

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.022; CSTR:;32311.14.rswc.2026.01.022.

汝海丽, 孙贯芳, 王安民, 等. 5种水土保持植物单根力学特性及根土抗剪性差异[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):392-399.

Ru Haili, Sun Guanfang, Wang Anmin, et al. Mechanical characteristics of single roots and differences in root-soil shear strength of five soil and water conservation plants[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):392-399.

## 5种水土保持植物单根力学特性及根土抗剪性差异

汝海丽<sup>1</sup>, 孙贯芳<sup>2</sup>, 王安民<sup>1</sup>, 豆巧莉<sup>1</sup>, 靳雪琴<sup>1</sup>, 焦峰<sup>2</sup>

(1. 平凉市水土保持科学研究所, 甘肃 平凉 744000; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 探究不同植物单根抗拉力学特性及其根-土复合体抗剪强度差异, 为优化黄土高原沟壑区水土保持植物配置提供参考。 [方法] 以巨菌草等5种水土保持植物为对象, 运用WinRHIZO Pro 2019根系分析系统进行三维根系构型参数测定, 通过HLD-500电子推拉力计实施单根拉伸试验, 结合ZJ-2等应变直剪仪开展分层土壤抗剪强度测试, 开展单根抗拉力学特性与根-土复合体抗剪特性的对比研究。 [结果] (1) 根系垂直分布特征显示: 巨菌草有效根系集中分布于0—40 cm土层, 其中0—10 cm层根长密度达1.79 cm/cm<sup>3</sup>, 显著高于下层40.3%~72.8%。五物种根系参数随土层深度呈指数衰减( $R^2=0.87\sim 0.93$ ), 表层优势种排序为高丹草(根长密度2.41 cm/cm<sup>3</sup>)>甜高粱(2.04 cm/cm<sup>3</sup>)>红象草(1.89 cm/cm<sup>3</sup>)>巨菌草(1.79 cm/cm<sup>3</sup>)>玉米(1.31 cm/cm<sup>3</sup>)。 (2) 单根抗拉力学分析表明: 高丹草与甜高粱因粗根占比(>2 mm达85%), 表现出最大极限拉力(120 N±10 N), 而巨菌草和红象草细根(<2 mm占95%)则呈现最优抗拉强度(38.6±4.2 MPa), 抗拉强度与根径呈显著负相关( $p<0.01$ )。 (3) 根-土复合体抗剪增强效应: 巨菌草根-土体系抗剪强度较裸土提升20.4%~33.0%, 在400 kPa轴向荷载下, 其0—10 cm层抗剪强度达高丹草体系的1.15倍、玉米体系的1.60倍, 剪切曲线符合Mohr-Coulomb强度准则(黏聚力提升41.7%)。 [结论] 5种草本中巨菌草、红象草、高丹草、甜高粱、青贮玉米5种植物根系都是增强土体抗拉抗剪能力的水土保持优良植物, 巨菌草通过细根网络的高抗拉强度(7.90~41.30 MPa)与密集表层根系分布(RAD=0.0009)的协同作用, 形成最优根-土力学加固体系。

**关键词:** 水土保持; 水土保持植物; 根系拉力; 土壤抗剪强度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0392-08

## Mechanical characteristics of single roots and differences in root-soil shear strength of five soil and water conservation plants

Ru Haili<sup>1</sup>, Sun Guanfang<sup>2</sup>, Wang Anmin<sup>1</sup>, Dou Qiaoli<sup>1</sup>, Jin Xueqin<sup>1</sup>, Jiao Feng<sup>2</sup>

(1. Pingliang Institute of Soil and Water Conservation, Pingliang, Gansu 744000, China;

2. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The study explores the tensile mechanical properties of single roots and the differences in shear strength of root-soil composites among different plants to provide references for optimizing the configuration of soil and water conservation plants in the gully region of the Loess Plateau. [Methods] Five soil and water conservation plants, including *Pennisetum giganteum*, were selected as research objects. The WinRHIZO Pro 2019 root analysis system was used to measure the three-dimensional root architecture parameters. Single-root tensile tests were carried out using the HLD-500 electronic push-pull dynamometer, while layered soil shear strength was evaluated using a ZJ-2 in-situ direct shear apparatus. Comparative analyses were performed between single-root tensile mechanical properties and root-soil composite shear characteristics. [Results] (1) Root vertical distribution patterns showed that the effective roots of *P. giganteum* were predominantly concentrated in the 0—40 cm soil layer, with root length density in the 0—10 cm layer reaching 1.79 cm/cm<sup>3</sup>, which was significantly 40.3%~72.8%

收稿日期: 2025-03-10

修回日期: 2025-04-15

接受日期: 2025-04-20

资助项目: 平凉市重点研发计划—农业类项目(PL-STK-2023A-028); 中央高校基本科研业务费专项资金(2452021081); 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金(F2010121002-202320)

第一作者: 汝海丽(1988—), 女, 甘肃平凉人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持优质林草新品种引进示范推广。E-mail: 1175332809@qq.com

通信作者: 焦峰(1967—), 男, 陕西三原人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持效益评价研究。E-mail: Jiaof@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

higher than that in the deeper layers. The root parameters of the five species showed an exponential decay with increasing soil depth ( $R^2=0.87\sim 0.93$ ). The dominance hierarchy of surface-layer species was as follows: *Sorghum sudanense* (root length density  $2.41\text{ cm/cm}^3$ ) > *Sorghum bicolor* ( $2.04\text{ cm/cm}^3$ ) > *Pennisetum purpureum* ( $1.89\text{ cm/cm}^3$ ) > *P. giganteum* ( $1.79\text{ cm/cm}^3$ ) > *Zea mays* ( $1.31\text{ cm/cm}^3$ ). (2) Single-root tensile mechanical analysis revealed that *S. sudanense* and *S. bicolor* showed the maximum ultimate tensile force ( $120\text{ N}\pm 10\text{ N}$ ) due to the large proportion of thick roots ( $>2\text{ mm}$ , 85%), while *P. giganteum* and *P. purpureum* with thin roots ( $<2\text{ mm}$ , 95%) showed the best tensile strength ( $38.6\text{ MPa}\pm 4.2\text{ MPa}$ ). A significant negative correlation was observed between the tensile strength and the root diameter ( $p<0.01$ ). (3) Root-soil composite shear enhancement effect: the shear strength of the *P. giganteum* root-soil system increased by 20.4%~33.0% compared with that of the bare soil. Under the axial load of 400 kPa, its shear strength of the 0—10 cm layer was 1.15 times that of the *S. sudanense* system and 1.60 times that of the *Zea mays* system. The shear curve conformed to the Mohr-Coulomb strength criterion, with a 41.7% increase in cohesion. [Conclusion] Among the five herbaceous plants, *P. giganteum*, *P. purpureum*, *S. sudanense*, *S. bicolor*, *Zea mays* all have excellent root systems that enhance the tensile and shear resistance of soil, making them superior soil and water conservation plants. Through the synergistic effect of the high tensile strength (7.90~41.30 MPa) of its thin-root network and the dense distribution of surface roots ( $\text{RAD}=0.0009$ ), *P. giganteum* forms the optimal root-soil mechanical reinforcement system.

**Keywords:** soil and water conservation; soil and water conservation plants; root tensile force; soil shear strength

水土流失是全球性生态环境问题,严重威胁生态安全和可持续发展。在中国,水土流失面积约占地面积的30%,尤其在西南喀斯特地区、黄土高原及南方红壤丘陵区,水土流失问题尤为突出<sup>[1]</sup>。传统的工程措施(如挡土墙、梯田)虽能短期见效,但成本高且生态效益有限。因此,基于植物根系固土功能的生物措施逐渐成为水土流失治理的研究热点<sup>[1]</sup>。植物根系通过力学加固作用增强土体抗剪强度,是生物措施防治水土流失的核心机制之一<sup>[2]</sup>。不同水保植物根系在形态结构、力学特性及根-土相互作用上存在显著差异,直接影响其固土护坡效果。然而,目前针对典型水保植物单根力学特性及其与土壤协同抗剪增强效应的系统性对比研究仍较缺乏,制约了植物措施的精准配置与优化<sup>[3]</sup>。植物通过“加筋”和“锚固”等根系力学作用与土壤结合形成根-土复合体来提高边坡坡体稳定性。植物根系对土壤抗剪性的作用一直是土壤侵蚀机理研究的一个热点问题,研究多采用定位观测的方法,对不同植被条件下保持水土的效益进行评价与分析,但从土壤力学特性角度揭示植物根系与地表土壤团聚性、分离和侵蚀过程之间关系的研究尚不多<sup>[4]</sup>。近年来,植物根系被用于加固软弱土体,可有效提高土体的稳定性以及抗剪切能力,既绿色又环保。在材料力学方面,植物根系作为一种材料而言,具有较强的抗拉能力<sup>[5]</sup>;根系在土壤中生长形成的网络状根系系统交错、缠柔在土壤颗粒周边,提升土壤结构的稳定性,增加土壤颗粒间抵抗分离的能力,增强土壤抗冲性和抗崩解

性<sup>[6]</sup>。有试验表明,不同植物根系类型和生长阶段<sup>[7-8]</sup>,根系的单根抗拉力学特性有较大变化,因而对根系固土护坡的影响效果不尽相同。单根抗拉力学特性是植物发挥抗剪增强作用的重要环节,可作为评价植物固土护坡作用的重要依据。因此有必要对特定区域优质水保植物进行单根抗拉力学特性等方面的固土性能测定,以筛选区域优秀固土护坡植物。

近年来,国内外学者在根系力学领域取得了一定进展。例如,Gray等<sup>[9-10]</sup>提出了根系增强土体的纤维加筋理论;国内研究<sup>[11-12]</sup>多聚焦于乔木根系(如油松、刺槐)的抗拉特性。然而,现有研究存在以下局限。(1)研究对象单一:多集中于少数乔木或草本,缺乏多类型水保植物(如灌木、藤本)的对比分析;(2)力学机制不明:根系-土壤界面摩擦、根系变形与土体剪切破坏的协同机制尚不清晰;植物根系通过其力学作用增强土壤抗剪强度,是植被护坡的核心机制。这一过程主要依赖于根系的加筋效应和锚固效应,一方面,根系在土体中形成三维网络结构,通过摩擦力和机械互锁作用限制土体位移;另一方面,根系自身的抗拉特性能够抵抗外部剪切力,延缓坡面破坏。研究表明<sup>[13-15]</sup>,根系对土体抗剪强度的提升可达20%~50%。然而,不同植物由于根系形态、解剖结构及生长策略的差异,其固土效能存在显著不同。例如,深根型乔木(如马尾松)在深层土体中表现优异,而浅根型草本(如狗牙根)则更擅长表层抗蚀。因此,系统比较不同水保植物的根系力学特性及其与土壤的协同作用,对优化植被配置、提高水土保持

效率具有重要意义。

本研究选取5种典型水保植物,巨菌草(*Pennisetum giganteum*)、红象草(*Pennisetum purpureum*)、高丹草(*Sorghum sudanense*)、甜高粱(*Sorghum bicolor*)、青贮玉米(*Zea mays*),通过单根拉伸试验、根-土复合体直剪试验及微观结构分析,旨在揭示不同植物单根抗拉强度、弹性模量的种间差异及其与根系解剖结构的关系;量化根土复合体抗剪强度参数(黏聚力 $c$ 、内摩擦角 $\varphi$ )的提升效应;建立根系力学特性与抗剪增强效应的关联模型,为水土保持植物筛选提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验区概况

纸坊沟小流域位于甘肃省平凉市城南,属于泾河干流一级支沟,上游源于六盘山—太统山脉的虎狼山,地理坐标为东经 $106^{\circ}37'$ — $106^{\circ}42'$ 、北纬 $35^{\circ}26'$ — $35^{\circ}33'$ ,海拔为1400 m。流域总面积19.04 km<sup>2</sup>,相对高差739.80 m,主沟道长15.77 km,沟道平均坡降4.34%,是陇东黄土高原沟壑区的典型代表区。属半干旱大陆性季风气候区,多年平均气温8.8℃,≥10℃年均积温2935.1℃,多年平均日照时数2381 h,多年平均降水量548.7 mm,降水年内分布不均,主要集中在6—9月,多年平均蒸发量1499.2 mm,多年平均无霜期142 d,多年平均风速2 m/s。试验地布设在纸坊沟小流域出口坝地,随机布设试验小区15个。

### 1.2 试验材料

试验材料选取引种栽植的巨菌草、高丹草、红象草、甜高粱、青贮玉米5种优良草种,这5种草本植物具有耐旱、耐贫瘠等特性,且具有较好的水保特性和生态价值<sup>[16]</sup>。巨菌草与红象草种节从贵州引进,运输到平凉试验地以后种植前用清水浸泡24 h催芽,随切随泡,及时种植,以防过多养分流失;浸泡时添加少量生根粉可有效提高茎节的发芽率,增加分蘖数。若芽苞被苞叶包裹,可将苞叶剥去,利于种苗出土。平凉地区4月中下旬至5月上旬,日平均气温稳定在15℃以上即可种植巨菌草。试验地采用穴状种植,每穴3株,密度约40000株/hm<sup>2</sup>,覆土2~3 cm,株行距一般为60 cm×80 cm。高丹草、甜高粱、青贮玉米采用种子点播。

### 1.3 试验方法

1.3.1 根系特征测定 在直接剪切试验完成后,整理收集各试样根-土复合体中草本植物根系,洗净后烘干后采用Epson扫描仪进行灰度扫描(400 dpi),利用WinRHIZO分析软件进行分析,之后将所得根系烘干

称重。获得包括根长、总体积、平均直径以及干根重量等根系参数。进行根长密度(Root Length Density, RLD)、根重密度(Root Mass Density, RMD)以及根面积比(Root Area Root, RAR)的<sup>[17]</sup>计算,计算公式如下:

$$RLD = L/V \quad (1)$$

$$RMD = Mr/V \quad (2)$$

$$RAR = RLD \times RCSA \quad (3)$$

式中: $L$ 为总根长(cm); $Mr$ 为烘干根总质量(kg); $V$ 为环刀容积(m<sup>3</sup>); $RCSA$ 为平均单根横截面积(m<sup>2</sup>)。

1.3.2 根系抗拉强度测定 将原位挖掘出的植株移放至试样盆内编号,并及时带回实验室。先将根-土复合体用清水冲洗干净,选取顺直且表面完好的根系50个,截取长度为5~10 cm的根段,然后选取3个不同部位用游标卡尺测量其根径,取其平均值作为该根段的根径。用推拉力计(艾德堡HLD-500N)进行单根拉伸试验。在单根拉伸试验过程中,为避免根系在夹具中发生滑动,采用在夹具夹头两端粘贴胶片、缠绕和增加柔性物质的方法增大根系与夹具之间的摩擦力。选取断裂破坏发生在根系中部或接近中部的情况作为有效试验结果,若根系在两端发生断裂,则不计入有效数据。根据试验得到的单根最大抗拉力和实测得到的根径,可算出5种草本植物的单根抗拉强度,计算公式为:

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

式中: $P$ 为单根抗拉强度(MPa); $F$ 为单根最大抗拉力(N); $D$ 为根径(mm)。

1.3.3 根土复合体抗剪特性测定 10月底植株生长成熟后,进行野外试验取样,按照0—10,10—20,20—30,30—40 cm分层用环刀取样,每层至少取12个样品,总计取样288个。依据《土工试验方法标准》(GB/T32737-2016)土壤剪切试验(固结快剪法)规程,使用剪切仪(ZJ-2等应变直剪仪,南京宁曦土壤仪器有限公司)分别在100 kPa,200 kPa,300 kPa和400 kPa共4个压力下进行直剪试验,直至完全接破,并记录试验数据。4种垂直压力对每一小组试样进行剪切后可以得到4个不同垂直压力下的剪应力。应用库仑公式计算出相应的黏聚力和内摩擦角<sup>[17]</sup>。具体公式如下:

$$\tau f = \frac{C \cdot R}{A} \times 10 \quad (5)$$

式中: $\tau f$ 表示抗剪强度(kPa); $C$ 为测力计率定系数,测力计率定系数(N/0.01 mm); $R$ 为测力计读数(0.01 mm);10为单位换算系数; $A$ 为试样剪切时的面积,本试验取环刀截面面积30 cm<sup>2</sup>。

库仑定律计算公式为:

$$\tau f = \gamma + \delta \tan \varphi \quad (6)$$

式中: $\gamma$ 为土壤黏结力(kPa); $\delta$ 为垂直应压力(kPa); $\varphi$ 为内摩擦角( $^{\circ}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 5种植物根系特征参数分析

本研究发一年生巨菌草根系垂直分布范围在0—40 cm土层内,其中0—10 cm平均根长为97.33 cm,平均根径为0.63 mm,根长密度为1.79 cm/cm<sup>3</sup>,显著大于10—40 cm其他土层( $p < 0.05$ );根重密度为11.60 kg/m<sup>3</sup>,根面积比为0.000 9。巨菌草根系各参数随着土层加深减小,平均根径为30—40 cm土层根径的2.42倍,平均根长为30—40 cm土层的5.90倍,根长密度为30—40 cm土层的6.51倍,根重密度为30—40 cm土层的72.5倍,根面积比相差不大。红象草根系也主要分布在0—40 cm土层内,且各土层根系粗度较巨菌草大,其中0—10 cm平均根长为71.67 cm,平均根径为0.88 mm,根长密度为1.20 cm/cm<sup>3</sup>,根重密度为8.50 kg/m<sup>3</sup>,根面积比为0.005 1,显著大于10—40 cm其他各土层( $p < 0.05$ )。高丹草0—10 cm平均根长为58.07 cm,平均根径为2.28 mm,根长密度为0.97 cm/cm<sup>3</sup>,根重密度为16.00 kg/m<sup>3</sup>,根面积比为0.039 6,甜高粱0—10 cm平均根长为83.98 cm,平均根径为1.98 mm,根长密度为1.40 cm/cm<sup>3</sup>,

根重密度为15.61 kg/m<sup>3</sup>,根面积比为0.042 9,5种植物种高丹草和甜高粱的根径最粗。青贮玉米根系垂直分布范围在0—30 cm土层内,0—10 cm平均根长为37.33 cm,平均根径为1.40 mm,根长密度为0.62 cm/cm<sup>3</sup>,根重密度为4.00 kg/m<sup>3</sup>,根面积比为0.000 3。从单个土层来看,0—10 cm土层,5种植物根系粗度差异显著( $p < 0.05$ ),具体大小顺序为高丹草>甜高粱>红象草>巨菌草>玉米,根长密度差异也显著( $p < 0.05$ ),其中巨菌草显著大于其他4种植物,其他各个参数值差异也都基本显著,但大小顺序没有规律,具体数据见表1。

根系作为骨性植物体,是摄取、运输和贮存营养物质以及合成一系列有机化合物的器官,因此,研究根系的形态特征、生理功能,生长发育,具有重大的理论和生产实践意义<sup>[18-19]</sup>。5种草本植物根系均主要分布在0—10 cm土层,同一草种根系参数值均表现出随着土层深度的增加而减小的趋势。谢伟文等<sup>[20]</sup>对护坡草本植物根系研究发现,根系参数随着土层深度增加而表现为指数函数或线性函数递减,说明不同的植物根系随土层变化的规律存在差异,本研究结果也证明了这一结论。5种植物各土层各根系参数基本都差异显著,但大小顺序没有规律,其中巨菌草根长密度显著大于其他4种植物,高丹草根系粗度、根重量和根密度比显著大于其他4种植物。

表1 不同土层5种植物根系特征参数变化值

Table 1 Variation values of root characteristic parameters of five plant species in different soil layers

植被类型 和土层	土层/cm	$D/mm$	$L/cm$	$M/g$	RLD/ ( $cm \cdot cm^{-3}$ )	RCSA/ $m^2$	RMD/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	RAR
巨菌草	0—10	0.63±0.08 <sup>a</sup>	97.33±12.33 <sup>a</sup>	0.70±0.05 <sup>a</sup>	1.79±0.03 <sup>a</sup>	0.0000 005 <sup>a</sup>	11.60±1.23 <sup>a</sup>	0.0009 <sup>a</sup>
	10—20	0.62±0.05 <sup>b</sup>	87.67±11.00 <sup>b</sup>	0.18±0.02 <sup>b</sup>	1.46±0.02 <sup>b</sup>	0.0000 003 <sup>a</sup>	3.06±0.80 <sup>b</sup>	0.0045 <sup>a</sup>
	20—30	0.50±0.04 <sup>c</sup>	24.67±5.23 <sup>c</sup>	0.02±0.00 <sup>c</sup>	0.41±0.01 <sup>c</sup>	0.0000 002 <sup>a</sup>	0.39±0.05 <sup>bc</sup>	0.0008 <sup>a</sup>
	30—40	0.26±0.03 <sup>d</sup>	16.50±1.35 <sup>d</sup>	0.01±0.00 <sup>c</sup>	0.28±0.01 <sup>d</sup>	0.0000 001 <sup>a</sup>	0.16±0.04 <sup>c</sup>	0.0009 <sup>a</sup>
红象草	0—10	0.88±0.12 <sup>a</sup>	71.67±8.98 <sup>a</sup>	0.51±0.05 <sup>a</sup>	1.20±1.02 <sup>a</sup>	0.0000 006 <sup>a</sup>	8.50±2.30 <sup>a</sup>	0.0051 <sup>a</sup>
	10—20	0.80±0.10 <sup>b</sup>	61.60±6.56 <sup>a</sup>	0.21±0.02 <sup>a</sup>	1.03±1.00 <sup>b</sup>	0.0000 005 <sup>a</sup>	3.44±0.85 <sup>b</sup>	0.0052 <sup>a</sup>
	20—30	0.69±0.08 <sup>c</sup>	12.00±1.20 <sup>b</sup>	0.10±0.01 <sup>a</sup>	0.02±0.00 <sup>d</sup>	0.0000 004 <sup>a</sup>	1.61±0.20 <sup>bc</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
	30—40	0.58±0.01 <sup>d</sup>	18.67±1.03 <sup>b</sup>	0.03±0.00 <sup>a</sup>	0.31±0.69 <sup>c</sup>	0.0000 003 <sup>a</sup>	0.50±0.03 <sup>c</sup>	0.0015 <sup>a</sup>
高丹草	0—10	2.28±0.12 <sup>a</sup>	58.07±2.30 <sup>a</sup>	0.96±0.08 <sup>a</sup>	0.97±0.03 <sup>a</sup>	0.0000 041 <sup>a</sup>	16.00±1.02 <sup>a</sup>	0.0396 <sup>a</sup>
	10—20	1.09±0.10 <sup>c</sup>	41.33±2.20 <sup>a</sup>	0.30±0.02 <sup>a</sup>	0.69±0.02 <sup>a</sup>	0.0000 009 <sup>a</sup>	5.00±1.00 <sup>b</sup>	0.0065 <sup>a</sup>
	20—30	1.27±0.14 <sup>b</sup>	40.23±1.65 <sup>a</sup>	0.26±0.01 <sup>a</sup>	0.67±0.01 <sup>a</sup>	0.0000 013 <sup>a</sup>	4.39±0.89 <sup>bc</sup>	0.0085 <sup>a</sup>
	30—40	0.50±0.02 <sup>d</sup>	30.00±1.53 <sup>a</sup>	0.05±0.00 <sup>a</sup>	0.50±0.01 <sup>a</sup>	0.0000 002 <sup>a</sup>	0.83±0.05 <sup>c</sup>	0.0010 <sup>a</sup>
甜高粱	0—10	1.98±0.15 <sup>a</sup>	83.98±5.63 <sup>a</sup>	0.94±0.02 <sup>a</sup>	1.40±0.08 <sup>a</sup>	0.0000 031 <sup>a</sup>	15.61±1.53 <sup>a</sup>	0.0429 <sup>a</sup>
	10—20	1.08±0.08 <sup>b</sup>	69.47±4.23 <sup>a</sup>	0.72±0.01 <sup>a</sup>	1.16±0.05 <sup>b</sup>	0.0000 009 <sup>a</sup>	12.06±1.02 <sup>a</sup>	0.0106 <sup>a</sup>
	20—30	0.64±0.05 <sup>c</sup>	67.33±2.10 <sup>a</sup>	0.21±0.01 <sup>a</sup>	1.12±0.03 <sup>c</sup>	0.0000 003 <sup>a</sup>	3.50±0.56 <sup>b</sup>	0.0036 <sup>a</sup>
	30—40	0.03±0.00 <sup>d</sup>	24.00±0.32 <sup>a</sup>	0.03±0.00 <sup>a</sup>	0.40±0.00 <sup>d</sup>	0.0000 000 <sup>a</sup>	0.50±0.02 <sup>c</sup>	0.0001 <sup>a</sup>
玉米	0—10	1.40±0.12 <sup>a</sup>	37.33±1.20 <sup>a</sup>	0.25±0.08 <sup>a</sup>	0.62±0.12 <sup>a</sup>	0.0000 012 <sup>a</sup>	4.00±0.12 <sup>a</sup>	0.0003 <sup>a</sup>
	10—20	0.33±0.02 <sup>b</sup>	27.67±1.02 <sup>a</sup>	0.12±0.02 <sup>a</sup>	0.46±0.08 <sup>a</sup>	0.0000 001 <sup>b</sup>	2.00±0.03 <sup>a</sup>	0.0004 <sup>a</sup>
	20—30	0.27±0.01 <sup>b</sup>	14.33±0.85 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>a</sup>	0.24±0.02 <sup>a</sup>	0.0000 001 <sup>b</sup>	1.00±0.01 <sup>a</sup>	0.0002 <sup>a</sup>
	30—40	无根						

注: $L$ 为根长; $D$ 为平均根径; $M$ 为平均根重量;RLD为根长密度;RMD为根重密度;RAR为根面积比。

## 2.2 5种植物单根抗拉力和抗拉强度与根径变化关系分析

从图 1 可以看出,巨菌草根径大小为 0.5~1.6 mm,根系拉力大小为 1~40 N,根系拉力随根径增大而增大,且呈线性正相关,相关系数为 0.869。红象草根径大小为 0.5~1.8 mm,根系拉力大小为 1~50 N,根系拉力随根径增大而增大,且呈线性正相关,相关系数为 0.854 9。甜高粱根径大小为 0.5~6.8 mm,根系拉力大小为 1~120 N,根系拉力随根径增大而增大,且呈线性正相关,相关系数为 0.918 1。高丹草根径大小为 0.5~5.0 mm,根系拉力大小为 1~100 N,根系拉力随根径增大而增大。青贮玉米根径大小为 0.8~4.5 mm,根系拉力大小为 12~35 N,根系拉力随根径增大而增大,且呈线性正相关,相关系数为 0.852 3。5 种植物根径大小不同,根系拉力不同,其中以甜高粱和高丹草的根系最粗,拉力最大。

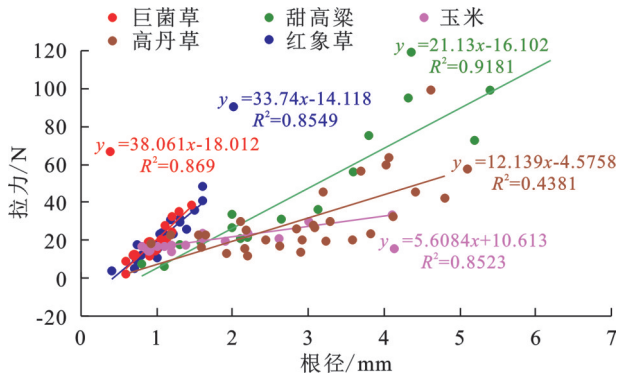


图 1 5种植物单根拉力随根径变化趋势

Fig. 1 Variation trends of single-root tensile force with root diameter for five plant species

如图 2 所示,巨菌草抗拉强度大小为 10~50 N/cm<sup>2</sup> 范围内,且其大小随着根径的增大而减小。红象草抗拉强度大小也在 10~50 N/cm<sup>2</sup> 范围内,且其大小随着根径的增大而减小。甜高粱抗拉强度大小在 10~20 N/cm<sup>2</sup> 范围内,变化趋势同巨菌草。高丹草抗拉强度大小在 10~30 N/cm<sup>2</sup> 范围内,变化趋势同巨菌草。青贮玉米抗拉强度大小在 0~40 N/cm<sup>2</sup> 范围内,变化趋势同巨菌草。可以看出 5 种植物抗拉强度最大的是红象草和巨菌草。

植物根系提高土壤抗侵蚀性主要通过直径小于 1 mm 的须根起作用。须根通过增加土壤水稳性团聚体的数量与粒径等作用来提高土壤的稳定性,以抵抗水流分散,须根还能有效地增强土壤渗透性,减少径流,从而达到减少土壤冲刷的目的<sup>[21-22]</sup>。5 种植物根系抗拉试验发现,5 种植物根系均表现较强的抗拉能力,其中以高丹草、甜高粱根系拉力最大,因为这两种植物根系较粗,>2 mm 根系占总根系重量的

85%,巨菌草和红象植物根系较细,根系<2 mm 的占 95%,其根系拉力较小,而青贮玉米根系虽然较巨菌草和红象草粗,但是其根系拉力却最小。总的来说,根系单根拉力变化曲线随根径粗度呈线性正相关关系,其中巨菌草、红象草、甜高粱、玉米相关性显著( $R^2 > 0.85$ )。本研究表明,当根径大于 1 mm 时,单根的抗拉能力明显增大,说明根径较粗的根系具有较强的抗拉力。根径>3 mm 的根系很难拉断,拉力都大于 60 N,且拉力随着根径的增大而增大,但根段却在上部、中部、下部不同的部位抽出。根系的抗拉强度并没有随根径的增加而增大,反而是基本呈负相关关系,其中红象草、甜高粱、玉米相关性显著( $R^2 > 0.85$ )。根径在 1~2 mm 之间时抗拉强度最大,根径>2 mm 后抗拉强度随着根径的增加而减小,直径在 1~2 mm 的毛根具有较大的抗拉强度,说明植物主要通过深粗根的锚固作用和细根的加筋作用提高土体稳定性。已有研究结果表明,单根抗拉力和单根抗拉强度与根径间关系密切,单根抗拉力随根径增大呈幂函数增大<sup>[23]</sup>,单根抗拉强度随根径增大呈幂函数减小<sup>[24]</sup>,且不同植物单根抗拉力和抗拉强度差异明显,这与本研究结果基本一致。

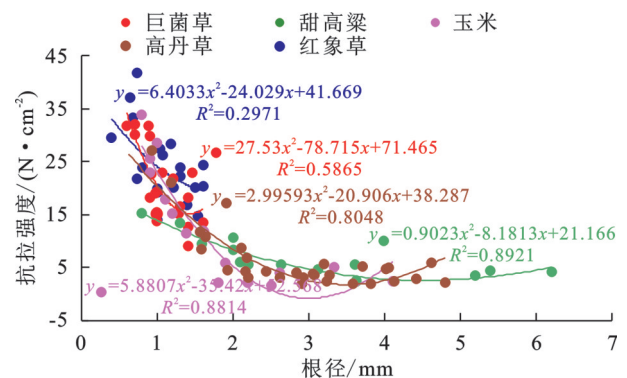


图 2 5种植物抗拉强度随根径变化趋势

Fig. 2 Variation of tensile strength with root diameter for five plant species

## 2.3 5种植物不同土层根-土复合体抗剪强度变化分析

在土壤中,土壤颗粒之间是通过各种引力而黏结起来的。这种引力多表现为范德华力、库仑力以及水膜的表面张力等物理引力,对土壤抗剪强度、抗冲性能以及崩解特性具有表征意义<sup>[25]</sup>。如表 2 所示,相同轴向荷载作用下,相较于其他 4 种植物根系和裸土,巨菌草植物根系加固后复合土体的强度更高。100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa 轴向荷载作用下,巨菌草 0—10 cm 土层根土复合体的强度分别是高丹草植物根系加固复合土体强度的 1.20 倍、1.33 倍、1.47 倍和 1.15 倍;是玉米的 1.38 倍、1.75 倍、1.93 倍和

1.60 倍,是裸地的 1.26 倍、1.33 倍、1.24 倍和 1.20 倍。除了玉米 0—10 cm 土层根土复合体的强度大于 10—20 cm 土层外,本研究中其他 4 种植物根系抗剪强度均随土层深度的增加而增大,在 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa 轴向荷载作用下巨菌草 30—40 cm 土层根土复合体的强度分别是高丹草植物根系加固复合土体强度的 1.20 倍、1.33 倍、1.47 倍和 1.15 倍;是裸地的 1.38 倍、1.33 倍、1.21 倍和 1.20 倍。

本研究巨菌草、红象草 2 种植被类型的根-土复合体在各层土壤中的剪切曲线都在裸土的剪切曲线之上,并具有不同的增长幅度,在其他类似的研究<sup>[26-27]</sup>中,学者们都得到了一样的结果,这说明草本植物根系能够提高土壤抗剪强度。但高丹草、甜高粱和玉米 3 种植被类型的根-土复合体在各层土壤中的剪切强度都基本跟裸土相同或较小,说明不同物种之间根系提升土壤抗剪能力的程度存在着差距,表现出不同的水土保持能力。和其他研究不同的是,本研究中 5 种植物根系抗剪强度均随土层深度的增加而增大,和裸地表现出相同的趋势。5 种不同措

施区土壤抗剪强度均值表现为巨菌草>红象草>高丹草>甜高粱>玉米,与裸地相比,巨菌草抗剪强度的增幅为 32.00%,红象草抗剪强度的增幅为 3.33%,以上结果表明,巨菌草和红象草根系均能提高根-土复合体的抗剪强度,且巨菌草的效果更明显。大量研究表明,根系对抗剪强度的提高主要体现在黏聚力上,存在最优含根率使得抗剪强度指标  $c$ 、 $\varphi$  最大,且不同直径对应的最优含根率(区)不同;亦存在最优直径范围使根系对黏聚力的增强最大,根系具有提土体抗剪强度的能力同时,随着含根量的增大,根土复合体抗剪强度先增大后减小,存在一个峰值,即临界含根量<sup>[28]</sup>。而随着含水量的增大,根土复合体抗剪强度亦先增大后减小,在最优含水量附近达到最大值<sup>[29]</sup>。本研究结果与其他研究结果不同,可能是由于高丹草、甜高粱、玉米的根系较粗,根系>2 mm 的根系占比为 85%,而许多研究表明根系提高土壤黏聚力主要以 0.5~1 mm 为主,对于 5 种植物提高土壤抗剪强度的最优含根量和最优含水率还需进一步详细研究。

表 2 5种植物根-土复合体抗剪强度

Table 2 Shear strength of root-soil composites of five plant species

植被类型	土层/cm	含水量/%	不同轴向荷载作用下平均土壤抗剪强度/kPa				拟合方程	$R^2$	黏结力/kPa	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
			100	200	300	400				
巨菌草	0—10	8.49	9.9660	15.0900	26.4623	29.4700	$Y=0.0699x+2.7763$	0.9539	2.7736	3.99
	10—20	8.34	9.6220	11.6500	17.4340	23.7130	$Y=0.0481x+3.5905$	0.9581	3.5905	2.75
	20—30	8.47	20.6200	32.6700	36.3950	46.7386	$Y=0.0821x+13.586$	0.9659	13.5860	4.69
	30—40	10.23	20.6200	25.3690	38.1470	47.4260	$Y=0.0932x+9.5915$	0.9736	9.5915	5.32
红象草	0—10	8.70	7.1860	11.3410	19.9327	24.7440	$Y=0.0613x+0.4845$	0.9818	0.4845	3.51
	10—20	9.05	8.5917	15.1213	19.7608	25.4313	$Y=0.0552x+3.4367$	0.9960	3.4367	3.16
	20—30	7.12	10.2170	16.1523	20.9637	31.9610	$Y=0.0700x+2.3127$	0.9643	2.3127	4.00
	30—40	9.81	17.8707	21.5890	33.3357	38.4907	$Y=0.0736x+9.4198$	0.9603	9.4198	4.21
高丹草	0—10	7.73	8.3240	12.7157	18.0000	25.6604	$Y=0.0573x+1.8516$	0.9833	1.8516	3.28
	10—20	10.54	8.5917	17.1833	26.8060	29.7035	$Y=0.0730x+2.3316$	0.9599	2.3316	4.18
	20—30	11.15	9.9663	13.0250	19.9327	23.0257	$Y=0.0461x+4.9660$	0.9731	4.9660	2.64
	30—40	12.01	13.2300	19.5300	29.0130	35.0230	$Y=0.0749x+5.4835$	0.9921	5.4835	4.28
甜高粱	0—10	8.59	7.9000	9.5900	15.4960	18.5880	$Y=0.0380x+3.4010$	0.9605	3.4010	2.18
	10—20	10.10	9.2700	15.4650	20.9360	23.0250	$Y=0.0467x+5.4900$	0.9599	5.4900	2.67
	20—30	8.25	13.0590	19.2450	21.9946	25.9460	$Y=0.0414x+9.7085$	0.9736	9.7085	2.37
	30—40	10.00	15.1213	23.0250	29.2110	35.0540	$Y=0.0660x+9.1068$	0.9947	9.1068	3.77
玉米	0—10	10.72	7.2170	8.5916	13.7466	18.4770	$Y=0.0389x+2.2743$	0.9535	2.2743	2.23
	10—20	9.26	4.5822	8.41983	11.6846	13.5748	$Y=0.0302x+2.0047$	0.9790	2.0047	1.73
	20—30	9.51	9.6226	14.0903	19.4171	28.8680	$Y=0.0631x+2.2338$	0.9672	2.2338	3.61
	30—40	10.59	17.4650	21.9946	24.05660	26.4650	$Y=0.0291x+15.2300$	0.9652	15.2300	1.67
裸地	0—10	10.14	7.9000	11.3410	21.3000	24.6500	$Y=0.0602x+1.2455$	0.9546	1.2455	3.45
	10—20	10.98	12.2000	17.9300	21.9500	24.7100	$Y=0.0416x+8.8100$	0.9750	8.8100	2.29
	20—30	10.78	11.6800	20.2700	28.5200	30.8700	$Y=0.0658x+6.3800$	0.9505	6.3800	3.76
	30—40	13.99	17.8700	19.9600	24.4000	26.4900	$Y=0.0303x+14.6050$	0.9765	14.6050	1.74

### 3 结论

(1) 5种植物各根系参数随着土层深度增加而表现为指数函数或线性函数递减。5种植物各土层各根系参数基本都差异显著,其中巨菌草根长密度显著大于其他4种植物,高丹草根系粗度、根重量和根密度比显著大于其他4种植物。

(2) 5种植物根系均表现较强的抗拉能力,其中以高丹草、甜高粱根系拉力最大(1~120 N),根系拉力随根径增大而增大,且基本呈线性正相关。5种植物抗拉强度最大的是红象草和巨菌草,其中巨菌草抗拉强度大小为10~50 N/cm<sup>2</sup>,且其大小随着根径的增大而减小。巨菌草、红象草、高丹草、甜高粱,4种植物根系单根抗拉能力均优于青贮玉米,且相较于其他4种植物根系和裸土,巨菌草根系的单根抗拉力学性能最强。

(3) 相同轴向荷载作用下,巨菌草、红象草的根-土复合体在各层土壤中的剪切曲线都在裸土的剪切曲线之上,高丹草、甜高粱和玉米3种植物类型的根-土复合体在各层土壤中的剪切强度都基本跟裸土相同或较小,且巨菌草植物根系加固后复合土体的抗剪强度更高。除了玉米0—10 cm土层根-土复合体的强度大于10—20 cm土层外,本研究中其他4种植物根系抗剪强度均随土层深度的增加而增大。

综上,巨菌草、红象草、高丹草、甜高粱、青贮玉米5种植物根系都是增强土体抗拉抗剪能力的水土保持优良植物,且以巨菌草根系的单根抗拉力学性能和增强土体抗剪能力最强,对于5种植物提高土壤抗剪强度的最优含根量和最优含水率还需进一步详细研究,本研究结果可为陇东黄土高原沟壑区水土保持研究提供一定的科学依据。

#### 参考文献 (References):

[1] 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 H B, Zhang X, Yao C, 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.

[2] 苏雪萌,刘俊娥,周正朝,等.黄土丘陵区不同植物根系抗拉力学特性[J].水土保持研究,2019,26(3):259-264.  
Su X M, Liu J E, Zhou Z C, et al. Root tensile and mechanical properties of three typical plants in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(3):259-264.

[3] 潘天辉,杜峰,王月.陕北黄土区护坡植物根系分布和抗剪增强分析[J].水土保持研究,2020,27(3):357-363,371.  
Pan T H, Du F, Wang Y. Analysis of root distributions and shear strengths of slope protection plants in the loess

region of northern Shaanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(3):357-363,371.

[4] 李慧.4种草本植物根系固土的力学效应研究[D].南昌:江西农业大学,2021.  
Li Y. Study on the mechanical effects of four herb roots on soil reinforcement[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021.

[5] 李慧,黄炎和,蒋芳市,等.2种草本植物根系对崩岗洪积扇土壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):96-101.  
Li H, Huang Y H, Jiang F S, et al. Effects of two herbal plants' roots on soil shear strength in a collapsing gully alluvial fan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(3):96-101.

[6] 周林虎,刘昌义,胡夏嵩,等.寒旱区4种草本根系力学特性试验研究[J].人民黄河,2019,41(5):90-95.  
Zhou L H, Liu C Y, Hu X S, et al. Experimental study on the mechanical properties of four herbs roots in cold-arid area[J]. Yellow River, 2019,41(5):90-95.

[7] 林春梅.黄河流域典型生态脆弱区菌草治理技术的选择与应用[D].福州:福建农林大学,2017.  
Lin C M. Selection and application of Juncao technology in typical ecological fragile areas of the yellow river basin[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.

[8] 黄炎和,李思诗,岳辉,等.崩岗区四种草本植物根系抗拉特性及其与化学成分的关系[J].亚热带水土保持,2021,33(4):9-15.  
Huang Y H, Li S S, Yue H, et al. Relationship between root tensile properties and its main chemical components of four kinds of herbaceous plants in Benggang area[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2021,33(4):9-15.

[9] 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.  
Xu D Z, Zhang X, Chen Y, 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.

[10] Gray D H. Reinforcement and stabilization of soil by vegetation[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974,100(6):695-699.

[11] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2005,29(2):189-217.

[12] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰,等.油松根系形态分布的分形分析研究[J].水土保持通报,2007,27(1):47-50,54.  
Liu X P, Chen L H, Song W F, et al. Fractal analysis on morphology distribution of the *Pinus tabulaeformis*

- Carr. Root system[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(1):47-50, 54.
- [13] 杨路, 杜峰, 秦晶晶, 等. 黄土区3种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 295-300, 310.
- Yang L, Du F, Qin J J, et al. Research on shear strengths of root-soil complexes of three dominant shrubs in loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1):295-300, 310.
- [14] Stokes A, Lucas A, Jouneau L. Plant biomechanical strategies in response to frequent disturbance: uprooting of *Phyllostachys nidularia* (Poaceae) growing on landslide-prone slopes in Sichuan, China[J]. American Journal of Botany, 2007, 94(7):1129-1136.
- [15] Tosi M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy)[J]. Geomorphology, 2007, 87(4):268-283.
- [16] 李思诗, 司晓静, 蒋芳市, 等. 长汀县崩岗区8种禾本科植物根系构型特征[J]. 草业学报, 2018, 27(10):215-222.
- Li S S, Si X J, Jiang F S, et al. Root architecture of eight Gramineae plant species in the Benggang area of Changting County[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(10):215-222.
- [17] 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 Soil, 2008, 305(2):207-226.
- [18] 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.
- [19] 童冉, 陈庆标, 周本智, 等. 毛竹和雷竹地下系统结构及生物力学性质[J]. 生态学报, 2020, 40(7):2242-2251.
- Tong R, Chen Q B, Zhou B Z, et al. Structure and biomechanical properties of underground system of Moso bamboo and Lei bamboo[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7):2242-2251.
- [20] 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.
- [21] 谢伟文. 广州白云山风景名胜区9种草本植物根系固土护坡效能研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2023.
- Xie W W. Study on soil reinforcement and slope protection efficiency of root systems of 9 herbaceous plants in Guangzhou Baiyun mountain scenic area [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2023.
- [22] 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 J Q, Li J X, Wang B, 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.
- [23] 王建瑞. 内蒙古阴山北麓地区藜麦根系形态和抗拉特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- Wang J R. Study on root morphology and tensile characteristics of quinoa in the northern foot of Yinshan Mountain in Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.
- [24] 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, 69.
- He Z Z, Dang S, Liu C Y, 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, 69.
- [25] 梁亚红. 黄土山区公路滑坡稳定性分析与防治研究[J]. 建材与装饰, 2020(12):238-239.
- Liang Y H. Stability analysis and prevention of highway landslide in loess mountainous area [J]. Construction Materials & Decoration, 2020(12):238-239.
- [26] 袁海莉. 基于根系形态与层次结构的草本根系固土力学机制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- Yuan H L. Study on soil consolidation mechanism of herbaceous roots based on roots based on root morphology and hierarchical structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [27] 张川, 谢祥荣, 段青松, 等. 木纤维重构红壤下根系特征对根土复合体抗剪特性的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4):138-146.
- Zhang C, Xie X R, Duan Q S, et al. Effects of root characteristics on the shear characteristics of root-soil complex in wood fiber reconstructed red soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4):138-146.
- [28] 杨永红, 刘淑珍, 王成华, 等. 含根量与土壤抗剪强度增加值关系的试验研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 287-288, 291.
- Yang Y H, Liu S Z, Wang C H, et al. Experimental research on the relation between increasing value of shearing strength with root system[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3):287-288, 291.
- [29] 王楠, 赵友朋, 郭晓平, 等. 土壤含水率和干容重对不同植被类型边坡土壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6):88-94, 102.
- Wang N, Zhao Y P, Guo X P, et al. Effects of soil moisture content and dry bulk density of different vegetation types on slope soil shear strength[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6):88-94, 102.