

# 云南省昭通市烂泥箐滑坡源区草本植物根系抗拉特征

徐宗恒, 陈云英, 张宇, 查玲珑, 陶真鹏

(云南师范大学 地理学部, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明 650500)

**摘要:** [目的] 研究植物根系的抗拉强度特征, 了解根系在复合体中的表现, 为开展生态护坡时植物的选择提供依据。[方法] 对取自于云南省昭通市烂泥箐滑坡源区的鸢尾和艾根系开展单根拉伸试验, 从宏观破坏特征, 变形—拉力曲线以及断裂拉力、最大抗拉力、抗拉强度、延伸率和拉伸模量等参数揭示两者变形破坏特征和抗拉特征。[结果] ① 鸢尾根系破坏具有明显延性, 而艾根系呈现脆性破坏特征; 破坏时前者的平均延伸率约是后者的 3 倍。鸢尾根系在拉伸过程表现出较好弹塑性变形特征和较强的变形能力。② 由于周皮组织的保护作用, 鸢尾根系变形—拉力曲线多呈现波动多峰值型, 而艾根系主要呈现近似直线型。③ 根径和根系长度明显影响着根系抗拉特征, 根系的断裂拉力和最大抗拉力、抗拉强度和拉伸模量随根径增加而呈现增加或减小的变化特点, 待测根系长度较短会导致抗拉特征参数变异程度增强。所以建议选择根径沿轴向变化不大, 尽量长的根系开展相关力学试验。[结论] 建议选择根组织结构好, 周皮组织厚, 变形能力强, 延伸率大且具有明显延性破坏特征的植物作为草本护坡植物。

**关键词:** 根系拉伸试验; 抗拉特征参数; 应力应变特征; 破坏特征; 护坡植物

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0011-08

中图分类号: S718.3, Q948.1

**文献参数:** 徐宗恒, 陈云英, 张宇, 等. 云南省昭通市烂泥箐滑坡源区草本植物根系抗拉特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 11-18. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.002; Xu Zongheng, Chen Yunying, Zhang Yu, et al. Root tensile characteristics of herbaceous plants from source areas of Lanniqing landslide in Zhaotong City, Yunnan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 11-18.

## Root Tensile Characteristics of Herbaceous Plants from Source Areas of Lanniqing Landslide in Zhaotong City, Yunnan Province

Xu Zongheng, Chen Yunying, Zhang Yu, Zha Linglong, Tao Zhenpeng

(Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Changes of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** [Objective] The tensile strength characteristics of plant roots were studied to understand the performance of roots in complexes, in order to provide a basis for the selection of plants to be used in ecological slope protection. [Methods] Single root tensile tests were carried out on the roots of *Iris tectorum maxim* and *Artemisia argyi* taken from the source areas of the Lanniqing Landslide in Zhaotong City, Yunnan Province. The deformation and failure characteristics and tensile strength features were determined from macroscopic failure characteristics, deformation-tension curve, and feature parameters of fracture tension, maximum tension force, tensile strength, elongation rate, and tensile modulus. [Results] ① *Iris* root damage showed obvious ductility, while *A. argyi* root damage showed brittleness. The average elongation rate of *I. tectorum maxim* was about three times of *A. argyi* when damaged, and the root system of *I. tectorum maxim* showed good elastic-plastic deformation characteristics and strong deformation ability in the tensile process. ② Due to the protective effect of the periderm, the deformation-tension curves of *Iris tectorum maxim* roots mostly showed fluctuation and multiple peak values, while the roots of *A. argyi* mainly showed an approximately linear response. ③ Diameter and length significantly affected the mechanical features and parameters of roots. Fracture tension and maximum tension force increased with increasing root diameter,

收稿日期: 2022-04-27

修回日期: 2022-10-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“典型斜坡非饱和带优先域及其降雨入渗机制研究”(41502340); 云南省科技厅应用基础研究面上项目“植被参与条件下斜坡非饱和土水理—力学特征: 试验及机理”(202101AT070138)

第一作者: 徐宗恒(1987—), 男(汉族), 云南省永胜县人, 博士, 副教授, 主要从事山地灾害与地质环境研究。Email: 553790356@qq.com。

while tensile strength and tensile modulus decreased. The variation of the characteristic parameters of tensile strength was enhanced when the root length was short. Therefore, it is recommended that plants be selected that have little change in root diameter along the axial direction and the roots be as long as possible when carrying out relevant mechanical tests. [Conclusion] We recommend selecting vegetation with good root tissue structure, thick periderm tissue, strong deformation ability, large elongation rate, and obvious ductile failure characteristics to be used as slope protection plants.

**Keywords:** root tensile test; tensile characteristic parameters; stress and strain characteristics; failure characteristics; herbaceous slope protection plant

近年来,受强降雨的影响,发育有植被的山区流域斜坡常常发生滑坡、泥石流等地质灾害,在形成的堆积体中常含有很多的倾倒树杆、根系和枝叶等植物残体,表明滑坡发生时,存在于浅表层土体中的植物根系和斜坡体一并破坏的现象比较常见,所以浅表层斜坡根土复合体的破坏相关理论研究是山区流域斜坡浅层滑坡发生过程—机制研究中需要重点关注的问题。

在山区流域植被发育斜坡,植被根系主要分布于表土层,且随着深度的增加逐渐减少。相关研究结果表明在有根系存在的区域,根系对斜坡根土复合体的力学性质有明显的影 响,主要表现为植被根系在复合体中作为一种加筋材料发挥着固土作用,植物根系的能提高土体抗剪强度。李怡帆等<sup>[1]</sup>研究发现细根相比粗根具有更强的抗拉强度,在土体中的加筋作用更为明显,其将土体的剪应力转化为自身的拉应力从而增强土体抗剪强度的作用更好;薛海龙等<sup>[2]</sup>认为抗拉强度越大的根系组合组成的根土复合体黏聚力越大,相关研究表明植物根系的力学强度特征特别是抗拉特征会直接影响植物根系固土效应,根系抗拉特征相关研究具有基础性的地位,同时也是近年来该方向研究的热点问题。例如付江涛等<sup>[3]</sup>对不同标距的草本垂穗披碱草根系进行单根抗拉试验,计算单根抗拉强度、拉伸率和拉伸模量,探讨根系长度对单根抗拉性能的影响。Vergani 等<sup>[4]</sup>对意大利北部的伦巴迪亚的不同地点采集的 7 种常见的高山环境树种根系,开展抗拉试验并分析统计了抗拉承载力和直径关系,所得研究结果与前人研究结果一致,证实了根径与断裂力和断裂强度之间呈幂函数关系。除此以外,Zhang 等<sup>[5]</sup>、Mahannopkul 等<sup>[6]</sup>对 5 种土地修复工程的优势物种根系、香根草根系的抗拉强度开展试验研究,并分析不同季节根系不同含水率等因素对抗拉强度的影响。除抗拉强度以外,还有学者对根系抗拔、抗剪、抗折强度开展了研究,例如刘亚斌<sup>[7]</sup>、郑明新等<sup>[8]</sup>、崔天民等<sup>[9]</sup>对一定生长期的柠条锦鸡儿、霸王和多花木兰和内蒙古中西部 3 种典型乡土植物根系的相关力学强度进行了详细的研究。已有研究成果表明根系力学强度特征对根系加固复合体的效

应—机制等方面认识具有基础性地位。本文在此基础上,以云南省昭通烂泥箐滑坡源区两种草本植物根系为研究对象,从宏观破坏特征,变形和拉力曲线定性分析入手得到单根系拉伸过程中的变形—破坏特征,再结合断裂拉力、最大抗拉力、抗拉强度、延伸率和拉伸模量等参数定量揭示两种根系力学强度特征,以期通过对比两者抗拉特征给出进行生态护坡时草本植物选择的建议。

## 1 研究区概况

取样点位于云南省昭通市巧家县小河镇马鞍村烂泥箐村民小组,位于巧家县东北部。小河镇位于发源于昆明嵩明县的金沙江支流牛栏江流域的炉房沟与银厂沟交汇地带,境内主要为构造溶蚀侵蚀高山峡谷地貌,最高点位于山堡村满天星,海拔 3 300 m;西侧药山山顶海拔 4 040 m,小河镇政府驻地于牛栏江干流西北侧,处于两山间河谷地带,海拔不到 1 000 m<sup>[10]</sup>,具体研究区概况可同时参考徐宗恒等<sup>[11]</sup>有关研究。马鞍村烂泥箐村民小组是小河镇下辖的行政村,该村民小组东北侧斜坡 2019 年 9 月 5 日凌晨 4 时 40 分许曾发生滑坡,造成唐姓兄弟 2 户 9 人死亡。为研究滑坡区优势草本植物对防治地表水土流失和固土作用,在烂泥箐滑坡源区(103.14°E, 27.27°N, 高程 2 315 m)获取两种植物根系开展相关的试验研究。

## 2 取样及试验方法

### 2.1 取样方法

在进行取样之前,对滑坡源区范围内植物类型、生长状况进行了详细的调查,发现滑坡源区呈片状或者带状分布的优势草本物种为鸢尾科鸢尾属鸢尾(*Iris tectorum*)和菊科蒿属艾(*Artemisia argyi*)2 种多年生植物,为了使研究具有代表性和方便对比分析,本文仅选取该两种草本植物进行研究。选择一长势较好,未有人为扰动的植株面积分布区域,先去除土体表层范围内的大根枯枝和杂草以及稍大砾石,并清除周围有可能妨碍取样的杂物,在清理时注意尽量不要扰动土体表层以及不要拉扯到植物植株。清理

好取样现场以后,选定取样范围,首先将植株地上部分统一用锋利剪刀进行切除,然后以植株中心往外 50 cm 为取样范围,开始由外及里进行缓慢保护性切土开挖,当出现根系即刻停止开挖,用尖铁棍缓慢地刨去周围土体然后用毛刷刷去粘附的松散颗粒,此处特别注意该过程中不能对原生根系造成损伤。需要说明的是,挖掘过程中我们发现包括主根系、须根、不定根和根状茎<sup>[12]</sup>在内的地下植物组织对土体加固作用明显,地下组织沿不同方向的分化和生长形成纵横交错的网络结构,有利于防治水土流失和固结土壤<sup>[13]</sup>,所以从本文研究目的出发,对上述组织进行全部提取挖掘,完毕以后迅速将其用保鲜薄膜包裹好,分样装入密闭的自封袋带回实验室,在实验室内对取回的根系浸水清洗,明显的附着颗粒人工清除,紧贴根系的黏土则用毛刷浸水缓慢去除,待根系清洗干净以后,在实验室平台通风晾干 24 h 至没有自由水附着,然后放置 4 ℃ 恒温箱内备用。

## 2.2 试验方法

为方便开展试验和方便结果与分析,将鸢尾科鸢尾属鸢尾编为 A 组,菊科蒿属艾编为 B 组,试样长度按照根系自然生长情况,截取相对完整无损伤,截面面积在轴向变异性较小的根段开展试验,同时考虑试样长度效应,对 A 组截取 4 种长度根系开展试验,分别 5, 10, 15, 20 cm。A 组编号为 A-X-Y, X 代表根系长度, Y 代表试样在该组中的试验顺序编号。B 组编号分别为 B-1-Z, Z 代表试样在该组中的试验顺序编号。采用游标卡尺对两种植物根系根径进行测量,用根系待拉伸段两端和中部 3 个位置处根径的平均值作为根径值(mm)。

根系拉伸试验采用 WANCE 微机控制电子万能试验机开展试验。试验开始前,需要检查试验机横梁限位装置,确保不会因为根系初始长度过长或者变形过大导致横梁位移超限而导致夹具或装置损坏;根据根系的外形特征和直径选择适当的夹具,并在夹具和根端接触位置缠绕软纸,以扩大摩擦,防止受力时根端滑出<sup>[14]</sup>,同时避免夹具不合适导致应力集中而在根系端头处发生断裂从而影响试验结果,在选择好合适夹具以后,先用固定位置的下夹头夹紧待测根系,再根据根系长度上下移动确定上夹头的位置,缓慢移动上夹头使根系处于初始拉伸阶段。拉伸过程选择控制方式为位移控制,加载速率为 25 mm/min,试验结束条件为定力衰减率 50%/s。根系在拉伸变形过程中,用数码相机拍照记录根系的变形以及破坏现象,同时仪器自动采集加载过程中的变形和相应拉力值,当仪器记录到根系首次拉力有突降(拉伸过程中

瞬间位移增加为 0,而拉力突然降低)时,此时的拉力为断裂拉力(N);拉伸开始至结束过程中所能承受的最大拉力,即变形—拉力曲线最高峰值点对应的拉力为最大抗拉力(N)。

## 2.3 数据处理

根据本文实际情况以及已有成果对拉伸数据的处理<sup>[14-15]</sup>,选择根系在上下夹具中部或接近中部断裂时试验结果有效,而从夹具内滑脱以及夹具端部位置处断裂时结果无效,无效数据将不纳入分析范围。经统计, A 组和 B 组共获得有效数据 34 组和 31 组。根据试验根段的根径、变形和拉力等,可计算抗拉强度、延伸率和拉伸模量等参数,计算公式为<sup>[3,16]</sup>:

$$P = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100\% \quad (2)$$

$$E = \frac{P}{0.01\epsilon} \quad (3)$$

式中:  $P$  为根系抗拉强度(MPa);  $F$  为单根最大抗拉力(N);  $D$  为根径(mm);  $\Delta L$  为拉伸破坏时变形量(mm);  $L$  为根系初始拉伸长度(mm);  $\epsilon$  为根系破坏时根系延伸率;  $E$  为根系拉伸模量(MPa)。根据试验所得单根最大抗拉力和根径可以计算抗拉强度,并计算延伸率和拉伸模量,文中为了分析根系初始截面面积对断裂拉力和最大抗拉力的影响,将对不同植物根系试验所得拉力和截面面积进行线性回归,并对回归模型进行显著性检验。

## 3 结果与分析

### 3.1 根系破坏的宏观特征

依据严小龙<sup>[17]</sup>关于植物根系的论述,植物的根系分为主根系和须根系以及一些特殊根系类型。从现场观察所知,两种植物根系分布均相对较浅,多在 50 cm 范围内,少部分初生根会超过 50 cm。鸢尾无明显粗大而长的主根系,从根基生长出众多无主次之分不定根和侧根,呈须状,艾根系则由主根和侧根组成,主根相对粗而长,根径多为 2~5 mm,主根上发育有较多的侧根,根径多在 1 mm 以下。从形态上分析,鸢尾和艾应分别属于须根系和直根系<sup>[12]</sup>。从根系分布特征来看,鸢尾以不定根和侧根为主,艾以主根和侧根为主,本次试验主要提取较完整无损伤、根径变化不大的两者根段开展拉伸试验。

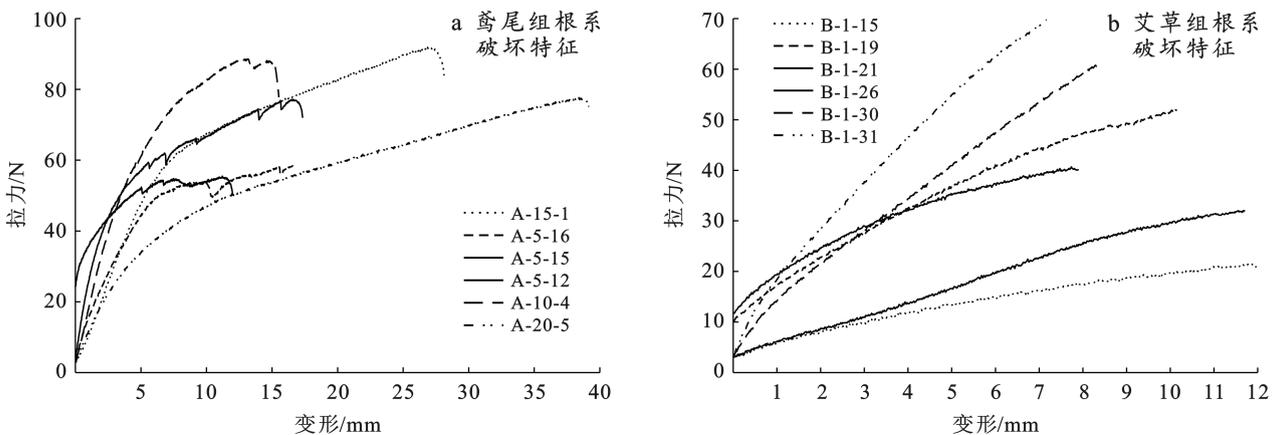
对加载完成后的根系破坏形态进行仔细观察,我们发现处理 A-15-1(此处仅列出部分典型根段的试验结果)根径为 3.2 mm 的鸢尾根系断裂后,上下断

口距离较大,约 4 cm,说明在拉伸过程中产生较大的变形才发生了断裂,并且断口参差不齐,有颈缩现象,断裂以后还有明显的残余变形。有的根系拉伸后期出现明显塑性变形,产生较大位移而拉伸力降低导致试验结束,拉伸后根系周皮表面产生了明显的裂纹,周皮组织有撕裂的情况,内部木质部产生“橡皮筋”似的变形,整体上根系并未断裂,呈现明显的塑性变形的破坏模式,A-5-2 和 A-5-13 即为此破坏模式。而艾根系断裂后断口平齐,断距相对鸢尾来说较短,拉伸变形较小,约为 1.5 cm~3 mm,拉伸断裂后基本无残余变形,径向尺寸较加载前无明显变化,破坏具有明显的脆性断裂特征,此破坏模式出现在绝大多数艾根系试验结果中。

如图 1 所示,通过观察发现两者曲线有着明显的区别,鸢尾根系在轴向拉伸力作用下,其变形—拉力曲线主要呈现近似直线型、单峰值型和波动多峰值型。近似直线型相对较少,仅如 A-10-9 和 A-20-3,随着变形的增加,首先根系承受的拉力会呈线性关系增加,当变形到达 10 mm 左右时,拉力增加的速率有所下降,曲线变得平缓,变形在急剧增加,直至根系被突然拉断,该种情况断裂部分发生在组织的节间分节处。单峰值型是最主要最常见的形式,前期曲线变化过程与近似直线型类似,拉力经历快速增长—缓慢增

长的过程,与前者不同的是后期破坏过程不一样,此模式曲线有明显“低头”的情况,形成单峰峰值,此时对应的拉力即为根系所能承受的最大抗拉力。波动多峰值型曲线则是在变形至一定程度以后,根系的周皮组织有撕裂的情况断续发生,当部分区域首次发生周皮撕裂时,根系的所能承受的拉力将降低,但并未达到 50%/s 的定力衰减率,此时曲线有所“低头”,但内部木质部并未断裂,继续能承受拉力,变形增加拉力有恢复增加,曲线再次“上扬”,当变形继续变大,其他区域的周皮继续发生撕裂,每发生一次撕裂,曲线就低头一次,直至内部木质部断裂,整体曲线呈现波动上升形式,出现多个峰值,最终当内部木质部断裂时对应的拉力为最大抗拉力,这种模式一般根系变形量是最大的,根系破坏时呈明显的塑性状态。

对于艾植物根系拉伸变形—拉力曲线,主要呈现近似直线型,破坏模型较为单一,随着变形的增加,根系承受的拉力会呈线性关系增加,根径较大的根系,其拉力增加速率明显较快,曲线斜率陡峻,当变形达到 5~10 mm 左右时,拉力增加的速率有所下降,曲线变得平缓,进入应变软化阶段,当变形量达到 15~20 mm 时,根系无征兆性地突然断裂,曲线无“低头”不会具有单峰的现象,也无先下降后上升的波动现象,艾单根系具有明显脆性断裂的特点。



注:图例中的字母和数字组合为试验处理;A 为鸢尾组, B 为艾草组;A 组截取 4 种长度根系开展试验,分别 5 cm,10 cm,15 cm 和 20 cm。A 组编号为 A-X-Y,X 代表根系长度,Y 代表试样在该组中的试验顺序编号。B 组编号分别为 B-1-Z,Z 代表试样在该组中的试验顺序编号。

图 1 两种植物根系拉伸变形—拉力关系图

Fig.1 Tensile deformation-tension diagram of roots of two plants

### 3.2 根系抗拉特征

已有研究结果表明根径即根系径向截面积是抗拉强度特征主要影响因素,图 2 和图 3 为两种植物根系初始截面积与最大抗拉力/断裂拉力/抗拉强度的关系图。断裂拉力一般会与最大拉力相等,但是对于具有较好延性,具有波动多峰值特点的鸢尾来说,在拉伸过程中,首先多为周皮组织先拉裂/撕裂破坏,

此时根系所受拉力为根系断裂拉力,但此时木质部并未完全断裂,根系可继续承受拉力直至最后整体破坏断裂,此时对应的拉力为最大抗拉力,所以对于渐进性破坏的根系,最大抗拉力和断裂拉力并不相等,例如仅 A-10-6 的鸢尾根系最大拉力和断裂拉力相等,均为 100.08 N,其余根系的前者均大于甚至远远大于后者,A-10-2 断裂拉力仅有 4.01 N,而最大拉力

有 48.01 N。所以最大抗拉力代表着根系所能承受的极限抗拉能力,对根系抗拉强度分析时采用最大抗拉力进行计算是合理的。鸢尾根系初始截面积为 3.14~16.61 mm<sup>2</sup>, 所得断裂拉力 4.01~129.62 N, 最大拉力 36.67~136.42 N, 鸢尾根系所能承受的断裂拉力和最大抗拉力随着根系截面积的增加均有增加, 线性拟合所得前者斜率约为 2.11±0.92 ( $p>0.05$ ), 后者为 1.00±1.24 ( $p<0.05$ ), 最大抗拉力的增长幅值要大于断裂拉力。依据根系破坏的宏观特征分析

可知,断裂拉力一般代表着周皮组织的抗拉性能,由于根径主要决定着木质部的径向截面面积,所以根径变化在一定范围内对周皮组织的影响较小,断裂拉力的变幅随根径变化就会很小,而最大抗拉力则变化明显,但对于具有延性变形特征的鸢尾根系来说,除了根径,还有根系截面组织结构和根系长度对抗拉特征也有影响,此外根系含水率也无法实现统一,所以根系初始截面积和拉力两者之间并不是很好的正比例关系。

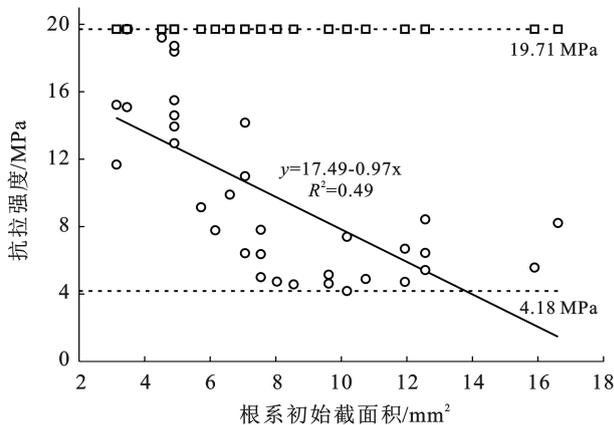
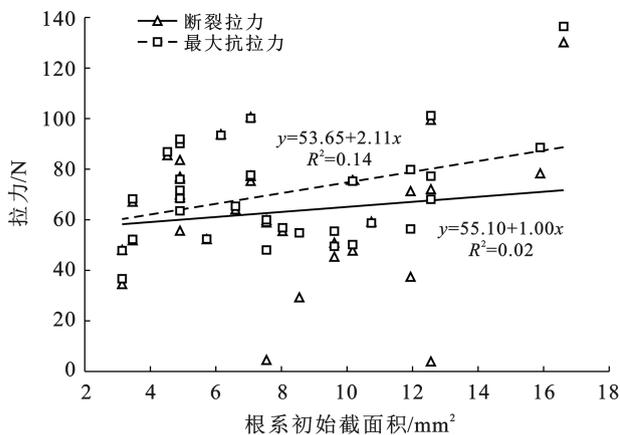


图 2 鸢尾根系截面积—最大抗拉力/抗拉强度关系

Fig.2 Cross-sectional area-maximum tensile/tensile strength relationship of *Iris* roots

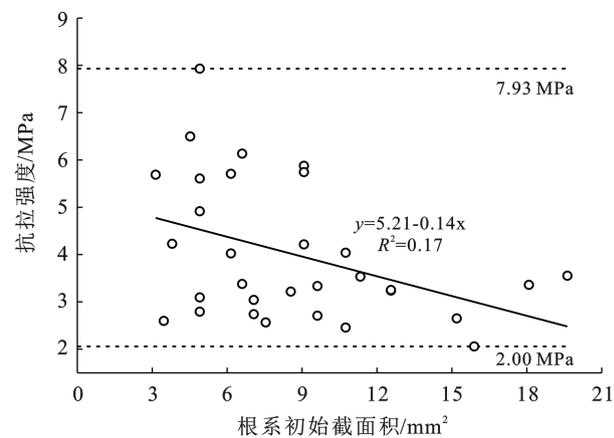
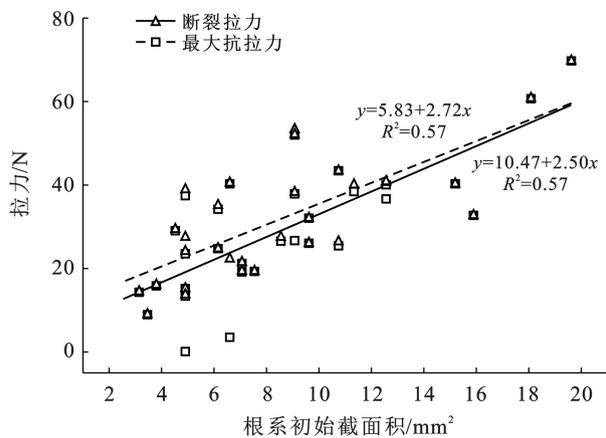


图 3 艾根系截面积—最大抗拉力/抗拉强度关系

Fig.3 Cross-sectional area-maximum tensile/tensile strength relationship of *Artemisia* roots

艾根系初始截面积为 3.14~19.63 mm<sup>2</sup>, 所得断裂拉力 8.99~69.72 N, 最大抗拉力为 0.11~69.72 N, 由于艾根系脆性断裂的特点, 导致艾根系在相同初始截面积时最大抗拉力和断裂拉力仅有鸢尾的约 50%, 同时, 与鸢尾不同的是, 在拉伸过程中, 艾根系很少出现周皮组织首先拉裂的情况, 而是首次瞬间拉力突降即是根系被整体拉断, 其最大抗拉力和断裂拉力两者基本相等(图 3)。随初始截面积增加艾根系的最大抗拉力和断裂拉力随之明显增加, 斜率分别为 2.72 ( $p<0.01$ ) 和 2.50 ( $p<0.01$ ), 从增加幅度来看, 相同

截面积的艾根系拉力增加值要比鸢尾的大, 说明主要由木质部承受拉力的根系要比由周皮组织承受的拉力的根系抗拉能力要强, 但是在抗拉持时性上前者比后者要差。根系抗拉强度由根系最大抗拉力和初始截面积计算所得, 在相同拉伸力时, 强度由初始截面积决定, 根系初始截面积越小, 强度越大, 反之亦然。由图 2 和图 3 可知, 根系拉伸强度随截面积增加均出现降低的趋势(鸢尾:  $p<0.01$ , 艾:  $p<0.05$ ), 鸢尾根系的降低的速率要比艾根系的高。鸢尾和艾的拉伸强度分别在 4.18~19.71 MPa 和 2.06~7.93 MPa 之

间,前者强度区间值要比后者大,具有更宽的拉伸强度区间。综上所述,鸢尾根系的断裂拉力和最大抗拉相对较高,抗拉性能要优于艾根系。

从以上分析可知,最大抗拉力和抗拉强度是表征根系拉伸力学特征的两个重要指标。将两种植物根系所得最大抗拉力和抗拉强度计算结果列于表 1 中。表中两种植物按照 2~3,3~4,4~5 mm 不同根径范围以及艾根系按照 5~15,15~25,25~35 cm 不同长度进行分级比较分析。4 种不同长度鸢尾和 3 个不同长度区间艾根系有效数据分别为 16,9,3,6 组和 11,15,5 组。

由表 1 可看出不同长度的鸢尾根系的平均最大抗拉力中位数约在 65~75 N 之间,平均水平波动不大,计算所得总平均最大抗拉力约 70 N,但是数值变异程度不尽相同,根系最短 5 cm 长度时试验数据离散性最大,所以拉伸试验中待测根系选取越短,可能获得的数据变异程度越大。对于相同长度根系,根径越粗,最大抗拉力越大,且变异程度越小。不同长度鸢尾根系的平均抗拉强度均大致相等,后者约

11 MPa,同样的,待测根系越短,所得数值变异程度越大,越长数值相对越稳定。艾根系的平均最大抗拉力,分别为 31.93,32.83,38.86 N,平均拉伸强度分别为 7.34,3.10,2.24 MPa,整体上随着根系长度增加两者变异程度降低。通过对比发现,相同长度的根系,随着根径增加,最大抗拉力随之增加,而抗拉强度随之降低,且鸢尾根系的平均最大抗拉力和抗拉强度均明显比艾根系的大,这之前分析一致。

根系延伸率为根系拉伸破坏时变形量与根系初始长度的比值,其值能直接体现植物根系在破坏过程中所体现出来的变形能力。

从表 1 中不同长度植物根系的平均延伸率数据发现,鸢尾根系的总平均延伸率在 13%~23%之间,而艾根系则仅有 4%~8%,前者轴向变形量约为后者的 3 倍,变形能力远远优于后者,这种明显差异对根系破坏的宏观特征观察所得结果也有直接的体现,所以可以推测根土复合体在重力和降雨入渗作用下发生浅表层滑移的过程中,鸢尾的抵抗变形的能力较强,可以在一定条件下缓解浅表层斜坡的失稳进程。

表 1 两种植物根系拉伸试验结果

Table 1 Tensile test results of roots of two plants

植物名称	根系长度/cm	根径/mm	平均最大抗拉力/N	总平均最大抗拉力/N	平均抗拉强度/MPa	总平均抗拉强度/MPa	平均延伸率/%	总平均延伸率/%
鸢尾	5	2~3	77.11±30.97		20.60±12.06		16.11±4.25	
		3~4	69.50±22.29	69.56±24.15	6.81±2.28	10.67±9.66	19.09±8.57	22.56±7.92
		4~5	60.22±10.27		5.02±0.86		30.69±3.39	
	10	2~3	62.26±13.21		14.14±6.31		14.61±5.71	
		3~4	81.99±11.13	76.68±15.59	10.41±2.47	11.36±4.60	19.61±4.42	16.49±5.90
		4~5	93.39±0.00		7.78±0.00		18.75±0.00	
	15	2~3	72.10±19.76		13.93±4.79		14.57±4.81	
		3~4	60.01±0.00	68.07±17.11	5.00±0.00	10.96±5.75	10.09±0.00	13.08±4.01
	20	2~3	63.18±7.00		13.13±2.03		12.39±3.84	
3~4		67.25±10.41	64.54±8.51	7.87±3.13	11.38±3.49	13.17±4.34	13.17±4.34	
艾	5~15	2~3	31.93±10.15	31.93±10.15	7.34±3.77	7.34±3.77	7.72±4.06	7.72±4.06
		3~4	22.69±3.34		3.44±0.51		3.98±0.798	
	15~25	2~3	22.69±3.34		3.44±0.51		3.98±0.798	
		3~4	31.11±15.52	32.83±17.21	3.36±1.70	3.10±1.71	3.66±1.98	4.01±2.43
	25~35	2~3	31.93±10.15		7.34±3.77		7.72±4.06	
		4~5	38.86±17.06	38.86±17.06	2.44±1.15	2.44±1.15	4.62±2.87	4.62±2.87

表征根系抗拉特征另外一个重要参数为拉伸模量,其值根据根系的拉伸强度和延伸率计算所得(公式 3),结果见表 2。两种植物根系的拉伸模量变化规律差别明显,根据鸢尾根系不同长度的平均拉伸模量结果可知,长度最长时,拉伸模量最大;而艾根系则是根系长度最短时拉伸模量最大,为 162.02 MPa,主要原因是根据前文分析可知,艾的延伸率较低,并且根系长度较短时艾的拉伸强度较大,所以艾根系的拉伸

模量相对较大。相同根系长度时,随着根径的增加,拉伸模量有降低趋势。例如 5 cm 长度鸢尾根系,随着根径增加,平均拉伸模量呈现 154.58 MPa→42.83 MPa→16.31 MPa 的变化,每个根径级别的拉伸模量仅为前一级别的 30%,同样的 10 cm 长度鸢尾根系的每个根径级别的模量仅为前一级别的 50%,随着根径增加拉伸模量降低是明显的,但对于具有脆性破坏特征的艾根系,随着根径增加其拉伸模量降低幅值相对较

小。整体上,根径越小,根系柔韧性较好,同时抵抗变形的能力也越强,这与张玉等<sup>[14]</sup>研究结果一致。艾根系虽然脆性破坏,变形小,但拉伸模量相对较大,同时众多根径较小的鸢尾须根和艾侧根,拉伸模量也较大,柔韧性较好,对阻止浅表层斜坡破坏均发挥着重要作用。

不论是总平均延伸率还是总平均拉伸模量,鸢尾根系的变异程度均随着测试根系长度的增加而降低,在测试根系较短情况下,延伸率和拉伸模量离散性较大,变异程度强,测试结果有较广的区间范围。所以结合着不同长度的鸢尾根系的总平均抗拉力和抗拉强度来看,除了根径以外,待测根系长度也能明显影响根系抗拉特征,所以在开展根系力学试验时宜选择全断面根径变化不大,尽量长的根系,以便试验结果更具代表性。

表2 两种植物单根系拉伸模量试验结果

Table 2 Tensile modulus test results of single root system

植物名称	根系长度	根径/mm	平均拉伸模量/MPa	总平均拉伸模量/MPa	
鸢尾	5	2~3	154.58±125.87	60.58±83.97	
		3~4	42.83±8.18		
		4~5	16.31±1.55		
	10	2~3	123.38±31.75	90.06±42.48	
		3~4	78.04±41.65		
		4~5	41.49±0.00		
	15	2~3	93.94±5.91	75.23±26.91	
		3~4	37.79±0.00		
	20	2~3	121.85±53.06	101.03±52.42	
		3~4	59.38±3.24		
	艾	5~15	2~3	162.02±161.81	162.02±161.81
			2~3	112.27±30.11	
15~25		3~4	100.57±55.31	103.69±50.12	
		4~5	74.95±56.25		
25~35		4~5	74.95±56.25	74.95±56.25	

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

植物根系对土体具有加固效应,能提高土体的抗剪强度。土体中根系结构特征,尤其是根系不同类型、根系含量、根径、分布位置/形式/形态、根系倾角、含水量对根土复合体的抗剪特征都有明显影响,根系的抗拉特征又直接影响植物根系固土效果。本文中所采用的抗拉特征参数指标:断裂拉力、最大抗拉力、抗拉强度、延伸率和拉伸模量来定量描述两种植被根系所体现出的抗拉特征,具有很好的应用。通过分析鸢尾和艾植物根系最大抗拉力、抗拉强度力学特征指标发现,前两指标数值随着根径增加而增加,这与张

玉等<sup>[14]</sup>对华扁穗草、线叶嵩草和金露梅3种优势滨河植物,杨苑君<sup>[15]</sup>对白梢、蒙古栋、油松和落叶松4种植被根系,徐文秀等<sup>[18]</sup>的对狗牙根和苍耳2种草本植物,李慧强等<sup>[19]</sup>对6种草本植物根系开展研究所得结果一致。结合张玉等<sup>[14]</sup>和徐文秀等<sup>[18]</sup>研究结果可知,3种优势滨河植物金露梅、线叶嵩草和华扁穗草的最大抗拉分别为4.40,2.49,1.97 N;抗拉强度分别为40.94,32.78,26.20 MPa;根径小于1 mm的狗牙根和苍耳根系最大抗拉力为(9.58±0.57)N和(9.30±0.66)N,抗拉强度均值为83.23 MPa和77.42 MPa。对比发现,本文鸢尾和艾的平均抗拉力远大于而抗拉强度低于上述草本植物根系已有研究结果,两者抗拉强度与杨苑君等<sup>[15]</sup>所得白梢(33.01 MPa)、蒙古栋(25.77 MPa)、油松(12.19 MPa)乔木植物根系的结果接近,说明从力学特征指标上看,鸢尾和艾都可作为良好的草本护坡植物。

延伸率和拉伸模量也是根系抗拉特征及其宏观破坏现象的具体定量体现。鸢尾和艾最大平均拉伸模量为101.03 MPa和162.02 MPa,表明两者均具有较强抵抗拉伸变形的能力。但鸢尾和艾根系的总平均延伸率为22.56%和7.72%,前者约是后者的3倍,强大的弹塑性变形能力使得鸢尾根系在浅表层介质下滑过程中不致发生突然破坏,当滑动面形成土体逐渐退出工作以后剪应力将大部分转移至根系上,在滑动面上根系的破坏将呈现循序渐进破坏进程,此时根系会将应力逐渐缓慢转移至深部根系直至根系完全断裂破坏,体现了变形能力较强的根系在抗滑中的作用。

根据严小龙<sup>[17]</sup>关于植物根结构的论述,根系生长一段时间以后,根的初生结构慢慢成熟稳定,成为根的主体部分,继续次生长,形成的次生结构,根的次生结构从外到内可划分为周皮、次生韧皮部、次生木质部和初生木质部。从本文研究结果发现,不同植物根系的次生结构组成不一样,会直接影响到拉伸过程中的应力应变特征。吕春娟<sup>[20]</sup>发现同一树种去皮根系抗拉强度明显高于带皮根系抗拉强度,特别是落叶松和榆树带皮根系与去皮根系的抗拉强度界限明显。杨苑君<sup>[15]</sup>发现根皮对抗拉能力应该有正面影响,根皮在含水率降低过程中会裂开或者直接剥落从而失去对根的保护作用,单根抗拉强度就急剧减小。以上研究中涉及的根皮应为根次生结构中的周皮,周皮组织对植物根系包括本文研究对象鸢尾和艾根系抗拉特征影响是明显的,周皮部分较厚的根系较为发达致使抗拉强度较强<sup>[14]</sup>。鸢尾具有的周皮组织在拉伸过程中的不断撕裂/拉裂直至最终木质部断裂导致应力应变曲线多呈现波动多峰值型,体现了周皮组织

的保护作用致使根系具有明显的延性破坏特征,反之艾根系为脆性破坏,这种破坏特征在低含水量情况(例如旱季)时,周皮组织的薄弱以及干裂将更加明显。鸢尾与艾根系应力应变特征体现出来两者组织结构的差异,同时也揭示鸢尾的抗拉特征相对较好,在一定条件下更有利于遏制浅表层滑坡的进程。当然,在本文基础上,采用石蜡切片试验和图像处理研究<sup>[14]</sup>对鸢尾和艾横断面根系组织组成及其破坏机理研究将有利于进一步揭示在拉伸过程中的周皮、韧皮部和木质部等结构的变化对应力应变性能的影响。

综上所述,仅从本文研究的角度去考虑草本植物根系抗拉性能,建议选择根的次生结构较好,周皮组织厚,抵抗变形能力强,延伸率大,具有明显的延性破坏过程的草本植物作为护坡植物。

## 4.2 结论

(1) 鸢尾根系宏观拉伸破坏特征为前者断口参差不齐,有颈缩现象,断裂以后还有明显的残余变形,具有明显延性破坏特征;而艾根系断口平齐,断裂时拉伸变形量小,呈脆性破坏特征。破坏时前者的平均延伸率约是后者的 3 倍,揭示鸢尾有较强的弹塑性变形能力。

(2) 鸢尾根系变形—拉力曲线呈现近似直线型、单峰值型和波动多峰值型(主要类型),而艾根系主要表现为近似直线型。从鸢尾与艾根系应力应变特征的差异并结合根系横截面组织结构的差异性可知,前者周皮组织在拉伸过程中的不断撕裂/拉裂直至最终木质部断裂而整体破坏使根系具有明显延性破坏特征,体现了周皮组织的保护作用。

(3) 根径和根系长度影响根系抗拉特征。随着根径增加,根系断裂拉力和最大抗拉力均随之增加,抗拉强度和拉伸模量均随之较小。鸢尾根系的断裂拉力和最大抗拉力均比艾根系的要高,抗拉性能优于艾根系。从不同的抗拉特征参数来看,待测根系较短会导致参数变异程度增强,所以为使结果更具代表性,开展根系力学试验时宜选择全断面根径变化不大,尽量长的根系。

(4) 综合鸢尾和艾根系的抗拉特征研究结果,仅从本文研究的结论出发建议生态护坡所采用的草本植物其根系宜具有鸢尾根系类似的抗拉特征。

## [参 考 文 献]

- [1] 李怡帆,张国涛,雷鸣宇,等.西南山区云南松根土复合体力学特性及其对浅层坡体稳定性的影响[J].水土保持通报,2022,42(6):88-96.
- [2] 薛海龙,唐彪,张竞元,等.尖萼金丝桃根系对边坡土体抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2019,39(3):87-92.
- [3] 付江涛,李晓康,刘昌义,等.标距对垂穗披碱草根系抗拉特性影响统计研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(S2):3399-3413.
- [4] Vergani C, Chiaradia E A, Bischetti G B. Variability in the tensile resistance of roots in Alpine forest tree species [J]. Ecological Engineering, 2012,46:43-56.
- [5] Zhang Lun, Xia Zhenyao, Zhou Zhengjun, et al. Experimental study on tensile properties and reinforcement ability of plant roots [J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2018,17(3):729-738.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 郑明新,黄鹏,彭晶.不同生长期多花木兰根系抗拉拔特性及其根系边坡的稳定性[J].农业工程学报,2018,34(20):175-182.
- [9] 崔天民,格日乐,杨锐婷,等.内蒙古中西部 3 种典型乡土植物根系抗折力学特性[J].水土保持学报,2021,35(2):138-143.
- [10] 高安生,郭荣芬,柴秀芬,等. $\gamma$  中尺度单体合并在昭通小河镇“2010.7.13”灾害性天气中的特征分析[J].灾害学,2011,26(2):96-101.
- [11] 徐宗恒,张宇,陶真鹏,等.昭通烂泥箐滑坡源区原生状态根—土复合体抗剪特征[J].水土保持学报,2022,36(4):128-134.
- [12] 姜在民,贺学礼.植物学[M].2版.杨凌:西北农林科技大学出版社,2016.
- [13] 李佳林,姜升林,李云霞,等.禾本科草本植物根状茎发育调控机理研究进展[J].草业学报,2022,31(8):211-220.
- [14] 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.
- [15] 杨苑君.华北典型乔木根系抗拉及土壤抗剪性能研究[D].北京:北京林业大学,2016.
- [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.
- [17] 严小龙.根系生物学原理与应用[M].北京:科学出版社,2007.
- [18] 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.
- [19] 李慧强.都江堰市蒲虹路边坡草本植物根系分布及抗拉特性研究[D].雅安:四川农业大学,2015.
- [20] 吕春娟.乔木根系抗拉力学特性及其与化学成分关系[D].北京:北京林业大学,2013.