

大型水库消落带 2 种典型耐淹草本植物 单根抗拉力学特性

徐文秀^{1,2,3}, 杨玲^{1,4}, 鲍玉海¹, 韦杰^{2,3}, 李进林^{1,4}, 曹龄心²

(1.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室,

成都 610041; 2.重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331;

3.三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331; 4.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:研究水库消落带 2 种典型固土护坡草本的单根抗拉力学特性,可为明确草本根系固土护坡的力学机制提供依据。以狗牙根(*Cynodon dactylon*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*) 2 种草本植物为对象,通过室内单根拉伸试验,对比观测了不同根径级别条件下单根的抗拉力、抗拉强度、极限延伸率和弹性模量,分析了各力学特性指标与根径间的拟合关系,并探讨了单根拉伸试验过程中的应力—应变特征。结果表明:(1) 狗牙根单根抗拉力平均值大于苍耳,在 0.30~0.50 mm 和 0.90~1.00 mm 根径范围内两者达到显著性差异($p<0.05$),狗牙根单根抗拉力分别比苍耳的大 28.06%和 9.95%;(2) 狗牙根单根抗拉强度平均值是苍耳的 1.08 倍,在 0.40~0.50 mm 和 0.90~1.00 mm 根径范围内两者达到显著性差异($p<0.05$),狗牙根单根抗拉强度分别比苍耳大 24.10%和 18.72%;(3) 2 种草本单根抗拉力和单根抗拉强度随着根径增大,分别呈幂函数增长和幂函数降低关系;(4) 2 种草本单根均呈弹塑性材料特征,单根拉伸过程中的应力—应变关系表现为弹性变形、弹塑性变形、塑性变形和突然断裂 4 个变化阶段,单根弹性变形阶段的极限拉应力约占极限抗拉强度的 50%~70%;(5) 狗牙根单根极限延伸率显著大于苍耳($p<0.05$),分别为 $(23.59\pm 0.44)\%$ 和 $(14.54\pm 0.38)\%$,与之相反,狗牙根单根弹性模量显著小于苍耳($p<0.05$),分别为 (474.79 ± 13.82) MPa 和 (540.77 ± 14.21) MPa。整体来看,草本单根抗拉力学特性与植物类型、根径大小密切相关,狗牙根单根抗拉力和单根抗拉强度均大于苍耳,其单根抵抗外界拉伸作用的能力强于苍耳,说明狗牙根具有更强的固土护坡能力。

关键词:草本植物; 固土护坡; 单根抗拉力; 单根应力—应变关系; 水库消落带

中图分类号:Q947.6; S781.25

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0259-06

Tensile Mechanical Properties Single Root of Two Typical Flood-Tolerant Herbs in the Reservoir Riparian Zone

XU Wenxiu^{1,2,3}, YANG Ling^{1,4}, BAO Yuhai¹, WEI Jie^{2,3}, LI Jinlin^{1,4}, CAO Lingxin²

(1.Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2.School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 3.Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China; 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To further explore the mechanics mechanism of herb species roots on soil reinforcement and slope protection in the reservoir riparian zone, the mechanical properties of single root tensile of two typical herbs on soil reinforcement and slope protection were studied. The typical herbs (*i. e. Cynodon dactylon* and *Xanthium sibiricum*), which were widely grown in the reservoir riparian zone, were selected as the samples of study. Under the condition of different root diameter levels, the mechanical properties of single root tensile (*i. e. tensile force, tensile strength, limit extensile rate and elastic modulus*) of two herbs in the reservoir riparian zone were measured via single root tensile test. Furthermore, the stress-strain characteristics of single root during the tensile process were further analyzed. The results showed that: (1) the average value

收稿日期:2019-11-18

修回日期:2019-12-10

资助项目:国家自然科学基金(41977075,41571278,41771321);四川省科技计划项目(2018SZ0132);国家级大学生创新创业训练计划项目(201810637003)

第一作者:徐文秀(1992—),女,山东昌邑人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:xuwenxiu0314@163.com;

通信作者:鲍玉海(1981—),男,山东武成人,副研究员,博士,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:byh@imde.ac.cn

of single root tensile force data of *Cynodon dactylon* was larger than that of *Xanthium sibiricum*; under the condition of 0.30~0.50 mm and 0.90~1.00 mm root diameter levels, the single root tensile forces of *Cynodon dactylon* were significantly 28.06% and 9.95% larger than those of *Xanthium sibiricum*, respectively ($p<0.05$); (2) the average value of single root tensile strength data of *Cynodon dactylon* was 1.08 times that of *Xanthium sibiricum*; under the condition of 0.40~0.50 mm and 0.90~1.00 mm root diameter levels, the single root tensile strengths of *Cynodon dactylon* were significantly 24.10% and 18.72% larger than those of *Xanthium sibiricum*, respectively ($p<0.05$); (3) with the increase of root diameter, the single root tensile force of two herbs significantly increased, and the single root tensile strength the significantly decreased. These relationships can both be well fitted by power function; (4) the stress-strain characteristics of single root of two herbs showed the characteristics of elastoplastic materials, and the stress-strain curves for two herbs could be divided into four stages: elastic deformation, elastic-plastic deformation, strain hardening and fracture failure; the ultimate tensile stress in the elastic deformation stage accounted for about 50%~70% of the ultimate tensile strength; (5) the single root limit extensile rate of *Cynodon dactylon* was significantly higher than that of *Xanthium sibiricum* ($p<0.05$), and the single root limit extensile rates of *Cynodon dactylon* and *Xanthium sibiricum* were $(23.59\pm0.44)\%$ and $(14.54\pm0.38)\%$, respectively; on the contrary, the single root elastic modulus of *Cynodon dactylon* was significantly lower than that of *Xanthium sibiricum* ($p<0.05$), and the single root elastic moduli of *Cynodon dactylon* and *Xanthium sibiricum* were (474.79 ± 13.82) MPa and (540.77 ± 14.21) MPa, respectively; the single root tensile mechanical properties of herbs are closely related to plant types and root diameter. On the whole, the single root tensile force and the single root tensile strength of *Cynodon dactylon* are both greater than those of *Xanthium sibiricum*. The ability to resist external stretching of *Cynodon dactylon* single root is stronger than that of *Xanthium sibiricum*, suggesting that *Cynodon dactylon* has stronger ability of soil reinforcement and slope protection.

Keywords: herbs; soil consolidation and slope protection; tensile force of single root; stress-strain characteristics of single root; reservoir riparian zone

植物根系可将土体内部剪应力转化为自身所承受的拉应力,显著增强土体抗剪强度从而有效发挥固土护坡作用^[1-3]。植物单根抗拉力学特性反映单根抗拉能力及抵抗抗变的能力,是评判植被增强边坡稳定性的重要依据^[4]。表征单根抗拉力学特性的重要指标有抗拉力、抗拉强度、极限延伸率和弹性模量等,抗拉力和抗拉强度反映单根抵抗极限拉伸作用的能力^[5],极限延伸率和弹性模量则可分别反映单根抵抗塑性变形和弹性变形的能力^[6]。草本根系可显著发挥其固土护坡作用,其中较细根系可显著增强土壤抗剪强度和提高土壤抗冲性,固土护坡效应较为显著^[7-8]。国内外学者开展了不同地区不同草本单根抗拉力学特性差异、单根应力—应变特征、单根抗拉力学特性影响因素等相关试验研究^[9-13]。已有研究结果表明,不同草本单根抗拉力和单根抗拉强度存在明显差异,草本单根在拉伸过程中的应力—应变关系曲线反映其具有弹塑性材料特征,单根抗拉力和单根抗拉强度与根径间关系密切,单根抗拉力随根径增大呈幂函数增大趋势,单根抗拉强度随根径减小呈幂函数减小趋势^[1,9-15]。草本单根内在化学成分是影响单根抗拉力学特性的重要

因素,草本单根抗拉力与木质素、木纤比呈正相关,与纤维素、综纤维素含量呈负相关^[15-16]。

大型水库消落带受水库调水节律影响,遭受周期性高压淹水与高幅度干湿交替作用,其植被、土壤等下垫面状况在短期内发生巨变,特殊的水文环境诱发强烈的土壤侵蚀,亟需植被重建与生态修复^[17-19],而遴选固土抗蚀植被物种是消落带生态重建的关键,相关研究表明用草本植物进行生态重建较为经济、高效^[19]。单根抗拉力学特性可作为此地区草本固土护坡效应的重要评判依据,但目前对此地区典型草本单根抗拉力学特性及其影响因素的研究较少,对不同草本单根抗拉力学特性的对比研究更为匮乏。本研究选取水库消落带狗牙根和苍耳 2 种典型适生耐淹草本植物为研究对象,通过室内单根拉伸试验,分析单根抗拉力、抗拉强度、极限延伸率、弹性模量与根径间的关系,探讨单根拉伸试验过程中的应力—应变特征,揭示 2 种草本单根抗拉力学特性差异及共同特性,以期为水库消落带草本根系固土力学机制研究、护坡效益评价、物种筛选等提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区腹心地带的忠县石宝镇库段消落带(107°32′—108°14′E, 30°03′—30°35′N)。区内出露岩层为侏罗纪沙溪庙砂页岩(J₂s)。该区域属亚热带东南季风气候,四季分明,雨量充沛,年均降雨量为1 150 mm,主要集中于6—8月,相对湿度为80%,年均气温为19.2℃,日照充足,日照时数为1 327.5 h。土壤类型有紫色土、黄壤和水稻土,紫色土分布最为广泛。淹水前土地利用方式主要有旱地、水田、林地等,水库正常运行后主要为一年生和多年生草本植物构成的草地。

受三峡水库“蓄清排浑”年调度方式的影响,三峡水库每年从10月开始蓄水到11月上旬逐渐上升至175 m,次年1—4月水位由175 m逐渐降低至156 m,5月末下降至防洪限制水位145 m,6—9月汛期水位在145~160 m波动。研究区主要自然恢复植被以狗牙根(*Cynodon dactylon*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)和鬼针草(*Bidens pilosa*)等几种草本为优势种群的植物群落为主,已经历了11 a的周期性淹水过程^[13,18]。该区域消落带坡地和阶地前缘陡坡分布广泛,经受多年的季节性淹没和出露过程,土壤侵蚀较为强烈^[18]。

1.2 样地选择和采样

2018年8月,在石宝镇共和村消落带170 m水位分别选取狗牙根和苍耳为主要植物种群的恢复草地,两种草本植物样地盖度均在85%以上,狗牙根为多年生禾本科草本植物,根系为须根系,苍耳为一年生菊科草本,根系为直根系。采样地均为缓坡弃耕地,坡度均在10°左右,土壤类型均为紫色土,土壤质地均为壤质黏土。采用全株挖掘法获取草本植物鲜根,及时将根系样品放入大号自封袋内并带回实验室进行保鲜处理。

1.3 试验方法和指标测定

将狗牙根和苍耳根系用清水洗净,用游标卡尺分别测量两者单根直径,发现狗牙根和苍耳总根径范围分别为0.00~1.00 mm和0.00~5.00 mm,且单根分别主要分布在0.00~0.70 mm和0.00~1.00 mm根径范围,考虑到两种草本小于1.00 mm根径范围内的单根具有物种代表性,且可发挥重要的固土护坡作用,故均选取此根径范围单根作为试验样,并以0.10 mm为间距筛分出了10个根径级别(0.00~0.10 mm, 0.10~0.20 mm, 0.20~0.30 mm, ..., 0.90~1.00 mm),单根长度控制在8~10 cm,每个根径级别试样选择10~25根,并放置于保鲜箱中。采用单根拉伸

试验法,所用仪器为LDS-5A型微机控制电子拉力试验机,电子拉力机最大试验力为5 kN,准确度为每档20%起优于示值的±1%。单根在进行拉伸试验前,先用记号笔在其中部附近位置做2个标记(标记间距为5 cm),并在2个标记间的3个位置处用游标卡尺测得3次单根直径,取平均值作为单根平均直径;随后将处理过的单根(两端用软纸包裹)夹持在上、下拉伸夹具之间,并保证上、下两夹具间的根段标距为5 cm(根段保持自然顺直并不受力)。试验过程中,上夹具以5 mm/min的速率匀速上行,使位于上、下两夹具间的根段承受拉伸作用,直至根段被拉断为止。选取位于上、下两夹具中间位置处发生断裂的单根的抗拉力学特性指标作为试验的有效数据。记录单根拉伸试验后的最大抗拉力,根据仪器导出的反映拉伸试验过程的时间、力、变形和位移等数据,计算拉应力、应变和抗拉强度等单根抗拉力学特性指标,绘制应力—应变关系曲线,并根据应力—应变关系曲线获得极限延伸率和弹性模量。

根系力学特性指标的计算方法^[9]:

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

$$\sigma = F / A \quad (2)$$

$$\epsilon = \Delta L / L \times 100\% \quad (3)$$

$$E = (\sigma_{0.40} - \sigma_{0.20}) / (\epsilon_{0.40} - \epsilon_{0.20}) \quad (4)$$

式中: P 为根系抗拉强度(MPa); F_{\max} 为最大抗拉力(N); D 为根系平均直径(mm); σ 为应力(MPa); F 为抗拉力(N); A 为根段横截面积(mm²); ϵ 为根系纵向线应变即延伸率(%); ΔL 为根系拉伸时的伸长量(mm); L 为根段原始长度(mm),本研究中即标距,取50 mm; E 为弹性模量,根据应力—应变关系曲线特征,在抗拉强度极限应力的50%以内,2种草本单根变形近似处于弹性区域,故本试验弹性模量 E 取40%和20%极限应力时的抗拉割线模量(MPa)。

2 结果与分析

2.1 单根抗拉力特征

由小于1.00 mm根径范围内的平均单根抗拉力来看,狗牙根[(9.58±0.57) N]大于苍耳[(9.30±0.66) N],狗牙根平均单根抗拉力比苍耳的大0.28 N,尤其在0.30~0.50 mm和0.90~1.00 mm两个根径范围,狗牙根与苍耳的单根抗拉力达到显著性差异($p < 0.05$),狗牙根的单根抗拉力分别比苍耳的大28.06%和9.95%。整体来看,狗牙根大部分根径级别条件下的单根抗拉力大于苍耳,其单根抵抗外界拉伸作用的能力强于苍耳。此外,2种草本单根抗拉力与根径大小密切相关,单根抗拉力均随根径增大而增

大,且变化幅度较为相似。2 种草本单根抗拉力与根径间均具有较好的幂函数关系,狗牙根和苍耳对应的拟合方程分别为 $y=27.74x^{1.32}$ 和 $y=25.16x^{1.33}$,拟合优度(R^2)分别为 0.89,0.83 (图 1)。

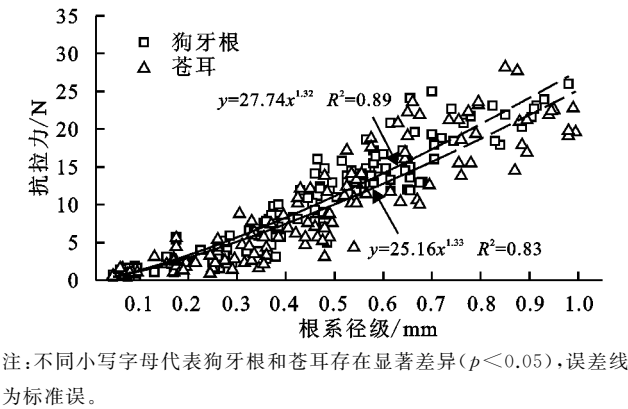


图 1 草本单根抗拉力随根径变化特征

2.2 单根抗拉强度特征

小于 1.00 mm 根径范围内的狗牙根平均单根抗拉强度 83.23 ± 6.16 MPa 大于苍耳的 77.42 ± 6.79 MPa,狗牙根平均单根抗拉强度是苍耳的 1.08 倍,狗牙根单根抗拉强度略大于苍耳;但在 0.40~0.50 mm 和 0.90~1.00 mm 根径级别条件下,狗牙根单根抗拉强度均显著大于苍耳($p < 0.05$),分别比苍耳大 24.10%和 18.72%。2 种草本单根抗拉强度均随根径增大而减小,且变化幅度较为相似。2 种草本单根抗拉强度与根径间的关系均可用幂函数进行较好拟合,狗牙根的拟合方程为 $y=28.99x^{-0.80}$,拟合优度(R^2)为 0.72,苍耳的拟合方程为 $y=22.49x^{-0.89}$,拟合优度为 0.76(图 2)。整体来看,狗牙根大部分根径级别条件下的单根抗拉强度大于苍耳,其单根承受的最大拉应力高于苍耳。

2.3 单根应力—应变特征

单根的应力—应变关系曲线是揭示单根拉伸全过程的重要基础,选取 2 种草本 0.20~1.00 mm 根径范围内代表性的单根应力—应变关系曲线进行单根

应力—应变特征分析(图 3)。2 种草本不同根径级别条件下单根应力—应变关系曲线的形态存在明显差异,但 2 种草本不同根径级别条件下单根应力—应变关系曲线存在一定相似性,即整体上均为从圆点出发的单峰曲线,基本可分为初期、过渡期、中期和后期 4 个受力变化阶段,反映出单根具有明显弹塑性材料特征。其中,初期为单根拉伸过程中的弹性变形阶段,应力—应变关系曲线基本呈直线型,应力与应变之间呈线性变化关系;过渡期为弹塑性变形阶段,应力—应变关系曲线发生明显弯曲,应力与应变之间呈非线性变化关系,单根在拉应力作用下开始屈服;中期阶段为塑性阶段,应力—应变关系曲线近似呈直线型,应力与应变之间呈线性变化关系,但应力随应变增大的速率要小于初期阶段;后期为突然断裂阶段,应力—应变关系曲线在达到某点后,曲线终止,即单根达到其极限拉应力后发生断裂。2 种草本单根拉伸过程中各受力变化阶段所对应的应变范围存在差异,就弹性变形阶段而言,狗牙根和苍耳对应的应变范围分别约为 0.02~0.10 mm 和 0.02~0.08 mm,就塑性变形阶段而言,狗牙根和苍耳对应的应变范围分别约为 0.10~0.35 mm 和 0.04~0.18 mm。观察图 3 中各应力应变曲线,发现 2 种草本单根弹性变形阶段的极限拉应力约为极限抗拉强度的 50%~70%,且单根极限拉应力和单根极限应变均随根径增大存在一定的减小趋势。

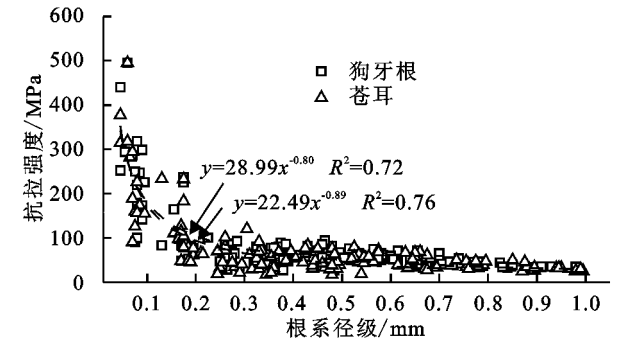


图 2 草本单根抗拉强度随根径变化特征

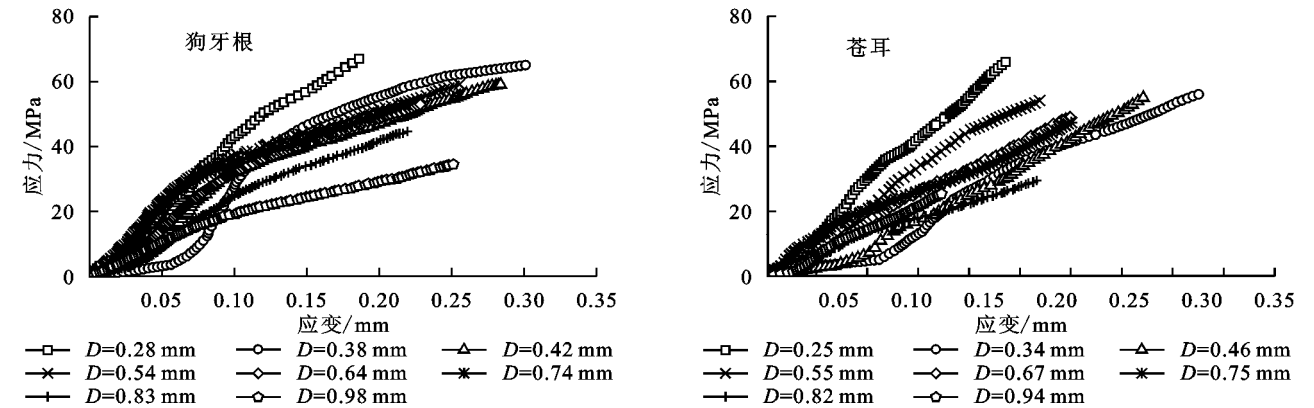
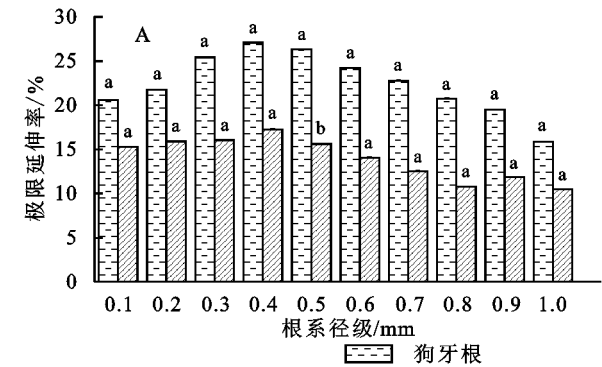


图 3 草本单根应力—应变特征

2.4 单根弹塑性变形特征

根径小于 1.00 mm 的狗牙根和苍耳单根极限延伸率范围分别为 11.48%~35.00% 和 3.12%~31.45%,狗牙根单根极限延伸率显著大于苍耳($p<0.05$),分别为 23.59%和 14.54%;其中在 0.40~0.50 mm 根径级别条件下,狗牙根单根极限延伸率显著大于苍耳($p<0.05$),是苍耳的 1.69 倍。狗牙根和苍耳单根极限延伸率随根径增大均呈先增后减趋势,在 0.30~0.40 mm 根径级别条件下,单根极限延伸率分别高达 27%和 17%,但整体来看,2 种草本单根极限延伸率随根径增大呈减小趋势,其中狗牙根单根极限延伸率随根径变化的幅度较大(图 4A)。狗牙根和苍耳单根极限延伸率和根径间的关系均可用单峰函数进行拟合,拟合优度(R^2)均较小,分别为 0.26,0.21(表 1)。狗牙根各根径级别条件下单根极限延伸率



注:不同小写字母代表狗牙根和苍耳存在显著差异($p<0.05$),误差线为标准误。

图 4 草本单根极限延伸率、单根弹性模量随根径变化特征

表 1 草本单根极限延伸率、单根弹性模量与根径间关系的拟合方程

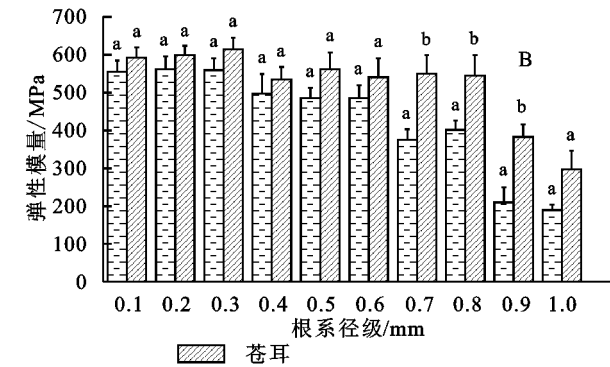
单根抗拉力学指标	草本	与根径间关系的拟合方程	R^2
单根极限延伸率	狗牙根	$y=12.19+(2\times\frac{16.88}{\pi})\times(\frac{0.73}{4\times(x-0.40)^2+0.53})$	0.26
	苍耳	$y=8.80+(2\times\frac{8.82}{\pi})\times(\frac{0.68}{4\times(x-0.30)^2+0.46})$	0.21
单根弹性模量	狗牙根	$y=562.57-453.55x^{2.41}$	0.30
	苍耳	$y=580.92-313.34x^{4.66}$	0.18

3 讨论

狗牙根和苍耳单根抗拉力学特性存在明显差异。对比狗牙根和苍耳小于 1.00 mm 根径范围内单根抗拉力学特性指标后发现,狗牙根单根抵抗外界拉伸作用的能力略强于苍耳,单根抗拉力均值和单根抗拉强度均值分别比苍耳大 3.01%和 7.50%,狗牙根单根抵抗塑性变形的能力显著强于苍耳,单根极限延伸率均值比苍耳大 62.24%,而单根抵抗弹性变形的能力显著弱于苍耳,单根弹性模量均值比苍耳小 12.20%,整体来看,狗牙根单根抗拉力学特性优于苍耳,可发挥

均大于苍耳,可见其单根呈现较好的延伸性,抵抗塑性变形的能力强于苍耳。

根径小于 1.00 mm 的狗牙根和苍耳单根弹性模量范围分别为 107.56~970.98 MPa 和 144.10~925.80 MPa,苍耳单根弹性模量 540.77 ± 14.21 MPa 显著大于狗牙根 474.79 ± 13.82 MPa ($p<0.05$),在 0.60~0.90 mm 根径范围内两者差异最为显著($p<0.05$),其中苍耳在 0.80~0.90 mm 根径级别条件下的单根弹性模量是狗牙根的 0.83 倍。此外,2 种草本单根极限延伸率均随根径增大而波动减小,其中狗牙根的波动幅度较大(图 4B)。狗牙根和苍耳单根极限延伸率和根径间的关系均可用幂函数进行拟合,但拟合优度(R^2)均较小,分别为 0.30,0.18(表 1)。苍耳各根径级别条件下单根弹性模量均大于狗牙根,可见其单根刚性较大,抵抗弹性变形的能力强于狗牙根。



更强的固土护坡能力,钟荣华等^[13]对消落带上狗牙根、扁穗牛鞭草和双穗雀稗等小于 0.50 mm 根径范围内的单根抗拉力学特性进行对比研究后也得出狗牙根单根抗拉力和抗拉强度均最大,固土护坡作用最为显著的结论,而关于苍耳单根力学特性的研究匮乏。本文基于单根抗拉力、单根抗拉强度、单根极限延伸率和单根弹性模量 4 项指标,可推测 2 种草本固土护坡能力的强弱,例如当土体出现滑坡裂缝时,狗牙根单根能够承受的极限拉应力较大,单根形变量较大,抵抗土体破坏的能力较强,当然苍耳单根也可有效发挥其固土护坡作用,其优势在于单根弹性较好,有一定的弹性形变范围,对

土体下滑的缓冲能力较强^[20-21]。单根抗拉力学特性是单根力学性能的宏观表现,从微观层面去解释单根抗拉力学特性,可更好的探究 2 种草本的单根力学特性及存在的种间差异。根系作为一种具生物学特质的力学材料,根系内部形态为细胞组成的复杂层状结构,根系内部显微结构组织及化学成分(纤维素、半纤维素和木质素等)比量对根系抗拉力学特性产生协同影响^[16,22-23]。狗牙根和苍耳分属 2 个植物科属,分别为多年生和一年生,根系类型亦不同,故 2 种草本单根本身遗传特性差异较大,而这直接导致的根系材料显著差异又是 2 种草本单根抗拉力学特性显著差异的本质原因。同时,大型水库长期淹水一出露一淹水交替的水文极端变化对消落带植物根系内在生物学特性产生显著影响,单根内在显微结构及化学成分均可发生相应变化,不同淹水时间、淹水深度及频率对不同植物种类的影响也不尽相同^[24]。因此,进一步研究可考虑草本单根耐淹水特性及单根显微结构、化学成分等变化,研究水库消落带下这种特殊环境下多种草本单根抗拉力学特性的变化及差异,并分析成因,为水库消落带不同淹水梯度下的最优固土护坡植物筛选和固土力学机制研究提供参考。

狗牙根和苍耳单根抗拉力学指标在根径间存在断裂力学上的尺寸效应^[25]。其中 2 种草本单根抗拉力和单根抗拉强度在根径间的尺寸效应最为明显,单根抗拉力随根径增大而明显增大,单根抗拉强度则随根径增大而明显减小,且 2 项根系指标与根径间的关系均可用幂函数进行较好拟合,这与国内其他研究的结果一致^[9-15],说明根径大小是单根抗拉力和抗拉强度的重要影响因素。当然,根系生长过程中的非均匀性和各向异性使得 2 种草本同一根径级别条件下的不同单根力学特性仍存在一定差异,其中单根极限延伸率和单根弹性模量在同一根径级别条件下的差异表现较为明显,这也可间接导致 2 项根系指标在根径间不存在明显的尺寸效应。单根抗拉力学特性在根径间的尺寸效应受单根横截面积、内在结构和化学成分的共同影响,即根径增大,横截面积增大及伴随的根系内在结构和化学成分的变化对单根抗拉力学特性产生生物、力学上的综合影响^[16,22-23]。同时,这种尺寸效应还可间接反映出单根生长发育过程中,根径由大到小,单根抗拉力学特性可发生相应变化。2 种草本单根拉伸试验过程中均表现出弹塑性材料特征,应力—应变关系曲线均存在弹性变形和弹塑性变形变化阶段,这与刘亚斌和钟荣华等人^[9,13]的研究结果较为相似,单根在拉伸过程中表现出的弹性特性在固土护坡过程中可发挥重要作用。观察和分析 2 种草本不同根径级别条件下所获

得的单根应力—应变关系曲线,各个受力阶段曲线存在较大差异,故本文未考虑抛弃受力阶段而建立草本不同根径级别条件下单根应力与全量应变之间的关系数学模型,在后续研究中可考虑抛弃受力阶段而建立草本应力与应变增量之间的关系数学模型或者分不同受力阶段分别建立相应的关系数学模型。

4 结论

(1) 狗牙根单根抗拉力和单根抗拉强度整体上均略大于苍耳,小于 1.00 mm 根径范围内的单根抗拉力均值分别为 9.58 N 和 9.30 N,单根抗拉强度均值则分别为 83.23 MPa 和 77.42 MPa,在某些根径级别条件下则显著大于苍耳($p < 0.05$)。可见与苍耳相比,狗牙根单根抵抗外界拉伸作用的能力较强。同时,2 种草本的单根抗拉力和抗拉强度与根径大小密切相关,随根径增大分别呈增大趋势和减小趋势,并均可用幂函数进行良好拟合。

(2) 狗牙根和苍耳单根拉伸过程中各受力变化阶段所对应的应力—应变特征存在明显差异,但总体来看,2 种草本单根均表现出弹塑性材料特征,单根拉伸过程中均表现为弹性变形、弹塑性变形、塑性变形和突然断裂 4 个变化阶段,且单根弹性变形阶段的极限拉应力约占极限抗拉强度的 50%~70%。

(3) 狗牙根和苍耳单根弹塑性变形特征存在显著差异,就小于 1.00 mm 根径范围内单根极限延伸率而言,狗牙根显著大于苍耳($p < 0.05$),均值分别为 23.59% 和 14.54%,其单根抵抗塑性变形的能力显著强于苍耳;就单根弹性模量而言,苍耳单根弹性模量则显著大于苍耳($p < 0.05$),均值分别为 540.77,474.79 MPa,其单根抵抗弹性变形的能力显著强于狗牙根。整体来看,2 种草本单根极限延伸率和单根弹性模量与根径间的关系较为不明显,但均随根径增大呈现出一定的减小趋势。

参考文献:

- [1] 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*, 2008,305:207-226.
- [2] 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):0-283.
- [3] 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*, 2009,324:1-30.

(下转第 272 页)

- [J].地理研究,2010,29(1):35-42.
- [16] 贺艳华,唐承丽,周国华,等.我国中部地区农村聚居现状及调控模式研究[J].人文地理,2014,29(3):95-102.
- [17] 师满江,颜耀文,曹琦.干旱区绿洲农村居民点景观格局演变及机制分析[J].地理研究,2016,35(4):692-702.
- [18] 关小克,张凤荣,刘春兵,等.平谷区农村居民点用地的时空特征及优化布局研究[J].资源科学,2013,35(3):108-114.
- [19] 姜广辉,何新,马雯秋,等.基于空间自相关的农村居民点空间格局演变及其分区[J].农业工程学报,2015,31(13):265-273.
- [20] 谭雪兰,钟艳英,段建南,等.快速城市化进程中农村居民点用地变化及驱动力研究:以长株潭城市群为例[J].地理科学,2013,34(3):309-315.
- [21] 朱彬,马晓冬.苏北地区乡村聚落的格局特征与类型划分[J].人文地理,2011,26(4):66-72.
- [22] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [23] 杨忍,刘彦随,龙花楼,等.基于格网的农村居民点用地时空特征及空间指向性的地理要素识别:以环渤海地区为例[J].地理研究,2015,34(6):1077-1087.
- [24] 谭雪兰,张炎思,谭洁,等.江南丘陵区农村居民点空间演变特征及影响因素研究:以长沙市为例[J].人文地理,2016,31(1):89-93,139.

(上接第 264 页)

- [4] Mahannopkul K, Jotisankasa A. Influence of root suction on tensile strength of *Chrysopogon zizanioides* roots and its implication on bioslope stabilization[J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(2):275-284.
- [5] 李宁,陈丽华,杨苑君.油松、华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J].北京林业大学学报,2015,37(12):77-84.
- [6] 吕春娟,陈丽华,周硕,等.油松根系固土的基本力学特性[J].水土保持学报,2011,25(5):17-20.
- [7] 李建兴,何丙辉,湛芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
- [8] Ye C, Guo Z, Li Z, et al. The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquilts in subtropical China [J]. Geomorphology, 2017,285:82-93.
- [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] 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.
- [11] 陆桂红,欧国强,杨顺,等.泥石流源区典型草本植物根系抗拉试验[J].山地学报,2014,32(6):725-731.
- [12] 周萍,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡耕地草本植物根系固结地埂的土力学机制[J].水土保持学报,2017,31(1):88-93.
- [13] 钟荣华,鲍玉海,贺秀斌,等.三峡水库消落带 4 种草本根系抗拉特性及根系粘聚力[J].水土保持学报,2015,29(4):188-194.
- [14] 李可,朱海丽,宋路,等.青藏高原两种典型植物根系抗拉特性与其微观结构的关系[J].水土保持研究,2018,25(2):240-249.
- [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] 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.
- [17] Bao Y H, He X B, Wang A B, et al. Dynamic changes of soil erosion in a typical disturbance zone of China's Three Gorges Reservoir[J]. Catena, 2018,169:128-139.
- [18] 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.
- [19] 贺秀斌,鲍玉海.三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J].中国水土保持科学,2019,17(4):160-168.
- [20] 刘福全,刘静,姚喜军,等.根系固土主导力学因素与差异性评价[J].生态学报,2015,35(19):6306-6315.
- [21] 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.
- [22] 张双燕,费本华,余雁,等.木质素含量对木材单根纤维拉伸性能的影响[J].北京林业大学学报,2012,34(1):131-134.
- [23] 李思诗.崩岗侵蚀劣地草本植物根系抗拉特性与微观性质的关系[D].福州:福建农林大学,2018.
- [24] 宋香静,李胜男,郭嘉,等.环境变化对湿地植物根系的影响研究[J].水生态学杂志,2017,38(2):1-9.
- [25] Hathaway R L, Penny D. Root strength in some *Populus* and *Salix* clones[J]. New Zealand Journal of Botany, 1975,13(3):333-344.