

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.026.

段继琪, 李建兴, 王波, 等. 4 种消落带适生草本根系抗拉特性及与微观结构的关系[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6):130-138.

Duan Jiqi, Li Jianxing, Wang Bo, et al. Relationship Between Tensile Properties and Microstructures of Four Kinds of Herbaceous Root in the Water-Level-Fluctuating Zone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6):130-138.

4 种消落带适生草本根系抗拉特性及与微观结构的关系

段继琪¹, 李建兴², 王波², 杜技能³, 张立芸⁴, 段青松³

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 中国电建集团昆明勘察设计研究院有限公司, 昆明 650051;

3. 云南农业大学 水利学院, 昆明 650201; 4. 云南农业大学 机电工程学院, 昆明 650201)

摘 要: [目的] 研究消落带适生草本根系解剖结构对单根力学特性的影响, 为明确消落带草本根系固土的微观力学机理提供依据。[方法] 选取菖蒲(*Acorus calamus* L.)、狗牙根(*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.)、风车草(*Cyperus involucratus* Rottb.)、花叶芦竹(*Arundo donax* 'Versicolor') 4 种消落带适生草本为研究对象, 使用万能试验机进行单根拉伸试验, 使用显微镜及图像分析软件测定根系微观结构, 定量分析了根系各显微结构与抗拉特性的关系。[结果] (1) 根系抗拉力、抗拉强度分别随直径的增大呈幂函数增大、减小, 4 种草本根系的平均抗拉力以花叶芦竹(13.02 N)最大, 菖蒲(5.90 N)最小, 花叶芦竹显著大于其他 3 种草本($p < 0.05$); 抗拉强度以狗牙根(42.79 MPa)最大, 花叶芦竹(24.16 MPa)最小, 菖蒲和狗牙根极显著大于其他两种草本($p < 0.01$)。 (2) 4 种草本根系的平均极限延伸率以风车草(36.18%)最大, 狗牙根(23.38%)最小, 风车草显著大于其余草本($p < 0.05$); 根系弹性模量随直径增大呈幂函数减小, 平均弹性模量以狗牙根(195.85 MPa)最大, 风车草(72.00 MPa)最小, 菖蒲和狗牙根显著大于风车草($p < 0.05$)。 (3) 4 种草本根系横切面均由表皮、皮层和中柱构成, 除花叶芦竹外, 基本结构均以皮层厚度最大, 中柱鞘厚度最小; 除菖蒲外, 微观结构组织比量均以皮层面积占比最大, 中柱面积占比次之, 韧皮部面积占比最小。 (4) 菖蒲抗拉特性受表皮和髓面积的影响, 狗牙根抗拉特性受表皮、木质部和韧皮部面积的影响, 花叶芦竹抗拉特性受皮层和髓面积的影响。[结论] 4 种消落带草本在根系固土能力方面各有优势, 菖蒲和风车草根主要起减缓消落带边坡变形的作用, 花叶芦竹根系主要起锚固作用, 狗牙根根系既能起较好的锚固作用, 也能较好的缓减边坡变形。

关键词: 水库消落带; 草本植物; 抗拉特性; 微观结构

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0130-09

Relationship Between Tensile Properties and Microstructures of Four Kinds of Herbaceous Root in the Water-Level-Fluctuating Zone

Duan Jiqi¹, Li Jianxing², Wang Bo², Du Jineng³, Zhang Liyun⁴, Duan Qingsong³

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China;

3. College of Water Resources, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to examine the effect of the anatomical structure of herbaceous root systems on the mechanical properties of single roots, and to provide a basis for elucidating the micromechanical mechanism of soil consolidation by herbaceous root systems in water-level-fluctuating zone. [Methods] Four species of water-level-fluctuating zone herbs (*Acorus calamus* L.; *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.; *Cyperus involucratus* Rottb.; *Arundo donax* 'Versicolor') were selected as research objects, and the single tensile test and microstructure determination test was carried out. [Results] (1) The tensile

收稿日期: 2024-01-02

修回日期: 2024-01-28

资助项目: 国家自然科学基金“三江并流区水库消落带草本植物根系水下固土机理研究”(42167046)

第一作者: 段继琪(1999—), 女, 云南昆明人, 硕士研究生, 研究方向为土地生态利用与保护。E-mail: 2417590386@qq.com

通信作者: 段青松(1971—), 男(白族), 云南大理人, 博士, 教授, 主要从事水土保持及土地生态整治研究。E-mail: 258437886@qq.com

http://stbcyj.paperonce.org

force and tensile strength of the root system increased and decreased as a power function of diameter, respectively. The average tensile force of the root system of the four species of herbs was the largest in *Arundo donax* ‘Versicolor’ (13.02 N), the smallest in *Acorus calamus* L. (5.90 N), which was significantly larger than the other three species of herbs ($p < 0.05$). The tensile strength was greatest for *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. (42.79 MPa) and smallest for *Arundo donax* ‘Versicolor’ (24.16 MPa), with *Acorus calamus* L. and *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. being highly significantly greater than the other two herbs ($p < 0.01$). (2) The average ultimate elongation of the root systems of the four herbs was the largest for *Cyperus involucratus* Rottb. (36.18%) and the smallest for *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. (23.38%), which was significantly larger than that of the remaining herbs ($p < 0.05$). The modulus of elasticity of the root system decreased as a power function with increasing diameter, and the average modulus of elasticity was the largest for *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. (195.85 MPa) and the smallest for *Cyperus involucratus* Rottb. (72.00 MPa), *Acorus calamus* L. and *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. were significantly greater than *Cyperus involucratus* Rottb. ($p < 0.05$). (3) Except for *Arundo donax* ‘Versicolor’, the basic structure with the cortical thickness was the largest, and the thickness of vascular bundle was the smallest. Except for *Acorus calamus* L., the microstructural organization ratio with the area of the cortex accounted for the largest percentage, the area of the stele was the second largest, and the area of the phloem accounted for the smallest percentage. (4) The tensile performance of *Acorus calamus* L. was influenced by the surface area of the epidermis and pulp. The tensile performance of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. was influenced by the surface area of the epidermis, xylem and phloem. The tensile performance of *Arundo donax* ‘Versicolor’ was influenced by the surface area of the cortex and pulp. [Conclusion] Each of the four water-level-fluctuating zone herbs has its own advantages in terms of root sequestration capacity. *Acorus calamus* L. and *Cyperus involucratus* Rottb. mainly play the role in slowing down the deformation and damage of the slope in the subsidence zone. *Arundo donax* ‘Versicolor’ mainly plays the role in consolidating soil. *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. can both buffer soil sliding and play the anchoring role.

Keywords: water level fluctuation zone; herbaceous plants; tensile characteristics; microstructure

水库消落带是指因水库运行时水位变化而使周围土地呈现周期性淹没和裸露所形成的水陆交错控制区域^[1]。消落带是水体循环调节的缓冲带,是陆地生态系统和水域生态系统之间进行物质交换、能量迁移的关键地带,在稳定库岸、防止水土流失、美化景观、维持水陆界面生态系统动态平衡等方面提供着不可替代的生态服务功能^[2]。但由于库水长期淹没、水位季节性大幅度涨落,导致原生植物消亡^[3],加剧了消落带的水土流失、边坡崩塌^[4],导致生态环境条件恶劣、地理景观格局剧变^[5]。植被作为消落带生态系统的重要组成部分,也是消落带生态功能的主体,能有效减缓库区的水土流失、促进水陆养分循环,更在维持消落带库岸生产力和生物多样性等方面起着积极作用^[6],是消落带生态修复的关键。

近年来,国内外学者对不同地区消落带适生植物开展了系列研究,主要集中于消落带适生植物的筛选^[7-8]、根土复合体抗蚀抗冲性^[9-10]、抗崩解性^[11-12]、抗剪性^[13]、根系抗拉力学特性^[14-15]等的研究。根系

抗拉强度是表征根系固土能力的重要指标,大多研究表明,不同植物之间的根系抗拉特性存在较大差异,根系的微观结构是影响根系抗拉特性的重要因素^[16]。李思诗^[17]通过研究崩岗区4种草本根系力学特性与微观结构的关系发现,草本植物根系的抗拉力和抗拉强度均与中柱、中柱鞘面积百分比呈正相关,与表皮面积百分比呈负相关。蒋坤云^[18]从微观结构讨论了华北固坡草本单根抗拉特性与主要微观结构的关系,结果显示,草本植物根系的木纤维面积百分比及壁腔比对单根最大抗拉力及抗拉强度有影响。张玉等^[19]对2种滨河草本的抗拉特性及微观结构展开研究,结果表明,华扁穗草的韧皮部面积占比与抗拉力呈负相关,与抗拉强度呈正相关,线叶嵩草的木质部、韧皮部面积占比均与抗拉力呈正相关,与抗拉强度呈负相关。根系微观结构受环境、种属的影响而不同,导致与抗拉特性的关系也有所不同。虽然当前已有学者从根系微观结构探究根系抗拉特性,但鲜有针对消落带适生植物展开的研究。水分是影响植物

生存和进化的重要影响因素之一。在反复干湿交替作用下,消落带植物的光合作用和呼吸作用受到影响,为了更好地适应环境,植物根系的微观结构发生变化,从而对根系抗拉力学特性产生影响^[20]。从微观角度研究消落带适生草本根系力学特性有助于进一步探究消落带植物应对淹水环境的适应机制以及固土能力变化规律。

为更好地分析消落带草本植物根系抗拉力学特性的微观结构机理,本研究选取 4 种消落带草本(菖蒲、狗牙根、风车草和花叶芦竹)为研究对象,通过开展单根拉伸试验和微观结构测定试验,定量分析 4 种草本根系的抗拉力学特性及与微观结构的关系,从微观结构角度明确不同草本植物根系固土的力学机理,为评价消落带植被护坡作用和植物筛选、优化植被配置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市云南农业大学后山试验基地(102°45'17"E,25°8'14"N),海拔 1 919 m,属低纬度亚热带—高原山地季风气候,年平均气温 15℃左右,年无霜期 240 d 以上,年日照总时数 2 200 h,年均降水量约 1 000 mm,年蒸发量 1 856 mm,降雨主要集中在 7—9 月。种植土壤为山原红壤,含水率为 21.43%,密度为 1.19 g/cm³。

1.2 供试植物

选取 4 种消落带适生草本:狗牙根[*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.]、风车草(*Cyperus involucratus* Rottb.)、花叶芦竹(*Arundo donax* 'Versicolor')、菖蒲(*Acorus calamus* L.)。狗牙根:禾本科,属低矮草本植物,生长适应性强,喜排水良好的肥沃土壤,根茎蔓延力强,节上常生不定根,是优良的水土保持植物。菖蒲:多年生草本植物,根状茎粗壮,具有毛发状须根,生长于沼泽地、溪流或水田边。风车草:又名伞草,莎草属多年生草本植物,根状茎短,粗大,须根坚硬,广泛分布于森林、草原地区的大湖、河流边缘的沼泽中。花叶芦竹:禾本科,芦竹属多年生挺水观叶草本,宿根,根状茎粗而多结,常大片生长于河畔、池沼和湖边。4 种草本均在消落带环境中具有较强的适生性^[6,14]。

1.3 样品种植与采集

2022 年 7 月 16 日,在云南农业大学后山试验基地种植槽内以播种的方式种植狗牙根,以移栽的方式种植菖蒲、风车草、花叶芦竹。生长过程中,保证狗牙根正常生长的需水,但不淹水;其他 3 种植物保持 5~10 cm 的淹水;2023 年 7 月 1—31 日,将 4 种草本

淹水没顶 5 cm,模拟消落带植物部分时段没顶受淹的状态;7 月 31 日后,4 种草本恢复至与淹水前相同的生长条件。2023 年 8 月 27 日进行样品采集,每种草本选取 3 株长势良好且一致的植株,将其地上部分刈割,采用全挖掘法把根系整株挖出,为保证根系完整,连根带土装入保鲜袋编号带回实验室冷藏。

1.4 单根拉伸试验

每种草本选取 50 根表皮完好、顺直且直径均匀的根系进行单根抗拉试验。使用数显游标卡尺测量根系的单根直径。采用深圳 WANCE 试验设备有限公司生产的 ETM104B 型电子万能试验机进行单根拉伸试验,设定标距为 50 mm,拉伸速率为 5 mm/min。试验前,将自制的塑料薄片用胶水粘在万能试验机夹具槽内以增加夹具与根系间的摩擦力,同时保证根系受力均匀。试验仅保留根系在中间 1/3 段发生断裂时测得的数据。根据试验根段的平均直径、抗拉力、位移等计算根系抗拉强度、极限延伸率、弹性模量,计算方法如下:

$$T_r = 4F / \pi D^2 \quad (1)$$

$$\epsilon = \Delta L / 50 \times 100\% \quad (2)$$

$$E_r = 200F / \pi D^2 \Delta L \quad (3)$$

式中: T_r 为根系抗拉强度(MPa); F 为根系最大抗拉力(N); D 为根系直径(mm); ϵ 为根系纵向应变,即极限延伸率(%); ΔL 为根系拉断时的伸长量(mm); E_r 为弹性模量(MPa)。

1.5 根系微观结构

选择抗拉成功预留的根段进行番红固绿染色,并采用石蜡切片法将根系制作为永久切片。切片制作完成后,采用 NIKON Eclipse ci 正置显微镜在 20, 100, 200 三个放大倍数下进行微观观察,通过连接的 CCD 采集视野中的图像,在显微成像软件 NIKON digital sight DS-F12 中对图像进行预处理和保存,最后运用 Image J 软件定量根系切片各结构组织比量,分别为表皮厚度及面积百分比、皮层厚度及面积百分比、中柱面积百分比、中柱鞘厚度及面积百分比、木质部面积百分比、韧皮部面积百分比和髓面积百分比。

1.6 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据整理和计算;采用 SPSS 26.0 进行单因素 ANOVA 分析和回归分析;采用 Origin 2022 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 草本根系抗拉特性

2.1.1 根系抗拉力和抗拉强度 4 种草本单根抗拉成功率为 20.45%~39.29%,测试成功的直径范围为

0.14~1.63 mm,测得根系抗拉力的范围为 1.37~34.35 N,抗拉强度范围为 9.12~94.16 MPa。

由图 1A 可知,4 种草本根系的最大抗拉力与直径呈幂函数增大关系。由图 2A 可知,4 种草本平均抗拉力大小依次为花叶芦竹(13.02 N)>狗牙根(9.27 N)>风车草(8.44 N)>菖蒲(5.90 N),且花叶芦竹显著大于其他 3 种草本($p<0.05$),分别是其他 3 种的 1.43 倍、1.57 倍、2.25 倍。由表 1 拟合方程可知, R^2 在 0.79~0.93 内,均达到极显著水平($p<0.01$)。拟合方程中的抗拉力系数 a 说明当直径为 1 mm 时,4 种草本根系抗拉力为花叶芦竹(15.366 N)>风车草(14.519 N)>狗牙根(13.079 N)>菖蒲(12.270 N)。抗拉力幂系数 b 说明随着直径增大,抗拉力的增速为

风车草>花叶芦竹>菖蒲>狗牙根。

由图 1B 可知,草本根系的抗拉强度与直径呈现幂函数减小关系。由图 2B 可知,4 种草本平均抗拉强度依次为狗牙根(42.79 MPa)>菖蒲(39.32 MPa)>风车草(24.57 MPa)>花叶芦竹(24.16 MPa),且菖蒲和狗牙根极显著大于风车草和花叶芦竹($p<0.01$)。由表 1 拟合方程可知, R^2 在 0.47~0.92 内,均达到极显著水平($p<0.01$)。拟合方程中的抗拉强度系数 c 说明当直径为 1 mm 时,4 种草本根系抗拉强度为花叶芦竹(19.772 MPa)>风车草(19.751 MPa)>狗牙根(16.661 MPa)>菖蒲(15.630 MPa)。抗拉强度幂系数 d 说明随着直径增大,抗拉强度的变化速率从快到慢依次为狗牙根>菖蒲>花叶芦竹>风车草。

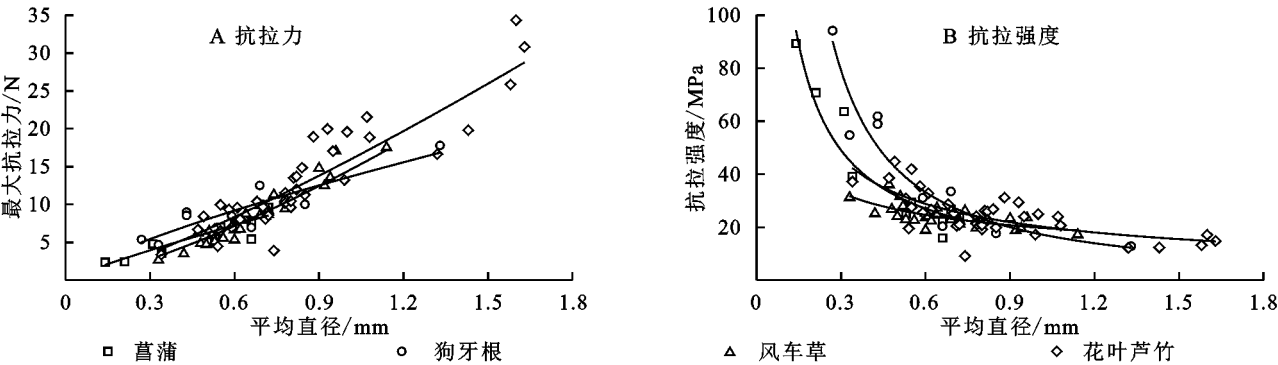
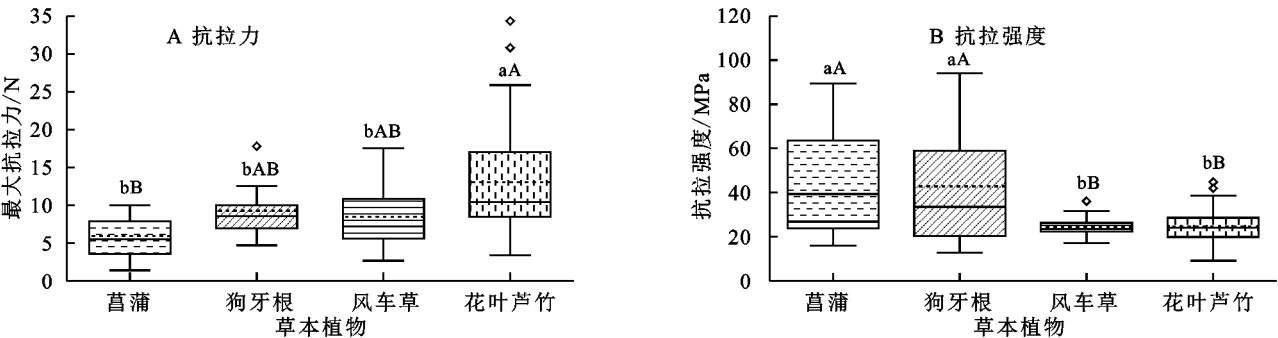


图 1 4 种草本根系抗拉力、抗拉强度随直径的变化特征

Fig. 1 Characteristics of tensile strength and tensile strength of four herbaceous root systems with diameter



注:不同小写和大写字母分别表示不同植物在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平下的差异显著性。

图 2 4 种草本根系平均抗拉力、平均抗拉强度

Fig. 2 Mean tensile strength and mean tensile strength of four herbaceous root systems

草本植物	抗拉力/N			抗拉强度/MPa		
	拟合方程	R^2	p	拟合方程	R^2	p
菖蒲	$F=12.270D^{1.057}$	0.84	<0.01	$T_r=15.630D^{-0.943}$	0.92	<0.01
狗牙根	$F=13.079D^{0.713}$	0.79	<0.01	$T_r=16.661D^{-1.287}$	0.89	<0.01
风车草	$F=15.505D^{1.581}$	0.93	<0.01	$T_r=19.751D^{-0.420}$	0.47	<0.01
花叶芦竹	$F=15.521D^{1.315}$	0.83	<0.01	$T_r=19.772D^{-0.685}$	0.52	<0.01

注:4 种草本根系抗拉力和抗拉力强度随直径增大呈幂函数增大和减小,拟合方程分别为 $F=aD^b$, $T_r=cD^d$ 。式中: F 为抗拉力; T_r 为抗拉强度; D 为根系直径; a 为抗拉力系数; b 为抗拉力幂系数; c 为抗拉强度系数; d 为抗拉强度幂系数。

2.1.2 根系极限延伸率和弹性模量 由表 2 可知, 4 种草本的极限延伸率范围在 3.79%~55.18%,从

大到小依次为风车草(36.18%)>菖蒲(28.96%)>花叶芦竹(24.14%)>狗牙根(23.38%),且风车草显著大于其他 3 种草本($p<0.05$),分别是其他草本的 1.25 倍、1.50 倍、1.55 倍。4 种草本的弹性模量范围在 39.26~608.38 MPa,从大到小依次为狗牙根(195.85 MPa)>菖蒲(160.05 MPa)>花叶芦竹(111.86 MPa)>

风车草(72.00 MPa),菖蒲显著大于风车草($p<0.05$),狗牙根极显著大于风车草($p<0.01$)。从图 3 可以看出,随着根径的增大,4 种草本的弹性模量呈幂函数减小,且达到极显著水平($p<0.01$),但不同草本减幅不一致,减幅分别为 89.40%,86.97%,69.85%,80.95%。

表 2 4 种草本根系极限延伸率与弹性模量

Table 2 Ultimate elongation and modulus of elasticity of four herbaceous root systems

草本植物	极限延伸率/%		弹性模量/MPa	
	范围	均值	范围	均值
菖蒲	13.795~41.793	28.963±7.075bAB	54.355~512.891	160.045±145.750aAB
狗牙根	13.762~38.634	24.717±9.272bB	79.299~608.379	195.847±168.995aA
风车草	20.355~48.799	36.327±8.838aA	39.260~130.214	72.005±26.741bB
花叶芦竹	9.851~46.374	24.510±9.141bB	42.325~222.177	111.861±49.990abAB

注:不同小写和大写字母分别表示不同植物在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平下的差异显著性,下表同。

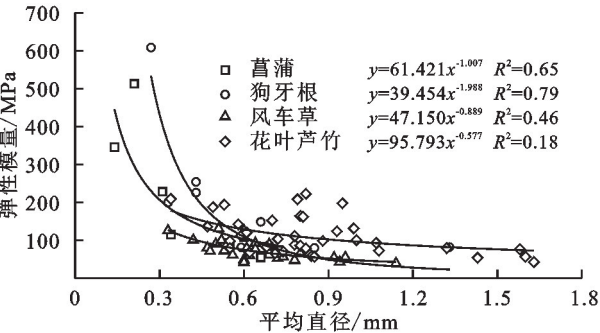


图 3 4 种草本根系弹性模量随直径变化特征及回归方程

Fig. 3 Characteristics of changes in elastic modulus with diameter and regression equation for four herbaceous root systems

2.2 草本根系微观结构

2.2.1 根系微观结构 图 4 为 4 种草本的根系横切面图。试验选取的 4 种草本均为单子叶植物,根系结构特征明显,从外到内依次为表皮、皮层、中(维管)柱,没有次生木质部和次生韧皮部等次生结构。

由图 5、表 3—4 可知,根系表皮是最外一层的生活细胞,表皮厚度以风车草(20.53 μm)最大,狗牙根(13.42 μm)最小,狗牙根与菖蒲间差异显著($p<0.05$),与风车草、花叶芦竹之间差异极显著($p<0.01$)。表皮面积平均占整个横切面的 7.83%,以菖蒲(9.22%)最大,风

车草(6.82%)最小,菖蒲与其余 3 种草本间差异极显著($p<0.01$)。皮层又分为外皮层、皮层薄壁细胞和内皮层,外皮层由一至数层排列紧密的细胞构成,皮层薄壁细胞间隙大,排列稀疏,有明显的气腔,内皮层为最内一层特化细胞,在横切面上呈明显的马蹄铁形。皮层厚度以花叶芦竹(660.45 μm)最大,狗牙根(178.27 μm)最小,狗牙根与其余草本间差异极显著($p<0.01$)。皮层面积占各微观结构组织比量中的第一位,平均占整个横切面的 80.00%,以菖蒲(88.38%)最大,狗牙根(62.27%)最小,狗牙根与其余 3 种草本差异极显著($p<0.01$)。中柱由中柱鞘、初生木质部、初生韧皮部和髓构成。中柱面积平均占整个横切面的 12.02%,以狗牙根(8.13%)最大,菖蒲(6.82%)最小,和皮层一样,狗牙根极显著大于其余 3 种草本($p<0.01$)。中柱鞘是中柱最外一层的薄壁细胞,中柱鞘厚度以花叶芦竹最大(19.43 μm),菖蒲(7.59 μm)最小,菖蒲与其余草本间差异极显著($p<0.01$)。4 种草本的中柱鞘面积、木质部面积、韧皮部面积和髓面积分别占整个横切面的 1.44%,1.86%,0.47%,3.08%,占中柱面积的 11.98%,15.47%,3.91%,25.62%,均以狗牙根最大,花叶芦竹次之,菖蒲最小,且除花叶芦竹韧皮部外,狗牙根各面积占比均极显著大于其余 3 种($p<0.01$)。

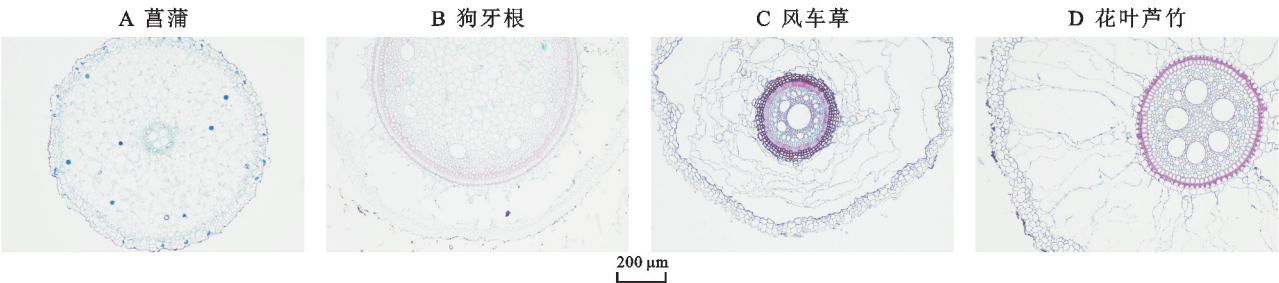


图 4 4 种草本根系的微观结构(×100)

Fig. 4 Microstructure of four herbaceous root systems (×100)

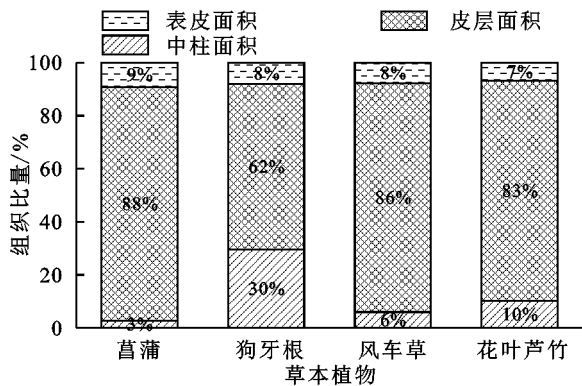


图 5 4 种草本根系基本结构组织比量

Fig. 5 Ratio of basic structural organization of four herbaceous root systems

2.2.2 根系抗拉特性与微观结构的关系 为了探究根系各微观结构对抗拉力学特性影响程度的大小,对根系的抗拉力、抗拉强度与各显微结构百分比进行回

归分析。由于数据单位不同,先将数据进行标准化处理,再分别以抗拉力、抗拉强度为因变量,以各显微结构百分比为自变量(X_n),采用逐步回归法进行多元线性回归分析,回归模型结果如下:

$$F = \sum a_n X_n \tag{4}$$

$$T_r = \sum a_n X_n \tag{5}$$

式中: F 为根系最大抗拉力(N); T_r 为根系抗拉强度(MPa); $n \in [1, 7]$, $a_1 \sim a_7$ 为对应自变量的回归系数; X_1 为表皮面积百分比(%); X_2 为皮层面积百分比(%); X_3 为中柱面积百分比(%); X_4 为中柱鞘面积百分比(%); X_5 为木质部面积百分比(%); X_6 为韧皮部面积百分比(%); X_7 为髓面积百分比(%)。由于各微观结构与菖蒲抗拉强度、风车草抗拉力和抗拉强度无显著关系,未能得到菖蒲抗拉强度、风车草抗拉力和抗拉强度与根系各微观结构的回归方程。

表 3 4 种草本根系微观基本结构

Table 3 Microscopic basic structure of the root system of four herbaceous species				μm
草本	表皮厚度	皮层厚度	中柱鞘厚度	
菖蒲	16.612±3.508abAB	406.707±72.025bB	7.589±1.295cC	
狗牙根	13.418±2.095bB	178.271±15.172cC	12.177±1.265bB	
风车草	20.530±5.669aA	410.799±79.909bB	12.180±3.675bB	
花叶芦竹	18.750±3.201aAB	660.446±131.463aA	19.425±2.879aA	

表 4 4 种草本显微结构组织比量

Table 4 Microstructure and organization ratios of the four herbaceous species					%
组织比量	菖蒲	狗牙根	风车草	花叶芦竹	
表皮面积百分比	9.223±1.688aA	8.133±1.062abAB	7.748±1.236bAB	6.818±0.688bB	
皮层面积百分比	88.384±1.898aA	62.272±11.086bB	86.352±1.100aA	83.000±0.264aA	
中柱面积百分比	2.392±0.372cB	29.595±10.194aA	5.900±1.660bcB	10.181±0.898bB	
中柱鞘面积百分比	0.465±0.068cC	3.304±0.948aA	0.562±0.192cC	1.418±0.251bB	
木质部面积百分比	0.676±0.190cC	3.170±0.607aA	0.892±0.619cC	2.150±0.405bB	
韧皮部面积百分比	0.236±0.079bC	0.780±0.160aA	0.305±0.033bBC	0.577±0.091aAB	
髓面积百分比	0.087±0.030bB	10.604±6.735aA	0.653±0.269bB	0.956±0.398bB	

由表 5—6 可知,各种草本的抗拉力、抗拉强度与微观结构的回归方程的 R^2 为 0.88~0.99,说明各回归方程的拟合程度较好,均达到显著性水平($p<0.05$)。4 种草本植物根系的微观结构对其抗拉力学特性造成不同程度的影响。菖蒲的单根抗拉力与表皮和髓的占比有关,且与表皮面积百分比呈负相关,与髓面积百分比呈正相关。狗牙根的单根抗拉力与表皮、木质部、韧

皮部的占比有关,且与表皮面积和韧皮部面积百分比呈负相关,与木质部面积百分比呈正相关;抗拉强度与木质部和韧皮部的占比有关,与木质部面积百分比呈负相关,与韧皮部面积百分比呈正相关。花叶芦竹的单根抗拉力仅与髓面积百分比呈正相关;抗拉强度与皮层和髓的占比有关,与皮层面积百分比呈正相关关系,与髓面积百分比呈负相关关系。

表 5 4 种草本最大抗拉力与微观结构的回归方程

Table 5 Regression equations of maximum tensile and microstructure of four herbs				
草本	回归方程	R^2	p	样本数/个
菖蒲	$F = -0.521X_1 + 0.927X_7 + 7.334E-16$	0.88	<0.05	14
狗牙根	$F = -0.160X_1 + 0.473X_5 - 1.331X_6 + 8.271E-16$	0.99	<0.05	14
花叶芦竹	$F = 0.988X_7 + 4.956E-17$	0.97	<0.05	14

表 6 4 种草本抗拉强度与微观结构的回归方程

Table 6 Regression equations of tensile strength and microstructure of four herbs

草本	回归方程	R^2	p	样本数/个
狗牙根	$T_r = -0.416X_5 + 1.254X_6 - 1.882E - 16$	0.99	<0.05	14
花叶芦竹	$T_r = 0.170X_2 - 0.892X_7 + 2.689E - 15$	0.99	<0.05	14

3 讨论

3.1 根系抗拉性能

植物根系抗拉力和抗拉强度主要受直径、含水率、拉伸速率、化学成分和微观结构的影响^[21]。本次单根拉伸试验发现,单根抗拉力和抗拉强度与根径间关系密切,根系的抗拉力随着直径的增大呈幂函数增大,抗拉强度随直径的增大呈幂函数减小,但不同植物之间存在差异,这与黄广杰等^[14]研究三江并流区水库消落带草本、张玉等^[19]研究黄河源区滨河草本和灌木、叶兴等^[22]研究长江河岸狗牙根等的结论一致。根系的极限延伸率和弹性模量分别反映根系抵抗塑性形变和弹性形变的能力^[23]。本试验中,4 种草本的极限延伸率与直径不存在显著的相关关系,这与黄广杰等^[14]、潘露^[24]的结论一致,与刘亚斌等^[25]研究的 3 种草本植物单根极限延伸率随着根径的增加呈逐渐增大趋势、石川等^[26]研究的青藏高原护坡灌木柠条锦鸡儿极限延伸率随着根径增大而降低不同。分析论文可知,可能是因为供试植物的生长环境和种类有所差异,导致根系微观结构不同,从而改变了根径与极限延伸率的关系。4 种草本的弹性模量随直径增大而呈幂函数降低,这与大部分研究结果一致^[14,22]。

3.2 微观结构对抗拉特性的影响

根系微观结构是根系的内在生理本质,单根抗拉特性是根系力学的外在宏观表现^[27],从微观角度探究根系抗拉特性,能够更好地解释不同植物发挥的固土能力及其种间的差异。本文研究结果表明,在 4 种草本的根系微观结构中,表皮面积百分比对根系抗拉力呈负相关,这与李思诗^[17]的研究结果一致,可能是因为表皮是横切面的最外层生活细胞,寿命较短,当根毛枯死后往往解体脱离,所以不能对根系起到支撑的作用^[28]。皮层面积占比最大,内外皮层之间分布着皮层薄壁细胞,随着根系的生长,皮层薄壁细胞慢慢解体形成空腔,所以对根系抗拉力和抗拉强度影响不大^[17,28],但薄壁细胞中纤维素含量多,影响着根系极限延伸率,表现为皮层占比越大,极限延伸率增大^[29],与本文的研究结果一致。此外,通过观测切片发现,菖蒲的内皮层没有其他 3 种草本一样出现禾本科的马蹄形内皮层,而是保留了卡氏带结构,之后可关注菖蒲特殊结构对抗拉特性的影响。中柱和中柱

鞘面积百分比未出现于回归方程中,说明两者对这 4 种草本的抗拉特性没有影响或影响很小,这与目前的部分研究不同,可能是因为植物自身遗传特性造成的^[30]。虽然木质部和韧皮部的面积占比很小,但二者含有较多的木纤维和韧皮纤维,丰富的木质素和纤维素对植物根系起到了显著的机械支撑作用^[17,19]。本研究得出木质部面积百分比与根系抗拉强度呈正相关,这与蒋坤云^[18]、张玉等^[19]的研究结果一致。环境、种属等不同条件都会造成根系微观结构的变化,进而影响根系抗拉力学特性。

4 结论

(1) 4 种草本的抗拉力与直径呈幂函数正相关,以花叶芦竹最大,菖蒲最小,花叶芦竹显著大于其他 3 种草本;抗拉强度与直径呈幂函数负相关,以狗牙根最大,花叶芦竹最小,菖蒲和狗牙根极显著大于其余两种草本。

(2) 4 种草本根系的极限延伸率与直径不存在显著的相关关系,以风车草最大,狗牙根最小,风车草显著大于其他 3 种草本;弹性模量与直径呈幂函数负相关,以狗牙根最大,风车草最小,菖蒲和狗牙根显著大于风车草。

(3) 4 种草本根系横切面由外到内依次为表皮、皮层、中柱 3 个部分。除花叶芦竹外,基本结构以皮层厚度最大,中柱鞘厚度最小;除菖蒲外,微观结构组织比量以皮层面积占比最大,中柱面积占比次之,韧皮部面积占比最小。

(4) 菖蒲的抗拉力主要受表皮和髓面积的影响;狗牙根的抗拉力主要受表皮、木质部和韧皮部面积的影响,抗拉力强度受木质部和韧皮部面积的影响;花叶芦竹的抗拉力主要受髓面积的影响,抗拉强度主要受皮层和髓面积的影响。

结合草本单根抗拉特性及其微观结构特点,4 种消落带草本在根系固土能力方面各有优势。菖蒲抵抗塑性形变和弹性形变能力强,风车草抵抗塑性形变能力强,2 种草本根系可有效减缓消落带边坡的变形;花叶芦竹根系抗拉力大,但抵抗形变能力弱,主要发挥锚固作用;狗牙根根系抗拉力、抗拉强度大,且抵抗弹性形变能力强,既起较好的锚固作用,也能较好的减缓边坡变形。

参考文献(References):

- [1] 李姗泽,邓玥,施凤宁,等.水库消落带研究进展[J].湿地科学,2019,17(6):689-696.
Li S Z, Deng Y, Shi F N, et al. Research progress on water-level-fluctuation zones of reservoirs: A review[J]. Wetland Science, 2019,17(6):689-696.
- [2] 饶洁,唐强,冯韫,等.三峡水库消落带生境特征与植被恢复模式[J].水土保持学报,2024,38(1):310-318.
Rao J, Tang Q, Feng Y, et al. Habitat condition and vegetation restoration patterns in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):310-318.
- [3] 鲍玉海,贺秀斌,钟荣华,等.三峡水库消落带植被重建途径及其固土护岸效应[J].水土保持研究,2014,21(6):171-174,180.
Bao Y H, He X B, Zhong R H, et al. Revegetation and its effects on soil reinforcement in the riparian zone of Three-Gorge Reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014,21(6):171-174,180.
- [4] Li J L, Bao Y H, Wei J, et al. Fractal characterization of sediment particle size distribution in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(9):2028-2038.
- [5] 邓华锋,肖瑶,方景成,等.干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究[J].岩土力学,2017,38(9):2629-2638.
Deng H F, Xiao Y, Fang J C, et al. Shear strength degradation and slope stability of soils at hydro-fluctuation belt of river bank slope during drying-wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017,38(9):2629-2638.
- [6] 窦文清,贾伟涛,张久红,等.三峡水库消落带植被现状、适生策略及生态修复研究进展[J].生态学杂志,2023,42(1):208-218.
Dou W Q, Jia W T, Zhang J H, et al. Research progress of vegetation status, adaptive strategies and ecological restoration in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(1):208-218.
- [7] 李建兴,黄广杰,熊寿德,等.4种乔木在三江并流区水库消落带生态修复中的适应性[J].水土保持通报,2022,42(6):182-189.
Li J X, Huang G J, Xiong S D, et al. Adaptability of four tree species in ecological restoration of reservoir fluctuating zone in parallel flow area of Three Rivers[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):182-189.
- [8] Polzin M L, Herbison B, Tien K M, et al. Environmental determinants of vegetation in the drawdown zones of a Columbia River Treaty reservoir: A template for ecosystem enhancement[J]. Environmental Management, 2023,72(3):488-504.
- [9] 徐文秀.三峡水库消落带草本根-土复合体抗冲性能研究[D].重庆:重庆师范大学,2019.
Xu W X. Anti-scourability of the Herbaceous Root-Soil System in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir, China[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2019.
- [10] Hashim A M, Catherine S M P. A laboratory study on wave reduction by mangrove forests[J]. APCBEE Proceedings, 2013,5:27-32.
- [11] 段青松,保锐琴,黄广杰,等.澜沧江黄登水电站库周土壤的崩解特性[J].水土保持通报,2023,43(4):195-202.
Duan Q S, Bao R Q, Huang G J, et al. Soil disintegration characteristics around Huangdeng hydropower station reservoir on Lancang River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(4):195-202.
- [12] 肖海,彭逗逗,邵艳艳,等.狗牙根根系对三峡库区消落带紫色土崩解性能的作用机理分析[J].土壤通报,2019,50(5):1116-1122.
Xiao H, Peng D D, Shao Y Y, et al. Mechanism of soil disintegration by *Cynodon Dactylon* root in the purple soil from water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019,50(5):1116-1122.
- [13] 熊寿德,段青松,方雪峰,等.三江并流区水电站消落带适生草本植物根系固土能力[J].生态学报,2022,42(17):7210-7221.
Xiong S D, Duan Q S, Fang X F, et al. Soil-fixing capacity of suitable herbaceous plant roots in the water-level-fluctuating zone of hydropower station in the Three Parallel Rivers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(17):7210-7221.
- [14] 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 G J, Duan Q S, Li J X, 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.
- [15] 夏振尧,闫茹冰,张伦,等.狗牙根根系抗拉性能对水淹时长的响应[J].农业工程学报,2023,39(6):103-110.
Xia Z Y, Yan R B, Zhang L, et al. Response of tensile properties in *Cynodon dactylon* root to submersion duration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(6):103-110.
- [16] 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.
- Li K, Zhu H L, Song L, et al. Relationship between tensile properties and microstructure of two typical plant roots in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2):240-249.
- [17] 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.
- Li S S. Relationship Between Tensile Properties and Microscopic Properties of Herbaceous Plant Roots in Benggang Area[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.
- [18] 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.
- Jiang K Y. Mechanism of the Microstructure of a Single Root to the Tensile Properties of Plant Root System[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [19] 张玉,朱海丽,张珂,等.3种滨河植物单根抗拉特性与其微观结构关系[J].干旱区研究, 2022, 39(2):572-583.
- Zhang Y, Zhu H L, Zhang K, et al. Relationship between tensile properties and microstructure of single root of three riparian plants[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2):572-583.
- [20] Luo F L, Matsubara S, Chen Y, et al. Consecutive submergence and de-submergence both impede growth of a riparian plant during water level fluctuations with different frequencies[J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 155:641-649.
- [21] 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.
- Lei X K, Zhang X B, Yang Q H, et al. Research progress on the tensile mechanical properties of plant roots [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2016, 33(4):703-711.
- [22] 叶兴,杨启红,张超波,等.长江河岸边坡狗牙根根系力学性能研究[J].人民长江, 2022, 53(4):195-200.
- Ye X, Yang Q H, Zhang C B, et al. Analysis of mechanical properties of bermudagrass root system on riparian slopes of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2022, 53(4):195-200.
- [23] 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 C J, Chen L H. 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 Engineer-
- ing, 2013, 29(23):69-78.
- [24] 潘露.护坡灌木根系形态对根系力学特性影响研究[D].贵阳:贵州大学, 2021.
- Pan L. Study on the Influence of Root Morphology of Slope Protection Shrub on Root Mechanical Characteristics[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [25] 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 Y B, Li S X, Yu D M, 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.
- [26] 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 C, Liang S, Liu Y B, 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.
- [27] 张乔艳,唐丽霞,潘露,等.基于根系化学组成的抗拉力学特性分析[J].南京林业大学学报:自然科学版, 2020, 44(1):186-192.
- Zhang Q Y, Tang L X, Pan L, et al. Tensile mechanical properties of roots based on chemical composition [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2020, 44(1):186-192.
- [28] 金银根.植物学[M].3版.北京:科学出版社, 2017.
- Jin Y G. Botany [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2017.
- [29] 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.
- Zhu H L, Hu X S, Mao X Q, et al. Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(5):40-46.
- [30] 徐文秀,杨玲,鲍玉海,等.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[J].水土保持研究, 2020, 27(5):259-264, 272.
- Xu W X, Yang L, Bao Y H, et al. Tensile mechanical properties single root of two typical flood-tolerant herbs in the reservoir riparian zone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5):259-264, 272.