

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.026.

袁亚楠, 李诗文, 胡晶华, 等. 紫穗槐根—土界面拉拔摩阻特性[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 207-213.

Yuan Yanan, Li Shiwen, Hu Jinghua, et al. Characterization of the Interfacial Friction Resistance Between *Amorpha fruticosa* Root and Soil Under Pulling Forces[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 207-213.

## 紫穗槐根—土界面拉拔摩阻特性

袁亚楠<sup>1</sup>, 李诗文<sup>1</sup>, 胡晶华<sup>1</sup>, 肖巍<sup>2</sup>, 王博<sup>3</sup>, 郑欣如<sup>1</sup>, 刘静<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010019; 2.中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司, 乌鲁木齐 830000; 3.内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010019)

**摘要:** [目的]探究不同影响因素下紫穗槐根—土界面拉拔摩阻特性的变化规律, 为研究区栽培植物种的选择提供理论依据。[方法]通过室内拉拔试验研究有无须根、根径、拉拔速率对紫穗槐根—土复合体最大拉拔力、拉拔摩阻强度、根土界面摩擦系数的影响。[结果]紫穗槐直根带须根—土复合体和直根—土复合体拉拔过程中的拉拔力—时间曲线以及拉拔力—位移曲线基本一致, 但同径级紫穗槐直根带须根—土复合体的最大拉拔力、根土界面摩擦系数、拉拔摩阻强度较直根—土复合体均提高了1.3倍, 须根明显提高了根段的固土性能。随根径增大, 紫穗槐直根—土复合体的最大拉拔力、拉拔摩阻强度、根土界面摩擦系数呈指数正相关; 随拉拔速率增大, 紫穗槐直根—土复合体的根土界面摩擦系数、拉拔摩阻强度均呈增大趋势, 即  $500\text{ mm/min}(0.74, 40.11\text{ kPa}) > 10\text{ mm/min}(0.65, 35.58\text{ kPa})$ 。冗余分析表明根径、有无须根、拉拔速率与紫穗槐根—土界面拉拔摩阻特性指标均呈显著相关关系, 其中贡献率最高的是根径(55.4%), 其次是有无须根(23.7%), 第三是拉拔速率(20.9%)。[结论]紫穗槐具有较强的固土性能, 在承受大风拉拔、径流冲刷等荷载时能发挥其固土作用。

**关键词:** 根系; 根—土复合体; 拉拔试验; 摩阻特性

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0207-07

## Characterization of the Interfacial Friction Resistance Between *Amorpha fruticosa* Root and Soil Under Pulling Forces

Yuan Yanan<sup>1</sup>, Li Shiwen<sup>1</sup>, Hu Jinghua<sup>1</sup>, Xiao Wei<sup>2</sup>, Wang Bo<sup>3</sup>, Zheng Xinru<sup>1</sup>, Liu Jing<sup>1</sup>

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China; 2.Zhongkan Metallurgical Geotechnical Investigation Design and Research Institute Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 3.College of Geography Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010010, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the variation of pullout friction characteristics of root-soil interface of *Amorpha fruticosa* under different influencing factors, and to provide a theoretical basis for the selection of cultivated plant species in the study area. [Methods] The influence of fibrous roots, root diameter, and pulling rate on the maximum pulling force and friction resistance of *A. fruticosa* root-soil composite, as well as the friction coefficient in the *A. fruticosa* root-soil interface were investigated through indoor tensile testing. [Results] The curve between pulling force and time, pulling force and displacement of root-soil composite with or without fibrous root were basically the same. However, the maximum pulling force, root-soil friction coefficient, and friction resistance of the fibrous root-soil composite were 1.3 times higher than tap root-soil composite in the same root diameter. In tap root-soil composite, the root diameter was exponentially correlated with the maximum pulling force, pulling friction coefficient, and root-soil friction resistance.

收稿日期: 2022-10-31

修回日期: 2022-11-27

资助项目: 内蒙古科技计划项目“呼包鄂榆生态功能区发挥根系持续固土力学特性的精准植被建设技术研究”(201802107)

第一作者: 袁亚楠(2002—), 女, 山西省朔州市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: yuanyanan121@163.com

通信作者: 刘静(1958—), 女, 湖北省钟祥市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: ljing58@126.com

http://stbcj.paperonice.org

tion coefficient. With the increase of pulling rate, root-soil friction coefficient, and pulling friction coefficient showed an increasing trend in which values under the pulling rate of 500 mm/min (14.06 N, 0.74, 40.11 kPa) was larger than 10 mm/min (12.04 N, 0.65, 35.58 kPa). The redundancy analysis showed that root diameter, presence or absence of fibrous roots, and pulling rate were significantly correlated with the interfacial root-soil friction. Contribution rates from root diameter, fibrous roots, and pulling rate were 55.4%, 23.7%, and 20.9%, respectively. [Conclusion] *A. fruticosa* showed strong soil conservation capacity and will play its role when subjected to the pulling force loads from high wind and runoff.

**Keywords:** root; root-soil composite; pulling force test; friction resistance characteristics

根系不断分支深入地下与土壤紧密接触,起到固持土体、改善土壤结构与支撑树体的重要作用<sup>[1-2]</sup>。当植物受到外营力作用(如风力、水力作用)或土体发生变形时,根系可将土体受到的一部分剪应力转化成自身的拉应力从而稳固土体<sup>[3]</sup>,根系与土体的相对位移产生摩阻力,而摩阻力会改变根—土复合体的应力应变状态,对土体稳定产生有利的影响<sup>[4]</sup>。研究根系与土壤直接接触的根土界面可以直观地模拟根系的固土性能,单根拉拔试验能够模拟土体发生滑动或塌陷时,根系从土体中被完全拔出的过程<sup>[5]</sup>。因此,根土界面拉拔摩阻特性的研究对于探究植物根系固土机制尤为必要,并且对于植物固土护坡具有理论指导意义和实际应用价值。

目前国内外学者已经对多种植物的根土界面拉拔摩阻特性进行研究,主要探究根系特征和不同土壤的土工性质对植物根土界面拉拔摩阻特性的影响。北沙柳(*Salix psammophila*)、薄叶山矾(*Symplocos anomala*)、香根草(*Vetiveria zizanioides*)等植物根系的拉拔力与根径、根长、根土间接触面积均呈正相关关系<sup>[6-9]</sup>;根系表面粗糙程度、根系埋深、土壤干密度均会影响根系抗拔,根系表面越粗糙,最大拉拔力越大<sup>[10-11]</sup>,根系埋深越大,最大拉拔力越大<sup>[12-13]</sup>,同时土壤干密度增大,最大拉拔力也增大<sup>[14-15]</sup>。此外,根系被拔出的速率也影响着根土界面拉拔摩阻特性<sup>[16]</sup>,但关于根—土复合体中根系拉拔速率对拉拔摩阻特性影响的报道较少,且不同植物种间差异较大。紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)是一种典型的深根性树种,根系广、侧根多,耐盐碱、耐干旱、抗风沙、且对土壤要求不高,是保持水土的优良植物材料<sup>[17]</sup>。目前针对紫穗槐根系拉拔摩阻特性的研究较少,且综合分析各影响因素对固土特性的贡献率少有研究。本文对我国广泛分布的常见造林绿化种紫穗槐根系及其固体机制开展研究,通过室内拉拔试验,探讨有无须根、根径、拉拔速率(根系被拔出的快慢)对紫穗槐根土界面拉拔摩阻特性的影响,研究结果将为完善植物根系固土机制提供理论支持,并为研究区

栽培植物种的选择提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与制备

1.1.1 根系采集 取样地位于陕西省神木市大柳塔镇,于2021年8月下旬在试验区内挖取试验所需紫穗槐根系,根系保存于恒温冷藏柜中(温度:4℃,湿度70%),并在一周内完成试验。

1.1.2 土样采集 按照土工试验规范在试验地开挖剖面取土,取回的土壤一部分作为试验用土,另一部分用于土壤基本理化性质的测定,包括用烘干法测算土壤含水率,用环刀法测算土壤干密度。测得土壤干密度为1.67 g/cm<sup>3</sup>,原状土含水率为4.68%。土样的粒径成分使用 Mastersizer 3000 激光粒度分析仪测试,根据《土的工程分类标准》GB/T50145-2007 将试验土样命名为粉土质砂(SM)。

1.1.3 样品制备 重塑土的制备:结合原状土的物理性质和紫穗槐生境状况,将重塑土的含水率设为4.68%。将风干后的原状土过2 mm筛后备用,本试验中每1 kg风干土需要43.6 g水,将原状土平铺于不透水的托盘上,水装入喷壶中均匀喷洒至土样上,其间不断搅拌,直至均匀混合后将制备好的土壤装入密封罐中遮光静置24 h后使用,使重塑土的性质更接近于原状土。

直根试验根段制备:从采集的紫穗槐根系中选取根径均匀、表皮完整的直根段进行试验,试验根总长8 cm,距离根端2 cm处为夹口端,如图1(左)所示。测量A、O、B三处根径并取平均值作为该根段根径。根径范围为1~5 mm,分为1~1.5 mm,1.5~2 mm,2~2.5 mm,2.5~3 mm,3~3.5 mm,3.5~4 mm,4~4.5 mm,4.5~5 mm 8个径级组,每个径级组均做15个重复。

直根带须根试验根段制备:从采集的紫穗槐根系中选取直根上有侧生根径较细须根的直根段,本试验中称为带须根根段,如图1(右)所示。试验根总长8 cm,距离根端2 cm处为夹口端,根径测量方法同直根段。为减小误差,试验过程中,先用带须根根段进行第一次试验,

然后对剪掉须根后得到的直根段进行第二次试验。该方法已证明可行,故不再赘述<sup>[18]</sup>。本研究选取 1.5~2 mm 径级范围内的试验根段,做 20 个重复。

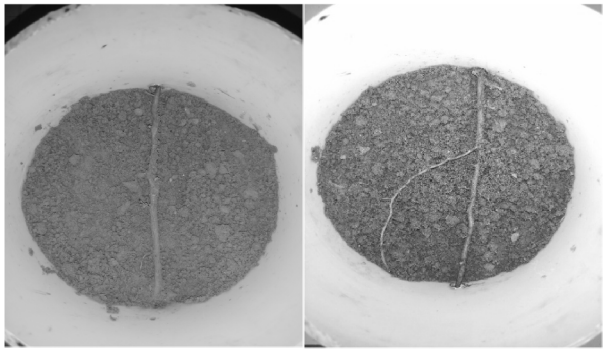


图 1 试验根段示意图

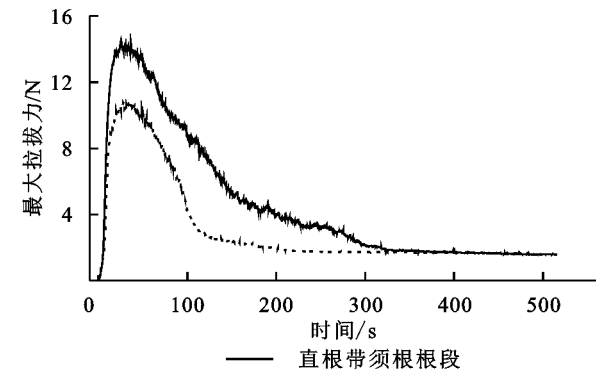
Fig. 1 Diagram of test root segment

根—土复合体的制备:称量配置好的重塑土放入管中部对称开小孔的 PVC 管中(使管内土的干密度为 1.67 g/cm<sup>3</sup>),先封紧一侧管口,往管里添加重塑土,在土到达圆孔时将试验根段穿过圆孔,上部露出夹持段,继续填土直至将称量好的土全部加完,再封紧另一侧管口。将制备好的试样固定于自制夹具备用。

1.2 试验仪器及方法

选用 TY 8000 伺服强力机,设置好加载速度,固定制备好根—土复合体的 PVC 管,并将露出来的根段用夹具夹住向上拉拔,直至试验根从土中完全拔出,并记录最大拉拔力—位移曲线以及最大拉拔力—时间曲线。

为探究拉拔速率(根段被拔出的快慢)对紫穗槐根土界面拉拔特性的影响,分别设定拉拔速率为 10 mm/min,500 mm/min,其中拉拔速率为 10 mm/min 时模拟根—土复合体在斜坡作用下的缓慢变形,拉拔速率为 500 mm/min 时模拟大风对枝叶的拉拔作用,力逐级传递到根—土复合体的根上发生的瞬间变形。



1.3 根土界面拉拔摩阻强度及摩擦系数推算  
拉拔摩阻强度计算:

$$\tau \pi d l - F = 0 \tag{1}$$

式中: $\tau$  为根土界面拉拔剪应力(kPa); $d$  为根段的平均直径(mm); $F$  为根被拔出时的最大拉力(N); $l$  为根系在土中的长度(mm)。

摩擦系数计算<sup>[19]</sup>

$$F = \frac{1}{2} \mu \pi D \rho_d (1 + \omega) L^2 \tag{2}$$

式中: $D$  为根段的平均直径(mm); $\rho_d$  为试验土的干密度(g/cm<sup>3</sup>); $\omega$  为试验土的含水率(%); $L$  为试验根段在土壤中的长度(mm)。

1.4 数据统计分析

数据处理及统计采用 Excel 2019 和 SPSS Statistics 25 软件,采用 Origin 2018 进行制图。使用最小显著极差法(LSD)、配对样本 T 检验法进行差异性检验。

2 结果与分析

2.1 有无须根条件下紫穗槐根土界面拉拔特性

由图 2 可知,直根带须根根段和直根段拉拔过程中的拉拔力—时间曲线的变化特征、直根带须根根段和直根段的拉拔力—位移曲线的变化特征基本一致,当外力作用于根段时,根段拉拔过程分为急剧上升、陡峭下降和平稳拔出 3 个阶段。由于紫穗槐 1.5~2 mm 径级范围内直根段有较高的轴向弹性模量(591.32 MPa)<sup>[20]</sup>,在外力作用下根段的弹性缓解拉力,根段在土中的位移不大,而随着外力加载,根段的弹性变形全部释放,根土界面摩阻特性充分发挥达到最大拉拔力,即急剧上升段。继续加载,随着根被拔出,根与土壤的接触面积不断减小,随着位移的增大,摩擦力急剧减小,即陡峭下降段。随着根土界面被完全破坏,根土间的摩擦力几乎为零,根段被完全拔出,即平稳拔出段。

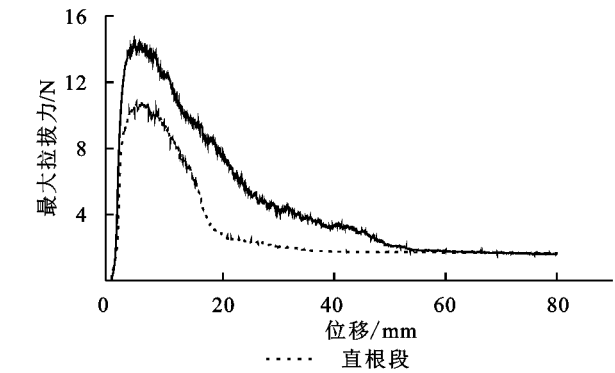


图 2 有无须根条件下紫穗槐根土界面拉拔特性

Fig. 2 Pulling characteristics of fibrous roots on *Amorpha fruticosa* root-soil interface

从表 1 可以看出,紫穗槐直根带须根—土复合体的最大拉拔力、拉拔摩阻强度、根土界面摩擦系数较

直根—土复合体均提高了 1.3 倍。直根带须根—土复合体的最大拉拔力、拉拔摩阻强度、根土界面摩擦



系数较直根—土复合体均有显著提高。

表 1 1.5~2 mm 两种根段的拉拔强度特性指标

Table 1 Characteristic indexes of drawing strength of 1.5~2 mm root segments

根段类型	最大 拉拔力/N	拉拔摩阻 强度/kPa	根土界面 摩擦系数
直根带须根根段	17.12±2.32a	51.18±5.91a	0.96±0.08a
直根段	13.65±2.33b	39.62±4.84b	0.76±0.09b

注：同列不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

## 2.2 不同根径条件下紫穗槐根土界面拉拔特性

由图 3 可见根径对最大拉拔力有较大影响,随根径增大直根—土复合体最大拉拔力呈指数函数增加,相关系数为 0.95。在 1~5 mm 径级范围内直根—土复合体的最大拉拔力由 7.28 N 增加至 45.29 N,根径在 4.5~5 mm 范围内直根—土复合体的最大拉拔力约为 1~1.5 mm 范围内根段的 6 倍。

从表 2 可以看出,1~5 mm 径级范围内直根—土复合体拉拔摩阻强度与根径呈指数函数正相关,拉拔摩阻强度由 30.09 kPa 增加至 52.68 kPa,其中 1~4 mm 范围内 6 个径级组直根—土复合体的拉拔摩阻强度之间无显著性差异,4~5 mm 范围内两个径级组直根—土复合体的拉拔摩阻强度之间也无显著性差异,但 4~5 mm 范围内两个径级组直根—土复合体的拉拔摩阻强度与其他径级组均有显著性差异。紫穗槐根土界面摩擦系数随根径的变化趋势与最大拉拔力随根径的变化趋势相似,呈指数正相关,由 0.53 增至 0.91,增幅为 71.7%。其中根径在 1~3.5 mm 的 5 个径级组之间紫穗槐根土界面摩擦系数均无显著性差异,4~4.5 mm,4.5~5 mm 两个径级组紫穗槐根土界面摩擦系数与其他径级组均表现为显著性差异。

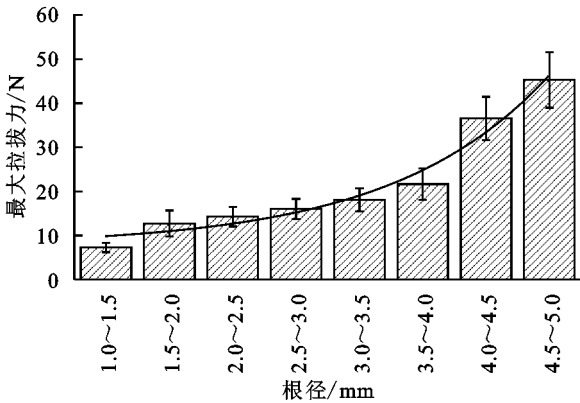


图 3 不同根径条件下最大拉拔力变化

Fig. 3 Effect of root diameter on maximum drawing force

## 2.3 不同拉拔速率条件下紫穗槐根土界面拉拔特性

由表 3 可知,随拉拔速率增大,紫穗槐直根—土复合体的根土界面摩擦系数、拉拔摩阻强度呈增大趋

势,拉拔速率为 500 mm/min 时紫穗槐直根—土复合体的拉拔摩阻强度、根土界面摩擦系数较拉拔速率为 10 mm/min 时差异性不显著。拉拔速率为 500 mm/min 时紫穗槐直根—土复合体的根土界面摩擦系数、拉拔摩阻强度较拉拔速率为 10 mm/min 时分别提高了 12.73%,13.85%,拉拔速率为 500 mm/min 时根系全段激活时间远远短于拉拔速率为 10 mm/min。

表 2 根径对拉拔摩阻强度和摩擦系数的影响

Table 2 Effect of root diameter on drawing friction strength and friction coefficient

径级/mm	拉拔摩阻 强度/kPa	根土界面 摩擦系数
1~1.5	30.09±3.73b	0.53±0.06c
1.5~2	35.27±6.11b	0.57±0.04bc
2~2.5	33.76±6.20b	0.59±0.06bc
2.5~3	31.04±4.15b	0.61±0.06bc
3~3.5	30.85±3.20b	0.63±0.04bc
3.5~4	34.00±1.75b	0.65±0.03b
4~4.5	50.03±2.45a	0.85±0.15a
4.5~5	52.68±0.85a	0.91±0.15a

注：同列不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

表 3 不同拉拔速率下根段的拉拔强度特性指标

Table 3 Drawing strength characteristic index of root section under different drawing rates

拉拔速率	拉拔摩阻 强度/kPa	根土界面 摩擦系数	根系全段 激活时间/s
10 mm/min	35.58±5.07a	0.65±0.11a	36.52±6.79b
500 mm/min	40.11±6.59a	0.74±0.14a	1.27±0.20a

注：同列不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

## 2.4 各影响因素对紫穗槐根段拉拔摩阻特性的贡献

为进一步分析比较根径、有无须根、拉拔速率对紫穗槐根段拉拔摩阻特性各项指标的影响,以根径、拉拔速率和有无须根为解释变量,以根土界面摩擦系数、摩阻强度和最大拉拔力为响应变量进行冗余分析(图 4)。第一排序轴特征值为 78.29%,第二排序轴特征值为 21.71%,两轴完全解释了各变量与根土界面摩擦特性之间的关系,冗余分析更直观全面地反映出不同影响因素对紫穗槐根段拉拔摩阻特性各项指标的影响及影响强度,即各影响因素中贡献率最高的是根径(55.4%),其次是有无须根(23.7%),第三是拉拔速率(20.9%),三者与紫穗槐根段拉拔摩阻特性指标均呈极显著相关关系( $p<0.01$ )。

## 3 讨论

紫穗槐根系最大拉拔力随根径增大呈指数函数增加,这与油松(*Pinus tabulaeformis*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、榆树(*Ulmus pumila*)、白桦

(*Betula platyphylla*)、雪松(*Cedrus deodara*)根系最大拉拔力随根径变化的规律相似<sup>[21-24]</sup>。根径增大,使根—土接触面积变大,根—土间摩擦力发挥得更充分,导致最大拉拔力增大。即随着植物根系生长,根径逐渐增粗,根系抗拔能力提高。紫穗槐根系多生须根<sup>[25]</sup>,分析紫穗槐带须根根段和直根段的应力应变曲线发现,带须根根段和直根段拉拔过程中的变化曲线基本一致,当外力作用于根段时,根段拉拔过程分为急剧上升、陡峭下降和平稳拔出 3 个阶段,在上升段带须根根段和直根段几乎重合,带须根根段的最大拉拔力大于直根段,小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、冬瓜杨(*Populus purdomii*)、峨眉冷杉(*Abies fabri*)根系均表现出相同规律,即带须根根段的最大拉拔力大于直根段<sup>[26-27]</sup>。

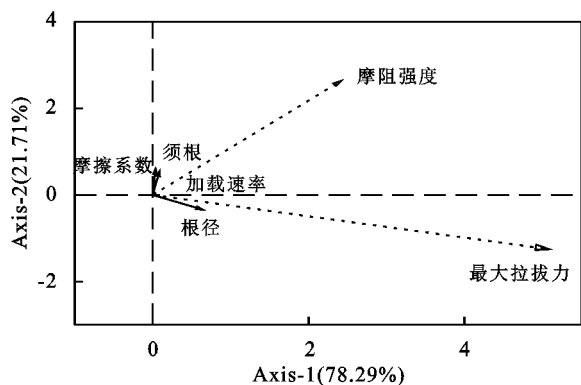


图 4 拉拔摩阻强度各项指标与各影响因素的综合分析

Fig. 4 Synthetic analysis of various indexes and influencing factors of drawing friction strength

根系全段激活时间(即达到最大拉拔力对应的时间<sup>[28]</sup>)表征根段在表面摩阻特性影响下抵抗拉拔位移的能力,试验表明根径为 1.55 mm 时,带须根根段根系全段激活时间 30.4 s,而同径级直根段根系全段激活时间在 27.8 s,根径为 2.21 mm 时,带须根根段根系全段激活时间 49.4 s,而同径级直根段根系全段激活时间在 38.8 s。这是由于带须根根段与直根段相比与土壤的接触面积更大,使得根土间摩擦力增加,根系全段激活时间延后,并且当根受到外力时,须根的侧向牵引作用分担了部分外力,即带须根根段可发挥较强的摩阻特性来控制土体变形<sup>[26]</sup>,须根有效提高了根系的固土特性。拉拔速率为 500 mm/min 时紫穗槐直根—土复合体中根段的最大拉拔力、根土界面摩擦系数和拉拔摩阻强度较拉拔速率为 10 mm/min 时均有提高,这是由于当根系承受拉拔的速度低时,根土界面摩阻特性需要经过一段时间(36.52 s)才能充分激活。当拉拔速率为 500 mm/min 时,在瞬时拉力的作用下,根—土复合体结构瞬间(1.27 s)被破坏,根土间摩擦阻力立即达到峰值,来抵抗根土间产

生的相对位移。但现有报道表明中国沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和小叶锦鸡儿根系的最大拉拔力均随拉拔速率的增大呈现先增大后减小的变化趋势<sup>[29]</sup>,柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、黑沙蒿根系的最大拉拔力均随拉拔速率的增大呈现先减小后增大的变化趋势<sup>[30-31]</sup>,油松根系的最大拉拔力随拉拔速率的增加而减小<sup>[32]</sup>。综上,最大拉拔力对拉拔速率的响应是因植物而异的,有待深入研究。

根系极限抗拉力是根系在拉断前承受的最大拉力,反映根系抵抗拉伸破坏的能力;根系最大拉拔力是根系从特定土壤以及特定根—土复合体中完整拔出所承受的最大拉力,反映根系与土壤之间的摩擦力<sup>[33-34]</sup>。本课题组对轴向荷载下紫穗槐直根段的极限力及极限强度进行测定<sup>[20]</sup>,结果表明紫穗槐 1~5 mm 径级范围内直根段极限抗拉力由 46.35 N 增加至 215.85 N,极限抗拉力与根径呈幂函数正相关;紫穗槐 1~5 mm 径级范围内直根段抗拉强度由 42.71 MPa 减小至 10.18 MPa,与根径呈幂函数负相关。在本研究中紫穗槐 1~5 mm 径级范围内直根—土复合体的最大拉拔力由 7.28 N 增加至 45.29 N,紫穗槐 1~5 mm 径级范围内直根—土复合体的拉拔摩阻强度由 30.09 kPa 增大至 52.68 kPa,与根径呈指数函数正相关。对比紫穗槐根系的极限抗拉力和最大拉拔力发现根系极限抗拉力远远大于最大拉拔力。郭翬对比四川山矾(*Symplocos setchuensis*)的极限抗拉力和最大拉拔力发现,在根径<2 mm 时四川山矾的极限抗拉力略小于最大拉拔力,而根径>2 mm 时表现为极限抗拉力远远大于最大拉拔力,四川山矾的较细根(根径<2 mm)在拔出前已经被拔断<sup>[33]</sup>。而紫穗槐的弹性模量较大,韧性较强,同时在本试验原状土(粉土质砂)紫穗槐直根—土复合体拉拔试验中,并未发生根段断裂情况,说明生长于粉土质砂土壤环境中的紫穗槐根段具有良好的抗拉断特性,其根—土复合体承受外力后,一般不会因根系拉断而解体。并且紫穗槐根系中较细根的抗拉强度大,因此能承受更多应力,大量较细根系在土里纵横交错使得根—土复合体的强度增大;较粗根的拉拔摩阻强度大,锚固作用显著,可有效的抵抗土体位移,保持根—土复合体的稳定。

## 4 结论

(1) 须根明显提高了根段的固土性能,同径级紫穗槐直根带须根—土复合体的最大拉拔力、根土界面摩擦系数、拉拔摩阻强度较直根—土复合体均提高了 1.3 倍;

(2) 在 1~5 mm 径级范围内,随根径增大,紫穗槐直根—土复合体的最大拉拔力、根土界面摩擦系

数、拉拔摩阻强度均呈指数正相关,其中4~4.5 mm径级范围内直根—土复合体的最大拉拔力、根土界面摩擦系数和拉拔摩阻强度较1~1.5 mm径级范围内分别提高了522.12%,71.7%和75.07%;

(3) 根系拉拔速率由10 mm/min增大至500 mm/min,紫穗槐直根—土复合体的根土界面摩擦系数、拉拔摩阻强度均呈增大趋势,即根系在遭到大风拉拔等大而瞬时的作用时也能发挥较好的固土特性。

(4) 冗余分析结果表明:根径对紫穗槐根—土复合体拉拔摩阻强度贡献较高(55.4%),其次是须根(23.7%),最后是拉拔速率(20.9%)。

#### 参考文献:

- [1] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍.树木根系固土力学机制研究综述[J].浙江林学院学报,2008,25(3):376-381.  
Song W F, Chen L H, Liu X P. Root reinforcement of soil: a review[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2008, 25(3): 376-381.
- [2] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150 (2015): 666-678.
- [3] 陈丽华,余新晓,宋维峰,等.林木根系固土力学机制[M].北京:科学出版社,2008.  
Chen L H, Yu X X, Song W F, et al. Mechanical mechanism of soil consolidation of forest root system [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [4] 曹云生,陈丽华,刘小光,等.植物根土界面摩擦力的影响因素研究[J].摩擦学学报,2014,34(5):482-488.  
Cao Y S, Chen L H, Liu X G, et al. The influence factors of plant root-soil interface friction[J]. Tribology, 2014, 34(5): 482-488.
- [5] 刘福全,刘静,璠珉,等.植物枝叶与根系耦合固土抗蚀的差异性[J].应用生态学报,2015,26(2):411-418.  
Liu F Q, Liu J, Nao M, et al. Species-associated differences in foliage-root coupling soil-reinforcement and anti-erosion[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2): 411-418.
- [6] Fan C, Lu J Z, Chen H H. The pullout resistance of plant roots in the field at different soil water conditions and root geometries[J]. Catena, 2021, 207(4): 105593.
- [7] 张文豪,王桂尧,胡圣辉,等.薄叶山矾根系抗拔力的室内试验研究[J].中国水土保持科学,2020,18(3):22-30.  
Zhang W H, Wang G Y, Hu S H, et al. Indoor experimental study on the pull-out force of *Symplocos anoma-laBrand* root[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(3): 22-30.
- [8] Yang Q, Zhang C, Liu P, et al. The role of root morphology and pulling direction in pullout resistance of *Alfalfa* roots[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12 (2021): 212-219.
- [9] 夏振尧,张伦,陈毅,等.香根草根系与土壤接触特性及抗拔模型研究[J].水生态学杂志,2016,37(4):36-41.  
Xia Z Y, Zhang L, Chen Y, et al. *Vetiver* Root-soil Contact Characteristics and Pull-out Model[J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(4): 36-41.
- [10] 刘亚斌,胡夏嵩,余冬梅,等.西宁盆地黄土区2种灌木植物根—土界面微观结构特征及摩擦特性试验[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1270-1280.  
Liu Y B, Hu X S, Yu D M, et al. Microstructural features and friction characteristics of the interface of shrubroots and soil in loess area of Xining Basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1270-1280.
- [11] 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.  
Liu Y B, Yu D M, Qi Z X, et al. Research on pul-out test and surface microstructure features of shrubs roots in loess area of cold and arid environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (S1): 3701-3713.
- [12] 傅胤榕,仇文岗.土体含水率与根系埋深对银杏树苗抗拉拔性能的影响[J].土木与环境工程学报,2019,41(5):42-48.  
Fu Y R, Zhang W G. Effects of soil moisture content and root depth on anti-overturning performance of *Ginkgo biloba* seedlings[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(5): 42-48.
- [13] Zegeye A D, Langendoen E J, Tilahun S A, et al. Root reinforcement to soils provided by common Ethiopian highland plants for gully erosion control[J]. Ecohydrology, 2018, 11(6): e1940.
- [14] 夏振尧,刘琦,许文年,等.多花木蓝根系与土体界面摩擦阻特征[J].水土保持学报,2018,32(1):128-134.  
Xia Z Y, Liu Q, Xu W N, et al. Characteristics of interface friction between *Indigofera amblyantha* root system and soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 128-134.
- [15] Schwarz M, Cohen D, Or D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115(F4): F04035.
- [16] 刘小光,冀晓东,赵红华,等.油松根系与土壤摩擦性能研究[J].北京林业大学学报,2012,34(6):63-67.  
Liu X G, Ji X D, Zhao H H, et al. Tribological properties between roots of *Pinus tabulaeformis* and soil[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(6): 63-67.
- [17] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京:科学出版社,1993.



- Editorial Committee of Chinese Flora of China Academy of Sciences. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [18] 洪德伟. 晋西黄土区油松根系与土壤的摩擦力学特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Hong D W. Study on friction characteristics between roots of *Pinus Tabuliformis* and soil of the Loess Plateau of western Shanxi province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [19] 解明曙. 林木根系固坡土力学机制研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 7-14, 50.
- Xie M S. Study on the soil mechanics mechanism of slope consolidation by forest root system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(3): 7-14, 50.
- [20] 白璐翼, 刘静, 胡晶华, 等. 紫穗槐直根力学性质研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1111-1119.
- Bai L Y, Liu J, Hu J H, et al. Deformation characteristics of the straight roots of *Amorpha fruticosa* [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1111-1119.
- [21] Su L J, Hu B L, Xie Q J, et al. Experimental and theoretical study of mechanical properties of root-soil interface for slope protection[J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(11): 2784-2795.
- [22] 郑力文, 刘小光, 涂志华, 等. 油松群根与土壤界面摩擦特性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 84-87.
- Zheng L W, Liu X G, Yu Z H, et al. Friction characteristics between roots of *Pinus tabuliformis* and soil interface[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 84-87.
- [23] 赵东晖, 冀晓东, 张晓, 等. 冀西北地区白桦根系—土壤界面摩擦性能[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 124-131.
- Zhao D H, Ji X D, Zhang X, et al. Friction performance of root-soil interface of *Betula platyphylla* in Northwestern Hebei Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 124-131.
- [24] 张强, 刘静, 李强, 等. 黑沙蒿与粉土质砂根土及土—土界面摩阻特性[J]. 西北农业学报, 2019, 28(3): 489-496.
- Zhang Q, Liu J, Li Q, et al. Friction characteristics of root-soil and soil-soil interface of *Artemisia ordosica* and silty sand[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2019, 28(3): 489-496.
- [25] 嵇晓雷, 夏光辉, 张海亚. 紫穗槐根系形态与固土护坡效应研究[J]. 湖北林业科技, 2016, 45(1): 16-19.
- Ji X L, Xia G H, Zhang H Y. Effects of *Amorpha fruticosa* root system on slope soil and water conservation [J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2016, 45(1): 16-19.
- [26] 袁亚楠, 刘静, 李诗文, 等. 小叶锦鸡儿根土界面摩阻特性及复合体抗剪强度研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 173-179.
- Yuan Y N, Liu J, Li S W, et al. Root-soil interface friction characteristics and shear strength of the composite in *Caragana korshinskii* [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(7): 173-179.
- [27] 朱清科, 陈丽华, 张东升, 等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 64-67.
- Zhu Q K, Chen L H, Zhang D S, et al. Mechanisms of soil-reinforcement by roots in forest ecological systems in Gongga Mountain [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(4): 64-67.
- [28] 王桂尧, 胡圣辉, 张永杰, 等. 小乔木根系根土间作用力的室外拉拔试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 64-69.
- Wang G Y, Hu S H, Zhang Y J, et al. An outdoor drawing test study of the root soil interaction force for a small tree root system [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 64-69.
- [29] 那顺. 北沙柳等4种植物根—土界面拉拔摩阻特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- Na S. The Study on the friction drag characteristics of Root-soil interface of Four plants Including *Salix psammophila* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [30] 张强. 黑沙蒿根—土复合体土工特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- Zhang Q. The Studies on geotechnical characteristics of *artemisia ordosica* root-soil complex[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [31] 邢会文, 刘静, 王林和, 等. 柠条、沙柳根与土及土—土界面摩擦特性[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 87-91.
- Xing H W, Liu J, Wang L H, et al. Friction characteristics of soil-soil interface and root-soil interface of *caragana intermedia* and *salix psammophila* [J]. Tribology, 2010, 30(1): 87-91.
- [32] Ji X D, Cong X, Dai X Q, et al. Studying the mechanical properties of the soil-root interface using the pull-out test method [J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(4): 882-893.
- [33] 郭翬, 王云琦, 王青兰, 等. 根系逐渐破坏过程中固土效果研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(6): 85-92.
- Guo H, Wang Y Q, Wang Q L, et al. Change of soil fixation effects in the process of gradual damage [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(6): 85-92.
- [34] Ettbeb A E, Rahman Z A, Razi Idris W M, et al. Root tensile resistance of selected *Pennisetum* species and shear strength of root-permeated soil [J]. Applied and Environmental Soil Science, 2020, 2020(1): 3484718.