

鄂陵湖区高寒草地草毡层草本植物 单根抗拉力学特性试验

徐得忠, 张旭, 陈耀, 李洪军, 郭小东

(中国地质调查局 西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000)

摘要: [目的] 探究鄂陵湖区生物多样性和植物根系抗拉伸力学特性, 为黄河源鄂陵湖区水土流失, 高寒草地草毡层滑塌等地质灾害现象的有效防治提供数据支持, 为草毡层滑塌破坏机理的研究提供理论依据。[方法] 以研究区样方调查结果为依据, 对区内优势草本植物开展单根拉伸试验; 对比分析不同草本植物在不同根径级别条件下, 单根抗拉力、单根抗拉强度、单根极限延伸率及单根弹性模量的差异性及其与根径之间的关系。[结果] 研究区内优势草本植物为青藏薹草、多枝黄耆、冷蒿、早熟禾、弱小火绒草和短穗兔耳草。在根径范围为 0.10~0.60 mm 条件下, 以上 6 种草本植物单根抗拉力和单根抗拉强度随着根径的增大分别呈幂函数增长和幂函数减小的趋势, 单根极限延伸率和单根弹性模量与根径之间不存在显著性函数关系。综合考虑不同植物类型的单根抗拉力学特性指标、物种重要值与根系类型, 在鄂陵湖地区, 早熟禾的固土能力最好。[结论] 研究区 6 种优势草本植物的根系均具备较好的固土潜能, 其中早熟禾的固土能力最强, 该研究结果可以为鄂陵湖区水土保持工作提供一定依据。

关键词: 鄂陵湖; 力学特性; 草毡层; 水土保持; 单根拉伸试验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0001-11

中图分类号: S157.9, TU432

文献参数: 徐得忠, 张旭, 陈耀, 等. 鄂陵湖区高寒草地草毡层草本植物单根抗拉力学特性试验[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 1-11. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.001; Xu Dezhong, Zhang Xu, Chen Yao, et al. Experiment study on single root tensile mechanical properties of sod layer in alpine grassland in Ngoring Lake area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 1-11.

Experiment Study on Single Root Tensile Mechanical Properties of Sod Layer in Alpine Grassland in Ngoring Lake Area

Xu Dezhong, Zhang Xu, Chen Yao, Li Hongjun, Guo Xiaodong

(Xining Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: [Objective] The biological diversity and the anti-tensile mechanical properties of plant roots in the Ngoring Lake area were investigated, to provide data support for the effective prevention and control of geological disasters such as soil erosion and the sod layer slump of alpine grassland in the Ngoring Lake area, the source of the Yellow River, as well as a theoretical basis for the research on the failure mechanism of the sod layer. [Methods] Based on the sample survey results in the study area, single-root tensile tests were performed on the dominant herbaceous plants in the area; the differences in single-root tensile strength, single-root tensile intensity, single-root ultimate elongation and single-root modulus of elasticity of the different herbaceous plants and their relationship with the root diameter were comparatively analyzed in different root-diameter levels. [Results] The dominant herbaceous plants in the study area were *Carex moorcroftii*, *Astragalus polycladus*, *Artemisia frigida*, *Poa annua*, *Leontopodium pusillum*, and *Lagotis brachystachya*. Under the condition of root diameter range of 0.10—0.60 mm, the single root tensile strength and single root tensile intensity of the above six herbaceous plants exhibited the trend of power function

收稿日期: 2024-07-05

修回日期: 2024-08-23

资助项目: 中国地质调查局项目“黄河源鄂陵湖—扎陵湖地区生态保护修复支撑调查”(DD20220960)

第一作者: 徐得忠(1992—), 男(汉族), 青海省海东市人, 工程师, 主要从事水工环地质工作。Email: 1297408128@qq.com。

通信作者: 张旭(1980—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事与生态地质工程有关的地球物理方法技术研究。Email: 114651590@qq.com。

growth and power function decrease, respectively, with the increase of root diameter. Furthermore, there was no significant functional relationship between the single-root ultimate elongation and single-root elastic modulus and root diameter. Considering the mechanical property indexes of single root tensile resistance, species importance value, and root type of different plant types, *Poa annua* exhibited the best soil fixation capacity in the Ngoring Lake area. [Conclusion] The root systems of the six dominant herbaceous plants in the study area have better soil-fixing potential, among which *Poa annua* has the strongest soil-fixing ability. This study's results can provide a certain basis for the soil and water conservation work in the Ngoring Lake area.

Keywords: Ngoring Lake; mechanical properties; sod layer; soil conservation; tensile test of single root

黄河源区处于青藏高原东北部,是中国重要的水源涵养区和黄河上游的主要产流区,在全球生态环境中有着重要地位;同时,其脆弱的生态环境,对外界影响因素尤其是气候变化方面极其敏感^[1]。近年来,随着气候变化、人类活动等作用加剧,该区生态系统功能衰退,自我调控能力大大减弱,进一步加剧了该地区的气候变化及生态系统退化^[2-3]。鄂陵湖作为黄河源区内最大的淡水湖泊,自晚更新世以来仍逐年解体缩小。包含鄂陵湖在内的湖泊等水资源的变化对鄂陵湖区甚至黄河下游地区的生态系统造成了严重的影响^[4]。高寒草甸作为该区的重要植被类型,发育环境多样,分布区域广泛,在涵养水源、调节气候及维持生物多样性等方面起着重要作用,其形成的草毡状耐搬运性表土层(即草毡层)是高寒生态系统能量流动及物质循环的重要枢纽^[5-6]。然而,在严峻复杂的生态环境下,草毡层难以形成或较为脆弱,使得该区斜坡草毡层极易发生滑塌破坏,从而进一步导致黄河源区水土流失及荒漠化等现象大量出现。因此,明确鄂陵湖区高寒草本植物的生物多样性和植物固土护坡效应,对于进一步研究草毡层滑塌体稳定性、保护区生态地质环境等方面具有重要科学意义。

诸多研究表明,植物根系能够有效提升边坡坡面抗侵蚀能力和表层土体抗剪强度,从而达到提高边坡浅表层土体稳定性的作用,究其根本在于植物根系的抗拉特性^[7-9]。当含根土体承受剪应力时,剪切面上的剪应力,能够通过剪切面上下的根—土界面摩擦力,转化为根系拉应力,从而提高土体的抗剪强度。因此,植物根系抗拉强度特性是控制土壤稳定的主要因素之一,也是能表征增强土体抗剪强度的重要力学特性^[10-13]。关于植物根系抗拉力学特性指标的研究,诸多学者开展了大量的深入试验,研究对象多以灌木和草本植物根系的抗拉力和抗拉强度为主。刘国彬等^[14]研究了黄土高原地区直径为 0.1~1.0 mm 的常见豆科、禾本科及菊科草本根系,发现毛根抗拉力随直径增大而增加,递增率从大到小依次为:禾本

科>豆科>菊科。李绍才等^[15]通过拉拔试验发现,单根极限抗拉力与根径呈正相关,两者之间存在着良好的幂函数关系,且根系最大伸长量与直径有直接关系。关于植物根系最大抗拉力与直径间的正相关性关系,杨维西等^[16]、朱海丽等^[17]在相关的研究中也取得了相同的结果,但拟合函数类型无法确定。

综上所述,诸多学者在植物根系抗拉力学特性研究方面已取得了较为丰富的成果,能够为定量评价植物根系增强土体抗剪强度研究和相关工程应用提供理论支撑。然而,现有的研究主要在于探究不同植物根系单根抗拉力学特性指标与根径之间的关系,在青藏高原黄河源鄂陵湖区,以根径级别进行划分,对不同草本植物的单根抗拉力、单根抗拉强度等单根抗拉力学特性指标的分析则鲜有研究。

基于此,本研究在对草本植物进行样方调查的基础上,选取其中的优势种或亚优势种开展单根拉伸试验,并对这些草本植物的单根抗拉力、单根抗拉强度等单根抗拉力学特性指标大小与根径之间的关系开展研究。本研究通过明确鄂陵湖区生物多样性和植物根系抗拉力学特性指标,为黄河源鄂陵湖区水土流失、高寒草地草毡层滑塌破坏等地质灾害现象的有效防治提供数据支持,在保护区域生态地质环境等方面具有很大积极意义。

1 材料与方法

1.1 研究区基本概况

研究区位于青海省东南部黄河源区玛多县,地理位置为东经 98°13′—99°33′,北纬 34°55′—35°33′,海拔高度为 4 000~4 900 m^[18]。区内年平均气温为 -4℃,年降雨量 300 mm,主要集中于 4—9 月,属半干旱高寒草原气候^[19-20]。鄂陵湖地处高原腹地,具有独特的高原湿地生态系统,生物多样性丰富,植被覆盖率为 40%~70%,类型以高寒草甸和高寒草原植被为主^[21]。草毡层滑塌体是草毡层沿其下伏基岩界面发生滑移现象,且已经出现滑塌变形破坏的草毡层(如图 1),对当地生态地质环境构成了严重威胁。



图 1 天然斜坡草地草毡层滑塌变形破坏现象

Fig.1 Deformation failure of sod layer slump at natural sloping grassland

1.2 试验供试植物调查

该项研究于 2023 年 7 月在鄂陵湖北部及西部地区开展样方调查试验,选取了 3 个典型的草毡层滑塌破坏斜坡,每处斜坡以对角线形式布置 3 个面积为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的样方(如图 2)。各试验点基本信息如表 1 所示。样方由 50 个面积为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的方格组成。通过样方调查获得草毡层滑塌体植物种类、株数、株高及覆盖度,并在此基础上计算出植物重要值(IV), α 多样性指数。结合以上数据进一步筛选优势植株进行单根拉伸试验。



图 2 样方调查现场情况

Fig.2 Condition of sample survey site

表 1 鄂陵湖区各试验点位背景信息

Table 1 Background information of each test point in Ngoring Lake area

试验点	坡度/(°)	坡向	海拔高度/m	经度	纬度
1	11.6 ± 1.2	EN	4 320	$97^{\circ}54'29''\text{E}$	$35^{\circ}5'31''\text{N}$
2	14.1 ± 0.6	ES	4 385	$97^{\circ}32'33''\text{E}$	$35^{\circ}0'03''\text{N}$
3	8.0 ± 0.7	ES	4 389	$97^{\circ}32'32''\text{E}$	$35^{\circ}0'03''\text{N}$

植物覆盖度是小区植物覆盖面积与样方面积的百分比值,其中小区植物覆盖面积由现场计算得到的

未被植物覆盖的空方格面积估算得出。物种重要值(IV)以综合数值表征群落中各物种优势程度,通常以 1~3 个特征指标进行计量,重要值 $\geq 40\%$ 时为优势种,重要值 $\geq 3\%$, $< 40\%$ 时为亚优势种,重要值 $< 3\%$ 时为偶见种^[22]。 α 多样性指数可用于分析评价植物群落的物种组成、结构和功能的异质性,包括 Patrick 丰富度指数(R), Shannon-Wiener 多样性指数(H'), Simpson 多样性指数(D), Pielou 均匀度指数(J)^[23-24]。计算公式分别为:

$$IV = (H_i + D_i + F_i) / 3 \quad (1)$$

$$R = S \quad (2)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (4)$$

$$J = H' / \ln S \quad (5)$$

式中:IV 为样方中植物 i 的重要值(%); H_i 为植物 i 的相对盖度(%),是样方中植物 i 的盖度与样方中所有植物盖度之和的百分比值; D_i 为植物 i 的相对密度(%),为样方中植物 i 的个体数与样方中所有植物个数的百分比值; F_i 为植物 i 的相对频度(%),为样方中植物 i 的频度与样方中所有植物频度之和的百分比值; S 为样方物种总数; P_i 为样方中物种 i 的个体数与样方中所有植物个体数之和的比值。

1.3 取样与制样方法

以每个样方中点为中心,采集 $0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ 的方格范围内所有植株根系。为确保植株根系的完整性,先利用小铁铲划分出采集区域,在采集前用小铁铲沿采集区域土层剖面铲除周围部分土体,直至观察到采集区域土体剖面无根系分布;用铁铲将采集区范围根—土复合体完整挖出,在采集的过程中,根据根系空间形态分布情况调整挖掘深度,避免损伤根系;将采集到的根—土复合体存放在花盆内,在单根拉伸试验前定期浇水。试验前,轻微甩打采集得到的根—土复合体,水洗去掉土壤,并对植物进行分类,只用剪刀剪取其中未受损伤的根系进行试验。在试验过程中,为避免根系水分减少所带来的影响,用湿润纱布包裹待试验根系,其余植物根系则用自封袋密封并放于冰箱保存。鉴于根径 $D < 1.00\text{ mm}$ 的根系固结土体、增强土体抗冲蚀性作用显著,根据优势植物根系根径值的分布情况(如表 2),本项研究单根拉伸试验选择的根系根径范围为 $0.10 \sim 0.60\text{ mm}$,并将植物根系根径进一步分为 $(0.10, 0.20]$, $(0.20, 0.30]$, $(0.30, 0.40]$, $(0.40, 0.50]$ 和 $(0.50, 0.60]$ mm 共 5 个级别开展单根拉伸试验^[14,25]。

表 2 草本植物根系根径分布情况

Table 2 Distribution of root diameter of herbaceous plant roots

植物名称	根系根径范围/mm								
	(0,0.1]	(0.1,0.2]	(0.2,0.3]	(0.3,0.4]	(0.4,0.5]	(0.5,0.6]	(0.6,0.7]	(0.7,0.8]	>0.8
早熟禾	1	29	60	19	6	4	8	3	0
青藏薹草	0	2	20	17	0	3	0	0	0
冷蒿	0	5	6	16	23	19	13	11	68
火绒草	0	3	25	24	13	2	1	2	0
多枝黄耆	0	4	13	17	17	14	4	8	30
短穗兔耳草	0	29	8	0	2	2	0	0	0

1.4 单根拉伸试验方法

单根拉伸试验仪器为上海衡翼精密仪器有限公司生产的 HY-0580 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 kg,精度为 0.3%。单根拉伸试验前进行根系处理。先预留根段某一端 3 cm 长度作为夹持段,然后自此点起每隔一定距离量取此点根径,取 3 次测量的平均值作为该根段的根径,最后再取 3 cm 根段作为另一夹持段。上、下两夹具间根段的标距应为该根段根径的 10 倍,本研究取 5 cm 作为根段标距长度,且夹具间根段顺直无侧根,在拉伸试验前未受拉力作用。为避免夹具与根段接触部分出现应力集中,导致根段在接触端周皮

脱落或被夹断,试验前对根系根段夹持段用滤纸缠绕做防护处理。在电脑终端程序中输入根段根径与标距值即可开始试验,上夹具以 5 mm/min 匀速上行,直至根段发生破坏。选取破坏点位于上、下夹具间的单根抗拉力学特性指标为有效数据,并按单根根径级别进行归类。在单根拉伸试验进行过程中,单根抗拉力学特性指标由电脑终端程序自动采集。

2 结果与分析

2.1 植物多样性特征

试验区共出现 17 种草本植物,分属 9 科 16 属。由表 3 可知,不同草毡层滑塌破坏斜坡的优势种存在差异。

表 3 研究区不同点位植物物种组成及其重要值

Table 3 Plant species composition and importance values at different points in study area

植物名	所属科属	采样点编号								
		1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
青藏薹草	莎草科薹草属	20.80	17.76	12.93	9.49	—	—	—	—	5.15
多枝黄耆	豆科黄耆属	21.66	17.29	11.57	9.89	—	11.22	10.19	—	—
冷蒿	菊科蒿属	13.73	8.67	6.53	—	6.53	4.96	7.46	7.58	5.15
早熟禾	禾本科早熟禾属	19.29	22.84	27.15	28.59	39.15	25.59	24.61	23.75	30.85
蒲公英	菊科蒲公英属	—	6.83	—	—	—	—	—	—	—
弱小火绒草	菊科火绒草属	—	6.23	19.20	17.34	15.71	18.91	21.19	11.71	8.83
短穗兔耳草	车前科兔耳草属	—	5.32	—	6.41	9.56	8.37	5.16	4.93	4.32
禾叶风毛菊	菊科风毛菊属	—	3.88	—	—	—	—	—	—	—
马蔺	鸢尾科鸢尾属	—	—	7.89	—	—	—	—	—	—
二裂委陵菜	蔷薇科委陵菜属	—	—	—	—	9.03	5.63	7.67	6.55	5.51
急弯棘豆	豆科棘豆属	—	—	—	—	—	4.08	—	8.66	9.05
地胆草	菊科地胆草属	—	—	—	—	5.07	4.56	—	—	—
细叶亚菊	菊科亚菊属	—	—	—	—	—	—	4.76	5.04	—
单子麻黄	麻黄科麻黄属	—	—	—	—	—	3.74	—	—	—
唐松草	毛茛科唐松草属	—	—	—	—	—	—	9.44	8.09	7.63
茵陈蒿	菊科蒿属	—	—	—	—	—	—	—	11.48	7.63
野决明	豆科野决明属	—	—	—	—	—	—	—	—	7.63

试验点 1 处有亚优势种青藏薹草 (*Carex moorcroftii*)、多枝黄耆 (*Astragalus polycladus*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、早熟禾 (*Poa annua*)、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、弱小火绒草 (*Leontopodium pusillum*)、短穗兔耳草 (*Lagotis brachystachya*)、禾叶风毛菊 (*Saussurea graminea*) 和马蔺

(*Iris lactea*),重要值分别为(17.17±3.24)%, (16.84±4.13)%, (9.64±3.02)%, (23.09±3.21)%, 6.83%, (12.71±6.48)%, 5.32%, 3.88%, 7.89%。试验点 2 处有亚优势种青藏薹草、多枝黄耆、冷蒿、早熟禾、弱小火绒草、短穗兔耳草、二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*)、急弯棘豆 (*Oxytropis deflexa*)、地胆草

(*Elephantopus scaber*)和单子麻黄(*Ephedra monosperma*),重要值分别为 9.49%, (10.56±0.67)%, (5.75±0.79)%, (31.11±5.81)%, (17.32±1.31)%, (8.11±1.30)%, (7.33±1.70)%, 4.08%, (4.81±0.26)%, 3.74%。试验点 3 处有亚优势种青藏藁草、多枝黄耆、冷蒿、早熟禾、弱小火绒草、短穗兔耳草、二裂委陵菜、急弯棘豆、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、野决明(*Thermopsis lupinoides*),重要值分别为 5.15%, 10.19%, (6.73±1.11)%, (26.40±3.17)%, (13.91±5.28)%, (4.80±0.35)%, (6.58±0.88)%, (8.85±0.19)%, (4.90±0.14)%, (8.38±0.77)%, (9.55±1.92)%, 7.63%。3 处试验点及其不同点位生长的植物种属不完全一致,主要生物群落 α 多样性指数数值较为相近(表 4)。本文选

取 3 处试验点所共有的 6 种草本植物进行单根抗拉力学特性及其与根径之间关系的分析。这 6 种草本植物为青藏藁草、多枝黄耆、冷蒿、早熟禾、弱小火绒草和短穗兔耳草。

表 4 试验点位 α 多样性指数

Table 4 The α plant diversity indexes of each test point

试验点	Patrick 丰富度	Shannon-Wiener 多样性指数	Simpson 多样性指数	Pielou 均匀度指数
1	7.00±1.63	1.54±0.09	0.74±0.04	0.67±0.04
2	7.68±1.70	1.18±0.17	0.61±0.06	0.45±0.06
3	9.33±0.94	1.27±0.17	0.64±0.04	0.50±0.07

2.2 植物单根抗拉力学特性

2.2.1 单根抗拉力 试验区 6 种草本植物单根抗拉试验结果如表 5 所示。

表 5 试验区 6 种草本植物单根抗拉力学特性指标试验结果

Table 5 Single root tensile mechanical property indexes of six herbs at test area

植物种类编号	根径/mm	单根抗拉力/N	极限延伸率/%	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
1	(0.10,0.20]	1.92±0.55 ^a	6.71±3.67	79.66±33.68 ^a	1 116.25±904.47
2		1.72±0.73 ^a	4.00±3.54	64.00±8.49 ^a	868.92±102.21
3		1.85±0.60 ^a	3.40±2.48	97.60±47.63 ^a	3 509.22±2 601.85
4		2.16±0.11 ^a	10.50±5.27	97.33±5.77 ^a	1 791.77±1 675.96
5		1.61±0.22 ^a	2.38±0.25	71.50±36.57 ^a	1 741.60±1 311.20
6		1.74±0.58 ^a	9.12±6.17	92.67±38.68 ^a	946.78±855.29
1	(0.20,0.30]	2.50±0.82 ^b	6.55±3.31	52.69±16.03	982.25±625.48 ^{ab}
2		2.64±1.07 ^{ab}	7.50±3.83	51.90±23.52	757.31±740.23 ^b
3		2.32±0.54 ^b	4.58±1.02	49.00±18.36	930.97±430.35 ^{ab}
4		1.95±0.55 ^b	7.78±4.21	36.00±12.38	680.20±673.02 ^b
5		2.60±0.83 ^b	5.92±3.10	56.92±26.54	1 030.85±972.03 ^{ab}
6		3.45±1.09 ^a	16.19±8.84	78.75±24.68	1 463.99±736.90 ^a
1	(0.30,0.40]	3.33±0.79	8.50±3.17 ^a	37.05±9.29	751.71±522.85
2		3.71±1.32	9.71±4.72 ^a	42.71±15.67	1 251.56±1 222.11
3		2.53±1.11	3.34±2.03 ^b	25.25±11.80	732.01±370.95
4		2.44±0.67	8.63±4.07 ^a	25.42±6.79	938.40±724.05
5		3.30±1.58	5.24±3.90 ^b	36.59±19.14	540.26±302.20
6		—	—	—	—
1	(0.40,0.50]	4.58±1.73 ^a	9.75±3.70 ^{ab}	28.33±6.62 ^a	670.79±586.74 ^a
2		—	—	—	—
3		3.18±1.41 ^a	3.89±2.60 ^c	20.26±10.47 ^a	959.41±742.33 ^a
4		3.19±1.33 ^a	6.19±3.85 ^{bc}	19.85±7.37 ^a	744.55±383.11 ^a
5		3.60±2.03 ^a	6.53±4.69 ^{bc}	22.82±13.36 ^a	927.18±1 306.95 ^a
6		4.89±1.61 ^a	12.66±5.05 ^a	24.00±10.39 ^a	684.73±143.79 ^a
1	(0.50,0.60]	5.45±2.90 ^a	5.50±2.80	25.50±15.35	1 166.28±807.34 ^a
2		4.65±1.37 ^a	8.68±2.00	55.00±32.51	936.13±588.46 ^a
3		3.58±1.80 ^a	3.58±1.73	15.16±8.01	701.14±635.29 ^a
4		3.81±0.44 ^a	5.80±2.44	17.00±5.57	1 206.65±450.92 ^a
5		4.36±1.46 ^a	5.25±3.60	17.71±5.65	692.44±459.69 ^a
6		5.84±2.37 ^a	9.73±7.12	21.00±7.00	510.20±159.27 ^a

注:①植物种类编号一栏中,1 表示早熟禾;2 表示青藏藁草;3 表示冷蒿;4 表示弱小火绒草;5 表示多枝黄耆;6 表示短穗兔耳草。②表中同行小写字母表示在相同根径级别条件下,6 种草本植物单根抗拉力值之间、单根极限延伸率值之间、单根抗拉强度值之间及单根极限模量值之间的差异显著性分析结果(LSD法), $p < 0.05$ 。

由表 5 可知,在(0.10,0.20],(0.20,0.30],(0.30,0.40],(0.40,0.50]和(0.50,0.60]mm 5 个根径级别条件下,早熟禾单根抗拉力为(1.92±0.55)~(5.45±2.90)N,青藏藁草单根抗拉力为(1.72±0.73)~(4.65±1.37)N,冷蒿单根抗拉力为(1.85±0.60)~(3.58±0.80)N,弱小火绒草单根抗拉力为(1.95±0.55)~(3.81±0.44)N,多枝黄耆单根抗拉力为(1.61±0.83)~(4.36±1.46)N,短穗兔耳草单根抗拉力为(1.74±0.58)~(5.84±2.37)N。其中,在根径级别为(0.40,0.50]和(0.50,0.60]mm 时,早熟禾和短穗兔耳草单根抗拉力较青藏藁草、冷蒿、弱小火绒草及多枝黄耆单根抗拉力大。

当根径级别为(0.10,0.20],(0.40,0.50]和(0.50,0.60]mm 时,早熟禾单根抗拉力较青藏藁草、多枝黄耆、冷蒿、弱小火绒草及短穗兔耳草表现出相对不显著性的特性。当根径级别为(0.20,0.30]mm 时,青藏藁草较早熟禾、多枝黄耆、冷蒿及弱小火绒草表现出相对较小的差异性,短穗兔耳草较早熟禾、多枝黄耆、冷蒿及弱小火绒草表现出相对较大的差异性,即青藏藁草单根抗拉力分别为早熟禾、多枝黄耆、冷蒿及弱小火绒草的 1.06,1.14,1.35 及 1.02 倍,短穗兔耳草单根抗拉力分别为早熟禾、多枝黄耆、冷蒿及弱小火绒草的 1.38,1.49,1.77 及 1.33 倍。

2.2.2 单根抗拉强度 由表 5 可知,在(0.10,0.20],(0.20,0.30],(0.30,0.40],(0.40,0.50]和(0.50,0.60] mm 5 个根径级别条件下,早熟禾单根抗拉强度为(25.50±15.35)~(79.66±33.68) MPa,青藏藁草单根抗拉强度为(42.71±15.67)~(64.00±8.49) MPa,冷蒿单根抗拉强度为(15.16±8.01)~(97.60±47.63) MPa,弱小火绒草单根抗拉强度为(17.00±5.57)~(97.33±5.77) MPa,多枝黄耆单根抗拉强度为(17.71±5.65)~(71.50±36.57) MPa,短穗兔耳草单根抗拉强度为(21.00±7.00)~(92.67±38.68) MPa。当根径级别为(0.10,0.20],(0.40,0.50],(0.50,0.60] mm 时,早熟禾单根抗拉强度表现出较青藏藁草、多枝黄耆、冷蒿、弱小火绒草和短穗兔耳草不显著的特性。当根径级别为(0.20,0.30] mm 时,短穗兔耳草单根抗拉强度与早熟禾、冷蒿、弱小火绒草和多枝黄耆之间的差异性表现出相对较小的差异性。

2.2.3 单根极限延伸率 由表 5 可知,在(0.10,0.20],(0.20,0.30],(0.30,0.40],(0.40,0.50]和(0.50,0.60] mm 5 个根径级别条件下,早熟禾单根极限延伸率为(6.71±3.67)~(9.75±3.70)%,青藏藁草单根极限延伸率为(4.00±3.54)~(9.71±4.72)%,冷蒿单根极限延伸率为(3.34±2.03)~(4.58±1.02)%,弱小火绒草单根极限延伸率为(5.80±2.44)~(10.50±5.27)%,

多枝黄耆单根极限延伸率为(2.38±0.25)~(6.53±4.69)%,短穗兔耳草单根极限延伸率为(9.12±6.17)~(12.66±5.05)%。区内 6 个草本植物在(0.20,0.30],(0.40,0.50]和(0.50,0.60] mm 3 个根径级别条件下,短穗兔耳草的单根极限延伸率显著高于青藏藁草、多枝黄耆、冷蒿、早熟禾和弱小火绒草,即短穗兔耳草单根极限延伸率分别较青藏藁草、多枝黄耆、冷蒿、早熟禾和弱小火绒草平均高出 1.47,1.16,2.53,1.08 和 1.73 倍。其中,当根径级别为(0.30,0.40] mm 时,多枝黄耆单根极限延伸率与青藏藁草、冷蒿、早熟禾和弱小火绒草之间的差异性均表现出相对较小的特性,即多枝黄耆单根极限延伸率分别为青藏藁草、冷蒿、早熟禾和弱小火绒草的 0.62,0.54,1.57 和 0.61 倍。当根径级别为(0.40,0.50] mm 时,冷蒿的单根极限延伸率较早熟禾、短穗兔耳草表现出具有相对较大的差异性,弱小火绒草和多枝黄耆单根极限延伸率较短穗兔耳草表现出具有相对较大的差异性,即冷蒿单根极限延伸率分别为早熟禾、短穗兔耳草的 0.40,0.31 倍,弱小火绒草和多枝黄耆单根极限延伸率分别为短穗兔耳草的 0.49 和 0.52 倍。

2.2.4 单根弹性模量 由表 5 可知,在(0.10,0.20],(0.20,0.30],(0.30,0.40],(0.40,0.50]和(0.50,0.60] mm 5 个根径级别条件下,早熟禾单根弹性模量为(670.79±586.74)~(1 166.28±807.34) MPa,青藏藁草单根弹性模量为(757.31±740.23)~(936.13±588.46) MPa,冷蒿单根弹性模量为(701.14±635.29)~(3 509.22±2 601.85) MPa,弱小火绒草单根弹性模量为(680.97±430.35)~(1 791.77±1 675.96) MPa,多枝黄耆单根弹性模量为(540.26±302.20)~(1 741.60±1 311.20) MPa,短穗兔耳草单根弹性模量为(510.20±159.27)~(1 463.99±736.90) MPa。当根径级别为(0.20,0.30] mm 时,短穗兔耳草的单根弹性模量分别较青藏藁草、弱小火绒草表现出相对较大的差异性,即短穗兔耳草单根弹性模量分别为青藏藁草、弱小火绒草的 1.93,2.15 倍。当根径级别为(0.40,0.50] mm 时,早熟禾单根弹性模量较多枝黄耆、冷蒿、弱小火绒草和短穗兔耳草差异性不显著。当根径级别为(0.50,0.60] mm 时,早熟禾单根弹性模量表现出较青藏藁草、多枝黄耆、冷蒿、弱小火绒草和短穗兔耳草不显著的特性。

2.3 植物单根抗拉力力学特性指标与根径的关系

2.3.1 单根抗拉力与根径关系 图 3 所示为试验区 6 种草本植物单根抗拉力与根径间的关系曲线。由图 3 可知,试验区内 6 种草本植物单根抗拉力呈随着根径的增大而增大的变化趋势,且单根抗拉力与根径间基本符合幂函数关系。

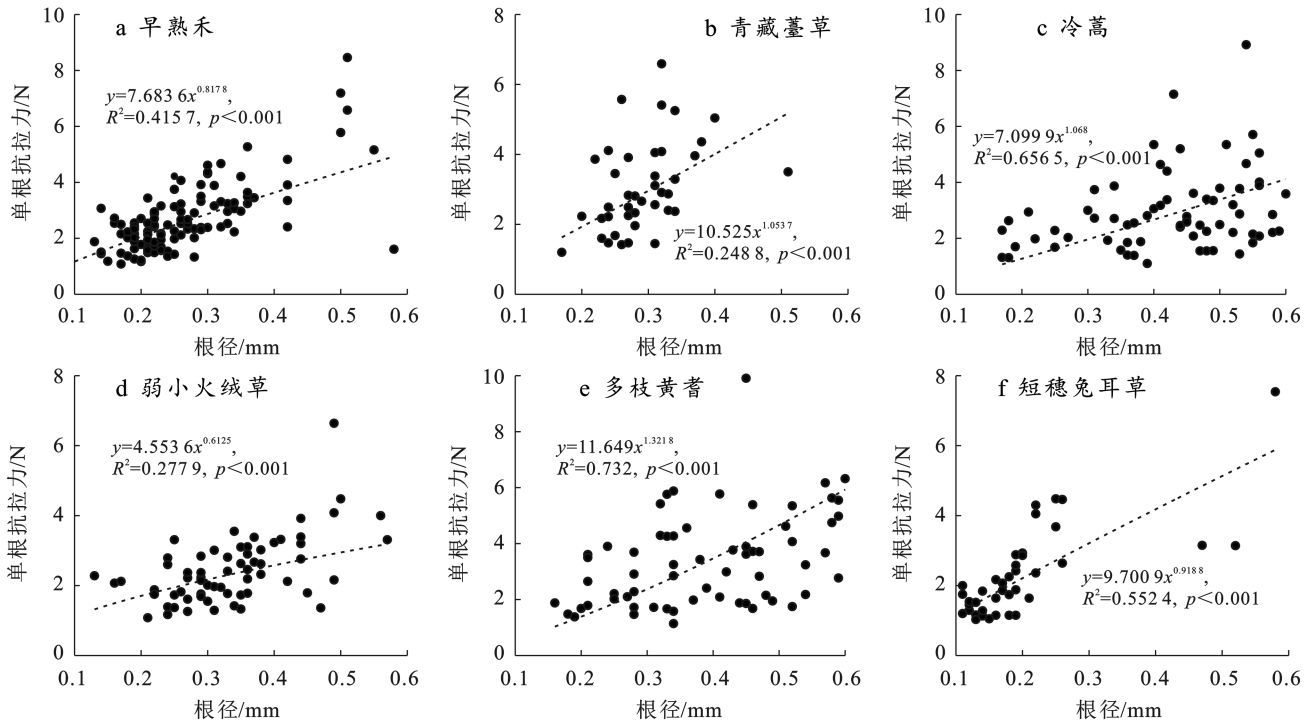


图 3 试验区 6 种草本植物单根抗拉力与根径关系

Fig.3 Relationship between single root tensile force and root diameter of six herbs in test area

2.3.2 单根抗拉强度与根径关系 图 4 所示为试验区 6 种草本植物单根抗拉强度与根径间的关系曲线。由该图 4 可知,试验区内 6 种草本植物单根抗拉强度随着根径的增大而减小,且单根抗拉强度与根径间基本符合幂函数关系。

2.3.3 单根极限延伸率与根径关系 图 5 所示为试

验区 6 种草本植物单根极限延伸率与根径之间的关系曲线。由图 5 可知,试验区内 6 种草本植物单根极限延伸率值与根径之间变化趋势无统一规律,且根据回归分析结果反映得出两者之间的拟合优度 R^2 过低,因此幂函数不能正确反映该区 6 种草本植物单根极限延伸率与根径之间的关系。

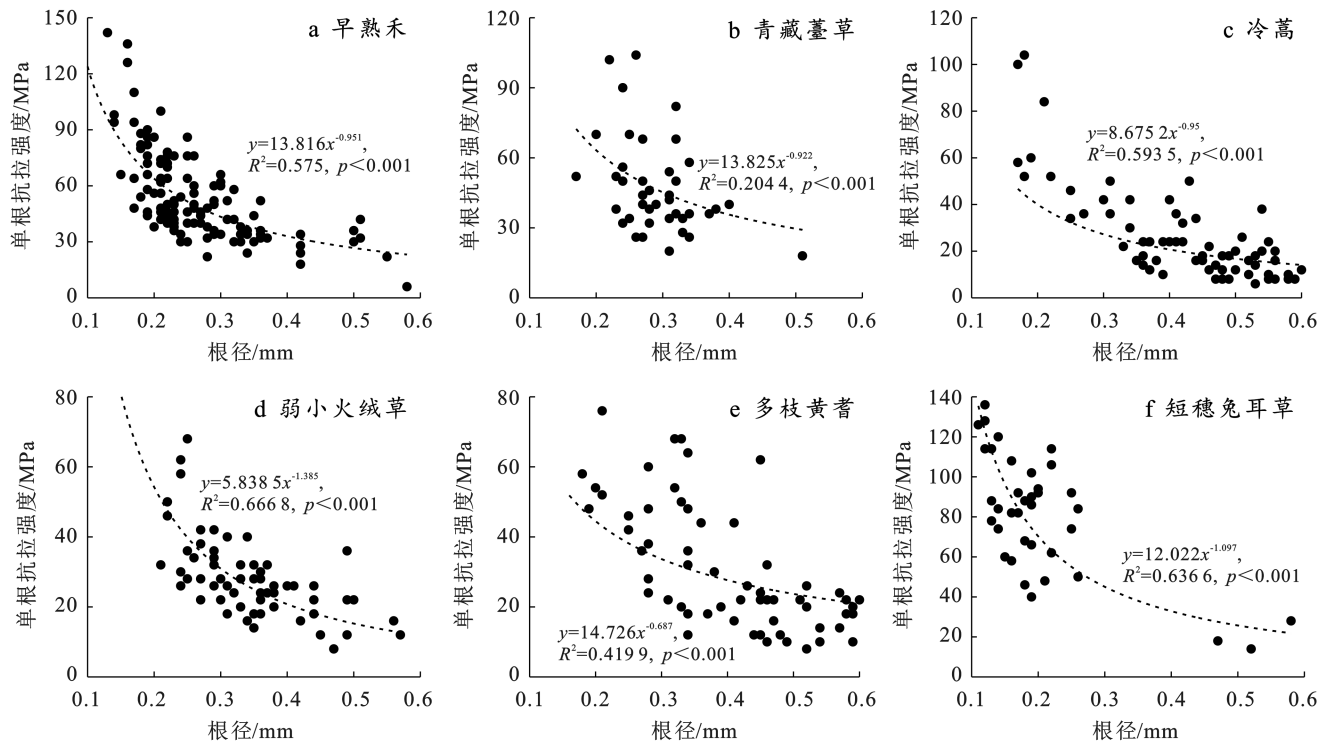


图 4 试验区 6 种草本植物单根抗拉强度与根径关系

Fig.4 Relationship between single root tensile strength and root diameter of six herbs in test area

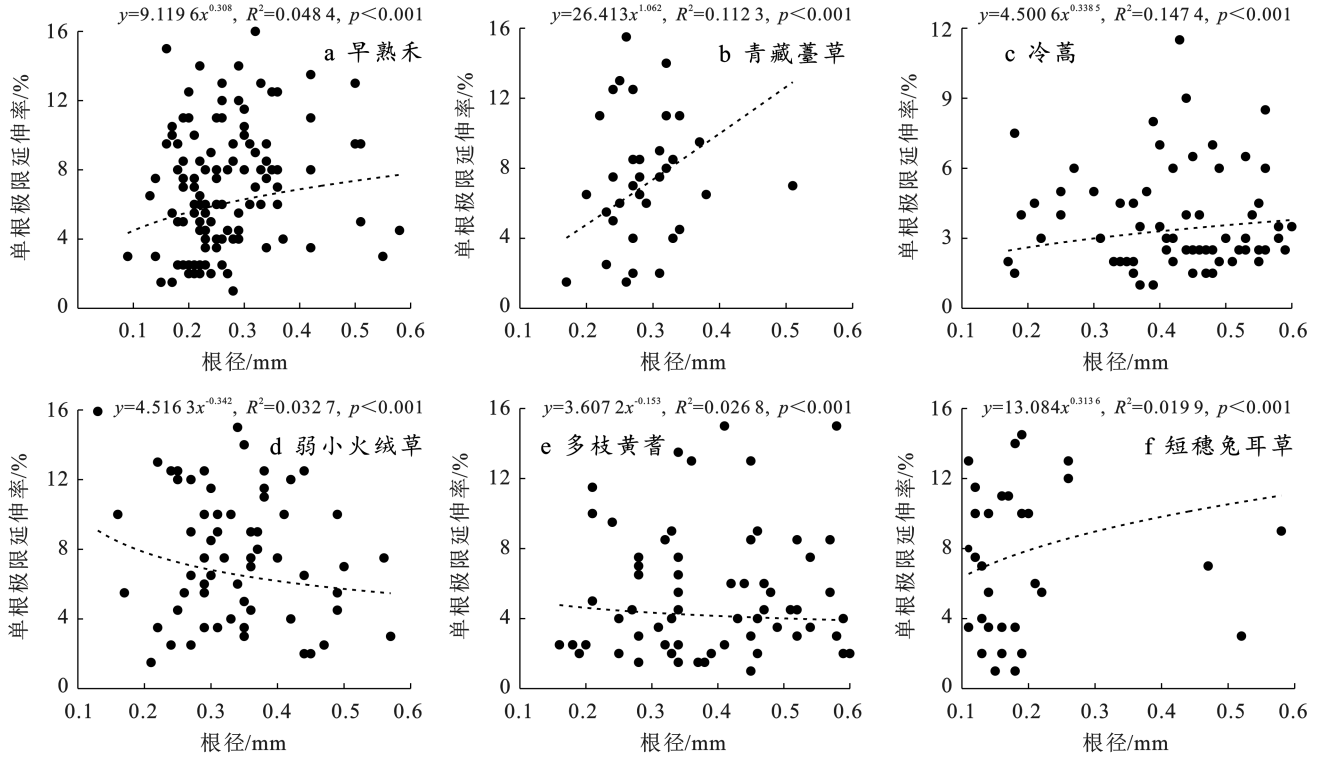


图 5 试验区 6 种草本植物单根极限延伸率与根径关系

Fig.5 Relationship between single root limit extensile rate and root diameter of six herbs in test area

2.3.4 单根弹性模量与根径关系 图 6 所示为试验区 6 种草本植物单根弹性模量与根径间的关系曲线。

由该图可知,试验区内短穗兔耳草的单根弹性模量呈随着根径的增加而增大的变化趋势。

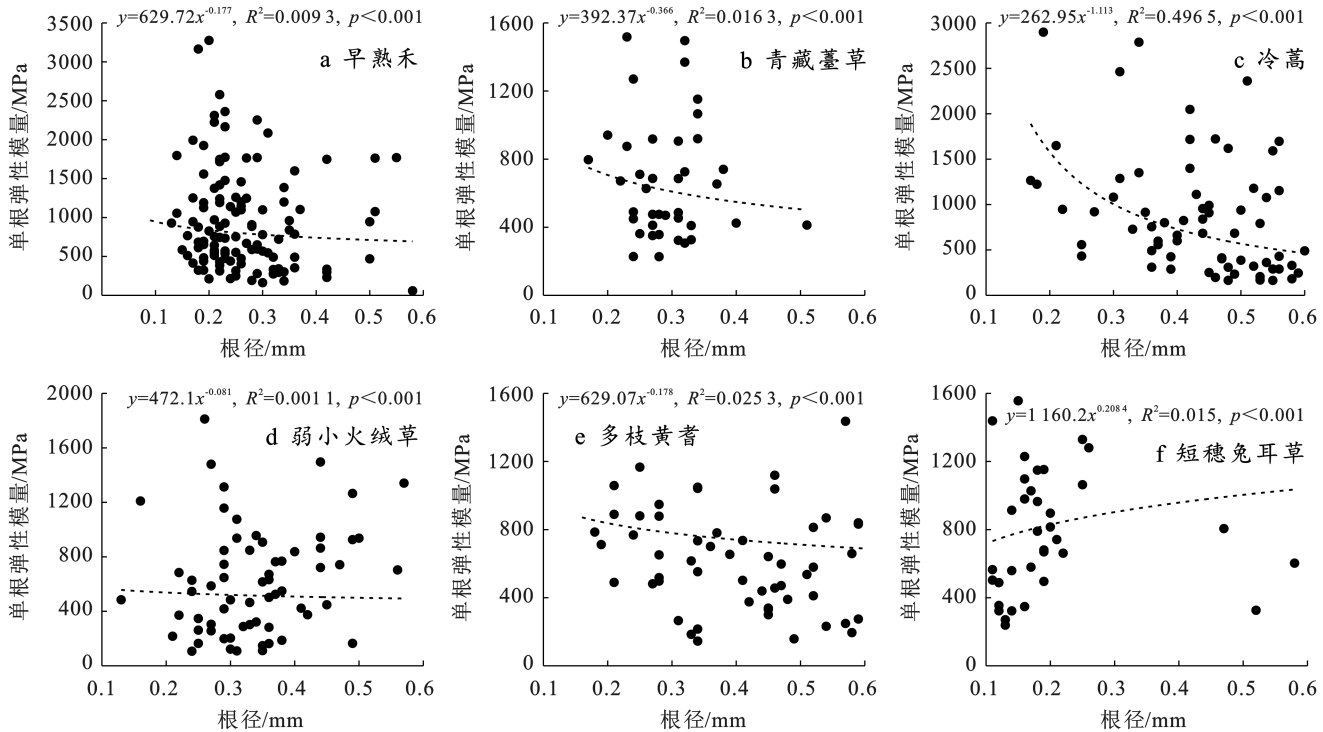


图 6 试验区 6 种草本植物单根弹性模量与根径关系

Fig.6 Relationship between single root elastic modulus and root diameter of six herbs in test area

其余 5 种草本植物的单根弹性模量与根径之间基本呈随着根径的增加而减小的变化趋势。虽然草

本植物的单根弹性模量与根径之间拟合优度 R² 过低,无法采用幂函数反映两者之间的拟合关系,但整

体上单根弹性模量仍呈随着根径的增加而减小的变化趋势。

3 讨论

青藏藁草、多枝黄耆、冷蒿、早熟禾、弱小火绒草和短穗兔耳草 6 种草本植物的单根抗拉力与根径之间均符合正相关的幂函数关系,即在根径范围为 0.10~0.60 mm 时,呈现出随根径增大而增加的规律;植物单根抗拉强度与根径之间均符合负相关的幂函数关系,即在根径范围为 0.10~0.60 mm 时,呈现出随根径增大而减小的规律。关于植物单根抗拉力与根径之间关系的研究方面,贺振昭^[26]和钟荣华^[27]等对紫花针茅、牛鞭草等草本植物根系进行室内单根拉伸试验,结果表明以上草本植物单根抗拉力均呈随其根径增加而增大的幂函数关系。张超波等^[28]通过对香根草、百喜草、黑麦草 3 种草本植物进行了原位拉拔力学试验,亦得到了根系抗拉力随根径的增加而增大,且抗拉力与根径间呈幂函数关系。此外,有关草本植物单根抗拉强度与根径之间的关系,与本文研究结果相似的相关研究表现为:张培豪等^[29]通过对高山嵩草为主的草本植物根系进行室内拉伸试验得出草本植物单根抗拉强度呈随根径增大而减小的幂函数关系;植物根系存在增强土体强度的群根效应,即根系抗拉力与抗拉强度表现出随根数增加而增大的线性函数关系。Lateth H.等^[30]和 Ye Chao 等^[31]通过对百喜草、乔木马占相思进行单根拉伸试验,也得到了单根抗拉强度随着根径增加而幂函数减小的变化规律,同时指出根系力学特性与其纤维素含量呈显著正相关,纤维素含量随着根径的增加而显著下降。上述研究结果均与本项研究所得到的结果相类似。

试验区 6 种草本植物单根极限延伸率与根径之间未表现出相对显著性,此结论与李宏斌等^[32]、张玉等^[33]、刘亚斌等^[34]研究结果一致。此外,李宏斌与刘亚斌还指出,细叶藁草、猪毛蒿、垂穗披碱草和细茎冰草等草本植物单根极限延伸率均呈现出随根径增大而逐渐增大的趋势,且前者认为根系延伸率与纤维素含量、木质素含量、植物组织含水量有较大关系,此结论也与张玉的研究结果相类似。

在 5 个根径级别下,对 6 种草本植物的单根抗拉力学特性指标进行比较,结果表明:在根径级别为(0.50,0.60]mm 时,植物种类对单根抗拉力的影响已达显著水平,6 种植物平均单根抗拉力关系为:短穗兔耳草(5.84 N)>早熟禾(5.45 N)>青藏藁草(4.65 N)>多枝黄耆(4.36 N)>弱小火绒草(3.81 N)>冷蒿(3.58 N)。在根径级别为(0.10,0.20]mm 时,植物种

类对单根抗拉强度的影响已达显著水平,6 种植物平均单根抗拉强度关系为:冷蒿(97.60 MPa)>弱小火绒草(97.33 MPa)>短穗兔耳草(92.67 MPa)>早熟禾(79.66 MPa)>多枝黄耆(71.50 MPa)>青藏藁草(64.00 MPa)。6 种草本植物的单根极限延伸率和单根弹性模量与根径之间不存在显著性函数关系。

当土体受到剪切时,穿过剪切面的根系将所受拉应力转化为剪切面上的切向应力和法向应力,因此草本植物根系与土体形成的根—土复合体能有效地提高土的黏聚力,从而增强土体抗剪强度。已有研究表明^[11,35-36],草本植物对土体的加固作用与根的含量、根的长度以及根系在土体中的分布形态等因素有关,且随着根系强度及根系含量的增大而提高。此外,植物单根弹性模量反映了其抵抗弹性变形的能力,单根弹性模量越大,则越能迅速调动抗拉力并发挥其抗拉能力。在 5 个根径级别下,早熟禾、青藏藁草、冷蒿、弱小火绒草、多枝黄耆和短穗兔耳草的单根平均抗拉强度分别为(87.67±35.55),(51.25±20.60),(32.97±14.28),(21.84±10.43),(19.93±13.91)和(87.05±38.22)MPa,单根平均弹性模量分别为(1270.19±1247.59),(923.06±702.04),(817.03±706.89),(863.82±840.23),(774.78±566.78)和(1022.57±817.27)MPa。通过单根平均抗拉强度和单根平均弹性模量的分析可知,早熟禾的单根抗拉性能整体上强于其他 5 种草本植物。

与此同时,由植物物种重要值统计可知,3 个试验点的早熟禾物种重要值均远大于其他 5 种草本植物的物种重要值。且相比于根茎型的青藏藁草和短穗兔耳草、轴根型的多枝黄耆和冷蒿、须根型的弱小火绒草,疏丛型的早熟禾的每个分蘖节均形成一条粗壮根,经过分蘖又形成小丘状株丛,从而在土壤中交织形成紧密结实的根群^[37]。因此,就重要值和根系构型而言,3 个试验点植物群落中,早熟禾在土体中的含根量和分布范围要大于其他 5 种植物。结合不同植物类型的单根抗拉力学特性指标、物种重要值与根系构型综合分析,在鄂陵湖地区,青藏藁草、多枝黄耆、冷蒿、早熟禾、弱小火绒草和短穗兔耳草 6 种草本植物中,早熟禾的固土效果最好。

4 结论

(1) 对鄂陵湖区早熟禾、青藏藁草、冷蒿、弱小火绒草、多枝黄耆和短穗兔耳草 6 种亚优势草本植物进行单根拉伸试验发现,在根径范围为 0.10~0.60 mm 条件下,以上 6 种草本植物单根抗拉力和单根抗拉强度随着根径的增大分别呈幂函数增长和幂函数减小

的趋势,单根极限延伸率和单根弹性模量与根径之间不存在显著性函数关系。

(2) 在 5 个根径级别下,6 种草本植物单根平均抗拉强度由大到小依次为早熟禾、短穗兔耳草、青藏藁草、冷蒿、弱小火绒草、多枝黄耆,单根平均弹性模量由大到小依次为早熟禾、短穗兔耳草、青藏藁草、弱小火绒草、冷蒿、多枝黄耆。就单根抗拉性能而言,早熟禾优于其他 5 种草本植物。综合考虑鄂陵湖地区不同植物类型的单根抗拉力学特性指标、物种重要值与根系构型,早熟禾具备较好的固土潜力。

参考文献 (References)

- [1] 张蕴帅,黄倩,马耀明,等.黄河源区鄂陵湖湖面和湖边草地对流边界层湍流结构特征的大涡模拟研究[J].大气科学,2021,45(2):435-455.
Zhang Yunshuai, Huang Qian, Ma Yaoming, et al. Large eddy simulation study of the turbulent structure characteristics of the convective boundary layer over Ngoring Lake and surrounding grassland in the source region of the Yellow River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021,45(2):435-455.
- [2] 严作良,周华坤,刘伟,等.江河源区草地退化状况及成因[J].中国草地,2003,25(1):73-78.
Yan Zuoliang, Zhou Huakun, Liu Wei, et al. Preliminary discuss on grassland degradation in the source region of Yangtze and Yellow rivers [J]. Grassland of China, 2003,25(1):73-78.
- [3] 李小娟,张莉,张紫萍,等.高寒草甸生物结皮发育特征及其对土壤水文过程的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):139-144.
Li Xiaojuan, Zhang Li, Zhang Ziping, et al. Characteristic of biological soil crust and its effects on hydrological processes in alpine meadow [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):139-144.
- [4] 李娜,王琳,文广超,等.黄河源头鄂陵湖面积变化及驱动力分析[J].测绘通报,2023(10):7-13, 33.
Li Na, Wang Lin, Wen Guangchao, et al. Analysis of area change and driving forces for the Eling Lake at the source of the Yellow River [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(10):7-13,33.
- [5] 苏培玺,周紫鹃,侍瑞,等.高寒草毡层基本属性与固碳能力沿水分和海拔梯度的变化[J].生态学报,2018,38(3):1040-1052.
Su Peixi, Zhou Zijuan, Shi Rui, et al. Variation in basic properties and carbon sequestration capacity of an alpine sod layer along moisture and elevation gradients [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(3):1040-1052.
- [6] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报,2012,67(1):3-12.
Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(1):3-12.
- [7] Stokes A, Douglas G B, Fourcaud T, et al. Ecological mitigation of hillslope instability: Ten key issues facing researchers and practitioners [J]. Plant and Soil, 2014, 377(1):1-23.
- [8] 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.
Zhou Yunyan, Chen Jianping, Wang Xiaomei. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012,21(6):1171-1177.
- [9] 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(1):207-226.
- [10] 周德培,张俊云.植被护坡工程技术[M].北京:人民交通出版社,2003.
Zhou Depei, Zhang Junyun. Vegetation slope protection engineering technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [11] Wu T H, McKinnell W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1):19-33.
- [12] Kazutoki Abe, Masaru Iwamoto. An evaluation of tree-root effect on slope stability by tree-root strength [J]. Journal of the Japanese Forestry Society, 1986, 68(12):505-510.
- [13] 程洪,张新全.草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J].水土保持通报,2002,22(5):20-23.
Cheng Hong, Zhang Xinquan. An experimental study on herb plant root system for strength principle of soil-fixation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002,22(5):20-23.
- [14] 刘国彬,蒋定生,朱显谟.黄土区草地根系生物力学特性研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,10(3):21-28.
Liu Guobin, Jiang Dingsheng, Zhu Xianmo. Study on grasses root bio-mechanics in Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996,2(3):21-28.
- [15] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等.护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J].岩石力学与工程学报,2006,25(10):2051-2057.
Li Shaocai, Sun Hailong, Yang Zhirong, et al. Mechanical characteristics of interaction between root system of plants and rock for rock slope protection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2006,25(10):2051-2057.
- [16] 杨维西,黄治江,黄土高原九个水土保持树种根的抗拉力[J].中国水土保持,1988(9):47-49.
Yang Weixi, Huang Zhijiang. Root tensile strength of nine soil and water conservation tree species on the Loess Plateau [J]. Soil and Water Conservation in China, 1988 (9):47-49.
- [17] 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(增刊2):3445-3452.
Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoqing, et al. Study on root mechanical characteristics of slope protection shrubs in loess area of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (Suppl. 2):3445-3452.
- [18] 唐恬,王磊,文小航.黄河源鄂陵湖地区辐射收支和地表能量平衡特征研究[J].冰川冻土,2013,35(6):1462-1473.
Tang Tian, Wang Lei, Wen Xiaohang. A study of the radiation and surface energy balance around the Ngoring Lake in source regions of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013,35(6):1462-1473.
- [19] 李万寿,冯玲,孙胜利.扎陵湖、鄂陵湖对黄河源头年径流的影响[J].地理学报,2001,56(1):75-82.
Li Wanshou, Feng Ling, Sun Shengli. Influence of Zaling and Eling Lake on the annual discharge of the Huanghe River source area [J]. Acta Geographica Sinica, 2001,56(1):75-82.
- [20] 运志辉.高原冻土路基边坡病害机制研究[D].陕西西安:长安大学,2023.
Yun Zhihui. Study on Disease Mechanism of Plateau Permafrost Subgrade Slope [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2023.
- [21] 张懿铨,刘林山,摆万奇,等.黄河源地区草地退化空间特征[J].地理学报,2006,61(1):3-14.
Zhang Yili, Liu Linshan, Bai Wanqi, et al. Grassland degradation in the source region of the Yellow River [J]. Acta Geographica Sinica, 2006,61(1):3-14.
- [22] 杨鑫光,李希来,金立群,等.不同人工恢复措施下高寒矿区煤矸石山植被和土壤恢复效果研究[J].草业学报,2019,28(3):1-11.
Yang Xinguang, Li Xilai, Jin Liqun, et al. Effectiveness of different artificial restoration measures for soil and vegetation recovery on coal mine tailings in an alpine area [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28 (3):1-11.
- [23] 李瑞,张克斌,刘云芳,等.西北半干旱区湿地生态系统植物群落空间分布特征研究[J].北京林业大学学报,2008,30(1):6-13.
Li Rui, Zhang Kebin, Liu Yunfang, et al. Plant community spatial distribution pattern of wetland ecosystem in a semi-arid region of Northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008,30(1):6-13.
- [24] 邵田田,王明玖,齐雪.草原露天煤矿排土场重建植被与土壤相关性研究[J].草原与草业,2021,33(3):21-27.
Shao Tiantian, Wang Mingjiu, Qi Xue. Correlation between vegetation reconstruction and soil physical and chemical properties in grassland open-cast coal mine [J]. Grassland and Prataculture, 2021,33(3):21-27.
- [25] 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.
Ji Jinnan, Wu Zhiyang, Yao Ankun. Research of tree roots biomechanical characteristics [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2012,41(2):140-144.
- [26] 贺振昭,党生,刘昌义,等.青海湖地区草本植物根系力学特性试验研究[J].中国水土保持,2017(4):44-48.
He Zhenzhao, Dang Sheng, Liu Changyi, et al. Experimental study on mechanical characteristics of herbaceous root system of the Qinghai Lake area [J]. Soil and Water Conservation in China, 2017(4):44-48.
- [27] 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.
Zhong Ronghua, Bao Yuhai, He Xiubin, et al. Root tensile properties and root cohesion of 4 herbaceous plant species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(4):188-194.
- [28] 张超波,周霞,李东嵘,等.山西土石山区3种草本植物根拉拔特性[J].水土保持研究,2019,26(3):300-304.
Zhang Chaobo, Zhou Xia, Li Dongrong, et al. Root pullout properties of three slope-protecting herbaceous plants in earth-rock mountain area in Shanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26 (3):300-304.
- [29] 张培豪,卢海静,胡夏嵩,等.青藏公路五道梁—沱沱河段高寒草甸根系力学效应研究[J].草地学报,2023,31(9):2805-2813.
Zhang Peihao, Lu Haijing, Hu Xiasong, et al. Mechanical effect of plant roots in alpine meadow along Wudaoliang-Tuotuo River section of Qinghai-Tibet highway [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023,31(9):2805-2813.
- [30] Lateh H, Avani N, Bibalani G H. Investigation of root distribution and tensile strength of *Acacia mangium* Willd (Fabaceae) in the rainforest [J]. Greener Journal of Biological Sciences, 2014,4(2):45-52.

- Kou Xiaorong, Bai Zhongke, Du Zhenzhou, et al. Land reclamation quality completion standards for large open-cast coal mine enterprises in Loess areas [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):957-965.
- [33] 董倩, 李素清. 安太堡露天煤矿区复垦地不同植被下草本植物群落生态关系研究 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34(4):95-100.
- Dong Qian, Li Suqing. The ecological relationships of herbaceous plant communities under different plantations on the reclaimed dumps in Antaibao opencast coal mining area [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(4):95-100.
- [34] 徐志果. 安太堡露天矿复垦地草本植物群落多样性研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- Xu Zhiguo. Study on the diversity of herbaceous plant communities in reclaimed land of Antaibao opencast mine [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [35] 毕银丽, 李向磊, 彭苏萍, 等. 露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征 [J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12):205-213.
- Bi Yinli, Li Xianglei, Peng Suping, et al. Characteristics of spatial variability of plant diversity and soil nutrients in open-pit mining area [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12):205-213.
- [36] 张亦扬. 榆神府采煤塌陷区不同植被恢复方式下土壤与植物演替规律及其耦合关系 [D]. 陕西 西安: 西安科技大学, 2019.
- Zhang Yiyang. Soil-vegetation evolution dynamics and coupling effects of different vegetation restoration modes in Yushenfu coal mining area [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [37] 黄雅茹, 辛智鸣, 葛根巴图, 等. 乌兰布和沙漠东北缘典型灌木群落多样性与土壤养分相关性研究 [J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(9):95-105.
- Huang Yaru, Xin Zhiming, Ge G, et al. Correlation of typical shrub community diversity and soil nutrient in northeast ulanbuh desert [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(9):95-105.
- [38] 王洪丹, 王金满, 曹银贵, 等. 黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(16):5098-5108.
- Wang Hongdan, Wang Jinman, Cao Yingui, et al. Effect of soil and topography on vegetation restoration in an opencast coal mine dump in a loess area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16):5098-5108.

(上接第 11 页)

- [31] Ye Chao, Guo Zhonglu, Li Zhaoxia, et al. The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquilts in Subtropical China [J]. *Geomorphology*, 2017, 285:82-93.
- [32] 李宏斌, 张旭, 姚晨, 等. 陕北黄土区不同植物根系抗拉力学特性研究 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4):122-129.
- Li Hongbin, Zhang Xu, Yao Chen, et al. Study on root tensile mechanical properties of six typical plants in the loess area of Northern Shaanxi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4):122-129.
- [33] 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 Yu, Zhu Haili, Zhang Ke, et al. Relationship between tensile properties and microstructure of single root of three riparian plants [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(2):572-583.
- [34] 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 Yabin, Li Shuxia, Yu Dongmei, 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.
- [35] Gray D H. Influence of vegetation on the stability of slopes: [C] // *Vegetation and slopes: Stabilisation, Protection and Ecology*. London: Thomas Telford Publishing, 1994.
- [36] 言志信, 宋杰, 蔡汉成, 等. 草本植物加固边坡的力学原理 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(2):30-34.
- Yan Zhixin, Song Jie, Cai Hancheng, et al. Mechanical analysis of herbaceous plant strengthening slope [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(2):30-34.
- [37] 陈世鑽, 张昊, 王立群, 等. 中国北方草地植物根系 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2001.
- Chen Shihuang, Zhang Hao, Wang Liqun, et al. Root system of grassland plants in Northern China [M]. Changchun: Jilin University Press, 2001.