

# 黄河源河岸高寒草甸含根土体抗拉、 抗剪特性及其影响因素

张海龙<sup>1</sup>, 朱海丽<sup>1,2</sup>, 张玉<sup>3</sup>, 刘国松<sup>1</sup>, 吴悦辰<sup>1</sup>, 刘亚斌<sup>1,2</sup>, 李国荣<sup>1,2</sup>

(1.青海大学 地质工程学院, 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; 3.青海省交通规划设计研究院有限公司, 青海 西宁 810016)

**摘要:** [目的] 研究黄河源区河岸带高寒草甸含根土体抗拉、抗剪特性及其影响因素, 为源区河岸保护和河流崩岸力学机制研究提供数据支撑。[方法] 以青海省河南县兰木措弯曲河流为研究区, 以不同退化程度的河岸高寒草甸含根土体为研究对象, 分析含水率、含根量、根系组成以及冻融循环次数对含根土体抗拉、抗剪强度的影响, 并探讨含根土体抗拉强度与抗剪强度之间的关系。[结果] 含根土体的抗拉、抗剪强度随含水率从30%增加至55%逐渐减小, 且抗剪强度是抗拉强度5倍左右; 植物根系的加入能有效提高土体的抗拉、抗剪强度, 当根系含量由0%增加至0.25%, 抗拉、抗剪强度增幅分别为45%和107%, 且根土体抗拉、抗剪强度在禾本科植物比例为100%时达到最大值, 分别为4.38和19.98 kPa; 经多次冻融循环之后含根土体冰融循环次数与抗拉强度拟合曲线呈双峰式变化, 随冻融循环次数增加土体原网状结构首先破坏然后重新达到平衡; 含根土体抗拉强度与抗剪强度之间呈线性相关性。[结论] 黄河源区高寒草甸退化加剧使根量与根系形态发生了明显的变化, 表现为含根土体的抗拉、抗剪强度逐渐降低。因此, 应尽可能减少过度放牧及人为干扰, 保护河岸原生高寒草甸植被, 以保持源区河岸稳定。

**关键词:** 含根土体; 抗拉强度; 抗剪强度; 高寒草甸植物; 冻融循环

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0058-10

中图分类号: TU411, TU43

**文献参数:** 张海龙, 朱海丽, 张玉, 等. 黄河源河岸高寒草甸含根土体抗拉、抗剪特性及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 58-67. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.007; Zhang Hailong, Zhu Haili, Zhang Yu, et al. Tensile and shear characteristics and influencing factors of root-bearing soil in alpine meadow on bank of Yellow River source [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 58-67.

## Tensile and Shear Characteristics and Influencing Factors of Root-bearing Soil in Alpine Meadow on Bank of Yellow River Source

Zhang Hailong<sup>1</sup>, Zhu Haili<sup>1,2</sup>, Zhang Yu<sup>3</sup>, Liu Guosong<sup>1</sup>, Wu Yuechen<sup>1</sup>, Liu Yabin<sup>1,2</sup>, Li Guorong<sup>1,2</sup>

(1.School 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;

3.Qinghai Provincial Transportation Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Xining, Qinghai 810016, China)

**Abstract:** [Objective] The tensile and shear resistance characteristics of the riparian alpine meadow rooted soil and the influencing factors along the riverbanks of the Yellow River source area were analyzed to provide data support for research on riverbank protection and the mechanical mechanisms of riverbank failure in the source area. [Methods] Taking the meandering river Lanmucuoqu in Henan County, Qinghai Province, as the study area and the rooted soil of alpine meadows with varying degrees of degradation along riverbanks as the research object. The effects of water content, root content, root system composition, and the number of freeze-thaw cycles on the tensile and shear strength of root-bearing soil were analyzed. The relationship

收稿日期: 2024-05-04

修回日期: 2024-07-02

资助项目: 国家自然科学基金项目“冻融作用下高寒草甸表层裂缝形成力学机制及根系阻裂增韧效应”(42062019), “青藏高原东北部黄土区垂直根型灌木根系锚固机理研究”(40022283); 青海省科技厅项目(2021-ZJ-927)

第一作者: 张海龙(1999—), 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: 1433059329@qq.com。

通信作者: 朱海丽(1977—), 女(汉族), 江苏省溧阳市人, 博士, 教授, 主要从事边坡生态防治及河流生态研究。Email: qdzhuhaili@163.com。

between the tensile and shear strengths of the root-bearing soil was also explored. [Results] The tensile and shear strengths of the rooted soil gradually decreased as the water content increased from 30% to 55%, and the shear strength was approximately five times than that of the tensile strength. The addition of plant roots effectively improved the tensile and shear strength of the soil. As the root content increased from 0% to 0.25%, the tensile and shear strengths increased by 45% and 107%, reaching maximum values of 4.38 and 19.98 kPa, respectively, when the proportion of gramineous plants was 100%. After multiple freeze-thaw cycles, the fitting curve of the root-bearing soil showed a bimodal pattern, with the original network structure of the soil first being destroyed and then reaching a new equilibrium as the number of freeze-thaw cycles increased. A linear correlation was observed between the tensile and shear strengths of root-bearing soil. [Conclusion] The degradation of alpine meadows in the Yellow River source area has led to significant changes in root quantity and root system morphology, resulting in a gradual decrease in the tensile and shear strengths of the rooted soil. Therefore, it is necessary to minimize overgrazing and human interference to protect the native alpine meadow vegetation along riverbanks and maintain the stability of riverbanks in the source area.

**Keywords: rooted soil; tensile strength; shear strength; alpine meadow plant; freeze-thaw cycles**

黄河源区位于青藏高原东北部,曲流广泛发育,河岸带植被类型以高寒草甸为主,并伴有部分高寒沼泽草甸<sup>[1-2]</sup>。滨河草甸植被根系对提高河岸上部土层的抗剪强度、减缓河岸带张拉裂隙的发育和减缓冻胀效应都具有重要作用<sup>[3]</sup>。近几十年来,由于全球气候变化和人类活动的影响,青藏高原东部高寒草甸正在发生不同程度的退化,其退化演替引起了植物群落组成的变化<sup>[4-5]</sup>。河岸植被的退化不仅影响物种多样性的变化和地下有效根系的减少,而且影响植被河岸的抗拉强度和抗剪强度,降低河岸的稳定性,影响河流的横向演变趋势<sup>[6]</sup>。因此,开展对黄河源区高寒草甸含根土体力学特性的研究,可为源区河岸保护和河流横向演变分析提供数据支撑。近年来,国内外学者通过对含根重塑土体与原状土体力学特性开展了大量研究,发现含根土体力学特性受到多因素影响。张晓明等<sup>[7]</sup>验证了在相同的植被、干密度、含水率以及同一垂直荷载下,原状土的抗剪强度大于重塑土。李健等<sup>[8]</sup>在研究纤维加筋重塑土的抗拉强度试验研究中发现,土体的纤维掺量、干密度和含水率的变化,都会对其抗拉强度产生影响。刘昌义等<sup>[9]</sup>、杨馥铨等<sup>[10]</sup>通过对青海省河南县境内的高寒草甸根土体开展抗剪试验,发现随着退化程度的加剧,根—土复合体抗剪强度随高寒草甸原生植物种类及数量减少呈降低的趋势。牛家永等<sup>[11]</sup>通过应用自主研发的一套单轴拉伸试验装置,定量分析灌木植物胡枝子(*Lespedeza bicolor*)根系对土体抗拉强度的增强作用,研究发现根—土复合体的抗拉强度随含根量的增加非线性增大变化。此外, Schwarz 等<sup>[12]</sup>研究植物根系对土体的抗拉增强作用时提出,根径不同,其与土体接触面积则不同,

根—土界面摩擦力则会存在较大差异,从而影响根土体抗拉强度。随着高寒草甸退化加剧,地上及地下生物量降低<sup>[13-14]</sup>、植被覆盖度下降<sup>[15]</sup>以及根系形态组成发生变化,由禾本科与莎草科根系逐渐向杂草类根系转变,根系体积的增加和须根数量的减少<sup>[16]</sup>,降低了根土接触面积,改变了不同退化程度样地含根土体力学特性。此外,由于黄河源区季节性冻融作用和降水季节性分布的特点,当高寒草甸根土体冻胀力超过一定数值,土颗粒之间的排列和联结则会发生改变<sup>[17]</sup>;而降雨影响土体水分蒸发速率和植物蒸腾作用,使根土体中产生含水率梯度<sup>[18]</sup>,两者都对根土体力学特性产生影响。

综上,深入分析高寒草甸退化和黄河源区特殊气候变化引起的地下生物量、根系组成、土体含水率和冻融循环次数等变化而使根土体力学特性的改变,对于分析源区河岸、路堑边坡稳定具有重要意义。目前针对高寒草甸力学特性的研究相对较少,现有成果多为高寒草甸植物根—土复合体抗拉、抗剪强度数值的试验研究<sup>[19]</sup>,缺少对其力学特性影响因素的深入分析。本研究基于前期对黄河源区河流侵蚀和崩岸现象相关研究发现,河岸破坏形式和崩退速率受季节性降水、土体冻胀变化、草地退化及人为干扰等因素不同程度的影响,且目前分析相关因素对河岸稳定性影响的研究缺少河岸带根土体力学数据支撑,为此,本研究通过开展不同含水率、含根量(根土比)、根系组成以及冻融循环次数的室内重塑含根土抗拉、抗剪试验,深入系统分析高寒草甸含根土体抗拉强度和抗剪强度及其主要影响因素,对分析黄河源区高寒草甸型河岸、边坡的稳定性尤为必要,为解释河流崩岸力学机制提供数据支撑。

# 1 研究区概况

研究区位于青海省黄南藏族自治州河南县兰木措曲弯曲河流,地理坐标为 34°26′—35°02′N, 101°23′—101°35′E,海拔 3 400~4 200 m,属于典型的高寒草甸型弯曲河流。据 1981—2018 年河南县气象数据观测资料可知,研究区四季不分明,气候寒冷,降水量少,蒸发量大,日温差大,无绝对无霜期,多年平均降水量为 560.5 mm,多年平均蒸发量为 1 349 mm,年平均气温 0.4 ℃,属于季节性冻土区<sup>[20]</sup>。根据前期对研究区调查统计,发现研究区高寒草甸由于受到放牧和人类活动影响,呈现以牧民居住点为中心向外辐射的植被退化,地表植被覆盖度和物种组成均呈现一定变化。其中原生草甸优势植物种主要为禾本科植物冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)以及

莎草科华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*),退化草甸则以杂毒草二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)等杂毒草为优势植物种。

本研究基于大范围的野外调查和原位样方试验,对研究区高寒草甸进行了退化等级划分,综合不同退化程度样地草甸退化指标值(表 1),并依据《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级标准(GB19377—2003)》,以空间序列代替时间演替的方法和原则<sup>[21-22]</sup>,将研究区内高寒草甸划分为轻度退化草甸、中度退化草甸和重度退化草甸。不同退化程度的高寒草甸植被组成及覆盖度详见表 1。随高寒草甸退化程度加剧,研究区植被覆盖度从 100% 减小到 70%。在轻度到重度退化的样地中,原本占据优势的禾本科和莎草科植物覆盖面积也随之减少,从 71% 降至 40%,逐渐被杂类草本植物群落所取代。

表 1 不同退化程度高寒草甸分级指标

Table 1 Grading indicators of different degrees of degradation in alpine meadows

退化等级	植物群落优势种	禾本科+莎草科覆盖面积/%
轻度退化(95%~100%)	华扁穗草、线叶嵩草、冷地早熟禾	71
中度退化(80%~90%)	华扁穗草、达乌里秦艽( <i>Gentiana macrophylla</i> )、美丽风毛菊	55
重度退化(70%~80%)	二裂委陵菜、玲玲香青( <i>Anaphalis hancockii</i> )、线叶嵩草	40

# 2 材料与方法

## 2.1 试验材料

为分析滨河植被含根土体在不同降水、冻融、含根量及根系组成等因素影响下的土体抗拉、抗剪特性变化规律,为室内重塑力学试验物理参数和根系参数的设定提供依据,为此,在研究区分别选取轻度、中度、重度 3 种不同退化程度样地作为试验和取样点位。2022 年 7 月,在 3 个不同退化程度试验点位开展对原位土样密度、含水率、颗粒级配、根系组成、含根量等基本参数的测定和取样工作。基于前期对研究区含根土体作用范围调查,发现河岸带含根土体发生剪切破坏和拉张破坏的主要作用于地表以下 0—30 cm 深度范围,因此将原位取样的深度确定为 0—30 cm,分 3 层取样(0—10 cm,11—20 cm 和 21—30 cm)。其中,土体含水率采用烘干法测定;密度采用称重法测定。根据《土工试验方法标准(GB/T50123-2019)》进行相关基本参数的测定,试验结果详见表 2。

试验所用的土体材料取自 3 种不同退化程度研究区取样点地表以下 0—30 cm 深度范围的土体。含

根土体所用的根系分别为原生高寒草甸优势植物种禾本科垂穗披碱草和莎草科华扁穗草,退化高寒草甸优势物种以杂类草二裂委陵菜为主。利用现场挖掘法挖取花盆大小的含根土体土柱,将其装入花盆并带回实验室放入大塑料桶内浸泡 6 h,然后用水冲洗,从而获得干净的植物根系;不同退化样地含根量用剖式根钻(直径 100 mm,高为 200 mm)取得每层的土样,分离根—土复合体并烘干 8 h 后称取每层干根、干土的质量,平均得到其不同退化样地根土比,具体计算公式为:

$$R_s=\frac{m_{\text{根}}}{m_{\text{土}}}$$

(1)

式中: $R_s$  为根土比;  $m_{\text{根}}$  为干根的质量(g);  $m_{\text{土}}$  为干土的质量(g)。结合抗拉试验模具拉伸段长度(7 cm)和植物根系平均长度、直径(垂穗披碱草和华扁穗草根径为 0.23~0.37 mm,二裂委陵菜根径为 4~6 mm),将单轴抗拉试样中所含的华扁穗草和垂穗披碱草的根系长度剪至 8~10 cm(图 1)、委陵菜剪至 7 cm 备用;基于小环刀高度(内径为 61.8 mm,高为 20 mm),直剪试样中根系长度剪至 2~3 cm。



表 2 不同退化程度高寒草甸含根土体基本特性

Table 2 Basic characteristics of alpine meadow soil with different degrees of degradation

退化程度	含水率 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含根量/ $\%$	植物根系组成	颗粒组成/ $\%$			土体类型
					$>0.25\text{ mm}$	$0.25\text{--}0.075\text{ mm}$	$<0.075\text{ mm}$	
轻度退化	$50.29 \pm 8.94$	$1.11 \pm 0.08$	$0.40 \pm 0.21$	GC80%, W20%	$25.29 \pm 3.25$	$64.19 \pm 3.86$	$10.52 \pm 1.81$	砂质粉土
中度退化	$37.63 \pm 5.82$	$1.10 \pm 0.16$	$0.21 \pm 0.11$	GC50%, W50%	$33.49 \pm 5.17$	$56.17 \pm 5.39$	$10.33 \pm 1.82$	砂质粉土
重度退化	$33.21 \pm 6.19$	$1.14 \pm 0.16$	$0.19 \pm 0.09$	GC20%, W80%	$28.74 \pm 5.45$	$58.02 \pm 6.12$	$14.24 \pm 5.17$	砂质粉土

注:数据为:平均值±标准误差;GC表示禾本科、莎草科优势植物垂穗披碱草和华扁穗草,W表示杂类草二裂委陵菜。下同。



图 1 试验用根系材料

Fig.1 Root materials for experiments

2.2 试验设计

基于研究区 3 种不同退化程度草甸根系组成、含根土体含水率、含根量等变化范围,设定含水率、冻融循环次数、含根量和植物根系组成 4 个因素在不同水平条件下的单因素试验。含水率设定 30%,35%,40%,45%,50%,55% 共 6 个梯度;根系含量设定 0%,0.05%,0.1%,0.15%,0.2% 和 0.25% 共 6 个梯度,其中含根量 0% 即不含根素土试样。由表 2 可知,3 种退化程度草地同一深度范围内(0—30 cm)土体的干密度和颗粒级配变化范围较小,因此取其平均值制备不同单因素水平条件下的重塑试样,故将重塑试样干密度设定为 0.8 g/cm<sup>3</sup>,并按比例等质量均匀混合不同退化程度样地的土体。基于野外调查和试验

分析结果(表 2),课题组以不同退化程度植物根系组成占比为依据,设定 4 种根系组成变化,考虑不同植物根系比例对含根土的抗拉、抗剪强度的影响。设定 4 种植物根系组成,分别为禾本、莎草科植物根系质量比例为 100% 代表未退化高寒草甸(对照),80% 禾本、莎草科和 20% 杂类草根系组成代表轻度退化高寒草甸、50% 禾本、莎草科和 50% 杂类草根系组成代表中度退化高寒草甸、20% 禾本、莎草科和 80% 杂类草植物根系组成代表重度退化高寒草甸。结合研究区 2000—2022 年温度和日照时长资料,试验冻结温度和融化温度分别设定为-20 ℃和 10 ℃,冻、融时长各为 12 h,此为完成一次冻融循环。冻融循环次数设置 6 个梯度,即:0,1,4,7,10 和 13 次,具体试验设计详见表 3。

表 3 单因素试验设计

Table 3 Single factor experimental design

试验编号	含水率/ $\%$	冻融次数/次	含根量/ $\%$	根系组成
1	30,35,40,45,50,55	0	0.1	GC100%
2	40	0,1,4,7,10,13	0.1	GC100%
3	40	0	0,0.05,0.1,0.15,0.2,0.25	GC100%
4	40	0	0.1	GC100% GC80%,W20% GC50%,W50% GC20%,W80%

2.3 试验方法

2.3.1 试样制备 根据试验设计进行重塑试样的制备,制取过程根据规范《土工试验方法标准(GB/

T50123—2019)》进行。将烘干后试验土样过 2 mm 筛,按试验设计分别称取相应质量的干土和水,充分混合拌匀后,密封静置 24 h,浸润完全后待用。根系



布设方式依据抗拉、抗剪模具的差异而设置不同。其中,抗拉模具中根系沿垂直方向分 3 层水平布设,先后称配制好相应质量的素土,采用击实法分 3 层制得抗拉试样(图 2);直剪试样中将一定配比的根系与土体混合均匀,然后分 3 层采用击实筒(内径为 61.8 mm,高为 125 mm)制取直剪试样,分层制样过程中,用小刀刮毛各抗拉、抗剪层间的接触面。冻融抗拉试样是在未冻融试样基础上,继续完成相应次数的冻融循环而制得。



图 2 重塑单轴抗拉试样

Fig.2 Remolded uniaxial tensile specimen

2.3.2 重塑单轴抗拉试验 单轴抗拉试验设备采用 TFL-3KN 型微电脑卧式拉力试验机(图 3),主要由试验机、位移传感器(量程为 0~600 mm,精度为 0.001 mm)、拉力传感器(量程为 0~0.2 kN,精度为 0.01 N)、试样加载夹具、拉伸模具及数据采集系统组成。为避免拉伸模具应力集中,基于现有室内单轴拉伸试验装置<sup>[23]</sup>,课题组设计了一种哑铃形模具,增加拉伸段和扩大段连接处长度,设定为 7 cm。基于野外调查,研究区滨河植被含根土体拉张裂隙主要形成于地表以下 0—10 cm 深度范围,故将模具高度设为 10 cm,以此更符合实际。试验步骤具体为:先将装有试样的模具放在拉伸试验装置的承台上;其次,在电脑端设定试验拉伸速率为 0.1 mm/min,启动试验机,试验过程中拉应力、应变由数据采集系统自动采集;最后,当数据采集系统中的应力急剧下降至不在变化时,停止试验。土体的抗拉强度计算公式为:

$$P=\frac{F}{S}$$

(2)

式中: $P$  为土体抗拉强度; $F$  为含根土体抗拉力(N); $S$  为模具断裂处横截面面积(mm<sup>2</sup>)。

2.3.3 重塑直剪试验 按照《土工试验方法标准(GB/T50123-2019)》对制备好的环刀土样展开直剪试验。采用试验室 ZJ 型应变控制式直剪仪开展直接

剪切试验,剪切速率设定为 0.8 mm/min,采用逐级加压的方式,每组试样施加的法向应力分别为 50,100,150 和 200 kPa,每组试样试验结束后,记录所得黏聚力  $c$  值和内摩擦角  $\varphi$  值。为了更好地与抗拉试验结果对比分析,本研究以 10 cm 深度土体承受的垂直压力为依据,代入库仑公式得到其抗剪强度。

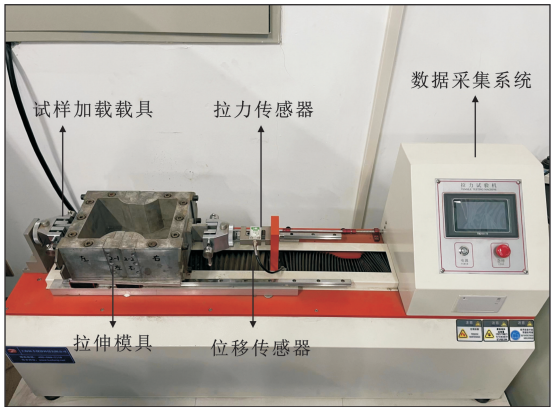


图 3 重塑拉伸试验仪器

Fig.3 Remolded tensile testing instrument

3 结果与分析

3.1 含水率对含根土体抗拉、抗剪强度影响

由试验结果可知,当试样含根量为 0.1%,根系组成为禾本科和莎草科植物时,含根土体抗拉强度随含水率从 30%增加至 55%,呈逐渐下降的变化趋势,减大幅度达 18.80%;当含水率为 30%时,其抗拉强度最大,达 4.84 kPa。植物根系对土体加固作用主要受根土界面摩擦力和黏聚力两因素影响<sup>[24-25]</sup>。当土样含水率增加时,根土界面自由水分增多,润滑作用加强,根土界面摩擦力降低。此外,含水率的增加还会导致黏土颗粒的水化膜变厚,粒间作用力减小,当根系在土中发生滑动时,界面上土颗粒发生重排所需克服的阻力也会减小。因此,随着含水率的增加,试样中根系的抗拔能力呈下降趋势<sup>[26]</sup>,表现为含根土体抗拉强度下降。由图 4 可知,含根土体抗剪强度随着含水率的增加从 27.96 kPa 减小到 12.87 kPa,约是抗拉强度的 5 倍。

3.2 含根量对重塑土体抗拉、抗剪强度影响

由重塑土体抗拉强度与含根量关系拟合曲线(图 5)可知,在含水率为 40%条件下,不含根土体的抗拉强度为 3.56 kPa,说明拉应力达到该值时,土颗粒间的联接发生断裂破坏。植物根系的加入能有效提高试样的抗拉强度,且抗拉强度随植物根系掺量的增加而增加。在含水率相同条件下,含根量梯度从 0%增加至 0.25%,其抗拉强度增加幅度为 45%,且含根土的抗拉强度在含根量为 0.25%时达到最大,抗拉强度分别是不含根土体的 1.19,1.23,1.25,1.46 和 1.45

倍。从图 5 分析可知,不含根土体抗剪强度与抗拉强度分别是 13.3 和 3.56 kPa,二者均随含根量的增加而增大。主要由于根系的增加改变了土体内部的应力分布,增强了对土体剪切面黏聚力与摩擦力作用。在剪切过程中,根系在土中的分布形态能够在多个方向上分散剪切应力,提高含根土体的整体抗剪强度<sup>[27]</sup>。相比之下,含根土体在受到拉伸力作用时,只有与拉伸方向一致的根系能够有效地承受拉应力,应力集中于特定的断裂面,无法更好地发挥根系增强效应<sup>[28]</sup>。因而综合表现为相同含水率条件下,含根土体的抗剪强度大于其抗拉强度。

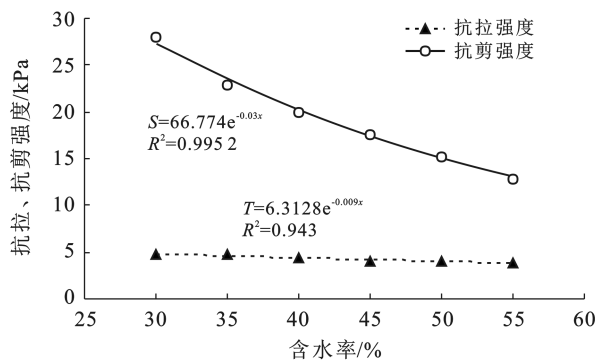


图 4 含根量为 0.1%条件下含根土体含水率与抗拉强度拟合关系

Fig.4 Fitting relationship between water content of soil with roots and tensile strength under condition that root content is 0.1%

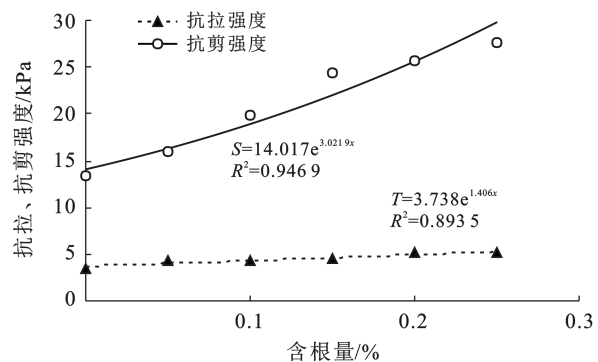


图 5 重塑土体含根量与抗拉强度拟合关系

Fig.5 Fitting relationship between root content and tensile strength of remolded soil

### 3.3 根系组成对含根土体抗拉、抗剪强度影响

由含根土体根系组成与其抗拉强度关系拟合曲线(图 6)可知,随着禾本科和莎草科植物根系比例由 20%增加至 100%,杂草根系所占比例逐渐减小,含根土体的抗拉强度呈增大的趋势,抗拉强度集中在 3.34~4.38 kPa,增幅为 31.14%,表明禾本科和莎草科植物根系对土体的抗拉增强作用大于杂草根系。李光莹等<sup>[29]</sup>研究发现高寒草甸禾本科植物根系单根抗拉

强度最大,其次为莎草科,杂草类根系强度最小。表明植物单根抗拉强度越大,其对含根土体抗拉增强作用愈明显,拉伸作用下含根土体从微裂缝出现到破坏的过程中,根系发达的植物可以结合根土界面的摩擦力,对土体起到横向牵引的作用,发挥一定的力学加固作用,从而不同程度地减缓土体裂缝产生与扩展。可以看出,根系自身强度决定着土体的力学特性,因此,含根土体的抗剪强度随禾本科与莎草科植物比例增加而增大,其数值增加了 11.8 kPa,增幅达到 222.64%。

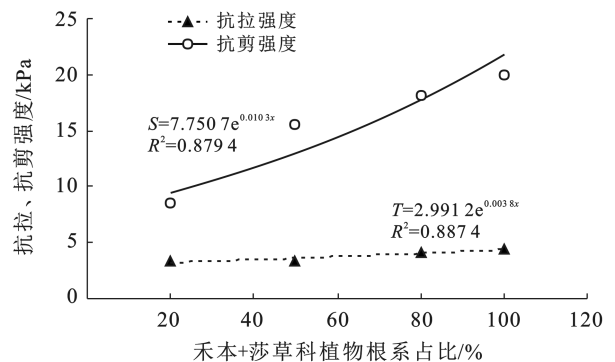


图 6 含根土体抗拉强度与禾本科植物根系比例拟合关系  
Fig.6 Fitting relationship between tensile strength of root-containing soil and proportion of gramineous plant roots

### 3.4 冻融循环对含根土体抗拉、抗剪强度影响

由试验结果可知,当冻融循环次数由 0 次增加至 13 次,含根土体冻融循环次数与抗拉强度拟合曲线呈双峰式变化,其抗拉强度在冻融 1 次和 10 次时出现峰值,较未冻融土体分别增加了 0.74 和 1.37 kPa,在第 13 次冻融循环结束后降至最小值 3.4 kPa。在冻融循环 1 次时,土颗粒由于冻融作用产生破裂<sup>[30]</sup>,造成土体与植物根部的接触点增多,使得根土实际接触面积变大,界面摩擦强度也随之增加,进而表现为含根土体试样抗拉强度较未冻融试样增加。含根土体在冻融循环 10 次时有明显的回升,而后变化趋于下降,可能是含根土体随着冻融循环次数的增加,土体由于受到穿插的根系作用,原网状根土结构被破坏并进行重组,土颗粒大小、形状、颗粒间的孔隙及根系与土颗粒间的联结状态在重组过程中趋于稳定,根—土体结构达到新的平衡状态,因此,表现出受冻融循环影响变小,根—土体抗拉强度有所增加的趋势<sup>[18,31]</sup>。此后冻融循环对土体的作用变得非常微弱,根土界面的摩擦力逐渐稳定<sup>[32]</sup>。不同冻融循环次数下含根土体抗剪强度如图 7 所示,由图 7 分析得知,含根土体在冻融循环 1 次时,土颗粒由于冻融作用而破碎,达到最小值 12.07 kPa,而后在多次冻融循环作用下土颗粒及根系逐渐稳定,达到新的平衡。从图 7 可以看出,含根土体在多次冻融循环之后,其抗拉强



度与抗剪强度表现出明显的差异。在拉伸力作用下,含根土体的抗拉强度主要依赖于根系的力学特性,而冻融作用会损伤根系的完整性<sup>[18]</sup>,降低其抗拉强度,从而直接影响土体的抗拉性能。在剪切状态下,尽管植物根系在多次冻融循环作用下会受损,但土体中的土颗粒间的摩擦力仍然在一定程度上高于拉伸时的土颗粒表面摩擦力。

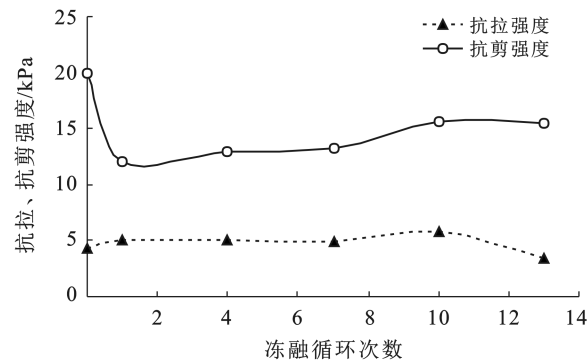


图 7 含根土体冻融循环次数与抗拉强度关系  
Fig.7 Relationship between freeze-thaw cycles and tensile strength of root soil

4 讨论

4.1 不同退化程度高寒草甸含根土体力学特性

高寒草甸退化表现为草甸生产力不断下降,植被群落的盖度、地上和地下生物量下降,群落结构的稳定性和物种的多样性发生变化,植被优势种由禾本科和莎草科植物逐渐变为以杂类草功能群植物为主<sup>[33]</sup>。研究区高寒草甸随着退化程度加剧,地下生物量和植物群落发生了明显改变,这些变化直接影响到含根土体的力学特性。研究区高寒草甸从轻度退化到重度退化样地,发现其含根量降低幅度为 52.5%,由此表现为重塑含根土体抗拉、抗剪强度随含根量减小

而降低,这是由于当含根土体受力时,植物根系与土颗粒之间界面作用力对根系滑动起到了一定的限制作用,使植物根系承受试样的部分拉应力与剪应力,而随着草地退化加剧,这种增强效应减弱。该结果与 Waldron 等<sup>[34]</sup>通过直剪试验发现根—土复合体的抗剪强度与穿过剪切面的含根量有直接关系,土的抗剪强度随根的数量减小而呈降低趋势的结论一致。

此外,李海云等<sup>[35]</sup>通过分析 4 种不同退化程度草地的植被群落发现,在草地退化过程中莎草科和禾本科覆盖度呈现降低趋势,杂类草盖度呈现升高趋势,植物群落组成发生明显变化。该结果与本研究区植物群落的变化趋势一致,草甸退化不仅导致地下生物量的减少,而且植物形态也发生了明显的变化。基于对研究区植被根径调查可知,垂穗披碱草和华扁穗草根径在 0.23~0.37 mm 范围内,主要为须根型,根径较细且根量丰富(图 8a),华扁穗草有较长的匍匐根状茎,有节,节上生根(图 8b)<sup>[3]</sup>,须根增强了根土界面摩擦力和抗拉拔作用,当根土体受到剪切和拉伸作用时,植物根系通过将土体基质中的作用力传递到根系的抗拉强度,帮助分散应力,从而提高了含根土体的抗拉、抗剪性能,具有较强的力学加固作用;而二裂委陵菜根系为主直根型,根径较粗(4~6 mm)且数量稀少(图 8c),较粗的根在土体抗拔过程中仅发挥了有限的抗拉强度,无法有效地提升土体的结构稳定性。因此,以杂类草植被为主的含根土体抗拉、抗剪强度低于以禾本科、莎草科植被根系为主的根土体。该结果与刘昌义等<sup>[8]</sup>通过对比不同退化程度高寒草甸根—土复合体抗剪强度大小的研究,得出随着草地退化程度加剧,原生植物种类及数量减少,次生植物逐渐取代原生植物并构成优势植物种类,使得植物群落改变,导致根—土复合体抗剪强度减小的结论一致。



图 8 不同植物种根系形态  
Fig.8 Root morphology of different plant species



综上所述,植被根系穿插在土体中,增加了与土颗粒间的接触面积,形成具有网络结构的根土体,提高了高寒草甸根土体的抗拉、抗剪强度。含水率与冻融循环会影响根系与土体间界面摩擦力及根系强度,从而间接影响根土体力学特性。随着含水率从 30% 增加至 50%,土颗粒间摩擦力和黏结力减小,根土体界面摩擦力降低,导致含根土体抗拉、抗剪强度下降。此外,多次冻融循环会破坏土颗粒间的联结,影响根系强度,从而进一步降低根土体抗拉、抗剪强度。以上研究结果与刘国松等<sup>[20]</sup>,格日乐等<sup>[26]</sup>研究结论一致。

河岸带高寒草甸退化不仅改变了原生植物群落的物种组成、降低了地下生物量,而且破坏了土壤的结构完整性,减弱了根土体蓄水能力,综合影响河岸带高寒草甸含根土体力学特性。本文主要针对 4 种单因素对根土体抗拉、抗剪强度的影响开展了试验分析,对于各因素两两组合或综合作用对根土体力学特性的影响有待深入。

#### 4.2 含根土体抗拉强度与抗剪强度的关系

通过使用 SPSS 软件对不同含水率、含根量、根系占比下含根土体抗拉强度与抗剪强度进行线性分析和曲线拟合,取抗剪强度  $\tau$  为自变量,抗拉强度  $T$  为因变量。结合 SPSS 软件得出抗拉强度与抗剪强度的线性回归方程:

$$T=0.076\ 7\tau+2.827\ 3 \quad (3)$$

通过方程可间接由土体抗剪强度计算其抗拉强度。由抗拉强度与抗剪强度的线性回归拟合曲线可知,两者之间呈现很好的正相关性, $R^2$  为 0.908 且大于 0.8,修正后方差为 0.9,说明拟合程度较好。抗拉强度与抗剪强度变化趋势相似,但由于在破坏时的受力条件不同,抗拉强度小于抗剪强度。由摩尔—库伦 (Mohr-Coulomb) 破坏准则可知,土体的抗剪强度综合了黏聚力与摩擦力的作用,且根系通过与土颗粒间的相互缠绕,增加了其接触面积,增强了土体的结构稳定性。在剪切应力的作用下,土体内部颗粒间的摩擦力起决定性作用并涉及整个颗粒间的接触面,而在拉伸作用下颗粒与颗粒之间同样会产生摩擦、错动、转动等现象,但这些现象主要发生在颗粒表面,且根土体受拉伸作用时,只有与拉伸方向一致的根系能够有效地承受拉应力,无法更好地发挥根系增强效应。因此土体抗拉强度较低,正因为这种差异,土体的抗拉强度通常小于其抗剪强度。

## 5 结论

(1) 研究区不同退化程度高寒草甸根土体含水

率随着草甸退化程度加剧呈降低的变化规律,当含水率从 30% 增加至 55%,含根土体中的水份会起到润滑作用,降低根土界面黏聚力和摩擦力,使其抗拉强度与抗剪强度都表现出递减趋势,且抗剪强度约是抗拉强度的 5 倍。

(2) 研究区河岸带根土体含根量随着草甸退化加剧而逐渐降低,禾本科与莎草科植物根系含量从 0.25% 降低至 0%,含根土体的抗拉、抗剪强度随之降低。植物组成表现出随草地退化程度加剧,禾本科和莎草科植物根系减少、而杂类草根逐渐增多,其重塑根土体抗拉、抗剪强度分别降低了 23.74% 和 57.6%。

(3) 随着冻融循环次数的增加,含根土体的抗拉、抗剪强度总体呈波状减小的变化趋势。在冻融循环第 10 次时,土颗粒及根系逐渐稳定化,使土体结构达到新的动态平衡状态,达到最大强度值分别为 5.75 和 15.65 kPa。

(4) 通过线性回归推出含根土体抗拉强度与抗剪强度间呈正相关关系 ( $R^2=0.908$ ),说明随草甸退化加剧,根量与根系形态发生变化,总体表现出抗拉、抗剪强度递减的趋势。综合根土体在 4 种因素不同水平条件下的抗拉、抗剪强度数值变化幅度,初步确定根量及根系组成是影响根土体力学特性的主要因素。

#### 参考文献 (References)

- [1] Li Jing, Zhang Fawei, Lin Li, et al. Response of the plant community and soil water status to alpine Kobresia meadow degradation gradients on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Ecological Research*, 2015, 30(4): 589-596.
- [2] Zeng Chen, Zhang Fan, Wang Quanju, et al. Impact of alpine meadow degradation on soil hydraulic properties over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 478: 148-156.
- [3] 朱海丽. 黄河源区弯曲河流滨河植被增强河岸稳定作用机理研究[D]. 青海 西宁: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2018.  
Zhu Haili. Study on the mechanism of riverbank stabilization reinforcement by the riparian vegetation of meandering river in the Yellow River source region [D]. Xining, Qinghai: Chinese Academy of Sciences (Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [4] Wang Genxu, Wang Yibo, Li Yuanshou, et al. Influences of alpine ecosystem responses to climatic change on soil properties on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Catena*, 2007, 70(3): 506-514.
- [5] Wang Genxu, Liu Guangsheng, Li Chunjie. Effects of changes in alpine grassland vegetation cover on hillslope

- hydrological processes in a permafrost watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2012,444:22-33.
- [6] Zhu Haili, Gao Peng, Li Zhiwei, et al. Impacts of the degraded alpine swamp meadow on tensile strength of riverbank: A case study of the upper Yellow River [J]. *Water*, 2020,12(9):2348.
- [7] 李建,唐朝生,王德银,等.纤维加筋土的抗拉强度试验研究[C]//山东 青岛:中国地质学会工程地质专业委员会.第九届全国工程地质大会论文集.2012:669-674.
- Li Jian, Tang Chaosheng, Wang Deyin, et al. Experimental study on tensile strength of fiber reinforced soil [C] // Qingdao, Shandong: Engineering Geology Committee of China Geological Society. Proceedings of the 9th National Engineering Geology Congress. 2012: 669-674.
- [8] 张晓明,王玉杰,夏一平,等.重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究[J].*农业工程学报*, 2006, 22 (11):6-9.
- Zhang Xiaoming, Wang Yujie, Xia Yiping, et al. Shear strengths of undisturbed and remolded soils of typical vegetations in Jinyun Mountain of Chongqing City [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006,22(11):6-9.
- [9] 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.
- [10] 杨馥铖,刘昌义,胡夏嵩,等.黄河源区不同退化程度高寒草地理化性质及复合体抗剪强度研究[J].*干旱区研究*, 2022,39(2):560-571.
- Yang Fucheng, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Study on physical and chemical properties and shear strength characteristics of root-soil composite system with different degradation degrees of alpine grassland in the source region of the Yellow River [J]. *Arid Zone Research*, 2022,39(2):560-571.
- [11] 牛家永,周永毅,张建经,等.基于新型拉伸装置的根—土复合体抗拉强度[J].*西南交通大学学报*, 2022, 57 (1):191-199.
- Niu Jiayong, Zhou Yongyi, Zhang Jianjing, et al. Tensile strength of root and soil composite based on new tensile apparatus [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022,57(1):191-199.
- [12] Schwarz M, Cohen D, Or D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles [J]. *Journal of Geophysical Research (Earth Surface)*, 2010,115(F4):F04035.
- [13] 肖玉,陈米贵,周杰,等.青藏高原腹地青藏苔草草原不同退化程度的植物群落特征[J].*应用与环境生物学报*, 2014,20(4):639-645.
- Xiao Yu, Chen Migui, Zhou Jie, et al. Plant community features of *Carex moorcroftii* steppe at different degradation degrees in the interior of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014,20(4):639-645.
- [14] 刘伟,周华坤,周立.不同程度退化草地生物量的分布模式[J].*中国草地*, 2005,27(2):9-15.
- Liu Wei, Zhou Huakun, Zhou Li. Biomass distribution pattern of degraded grassland in alpine meadow [J]. *Grassland of China*, 2005,27(2):9-15.
- [15] Peng Fei, Xue Xian, You Quangang, et al. Change in the trade-off between aboveground and belowground biomass of alpine grassland: Implications for the land degradation process [J]. *Land Degradation and Development*, 2019,31(1):105-117.
- [16] 柳小妮,孙九林,张德罡,等.东祁连山不同退化阶段高寒草甸群落结构与植物多样性特征研究[J].*草业学报*, 2008,17(4):1-11.
- Liu Xiaoni, Sun Jiulin, Zhang Degang, et al. A study on the community structure and plant diversity of alpine meadow under different degrees of degradation in the Eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008,17(4):1-11.
- [17] 王恒星,杨林.冻融作用下草本植物根系加固土体试验研究[J].*冰川冻土*, 2018,40(4):792-801.
- Wang Hengxing, Yang Lin. Experimental study on the reinforcement of herbaceous plant roots under freezing-thawing cycles [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018,40(4):792-801.
- [18] 孙畅,唐朝生,程青,等.土体—大气相互作用下土质边坡稳定性研究[J].*地球科学*, 2022,47(10):3701-3722.
- Sun Chang, Tang Chaosheng, Cheng Qing, et al. Stability of soil slope under soil-atmosphere interaction [J]. *Earth Science*, 2022,47(10):3701-3722.
- [19] 李本锋,朱海丽,谢彬山,等.黄河源区河岸带高寒草甸植物根—土复合体抗拉特性研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2020,39(2):424-432.
- Li Benfeng, Zhu Haili, Xie Binshan, et al. Study on tensile properties of root-soil composite of alpine meadow plants in the riparian zone of the Yellow River source region [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020,39(2):424-432.
- [20] 刘国松,朱海丽,张玉,等.冻融作用对黄河源区曲流河

- 岸土体抗剪特性的影响[J].干旱区研究,2023,40(10):1637-1643.
- Liu Guosong, Zhu Haili, Zhang Yu, et al. Influence of freezing and thawing on the shear resistance of meandering riverbank soil in the Yellow River source region [J]. *Arid Zone Research*, 2023,40(10):1637-1643.
- [21] 段鹏,张永超,王金贵,等.青藏高原高寒湿地退化过程中土壤微生物群落功能多样性特征[J].草地学报,2020,28(3):759-767.
- Duan Peng, Zhang Yongchao, Wang Jingui, et al. Functional diversity of soil microbial communities during degradation of alpine wetlands in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020,28(3):759-767.
- [22] 王亚飞,樊军,贾沐霖.黄土高原水蚀风蚀交错区植被恢复中土壤水分变化[J].草地学报,2016,24(2):344-350.
- Wang Yafei, Fan Jun, Jia Mulin. Variation of soil water content during vegetation restoration in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016,24(2):344-350.
- [23] 黄伟,项伟,王菁莪,等.基于变形数字图像处理的土体拉伸试验装置的研发与应用[J].岩土力学,2018,39(9):3486-3494.
- Huang Wei, Xiang Wei, Wang Jing'e, et al. Development and application of digital image processing technology based soil tensile apparatus [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018,39(9):3486-3494.
- [24] 栗岳洲,付江涛,余冬梅,等.寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1370-1383.
- Li Yuezhou, Fu Jiangtao, Yu Dongmei, et al. Mechanical effects of halophytes roots and optimal root content for slope protection in cold and arid environment [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015,34(7):1370-1383.
- [25] Hu Xiasong, Brierley G, Zhu Haili, et al. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013,10(4):668-686.
- [26] 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.
- Ge Rile, Liu Yanqi, Zuo Zhiyan, et al. Effect of soil moisture on the characteristics of root-soil interface interaction [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(1):135-140.
- [27] 刘建平,周花玉,何天奎,等.含根量对根—土石复合体的抗剪强度影响试验初探:以垂丝海棠为例[J].岩石力学与工程学报,2023,42(增刊1):3618-3628.
- Liu Jianping, Zhou Huayu, He Tiankui, et al. Preliminary study on the influence of root content on the shear strength of root-soil-rock composite: A case study of Begonia pendula [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023,42(Suppl.1):3618-3628.
- [28] 刘爱娟,徐翔,刘太平.岩土抗拉强度与抗剪强度参数关系讨论[J].人民长江,2017,48(增刊2):235-239.
- Liu Aijuan, Xu Xiang, Liu Taiping. Discussion on the relationship between tensile strength and shear strength parameters of rock and soil [J]. *Yangtze River*, 2017,48(Suppl.2):235-239.
- [29] 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.
- [30] 苏谦,唐第甲,刘深.青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1):2990-2994.
- Su Qian, Tang Dijia, Liu Shen. Test on physico-mechanical properties of Qinghai-Tibet slope clay under freezing-thawing cycles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008,27(Suppl.1):2990-2994.
- [31] 左小锋,王磊,郑粉莉,等.冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):30-35.
- Zuo Xiaofeng, Wang Lei, Zheng Fenli, et al. Effects of freeze-thaw cycles and soil properties on mollisol shear strength in Chinese black soil region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(2):30-35.
- [32] 牛钰杰.高寒草甸土壤裂隙形成原因及其生态学影响评估研究[D].甘肃兰州:甘肃农业大学,2017.
- Niu Yujie. Study the reason of soil crack formation and its ecological impact assessment in alpine meadow [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- [33] Wen Lu, Dong Shikui, Li Yuanyuan, et al. The impact of land degradation on the C pools in alpine grasslands of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2013,368(1):329-340.
- [34] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties [J]. *Soil Science*, 1981,132(6):427-435.
- [35] 李海云.祁连山高寒草地退化过程中“植被—土壤—微生物”互作关系[D].甘肃兰州:甘肃农业大学,2019.
- Li Haiyun. Interaction of “vegetation-soil-microbe” in the process of alpine grassland degradation in Qilian Mountains [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.