验 20 个重复,反复施加拉剪组合力试验 10 个重复。

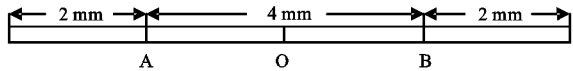


图 1 试验根制备

1.3 试验设计与方法

1.3.1 试验设计 试验于 2018 年 7 月在内蒙古农业大学沙漠治理学院根系力学实验室进行。对 1~5 mm 径级范围直根进行单次荷载的抗拉剪组合力试验作为对照,拟合单次荷载作用下的根径—极限抗拉剪组合力回归方程;对每条试验根按照根径计算拟合极限力,将拟合极限力的 70%作为该试验根反复施力的依据,对其反复加载 50 次后测定抗拉剪组合力,以及变形过程。

1.3.2 测定方法 采用 TY 8000 伺服强力机,加载速度设定为 20 mm/min。将试验根两端的夹持部分用夹具夹紧,保持试验根轴线呈水平状态。在试验段中点 O 匀速施加压力,使试验根在 O 点呈剪切受力、O 点两侧根段受拉,试验根整体受到拉剪组合力作用(图 2)。

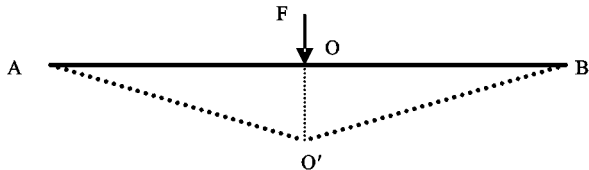


图 2 荷载施加及位移量测示意

(1)单次荷载下直根极限力测定:对试验根匀速施力至破坏,A、B 间断裂有效,夹具夹口处断裂的试验根为无效数据。

(2)反复加载试验:对试验根匀速施力至拟合极限力的 70%后卸载,使仪器施力点恢复到试验根轴线位置(径向位移归零),作为 1 次加—卸载过程。将此过程重复 50 次。

(3)反复加载后极限力测定:第 50 次加—卸载完成后,对试验根匀速施力至破坏,测定极限抗拉剪组合力。

(4)抗拉剪组合强度计算:公式(1)为直根抗拉剪组合强度计算公式。

$$\sigma = 4F/\pi D^2 \tag{1}$$

式中: σ 为抗拉剪强度(MPa); F 为破坏力(N); D 为试验根平均直径(mm)

试验过程中伺服强力机自动记录试验根的 $F-s$ (力—位移)曲线,位移指试验根初次受力点至每次施

力终点的移动距离 OO' ;在反复加一卸荷载过程中,每次加载的起点均为初次施力点 O ,即每条力一位移曲线的起点位于原根轴线。反复加一卸载过程中试验根段由 AOB 变形至 $AO'B$ 。

1.4 数据分析

采用 Excel 软件进行数据整理与制图,利用 SAS 9.0 软件对小叶锦鸡儿各径级直根在不同破坏形式下极限力、极限强度的差异性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 直根抗拉剪组合力与抗拉剪组合强度

图 3 为小叶锦鸡儿直根不同加载形式下抗拉剪组合力随根径变化关系。承受单次拉剪组合力及反复承受拉剪组合力后,直根极限抗拉剪组合力与根径均呈幂函数正相关($F_{\text{单次}}=51.47D^{1.40}, R^2=0.928$; $F_{\text{反复}}=61.76D^{1.52}, R^2=0.976$);图 4 为小叶锦鸡儿直根 2 种加载形式下抗拉剪组合强度随根径的变化关系。承受单次荷载及反复承受拉剪组合力后,直根极限抗拉剪组合强度与根径均呈幂函数负相关($\sigma_{\text{单次}}=65.57D^{-0.59}, R^2=0.702$; $\sigma_{\text{反复}}=78.68D^{-0.47}, R^2=0.797$)。反复施加拉剪组合力对直根极限抗拉剪组合力~径、极限抗拉剪组合强度~根径拟合曲线线型没有影响。随着根径的增加,反复加载后直根极限抗拉剪组合力相对承受单次荷载的对照根增幅增大。

表 1 小叶锦鸡儿直根单次荷载和反复加载后极限力学特性差异

径级/mm	单次荷载		反复加载	
	抗拉剪组合力/N	抗拉件组合强度/MP	抗拉剪组合力/N	抗拉件组合强度/MP
1~2	103.61±32.52Aa	49.39±9.09Aa	134.26±33.29Ba	62.29±4.21Ba
2.5~3.5	253.01±50.33Ab	34.98±7.63Ab	332.27±85.01Bb	48.92±5.36Bb
4~5	437.38±69.45Ac	26.85±4.01Ac	586.87±106.07Bc	38.67±5.42Bc

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同大写字母表示相同径级不同荷载作用差异性显著($p<0.05$);同列不同小写字母表示不同径级相同荷载作用差异性显著($p<0.05$)。

2.2 直根的变形特性

2.2.1 反复施加拉剪组合力过程中直根变形特征
3 个径级直根在反复加一卸载过程中 $F-s$ 曲线变化规律相似,以 2.5 mm 根径直根为例。由图 5 可知,第 1 次加载的 $F-s$ 曲线斜率明显小于反复加一卸载后 $F-s$ 的斜率,即第 1 次加载过程中试验根的弹性势能全面释放,达到 70% 拟合极限力时总应变量为 8.77 mm,其中塑性变形 5.2 mm,卸载后 3.57 mm 的弹性变形恢复。第 2 次及以后各次加载过程的 $F-s$ 曲线相似,斜率明显大于第 1 次加载,且曲线越来越密集;表明反复加一卸载过程中直根的塑性变形逐渐减小,弹性变形基本趋于稳定。从能量转化角度分析,拉剪组合力所做功一部分以直根弹性势能的形式存储,还有一部分以塑性变形的形式转变为伸长量。

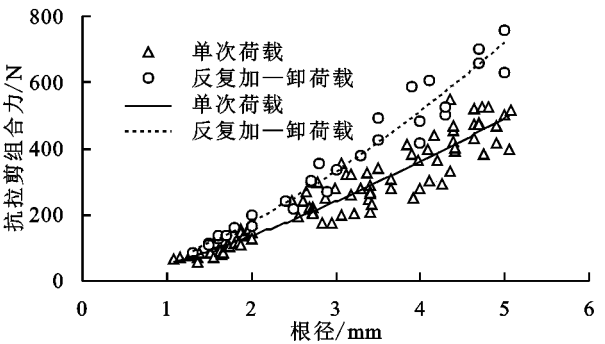


图 3 2 种加载形式的极限力与根径关系

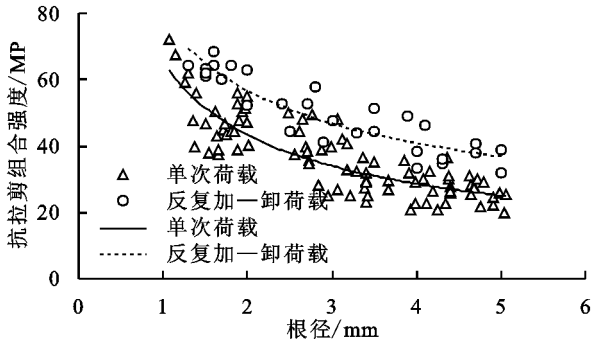


图 4 2 种加载形式的极限强度与根径关系

由表 1 可知,2 种加载形式下相同径级直根极限抗拉剪组合力差异显著($p<0.05$),极限抗拉剪组合强度亦然($p<0.05$)。1~2,2.5~3.5,4~5 mm 根径直根在反复加载后,极限抗拉剪组合力均显著增加,分别是单次荷载直根的 1.26,1.31,1.34 倍;极限抗拉剪组合强度是单次荷载直根的 1.33,1.38,1.44 倍。

反复加一卸载过程中,直根以伸长一恢复这一变化形式将弹性势能释放出来,超出弹性势能能量则以直根的塑性变形表现。

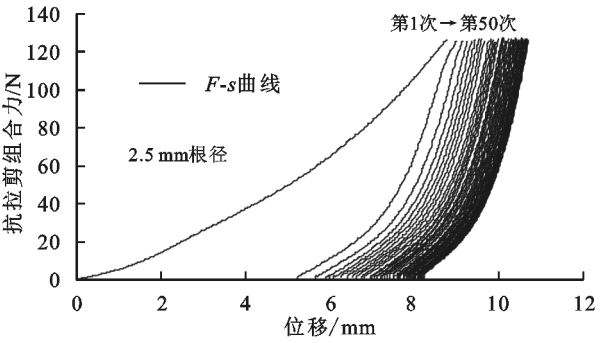


图 5 直根承受 70% 拟合极限力 50 次的 $F-s$ 曲线

2.2.2 不同破坏条件下直根极限力一位移的差异性分析
图 6 为根径 2.5 mm 直根在单次荷载作用下

极限抗拉剪组合力—位移曲线,以及反复加载 50 次后的极限力—位移曲线。单次荷载作用下 $F-s$ 曲线平缓且斜率基本不变,即随着抗拉剪组合力增大变形稳定增大。反复加载后直根再承受拉剪组合力时, $F-s$ 曲线的斜率由接近单次荷载时较平缓的状态(AB 段)快速变化为明显大于单次受力斜率的陡峭状态(BC 段),并且在应力增加过程(AC 段)中的位移远小于单次荷载(OD 段)。

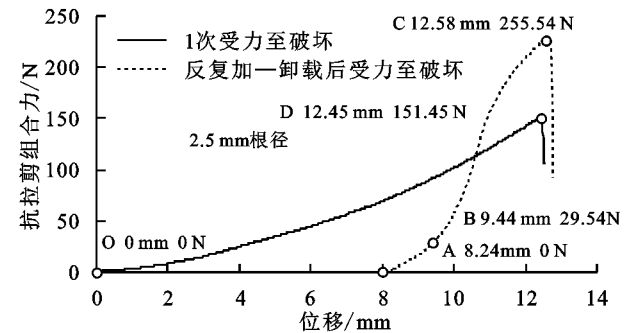


图 6 直根承受反复加载后与承受单次荷载的
极限力—位移曲线

3 讨论

3.1 根径对直根极限力和强度的影响

反复施力 50 次后直根极限抗拉剪组合力随着根径的增大呈幂函数增加,极限强度随根径增大呈幂函数减小,与直根承受单次荷载规律相同,这与吕春娟等^[14]对油松直根反复加—卸载后根径与极限抗拉力、极限抗拉强度的关系相似,且与 Tois^[4]对 3 种灌木欧洲蔷薇(*Rosa canina*)、黏蓬(*Dittrichia viscose*)和鹰爪豆(*Spartium junceum*)根系的研究结果一致。李有芳等^[3]从拉力、折力 2 种施力类型对单次荷载下直根极限力与根径的关系试验中同样得出:随着根径增大,极限力与根径呈幂函数正相关,极限强度与根径呈幂函数负相关。这表明反复施加拉剪组合力不影响根径和极限力、极限强度的函数关系。这是因为随根径增加,根内各组织中化学成分含量呈规律性变化,导致根径与极限力、极限强度呈线性变化^[15];韩立亮等^[16]研究表明,直根的抗拉力、抗拉强度与根组织结构中的半纤维素含量、木质素之间具有显著函数关系,而反复施加拉剪组合力不会改变根系化学成分含量,因此,根径与极限力、极限强度的函数规律不会出现明显变化。

3.2 反复施加拉剪组合力对直根极限力和强度的影响

各根径直根反复加—卸载后抗拉剪组合力和抗拉剪组合强度均显著高于对照根($p<0.05$),这与油松、侧柏(*Platycladus orientalis*)直根承受反复拉伸后,极限抗拉力与单次荷载下极限抗拉力的差异性相

似^[10];盖小刚^[12]对油松、落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、白桦(*Betula platyphylla*)和蒙古栎(*Quercus mongolicus*)直根疲劳性能试验同样得出,经过反复拉伸后直根极限抗拉力显著高于单次荷载下的极限抗拉力。

反复施加拉剪组合力后,抗拉剪组合力和抗拉剪组合强度显著增加,表现出更强的抵抗外力作用的能力,这与试验根在反复受力过程中细胞被挤压拉伸、细胞内原生质体的流失有关^[17]。苑淑娟^[18]研究表明,小叶锦鸡儿直根的抗拉力和抗拉强度随根系含水率下降均呈上升趋势;Hales 等^[19]也提出黄桦(*Betula lenta*)、北美马褂木(*Liriodendron tulipifera*)根细胞壁水分的增加会导致抗拉强度下降;Yang 等^[20]提出白桦、蒙古栎、油松和落叶松直根内水分的轻度流失可以显著提高直根抗拉强度;Zhang 等^[21]提出阿尔泰紫菀(*Heteropappus altai-cus*)和硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)直根抵抗机械破坏的能力随含水量减少而增强。

3.3 变形特征分析

反复施加拉剪组合力的次数对直根变形影响显著。反复受力初期,直根弹性势能高、塑性变形明显,原因是根系由多种组织组成,承受外力时不同组织的弹性势能和塑性变形具有差异,苏工兵等^[2]提出苧麻(*Boehmeria nivea*)茎秆韧皮纤维和木质部的弹性模量、最大抗拉强度差异性显著,说明植物不同组织的弹性势能和承受外力能力各异。直根第 1 次承受拉剪组合力时,弹性极限点低的组织产生明显塑性变形^[22],由于反复施加的拉剪组合力是恒定的,未达到弹性极限点的组织在反复受力过程中仍具有较高弹性势能,同时产生的塑性变形迅速减少,导致直根在反复受力过程中的 $F-s$ 曲线先疏后密,而蒋坤云等^[23]也提出不同植物直根在抵抗拉力作用时纤维素、木质素等组织的贡献能力具有差异。本研究结果表明,反复受力后直根达到极限力时位移显著小于承受单次荷载的直根,这是因为反复加—卸载过程消耗了直根的弹塑性势能,使直根受力至断裂过程的位移减少,证明直根的弹塑性是抵抗外力的一种方式。反复承受拉剪组合力后 $F-s$ 曲线斜率显著大于单次荷载直根,说明反复承受拉剪组合力后的直根具有更强的抵抗变形能力。这一特性不仅可以使根系具有更好的固定植物的能力,在固持土壤的过程中也能发挥更有效的固土效益。

4 结论

1~5 mm 径级范围内的小叶锦鸡儿直根,在承受 50 次拉剪组合力(荷载为试验根极限抗拉剪组合

力的 70%)后,抗拉剪组合力—根径呈幂函数正相关,抗拉剪组合强度—根径呈幂函数负相关,均与对照组相似;反复加载后直根的极限抗拉剪组合力显著大于对照根($p<0.05$),极限强度显著大于对照根。根径为 1~2,2.5~3.5,4~5 mm 的直根,在反复加载后的极限拉剪组合力分别是对照根的 1.26,1.31,1.34 倍;极限抗拉剪组合强度分别是单次荷载直根的 1.33,1.38,1.44 倍。

在反复加载过程中,随着加—卸载次数的增加,径向位移减少,极限拉剪组合力—移曲线在位移轴上的间距呈先疏后密规律,直根的弹性变形趋于稳定,塑性变形逐渐降低。反复加载后极限拉剪组合力—径向位移曲线斜率显著大于对照根,径向变形显著小于对照根。

参考文献:

[1] 田佳,卞莹莹,于江珊,等.贺兰山 3 种乔木单根及根土复合体力学特性[J].水土保持学报,2018,32(6):123-129.

[2] 苏工兵,刘剑英,王树才,等.苕麻茎秆拉伸力学性能的试验研究[J].农机化研究,2008(2):139-141,161.

[3] 李有芳,刘静,张欣,等.4 种植物生长旺盛期直根易受损的外力类型研究[J].水土保持学报,2016,30(6):339-344.

[4] Tois M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy) [J]. Geomorphology,2006,87(4):268-283.

[5] Baets S D, 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(1/2):207-226.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 郭丰英.用结构力学求解器模拟植物地茎受力向直根传递的力学特性[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.

[10] 穆枫,程子敏,李玉灵,等.太行山区林木根系单根固土生物力学及疲劳特性研究[J].西北林学院学报,2019,34(2):14-21.

[11] 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.

[12] 盖小刚.林木根系固土力学特性研究[D].北京:北京林业大学,2013.

[13] 李雪松,刘静,刘鹏飞,等.4 种植物根系活性保存方法及保存时间初探[J].中国农学通报,2017,33(25):52-58.

[14] 吕春娟,陈丽华,赵红华,等.油松直根的轴向疲劳性能研究[J].摩擦学报,2013,33(6):578-585.

[15] 乔娜,余芹芹,卢海静,等.寒旱环境植物护坡力学效应与直根化学成分响应[J].水土保持研究,2012,19(3):108-113.

[16] 韩立亮,宋桂龙.护坡木本植物直根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.

[17] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等.护坡植物直根力学特性与其解剖结构关系[J].农业工程学报,2009,25(5):40-46.

[18] 苑淑娟.4 种植物单根抗拉力学特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

[19] Hales T C, Miniati C F. Soil moisture causes dynamic adjustments to root reinforcement that reduce slope stability [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2017, 42(5):803-813.

[20] Yang Y, Chen L, Li N, et al. Effect of root moisture content and diameter on root tensile properties [J]. PLoS One, 2016,11(3):e0151791.

[21] Zhang C B, Zhou X, Jiang J, et al. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants [J]. Catena,2019,172:140-147.

[22] 牛国权,苑淑娟,刘静,等.柠条、沙地柏代表根变形特性的研究[J].金属矿山,2009(增刊 1):802-806.

[23] 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):8-12,19.