

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108052

何伟鹏, 刘昌义, 周国英, 等. 退化高寒草原人工恢复植被根系及根-土复合体力学特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 207-218.

HE Weipeng, LIU Changyi, ZHOU Guoying, et al. A study of the mechanical properties of herbaceous roots and root-soil composite systems in the degraded alpine pasture artificially restored grassland[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 207-218.

退化高寒草原人工恢复植被根系及 根-土复合体力学特性研究

何伟鹏¹, 刘昌义¹, 周国英², 胡夏嵩¹, 付江涛³, 卢海静⁴, 闫 聪¹, 杨馥铖¹, 李国荣¹
(1. 青海大学地质工程系, 青海 西宁 810016; 2. 中国科学院西北高原生物研究所,
青海 西宁 810008; 3. 青海大学农林科学院, 青海 西宁 810016;
4. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 为研究人工恢复草本植物对青藏铁路沿线退化高寒草原土体抗剪强度增强作用, 以青藏铁路沱沱河段人工草地建植区为研究区, 通过对区内生长期为1 a的3种组合种植草本植物开展单根拉伸和根-土复合体直剪试验, 评价了3种草本组合单根、根-土复合体力学强度特性。研究表明: 组合类型I即扁穗冰草(*Agropyron cristatum*) + 碱茅(*Puccinellia distans*) + 冷地早熟禾(*Poa crymophila*), 其3种草本平均根径(0.06 ~ 0.34 mm)、平均抗拉力(0.58 ~ 3.09 N)、平均抗拉强度(36.87 ~ 221.70 MPa)相对最大; 3种草本组合其单根抗拉力与根径呈幂函数正相关关系, 而抗拉强度与根径呈幂函数负相关关系; 直剪试验结果表明, 3种草本组合其根-土复合体黏聚力均随深度增加而降低, 其中组合类型I其根-土复合体黏聚力相对最大为32.62 kPa, 且较组合类型II、组合类型III根-土复合体黏聚力的增加幅度分别为15.3%、57.7%, 表现出草本组合类型I具有相对更为显著的增强土体抗剪强度作用。研究结果可为青藏铁路沿线高寒草地退化、水土流失、浅层滑坡等灾害防治提供理论依据, 同时对采用种植植被开展沿线生态恢复具有实际指导意义。

关键词: 青藏铁路; 人工恢复草地; 单根抗拉强度; 根-土复合体; 抗剪强度

中图分类号: P642.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0207-12

A study of the mechanical properties of herbaceous roots and root-soil composite systems in the degraded alpine pasture artificially restored grassland

HE Weipeng¹, LIU Changyi¹, ZHOU Guoying², HU Xiasong¹, FU Jiangtao³, LU Haijing⁴,
YAN Cong¹, YANG Fucheng¹, LI Guorong¹

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;
2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China;
3. Academy of Agriculture and Forestry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 4. College of
Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

收稿日期: 2021-08-25; 修订日期: 2021-12-15

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905); 青海省自然科学基金项目(2020-ZJ-906; 2018-ZJ-781); 国家自然科学基金项目(42041006; 41572306)

第一作者: 何伟鹏(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事地质工程与环境地质等方面的研究工作。E-mail: 1036762123@qq.com

通讯作者: 刘昌义(1991-), 男, 硕士, 实验师, 主要从事地质工程与环境地质等方面教学和科研工作。E-mail: 1358128151@qq.com

Abstract: To study the reinforcement to soil by herb roots along the Qinghai-Tibet railway, an artificially restored grassland along the Qinghai-Tibet railway is selected as test site. By conducting tensile tests to a single root and direct shear tests to the root-soil composite system with its growth period of one year, such mechanical indices as roots' tensile strength and shear strength of root-soil composite system are quantitatively assessed. The results show that the values of the mean root diameter, tensile resistance and tensile strength for the combination I (*Agropyron cristatum* + *Puccinellia distans* + *Poa crymophila*) are greater than those for the other combinations. Moreover, a positive power function can be introduced to describe the relationship between the root diameter and its tensile resistance for the three species, while a negative power function is introduced to describe the relationship between the root diameter and its tensile strength. In addition, the cohesion of the root-soil composite system for the three species exhibits a decreasing trend with the increasing soil depth. Of the values for cohesion for the three species, the cohesion for the combination I is 32.62 kPa, greater than that of the other two combinations by 15.3 % and 57.7%, respectively, suggesting the excellent capacity in reinforcing soil. The results may provide a theoretical basis for the prevention and control of the alpine grassland degradation, soil erosion, shallow landslides and other geo-hazards and eco-hazards along the Qinghai-Tibet railway, and are of a practical guiding significance for ecological restoration by planting vegetation along the railway.

Keywords: Qinghai-Tibet railway; artificial restoration of grassland; tensile strength of single plant root; root-soil composite system; shear strength

青藏铁路是穿越青藏高原腹地的重要交通设施工程, 青藏铁路格唐段北起格尔木市, 经西大滩、昆仑山、楚玛尔河、北麓河、沱沱河、唐古拉山垭口, 全长为 591.58 km^[1]。青藏铁路沿线生态环境和生物多样性具有敏感性、原始性和脆弱性等特点^[2]。近年来, 随着青藏高原地区基础设施和经济建设快速发展, 特别是青藏公路、青藏铁路等一批重要交通基础设施建设力度不断加大, 对该区域原始地貌和地表植被均产生不同程度扰动和影响, 其结果则引发一定程度的生态环境问题, 表现为区域草地退化、水土流失、土地沙漠化等地质灾害现象的发生^[3]。相关研究表明, 青藏铁路工程建设对沿线高寒草甸生态系统、高寒草甸草原生态系统、高寒草原生态系统、温性草原生态系统等各生态系统影响最大的是高寒草甸生态系统^[4]。高寒草甸是青藏高原主要的植被类型之一, 其面积约为青藏高原草地面积的 50%^[5]。因此, 在该地区开展科学有效的人工植被种植恢复, 对青藏铁路沿线原生草地生态保护和水土流失等灾害有效防护具有重要现实意义^[6]。

针对青藏铁路沿线脆弱生态环境恢复, 相关学者开展研究并取得了一定研究成果^[1,7-9]。仁康等^[7]研究青藏铁路西格段沿线 5 种不同植被恢复类型下的生态效应, 得出小叶杨(*Populus simonii*)-怪柳(*Tamatis chinensis*)混交林地生物量最高达到 28.81 t/hm², 较沙棘(*Hippophae hamnoides*)-柠条(*Caragana korshinskii*)林增加幅度为 42.3%, 较新疆杨(*Populus bolleana lauche*)-

怪柳(*Tamatis chinensis*)林增加幅度为 58%, 指出各模式均增加了植物多样性。罗久富等^[8]利用种间关联性分析法, 选取青藏高原高寒草甸区铁路工程迹地植物群落为研究对象, 对高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)等主要优势种进行长期监测, 其中对青藏铁路建设期(2005 年)、运行期(2009 年、2013 年)工程迹地进行 3 次植被群落调查, 结果表明 2013 年群落平均盖度与物种类型较 2005 年相比增长幅度分别为 23.29 %、19.71 %。

植物根系增强边坡土体强度以及提高边坡稳定性方面亦取得较为显著研究成果。其中, 国内外学者对植物根系单根抗拉强度、根系-土体之间相互作用, 以及边坡稳定性研究等方面开展了较为系统性研究^[10-15]。周林虎等^[10]以青藏铁路沱沱河段取土场作为研究区, 选取碱茅(*Puccinellia distans*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)等 4 种草本作为供试种, 通过单根拉伸和剪切试验得出生长期为 5、10 a 的 4 种草本其根系抗拉力增长幅度为 11.71%~62.31%, 抗剪力增长幅度为 26.30%~92.61%; 且优势草本植物碱茅和垂穗披碱草单根平均抗拉强度、平均抗剪强度分别为 66.29、50.78 MPa, 44.37、37.74 MPa。胡夏嵩等^[11]以青藏铁路沱沱河段路基边坡作为试验区, 通过野外原位根系拉拔试验, 指出生长期为 5 a 的垂穗披碱草(*Elymus nutans*)其根系抗拔力在阳坡位置显著大于阴坡, 阴坡、阳坡根系抗拔力分别为 23.52、30.88 N。CAPILLERI 等^[12]以意大利西西里岛金雀花(*Spartium junceum*)、芦

笋(*Asparagus officinalis*)作为研究对象,通过室内单根拉伸试验得到芦笋单根抗拉强度为 2.5~8.0 MPa,指出该草本植物可应用于浅层滑坡治理。胡夏嵩等^[14]以青藏铁路沱沱河段取土场草本种植区为例,在野外和室内分别对 6 种草本进行原位拉拔、室内单根拉伸和单根剪切试验,得到 6 种草本根系抗拔力为 187.34~57.89 N、抗拉力为 4.44~2.99 N,抗剪力为 4.33~3.85 N,其中以梭罗草(*Kengyilia thoroldiana*)、赖草(*Leymus secalinus*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*) 3 种草本植物的抗拔力相对较大;通过进一步分析得出 6 种草本根系固土力学强度与根系所含主要化学元素(Al、Ca、Mg、K、Fe、Zn、Mn、Sr)之间存在一定关系。

综上所述,有关青藏铁路沿线生态恢复方面的研究,主要是采用耐寒抗旱抗风沙优势乡土草本,通过开展对比株高、地径、覆盖度以及根系改良土壤作用等方面的生物量指标方法,来评价植被恢复退化草地的效果和贡献^[16-17]。基于此,本研究通过在青藏铁路沱沱河段建立植物种植试验区,对人工种植的 3 种不同草本组合进行根系力学强度和根-土复合体直剪试验,探讨同种植物在不同组合种植条件下的根系力学特性和强度变化特征,在此基础上,评价了能显著提高土体抗剪强度的优势草本植物组合。该项研究结果对青藏铁路沿线取土场和沙化地区开展植被生态恢复,实现科学有效防治草地退化、水土流失和浅层滑坡等灾害现象的发生提供了理论支撑。

1 研究区概况

研究区位于青藏铁路沿线沱沱河段,隶属青海格尔木唐古拉山镇管辖,其地理位置为北纬 34°16'N,东经 92°29'E,海拔高度为 4 540 m。研究区位于沱沱河北岸冲洪积平原,地形开阔,略有起伏,局部分布宽浅谷地,周围部分地段有沙地分布^[18]。地层主要由第四系全新统粉质粘土、细砂、砾砂、圆砾土,以及新近系、古近系互层状泥岩、砂岩组成^[18-19],土壤类型主要为高山草原土,土壤质地为砂砾质和砂壤质且表层已砂砾化^[18]。研究区属高原大陆性气候,具有高寒、干旱、多风等特点^[20];根据沱沱河气象站资料显示,年平均气温为-4.0℃,最低气温为-45.2℃,最高气温为 24.7℃,最热月份(7月)平均气温为 7.6℃,最冷月份(1月)平均气温为-16.2℃;年平均降水量为 248.5 mm,年平均蒸发量为 1 638.9 mm,年平均相对湿度为 53%,年平均大风日数为 178 d^[1]。

2 试验材料与方法

2.1 人工种植试验区建设及野外试样制取

人工种植自建试验区位于唐古拉山镇东北方向,距青藏铁路东部约 100 m 处,东西长为 200 m、南北宽为 150 m,总面积约为 30 000 m²。人工植被种植试验于 2016 年进行,在区内分别种植 3 种不同组合类型草本,即组合 I 为扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)+碱茅(*Puccinellia distans*)+冷地早熟禾(*Poa crymophila*)组合;组合 II 为碱茅(*Puccinellia distans*)+垂穗披碱草(*Elymus nutans*)+星星草(*Puccinellia tenuiflora*)组合;组合 III 为垂穗披碱草(*Elymus nutans*)+冷地早熟禾(*Poa crymophila*)+中华羊茅(*Festuca sinensis*)组合,以上 3 种组合类型草本生长期为 1 a。供试草种播量分别为:垂穗披碱草、扁穗冰草为 11.20 g/m²;冷地早熟禾、中华羊茅、碱茅、星星草为 6.00 g/m²,种植间距为 30 cm。试验区植物种植流程为:适度平整、地表翻耕、碎化耙沟、种子播种、磨耙镇压等 5 个过程,即利用机械方法对板结的大土块碎化并对地表适度平整,再对工程迹地进行耕翻处理,形成 10~15 cm 的松土层。在播种草本植物种子时,同时拌加种子基肥(尿素和磷酸二铵各 75 kg/km²),待草本植物种子播种完毕后及时磨耙镇压处理^[18]。试验区植物生长情况如图 1 所示。



图 1 自建试验区人工种植 3 种草本植物组合及其生长情况

Fig. 1 Combination and growth of three kinds of herbaceous plants planted artificially in the self-built testing area

野外取样工作于 2017 年开展,取样时按照 3 种组合类型种植方案,采用原位挖掘方法制取每种组合类型中不同种草本植物根系试样,并及时带回实验室进

行单根拉伸试验;与此同时,在每种组合类型草本植物生长区样地随机布置 6 组草本根-土复合体环刀试样,并在未生长植物裸地制取 3 组不含根系素土的环刀试样,进行封存处理后及时带回实验室开展直剪试验。

2.2 草本植物单根拉伸试验

试验采用上海衡翼精密仪器有限公司生产 HY-0580 微机控制电子万能材料试验机进行。在室内开展单根拉伸试验时,首先将草本根系剪至根长为 15 cm 根段,选择顺直且表面完好根系,然后利用游标卡尺在待测根段选取 3 个部位分别测量其根径,取其平均值作为该根段的平均根径(D)。单根拉伸试验开始时,通过调节上下升降按钮使夹具间距为 10 cm,然后将根系两端夹持于夹具间并拧紧固定。通过电脑操作系统启动仪器进行拉伸试验,系统自动采集单根所受拉力直至该根段被拉断,系统自动计算单根最大抗拉力。在试验过程中,为避免单根在受力时出现打滑现象,采用在夹具两端粘贴胶布、缠绕和添加柔性物质等方法来增大根系与夹具间的摩擦力,使根段受到拉伸力直至其被拉断为止^[21]。在此需要说明的是,每种类型的草本植物组合中,每种草本根系分别重复 30 次试验;在进行单根拉伸试验过程中,将根系从夹具中间位置处发生断裂的数据确认为有效数据,若在试验过程中,根系与夹具之间发生滑动现象,则将所得到的数据视为无效,重新进行试验。

草本植物单根抗拉强度计算公式为^[22]:

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

式中: P ——根段抗拉强度/MPa;

F ——最大抗拉力/N;

D ——根段直径/mm。

2.3 草本植物根-土复合体直剪试验

从野外试验区制取环刀试样,其内径为 6.18 cm,高为 2.00 cm,体积为 60 cm³,每 4 个环刀试样作为 1 组进行直剪试验,相应地制取根-土复合体试样检测其含水率、密度。在此需要说明的是,在制取根-土复合体试样过程中,选择每种草本生长正常的区域进行原位取样,并在每种草本组合类型样地随机制取 6 组草本根-土复合体试样和 3 组不含根系素土试样;与此同时,在每种草本组合样地制取试样时,每个取样点位置处制取试样分别按照上层和下层 2 层取样的方法进行,即地表以下 0~10 cm 深度为上层,地表以下 10~20 cm 深度为下层,野外试验区制取根-土复合体试样过程如图 2 所示。



图 2 试验区 3 种草本植物根-土复合体试样原位制样过程

Fig. 2 In situ sample preparation process of the root-soil complex samples of three herbaceous plants in the testing area

试样抗剪强度指标测试采用 ZJ 型应变控制式直剪仪。每组 4 个试样分别在 50, 100, 200, 300 kPa 等 4 级垂直压力(P)下,以 2.4 mm/min 的剪切速率进行直剪试验,得到试样抗剪强度指标黏聚力 c 值(kPa)和内摩擦角 φ 值($^{\circ}$)^[22]。待直剪试验结束后,采用水洗法得到每组 4 个环刀试样根-土复合体中的根系,烘干根系水分,统计根系干重、根数、根径等生长量指标并计算其根面积比^[23]。

3 结果与分析

3.1 土体物理性质特征

3 种组合土体上层(地表以下 0~10 cm)和下层(地表以下 10~20 cm)位置处土体物理性质测试结果如表 1 所示。上层位置处根-土复合体平均密度分别为 2.03, 1.99, 2.01 g/cm³, 不含根系素土平均密度分别为 2.00, 1.96, 1.99 g/cm³, 表现每种组合中,根-土复合体平均密度均高于素土,增加幅度分别为 1.50%、1.53%、1.01%。相应地,下层位置处根-土复合体与素土平均密度分别为 2.06, 2.00, 2.05 g/cm³, 2.05, 2.04, 2.00 g/cm³, 反映出根-土复合体与素土其平均密度随着深度增加而呈增大的变化趋势,其增加幅度分别为 1.48%、0.50%、1.99%, 2.50%、4.08%、0.50%。另外,在下层位置处,组合类型 I 与组合 I 素土其土体密度(2.06, 2.05 g/cm³)均大于其他 2 种组合根-土复合体和素土的平均密度。

3 种组合其土体在上层和下层位置处根-土复合体含水率分别为 16.70%、17.16%、18.06%, 15.99%、

表 1 试验区 3 种组合类型地表以下 2 种不同深度土体物理性质指标试验结果

Table 1 Experimental results of the physical property indexes of the soil mass at two different depths under the surface of three different combination planting types of herbaceous plants in the testing area

组合种植类型	平均密度/(g·cm ⁻³)		平均含水率/%	
	上层	下层	上层	下层
组合类型I	2.03±0.06	2.06±0.06	16.70±1.98	15.99±2.69
组合I素土	2.00±0.10	2.05±0.23	18.30±1.12	16.45±5.66
组合类型II	1.99±0.03	2.00±0.06	17.16±2.45	15.39±3.22
组合II素土	1.96±0.09	2.04±0.09	16.99±2.15	17.41±0.04
组合类型III	2.01±0.06	2.05±0.06	18.06±1.98	16.87±2.69
组合III素土	1.99±0.00	2.00±0.05	16.99±0.88	15.35±0.49

注: ①组合I素土、组合II素土、组合III素土分别指的是同一位置不同植物组合的不含根系素土; ②组合类型I、组合类型II、组合类型III分别指的是相同位置由不同植物组合构成的根-土复合体。

15.39%、16.87%, 素土平均含水率则分别为 18.30%、16.99%、16.99%, 16.45%、17.41%、15.35%。分析数据可知, 组合类型 I 与组合 I 素土中, 其上层、下层土体均表现出根-土复合体平均含水率低于素土, 其降幅为 8.74%、2.80%。组合类型 II 与组合 II 素土中, 其上层根-土复合体平均含水率高于素土, 增加幅度为 1.01%, 下层根-土复合体平均含水率低于素土, 降幅为 11.60%。组合类型 III 与组合 III 素土中, 其上层、下层土体表现出根-土复合体平均含水率均高于素土, 其增加幅度为 6.30%、9.90%, 且根-土复合体与素土平均含水率随深度增加呈降低趋势。进一步对比分析可知, 上层 3 种不同组合种植类型其根-土复合体平均含水率表现为组合类型 III 相对最大, 为 18.06%, 素土平均含水率则为组合 I 素土相对最大, 为 18.30%; 下层根-土复合体平均含水率表现为组合类型 III 相对最大, 为 16.87%, 素土平均含水率则为组合 II 素土相对最大, 为 17.41%。

综上, 通过对比区内土体密度和含水率可知, 在相同深度位置处, 根-土复合体平均密度与平均含水率均高于素土, 且平均密度随深度增加而增大, 而平均含水率随深度增加呈降低的变化规律。产生这一变化特征的主要原因在于: 上层土体中草本根系在植物生长过程中表现出具有涵养土壤水分的功能, 使其根-土复合体含水率显著高于不含根系素土^[24]。这一结果, 与申紫雁^[25]对黄河源区高寒草地不同深度土壤含水率的研究结果基本相一致。

3.2 根-土复合体中根系生长量特征

3 种组合其根-土复合体试样所含根系干重、平均根数、平均根径、平均根面积比等指标统计结果如

表 2 所示。由表 2 可知, 上层土体中根系平均干重分别为 0.146, 0.213, 0.355 g, 平均根径分别为 0.12, 0.20, 0.19 mm, 平均根数分别为 60, 57, 68 根, 平均根面积比分别为 0.026%、0.064%、0.069%; 相应地, 下层土体中根系平均干重分别为 0.040, 0.052, 0.081 g, 平均根径分别为 0.10, 0.19, 0.18 mm, 平均根数分别为 26, 17, 24 根, 平均根面积比分别为 0.008%、0.017%、0.021%。

表 2 试验区 3 种组合类型草本植物根-土复合体试样根系特征统计结果

Table 2 Statistics of the root characteristics of the root-soil complex samples of three combined planting types of herbaceous plants in the testing area

组合种植类型	位置	平均干重/g	平均根数/根	平均根径/mm	平均根面积比(RAR)/%
组合类型I	上层	0.146	60	0.12	0.026
	下层	0.040	26	0.10	0.008
组合类型II	上层	0.213	57	0.20	0.064
	下层	0.052	17	0.19	0.017
组合类型III	上层	0.355	68	0.19	0.069
	下层	0.081	24	0.18	0.021

注: ①数据均为每组根-土复合体试样中4个环刀试样的统计结果; ②RAR指的是根面积比即根-土复合体剪切面上根系横截面面积之和与土体横截面面积的比值, 其计算方法为 $RAR=A_r/A_s$, A_r 为根-土复合体试样横截面上所有根系面积之和/ mm^2 , A_s 为根-土复合体试样的横截面面积/ mm^2 。

3 种草本组合表现出随着土体深度的增加, 其平均根径、平均根数、平均根面积比等指标均呈降低的变化趋势, 其中平均根径分别降低 0.02, 0.01, 0.01 mm, 根系数量分别降低 34, 40, 44 根; 进一步对比上层、下层平均根数与平均根面积比结果可知, 平均根数降低幅度分别为 56.7%、70.2%、64.7%, 平均根面积比降低幅度分别为 69.2%、73.4%、69.5%。引起生长量指标这种变化的主要原因在于随着地表以下深度的增加, 其土壤质地趋于紧实, 养分含量下降, 土壤温度降低, 因此根系生物量一般呈迅速下降的变化趋势^[26]。

3.3 植物单根抗拉力、抗拉强度与根径关系

3 种草本组合其单根抗拉力、抗拉强度与根径关系曲线如图 3 所示。组合类型 I 中的 3 种草本中, 扁穗冰草最大根径为 0.78 mm, 其单根抗拉力为最大, 为 9.5 N; 相应地, 扁穗冰草根径为 0.70 ~ 0.78 mm 时, 其单根抗拉力则为 7.0 ~ 9.5 N, 该值显著大于碱茅和冷地早熟禾 2 种草本单根抗拉力。相类似地, 冷地早熟禾根径为 0.02 ~ 0.10 mm 时, 其单根抗拉力为 0.1 ~ 1.0 N; 碱茅根径为 0.12 ~ 0.54 mm 时, 其单根抗拉力为 1 ~ 3 N, 单根抗拉力随着根径的增加呈逐渐递增的变化趋势; 进一步分析可知, 冷地早熟禾根径相对较小, 而其抗拉强度则表现出相对较大的变化特征,

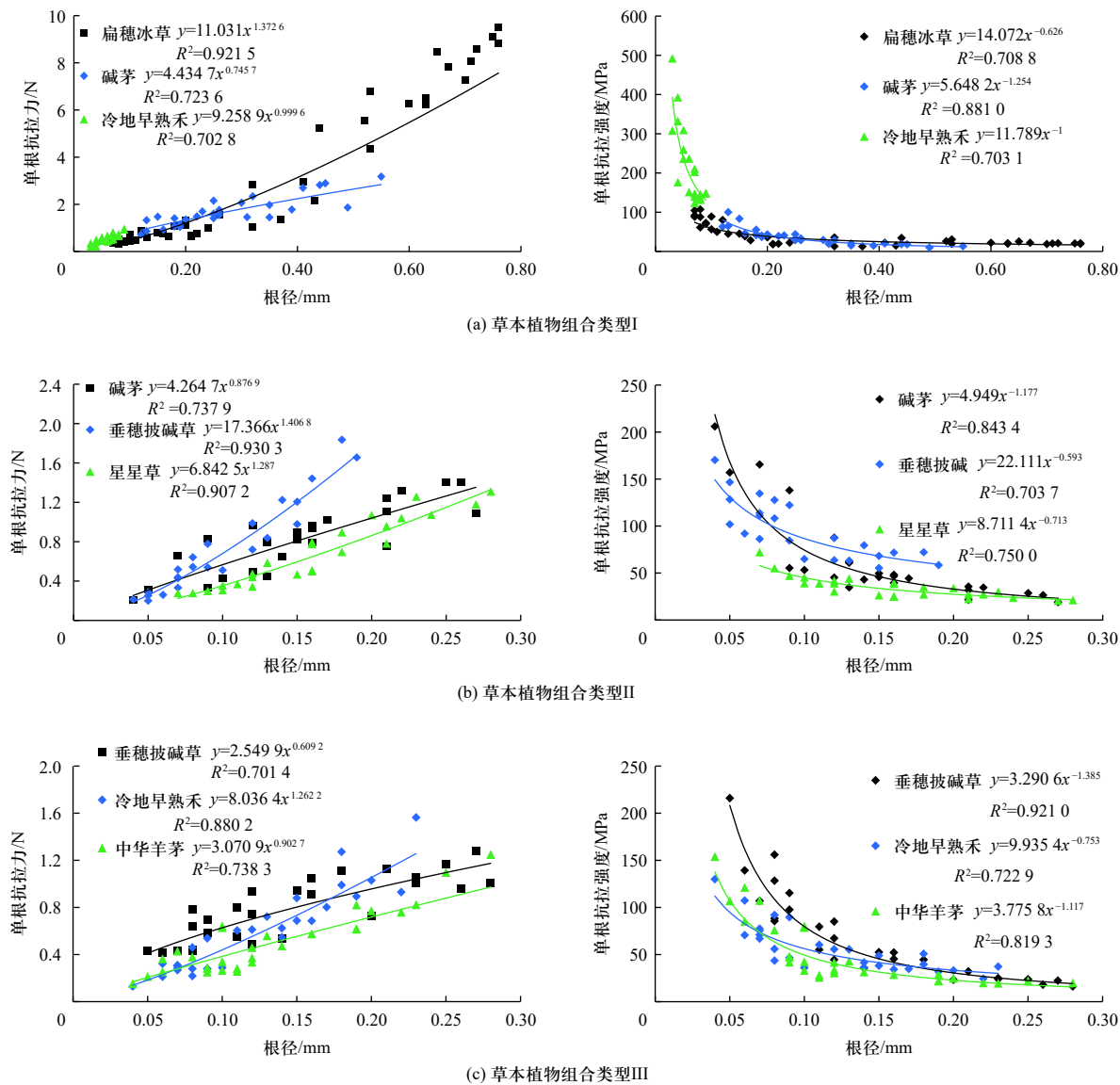


图 3 试验区 3 种组合类型草本植物单根抗拉力、抗拉强度与根径之间的关系

Fig. 3 Relationship between the single root tensile force, tensile strength and root diameter of three different combined planting types of herbs in the testing area

最大为 500 MPa, 且其单根抗拉强度随着根径增加而呈逐渐降低的变化特征。

组合类型 II 中的 3 种草本其根径为 0.04 ~ 0.28 mm, 其中, 垂穗披碱草、碱茅、星星草根径最大为 0.19, 0.27, 0.28 mm, 其单根抗拉力最大为 1.8, 1.4, 1.3 N, 其单根抗拉强度最大为 160, 200, 50 MPa。此外, 组合种植类型 III 中 3 种草本根径为 0.04 ~ 0.28 mm 时, 其单根抗拉力为 0.1 ~ 1.6 N, 单根抗拉强度为 10 ~ 200 MPa, 其中垂穗披碱草最大抗拉强度为 205 MPa。进一步分析表明, 3 种组合中, 6 种草本其单根抗拉力与根径拟合关系符合幂函数正相关, 其单根抗拉强度与根径间则呈幂函数负相关关系(表 3)。综上可知, 3 种组合

中, 其单根抗拉力均表现出随着根径增加而呈逐渐增大的变化规律, 且二者之间表现出显著幂函数正相关关系, 其单根抗拉强度则随着根径增加而逐渐降低, 且二者之间表现出显著幂函数负相关关系。

3 种组合中 6 种草本单根抗拉试验结果如表 4 所示。由该表可知, 组合类型 I 中 3 种草本其平均根径由大至小依次为扁穗冰草(0.34 mm)、碱茅(0.28 mm)、冷地早熟禾(0.06 mm), 平均单根抗拉力由大至小依次为扁穗冰草(3.09 N)、碱茅(1.70 N)、冷地早熟禾(0.58 N); 进一步分析可知, 3 种草本中扁穗冰草单根抗拉力显著大于碱茅、冷地早熟禾, 且其平均单根抗拉力分别为碱茅、冷地早熟禾的 1.8 倍、5.3 倍。相关

表 3 试验区 3 种组合类型草本植物根-土复合体试样根系与力学强度之间拟合函数关系式

Table 3 Fitting function relationship between the root and mechanical strength of the root-soil composite samples of three combined planting types of herbaceous plants in the testing area

组合种植类型	草本植物名称	单根抗拉力		单根抗拉强度	
		回归方程式	R^2	回归方程式	R^2
组合类型I	扁穗冰草	$y=11.03x^{1.372\ 6}$	0.921 5	$y=14.072x^{-0.626}$	0.708 8
	碱茅	$y=4.4347x^{0.745\ 7}$	0.723 6	$y=5.6482x^{-1.254}$	0.881 0
	冷地早熟禾	$y=9.2589x^{0.999\ 6}$	0.702 8	$y=11.789x^{-1}$	0.703 1
组合类型II	碱茅	$y=4.2647x^{0.876\ 9}$	0.737 9	$y=4.094x^{-1.177}$	0.843 4
	垂穗披碱草	$y=17.366x^{1.406\ 8}$	0.930 3	$y=22.111x^{-0.593}$	0.703 7
	星星草	$y=6.8425x^{1.287}$	0.907 2	$y=8.7114x^{-0.713}$	0.750 0
组合类型III	垂穗披碱草	$y=2.5499x^{0.609\ 2}$	0.701 4	$y=3.2906x^{-1.385}$	0.921 0
	冷地早熟禾	$y=8.0364x^{1.262\ 2}$	0.880 2	$y=9.9354x^{-0.753}$	0.722 9
	中华羊茅	$y=3.0709x^{0.902\ 7}$	0.738 3	$y=3.7758x^{-1.117}$	0.819 3

研究表明,植物单根抗拉强度可作为评价根系固土护坡能力的一个有效指标^[28]。鉴于此,组合类型 I 中 3 种草本平均单根抗拉强度由大至小依次为冷地早熟禾(221.70 MPa)、扁穗冰草(40.68 MPa)、碱茅(36.87 MPa),其中扁穗冰草和碱茅单根抗拉强度相差不显著,相比较而言,冷地早熟禾单根抗拉强度分别为碱茅和扁穗冰草的 6.0, 5.4 倍。

表 4 试验区 3 种组合类型中 6 种草本单根拉伸试验结果
Table 4 Tensile test results of the single root of 6 herbs of 3 different herb combination planting types in the testing area

组合种植类型	植物名称	平均根径/mm	平均抗拉力/N	平均抗拉强度/MPa
组合类型I	扁穗冰草	0.34±0.24	3.09±3.20	40.68±27.23
	碱茅	0.28±0.12	1.70±0.63	36.87±21.32
	冷地早熟禾	0.06±0.02	0.58±0.21	221.70±100.80
组合类型II	碱茅	0.15±0.06	0.83±0.33	63.22±49.26
	垂穗披碱草	0.10±0.04	0.73±0.47	96.19±31.43
	星星草	0.16±0.06	0.68±0.34	35.16±11.96
组合类型III	垂穗披碱草	0.15±0.07	0.79±0.27	69.67±49.48
	冷地早熟禾	0.12±0.05	0.60±0.35	56.65±25.25
	中华羊茅	0.13±0.06	0.50±0.27	50.60±35.47

注:表中单根拉伸试验采用的样本数量均为30株。

相应地,组合类型 II 中 3 种草本其平均根径由大至小依次为星星草(0.16 mm)、碱茅(0.15 mm)、垂穗披碱草(0.10 mm),3 种草本平均单根抗拉力由大至小依次为碱茅(0.83 N)、垂穗披碱草(0.73 N)、星星草(0.68 N),碱茅单根抗拉力大于其他 2 种草本,其平均单根抗拉力分别为垂穗披碱草、星星草的 1.1 倍、1.2 倍。此外,组合类型 II 中 3 种草本平均单根抗拉强度由大至小依次为垂穗披碱草(96.19 MPa)、碱茅(63.22 MPa)、星星草(35.16 MPa),垂穗披碱草单根平均抗拉强度分别为碱茅和星星草的 1.5, 2.7 倍。

组合类型 III 中 3 种草本植物平均根径由大至小

依次为垂穗披碱草(0.15 mm)、中华羊茅(0.13 mm)、冷地早熟禾(0.12 mm),平均单根抗拉力由大至小依次为垂穗披碱草(0.79 N)、冷地早熟禾(0.60 N)、中华羊茅(0.50 N),表明垂穗披碱草单根平均抗拉力显著大于其他 2 种草本,其平均单根抗拉力分别为冷地早熟禾、中华羊茅的 1.3 倍、1.6 倍。类型 III 中 3 种草本平均单根抗拉强度由大至小依次为垂穗披碱草(69.67 MPa)、冷地早熟禾(56.65 MPa)、中华羊茅(50.60 MPa),垂穗披碱草单根平均抗拉强度分别为冷地早熟禾和中华羊茅的 1.2, 1.4 倍。

综上所述,通过分析对比 6 种草本平均根径、平均抗拉力、平均抗拉强度试验结果可知,组合类型 I 中 3 种草本的平均根径(0.06 ~ 0.34 mm)、平均抗拉力(0.58 ~ 3.09 N)、平均抗拉强度(36.87 ~ 221.70 MPa)均相对最大,表明组合类型 I 的根系力学强度较高,其固土护坡的效应相对较为显著;且组合类型 I 中的扁穗冰草、碱茅相对于其它 4 种草本,表现出具有相对较大的平均根径(0.34, 0.28 mm)和平均抗拉力(3.09 , 1.70 N)。由此可知,以上 2 种草本在 3 种组合类型中表现出生长量相对较大的优势。从力学强度角度分析可知,3 种组合种植类型中,组合类型 I 中的冷地早熟禾和组合类型 II 中垂穗披碱草,其平均抗拉强度(221.70, 96.19 MPa)显著大于其它 2 种草本,这在一定程度上反映出冷地早熟禾、垂穗披碱草固土护坡能力相对更为显著。

3.4 根-土复合体抗剪强度特性

3 种组合其根-土复合体和素土直剪试验结果如表 5 所示。由该表可知,3 种组合中,其上层根-土复合体平均黏聚力 c 值由大至小依次为组合类型 I(32.62 kPa)、组合类型 II(28.28 kPa)、组合类型 III(20.69 kPa),其中,组合类型 I 的平均黏聚力 c 值分

别为组合类型 II、组合类型 III 的 1.2, 1.6 倍。3 种组合中, 上层素土其平均黏聚力 c 值由大至小依次为组合 I 素土 (19.81 kPa)、组合 II 素土 (14.94 kPa)、组合 III 素土 (14.37 kPa)。其中组合 I 素土其平均黏聚力 c 值大于其它 2 种组合素土, 且分别为组合 II 素土、组合 III 素土的 1.01, 1.4 倍。另外, 上层根-土复合体黏聚力 c 值均大于相同组合类型素土, 分别为其素土的 1.6, 1.9, 1.4 倍。以上根-土复合体与素土黏聚力 c 值的变化特征, 反映出组合类型 I 的根-土复合体平均黏聚力 c 值相对最大, 可作为增强土体抗剪强度效果相对更为显著的优势组合类型。

表 5 试验区 3 种组合类型草本植物根-土复合体直剪试验结果

Table 5 Direct shear test results of the root-soil complex of three combined planting types of herbaceous plants in the testing area

组合种植类型	平均黏聚力 c 值/kPa		平均内摩擦角 φ 值/(°)	
	上层	下层	上层	下层
组合类型 I	32.62±11.74	18.61±11.62	19.78±10.86	23.81±8.01
组合 I 素土	19.81±4.20	22.85±23.48	20.74±19.39	26.73±7.51
组合类型 II	28.28±9.61	27.61±20.57	29.96±3.60	23.93±11.84
组合 II 素土	14.94±12.16	21.42±14.29	32.88±4.77	19.15±13.89
组合类型 III	20.69±11.74	7.36±11.62	31.55±10.86	24.87±8.01
组合 III 素土	14.37±9.62	14.94±4.10	27.02±4.24	24.68±1.00

相应地, 3 种组合其下层根-土复合体平均黏聚力 c 值, 表现出由大至小依次为组合类型 II (27.61 kPa)、组合类型 I (18.61 kPa)、组合类型 III (7.36 kPa), 组合类型 II 的根-土复合体平均黏聚力 c 值分别为组合类型 I、组合类型 III 的 1.5 倍、3.8 倍; 相类似地, 3 种组合其下层素土平均黏聚力 c 值由大至小依次为组合 I 素土 (22.85 kPa)、组合 II 素土 (21.42 kPa)、组合 III 素土 (14.94 kPa), 组合 I 素土平均黏聚力 c 值分别为组合 II 素土、组合 III 素土的 1.1 倍、1.5 倍。此外, 组合 I、III 其下层素土的黏聚力 c 值, 均大于相同组合类型其下层根-土复合体黏聚力 c 值, 且分别为下层根-土复合体黏聚力 c 值的 1.2, 2.0 倍, 同时, 根-土复合体黏聚力 c 值随着深度增加而降低, 而素土黏聚力 c 值则随深度增加呈逐渐增大的变化趋势。3 种组合根-土复合体及素土其内摩擦角 φ 值则未表现出显著性变化规律。通过对比上层、下层 2 种位置处的根-土复合体抗剪强度可知, 3 种组合其根-土复合体抗剪强度随着根面积比的增加而逐渐增大, 且增大幅度依次为 75.3%、2.43%、181.1%。反映出 6 种草本根系具有显著增强根-土复合体抗剪强度的作用, 且在一定含根量范围内随着根面积比增加而呈逐渐增大的变化趋势。

3 种组合其根-土复合体、素土与黏聚力 c 值关系如图 4 所示。3 种组合其根-土复合体黏聚力 c 值表现出上层大于下层的特征, 素土土体黏聚力 c 值表现为下层均大于上层。进一步分析得到, 在试验区内地表以下相同位置条件下, 3 种组合其上层根-土复合体黏聚力 c 值均明显大于素土; 下层除组合类型 II 与组合 II 素土外, 其素土黏聚力 c 值均大于根-土复合体。综上可知, 组合类型 I 的根-土复合体黏聚力 c 值, 较其它 2 种组合类型表现出相对较大的特征, 且黏聚力 c 值的增加幅度为 64.6%。因此, 3 种组合类型中, 组合 I 其根-土复合体黏聚力 c 值相对大于其他 2 种组合种植类型, 这在一定程度反映出该组合类型具有相对更为显著的增强土体强度作用, 并可作为试验区内优势组合种植类型。

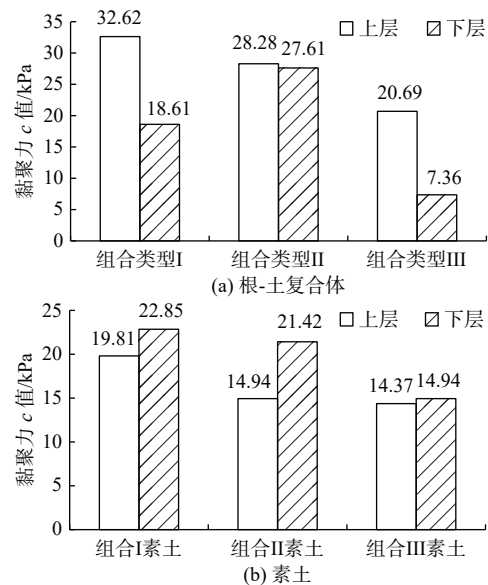


图 4 试验区 3 种组合类型草本植物根-土复合体粘聚力分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of the root-soil composite system cohesion force of three different herb combination planting types in the testing area

4 讨论

3 种组合因存在组合方式不同, 其力学强度特征与生长量指标表现出不同的特征, 且同种草本在不同组合方式下生长量指标存在一定的差异, 其结果造成同种草本根系抗拉力、抗拉强度亦表现出一定差异性^[29]。

组合 I 中 3 种草本植物其平均根径、平均抗拉力、平均抗拉强度均相对最大, 这表明组合类型 I 其力学强度较高, 反映出固土护坡效果较为显著。区内组合种植的草本扁穗冰草、碱茅相对于其它 4 种草本, 表现出具有相对较大平均根径 (0.34, 0.28 mm) 和

平均抗拉力(3.09, 1.70 N),体现出其生长优势;从力学强度角度分析可知,冷地早熟禾单根平均抗拉强度(221.70 MPa)明显大于其它5种草本,反映出组合类型I具有相对更为显著的固土护坡效果。与此同时,3种组合中的不同草本其单根抗拉力均表现出随着根径增加而逐渐增大,且抗拉力与根径之间呈幂函数正相关关系,而抗拉强度则随着根径增加而逐渐降低,且二者之间呈幂函数负相关关系。周林虎等^[10]以青藏铁路沱沱河段取土场作为研究区,选取生长期为10 a的碱茅(*Puccinellia distans*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)等4种草本进行单根拉伸试验,得到单根抗拉力与根径之间呈指数函数关系,且单根抗拉强度与根径之间呈幂函数关系。贺振昭等^[30]以青海湖北岸为研究区,通过对醉马草(*Achnatherum inebrians*)等7种优势草本进行室内单根拉伸,得出单根抗拉力、抗拉强度与其根径均符合幂函数关系。另外,刘亚斌等^[31]以西宁盆地自建试验区生长期为150 d垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、细茎冰草(*Agropyron trachycaulum*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为试验供试种,通过单根拉伸试验得到3种草本其单根抗拉力随根径增加呈幂函数正相关关系,单根抗拉强度随着根径增加呈幂函数降低的变化关系;李光莹等^[32]以黄河源玛沁地区为研究区,通过对小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)等6植物的单根拉伸试验,得到其单根抗拉强度随根径增加呈幂函数降低的变化关系。上述研究结果与试验所得结果基本相一致。

3种组合其黏聚力 c 值的变化特征,表现为上层根-土复合体黏聚力 c 值均大于下层,而素土则表现为下层大于上层;另外,上层3种组合其根-土复合体黏聚力 c 值均明显大于相同位置处素土,与之不同的是下层素土的黏聚力 c 值表现出大于根-土复合体,其主要原因是随着取样深度的递增,根-土复合体含根量表现出递减的变化趋势,因此对根-土复合体抗剪强度具有显著的影响,即表现在随着含根量的减少,其黏聚力 c 值表现出逐渐减小的变化规律,而素土因不含根系,土体黏聚力 c 值增大的原因主要是由于深层土体因受到上层土体荷载作用,使其土体孔隙变小、密实度增大^[25]。相关研究结果还表现在,李建兴等^[33]对不同护坡草本根系分布特征的研究结果表明,三峡库区4种草本土壤黏聚力 c 值由大至小为香根草(*Vetiveria zizanioides*)、百喜草(*Paspalum notatum*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、

裸地,且土壤黏聚力 c 值随着土层深度增加而降低。此外,余芹芹等^[34]通过室外开展不含根系素土和灌木根-土复合体原位剪切试验,指出相同坡度条件下,霸王与柠条锦鸡儿2种灌木根-土复合体抗剪力和抗剪强度均明显大于素土,表明植物根系可显著提高边坡土体抗剪能力。上述研究结果与试验所得结果基本相一致。

此外,上述根-土复合体抗剪强度均明显大于素土的主要原因在于上层根系含量相对较多,平均为62根,根系的存在显著提高了根-土复合体抗剪强度,使得根-土复合体黏聚力 c 值大于素土。由表2还可知,根-土复合体中平均根数、平均根径、平均根面积比表现出随深度的增加而减少,其中下层根系含量显著减少,其结果使得下层根-土复合体黏聚力 c 值呈逐渐减小;其次,通过对比上层和下层素土基本物理性质指标可知,随着地表以下深度增加,土体密度逐渐增大、含水率降低,这种素土密度逐渐增大和含水率降低的结果使得土体黏聚力 c 值增加。相关研究结果还表现在,沙琳川等、杨幼清等^[35]通过开展直剪试验,研究垂穗披碱草(*Elymus nutans*)和冷地早熟禾(*Poa crymophila*)2种草本根系对增强高寒地区露天煤矿排土场边坡土体抗剪强度贡献,以及土体物理力学性质与植物根系数量2个因素对边坡土体抗剪强度的影响,指出与素土抗剪强度相比较,根-土复合体随着海拔的升高和含水率的降低,根-土复合体抗剪强度逐渐增大。另外,依据WWM(Wu-Waldron-Model)计算模型可知,由根系和土体共同组成的根-土复合体受剪切作用后,部分剪切力通过根系与土体间的摩擦力、咬合力和锚固力转化为根系的抗拉力,采用公式 $S=c+\sigma\tan\varphi+\Delta S_r$ 和 $\Delta S_r=1.2t_r(A_{rm}/A)$ 表示,式中 S 为复合体抗剪强度(kPa), ΔS_r 为由根系产生的土体抗剪强度增加值(kPa), c 为土体黏聚力(kPa), φ 为土体内摩擦角(°), σ 为法向压力(kPa),数值1.2为根系因子修正系数, t_r 为复合体横截面上单位面积中单根平均抗拉强度(MPa), A_{rm}/A 为根面积比, A_{rm} 为复合体试样横断面上所有根系面积之和(mm^2), A 为复合体试样的横断面面积总和(mm^2)^[31]。基于此,3种草本组合种植类型中,组合类型I中草本冷地早熟禾其单根抗拉强度相对较大,为221.7 MPa,且其黏聚力 c 值亦相对较大,为32.62 kPa。因此,本项研究所得到的根-土复合体抗剪强度与该理论模型变化规律相一致,即均表现出随着单根平均抗拉强度的增大,根系产生的土体抗剪强度增加值增大,进而复合体抗剪强度增大。

综上,3种组合中的草本根系表现出具有显著增

强土体抗剪强度的作用。其中,组合类型 I 的冷地早熟禾其单根抗拉强度相对较大,为 221.70 MPa,且其根-土复合体黏聚力 c 值亦表现出相对最大,为 32.62 kPa。因此,该组合种植类型对提高区内土体抗剪强度效果相对更为显著,可选择作为区内青藏铁路沿线植被恢复的优势种植组合类型之一。

5 结论

(1) 试验区内根-土复合体与素土平均密度随深度增加而增大,增加幅度分别为 1.48%、0.50%、1.99%、2.50%、4.08%、0.50%;平均含水率随深度增加而降低,除组合 II 素土之外,其它降低幅度分别为 4.25%、10.31%、6.59%、10.11%、9.65%。

(2) 随着取样深度的增加,3 种草本组合其平均根数、平均根径、平均根面积比均呈显著降低的趋势,其中平均根数降低幅度分别为 56.7%、70.2%、64.7%,平均根面积比降低幅度分别为 69.2%、73.4%、69.5%。

(3) 3 种草本组合中,草本单根抗拉力表现出随着根径增加逐渐增大,且二者之间呈幂函数正相关关系;草本单根抗拉强度则随根径增加呈逐渐降低,且二者之间呈显著性幂函数负相关关系。

(4) 组合种植类型 I 中 3 种草本的平均根径(0.06 ~ 0.34 mm)、平均抗拉力(0.58 ~ 3.09 N)、平均抗拉强度(36.87 ~ 221.70 MPa)均相对最大,这表明组合 I 其根系力学强度较高,这在一定程度反映出草本植物相对具有更显著的增强土体抗剪强度作用。

(5) 3 种草本组合中,草本的根-土复合体黏聚力 c 值显著大于素土,且随深度增加而降低,而素土黏聚力 c 值则表现为随深度增加而逐渐增大。

(6) 组合类型 I 较其它 2 种类型表现出具有相对较大黏聚力 c 值,反映出该组合类型具有相对更显著增强土体抗剪强度的作用,可作为区内青藏铁路沿线路基边坡和取土场植被恢复的优势种植组合之一。

参考文献 (References):

[1] 陈桂琛,周国英,孙菁,等.梭罗草在青藏铁路取土场植被恢复中的应用研究[J].冰川冻土,2006,28(4): 506 - 511. [CHEN Guichen, ZHOU Guoying, SUN Jing, et al. Application of kengyilia thoroldiana to vegetation restoration in gravel-soil-taken field along the Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 506 - 511. (in Chinese with English abstract)]

[2] NIU F J, GAO Z Y, LIN Z J, et al. Vegetation influence on the soil hydrological regime in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2019, 354: 113892.

[3] ZHANG C B, ZHOU X, JIANG J, et al. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. *CATENA*, 2019, 172: 140 - 147.

[4] 沈渭寿,张慧,邹长新,等.青藏铁路建设对沿线高寒生态系统的影响及恢复预测方法研究[J].科学通报,2004,49(9): 909 - 914. [SHEN Weishou, ZHANG Hui, ZOU Changxin, et al. Method study of ecosystem infection forecast of along Tibet highroad[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(9): 909 - 914. (in Chinese)]

[5] 徐赞,罗久富,周金星,等.青藏铁路沿线高寒草甸区次生群落特征及种间关联性[J].草业科学,2020,37(1): 41 - 51. [XU Yun, LUO Jiufu, ZHOU Jinxing, et al. Secondary community characteristics and interspecific associations in alpine meadow areas along the Qinghai-Tibet railway[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(1): 41 - 51. (in Chinese with English abstract)]

[6] 李姜瑶,余冬梅,张西营,等.西宁盆地黄土区边坡土体含水量对植物根-土复合体抗剪强度影响的试验研究[J/OL].工程地质学报,2020(2021-8-23)[2020-09-08]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg>. [LI Jiangyao, YU Dongmei, ZHANG Xiyang, et al. The effect of soil moisture content on the shear strength of rooted soil in loess regions of Xining Basin [J/OL]. *Journal of Engineering Geology*, 2020(2021-8-23)[2020-09-08]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg>. (in Chinese with English abstract)]

[7] 任康,郭坤,郑景明,等.青藏铁路西格段沿线不同植被恢复模式的生态效益[J].生态学杂志,2019,38(3): 627 - 636. [REN Kang, GUO Kun, ZHENG Jingming, et al. Ecological benefits of different vegetation restoration modes along the Xining to Golmud section of Qinghai-Tibet Railway[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(3): 627 - 636. (in Chinese with English abstract)]

[8] 罗久富,郑景明,周金星,等.青藏高原高寒草甸区铁路工程迹地植被恢复过程的种间关联性[J].生态学报,2016,36(20): 6528 - 6537. [LUO Jiufu, ZHENG Jingming, ZHOU Jinxing, et al. Analysis of the interspecific associations present in an alpine meadow community undergoing revegetation on the railway-construction affected land of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(20): 6528 - 6537. (in Chinese with English abstract)]

[9] 陈桂琛,周国英,孙菁,等.采用垂穗披碱草恢复青藏

- 铁路取土场植被的试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2008, 29(5): 134 - 137. [CHEN Guichen, ZHOU Guoying, SUN Jing, et al. Test study on the application of Elymus nutans to the vegetation restoration in the gravel-soil-taken field along Qinghai-Tibet railway[J]. *China Railway Science*, 2008, 29(5): 134 - 137. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 周林虎,徐志闻,周国英,等. 青藏铁路沱沱河段取土场草本根系力学强度试验[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1353 - 1361. [ZHOU Linhu, XU Zhiwen, ZHOU Guoying, et al. Mechanics strength test of herb roots on the earth-borrowed area of Tuotuohe River section of the Qinghai-Tibet railway[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(5): 1353 - 1361. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 胡夏嵩,陈桂琛,周国英,等. 青藏铁路沱沱河段路基边坡植物护坡根系力学强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 107 - 113. [HU Xiasong, CHEN Guichen, ZHOU Guoying, et al. A study of the mechanic strength of vegetation roots for roadbed slope protection in the Tuotuohe River region along the Qinghai-Tibet railway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(1): 107 - 113. (in Chinese with English abstract)]
- [12] CAPILLERI P P, MOTTA E, RACITI E. Experimental study on native plant root tensile strength for slope stabilization[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 158: 116 - 121.
- [13] LIU Y B, HU X S, YU D M, 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.
- [14] 胡夏嵩,陈桂琛,周国英,等. 青藏铁路沱沱河取土场草本植物固土力学强度与化学元素含量特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1190 - 1199. [HU Xiasong, CHEN Guichen, ZHOU Guoying, et al. The roots-reinforcing strength of herbs and chemical element contents in the tuotuohe river earth-borrowed area along the Qinghai-Tibet railway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1190 - 1199. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 窦增宁,赵玉娇,刘昌义,等. 模拟降雨条件下寒旱地区边坡土体位移及土压力特征[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 117 - 122. [DOU Zengning, ZHAO Yujiao, LIU Changyi, et al. Soil displacement and earth pressure characteristics of slopes in a cold and arid region under rainfall simulation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 117 - 122. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 杨永兵,施斌,杨卫东,等. 边坡治理中的植物固坡法[J]. *水文地质工程地质*, 2002, 29(1): 64 - 67. [YANG Yongbing, SHI Bin, YANG Weidong, et al. The method of vegetation for slope protection in slope reatment[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002, 29(1): 64 - 67. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王可钧,李焯芬. 植物固坡的力学简析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(6): 687 - 691. [WANG Kejun, LI Zhuofen. Brief mechanics analysis on bioengineering techniques for slope protection[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(6): 687 - 691. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 周国英,李天才,徐文华,等. 多年冻土区工程迹地人工恢复区植物和土壤的矿质元素含量特征[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(2): 191 - 196. [ZHOU Guoying, LI Tiancai, XU Wenhua, et al. Characteristics analysis of mineral elements contents in dominant species and soil of artificial restoration vegetation of Qinghai-Tibet plateau permafrost region[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(2): 191 - 196. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李乐意. 青藏高原古近纪沱沱河盆地磁性地层及其古环境演变[D]. 西安: 中国科学院研究生院(地球环境研究所), 2015. [LI Leyi. Magnetostratigraphy and the paleoenvironment evolution of Paleogene tuotuohe basin, Tibetan Plateau[D]. Xi'an: Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 周立华. 青海省植被图(1:1 000 000)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990. [ZHOU Lihua. Vegetation map of Qinghai Province(1:1 000 000) [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990. (in Chinese)]
- [21] 张云伟,惠尚,卜晓磊,等. 3种散生竹的单根抗拉力学特性[J]. *林业科学*, 2013, 49(7): 183 - 187. [ZHANG Yunwei, HUI Shang, BU Xiaolei, et al. Mechanical characteristics of tensile strength for three monopodial bamboo single roots[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(7): 183 - 187. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 许桐,刘昌义,胡夏嵩,等. 柴达木盆地4种盐生植物根系力学特性及根-土复合体抗剪强度研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 101 - 110. [XU Tong, LIU Changyi, HU Xiasong, et al. Study on the mechanical properties of roots and the shear strengths of four halophytic plants in Qaidam Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 101 - 110. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘昌义,胡夏嵩,窦增宁,等. 黄河源区高寒草地植被根-土复合体抗剪强度试验及退化程度阈值确定[J].

- 草业学报, 2017, 26(9): 14 – 26. [LIU Changyi, HU Xiasong, DOU Zengning, et al. Shear strength tests of the root-soil composite system of alpine grassland vegetation at different stages of degradation and the determination of thresholds in the Yellow River source region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(9): 14 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 魏卫东, 李希来. 三江源区不同退化程度高寒草地土壤特征分析[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(6): 1102 – 1106. [WEI Weidong, LI Xilai. Characteristics of soil on different degraded grasslands on alpine meadow in source area of lancang, yellow and Yangtze River[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(6): 1102 – 1106. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 申紫雁, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 黄河源区高寒草地不同深度土壤理化性质与抗剪强度关系研究[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(2): 392 – 401. [SHEN Ziyang, LIU Changyi, HU Xiasong, et al. Relationships between the physical and chemical properties of soil and the shear strength of root-soil composite systems at different soil depths in alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(2): 392 – 401. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 邓坤枚, 罗天祥, 张林, 等. 云南松林的根系生物量及其分布规律的研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 21 – 24. [DENG Kunmei, LUO Tianxiang, ZHANG Lin, et al. Root biomass of different stand-age Pinus yunnanensis forests and its distribution pattern in different soil depths[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 21 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 廖博, 刘建平, 周花玉. 含根量对秋枫根-土复合体抗剪强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 104 – 110. [LIAO Bo, LIU Jianping, ZHOU Huayu. Effects of the influence of root content on the shear strength of root-soil composite of *bischofia javanica*[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 104 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [28] YE C, GUO Z L, LI Z X, et al. The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquults in subtropical China[J]. *Geomorphology*, 2017, 285: 82 – 93.
- [29] 付江涛, 李晓康, 刘昌义, 等. 基于统计理论的青海河南县地区5种草本植物根系力学特性研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1147 – 1159. [FU Jiangtao, LI Xiaokang, LIU Changyi, et al. Statistics of mechanical characteristics of five herb roots standing in Henan region of Qinghai Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1147 – 1159. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 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. [HE Zhenzhao, DANG Sheng, LIU Changyi, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 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. [LIU Yabin, LI Shuxia, YU Dongmei, et al. Experiment on single root tensile mechanical properties of typical herb species in loess region of Xining Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 157 – 166. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 李光莹, 虎啸天, 李希来, 等. 黄河源玛沁地区高寒草地植物固土护坡的力学效应[J]. *山地学报*, 2014, 32(5): 550 – 560. [LI Guangying, HU Xiaotian, LI Xilai, et al. Mechanical effects of alpine grassland plants in slope protection in Maqin County of the source area of the Yellow River[J]. *Mountain Research*, 2014, 32(5): 550 – 560. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 144 – 152. [LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(10): 144 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 余芹芹, 胡夏嵩, 李国荣, 等. 寒旱环境灌木植物根-土复合体强度模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(5): 1020 – 1031. [YU Qinqin, HU Xiasong, LI Guorong, et al. Research on strength model test of shrub root-soil composite system in cold and arid environments[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5): 1020 – 1031. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 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. [YANG Youqing, HU Xiasong, LI Xilai, et al. An experimental study of the soil shear strength reinforcement of a mine dump slope by herbaceous root systems in alpine regions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(6): 105 – 113. (in Chinese with English abstract)]