

# 青藏高原东北部黄土区灌木柠条锦鸡儿 根—土界面剪切特性

石川<sup>1</sup>, 刘亚斌<sup>1,2</sup>, 朱海丽<sup>1,2</sup>, 梁燊<sup>1</sup>, 薛立夫<sup>1</sup>, 王舒<sup>1</sup>, 胡夏嵩<sup>1,2</sup>, 李国荣<sup>1,2</sup>

(1.青海大学地质工程系, 青海 西宁 810016; 2.青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室, 青海 西宁 810016)

**摘要:** [目的] 分析不同因素对根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度的影响, 为深入探讨青藏高原东北部黄土区灌木根系固土护坡机制提供理论依据。[方法] 以区内优势灌木植物柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)为研究对象, 通过根—土界面直剪试验, 分析根径级别为  $2.20 \pm 1.00 \sim 32.00 \pm 1.80$  mm 以及土体含水量、干密度和含盐量分别为  $6.00\% \sim 22.00\%$ ,  $1.20 \sim 1.60$  g/cm<sup>3</sup>,  $0.59\% \sim 2.50\%$  的条件下, 各因素对柠条锦鸡儿根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度的影响规律。[结果] 在其他影响因素恒定的情况下, 根径对根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度无显著影响( $p > 0.05$ )。随着土体含水量由  $6.00\%$  增大到  $22.00\%$ , 根—土界面黏聚力呈先增大后减小的趋势, 当土体含水量达到  $14.00\%$  时黏聚力达到峰值  $6.74$  kPa; 根—土界面摩擦角由  $21.40^\circ$  降低至  $15.75^\circ$ , 呈线性函数降低趋势; 根—土界面抗剪强度呈线性函数降低趋势。随着土体干密度由  $1.20$  g/cm<sup>3</sup> 增长至  $1.60$  g/cm<sup>3</sup>, 根—土界面黏聚力由  $5.70$  kPa 增大至  $6.85$  kPa, 呈指数函数增长趋势; 根—土界面摩擦角由  $20.67^\circ$  增大至  $21.67^\circ$ , 呈线性函数增长趋势; 根—土界面抗剪强度呈线性函数增大趋势。随着土体含盐量由  $0.59\%$  增大至  $2.50\%$ , 根—土界面黏聚力由  $6.71$  kPa 增大至  $7.31$  kPa, 呈线性函数增长趋势; 根—土界面摩擦角无显著变化( $p > 0.05$ ); 根—土界面抗剪强度呈线性函数增长趋势。通过灰色关联分析可知, 土体干密度对根—土界面黏聚力、摩擦角和抗剪强度的影响程度最大。[结论] 土体含水量、干密度和含盐量均能够影响根—土界面剪切特性, 但影响程度存在差异; 在评价植物根系对黄土斜(边)坡浅层土体的防护效果时, 必须充分考虑降雨入渗对根—土界面剪切特性的影响。

**关键词:** 灌木; 柠条锦鸡儿; 根系; 黄土状盐渍土; 根—土界面; 抗剪强度指标

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0069-09

中图分类号: TU43

**文献参数:** 石川, 刘亚斌, 朱海丽, 等. 青藏高原东北部黄土区灌木柠条锦鸡儿根—土界面剪切特性[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 69-77. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230222.001; Shi Chuan, Liu Yabin, Zhu Haili, et al. Shear characteristics of root-soil interface of *Caragana korshinskii* in loess area of Northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 69-77.

## Shear Characteristics of Root-Soil Interface of *Caragana Korshinskii* in Loess Area of Northeastern Qinghai-Tibet Plateau

Shi Chuan<sup>1</sup>, Liu Yabin<sup>1,2</sup>, Zhu Haili<sup>1,2</sup>, Liang Shen<sup>1</sup>, Xue Lifu<sup>1</sup>, Wang Shu<sup>1</sup>, Hu Xiasong<sup>1,2</sup>, Li Guorong<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University,

Xining, Qinghai 810016, China; 2. Key Laboratory of Cenozoic Resources and

Environment on the Northern Edge of the Qinghai-Tibet Plateau, Xining, Qinghai 810016, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different factors on the shear strength index and shear strength of the root-soil interface were analyzed, in order to provide an understanding of the mechanism of shrub root soil fixation and slope protection in the loess region of the Northeastern Tibetan Plateau. [Methods] The dominant shrub (*Caragana korshinskii*) for this region was selected as the study object, and the effects of the dry density, moisture content, and salt content of soil, and of root diameter on the shear characteristics

收稿日期: 2022-05-05

修回日期: 2022-06-17

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“青藏高原东北部黄土区垂直根型灌木根系锚固机理研究”(42002283); 国家自然科学基金项目(42062019); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905)。

第一作者: 石川(1997—), 男(汉族), 青海省西宁市人, 硕士研究生, 研究方向为生态工程地质。Email: shichuanwj@163.com。

通信作者: 刘亚斌(1987—), 男(汉族), 青海省西宁市人, 博士, 副教授, 主要从事生态工程地质研究。Email: liuyabincug@163.com。

of the root-soil interface and their mechanisms were analyzed and discussed using the direct shear test (i. e., one factor was varied at a time) for root diameters of  $(2.20 \pm 1.00 - 32.00 \pm 1.80)$  mm and moisture contents, dry densities, and salt contents of the soil of 6.00%—22.00%, 1.20—1.60 g/cm<sup>3</sup>, and 0.59%—2.50% respectively. [Results] Root diameter had no significant effect on the shear strength indexes and shear strength of the root-soil interface ( $p > 0.05$ ) when other influencing factors were held constant. As soil moisture content increased from 6.00% to 22.00%, the root-soil interface cohesion initially increased and then decreased, reaching a maximum value of 6.74 kPa at a soil moisture content of 14.00%. The root-soil interface friction angle decreased linearly from 21.40° to 15.75°. The shear strength of the root-soil interface decreased linearly. As the soil dry density increased from 1.20 g/cm<sup>3</sup> to 1.60 g/cm<sup>3</sup>, the cohesion of the root-soil interface increased exponentially from 5.70 kPa to 6.85 kPa, and the friction angle increased linearly from 20.67° to 21.67°. The shear strength of the root-soil interface increased linearly. As the soil salt content increased from 0.59% to 2.50%, the root-soil interface cohesion increased linearly from 6.71 kPa to 7.31 kPa, and the shear strength increased linearly. However, there was no significant change in the root-soil interface friction angle ( $p > 0.05$ ). The gray correlation analysis of these results showed that dry density had the greatest influence on the cohesion, the friction angle, and the shear strength of the root-soil interface. [Conclusion] The dry density, moisture content, and salt content of soil can all affect the shear characteristics of the root-soil interface, however, the degree of influence is different. The influence of rainfall infiltration on the shear characteristics of the root-soil interface should be fully considered when evaluating the protective effect of plant roots on the shallow soil of loess slopes.

**Keywords:** shrub species; *Caragana korshinskii*; roots; loess saline soil; root-soil interface; shear strength index

青藏高原东北部是青藏高原地区主要的黄土沉积区<sup>[1]</sup>。区内生态环境脆弱,植被稀疏,水土流失、滑坡等地质灾害现象普遍发育<sup>[2]</sup>。近年来,随着区域经济发展,区内基础设施建设活动日益加强。工程建设会对原始地貌和生态环境进行一定程度的改造和破坏,促进水土流失、滑坡等地质灾害现象的发生,从而加剧区域生态地质环境问题<sup>[3-4]</sup>。因此,选择合理的工程技术措施以防治区内地质灾害现象的发生,并进一步协调工程建设与生态环境保护之间的矛盾,是区内亟待解决的工程地质问题之一。

诸多研究表明,植物通过水文效应和力学效应两方面的作用能够有效缓解水土流失,并起到增强斜(边)坡浅层土体抗剪强度和坡体稳定性的作用<sup>[5-8]</sup>。根系固土护坡力学效应是指在根—土相互作用下,根系和土体共同协调承担含根土体内部剪应力和张拉应力的过程及其结果。而根—土界面相互作用是讨论根系固土护坡力学效应的关键,其实质是根—土界面剪切作用。诸多学者在根—土界面相互作用理论方面开展了较为丰富的研究<sup>[9-11]</sup>。Waldron<sup>[12]</sup>认为植物根系之所以能够起到加筋土体的作用,主要是通过根—土界面间的摩擦作用把根系和周边土体联系起来。Ennos<sup>[13]</sup>指出植物根系受拉拔力作用时,根—土界面会产生剪应力以阻止根系被拔出;而根系被拉出土体时,剪切破坏发生在根—土界面还是根周土

体,取决于各自的强度。Schwarz 等<sup>[14-16]</sup>将根—土间摩擦力分为根—土界面摩擦力和侧根分支点处剪切土体产生的摩擦力,并指出在根系被拔出土体过程中,根—土间摩擦力将由静摩擦力转变为动摩擦力。Zhou 等<sup>[17]</sup>把拉拔土体中的根时,阻碍土体与根之间相互滑动的作用分为黏结型根土黏合键、摩擦型根土黏合键和剪切型根土黏合键 3 类。

已有的研究表明<sup>[16,18-19]</sup>,根—土界面剪切特性影响因素包括土质类型、土体含水量、土体干密度(密度)和植物类型等方面。土质类型方面,朱宏慧<sup>[20]</sup>通过研究柠条与粉土质砂、低液限粉土、低液限黏土和砒砂岩风化土的根—土界面摩擦阻特性,得出根与低液限黏土界面的黏聚力和摩擦系数( $\tan\varphi$ )最大,而根与粉土质砂界面、根与砒砂岩风化土界面的黏聚力和摩擦系数( $\tan\varphi$ )分别最小的结论。土体含水量方面,格日乐等<sup>[21]</sup>开展了不同土体含水量条件下的根—土界面直剪试验,结果表明随着土体含水量的增大,沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等 5 种植物根—土界面黏聚力呈先增大后减小趋势,摩擦系数( $\tan\varphi$ )呈降低趋势。在土体干密度方面,邢会文等<sup>[22]</sup>开展了不同土体干密度条件下沙柳(*Salix psammophila*)等灌木植物根—土界面直剪试验,结果表明植物根—土界面摩擦系数( $\tan\varphi$ )随土体干密度的增大而增大,而黏聚力无显著变化。在植物类型方面,田佳等<sup>[23]</sup>通过直剪

试验对比分析了花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙柳等灌木植物根—土界面剪切特性的差异性。

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)是青藏高原东北部地区优势灌木植物<sup>[24]</sup>。该种为豆科锦鸡儿属多年生落叶灌木,根系为主直根型,根系发达,属主根侧根均衡发育型灌木,为寒冷和干旱地区水土保持、稳定边坡的优良灌木<sup>[25-26]</sup>。然而,有关区内柠条锦鸡儿根—黄土界面剪切特性方面,尚缺乏深入研究,难以以为系统性研究柠条锦鸡儿根系护坡力学效应提供必要的理论和数据参考。与此同时,在根—土界面剪切特性研究方面,依然存在一些科学问题值得进一步研究。例如,青藏高原东北部地区分布的黄土普遍为黄土状盐渍土<sup>[26]</sup>,在盐渍土条件下,土体中易溶盐含量对根—土界面剪切特性存在何种影响?土体含易溶盐条件下,何种因素对根—土界面剪切特性影响最大?以上两方面,目前还鲜有相关研究见诸报道。

本研究以灌木柠条锦鸡儿和黄土状盐渍土为研究对象,通过根—土界面直剪试验,较为系统地评价土体含盐条件下,根径以及土体干密度、含水量和含盐量对根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度的影响,并结合试验结果探讨不同因素对根—土界面抗剪特性的影响机理。在此基础上,通过灰色关联分析法评价不同因素对根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度的影响程度,以期深入探讨青藏高原东北部黄土区灌木植物根系固土护坡机制提供理论和实际指导。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

该项研究中,柠条锦鸡儿根系于 2021 年 5 月通

过挖掘法采集自西宁市湟中区顾家岭村东侧斜坡,地理坐标为东经 101°43'19",北纬 36°44'24"。采集时,现场截取长度为 40~50 cm,相对顺直且表皮没有明显破损的根段带回实验室,在-4℃下冷藏备用。采集到的根段直径为 1.20~40.16 mm。试验所需黄土试样采集自西宁市长岭沟,将土样带回实验室后,用烘箱在 105℃条件下烘干 12 h,然后过 2 mm 筛备用。试验土体含盐量为 0.59±0.11%,属于硫酸盐渍土;液限( $w_L$ )和塑限( $w_P$ )分别为 24.60%和 17.20%,土质类型为粉土。

### 1.2 试验方法

该项研究选取根径以及土体含水量、干密度和含盐量 4 种因素开展单因素条件下根—土界面直剪试验。不同根径条件下的直剪试验设置 3 个根径级别分别为 2.20±1.00,17.60±1.90,32.00±1.80 mm。张中兴<sup>[27]</sup>指出,青海黄土天然含水量和天然干密度平均值分别为 13.50%和 1.35 g/cm<sup>3</sup>,故在开展不同土体含水量和干密度条件下的直剪试验时,设置 5 个土体含水量和 5 个土体干密度梯度分别为 6.00%,10.00%,14.00%,18.00%,22.00%和 1.20,1.30,1.40,1.50,1.60 g/cm<sup>3</sup>。由文献<sup>[28]</sup>可知,西宁地区黄土或黄土状土含盐量为 0.25%~2.45%,所含易溶盐以硫酸盐、亚硫酸盐为主。因此,在开展不同含盐量条件下的直剪试验时,结合研究区盐渍土特征和文献<sup>[29]</sup>中关于人工制备盐渍土的相关试验方法,采用无水硫酸钠(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)作为配置不同含盐量盐渍土试样的易溶盐添加材料,试验设置 0%,0.41%,0.91%,1.41%和 1.91% 5 个含盐量梯度,各梯度对应实际含盐量分别为 0.59%,1.00%,1.50%,2.00%和 2.50%(表 1)。

表 1 根—土界面直剪试验设置

Table 1 Direct shear test design of root-soil interface

因素	梯度	试验条件	各梯度试验重复次数
根径	2.20±1.00,17.60±1.90,32.00±1.80 mm	土体含水量、干密度、含盐量分别为 14.00%,1.40 g/cm <sup>3</sup> ,0.59%	10
含水量	6.00%,10.00%,14.00%,18.00%,22.00%	土体干密度、含盐量和根径分别为 1.40 g/cm <sup>3</sup> ,0.59%,17.60±1.90 mm	5
干密度	1.20,1.30,1.40,1.50,1.60 g/cm <sup>3</sup>	土体含水量、含盐量和根径分别为 14.00%,0.59%,17.60±1.90 mm	5
含盐量	0.59%,1.00%,1.50%,2.00%,2.50%	土体含水量、干密度和根径分别为 14.00%,1.40 g/cm <sup>3</sup> ,17.60±1.90 mm	5

根—土界面直剪试验采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪。试验中,根—土界面试样由根表面试样和土体试样两部分构成。

根表面试样制作过程如下:首先,对采集到的柠条锦鸡儿根段进行根径测量分级后,用裁纸刀将无明显损伤的柠条锦鸡儿根系表皮自根段木质部剥离备

用;然后,将相同根径级别的根系表皮用万能胶粘贴在直径和高度分别为 61.80 mm 和 20.00 mm 的木块表面,并用剪刀修整使根皮与圆木块边界吻合,操作过程如图 1a 和 1b 所示。制作土体试样时,按照试验设计配置好一定物理特性的土样并通过击实法进行重塑土制样,土样厚度 20.00 mm,直径 61.80 mm。进行直剪试验时,首先将根表面试样放置于直剪仪下盒,然后放置直剪仪上盒,并将配制好的土样放入直剪仪上盒。以上操作可保证直剪试验过程中剪切面

为根—土界面(图 1c)。胡崇礼<sup>[30]</sup>的研究表明,生长于西宁盆地且龄期为 18 a 的柠条锦鸡儿根系深度可达 7.0 m,按照土体干密度为 1.35 g/cm<sup>3</sup> 计算,在 7 m 深度土体自重应力为 94.5 kPa,故直剪试验 4 级垂直压力分别设置为 25,50,75,100 kPa。试验取剪切位移为 4 mm 时所对应的剪应力为根—土界面抗剪强度,剪切速率为 0.8 mm/min。试验过程按《土工试验规程》<sup>[31]</sup>中规定步骤进行。试验过程中,需确保根系轴线方向与剪切方向平行。



图 1 柠条锦鸡儿根—土界面直剪试验过程

Fig.1 Direct shear test process of root-soil interface of *C. korshinskii*

### 1.3 不同影响因素与根—土界面抗剪切特性灰色关联分析

本研究采用灰色关联分析法,通过计算土体含水量、干密度以及含盐量与根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度的关联度,对比分析 3 个因素对根—土界面抗剪特性的影响程度(因根径对根—土界面黏聚力、摩擦角和抗剪强度均未表现出显著性影响,因此,未对其进行灰色关联分析)。灰色关联分析法是通过灰色关联度来分析和确定系统诸因素间的影响程度或因素对系统主行为的贡献程度的一种方法<sup>[32]</sup>。关联度愈大,则表明该因素影响程度越大。本项研究所采用的关联度计算方法<sup>[32]</sup>如下:

(1) 设系统特征行为数据列和影响因素行为数据列。

$$X_0 = \{x_0(1), x_0(2) \cdots x_0(n)\} \quad (1)$$

$$X_i = \{x_i(1), x_i(2) \cdots x_i(n)\} \quad (2)$$

$(i=1, 2 \cdots m)$

式中: $n$  为每个数据列包含的数据个数; $m$  为影响因素数据列个数。

本项研究中,系统特征行为数据列  $X_0$  由直剪试验得到的根—土界面抗剪强度指标及抗剪强度数据组成,其中抗剪强度数据取竖向荷载为 100 kPa 条件下的根—土界面抗剪强度;影响因素数据列共 3 个,

即土体含水量、干密度和含盐量组成的数据列。

(2) 数据列的无量纲化。采用均值化方法对上述  $i+1$  个数据列进行量纲一化。

$$x'_i = \frac{x_i(k)}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k)} \quad (k=1, 2 \cdots n; i=1, 2 \cdots m) \quad (3)$$

式中: $x'_i$  为无量纲化后的第  $i$  个数据列中的第  $k$  个数据值; $x_i(k)$  为第  $i$  个原始数据列中的第  $k$  个数据值。

(3) 计算关联度。

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{0i}(k) \quad (k=1, 2 \cdots n; i=1, 2 \cdots m) \quad (4)$$

其中,

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (5)$$

$(k=1, 2 \cdots n; i=1, 2 \cdots m)$

式中: $\gamma_{0i}$  为系统特征行为数据列  $X_0$  与影响因素行为数据列  $X_i$  的关联度; $\xi_{0i}(k)$  为系统特征行为数据列与影响因素行为数据列每个对应数据之间的关联系数; $\Delta_{0i}(k)$  为无量纲化后的系统特征行为数据列与影响因素行为数据列中对应数据值的绝对差值,即  $\Delta_{0i}(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)|$ ;  $\Delta_{\min}$  为两级最小,  $\Delta_{\min} = \min_i \min_k |x'_0(k) - x'_i(k)|$ ;  $\Delta_{\max}$  为两级最大,  $\Delta_{\max}$

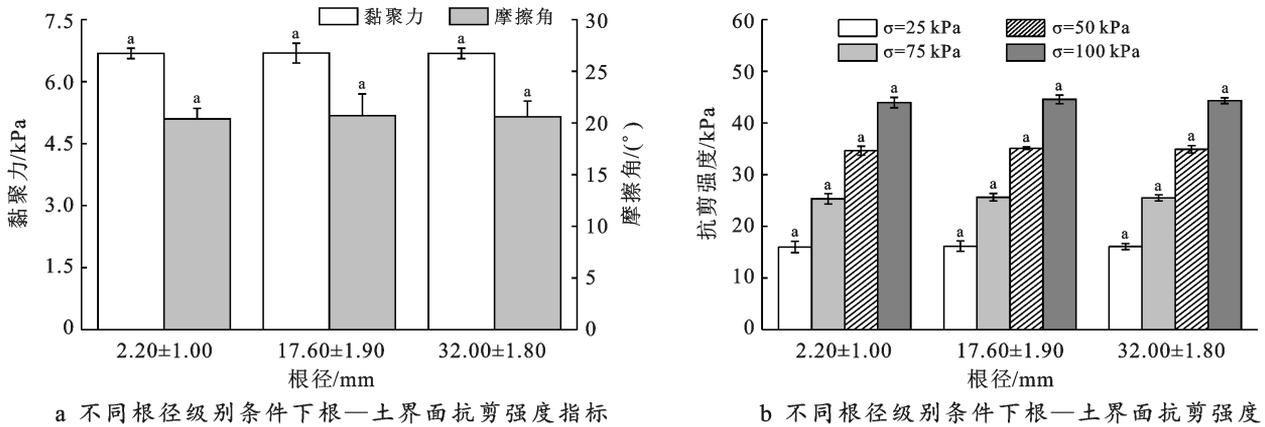
$= \max_i, \max_k = |x'_0(k) - x'_i(k)|$ ;  $\rho$  为分辨系数,  $\rho \in [0, 1]$ , 通常取 0.5。

## 2 结果与分析

### 2.1 根径对根—土界面剪切特性的影响

由图 2a 可知, 在  $2.20 \pm 1.00, 17.60 \pm 1.90, 32.00 \pm 1.80$  mm 3 个根径级别条件下, 柠条锦鸡儿根—土

界面黏聚力平均值分别为  $6.68 \pm 0.16, 6.69 \pm 0.01, 6.68 \pm 0.04$  kPa, 摩擦角平均值分别为  $20.40^\circ \pm 2.33^\circ, 20.70^\circ \pm 2.69^\circ$  和  $20.60^\circ \pm 1.80^\circ$ 。由方差分析可知, 不同根径级别根系所对应的根—土界面黏聚力和摩擦角均不存在显著性差异 ( $p > 0.05$ )。由图 2b 可知, 在不同垂直压力条件下, 根径变化对根—土界面抗剪强度亦无显著影响 ( $p > 0.05$ )。



注:图中小写字母表示在不同根径级别条件下,显著性水平为 0.05 时,根—土界面抗剪强度指标之间及抗剪强度之间的差异显著性分析结果(LSD 法)。

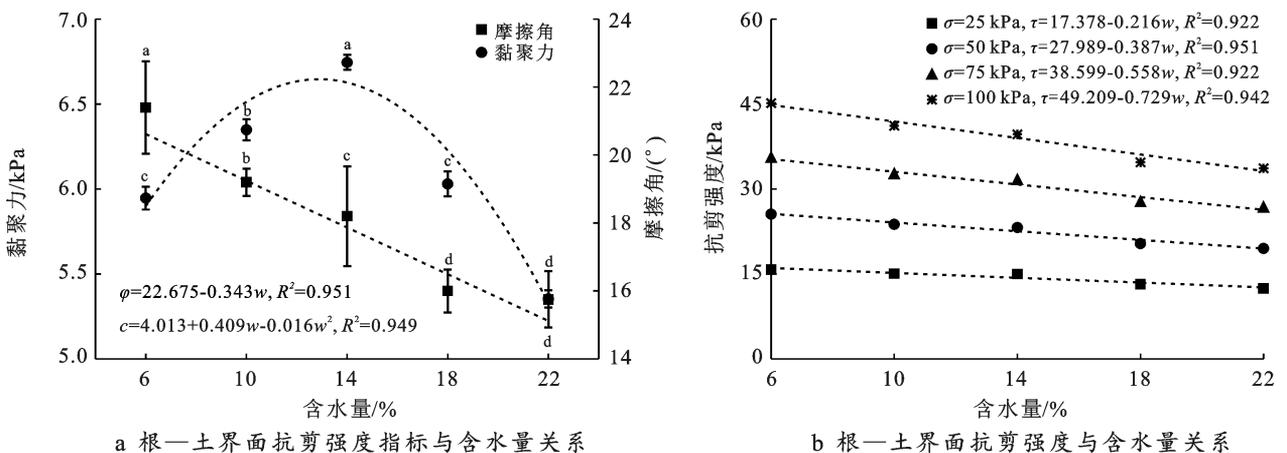
图 2 不同根径级别条件下根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度

Fig.2 Shear strength index and shear strength of root-soil interface under different root diameter

### 2.2 土体含水量对根—土界面剪切特性的影响

由图 3a 可知, 随着土体含水量由 6.00% 增长至 22.00%, 柠条锦鸡儿根—土界面黏聚力呈先增大后减小的变化趋势, 当土体含水量达到 14.00% 时, 黏聚

力达到峰值为 6.74 kPa。由回归分析可知, 二者间符合二次函数关系。随着土体含水量增大, 根—土界面摩擦角由  $21.40^\circ$  降低至  $15.75^\circ$ , 降幅为 26.40%, 根—土界面摩擦角呈线性函数降低趋势。



注:图中小写字母表示在不同含水量条件下,显著性水平为 0.05 时,根—土界面抗剪强度指标之间及抗剪强度之间的差异显著性分析结果(LSD 法)。

图 3 根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度与土体含水量关系

Fig.3 Relationship between shear strength index, shear strength of root-soil interface and moisture content of soil

由图 3b 可知, 根—土界面抗剪强度随着土体含水量的增大呈线性函数降低趋势。在 4 级垂直压力

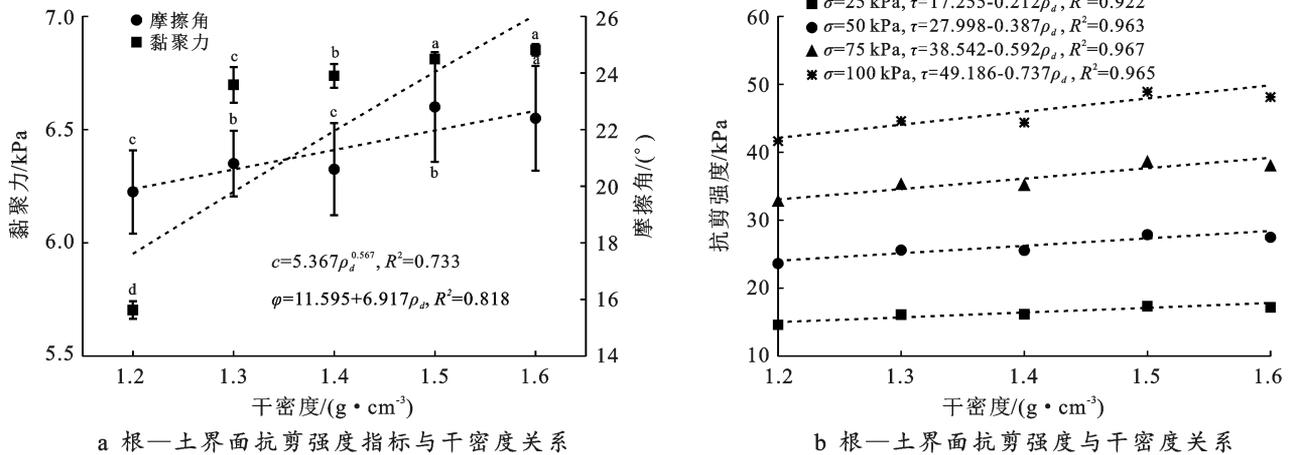
条件下, 随着土体含水量由 6.00% 增长至 22.00%, 根—土界面抗剪强度分别由 15.75, 25.55, 35.35,

45.16 kPa 降低至 12.42, 19.50, 26.58, 33.65 kPa, 降幅分别为 21.14%, 23.68%, 24.81% 和 25.49%。

### 2.3 土体干密度对根—土界面剪切特性的影响

由图 4a 可知, 随着土体干密度逐渐增大, 柠条锦鸡儿根—土界面黏聚力和摩擦角分别呈指数函数和线性函数增大趋势。随着土体干密度由 1.20 g/cm<sup>3</sup> 增长至 1.60 g/cm<sup>3</sup>, 根—土界面黏聚力由 5.70 kPa 增

大至 6.85 kPa, 增幅为 20.18%; 根—土界面摩擦角由 20.67° 增大至 21.67°, 增幅为 4.84%。由图 4b 可知, 根—土界面抗剪强度随着土体干密度的增大呈线性函数增大趋势。在 4 级垂直压力条件下, 随着土体干密度逐渐增大, 根—土界面抗剪强度分别由 14.60, 23.61, 32.16, 41.62 kPa 增大至 17.16, 27.48, 37.80, 48.11 kPa, 增幅分别为 17.53%, 16.39%, 17.54% 和 15.59%。



注: 图中小写字母表示在不同干密度条件下, 显著性水平为 0.05 时, 根—土界面抗剪强度指标之间及抗剪强度之间的差异显著性分析结果 (LSD 法)。

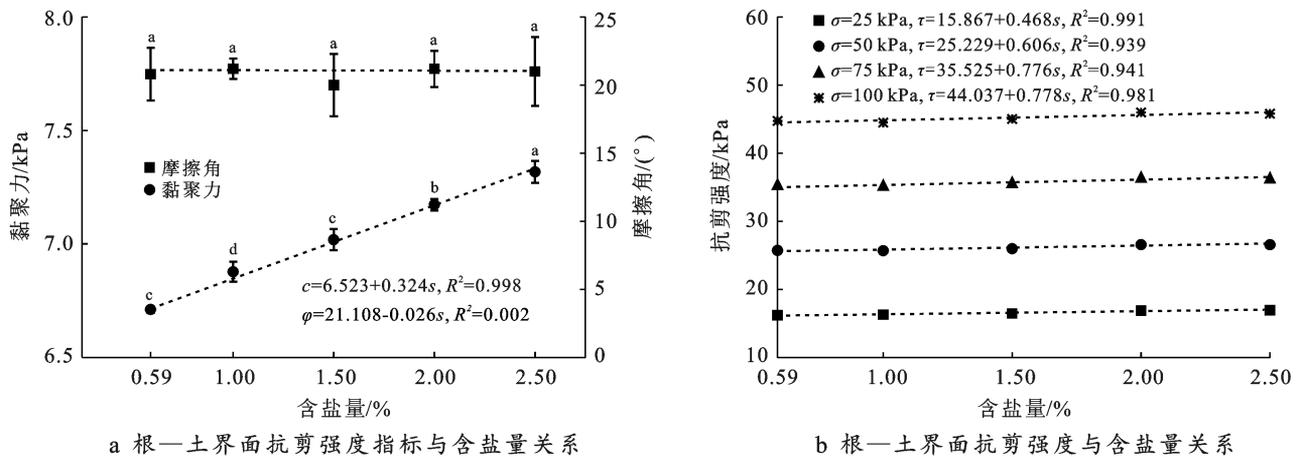
图 4 根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度与土体干密度关系

Fig.4 Relationship between shear strength index, shear strength of root-soil interface and dry density of soil

### 2.4 土体含盐量对根—土界面剪切特性的影响

由图 5a 可知, 随着土体含盐量的增大, 根—土界面黏聚力呈线性函数增大趋势。当土体含盐量由

0.59% 增长至 2.50%, 根—土界面黏聚力由 6.71 kPa 增大至 7.31 kPa, 增幅为 8.94%。土体含盐量与根—土界面摩擦角之间不存在显著性差异 ( $p > 0.05$ )。



注: 图中小写字母表示在不同含盐量条件下, 显著性水平为 0.05 时, 根—土界面抗剪强度指标之间及抗剪强度之间的差异显著性分析结果 (LSD 法)。

图 5 根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度与土体含盐量关系

Fig.5 Relationship between shear strength index, shear strength of root-soil interface and salt content of soil

由图 5b 可知, 根—土界面抗剪强度随着土体含盐量的增大呈线性函数增大趋势。在 4 级垂直压力条件下, 随着土体含盐量逐渐增大, 根—土界面抗

剪强度分别由 16.21, 25.72, 35.27, 44.74 kPa 增大至 16.93, 26.55, 36.17, 45.79 kPa, 增幅分别为 4.44%, 3.23%, 2.55% 和 2.35%。

## 2.5 不同影响因素与根—土界面抗剪切特性的关系

由表 2 可知,土体干密度与柠条锦鸡儿根—土界面黏聚力、摩擦角和抗剪强度之间的关联度最大,分别为 0.831 9, 0.922 5, 0.820 3, 是对根—土界面剪切特性影响相对最为显著的因素,其次为土体含水量和含盐量。

表 2 根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度与土体物理指标关联度

Table 2 Correlation degree between shear strength indexes, shear strength of root-soil interface and physical indexes of soil

关联度	土体物理性质指标		
	含水量/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含盐量/%
黏聚力/kPa	0.532 1	0.831 9	0.338 5
摩擦角/(°)	0.860 1	0.922 5	0.693 7
抗剪强度/kPa	0.536 4	0.820 3	0.343 8

## 3 讨论

在根径为 2.20±1.00~32.00±1.80 mm 范围内,柠条锦鸡儿根径变化对根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度不存在显著性的影响。由于试验条件相同,且根—土界面摩擦特性主要取决于根表面粗糙程度<sup>[33]</sup>。由此可知,在本项研究所选取的根径范围内,柠条锦鸡儿根表面粗糙程度并未发生明显变化。此外,张强等<sup>[34]</sup>通过单根拉拔摩阻试验分析了黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)根—土界面抗剪强度和根径的关系,结果表明根—土界面抗剪强度随根径增大而减小,与该项研究结果存在一定的差异性。以上结果表明不同植物根表面粗糙程度和根—土界面剪切特性与根径的关系存在差异性。

随着土体含水量增高,根—土界面黏聚力和摩擦角分别呈先增大后减小的二次函数关系变化趋势和线性函数降低趋势。以上结果与格日勒等<sup>[21]</sup>、张强等<sup>[34]</sup>和苏禹等<sup>[35]</sup>的研究结果相类似。土体含水量对根—土界面黏聚力的影响,可以利用非饱和土湿吸力与土体含水量的关系进行解释。水的表面张力使土颗粒之间、土颗粒与根表面之间产生湿吸力<sup>[36-37]</sup>,随着土体含水量的增大,湿吸力使土颗粒与土颗粒、土颗粒与根皮聚拢,增大了土颗粒之间以及土颗粒与根皮之间的黏结强度,使根—土界面黏聚力增大;而随着土体含水量的不断增大,土颗粒之间、土颗粒与根皮之间的湿吸力逐渐下降,导致相互之间的黏结强度降低,因此,根—土界面黏聚力呈先增大后减小的变化趋势。而摩擦角随着土体含水量的增大线性降低,

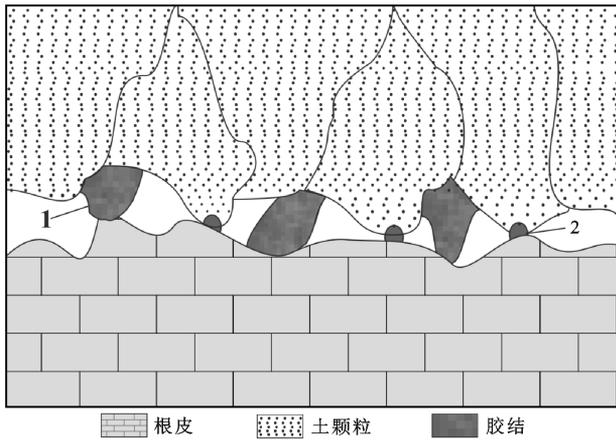
这是因为随着土体含水量的不断增大,土颗粒表层水化膜厚度相应增大,加之随着土体孔隙间自由水含量增大,使其在土颗粒间以及根—土界面间的润滑作用显著增强,故根—土界面的摩擦角和摩擦系数( $\tan\varphi$ )随之降低。此外,张文光等<sup>[38]</sup>研究发现,Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液润滑特性高于水。对于该项研究而言,随着土体含水量的不断增大,水所溶解的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 逐渐增多,且其在根—土界面的分布范围也随之增大,因此能够起到促进根—土界面摩擦角减小的作用。值得一提的是,田佳等<sup>[23]</sup>的研究结果表明,随着土体含水量的增加,根—土界面黏聚力和摩擦角均呈逐渐增长趋势。张乔艳等<sup>[39]</sup>亦获得类似的研究结果。以上研究结果与该项研究结果存在一定的差异性,究其原因,与试验土体类型存在差异性有关。

随着土体干密度的增大,根—土界面黏聚力和摩擦角均呈增长趋势。以上结果与宋维峰等<sup>[18]</sup>、邢会文<sup>[19]</sup>和郑力文等<sup>[40]</sup>的研究结果相类似。对于根—土界面抗剪强度指标而言,由于根系表面的不平整性,以及根皮表面土颗粒几何堆积,使得根—土界面存在不平整表面咬合作用所提供的表观黏聚力<sup>[41]</sup>。随着土体干密度的不断增大,根—土界面不平整表面咬合作用和摩擦作用均会增强,因此根—土界面黏聚力、摩擦角和抗剪强度均表现出逐渐增大的变化趋势。

黄土的黏聚力由原始黏聚力和固化黏聚力两部分组成<sup>[41]</sup>。其中,固化黏聚力主要由化学胶结作用所形成。对于根—土界面而言,其黏聚力也可以分为原始黏聚力和固化黏聚力。如图 6 所示,根—土界面存在一定的孔隙,在土体含水量一定的条件下,随着含盐量的增大,当土体中自由水达到饱和状态时,易溶盐会析出,并在根—土接触点和根—土界面孔隙中起到胶结作用,从而提高根—土界面黏聚力。由于根表面的不平整性,故根—土界面可能存在数量多且单个体积较大的孔隙,因此能够容纳较多的易溶盐,而这些析出的易溶盐可进一步起到胶结根—土界面的作用。故该项研究中,随着含盐量逐渐增大,根—土界面黏聚力呈线性增大趋势。对于不同土体含盐量条件下,根—土界面摩擦角之间不存在显著性差异的现象,尚无法给出合理的解释。

土体干密度是对柠条锦鸡儿根—土界面黏聚力、摩擦角和抗剪强度影响相对最为显著的土体物理指标,且土体干密度的增大对于根—土界面抗剪切特性具有积极的作用。土体含水量对根—土界面黏聚力和摩擦角的影响规律虽然存在差异,但总体而言,土体含水量增大对于根—土界面抗剪强度具有负面作用。此外,由于含水量的增大会导致土体中易溶盐溶

解,从而减弱易溶盐对根—土界面固化黏聚力的贡献。因此,土体含水量增大对于根—黄土界面剪切特性和根系固土作用是不利的<sup>[42-43]</sup>。在分析评价植物根系对黄土斜(边)坡浅层土体的防护效果时,必须充分考虑降雨入渗对根—土界面剪切特性的影响。



注:图中 1 指易溶盐在根—土界面孔隙内胶结;2 指易溶盐在根—土接触点处胶结。

图 6 根—土界面易溶盐胶结作用示意图

Fig.6 Schematic diagram of soluble salt cementation at the root-soil interface

## 4 结论

(1) 在根径为  $2.20 \pm 1.00 \sim 32.00 \pm 1.80$  mm 范围内,柠条锦鸡儿根径对根—土界面抗剪强度指标和抗剪强度无显著影响( $p > 0.05$ );随着土体含水量的增大,根—土界面黏聚力呈先增大后减小的变化趋势,当土体含水量达到 14.00% 时黏聚力达到峰值,且二者符合二次函数关系,根—土界面摩擦角和抗剪强度均呈线性函数降低趋势。

(2) 随着土体干密度的增大,柠条锦鸡儿根—土界面黏聚力呈指数函数增长趋势,根—土界面摩擦角和抗剪强度均呈线性函数增大趋势;随着土体含盐量的增大,根—土界面黏聚力和抗剪强度均呈线性函数增大趋势,而土体含盐量对根—土界面摩擦角无显著影响。

(3) 由灰色关联分析结果显示,在土体含水量、干密度和含盐量 3 个土体物理性质指标中,土体干密度对柠条锦鸡儿根—土界面黏聚力、摩擦角和抗剪强度的影响程度最大。

### [参 考 文 献]

- [1] 秦大河.中国西部环境演变评估(综合卷:中国西部环境演变评估综合报告)[M].北京:科学出版社,2002:4-6.
- [2] 孙莹,隋嘉,魏赛拉加,等.青藏高原隆升与西宁市地质灾害的关系研究[J].青海国土经略,2018(3):58-61.
- [3] 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.
- [4] 付江涛,李光莹,虎啸天,等.植物固土护坡效应的研究现状及发展趋势[J].工程地质学报,2014,22(6):1135-1146.
- [5] Rahimi A, Rahardjo H, Leong E C. Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011,137(5):483-491.
- [6] 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.
- [7] Ng C W W, Woon K X, Leung A K, et al. Experimental investigation of induced suction distribution in a grass-covered soil [J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 219-223.
- [8] Mickovski S B, Bengough A G, Bransby M F, et al. Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems [J]. European Journal of Soil Science, 2007,58(6):1471-1481.
- [9] 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.
- [10] 杨幼清,胡夏嵩,李希来,等.高寒矿区草本植物根系增强排土场边坡土体抗剪强度试验研究[J].水文地质工程地质,2018,45(6):105-113.
- [11] 胥子凡,易文.基于 Griffith 断裂准则的根系固土力学模型[J].中南林业科技大学学报,2021,41(6):167-174.
- [12] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977,41(5):843-849.
- [13] Ennos A R. The anchorage of leek seedlings: The effect of root length and soil strength [J]. Annals of Botany, 1990,65(4):409-416.
- [14] Schwarz M, Cohen D, Or D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2011,116(F2).
- [15] Schwarz M, Lehmann P, Or D. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes—from a bundle of roots to tree stands [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010,35(3):354-367.
- [16] Schwarz M, Cohen D, Or D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles [J]. Journal of Geophysical Research, 2010,115(F4): F04035.

- [17] Zhou Yue, Watts D, Li Yuhui, et al. A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 103(2/3):107-120.
- [18] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍.根系与土体接触面相互作用特性试验[J].*中国水土保持科学*, 2006, 4(2):62-65.
- [19] 邢会文.4种植物根—土界面摩阻特性研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学, 2009.
- [20] 朱宏慧.4类土根—土界面摩阻特性研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学, 2016.
- [21] 格日乐,刘艳琦,左志严,等.土壤水分对植物根—土界面相互作用特性的影响[J].*水土保持学报*, 2018, 32(1):135-140.
- [22] 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.
- [23] 田佳,曹兵,及金楠,等.花棒沙柳根与土及土—土界面直剪摩擦试验与数值模拟[J].*农业工程学报*, 2015, 31(13):149-156.
- [24] 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(S2):3445-3452.
- [25] 刘亚斌,余冬梅,付江涛,等.黄土区灌木柠条锦鸡儿根—土间摩擦力学机制试验研究[J].*农业工程学报*, 2017, 33(10):198-205.
- [26] Fu Jiangtao, Hu Xiasong, Li Xilai, et al. Influences of soil moisture and salt content on loess shear strength in the Xining Basin, northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(5):1184-1197.
- [27] 张中兴.黄土与黄土工程[M].青海 西宁:青海人民出版社, 1998:51.
- [28] 罗友弟.青海地区盐渍土分布规律及其盐胀溶陷机制探讨[J].*水文地质工程地质*, 2010, 37(4):116-120.
- [29] 徐志闻,刘亚斌,胡夏嵩,等.基于水分和原位电导率的西宁盆地盐渍土含盐量估算模型[J].*农业工程学报*, 2019, 35(5):148-154.
- [30] 胡崇礼.青海高原干旱、半干旱地区几个灌木树种抗性生理研究初报[J].*青海农林科技*, 1985(4):24-31.
- [31] 南京水利科学研究所.中华人民共和国行业标准:SL237-1999 土工试验规程[S].北京:中国水利水电出版社, 1999.
- [32] 孙玉刚.灰色关联分析及其应用的研究[D].江苏 南京:南京航空航天大学, 2007.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 苏禹,刘静,李昊,等.土壤饱和度对柠条根与两类土界面摩擦特性的影响[J].*内蒙古林业科技*, 2017, 43(2):1-5.
- [36] 汤连生,王思敬.湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J].*岩土工程学报*, 2000, 22(1):83-88.
- [37] 张鹏程,汤连生,邓钟尉,等.非饱和土湿吸力与含水量的定量关系研究[J].*岩土工程学报*, 2012, 34(8):1453-1457.
- [38] 张文光,刘维民,薛群基.(Ca, Mg)-Sialon 在几种含钠盐溶液润滑下的摩擦学特性[J].*摩擦学学报*, 2000, 20(1):14-17.
- [39] 张乔艳,唐丽霞,冉洁,等.多花木蓝和双荚决明根—土界面摩擦特性[J/OL].*长江科学院院报*, 2022:1-8. (2022-02-22).
- [40] 郑力文,刘小光,涂志华,等.土壤含水率与干密度对油松根—土界面摩擦性能的影响[J].*中国水土保持科学*, 2014, 12(6):36-41.
- [41] 李广信.高等土力学[M].2版.北京:清华大学出版社, 2016:138-202.
- [42] 朱锦奇,苏伯儒,王云琦,等.荆条根系的固土功能随土壤含水率的变化[J].*林业科学*, 2020, 56(6):202-208.
- [43] Liu Yabin, Hu Xiasong, Yu Dongmei, et al. Influence of the roots of mixed-planting species on the shear strength of saline loess soil [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(3):806-818.