

# 灌木柠条锦鸡儿根-黄土状盐渍土界面 相互作用力学特性

刘亚斌<sup>1,2,3</sup>, 王 芃<sup>2</sup>, 王 舒<sup>2</sup>, 石 川<sup>2</sup>, 朱海丽<sup>2,3</sup>, 李国荣<sup>2,3</sup>, 胡夏嵩<sup>2,3</sup>

(1.岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 武汉 430074; 2.青海大学 地质工程系,  
西宁 810016; 3.青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室, 西宁 810016)

**摘 要:**为了进一步探讨西宁盆地黄土区灌木植物根系固土护坡力学效应,以区内优势灌木植物柠条锦鸡儿为研究对象,开展不同土体密度、含水量、含盐量和根径单因素变化条件下的单根垂直拉拔试验,探讨和分析了上述因素对灌木植物根-土界面相互作用力学特性的影响和作用机理。结果表明:在垂直埋深为 25 cm 及其他因素恒定的情况下,随着土体密度由 1.20 g/cm<sup>3</sup> 增长到 1.60 g/cm<sup>3</sup>,单根最大抗拔出力由(28.60±2.83) N 增长至(114.33±7.17) N,呈指数函数增长趋势;随着土体含水量由 6.00% 增长到 22.00%,单根最大抗拔出力由(152.80±10.07) N 降低至(31.50±5.53) N,呈指数函数降低的变化趋势;随着土体含盐量由 0.59% 增长至 2.00%,单根最大抗拔出力呈现出先增大后减小的变化趋势,在含盐量为 1.00% 时,单根最大抗拔出力达到峰值(61.20±0.94) N,且二者关系符合二次函数关系;在根径为 2.74~9.57 mm 范围内,随着单根平均根径的逐渐增大,单根最大抗拔出力由 25.20 N 线性增长至 97.10 N。在此基础上,提出了垂直单根最大抗拔出力计算模型,并指出计算垂直单根最大抗拔出力所需的根-土界面综合黏聚力和综合摩擦角可通过根-土界面直剪试验获得。

**关键词:**植被护坡; 西宁盆地; 黄土状盐渍土; 灌木; 根-土界面相互作用; 单根最大抗拔出力

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2022)04-0127-06

## Mechanical Properties of the Interface Interaction Between *Caragana korshinskii* Kom. Root and Loess-Like Saline Soil

LIU Yabin<sup>1,2,3</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>, WANG Shu<sup>2</sup>, SHI Chuan<sup>2</sup>, ZHU Haili<sup>2,3</sup>, LI Guorong<sup>2,3</sup>, HU Xiasong<sup>2,3</sup>

(1.Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education,

Wuhan 430074, China; 2.Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016,

China; 3.Key Lab of Genozoic Resource & Env. in North Margin of the Tibetan Plateau, Xining 810016, China)

**Abstract:** In order to improve our knowledge of the mechanical effects of roots of shrub species on soil reinforcement and slope protection in loess region of Xining Basin, the dominant shrub *Caragana korshinskii* Kom. was selected as the study object, and the effects of the density, moisture content, and salt content of soil, and the root diameter on the friction characteristics of the root-soil interface and their mechanisms were analyzed and discussed via the single root vertical pull-out friction test (i. e., one factor was varied at a time). The results indicate that when the vertical buried depth was 25 cm and other factors are constant, as the density of soil increases from 1.20 g/cm<sup>3</sup> to 1.60 g/cm<sup>3</sup>, the maximum pull-out resistance of *C. korshinskii* single root exponentially increases from (28.60±2.83) N to (114.33±7.17) N; maximum pull-out resistance exponentially decreases from (152.80±10.07) N to (31.50±5.53) N, as the moisture content of soil increases from 6.00% to 22.00%; as the salt content of soil increases from 0.59% to 2.00%, the maximum pull-out resistance initially increases with salt content of soil and then decreases, and the turning point of the maximum pull-out resistance [(61.20±0.94) N] occurs when the salt content of soil is 1.00%, exhibiting a quadratic relationship; as the average root diameter increases from 2.74 mm to 9.57 mm, the maximum pull-

收稿日期: 2021-06-21

修回日期: 2021-07-21

资助项目: 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放资助项目(202005); 国家自然科学基金(42002283, 42062019); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905)

第一作者: 刘亚斌(1987—), 男, 青海西宁人, 博士, 副教授, 主要从事环境岩土工程与岩土体工程稳定性分析研究。E-mail: liuyabincug@163.com

通信作者: 胡夏嵩(1965—), 男, 河南开封人, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程与地质灾害及其防治研究。E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

out strength linearly increases from 25.20 N to 97.10 N. On these bases, a calculation model of the maximum pull-out resistance of a single vertical root is defined. In addition, the comprehensive cohesion and friction angle between the root-soil interface which requires to calculate the maximum pullout resistance of the vertical single root can be obtained via the direct shear test of the root-soil interface.

**Keywords:** slope protection with vegetation; Xining Basin; saline loess soil; shrub; root-soil interface interaction; maximum pull-out resistance of single root

植物通过力学效应和水文效应两方面的作用,能够有效地控制水土流失、浅层滑坡等地质灾害现象的发生<sup>[1-2]</sup>。因植物根系较土体而言具有显著较高的抗拉强度,故当含有植物根系的土体受到剪切或张拉作用时,在根-土界面摩阻力的作用下,根系能够将土体内部剪切面上的剪应力和张裂面上的张应力转化为自身所承受的拉应力,并再次通过根-土界面摩阻力将拉应力传递至稳定土体,从而起到增强土体抗剪强度和增加边坡稳定性的效果<sup>[3-4]</sup>。因此,根-土界面相互作用力学特性在很大程度上决定着植物根系的固土护坡效果<sup>[5-6]</sup>。

有关根-土界面相互作用力学特性研究方面,格日乐等<sup>[6]</sup>在开展柠条(*Caragana microphylla* Lam.)等6种植物单根抗拉力学特性、根-土复合体抗剪特性及根-土界面摩擦特性等研究的基础上,通过主成分分析评价了根系固土主要力学因子,研究结果指出在春季土壤干旱时期土壤孔隙水不承压和夏季暴雨后土壤含水量很高土壤孔隙水承压两种自然条件下,根-土界面摩擦特性均为影响根系固土的首要主导力学因子。Ennos<sup>[7]</sup>指出当根系被拔出土体时其拉应力会通过根-土间的剪应力传递给土体,且单根拉应力的分布取决于土体和根的刚度,根的破坏模式则取决于土体强度和根-土界面的黏结力。Zhou<sup>[8]</sup>和刘跃明<sup>[9]</sup>等把牵拉土壤中的根时阻碍土体与根相互滑动的作用因素统称为根-土黏合键,并进一步将其分为黏结型根-土黏合键、摩擦型根-土黏合键和剪切型根-土黏合键,同时提出可假设摩擦型根-土黏合键的破坏实际上是根-土界面上微观土层被破坏。邢会文<sup>[10]</sup>采用电子显微镜观察图像定量评价了沙地柏(*Sabina vulgaris* Ant.)和沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et C. Y. Yang)两种植物在不同根径级别条件下表面凹凸度及其差异性。刘亚斌等<sup>[11]</sup>采用扫描电镜观察方法分析了生长期为2 a的灌木植物柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)和霸王(*Zygo-phyllum xanthoxylon* maxim.)根表面、与根接触土体表面、未与根接触土体表面的微观结构特征及其对根-土界面摩擦特性的影响,研究结果表明灌木根生长过程中对与其接触的土体表面存在平整化作用,平

整化后的与根接触土体表面粗糙度显著降低,根-土界面摩擦特性主要取决于根表面粗糙程度。

在根-土界面相互作用力学特性影响因素研究方面,宋维峰<sup>[12]</sup>、格日乐<sup>[13]</sup>、邢会文<sup>[14]</sup>和苏禹<sup>[15]</sup>等通过根-土界面直剪试验,研究了不同植物(灌木和乔木)种类、法向应力、土体密度、土体含水量和土质类型对根-土界面摩擦特性的影响。曹云生<sup>[16]</sup>、刘小光<sup>[17]</sup>和郑力文<sup>[18]</sup>等则进一步通过单根垂直拉拔试验系统地研究了加载速率、埋深、根径对油松(*Pinus tabulaeformis*)和白桦(*Betula platyphylla*)等木本植物根-土界面摩擦特性的影响,并通过单根拉拔力-位移曲线,探讨了根系被拔出土体的力学过程。

在根-土界面相互作用力学模型方面,解明曙<sup>[5]</sup>从根系与黄土界面摩擦特性分析着手,提出了基于全株拉拔试验的根-土间综合静摩擦系数计算方法,即综合 $\mu_x$ 法,通过该方法得出生长期为5~34 a的乔木白榆(*Ulmus pumila*)根-土间静摩擦系数为0.383~0.775。Schwarz等<sup>[19]</sup>建立了考虑根-土界面摩擦过程的Root Bundle Model(RBM)模型,通过该模型能够获得应变控制变形过程中单根或根系的拉拔力-位移曲线,从而描述单根或根系在被拔出土体过程中的力学行为。周云艳<sup>[4]</sup>将根系拔出土体的过程看作根系与其周围土体介质间的剪切滑移过程,指出根-土界面的抗剪强度由界面摩擦作用和黏结作用耦合而成,在此基础上提出了考虑根-土界面黏聚力和摩擦系数的根系极限抗拔出力计算公式。

研究区西宁盆地处于青藏高原东北部与黄土高原西缘交接地带,盆地及周边普遍发育有黄土状盐渍土<sup>[20-21]</sup>,且水土流失、滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害频繁发生<sup>[22]</sup>。灌木植物是西宁盆地及其周边地区主要的天然和人工植被类型,同时亦为区内生态恢复、水土保持和固土护坡的优势植物。目前,有关西宁盆地优势灌木植物固土护坡力学特性研究方面主要集中在单根抗拉力学特性<sup>[23]</sup>、根-土复合体力学特性<sup>[24]</sup>、根系原位抗拔出特性等方面<sup>[25]</sup>,而有关区内灌木植物根-土界面相互作用力学特性的研究还相对较少。此外,已有的有关根-土界面相互作用力学特性影响因素方面的研究,多以土体密度和含水量

等土体物理特性指标为因素开展相关研究,而有关土体含盐量对根-土界面相互作用力学特性影响规律方面的研究还鲜有报道。基于此,本项研究通过单根拉拔试验,较为系统性地评价了土体密度、含水量、含盐量以及根径对单根最大抗拔出力的作用规律,在此基础上提出垂直单根最大抗拔出力计算模型,并结合拉拔试验结果探讨上述因素对根-土界面相互作用力学特性及单根最大抗拔出力的影响机理。本项研究对于探讨黄土区灌木植物根系固土护坡力学机理,以及科学有效地防治黄土状盐渍土地区水土流失、浅层滑坡等地质灾害现象具有理论意义和实际应用价值。

1 试验材料与方法

该研究选取西宁盆地常见的护坡灌木植物柠条

锦鸡儿根系作为试验材料。柠条锦鸡儿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,主根深,侧根多,属主根侧根均衡发育型灌木<sup>[11]</sup>。柠条锦鸡儿具有很强的抗寒、抗旱、耐风蚀能力,能在高寒地区的沙地和土坡中正常生长<sup>[26]</sup>。该种为寒冷和干旱地区水土保持、稳定边坡的优良灌木<sup>[11]</sup>。该项研究中,根系于 2020 年 9 月采集自西宁市湟中区顾家岭村东侧村道失稳路堑边坡处,地理坐标为东经 101°43′19″,北纬 36°44′24″。因夏季降雨导致该处部分黄土边坡局部失稳,使生长于坡顶且邻近坡面的柠条锦鸡儿根系暴露出土体,便于采集。在野外将柠条锦鸡儿根系处理成长度为 40~50 cm 的顺直根段,然后带回实验室备用。试验所需黄土状盐渍土试样采集自西宁市长岭沟,土体物理特性指标详见表 1。土体试样取回实验室后,烘干碾散后过 2 mm 筛备用。

表 1 土体物理特性指标

土体物理 特性指标	含盐量/%	液限 ( $w_L$ )/%	塑限 ( $w_p$ )/%	土粒组成/%			不均匀系数 ( $C_u$ )	土质类型	盐渍土 类型
				0.25~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm			
数值	0.59±0.11	24.60	17.20	30.10	62.60	7.30	3.90	粉土	硫酸盐渍土

该项研究以土体密度、含水量、含盐量和根径 4 种因素作为变量,开展单因素变化条件下的单根拉拔试验。开展不同土体密度条件下的单根拉拔试验时,设置 5 个土体密度梯度分别为 1.20,1.30,1.40,1.50,1.60 g/cm<sup>3</sup>,土体含水量和含盐量分别恒定为 14.00%和 0.59%;开展不同土体含水量条件下的单根拉拔试验时,设置 5 个土体含水量梯度分别为 6.00%,10.00%,14.00%,18.00%,22.00%,土体密度和含盐量分别恒定为 1.40 g/cm<sup>3</sup>,0.59%;开展不同土体含盐量条件下的单根拉拔试验时,设置 4 个土体含盐量梯度分别为 0.59%,1.00%,1.50%,2.00%,土体密度和含水量分别恒定为 1.40 g/cm<sup>3</sup>,14.00%。试验采用无水硫酸钠(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)作为配置不同含盐量土体试样的易溶盐添加材料。配置时,直接在最低含盐量梯度烘干土体中定量添加无水硫酸钠(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)粉末,使土体含盐量达到试验要求。以上试验中,每个条件下的拉拔试验均选择平均根径相近似的 3 根单根根段重复 3 次,并以 3 次试验平均值作为该试验条件下的单根最大抗拔出力进行数据分析。开展不同根径条件下的单根拉拔试验时,土体含水量、含盐量和密度分别恒定为 14.00%,0.59%和 1.40 g/cm<sup>3</sup>,共选择 19 根平均根径范围为 2.74~9.57 mm 的根段进行试验。上述试验中,单根平均根径指入土段根段每 5 cm 根径测量值的平均值,采用游标卡尺测定。

单根拉拔试验开始前,首先将提前配置好的一定含水量和含盐量的土体试样按质量分成 5 份,然后

采用分层击实法将各份土体依次置入试验桶内(试验桶直径 35 cm、高为 35 cm),控制试验桶内土体试样深度为 25 cm。击实过程中,每层土体厚度控制在(5.00±0.30) cm。在将上一层土体放入试验桶之前,需使用刮刀刨毛下一层土体表面。为使土体和根段充分接触,在试验桶内置入土体试样的过程中,亦同时置入根段,具体操作方法如下:在最下一层土体置入试验桶的同时,将根段放置在试验桶中心,根段底部接触试验桶底面,然后压实根周土体至设定高度,再依次置入上层土体。上述试样准备过程中需保持根段处于铅直状态。单根拉拔试验采用的拉拔仪器为 HP-K 型数显式推拉仪,仪器最大负荷 1 kN,精度±0.50%,分度值为 0.000 1 kN。拉拔试验过程中,为尽量避免人为误差,所有试验均由同一人完成根系拉拔操作。当根段发挥出最大抗拔出力时结束拉拔试验。

2 结果与分析

2.1 单根最大抗拔出力与土体密度的关系

由图 1 可知,在根径为(3.97±0.19) mm,土体含水量(14.00%)和含盐量(0.59%)一定的情况下,随着土体密度由 1.20 g/cm<sup>3</sup>增长至 1.60 g/cm<sup>3</sup>,单根最大抗拔出力由(28.60±2.83) N 增长至(114.33±7.17) N,增幅可达 299.76%。随着土体密度的逐渐增大,单根最大抗拔出力呈指数函数增长趋势。由相关分析可知,单根最大抗拔出力与土体密度的相关系



数为 0.93,属于高度正相关关系<sup>[27]</sup>。此外,有关植物单根抗拔出力与土体密度的关系,与本项研究结果相类似的相关研究主要表现为:郑力文等<sup>[18]</sup>通过单根垂直拉拔试验研究了土体干密度对油松根-土界面摩擦特性的影响,试验结果表明在土体含水量为 12.72%的情况下,随着土体干密度由 1.32 g/cm<sup>3</sup> 增长到 1.52 g/cm<sup>3</sup>,单根最大抗拔出力呈逐渐增大的变化趋势。李东嵘<sup>[28]</sup>通过垂直拉拔试验得出在土体含水量为 9.89%,土体密度由 1.25 g/cm<sup>3</sup> 增长到 1.52 g/cm<sup>3</sup> 条件下,紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)单根最大抗拔出力均随着土体密度的增大呈正幂函数关系。

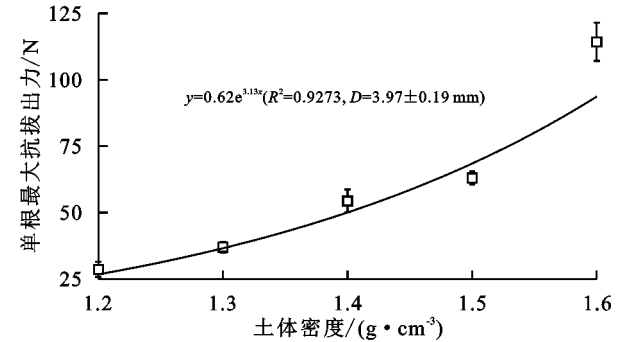


图 1 单根最大抗拔出力与土体密度关系

2.2 单根最大抗拔出力与土体含水量的关系

由图 2 可知,在根径为(4.42±0.16) mm,土体密度(1.40 g/cm<sup>3</sup>)和含盐量(0.59%)一定的情况下,当土体含水量由 6.00% 增长到 22.00% 时,单根最大抗拔出力由(152.80±10.07) N 降低至(31.50±5.53) N,降幅达到 79.38%。随着土体含水量的逐渐增大,单根最大抗拔出力呈指数函数降低趋势。由相关分析可知,单根最大抗拔出力与土体含水量的相关系数为 -0.96,属于高度负相关关系<sup>[27]</sup>。

有关植物单根抗拔出力与土体含水量的关系,与本项研究结果相类似的相关研究主要表现为:张兴玲等<sup>[29]</sup>通过水平拉拔试验研究了柠条锦鸡儿根系最大抗拔出力与黄土含水量的关系,试验结果表明,在不同的垂直压力条件下(1.22~51.22 kN),随着土体含水量的增加,根系最大抗拔出力呈逐渐降低趋势。周霞<sup>[30]</sup>通过原位拉拔试验研究了紫花苜蓿单根抗拔出力与黄土含水量的关系,结果表明单根最大抗拔出力随土体含水量的增大呈幂函数减小趋势。此外,曹云生<sup>[16]</sup>、郑力文<sup>[18]</sup>和杨闻达<sup>[31]</sup>等学者的研究指出,随着土体含水量的逐渐增大,单根最大抗拔出力呈先增大后减小的变化趋势; Mickovski 等<sup>[3]</sup>的试验研究亦得到在含水量较高的土体中的单根最大抗拔出力高于干土的结果。以上研究成果与本项研究成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。以上学者的试验采用的是砂壤土<sup>[16,18]</sup>、砂土<sup>[3]</sup>或黏土<sup>[31]</sup>,而本项研究中采用的黄土状盐渍土土质类型为粉土。在不同的土体类型中,水分的分布特征及其对土体物理力学特性的影响存在差异性,因此会导致根-土界面相互作用力学过程的差异。

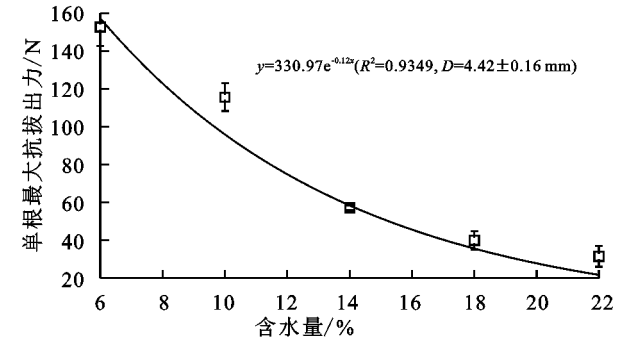


图 2 单根最大抗拔出力与土体含水量关系

2.3 单根最大抗拔出力与土体含盐量的关系

由图 3 可知,在根径为(4.42±0.16) mm,土体密度和土体含水量恒定为 1.40 g/cm<sup>3</sup>, 14.00% 时,随着土体含盐量由 0.59% 增长至 2.00%,单根最大抗拔出力呈现出先增大后减小的变化趋势,且在含盐量为 1.00% 时,单根最大抗拔出力达到峰值,为(61.20±0.94) N。单根最大抗拔出力与土体含盐量的关系符合二次函数关系。

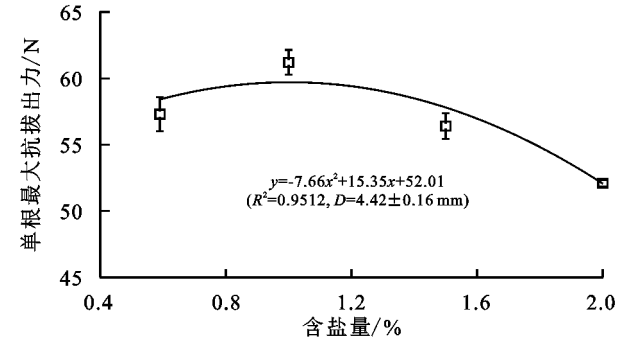


图 3 单根最大抗拔出力与土体含盐量关系

2.4 单根最大抗拔出力与根径的关系

单根最大抗拔出力和根径的关系见图 4。由图 4 可知,在土体密度、含水量和含盐量分别为 1.40 g/cm<sup>3</sup>, 14.00% 和 0.59% 时,在根径为 2.74~9.57 mm 范围内,随着单根根径逐渐增大,单根最大抗拔出力表现出逐渐增大的变化趋势,由 25.20 N 增长到 97.10 N,二者间呈线性函数关系。通过进一步开展相关分析可知,单根最大抗拔出力与根径的相关系数为 0.78,属于中度正相关关系<sup>[27]</sup>。此外,有关植物单根抗拔出力与根径的关系,与本项研究结果相类似的相关研究主要表现为:曹云生等<sup>[16]</sup>采用不同根径的油松单根开展了单根拉拔试验,结果表明随着单根根径的增大,单根最大抗拔出力呈线性增长趋势。

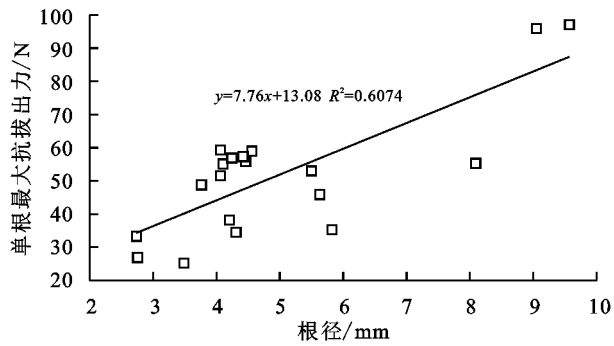


图 4 单根最大抗拔出力与根径关系

### 3 垂直单根最大抗拔出力计算模型

诸多研究结果表明,根-土界面摩擦特性服从摩尔-库仑理论<sup>[10,12]</sup>,即根-土界面抗剪强度由黏聚力和界面摩擦角耦合构成<sup>[4]</sup>。结合已有的研究<sup>[4,8-9]</sup>,本研究指出对于垂直单根,可将单根最大抗拔出阻力主要来源分为以下 5 种类型,即:根-土界面化学黏着力、表观黏聚力、静摩擦力、动摩擦力,以及根周土体抗剪强度。其中,根-土界面化学黏着力是指在根系生长过程中根表面分泌的化学物质(包括有机酸、糖类、氨基酸和高分子分泌物等)以及土体中易溶盐和有机质等成分所产生的胶凝作用;根-土界面表观黏聚力则包括土颗粒和根表面接触位置毛细水表面张力作用所引起的湿吸力<sup>[32]</sup>和因根-土界面凹凸不平相互嵌固咬合所引起的强度<sup>[33]</sup>;根-土界面静摩擦力由根-土界面间正应力和界面粗糙程度决定,当根-土间剪应力超过最大静摩擦力时,根-土间发生相对滑动,根-土界面摩擦力由静摩擦力转化为动摩擦力。此外,当局部根段根-土界面上的剪切强度高于根周土体抗剪强度时,根周土体会先于根-土界面发生剪切破坏,故该部分根段上的抗拔出阻力实际上由土体抗剪强度提供,这也是试验中部分被拔出土体单根表面附着有土体的原因。上述抗拔出阻力中,根-土界面化学黏着力、表观黏聚力,以及局部根周土体黏聚力组成了根-土界面间的实际黏聚力;而根-土间的静摩擦强度和土体内摩擦强度则贡献了根-土界面间的静摩擦阻力。

在上述理论分析的基础上,垂直单根最大抗拔出力计算模型推导过程如下:首先,由于根-土间的实际黏聚力由根-土界面化学黏着力、表观黏聚力,以及局部根周土体黏聚力组成,为便于简化计算,本文将根-土间的实际黏聚力定义为根-土间综合黏聚力,以  $c_{rs}$  表示。同理定义  $\varphi_{rs}$  为根-土间综合摩擦角,表示根-土间的静摩擦力对应的摩擦角和根周土体内摩擦角的综合作用值。根-土间摩擦强度可由式(1)表示。

$$\tau_{rs} = c_{rs} + \sigma_{rs} \tan \varphi_{rs} \quad (1)$$

式中: $\tau_{rs}$ 为根-土界面抗剪强度(kPa); $c_{rs}$ 为根-土间综

合黏聚力; $\sigma_{rs}$ 为作用在根-土界面上的法向应力; $\varphi_{rs}$ 为根-土间综合摩擦角( $^{\circ}$ )。

对于垂直生长于土体中的单根而言,其表面所承受正应力来自土体静止土压力作用,因此,埋深为  $z$  的根-土界面单元上的抗剪强度可表示为:

$$\tau_{rs} = c_{rs} + K_0 \gamma z \tan \varphi_{rs} \quad (2)$$

式中: $K_0$ 为静止土压力系数; $\gamma$ 为土体重度( $\text{kN/m}^3$ ); $z$ 为根-土界面单元距地表距离(m)。

假设根系垂直埋置深度为  $l$ ,根径为  $D$ ,则单根最大抗拔出力计算模型如下[式(3)是在周云艳<sup>[4]</sup>提出的根系极限抗拉拔力计算模型基础上,考虑静止土压力作用的条件下提出的]:

$$F_{\max} = \int_0^l \tau_{rs} \pi D dz = \int_0^l (c_{rs} + \tan \varphi_{rs} K_0 \gamma l) \pi D dz = c_{rs} \pi D l + \tan \varphi_{rs} K_0 \pi D \gamma l^2 / 2 \quad (3)$$

在已知根系垂直埋置深度的前提下,通过式(3)计算单根最大抗拔出力时存在两个未知量,即根-土间综合黏聚力和根-土间综合摩擦角。由于根-土界面剪切过程的复杂性,因此很难定量确定根-土界面黏聚力、摩擦角和根周土体黏聚力、内摩擦角在根-土间综合黏聚力和根-土间综合摩擦角中的分配比例。因此,通过根-土界面直剪试验获得根-土间综合黏聚力和根-土间综合摩擦角,并以此作为单根最大抗拔出力计算参数则较为合理。公式(3)使用的前提是根-土界面摩阻力与拉拔力满足静力平衡条件,不考虑根系与土体的弹塑性特性。

### 4 讨论

研究结果表明,在土体含水量、含盐量和根径一定的条件下,随着土体密度的增大,单根最大抗拔出力随之增大。这是因为随着土体密度增大,土体孔隙度降低,颗粒间的排列更为紧密,嵌固更为牢固,土体自身抗剪强度亦随之提高。同时,根-土界面上根表面和土颗粒接触面积会增大。因此,根-土界面咬合作用更为有效,表观黏聚力和静摩擦力均增大,故单根最大抗拔出力表现出随土体密度增大指数函数增长的趋势。

该项研究结果表明,在土体密度、含盐量和根径一定的情况下,随着土体含水量的增加,单根最大抗拔出力呈指数函数降低趋势。这是因为该项研究采用重塑土试样进行试验,因此土体孔隙类型主要以粒间小孔隙为主,由于在含水量较低(该项试验为 6.00%)的情况下,小孔隙处颗粒以及土颗粒与根表面接触相对紧密,故土颗粒间和根-土界面间由易溶盐黏结所形成的黏结力和毛细水表面张力作用所引起的湿吸力相对较大。随着土体含水量的增高,湿吸力下降的同时由于可溶盐的溶解,导致根-土界面黏聚力和土体

黏聚力均降低<sup>[34]</sup>,其结果是根-土间综合黏聚力降低。与此同时,随着含水量增加,黏土颗粒表面结合水层厚度会增大,且根-土界面间和颗粒间会产生自由水,并进一步溶解土体中的易溶盐并形成胶体溶液,在根-土界面和土颗粒之间产生润滑作用,从而降低其摩擦特性,导致根-土界面摩擦强度降低。因此,总体而言,在其他条件一定的条件下,随着土体含水量增加,单根最大抗拔出力逐渐降低。

含盐量对单根最大抗拔出力的影响,与土体中易溶盐相态变化存在关系。该项研究中,在土体含水量(14.00%)、密度(1.40 g/cm<sup>3</sup>)和根径一定的条件下,当土体含盐量相对较低时,土体中的易溶盐会溶解于土颗粒间的自由水中,以液相的形式存在;随着含盐量进一步增大,当超过溶解度时,易溶盐就会析出形成固态颗粒,这些固态易溶盐颗粒会在根-土界面和土体颗粒之间起到胶结和嵌固作用,可提高根-土界面和土体的黏聚力和摩擦特性,从而提高单根最大抗拔出力;而当含盐量进一步增大时,随着更多的固体易溶盐形成,当易溶盐颗粒结晶应力超过根-土界面和土颗粒间的抗拉强度时,就会破坏根-土界面和土颗粒间的黏结和摩擦作用,从而使单根最大抗拔出力降低。

由公式(3)可知,无论是根-土界面间的黏结强度还是摩擦强度,均与根径呈正比。因此,在土体密度、含水量、含盐量和埋深一定的情况下,随着根径的增大,单根最大抗拔出力呈线性增大的变化趋势。

## 5 结论

(1) 随着土体密度、含水量、含盐量的增大,单根最大抗拔出力分别呈指数函数增长、指数函数降低和先增大后减小的二次函数关系;随着单根根径的逐渐增大,单根最大抗拔出力呈线性增大的变化趋势。

(2) 垂直单根最大抗拔出阻力主要来源于根-土界面化学黏着力、表观黏聚力、静摩擦力、动摩擦力,以及根周土体抗剪强度;根-土界面化学黏着力、表观黏聚力,以及局部根周土体黏聚力组成了根-土间的实际黏聚力,而根-土间的静摩擦强度和土体内摩擦强度则贡献了根-土界面间的静摩擦阻力。可通过根-土界面直剪试验获得根-土界面综合黏聚力和综合摩擦角。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张倬元.滑坡防治工程的现状与发展展望[J].地质灾害

与环境保护,2000,11(2):89-97.

- [3] 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.
- [4] 周云艳.植物根系固土机理与护坡技术研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2010.
- [5] 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.
- [6] 格日乐,刘艳琦,左志严,等.根系固土主要力学因子的主成分分析[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2015,36(6):39-47.
- [7] Ennos A R. The mechanics of anchorage in seedlings of sunflower, *Helianthus annuus* L.[J]. *New Phytologist*, 1989,113(2):185-192.
- [8] Zhou Y, Watts D, Li Y, 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):107-120.
- [9] 刘跃明,张云伟,周跃.侧根的根土粘合键模型及牵引效应测试系统[J].南京林业大学学报:自然科学版,2003,27(1):50-54.
- [10] 邢会文.4种植物根-土界面摩阻特性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 邢会文,刘静,王林和,等.柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性[J].摩擦学学报,2010,30(1):88-91.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.DOI:10.1029/2009JF001603.



- 的作用研究[J].水生生物学报,2007,31(6):886-890.
- [12] 罗征鹏,熊康宁,许留兴.生物土壤结皮生态修复功能研究及对石漠化治理的启示[J].水土保持研究,2020,138(1):400-410.
- [13] 王学全,高前兆,卢琦.内蒙古河套灌区水资源高效利用与盐渍化调控[J].干旱区资源与环境,2005,19(6):118-123.
- [14] 侯玉明,王刚,王二英,等.河套灌区盐碱土成因、类型及有效的治理改良措施[J].现代农业,2011(1):92-93.
- [15] 李合生.植物生理生化试验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [16] Garcia-Pichel F, Castenholz R W. Characterization and biological implications of scytonemin, a cyanobacterial sheath pigment[J]. Journal of Phycology, 2010, 27(3):395-409.
- [17] 刘凤枝,李玉浸.土壤监测分析技术[M].北京:化学工业出版社,2015.
- [18] Sun, Q Y, An, et al. Chemical properties of the upper tailings beneath biotic crusts[J]. Ecological Engineering, 2004,23(1):47-53.
- [19] 陈心想,耿增超,王森,等.施用生物炭后塬土土壤微生物及酶活性变化特征[J].农业环境科学学报,2014,33(4):751-758.
- [20] Xie, Z M, Liu, Y D, Hu, C X, et al. Relationships between the biomass of algal crusts in fields and their compressive strength[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007,39(2):567-572.
- [21] 张元明.荒漠地表生物土壤结皮的微结构及其早期发育特征[J].科学通报,2005,50(1):42-47.
- [22] 周小泉,刘政鸿,杨永胜,等.毛乌素沙地3种植被下苔藓结皮的土壤理化效应[J].水土保持研究,2014,21(6):340-344.
- [23] Rai A K, Sharma N K. Phosphate metabolism in the cyanobacterium *anabaena doliolum* under salt stress[J]. Current Microbiology, 2006,52(1):6-12.
- [24] Singh J S, Kumar A, Rai A N, et al. Cyanobacteria: A precious bio-resource in agriculture, ecosystem, and environmental sustainability[J]. Frontiers in Microbiology, 2016,7.D0I:10.3389/fmicb.2016.00529.
- [25] Kaushik B D. Developments in cyanobacterial biofertilizer[J]. Proceedings of the Indian National Science Academy, 2014,80(2):379-388.
- [26] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India[J]. Applied Soil Ecology, 2006,31(3):220-227.
- [27] 黄哲,曲世华,白岚,等.不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分及酶活性的影响[J].水土保持研究,2017,24(4):290-295.
- [28] 赵军,耿增超,张雯,等.生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤酶活性的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(9):123-130.

(上接第132页)

- [20] 鹿化煜,王先彦, Vandenbergh J. 青藏高原东北部地貌演化与隆升[J].自然杂志,2014,36(3):176-181.
- [21] 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.
- [22] 孙毅.西宁市黄土滑坡发育特征及稳定性分析:以小西山滑坡为例[D].西安:长安大学,2013.
- [23] 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.
- [24] 胡夏嵩,李国荣,朱海丽,等.寒旱环境灌木植物根-土相互作用及其护坡力学效应[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):613-620.
- [25] 周林虎,胡夏嵩,刘昌义,等.西宁盆地黄土区4种灌木原位拉拔试验[J].水土保持研究,2019,26(5):236-242.
- [26] 牛西午,丁玉川,张强,等.柠条根系发育特征及有关生理特性研究[J].西北植物学报,2003,23(5):860-865.
- [27] 谢蕾蕾,宋志刚,何旭洪.SPSS统计分析实用教程[M].北京:人民邮电出版社,2013.
- [28] 李东嵘.黄土区紫花苜蓿与沙棘根系拉拔受力机理研究[D].太原:太原理工大学,2020.
- [29] 张兴玲,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区护坡灌木柠条锦鸡儿根系拉拔摩擦试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3739-3745.
- [30] 周霞.黄土区紫花苜蓿根土复合体摩擦锚固试验研究[D].太原:太原理工大学,2019.
- [31] 杨闻达,王桂尧,常靖美,等.主直根系拉拔力的室内试验研究[J].中国水土保持科学,2017,15(4):111-116.
- [32] 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):86-91.
- [33] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [34] 汤连生.黄土湿陷性的微结构不平衡吸力成因论[J].工程地质学报,2003,11(1):30-35.