

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.042.

石川, 梁桑, 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.

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

石川¹, 梁桑¹, 刘亚斌^{1,2}, 朱海丽^{1,2}, 李国荣^{1,2}, 胡夏嵩^{1,2}, 缪晓星³, 王延秀³

(1.青海大学 地质工程系, 西宁 810016; 2.青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室,
西宁 810016; 3.青海省水土保持中心, 西宁 810016)

摘要: [目的] 柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii* Kom.) 是青藏高原东北部和黄土高原地区最为广泛的护坡和水土保持灌木之一, 开展该种植物单根抗拉力学特性试验研究, 为定量评价该种植物固土护坡效果提供理论依据。 [方法] 以根径为 2.33~9.16 mm 的中龄期柠条锦鸡儿根系为研究对象, 通过单根拉伸试验对比分析了不同断裂模式和不同根径级别条件下, 柠条锦鸡儿单根抗拉力学特性的差异性及其与根径之间的关系, 并进一步探讨了单根断裂破坏模式及其应力-应变特征。 [结果] 柠条锦鸡儿单根存在周皮断裂和整体断裂 2 种断裂模式, 2 种断裂模式单根抗拉力和单根抗拉强度分别在 (2, 4], (4, 6] 和 (6, 8] mm 以及 (6, 8] mm 根径级别条件下存在显著性差异; 相同断裂模式不同根径级别之间, 4 个单根抗拉力学特性指标差异程度各不相同。周皮断裂和整体断裂模式条件下, 单根抗拉力随着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着根径增大而降低。2 种断裂模式的产生取决于单根受拉伸作用时, 周皮、中柱鞘薄壁组织和次生维管组织的应力状态; 对应的单根应力-应变曲线表现为弹性变形、弹塑性变形、应变硬化及周皮(断裂)破坏 4 个阶段。 [结论] 在采用单根拉伸试验来获取木本植物根系单根抗拉力学特性指标时, 有必要考虑根径和断裂模式对单根抗拉力学特性的影响。

关键词: 青藏高原东北部; 柠条锦鸡儿; 单根拉伸试验; 力学特性; 断裂模式; 应力-应变特征

中图分类号: S157.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0184-09

Research on Tensile Resistance Characteristics of Single Root of *Caragana korshinskii* Kom. in Loess Region of Northeastern Qinghai-Tibet Plateau

SHI Chuan¹, LIANG Shen¹, LIU Yabin^{1,2}, ZHU Haili^{1,2}, LI Guorong^{1,2},

HU Xiasong^{1,2}, MIAO Xiaoxing³, WANG Yanxiu³

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Key Laboratory of Cenozoic Resources and Environment on the Northern Edge of the Qinghai-Tibet

Plateau, Xining 810016, China; 3. Qinghai Soil and Water Conservation Research Center, Xining 810001, China)

Abstract: [Objective] *Caragana korshinskii* Kom. is one of the most widely used shrubs for slope protection and soil and water conservation in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau and the Loess Plateau. The experimental study on the tensile mechanical properties of a single root of *C. korshinskii* was carried out to provide a theoretical basis for quantitative evaluation of soil fixation and slope protection of this plant. [Methods] Single root of *C. korshinskii* with root diameters of 2.33~9.16 mm at middle age was taken as the research object. The differences of tensile resistance characteristics of single root of *C. korshinskii* under different failure modes and dif-

收稿日期: 2021-11-01

修回日期: 2022-11-26

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(42002283, 42062019); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905)

第一作者: 石川(1997—), 男, 青海西宁人, 硕士研究生, 研究方向生态工程地质。E-mail: shichuanwj@163.com

通信作者: 刘亚斌(1987—), 男, 青海西宁人, 副教授, 博士, 研究方向生态工程地质。E-mail: liuyabincug@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

ferent root diameter grades and their relationship with root diameter were compared and analyzed via single root tensile test, and the failure mode of single root and its stress-strain characteristics were further discussed. [Results] Two modes of failure of a single root, the periderm preferential breakage mode and the synchronous breakage mode, occurred when the roots were subjected to single root tensile test. The single root tensile force and single root tensile strength of the two failure modes were significantly different under the conditions of (2,4], (4,6], (6,8] mm and (6,8] mm root diameter grades, respectively ($p < 0.05$). The difference degree of four single root tensile resistance characteristics indexes was different between different root diameter grades with the same failure mode. Under the periderm preferential breakage mode and the synchronous breakage mode, the single root tensile force of *C. korshinskii* increased with the increase of root diameter, there existed exponential and power relationship between single root tensile force and root diameter, respectively. In addition, the single root tensile strength, single root elastic modulus and single root limit extensile rate of *C. korshinskii* decreased with the increase of root diameter. The occurrence of these two failure modes of roots depends on the stress state of the periderm, thin wall tissue of middle column sheath, and the secondary vascular tissue when a single root is under tension. The stress-strain curves for the two failure modes can be divided into four stages: elastic deformation, elastic-plastic deformation, strain hardening and fracture failure. [Conclusion] It is necessary to consider the influence of root diameter and failure mode on single root tensile properties when single root tensile test is used to obtain single root tensile properties indexes of woody plant species.

Keywords: northeastern Qinghai-Tibet Plateau; *Caragana korshinskii* Kom.; tensile test of single root; mechanical properties; failure mode; stress-strain characteristics

青藏高原东北部黄土地貌发育广泛,区内植被覆盖率相对较低,水土流失、滑坡等地质灾害频发,地质和生态环境相对脆弱^[1-2]。近年来,随着区域经济快速发展,区内基础设施建设活动日益加强。工程建设会对原始地貌和生态环境产生一定程度的改造和破坏,从而促进水土流失、滑坡等地质灾害现象的发生,加剧区域生态地质环境问题^[2-3]。诸多研究结果表明,采用植被护坡工程技术,对于防治地区水土流失、浅层滑坡等斜(边)坡浅层地质灾害,并进一步改善生态地质环境,具有重要的理论研究意义和实际价值^[3-5]。由于根系抗拉特性要显著高于土体,故当含根土体受到剪切作用时,根系将土体内部的剪应力通过根—土界面摩擦作用转换为根自身的拉应力,并再次通过根—土界面摩擦作用将拉应力传递至稳定土体,从而起到增强土体抗剪强度和提斜(边)坡稳定性的作用^[6-8]。因此,植物根系单根抗拉力学特性评价是植物根系固土护坡力学机制研究和固土护坡效应定量评价的重要基础。

目前,在植物根系单根抗拉力学特性研究方面,诸多学者主要通过单根拉伸试验,以获得不同植物单根抗拉力、抗拉强度、弹性模量和极限延伸率等单根抗拉力学特性指标,及其与根径和根系物理化学指标之间的关系,并通过分析单根拉伸应力—应变关系,

探讨单根抗拉力学行为。一般而言,植物单根抗拉力和抗拉强度愈高,则其抗拔出特性和固土护坡能力愈强^[8]。在单根极限延伸率较小、弹性模量较大的条件下,单根在受拉过程中,能够在产生较小变形的条件下,发挥出自身的抗拉强度以及根—土界面摩擦力,从而有利于控制斜(边)坡土体变形^[9]。单根抗拉力学特性与根径密切相关。随着根径的增大,单根抗拉力和单根抗拉强度分别呈增大和降低的变化趋势,而其具体函数关系则与植物种类密切相关^[10-12]。此外,一些木本植物单根弹性模量和极限延伸率随着根径的增加呈降低趋势^[12],而一些草本植物单根极限延伸率则随着根径的增加呈增大趋势^[13-14]。纤维素和木质素等化学成分的含量决定了单根抗拉力学特性的强弱^[14-16]。单根抗拉力学特性随着根径变化的根本原因在于单根化学成分与根径存在相关性。研究表明,根的抗拉强度和纤维素含量均与根径呈显著的负相关关系,而根的抗拉强度与纤维素含量呈正相关关系^[14,16]。此外,根系含水量亦对单根抗拉力学特性指标有一定程度的影响,随着根系含水量的减少,单根抗拉强度大幅度增加^[17-18]。根系属于弹塑性材料,在单根承受拉应力初期阶段,应力—应变关系曲线呈线性关系,当拉应力超过弹性极限,应力—应变关系曲线逐渐偏离直线,表现出非线性特征^[12-13,19]。

此外,亦有学者通过单根拉拔试验或整株根系原位拉拔试验,发现一些灌木植物单根在被拔出土体过程中存在多种破坏模式^[9,20]。

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)作为青藏高原东北部优势护坡灌木,具有很强的抗寒、抗旱、耐风蚀能力,能在高寒地区的沙地和土坡中正常生长,为寒冷和干旱地区水土保持、稳定边坡的优良灌木^[21-22]。然而,现有的青藏高原东北部黄土区柠条锦鸡儿根系抗拉力学特性方面的研究,多以幼龄期柠条锦鸡儿为研究对象,且已有的研究以获得单根抗拉力、抗拉强度和极限延伸率,及其与根径和根系化学成分之间的关系为主要研究内容^[11,23-24]。而有关大龄期柠条锦鸡儿单根抗拉力学特性方面还鲜有研究成果见诸报道。与此同时,国内外已有的植物单根抗拉力学特性相关研究,均以在夹具中部位置处全断面整体断裂的单根试验数据作为单根拉伸试验有效数据。然而,笔者在开展室内单根拉伸试验,以及野外原位拉拔试验^[20]过程中,发现柠条锦鸡儿单根存在2种破坏模式,即周皮断裂模式和整体断裂模式。但目前鲜有研究以单根断裂模式为划分依据,并以此为基础开展不同断裂模式条件下单根抗拉力学特性对比分析。基于此,本研究以生长于青藏高原东北部黄土区中龄期(6~14 a)柠条锦鸡儿为研究对象,通过单根拉伸试验,获得2.33~9.16 mm根径级别条件下,柠条锦鸡儿根系在不同断裂破坏模式条件下的单根抗拉力、抗拉强度、弹性模量和极限延伸率,并进一步分析上述指标与根径之间的关系。在此基础上,结合不同断裂模式条件下单根应力—应变曲线,探讨不同单根断裂模式的力学过程。该项研究对于青藏高原东北部黄土区水土流失、浅层滑坡等地质灾害生态防护具有理论研究价值和实际指导意义。

表1 试验区土壤物理性质

深度/m	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水量/%	液限/%	塑限/%	颗粒级配/%			不均匀系数	土壤类型
					0.250~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm		
0—30	1.28±0.10	18.61±4.10	24.08±0.66	17.34±0.38	35.16±16.04	61.88±14.76	2.97±2.12	4.73±2.58	粉土

1.3 试验方法

单根拉伸试验中,上、下夹具间根段的标距设定为该根段根径的10倍^[30-31]。准备试验根段时,首先将野外采集的根段自其一端量取3 cm长度预留为夹持段。然后自3 cm起,每隔一定距离量取根段根径,共取5个位置的根径计算平均根径,并确定该根段在上、下夹具间的标距。确定好标距后,沿根轴线继续量取3 cm根段作为另一端夹具夹持部分(图1)。由于夹具位置处存在应力集中,易导致夹具处试样出现

1 材料与方 法

1.1 研究区基本概况

研究区西宁盆地位于黄土高原西缘与青藏高原东北部的交接地带,属高原干旱—半干旱大陆性气候^[25]。西宁盆地及其周边地区是青藏高原东北部的黄土沉积区,区内黄土具有分布广泛、沉积厚度大及地层较完整的特征^[26-27]。受新构造运动影响,该地区的黄土受到强烈侵蚀和切割,导致沟壑广泛发育,形成以梁、峁、塬和黄土丘陵为特征的景观^[28]。研究区年平均气温为6℃,年均降水量为394~535 mm,且年内分布极不均匀,降雨主要集中在6—9月份,约占全年降水量的70%~80%,多以暴雨和阵雨形式出现,具有历时短、强度大、降雨集中等特点^[29]。

1.2 试验材料

柠条锦鸡儿为豆科锦鸡儿属多年生落叶灌木,根系为主直根型,根系发达,主根深,侧根多,属主根侧根均衡发育型灌木^[22]。该项研究试验区位于西宁市二十里铺大有山,地理坐标为东经101°44′24″,北纬36°42′01″。试验区坡度为24°~43°,坡向为东北方向,海拔2 350~2 450 m。表1为试验区0—30 cm深度范围内土壤物理性质指标。野外根系采集于2021年7月。在试验区内,选择生长期为中龄期(6~14 a)的柠条锦鸡儿作为研究对象,采用野外三维坐标根系追踪挖掘法(最大挖掘深度为1.8 m)以获得不同根径柠条锦鸡儿根系。现场将采集好的表皮无明显损伤的根系处理成长度为80~100 cm长的根段,并使用保鲜膜包裹后带回实验室储存在4℃的环境中备用。此外,为系统性对比分析不同根径条件下柠条锦鸡儿单根抗拉力学指标的差异性,本研究将柠条锦鸡儿单根划分为(2,4],[4,6],[6,8],[8,10] mm4个根径级别进行单根拉伸试验。

夹断或周皮脱落现象,为了避免此类现象的出现,试验中对单根夹持段进行胶带缠绕防护处理。试验开始前,提前将上、下夹具间根段平均根径输入拉拔仪电脑终端程序。试验过程中,上夹具以10 mm/min的速率匀速上行,以使位于上、下夹具间的根段承受拉伸作用,直至该根段发生破坏为止。选取位于上、下两夹具中间位置处发生断裂根段的单根抗拉力学特性指标作为试验有效数据。单根拉伸试验进行过程中,单根应力—应变关系曲线由拉拔仪电脑终端程

序自动计算生成并记录;待试验结束后程序自动记录单根抗拉力,并进一步计算出单根抗拉强度和极限延伸率。在获得单根应力—应变关系曲线的基础上,选取单根抗拉强度 15%和 40%的应力点作为弹性变形的区间点,计算得出单根弹性模量。本次试验共进行了 303 组单根拉伸试验,其中,从单根中间部位断裂的有 77 组,试验成功率 25.41%。在此基础上,该项研究对符合根径条件的 75 组有效数据分别进行单根抗拉力和抗拉强度箱型图排查,得出整体断裂下单根抗拉力和抗拉强度 2 个异常值数据,剔除后最终对 73 组有效数据进行分析。单根拉伸试验仪器为深圳万测仪器有限公司生产的 TSE104C 型微机控制电子万能试验机。电子万能试验机力学传感器量程为 10 kN,精度为 0.5%。



图 1 单根拉伸试验仪器与试验过程示意图

本项研究中植物单根抗拉强度计算公式为^[13]

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

植物单根极限延伸率计算公式为^[13]

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

植物单根弹性模量计算公式为^[12]

$$E_{0.4} = \frac{\sigma_{0.4} - \sigma_{0.15}}{\epsilon_{0.4} - \epsilon_{0.15}} \quad (3)$$

式中: σ 为单根的抗拉强度(MPa); F_{\max} 为单根最大抗拉力(kN); D 为单根平均根径(mm); ϵ 为纵向线应变即单根极限延伸率(%); ΔL 为单根拉伸时的伸长量(mm); L 为单根的原始长度,即标距(mm); $E_{0.4}$ 为抗拉强度极限 40%时的弹性模量(MPa); $\sigma_{0.4}$ 和 $\sigma_{0.15}$ 分别为单根抗拉强度 40%和 15%的应力值(MPa); $\epsilon_{0.4}$ 和 $\epsilon_{0.15}$ 分别为单根抗拉强度 40%和 15%的应力值对应的应变量(%)。

1.4 数据分析

分别采用独立样本 t 检验和方差分析(ANOVA),开展不同断裂模式相同根径级别条件下以及相同断裂模式不同根径级别条件下单根抗拉力学特性指标差异性分析。通过回归分析和相关分析,分析柠条锦鸡儿单根抗拉力、抗拉强度、弹性模量和极限延伸率与根径的关系,相关系数分类见表 2^[32]。使用 IBM SPSS Statistics 23 和 Office 2016 软件进行相关统计分析。

表 2 相关性强度的分类

$ r < 0.3$	$0.3 \leq r \leq 0.5$	$0.5 \leq r \leq 0.8$	$ r \geq 0.8$
弱相关性	低度相关性	中度相关性	高度相关性

2 结果与分析

2.1 柠条锦鸡儿单根破坏模式

该项研究中,柠条锦鸡儿单根在拉伸试验中存在 2 种断裂模式,即周皮断裂模式和整体断裂模式,见图 2。其中,周皮断裂指单根拉伸过程中单根仅周皮发生断裂破坏,而次生维管组织并未发生断裂;整体断裂模式指单根周皮和次生维管组织在相同的位置同时发生断裂。周皮断裂模式和整体断裂模式的单根数量分别占试验成功样本数的 57.53%和 42.47%。



图 2 柠条锦鸡儿单根断裂模式

2.2 柠条锦鸡儿单根抗拉力学特性

由表 3 可知,柠条锦鸡儿单根在(2,4],[4,6],[6,8],[8,10] mm 4 个根径级别,周皮断裂模式和整体断裂模式条件下单根抗拉力分别为(0.56±0.11)~(1.47±0.22)kN 和(0.24±0.25)~(2.25±1.10)kN。由独立变量 t 检验结果可知,2 种断裂模式对应的单根抗拉力在(2,4],[4,6]和(6,8] mm 3 个根径级别条件下存在显著性差异($p < 0.05$),在(8,10] mm 根径级别条件下不存在显著性差异($p > 0.05$)。周皮断裂模式条件下,(8,10] mm 根径级别单根抗拉力均值相对较大,但与(6,8] mm 根径级别单根抗拉力不存在显著性差异($p > 0.05$);(2,4]和(4,6] mm 根径级别单根抗拉力显著低于(6,8]和(8,10] mm 根径级别($p < 0.05$)。整体断裂模式条件下,(8,10] mm 根径级别单根抗拉力相对最高,但与(6,8] mm 根径级别单根抗拉力差异性不显著($p > 0.05$)。该断裂模式下,(6,8]和(8,10] mm 根径级别单根抗拉力显著高于(4,6]和(2,4] mm 根径级别,而后 2 个根径级别单根抗拉力间亦存在显著性差异($p < 0.05$)。

在上述 4 个根径级别范围内,柠条锦鸡儿单根在周皮断裂模式和整体断裂模式条件下单根抗拉强度分别为(26.30±2.36)~(62.72±10.10)MPa 和(40.68±22.38)~(60.24±15.50)MPa。2 种断裂模式对应的单根抗拉强度仅在(6,8] mm 根径级别条件下存在显著性差异($p < 0.05$)。周皮断裂模式下,(2,4] mm 根径级别单根抗拉强度显著高于其余根径级别($p < 0.05$),其次依次

为(4,6],(6,8]及(8,10] mm 根径级别,而后3个根径级别单根抗拉强度不存在显著性差异($p>0.05$)。整体断裂模式条件下,(2,4] mm 根径级别单根抗拉强度高于其余根径级别,其次依次为(4,6],(6,8]和(8,10] mm 根径级别,但4个根径级别单根抗拉强度之间不存在显著性差异($p>0.05$)。

在上述4个根径级别范围内,柠条锦鸡儿单根在周皮断裂模式和整体断裂模式条件下单根弹性模量分别为(237.76±128.35)~(838.71±833.72) MPa 和 (252.15±141.89)~(1 149.53±1 243.20) MPa。相同根径级别条件下2种断裂模式对应的单根弹性模

量不存在显著性差异($p>0.05$)。在上述4个根径级别条件下,周皮断裂模式对应的单根弹性模量依次降低,其中,在(2,4]和(4,6] mm 根径级别条件下,单根弹性模量不存在显著性差异($p>0.05$);(4,6],(6,8]和(8,10] mm 3个根径级别对应的单根弹性模量亦不存在显著性差异($p>0.05$)。整体断裂模式条件下,(2,4] mm 根径级别单根弹性模量高于其余根径级别,但与(4,6] mm 根径级别单根弹性模量不存在显著性差异($p>0.05$);(2,4]和(4,6] mm 根径级别单根弹性模量显著高于(6,8]和(8,10] mm 根径级别,而后2个根径级别单根弹性模量间不存在显著性差异($p>0.05$)。

表3 柠条锦鸡儿单根抗拉力学特性指标试验结果

断裂模式	根径级别/mm	单根抗拉力/kN	单根抗拉强度/MPa	单根弹性模量/MPa	单根极限延伸率/%	样本数/根
周皮断裂	2<D≤4	0.56±0.11 [*] b	62.72±10.10a	838.71±833.72a	19.22±10.21a	8
整体断裂		0.24±0.25 [*] c	60.24±15.50a	1149.53±1243.20a	32.38±8.45a	4
周皮断裂	4<D≤6	0.66±0.22 [*] b	39.17±12.21b	511.08±368.37ab	23.93±11.90a	15
整体断裂		1.30±0.62 [*] b	56.06±25.62a	627.06±263.65a	20.42±5.38b	11
周皮断裂	6<D≤8	1.44±0.84 [*] a	37.07±17.21 [*] b	244.85±135.67b	21.88±6.64a	14
整体断裂		1.99±0.35 [*] a	53.40±9.47 [*] a	252.15±141.89b	20.24±4.13b	14
周皮断裂	8<D≤10	1.47±0.22a	26.30±2.36b	237.76±128.35b	19.38±2.08a	4
整体断裂		2.25±1.10a	40.68±22.38a	376.24±154.36b	14.55±7.71b	3

注:图中*表示同一根径级别下周皮断裂模式与整体断裂模式的单根抗拉力之间、单根抗拉强度之间、单根弹性模量之间和单根极限延伸率之间在显著性水平0.05下呈现差异;图中小写字母表示相同断裂模式在不同根径级别条件下单根抗拉力之间、单根抗拉强度之间、弹性模量之间以及单根极限延伸率之间的差异显著性分析结果(LSD法), $p<0.05$ 。

在上述4个根径级别范围内,柠条锦鸡儿单根在周皮断裂模式和整体断裂模式条件下单根极限延伸率分别为19.22%±10.21%~23.93%±11.90%和14.55%±7.71%~32.38%±8.45%。相同根径级别条件下2种断裂模式对应的单根极限延伸率不存在显著性差异($p>0.05$)。周皮断裂模式条件下,不同根径级别所对应的单根极限延伸率不存在显著性差异($p>0.05$),其中(4,6] mm 根径级别对应的单根极限延伸率相对较大。整体断裂模式下,(2,4] mm 根径级别所对应的单根极限延伸率显著高于(4,6],(6,8]和(8,10] mm 3个根径级别($p<0.05$),且后3个根径级别对应的单根极限延伸率不存在显著性差异($p>0.05$)。

2.3 柠条锦鸡儿单根抗拉力学特性指标与根径的关系

由图3A可知,周皮断裂模式和整体断裂模式条件下,柠条锦鸡儿单根抗拉力随着根径的增大分别呈指数函数和幂函数增长趋势,对应的函数关系式分别为 $y=0.2113e^{0.2483}$ ($R^2=0.5775$)和 $y=0.0159x^{2.509}$ ($R^2=0.8043$)。2种断裂模式下柠条锦鸡儿单根抗拉力与根径的相关系数分别为0.6922,0.7871,说明2种断裂模式下单根抗拉力与根径均呈中度正相关关系。由图3B可知,2种断裂模式条件下柠条锦鸡儿单根

抗拉强度随着根径的增大呈逐渐降低趋势。但2种断裂模式条件下单根抗拉强度和根径之间不存在显著性的函数关系。周皮断裂模式和整体断裂模式下,单根抗拉强度与根径的相关系数分别为-0.4907和-0.2078,表明以上2种单根断裂模式分别与根径呈中度负相关和弱负相关关系。

由图3C可知,周皮断裂模式和整体断裂模式条件下柠条锦鸡儿单根弹性模量随着根径的增大呈逐渐降低趋势。但2种断裂模式条件下弹性模量和根径之间不存在显著性的函数关系。周皮断裂模式和整体断裂模式下,单根弹性模量与根径的相关系数分别为-0.3646和-0.5861,表明以上2种单根断裂模式单根弹性模量与根径分别呈低度和中度负相关关系。由图3D可知,2种断裂模式下柠条锦鸡儿单根极限延伸率随着根径的增大呈逐渐降低趋势。但2种断裂模式条件下极限延伸率和根径间的关系亦未表现出相对显著性的函数关系。周皮断裂模式和整体断裂模式下,单根极限延伸率与根径的相关系数分别为-0.0735和-0.5176,表明以上2种断裂模式单根极限延伸率分别与根径呈弱度负相关和中度负相关关系。

2.4 柠条锦鸡儿单根拉伸应力—应变关系曲线

图 4 所示为周皮断裂模式和整体断裂模式条件下对应的单根拉伸应力—应变关系曲线。由图 4A 和 4B 可知,在周皮断裂模式条件下,存在 2 种类型的应力—应变关系。第一种类型即应力—应变关系曲线 I (图 4A)。该类曲线总体可分为 4 个阶段,分别为弹性变形、弹塑性变形、应变硬化及周皮断裂 4 个阶段。其中,单根受力的初期阶段即进入弹性变形阶段,表现在图 4A 的 OA 段曲线,该阶段曲线近似于直线,单根拉应力与应变呈线性关系。在弹性变形阶段结束后,单根应力—应变曲线进入弹塑性变形阶段,即图 4A 的 AB 段曲线,该阶段应力—应变曲线呈上凸形,单根拉应力与应变呈非线性关系,表示单根在弹塑性变形阶段既包含有弹性变形,也有塑性变形。在经历弹塑性变形阶段后,单根应力—应变曲线进入应变硬化阶段,表现为图 4A 中的 BH 段曲线,该阶段应力—应变曲线近似为直线,单根应力和应变之间亦呈线性增长关系。应变硬化阶段的终点 H 点,亦为单根拉应力峰值点,对应的极限拉应力即为周皮断裂模式条件下的单根抗拉强度。曲线到达 H 点时,单根周皮首先发生断裂,单根进入周皮断裂阶

段,即图 4A 中的 HC 段曲线。在周皮断裂阶段,由于单根两端夹具的夹持力能够为周皮和次生维管组织界面提供较大的正应力,故单根拉应力主要来自周皮和次生维管组织界面相互滑移产生的剪切力。随着周皮与次生维管组织相对滑移距离的增大,其界面接触面积逐渐减小,界面剪应力相应地降低,直至试验结束。周皮断裂模式条件下另一类型应力—应变关系曲线 II 如图 4B 所示。该类曲线亦可分为弹性变形、弹塑性变形、应变硬化及周皮断裂 4 个阶段。但与应力—应变关系曲线 I 存在差异的是,在应变硬化阶段,曲线 II 单根应力和应变不再呈线性增长关系,对应的应力—应变曲线呈现出明显的锯齿形非线性波动(如图 4B 的 BHF 段曲线所示),且单根拉应力峰值点位于曲线中段,而非末端终点。通过试验观察,发现该段曲线具有上述特征的主要原因在于当单根在经历弹塑性变形阶段后,局部就已经出现断裂破坏。在进入应变硬化阶段后,随着单根拉应力逐渐增大,周皮受力后断裂区域进一步扩大。由于周皮表面物质组成的非均质性,因此周皮断裂区域扩大时,会不断出现局部应力集中现象,导致曲线出现锯齿形非线性波动的特征。当周皮全部断裂后,则进入周皮断裂阶段。

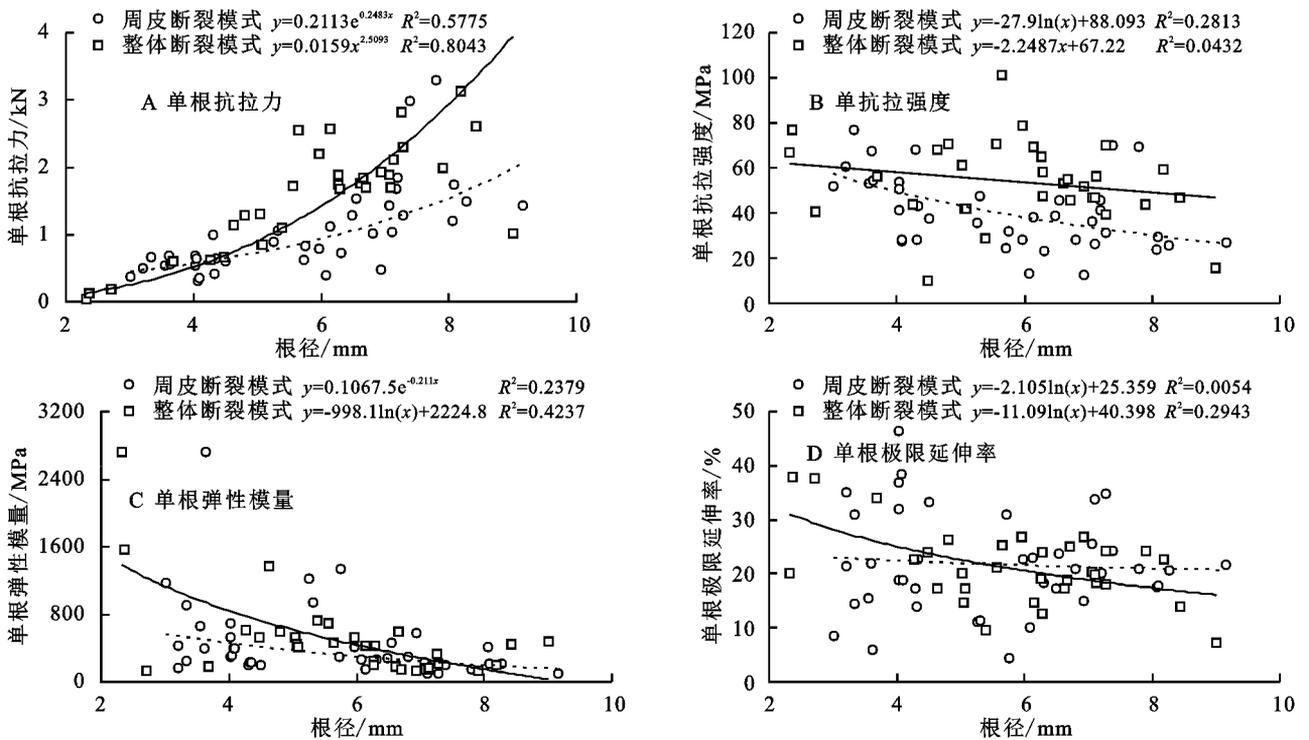


图 3 柠条锦鸡儿单根抗拉力学特性指标与根径的关系

单根整体断裂模式条件下对应的单根拉伸应力—应变关系曲线见图 4C 和 4D 所示。单根整体断裂模式条件下,曲线总体同样可分为 4 个阶段,分别为弹性变形、弹塑性变形、应变硬化及断裂破坏 4 个阶段。其中,弹性变形、弹塑性变形和应变硬化阶段特征与周皮断裂

模式下应力—应变曲线 I 对应的 3 个阶段特征相一致,故整体断裂模式下应力—应变曲线 III 和周皮断裂模式下应力—应变曲线 I,仅最后阶段曲线特征存在差异。整体断裂模式条件下应力—应变曲线 III 最后一个阶段为断裂破坏阶段,如图 4C 的 HC 段曲线所示。在该阶段

的起始点 H 点,单根周皮和次生维管组织同时发生断裂,故该阶段应力—应变曲线发生跌落,拉应力骤降。整体断裂模式下应力—应变曲线Ⅳ与应力—应变曲线Ⅲ相比,该类应力—应变曲线在断裂破坏阶段出现了 1 个

拉应力峰值点 F,该峰值的出现是由于在 H 点以后,单根周皮和次生维管组织虽然同时发生断裂,但周皮或次生维管组织还存在局部连接现象,其局部连接断裂破坏则会在应力—应变曲线上出现一个峰值点。

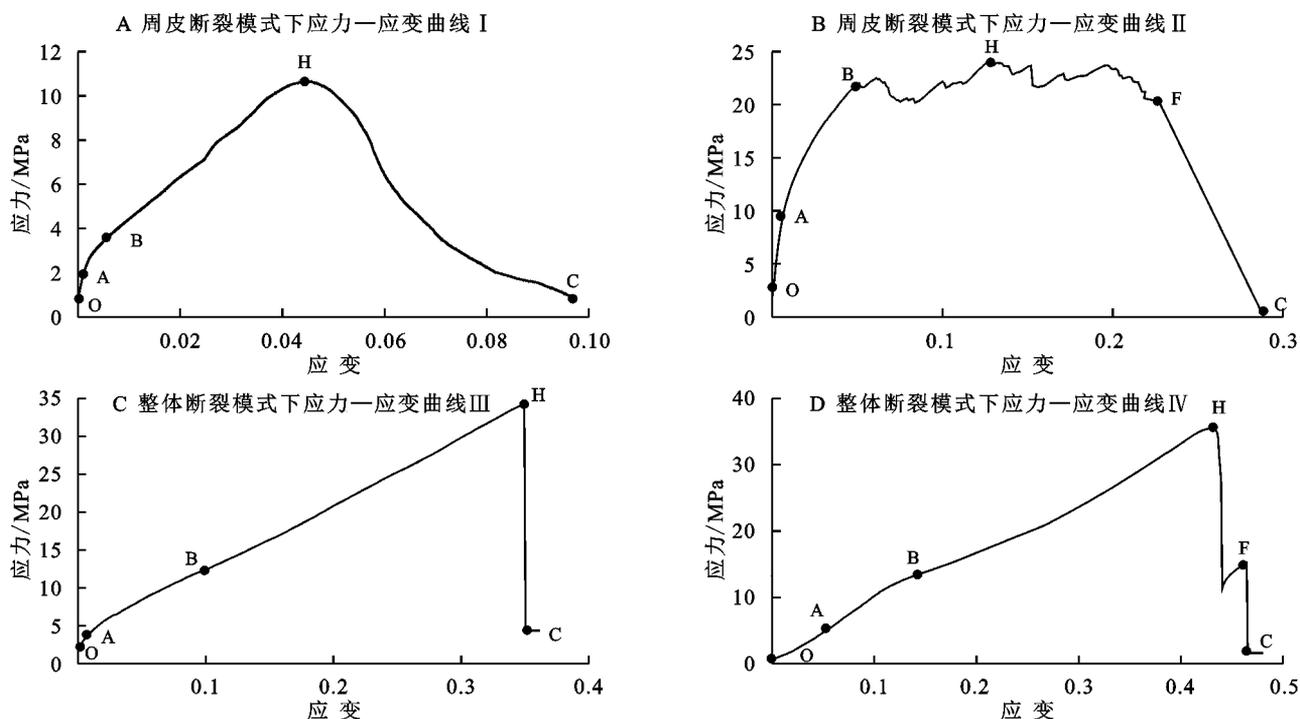


图 4 柠条锦鸡儿单根应力—应变关系曲线

3 讨论

该项研究以周皮断裂模式和整体断裂模式作为分类依据,对柠条锦鸡儿单根拉伸试验结果进行了对比分析。研究表明,同种断裂模式条件下,单根抗拉力学特性指标在不同根径级别条件下差异显著性各异。在不同断裂模式条件下,柠条锦鸡儿单根抗拉力和单根抗拉强度分别在(2, 4], (4, 6]和(6, 8] mm 以及(6, 8] mm 根径级别条件下存在显著性差异($p < 0.05$),而单根弹性模量和极限延伸率在相同根径级别条件下均不存在显著性差异($p > 0.05$)。因此,在利用单根拉伸试验来获取木本植物根系单根抗拉力学特性时,有必要先按照根径级别对单根抗拉力学特性指标进行分类,在此基础上,进一步按照断裂模式对同一级别根径进行分类,并进行差异显著性分析。如果单根抗拉力学特性指标在同一根径级别不同断裂模式条件下存在显著性差异。那么有必要先在根系调查的基础上获取不同植物在不同生长期条件下,不同根径级别单根在根系中的比例,同时确定各根径级别条件下不同断裂模式单根样本数占该根径级别全部有效样本数的占比,以此计算出不同根径级别和不同断裂模式条件下单根抗拉力学特性指标

的加权平均值作为该种植物在对应生长期的单根抗拉力学特性指标推荐使用值。

该项研究中,周皮断裂模式和整体断裂模式条件下的单根抗拉力随着根径的增大分别呈指数函数和幂函数增长趋势。以上结果与朱海丽等^[11]和刘昌义等^[23]所开展的研究结果相类似,以上学者分别对生长期为 18 个月和 1~2 年的幼龄期柠条锦鸡儿根系开展了单根拉伸试验,结果显示幼龄期柠条锦鸡儿单根抗拉力均与根径呈幂函数增长关系。此外,随着根径的增大,柠条锦鸡儿单根抗拉强度、单根弹性模量和单根极限延伸率均呈逐渐降低的变化趋势,这与王萍花等^[12]对油松等 4 种乔木植物单根进行单根拉伸试验所获得的结果相一致。该项研究中,除单根抗拉力以外,其他 3 个单根抗拉力学特性指标和根径间不具有显著性的函数关系。究其原因,与根系材料本身的不均质性存在关系。根系在生长的过程中,受土壤养分、土壤物理力学特性以及动物啃食多种环境因素影响,使根系单根表面形态在其轴向和径向方向均存在一定程度的不规则性和随机性,甚至在局部存在生长缺陷,导致单根本身的不均质性。随着树龄和根径的增大,这些不均质性可能进一步继承和放大。表面形态发生突变或存在缺陷的位置会在单根受到拉

应力时成为应力集中点,从而增大单根破坏位置的随机性,并导致单根拉伸试验中单根抗拉力学特性指标与根段平均根径之间的相关性降低。因此,在遇到上述情况时,有必要增加单根拉伸试验有效样本数,以较多的有效数据来降低根系材料本身的不均质性对单根抗拉力学特性指标的影响。

单根在受到拉应力时,以何种形式发生断裂破坏取决于单根次生结构特征、各结构物质组成和力学特性以及各结构在受力过程中的应力状态。朱海丽等^[33]的研究结果表明,柠条锦鸡儿单根沿其径向方向自外向内分别由周皮、中柱鞘薄壁组织和次生维管组织组成。其中,周皮为数层排列整齐呈长方形的木栓细胞(该项研究中,根径为2.33~9.16 mm的中龄期柠条锦鸡儿单根周皮厚度为0.5~1.0 mm);中柱鞘薄壁组织中则有分泌道分布;次生维管组织包括次生韧皮部、维管形成层和次生木质部,约占根系横截面积的80%。周皮和次生维管组织具有一定的材料强度,是单根材料强度的来源。然而,位于周皮和次生维管组织之间的中柱鞘薄壁组织的分泌道中存在一定量的组织液,润滑性较强。因此,中柱鞘薄壁组织的存在,使得柠条锦鸡儿单根周皮和次生维管组织之间存在一个软弱夹层,故单根在受到拉应力时所表现出来的抗拉力学特性和断裂方式,取决于周皮、中柱鞘薄壁组织和次生维管组织的应力状态。单根拉伸试验中,夹具对单根两端夹持段表面施加的垂直于根表面的均布荷载类似于单根生长在地下时,土压力在根表面形成的荷载。单根被夹具夹持并承受拉伸作用的过程,可看作土体剪切面或张裂面发生变形破坏时,穿过剪切面或张裂面的单根在根—土界面摩擦力的作用下,将土体剪应力和张拉应力传递给单根,从而使单根承受拉应力的过程。假设夹具的夹持力足够大,且在夹持段范围内,夹具与周皮之间不发生相对位移,单根仅在两夹具中部位置发生断裂(相当于单根在土体中受拉时,根—土界面摩擦力大于单根抗拉力,单根被拉断,而非被拔出)。此时,上下夹具之间的单根承受拉伸作用,并产生拉应力。周皮和次生维管组织首先同时进入弹性变形阶段,当二者之一或二者同时达到弹性极限时,单根相继进入弹塑性变形阶段以及应变硬化阶段。在应变硬化阶段,如果周皮和次生维管组织同时达到各自的极限强度,则单根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。理论上,如果次生维管组织先达到抗拉强度时,次生维管组织会先于周皮

断裂破坏。但本次试验以及相关试验研究报道中^[20]未发现次生维管组织先断裂的试样,这可能和次生维管组织抗拉力学特性优于周皮,以及中柱鞘薄壁组织的存在导致周皮和次生维管组织在单根拉伸过程中受力及变形不均衡相关。值得一提的是,该项研究是从室内单根拉伸试验的基础上,分析探讨了灌木柠条锦鸡儿不同断裂破坏模式的应力—应变特征和力学机理。而在室外自然情况下,不同断裂模式对于根—土相互作用力学过程,以及根系固土护坡效果的具体影响尚不明确,还有待通过数值模拟等分析方法进一步开展相关试验研究。

4 结论

(1) 单根拉伸过程中,柠条锦鸡儿单根有2种断裂模式,即周皮断裂模式和整体断裂模式;周皮断裂模式条件下,单根抗拉力、单根抗拉强度、单根弹性模量和单根极限延伸率分别为 $(0.56 \pm 0.11) \sim (1.47 \pm 0.22)$ kN, $(26.30 \pm 2.36) \sim (62.72 \pm 10.10)$ MPa, $(237.76 \pm 128.35) \sim (838.71 \pm 833.72)$ MPa 和 $19.22\% \pm 10.21\% \sim 23.93\% \pm 11.90\%$;整体断裂模式条件下,上述4个单根抗拉力学特性指标分别为 $(0.24 \pm 0.25) \sim (2.25 \pm 1.10)$ kN, $(40.68 \pm 22.38) \sim (60.24 \pm 15.50)$ MPa, $(252.15 \pm 141.89) \sim (1\ 149.53 \pm 1\ 243.20)$ MPa 和 $14.55\% \pm 7.71\% \sim 32.38\% \pm 8.45\%$;2种断裂模式单根抗拉力和单根抗拉强度分别在 $(2,4]$, $(4,6]$ 和 $(6,8]$ mm以及 $(6,8]$ mm根径级别条件下存在显著性差异($p < 0.05$);相同断裂模式不同根径级别之间,4个单根抗拉力学特性指标差异程度各不相同。

(2) 周皮断裂模式和整体断裂模式条件下单根抗拉力随着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、单根弹性模量和单根极限延伸率随着根径的增大呈降低趋势,但不存在较为显著的函数关系。

(3) 周皮断裂模式条件下,柠条锦鸡儿单根拉伸应力—应变曲线分为弹性变形、弹塑性变形、应变硬化及周皮断裂4个阶段;而整体断裂条件下,分为弹性变形、弹塑性变形、应变硬化及断裂破坏4个阶段;2种断裂破坏模式应力—应变曲线主要在应变硬化和周皮断裂阶段存在差异。

参考文献:

- [1] 魏刚,殷志强,史立群,等.西宁市北山地区林家崖滑坡发育特征及稳定性分析[J].地质与资源,2015,24(2): 146-151.
- [2] 秦大河.中国西部环境演变评估综合报告[M].北京:科

- 学出版社,2002:4-6.
- [3] 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.
- [4] Roering J J, Schmidk K M, Stock J D, et al. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003,40:237-253.
- [5] Wang X, Hong M 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.
- [6] 杨路,杜峰,秦晶晶,等.黄土区3种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究[J].水土保持研究,2022,29(1):295-300,310.
- [7] Bordoloi S, Ng C W W. The effects of vegetation traits and their stability functions in bio-engineered slopes: A perspective review[J]. Engineering Geology, 2020,275(10):105742.
- [8] Stokes A, Atger C, Bengough A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides[J]. Plant and Soil, 2009,324(1/2):1-30.
- [9] 刘亚斌,余冬梅,祁兆鑫,等.寒旱环境黄土区灌木植物根系拉拔试验及其根系表面微观结构特征研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3701-3713.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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] 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.
- [16] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant and Soil, 2005,278:1-9.
- [17] Ekeoma E C, Boldrin D, Loades K W, et al. Drying of fibrous roots strengthens the negative power relation between biomechanical properties and diameter [J]. Plant and Soil, 2021,469(1):321-334.
- [18] Zhang C B, Xia Z, Jing J, et al. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. Catena, 2019,172:140-147.
- [19] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰,等.油松根系抗拉应力与应变全曲线试验研究[J].中国水土保持科学,2006,4(2):66-70.
- [20] Liu Y B, Shi C, Yu D M, et al. Characteristics of root pullout resistance of *Caragana korshinskii* Kom. in the loess area of northeastern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2022,14(7):811-823.
- [21] 邱权,李吉跃,王军辉,等.西宁南山4种灌木根际和非根际土壤微生物、酶活性和养分特征[J].生态学报,2014,34(24):7411-7420.
- [22] 牛西午,丁玉川,张强,等.柠条根系发育特征及有关生理特性研究[J].西北植物学报,2003,23(5):860-865.
- [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] 乔娜,余芹芹,卢海静,等.寒旱环境植物护坡力学效应与根系化学成分响应[J].水土保持研究,2012,19(3):108-113.
- [25] 杨东,王慧,程军奇,等.近50年青海省气候变化特征及其与 ENSO 的关系[J].生态环境学报,2013,22(4):547-553.
- [26] 孙毅.西宁市黄土滑坡发育特征及稳定性分析[D].西安:长安大学,2013.
- [27] 鹿化煜,王先彦,孙雪峰,等.钻探揭示的青藏高原东北部黄土地层与第四纪气候变化[J].第四纪研究,2007,27(2):230-241.
- [28] Zhuang J Q, Peng J B, Wang G H, et al. Prediction of rainfall-induced shallow landslides in the Loess Plateau, Yan'an, China. Using the TRIGRS model [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016,42(6):915-927.
- [29] 李京梅,盛嘉誉,唐仲涛.近60年西宁地区气候变化及突变分析[J].青海科技,2021,28(5):100-106.
- [30] 全国钢标准化技术委员会.金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [31] 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.
- [32] 李洪成,姜宏华. SPSS 数据分析教程[M].北京:人民邮电出版社,2012.
- [33] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等.护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J].农业工程学报,2009,25(5):40-46.