

文章编号: 1008-2786-(2020)3-349-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000515

黄河源区高寒草地根—土复合体 抗剪强度与土壤营养元素分布关系

刘昌义^{1a}, 胡夏嵩^{1a,2*}, 李希来^{1b}, 申紫雁^{1a}

(1. 青海大学 a. 地质工程系; b. 农牧学院, 西宁 810016;

2. 中国科学院青海盐湖研究所 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 西宁 810008)

摘 要: 植物类型及土壤营养元素含量等因素随植物群落演替而发生规律性变化, 并影响植物根—土复合体抗剪强度。本文选择黄河源区高寒草地, 开展植物根—土复合体直接剪切试验及土壤营养元素含量测试, 分析区内不同植物群落根—土复合体抗剪强度与土壤营养元素分布之间的关系。结果表明: 区内草地沿剖面线方向分布 4 种植物群落类型, 即: 高山嵩草—矮嵩草群落、高山嵩草—异针茅—垂穗披碱草群落、青藏苔草+藏嵩草群落和藏嵩草群落; 土壤营养元素含量总体表现出由边坡高海拔位置向低海拔位置逐渐增大的变化特征, 有机质含量在坡顶相对最小为 $59.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在坡底最大可达 $178.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增加值为 $117.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 植物根—土复合体黏聚力 c 值随边坡海拔降低而逐渐增大, 即坡顶位置为 21.70 kPa , 至一级阶地位置达到最大为 34.87 kPa ; 进一步研究表明, 区内根—土复合体抗剪强度与营养元素含量间存在一定程度相关关系, 即营养元素含量相对较高位置处其植物根系相对较发达且密集分布, 其根—土复合体抗剪强度亦相对较大。研究结果对于科学有效地防治黄河源区高寒草地水土流失、浅层滑坡等现象, 具有理论研究价值。

关键词: 黄河源区; 高寒草地; 抗剪强度; 营养元素; 水土流失

中图分类号: P642.5

文献标志码: A

三江源是我国重要的生态屏障, 该地区生态保护对下游地区生态环境和经济可持续发展意义重大^[1]。受气候变化、过度放牧、鼠虫害等因素共同影响, 三江源区草地退化格局在 20 世纪 70 年代已基本形成, 至今, 草地退化仍持续发生^[2]。自 2005—2012 年以来, 随着三江源自然保护区生态保护和建设工程的实施, 区内草地退化趋势得到初步遏制^[1,3-4]。尽管如此, 区内草地退化形势依然较为严峻, 生态系统恢复和改善仍需长期持续努力^[5]。黄河源作为三江源的重要部分, 其草地退化和水土流失防治对整个黄河流域生态保护, 以及高质量发

展国家战略均具有重要意义^[6]。

国内外学者开展了诸多有关三江源区草地退化与植被生物量和土壤营养元素分布规律等方面的研究^[7-18], 指出土壤条件直接影响植物生长状况, 而草地植被类型和盖度亦影响土壤物质循环累积^[10]。高产牧草利于有机物质积累, 改善土壤理化性质, 而肥沃土壤则有利于植被生长, 植被与土壤间形成良性循环^[9,19-20]。草地土壤特别是土壤中有有机质含量对植物地上生物量影响显著, 并相应地影响植物根系发育程度^[19], 而植物根系有助于形成水稳性土壤团聚体, 提高土壤稳定性和养分含量^[30]。同时,

收稿日期 (Received date): 2019-01-03; 改回日期 (Accepted date): 2020-01-06

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金资助项目 (41572306)。[National Natural Science Foundation of China (41572306)]

作者简介 (Biography): 刘昌义 (1991-), 男, 四川宜宾人, 硕士, 助理实验师, 主要研究方向: 地质工程与环境地质。[LIU Changyi (1991-), male, born in Yibin, Sichuan province, M. Sc. candidate, laboratory technician, research on geological engineering and environmental geology] E-mail: 1358128151@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 胡夏嵩 (1965-), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 地质工程与环境地质。[HU Xiasong (1965-), male, Ph. D., professor, research on geological engineering and environmental geology] E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

植物根系在固土护坡和草地退化防治方面的作用则已有相关研究成果^[21]。近年来,随着植被护坡技术的进一步研究,诸多学者开展了大量植物根系-土体复合材料力学强度试验,研究结果均表明植物根系对根-土复合体力学强度具有显著增强作用,且主要由其黏聚力 c 值所决定,且黏聚力 c 值随根系含量增加而增大^[22-33]。

目前国内外学者对三江源草地的研究主要集中在草地生态系统结构、土壤营养元素分布等方面,对植物根-土复合体的研究则主要表现在植物根系对其强度增强作用方面,相比较而言,将土壤营养元素分布规律与植物根-土复合体抗剪强度特性结合起来进行研究则尚处于起步阶段;尤其是在黄河源地区,开展草地土壤营养元素分布规律与根-土复合体强度特征间关系的研究则相对更为少见。鉴于此,本项研究综合探讨黄河源区高寒草地植物根-土复合体抗剪强度与土壤营养元素分布间的关系。研究成果对于科学有效地防治黄河源区草地退化、水土流失等现象具有重要理论研究价值。

1 研究区概况

研究区位于青海省黄南藏族自治州河南县(图1),属黄河源区东部,地理坐标为东经 $101^{\circ}28'$,北纬 $34^{\circ}51'$,平均海拔为 3580 m。研究区属高原亚寒带湿润气候,海拔较高,高原大陆性气候显著^[34]。

河南县年平均气温为 $9.2^{\circ}\text{C} \sim 14.6^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 597.1 ~ 615.5 mm^[35]。

图2为野外调查所得区内草地植物类型及其分布情况,由剖面线方向始端至终端位置,区内草地植物变化演替为4种不同植物群落类型,并依次划分为:高山嵩草(*Kobresia pygmaea* C. B. Clarke) - 矮嵩草(*Kobresia humilis* Serg)群落、高山嵩草(*Kobresia pygmaea* C. B. Clarke) - 异针茅(*Stipa aliena* Keng) - 垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)群落、青藏苔草(*Carex mocroftii* Falc. ex Boott) + 藏嵩草(*Kobresia tibetica* Maximowicz)群落至藏嵩草(*Kobresia tibetica* Maximowicz)群落等4种类型(“+”代表并列优势种,“-”代表次优势种)。4种植物群落其生长的海拔高度依次降低,其所处地貌位置可依次划分为:斜坡、三级阶地、二级阶地、一级阶地及河漫滩等5种类型地貌单元。

由于沿地形剖面线方向受植物生长区地貌单元、海拔高度、与河床距离等因素综合影响,区内4种植物群落类型表现出不同生长特征,即:高山嵩草 - 矮嵩草群落位于三级阶地及斜坡地段,沿剖面线方向分布长度为 194.4 m,由于该位置处海拔高度相对高于剖面线其他位置,且坡度亦相对较大,在风力和水力等坡面营力作用下,该位置处部分地段植物生长较为稀疏,且部分地段出现未生长植物裸坡现象;高山嵩草 - 异针茅 - 垂穗披碱草群落位于区内二级阶地位置,沿剖面线方向分布长度为

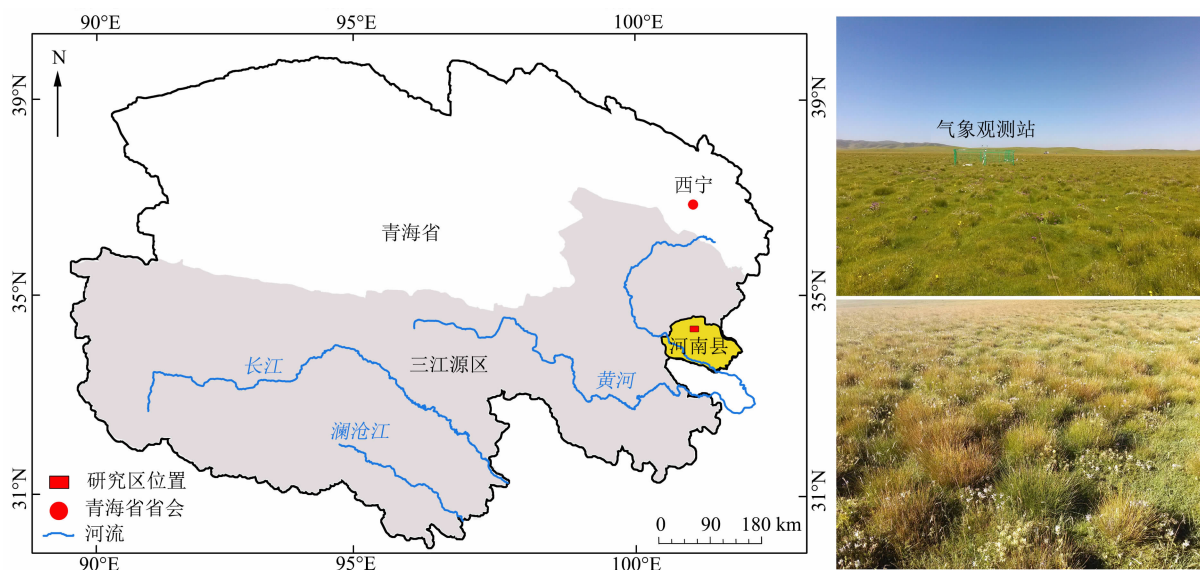


图1 研究区位置及其草地植物生长情况

Fig.1 Location of the study area and photos of grassland plants

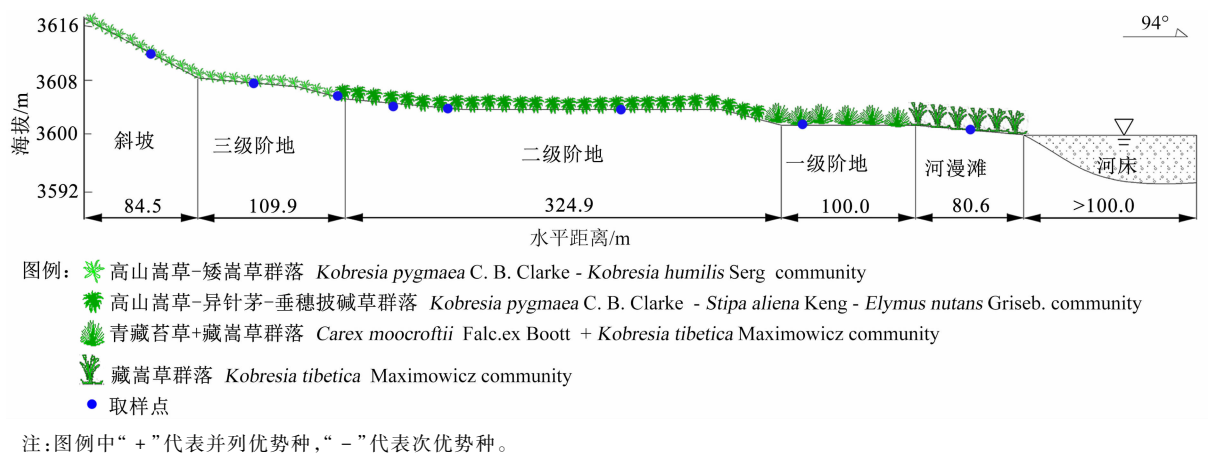


图 2 研究区实测地形剖面及其植物群落类型分布情况

Fig. 2 Geographical profile of the study area and the distribution of plant community types

324.9 m,地势相对较为平缓,植被覆盖度相对较大且生长较为密集;青藏苔草+藏嵩草群落位于一级阶地地段,沿剖面线方向分布长度为 100.0 m,与河床距离较河漫滩位置的藏嵩草群落略远,该群落植物较藏嵩草群落低矮,生长较为密集;藏嵩草群落位于接近于河床河漫滩位置处,沿剖面线方向分布长度为 80.6 m,分布范围相对较小,该位置处土壤水分充足,植物生长密集。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验区野外实地调查时,沿剖面线方向由坡顶至坡脚河漫滩位置,对草地植物群落类型进行了划分,并按照划分出的 4 种植物群落类型确定取样点位置,即在每个群落草地上沿剖面线方向间隔一定距离选取一个取样点,且在地形变化较大或群落交替位置加大取样点密度,沿剖面线共布置了 8 个取样点。在每个取样点制取直径为 30 cm,深度为 30 cm 的圆柱形根系-土体复合试样柱放置于试验样盆中并密封保持其含水率条件,与此同时采用分层取样的方法采集根-土复合体试样所对应的土体含水率、密度、土壤营养元素试样,即分 2 层进行取样,取样深度为地表以下 0~10 cm、10~20 cm 深度位置处^[31]。

2.2 研究方法

2.2.1 根-土复合体密度与含水率及土壤营养元素含量测试

密度测试采用环刀法,含水率测试采用烘干法。

土壤中营养元素的具体测试项目和测试方法如表 1 所示,样品送至青海大学农林科学院进行测试。

表 1 研究区土壤营养元素试验测定指标与测试方法

Tab. 1 Measurement indexes and methods of soil nutrient element tests in the study area

序号	测试项目	测试方法
1	全氮	凯氏定氮法
2	全磷	酸溶-钼锑抗比色法
3	全钾	氢氟酸高氯酸消煮法
4	碱解氮	碱解-扩散法
5	速效磷	碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法
6	速效钾	乙酸铵浸提-火焰光度法
7	有机质	高温外加热重铬酸钾氧化容量法
8	pH 值	电位法

2.2.2 根-土复合体直剪试验

根-土复合体抗剪强度采用 ZJ 型应变控制式直剪仪进行直接剪切试验而测得。试验时首先从野外制取的圆柱形根系-土体复合试样柱中,制取内径为 6.18 cm,高为 2.00 cm(体积为 60 cm³)的环刀试样^[31,33]。每个原状试样柱自地表以下 0~10 cm、10~20 cm 深度位置处分为两层,每层分别制取 4 个环刀试样作为 1 组进行直剪试验,从而得到其抗剪强度指标黏聚力 *c* 值和内摩擦角 φ 值^[31,33]。待直剪试验结束后将每组 4 个环刀试样根-土复合体收集起来,采用水洗法洗去复合体中的土颗粒而保留根系,烘干根系并统计其根系的数量、干重和根径等参数^[31,33]。

3 结果与分析

3.1 土体营养元素分布特征

表 2 为区内 4 种植物群落其土壤营养元素含量测试结果,由该表可知,4 种植物群落其土壤平均 pH 值介于 7.38~7.71,呈中性至碱性。土壤 7 项营养元素中,有机质含量相对较大,坡顶位置高山嵩草-矮嵩草群落其平均有机质含量为 59.48 g·kg⁻¹,坡底藏嵩草群落其平均有机质含量可达 178.13 g·kg⁻¹,增加值为 117.65 g·kg⁻¹;其次则为全钾、全氮、全磷等元素,其含量均大于 1 g·kg⁻¹,平均全钾含量在青藏苔草+藏嵩草群落位置最大为 22.54 g·kg⁻¹。碱解氮、速效钾、速效磷等元素含量相对较低且均小于 1 g·kg⁻¹。

图 3 为沿剖面线方向土体营养元素含量随地形变化的分布曲线,由该图可知,在相同位置处下层土壤(地表以下 10~20 cm)其碱性较上层土壤(地表以下 0~10 cm)碱性强;同时,土壤在二级阶地位置处 pH 值相对接近于 7,呈中性,而在三级阶地、斜坡以及河漫滩等位置处土壤的碱性则相对增强。随着区内海拔高度逐渐下降,土壤营养元素整体表现出自高处向低处进行积累的变化规律,具体表现为:土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷等 5 种元素含

量整体表现出随海拔降低而增加的变化规律。以图 3b 所示有机质含量变化特征为例,其含量表现为三级阶地及斜坡位置处土壤有机质含量较小,上层和下层含量亦相差较小,均约为 50 g·kg⁻¹,且平面分布较为均匀,在图中呈近似水平直线状;在二级阶地位置时,上层土壤有机质含量显著增大为 100 g·kg⁻¹左右,增长幅度相对于三级阶地位置处达到 100%,下层土壤有机质含量增加幅度相对不及上层;另外,在二级阶地其含量分布亦较为均匀,其曲线亦呈近似水平直线;当地貌单元由一级阶地开始至河漫滩位置时,有机质含量则显著增加,上层土壤其含量由二级阶地位置处的 100 g·kg⁻¹显著增加至河漫滩位置处达到最大值为 240 g·kg⁻¹,增加幅度为 140%,而下层土壤含量变化不及上层显著。

土壤中全钾、速效钾等 2 种元素含量随海拔降低,表现出先增大后减小的变化规律,在二级阶地后缘位置元素含量相对较大。全钾含量在整个剖面上变化幅度相对较小,约为 15~23 g·kg⁻¹,在二级阶地后缘含量最大,约为 23 g·kg⁻¹,并随着海拔高度的降低而缓慢降低。速效钾含量变化幅度则相对较小,全钾含量变化明显,在二级阶地后缘位置含量相对较大,约为 250 mg·kg⁻¹。

3.2 根-土复合体抗剪强度特征

表 3 为区内 4 种植物群落的根-土复合体密

表 2 研究区 4 种植物群落土壤营养元素含量测试结果

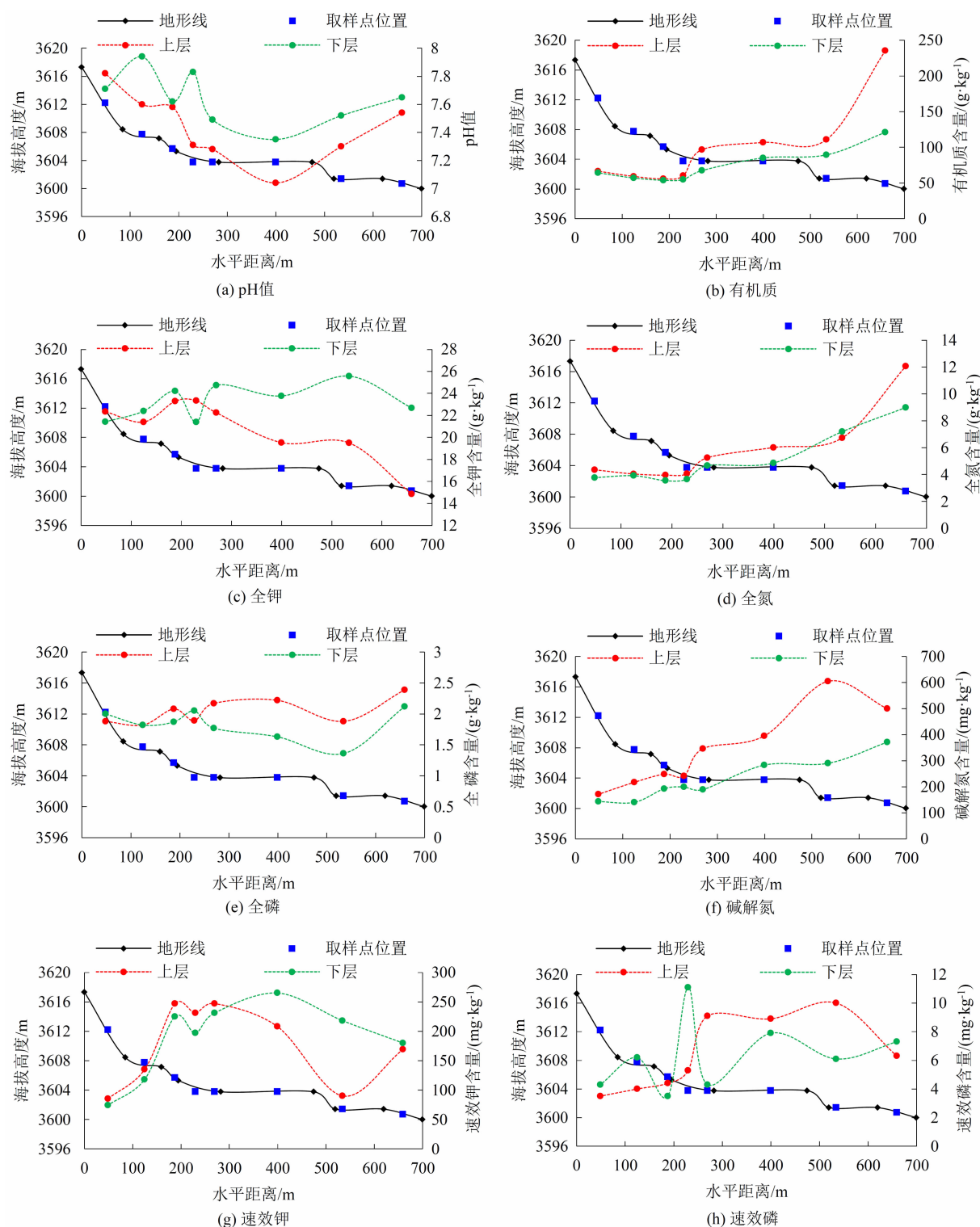
Tab. 2 Results of soil nutrient element content test in four plant communities in the study area

群落类型	pH 值	有机质 /(g·kg ⁻¹)	全钾 /(g·kg ⁻¹)	全氮 /(g·kg ⁻¹)	全磷 /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 /(mg·kg ⁻¹)
高山嵩草-矮嵩草	7.71±0.14	59.48±5.01	22.51±1.09	3.93±0.27	1.91±0.11	185.17±42.49	147.33±72.44	4.32±1.00
高山嵩草-异针茅-垂穗披碱草	7.38±0.26	78.51±20.96	22.50±1.86	4.75±0.84	1.96±0.23	275.50±82.26	229.83±24.85	7.77±2.54
青藏苔草+藏嵩草	7.41±0.16	100.18±15.17	22.54±4.29	6.96±0.33	1.62±0.37	447.50±222.74	154.00±90.51	8.05±2.76
藏嵩草	7.60±0.08	178.13±80.84	18.77±5.54	10.53±2.17	2.26±0.19	435.50±91.22	174.50±7.78	6.80±0.71

表 3 研究区 4 种不同植物群落的根-土复合体抗剪强度试验结果

Tab. 3 Results of shear strength test of root-soil composite system of four different plant communities in the study area

植物群落类型	水平距离 /m	海拔高度 /m	平均密度 /(g·cm ⁻³)	平均含水率 /%	根-土复合体抗剪强度指标	
					平均黏聚力 c 值/kPa	平均内摩擦角 φ 值/(°)
高山嵩草-矮嵩草	0~194.5	3617~3607	1.18±0.07	13.00±0.99	21.70±11.41	25.36±2.33
高山嵩草-异针茅-垂穗披碱草	194.5~519.3	3607~3604	0.95±0.14	16.23±1.65	27.49±19.18	24.66±3.54
青藏苔草+藏嵩草	519.3~619.3	3604~3601	1.02±0.18	24.62±16.38	34.87±13.40	24.42±4.18
藏嵩草	619.3~699.9	3601~3600	1.09±0.12	128.25±37.13	17.81±14.21	21.48±4.48



注:“上层”为边坡地表以下0~10 cm深度位置,“下层”为边坡地表以下10~20 cm深度位置。

图3 研究区地表以下不同深度位置处土壤营养元素含量分布规律

Fig.3 Distribution of soil nutrient elements at different depths below the ground in the study area

度、含水率及直剪试验结果。由该表可知,坡顶位置的三级阶地及斜坡地段的高山嵩草-矮嵩草群落(图2),离区内河床距离相对较远,水平距离达到约

500 m,该群落根-土复合体平均含水率相对较小,为13.00%;同时,该位置处海拔相对较高且地势较陡,易受风力和水力等坡面地表营力的侵蚀作用;该

位置处植物根-土复合体其平均黏聚力 c 值相对较小,为 21.70 kPa。高山嵩草-异针茅-垂穗披碱草群落位于剖面线中部二级阶地位置,坡面地表近于水平,其土体平均密度相对较小为 $0.95\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,平均含水率为 16.23%,较高山嵩草-矮嵩草群落平均含水率大;该群落根-土复合体平均黏聚力 c 值为 27.49 kPa,较高山嵩草-矮嵩草群落大。青藏苔草+藏嵩草群落位于剖面线一级阶地位置处,距离河床位置相对较近,其平均密度与平均含水率分别为 $1.02\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、24.62%,均较高山嵩草-异针茅-垂穗披碱草群落增大;该位置处植物生长条件相对较高海拔位置处优越,植物生长茂密且根系发达,进而使得植物根-土复合体的平均黏聚力 c 值增大,其平均黏聚力 c 值为 34.87 kPa。藏嵩草群落位于河漫滩位置,相对接近于河床位置,水分较为充足,含水率较高,为 128.25%,平均密度为 $1.09\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,这种高含水率使得其根-土复合体平均黏聚力 c 值相对较低,为 17.81 kPa。

图 4 为区内根-土复合体抗剪强度随剖面海拔高度变化曲线,由该图可知,4 种群落其植物根-土复合体黏聚力 c 值在上层及下层位置处呈现出相似的变化特征,即整体表现为随剖面线海拔降低而增大,且在坡脚一级阶地后缘位置达到最大值约为 45 kPa,而在接近河漫滩位置处则显著减小。坡顶及三级阶地位置处坡度相对较大,坡面易受地表风力、水力等侵蚀作用,使得该位置处土层厚度相对较小且植物根系分布相对不发达,根-土复合体黏聚力 c 值较小,其平均黏聚力 c 值为 21.70 kPa。随着海拔降低,二级阶地至一级阶地位置处地形相对平坦,该位置处生长的植物受风力和水力侵蚀作用相对较弱,植物生长状况相对较好且根系相对较为发达,结果使得该位置处的植物根-土复合体黏聚力 c 值呈现出增大的趋势,并在一级阶地位置处达到

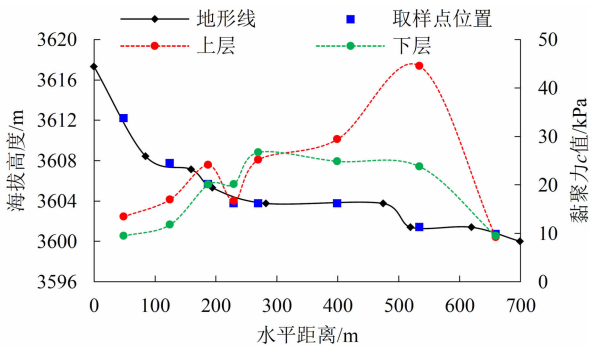


图 4 研究区边坡植物根-土复合体抗剪强度与剖面海拔高度变化关系

Fig.4 Relationship between shear strength of root-soil composite system and altitude in the study area

最大值约为 45 kPa。河漫滩位置处土体平均含水率相对其他位置处较高,为 128.25%,过高的含水率一定程度上降低了该位置处植物根-土复合体黏聚力 c 值,使得该位置处黏聚力 c 值随海拔降低而显著减小至 10 kPa 以下。

综上所述,区内 4 种不同植物群落其根-土复合体平均黏聚力 c 值,整体表现为随海拔降低而逐渐增大,且在剖面线方向一级阶地处达到最大值,而自河漫滩位置开始,当接近河床位置时则显著降低。4 种植物群落其根-土复合体平均黏聚力 c 值由大至小依次为:青藏苔草+藏嵩草>高山嵩草-异针茅-垂穗披碱草>高山嵩草-矮嵩草>藏嵩草。

表 4 为根-土复合体中根系含量统计结果,由该表可知,根-土复合体中根系数量、干重、根系占复合体干重的比例及平均根径等参数,均表现出与根-土复合体黏聚力 c 值相一致的变化特征,即均随海拔降低而呈先增大后减小的趋势。坡顶位置处的高山嵩草-矮嵩草群落其根-土复合体中平均根数相对较小,为 121 根,根系干重占根-土复合体干重的比例为 2.25%,比例相对较小,其平均根径亦

表 4 研究区 4 种植物群落类型根-土复合体中根系含量统计结果

Tab.4 Statistical results of root content in root-soil composite system of four plant community types in the study area

植物群落类型	平均根数/个	干重/g	根系干重占根-土复合体干重的比例/%	平均根径/mm
高山嵩草-矮嵩草	121 ± 51	4.20 ± 3.63	2.25 ± 1.98	0.30 ± 0.12
高山嵩草-异针茅-垂穗披碱草	343 ± 227	5.56 ± 4.11	2.70 ± 2.43	0.40 ± 0.15
青藏苔草+藏嵩草	368 ± 245	15.10 ± 9.62	15.24 ± 8.36	0.47 ± 0.10
藏嵩草	170 ± 99	8.92 ± 3.78	7.30 ± 3.77	0.46 ± 0.14

注:表中数据为同一植物群落中每组直剪试样根-土复合体中根系统计数据的平均值,其统计数据体积为 $4\times 60\text{ cm}^3=240\text{ cm}^3$ 。

相对较小,为0.30 mm,反映出该群落植物根系发达程度相对较弱。青藏苔草+藏嵩草群落其根-土复合体中平均根数相对较大,为368根,根系干重占根-土复合体干重的比例为15.24%,比例相对较大,其平均根径亦相对较大,为0.47 mm,反映出该群落植物根系相对较粗且密集,根系较为发达。上述根系含量统计结果一定程度上反映出根系在增强根-土复合体抗剪强度中的显著作用。

4 讨论

植物根-土复合体抗剪强度与土体物理性质如密度、含水率,以及与根系含量间关系的试验研究相对较多,且基本结论为:根-土复合体黏聚力 c 值与含根量、密度成正相关关系,与含水率呈负相关或存在最优含水率^[27-33],本项研究亦得出相同结论。植物根-土复合体抗剪强度与土壤营养元素含量间的关系研究相对较少,大多则是探讨土壤物理性质与化学性质间的关系^[36]。即:土壤有机质含量与土壤含水率间呈显著正相关关系,当土壤湿度过大时,水分充满土壤孔隙,使通气受阻,有机质的矿化率降低,故有利于有机质的积累和保存^[36]。本项研究中,大部分营养元素含量与有机质含量及土壤含水率的分布规律,呈现出相类似的变化规律,即随着区内海拔高度降低,土壤含水率逐渐增大,土壤营养元素特别是有机质整体上亦逐渐增大。同时,由图4可知,植物根-土复合体抗剪强度指标黏聚力 c 值随海拔降低表现出先增大后减小的特征。沿剖面线方向依次分布的斜坡、三级阶地、二级阶地位置,其植物根-土复合体抗剪强度与营养元素含量呈现出相类似的变化特征,即海拔愈低,其土壤营养元素含量及黏聚力 c 值均愈大。在一级阶地及河漫滩位置处土壤含水率显著增大,土壤营养元素含量亦显著增大,但含水率增大除有利于有机质积累外,亦显著改变了该位置处根-土复合体物理性质,进而降低土体的抗剪强度^[37],因此,该位置处土壤营养元素含量较大而根-土复合体黏聚力 c 值则显著降低。

区内沿实测剖面方向由高至低分布的斜坡、三级阶地、二级阶地位置处,植物根-土复合体抗剪强度与营养元素含量均呈现出随剖面海拔高度的降低而增加的变化趋势,一定程度上说明了植物根-土

复合体黏聚力 c 值与土壤营养元素含量之间呈正相关关系,即土壤营养元素含量相对愈大,其植物根-土复合体黏聚力 c 值亦相对愈大。其原因是:土壤营养元素含量及其变化一定程度上影响植物生长,具体表现为营养元素相对丰富时植物生长较好,植物种类愈多且根系愈发达,发达的根系在增强根-土复合体抗剪强度中作用显著,从而使得其根-土复合体黏聚力 c 值愈大。

综上所述,区内边坡土壤营养元素含量与根-土复合体抗剪强度表现出较为密切关系。一方面,营养元素丰富使得植物根系生长茂密,进而提高了植物根-土复合体的抗剪强度;相应地,营养元素流失则对植物根-土复合体抗剪强度产生显著的影响^[38]。另一方面,植物根系提高了土体的抗剪强度,起到有效阻止该位置处边坡表层水土流失现象,且有助于阻挡营养元素随坡面水流而发生相应的流失现象,从而起到有效防治区内水土流失和草地退化现象^[39-40]。

本项研究针对黄河源区高寒草地植物根-土复合体抗剪强度与土壤营养元素含量分布间关系进行了初步探讨,二者之间的关系亦主要是通过土壤营养元素影响植物生长和根系发育及影响土壤物理性质等方面,从而进一步起到影响其根-土复合体抗剪强度的作用。对于元素含量与抗剪强度之间的直接联系,则需要设计室内相关的控制试验开展进一步研究,这也是本课题组后续研究的主要内容。

5 结论

(1)研究区植物根-土复合体营养元素沿海拔降低方向发生流动,即整体表现为随海拔降低而逐渐增加,并在区内坡脚河漫滩位置处积累。

(2)区内植物根-土复合体抗剪强度表现为随海拔降低呈逐渐增大趋势,一级阶地位置处根-土复合体抗剪强度值相对较大;河漫滩位置处因土体含水率相对较高,使得该位置处抗剪强度显著降低。

(3)区内草地土壤营养元素含量与植物根-土复合体抗剪强度之间相互影响,总体表现为营养元素含量丰富使得该位置处植物生长状况相对较好,且根系相对发达,进而提高了其植物根-土复合体

抗剪强度;相应地,土壤营养元素流失,则影响植物生长状况,进而使得根-土复合体抗剪强度呈现出逐渐降低的变化特征。

参考文献 (References)

- [1] 徐新良,王靓,李静,等.三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析[J].地球信息科学学报,2017,19(1):50-58. [XU Xinliang, WANG Liang, LI Jing, et al. Analysis of the grassland restoration trend and degradation situation in the "Three-River Headwaters" region since the implementation of the ecological project [J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(1): 50-58]
- [2] LIU J, XU X L, SHAO Q. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the three-river headwaters region in Qinghai province [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(4): 364-376.
- [3] 张颖,章超斌,王钊齐,等.气候变化与人为活动对三江源草地生产力影响的定量研究[J].草业学报,2017,26(5):1-14. [ZHANG Ying, ZHANG Chaobin, WANG Zhaoqi, et al. Quantitative assessment of relative roles of climate change and human activities on grassland net primary productivity in the Three-River Source region, China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(5): 1-14]
- [4] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等.三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J].地理学报,2016,71(1):3-20. [SHAO Quanqin, FAN Jiangwen, LIU Jiyuan, et al. Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 3-20]
- [5] 李芬,张林波,李岱青.国家公园:三江源地区生态环境保护新模式[J].生态经济,2016,32(1):191-193. [LI Fen, ZHANG Linbo, LI Daiqing. National park: new pattern for Ecological and environmental protection in the Three-River Headwaters area [J]. Ecological Economy, 2016, 32(1): 191-193]
- [6] 徐田伟,赵新全,耿远月,等.黄河源区生态保护与草牧业发展关键技术及优化模式[J].资源科学,2020,42(3):508-516. [Xu Tianwei, Zhao Xinquan, Geng Yuanyue, et al. Key technologies and optimization model for ecological protection and grass-based livestock husbandry in the source region of the Yellow River [J]. Resources Science, 2020, 42(3): 508-516]
- [7] 康惠惠,潘韬,盖艾鸿,等.生态退化与恢复对三江源区土壤保持功能的影响[J].水土保持通报,2017,37(3):7-14. [KANG Huihui, PAN Tao, GAI Aihong, et al. Effects of ecological degradation and restoration on soil conservation function in Three Rivers Headwater region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 7-14]
- [8] 杨永胜,张莉,未亚西,等.退化程度对三江源泽库高寒草甸土壤理化性质及持水能力的影响[J].中国草地学报,2017,39(5):54-61. [YANG Yongsheng, ZHANG Li, WEI Yaxi, et al. Effects of degradation degree on soil physicochemical properties and soil water holding capacity in Zeku alpine meadow in the headwater region of Three Rivers in China [J]. Chinese Journal of Grassland, 2017, 39(5): 54-61]
- [9] 杨永梅,李惠梅,高泽兵,等.三江源花石峡地区植被退化与土壤养分的关联[J].干旱区地理,2016,39(2):361-367. [YANG Yongmei, LI Huimei, GAO Zebing, et al. Relevance of vegetation degradation and soil nutrient at Huashixia area of Three River source region in China [J]. Arid Land Geography, 2016, 39(2): 361-367]
- [10] 王瑞永,刘莎莎,王成章,等.不同海拔高度高寒草地土壤理化指标分析[J].草地学报,2009,17(5):621-628. [WANG Ruiyong, LIU Shasha, WANG Chengzhang, et al. Analysis on soil physicochemical indices at different altitudes in alpine rangeland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2009, 17(5): 621-628]
- [11] 母悦,耿元波.内蒙古羊草草原植物营养元素的含量特征[J].生态环境学报,2015,24(7):1118-1124. [MU Yue, GENG Yuanbo. The element content characteristics of main species in *Leymus Chinensis* grassland in inner Mongolia, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1118-1124]
- [12] 宋智芳,安沙舟,孙宗玖.放牧地伊犁绢蒿营养元素分配特点[J].草业科学,2014,31(1):132-138. [SONG Zhifang, AN Shazhou, SUN Zongjiu. Characteristics of nutrition allocation of *Seriphidium transiliense* under grazing condition [J]. Pratacultural Science, 2014, 31(1): 132-138]
- [13] 孙大成,郭雪莲,解成杰,等.氮输入对沼泽湿地植物生长和氮吸收的影响[J].生态环境学报,2013,22(8):1317-1321. [SUN Dacheng, GUO Xuelian, XIE Chengjie, et al. Effects of nitrogen input on marsh wetland plant growth and nitrogen uptake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(8): 1317-1321]
- [14] 洪江涛,吴建波,王小丹.放牧和围封对藏北高寒草原紫花针茅群落生物量分配及碳、氮、磷储量的影响[J].草业科学,2015,32(11):1878-1886. [HONG Jiangtao, WU Jianbo, WANG Xiaodan, et al. Effects of grazing and fencing on *Stipa Purpurea* community biomass allocation and carbon, nitrogen and phosphorus pools on the northern Tibet Plateau alpine [J]. Pratacultural Science, 2015, 32(11): 1878-1886]
- [15] 刘晨.放牧对草地植被、土壤空间异质性及其相互关系的调控机制[D].长春:东北师范大学,2015:1-20. [LIU Chen. Plant and soil spatial heterogeneity and their correlation [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2015: 1-20]
- [16] 银晓瑞.草原和荒漠植物养分时空动态与化学计量学研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2008:1-16. [YIN Xiaorui.

- Research of space-time dynamic and stoichiometry of plants nutrient in steppe and desert region [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2008: 1–16]
- [17] WANG H, HAN J, DENG N, et al. Effects of the natural restoration time of abandoned farmland in a semiarid region on the soil denitrification rates and abundance and community structure of denitrifying bacteria [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, **103**(4): 1939–1951.
- [18] ZHANG C, SONG Z L, ZHUANG D H, et al. Urea fertilization decreases soil bacterial diversity, but improves microbial biomass, respiration, and N-cycling potential in a semiarid grassland [J]. Biology and Fertility of Soils, 2019, **55**(3): 229–242.
- [19] 孙磊, 刘玉, 武高林, 等. 藏北退化草地群落生物量与土壤养分的关系[J]. 草业科学, 2016, **33**(6): 1062–1069. [SUN Lei, LIU Yu, WU Gaolin, et al. The relationships between community biomass and soil nutrients in the northern Tibet degradation grassland [J]. Pratacultural Science, 2016, **33**(6): 1062–1069]
- [20] NA G, A. ALLAN D, BIN D, et al. Changes in vegetation parameters and soil nutrients along degradation and recovery successions on alpine grasslands of the Tibetan plateau [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, **284**: 1–12.
- [21] 戚国庆, 胡利文. 植被护坡机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(11): 2220–2225. [QI Guoqing, HU Liwen. Study on mechanism and application of slope protection with vegetation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(11): 2220–2225]
- [22] 郑启萍, 徐得潜. 草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, **37**(2): 225–228. [ZHENG Qiping, XU Deqian. Experimental research on the mechanism of herb ecological slope protection and the effect of roots on slope reinforcement [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2014, **37**(2): 225–228]
- [23] 洪苗苗, 汪霞, 赵云飞, 等. 浅层滑坡多发区典型植被恢复树种根系对土壤抗剪强度影响[J]. 山地学报, 2018, **36**(1): 107–115. [HONG Miaomiao, WANG Xia, ZHAO Yunfei, et al. Effect of ecological restoration plants root on slope reinforcement in shallow landslide prone region [J]. Mountain Research, 2018, **36**(1): 107–115]
- [24] GHESTEM M, VEYRON G, BERNARD A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance [J]. Plant and Soil, 2014, **377**(1): 43–61.
- [25] COMINO E, DRUETTA A. The effect of *poaceae* roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment [J]. Soil and Tillage Research, 2010, **106**(2): 194–201.
- [26] GIADROSSICH F, SCHWARZ M, COHEN D, et al. Mechanical interactions between neighboring roots during pullout tests [J]. Plant and Soil, 2013, **367**(1): 391–406.
- [27] 张翔宇, 杨平, 王磊, 等. 植被根系对土体抗剪强度影响的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, **34**(4): 113–117. [ZHANG Xiangyu, YANG Ping, WANG Lei, et al. The experimental study on the effect of vegetation root on the soil shear strength [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, **34**(4): 113–117]
- [28] 杨悦舒, 夏振尧, 肖海, 等. 多花木蓝根—土复合体抗剪强度试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, **31**(4): 72–76. [YANG Yueshu, XIA Zhenyao, XIAO Hai, et al. Experimental research on shear strength of *Indigofera amblyantha* root-soil composite [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, **31**(4): 72–76]
- [29] 湛芸, 何丙辉, 练彩霞, 等. 三峡库区陡坡根—土复合体抗冲性能[J]. 生态学报, 2016, **36**(16): 5173–5181. [CHEN Yun, HE Binghui, LIAN Caixia, et al. Root-soil system anti-scourability on steep slopes in the Three Gorges reservoir area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(16): 5173–5181]
- [30] HUDEK C, STANCHI S, D'AMICO M, et al. Quantifying the contribution of the root system of alpine vegetation in the soil aggregate stability of moraine [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2017, **5**(1): 36–42.
- [31] 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 Pratacultural Sinica, 2017, **26**(9): 14–26]
- [32] 刘益良, 刘晓立, 付旭, 等. 植物根系对低液限粉质黏土边坡浅层土体抗剪强度影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2016, **24**(3): 384–390. [LIU Yiliang, LIU Xiaoli, FU Xu, et al. Experimental study on influence of plant roots to shear strength of low liquid limit silty clay at shallow depth of slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **24**(3): 384–390]
- [33] 刘昌义, 窦增宁, 胡夏嵩, 等. 黄河源区高寒草地植物组合对根—土复合体抗剪强度的影响[J]. 草地学报, 2019, **27**(1): 43–52. [LIU Changyi, DOU Zengning, HU Xiasong, et al. Research on the effect of plant combination types on the shear strength of the root-soil composite system of alpine grassland in the source region of the Yellow River [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, **27**(1): 43–52]
- [34] 王伟, 郭倩, 康海军, 等. 线叶嵩草草地群落构成及种间关联分析[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(10): 2096–2102. [WANG Wei, GUO Qian, KANG Haijun, et al. Community composition and interspecific association analysis of *Kobresia capillifolia* grassland [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, **35**(10): 2096–2102]

- [35] 杨元武, 李希来, 周旭辉, 等. 高寒草甸植物群落退化与土壤环境特征的关系研究[J]. 草地学报, 2016, **24**(6): 1211 – 1217. [YANG Yuanwu, LI Xilai, ZHOU Xuhui, et al. Study on relationship between plant community degradation and soil environment in an alpine meadow [J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, **24**(6): 1211 – 1217]
- [36] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 等. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J]. 草业学报, 2005, **14**(4): 15 – 20. [WANG Changting, LONG Ruijun, WANG Qiji, et al. Distribution of organic matter, nitrogen and phosphorus along an altitude gradient and productivity change and their relationships with environmental factors in the alpine meadow [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2005, **14**(4): 15 – 20]
- [37] WEI Y J, WU X L, XIA J W, et al. The effect of water content on the shear strength characteristics of granitic soils in South China [J]. Soil and Tillage Research, 2019, **187**: 50 – 59.
- [38] 白宏兵. 施氮对黄土高原丘陵沟壑区不同退耕年限植被群落以及土壤养分的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013: 1 – 25. [BAI Hongbing. Effects of nitrogen application on plant communities in abandoned lands and soil nutrient in hilly and gully regions on the loess plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013: 1 – 25]
- [39] 常松果. 红壤坡耕地耕层土壤抗剪强度及影响因素响应特征[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 2 – 18. [CHANG Songguo. Soil Shear strength and its influence factors in cultivated-layer of slope farmland in red soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2017: 2 – 18]
- [40] 卢海静, 胡夏嵩, 付江涛, 等. 寒旱环境植物根系增强边坡土体抗剪强度的原位剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(8): 1712 – 1721. [LU Haijing, HU Xiasong, FU Jiangtao, et al. In-situ shearing test on the shear strength of soil slope reinforced by plant roots in cold and arid environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(8): 1712 – 1721]

Relationship Between Shear Strength of Root-Soil Composite Systems of Alpine Grassland and Distribution of Soil Nutrient Elements in the Source Region of the Yellow River, China

LIU Changyi^{1a}, HU Xiasong^{1a,2*}, LI Xilai^{1b}, SHEN Ziyan^{1a}

(1a. Geological Engineering Department, 1b. Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China)

Abstract: Plant type and soil nutrient content change regularly with the succession of plant community and affect the shear strength of plant root-soil composite system. Alpine grassland in the source region of the Yellow River was selected as the study area in this research, direct shear tests of root-soil composite systems and soil nutrient content tests were conducted, and the relationship between shear strength of root-soil composite system and soil nutrient elements was analyzed. The result showed that the grassland was evolved into four types of plant communities on the slope profile, which were: *Kobresia pygmaea* C. B. Clarke - *Kobresia humilis* Serg community, *Kobresia pygmaea* C. B. Clarke - *Stipa aliena* Keng - *Elymus nutans* Griseb. community, *Carex mocroftii* Falc. ex Boott + *Kobresia tibetica* Maximowicz community and *Kobresia tibetica* Maximowicz community. The distribution of soil nutrient content showed a increasing characteristic from higher altitude to lower altitude in the slope. The content of soil organic matter was $59.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ at the top and $178.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ at the bottom, increasing by $117.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The cohesion force of root-soil composite systems also showed a gradual increasing trend with the decreasing of altitude. Namely, the cohesion force was 21.70 kPa at the top position, and reached maximum of 34.87 kPa at the

first grade terrace. Further research indicated that there was a correlation between the shear strength of root-soil composite systems and the soil nutrient element contents, namely, the plant roots developed well on the place where the nutrient were relatively high, so that the shear strength of the root-soil composite system was relatively large. The results of this research are of great theoretical value in scientifically preventing and controlling water and soil loss and shallow landslides in alpine grassland of the source region of the Yellow River.

Key words: the source region of the Yellow River; alpine grassland; shear strength; nutrient element; water and soil loss