

文章编号: 1008 - 2786 - (2014)5 - 550 - 11

黄河源玛沁地区高寒草地植物固土护坡的力学效应

李光莹¹, 虎啸天¹, 李希来², 余冬梅¹, 付江涛¹, 朱海丽¹, 胡夏嵩^{1,2*}

(1. 中国科学院 青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 2. 青海大学, 青海 西宁 810016)

摘 要: 通过对试验区草本植物根系的力学强度试验, 研究了黄河源玛沁地区高寒草地植物护坡的力学效应, 即通过研究未退化、轻度退化、重度退化的草地的主要优势种植物的单根抗拉力、抗拉强度和根-土复合体的抗剪强度等评价其固土护坡能力与贡献。研究所选取的未退化草地的优势种植物主要有小嵩草 (*Kobresia pygmaea* C. B. Clarke)、紫花针茅 (*Stipa purpurea* Griseb.), 轻度退化草地的优势种植物包括矮火绒草 (*Leontopodium nanum* (Hook. f. et Thoms.) Hand. - Mazz.), 二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca* L.), 重度退化草地的优势种植物为细叶亚菊 (*Ajania tenuifolia* (Jacq.) Tzvel.), 盐地风毛菊 (*Saussurea salsa* (Pall) Spreng)。由单根拉伸试验结果表明, 单根抗拉强度平均值由大至小依次为紫花针茅 > 小嵩草 > 矮火绒草 > 二裂委陵菜 > 细叶亚菊 > 盐地风毛菊; 室内根-土复合体原状试样直接剪切试验表明, 根-土复合体的抗剪强度由大至小依次为小嵩草 > 紫花针茅 > 矮火绒草 > 二裂委陵菜 > 细叶亚菊 > 盐地风毛菊。研究成果对进一步探讨黄河源高寒地区植物固土护坡机理, 以及试验区及其与试验区条件相似的其他地区, 科学防治坡面水土流失、浅层滑坡等地质灾害的发生具有重要理论指导意义。

关键词: 黄河源区; 高寒草地; 植物护坡; 根-土复合体; 抗拉强度; 抗剪强度; 力学效应

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

近年来受人类工程活动和气候等因素的影响, 黄河源区内草地退化、沙化、水土流失、湿地萎缩等现象趋于显著, 黄河源头水量减少, 径流携沙量增加, 使该地区生态地质环境受到一定程度的威胁^[1-4]。为了有效防治上述灾害现象的进一步发生, 充分利用当地乡土植物, 合理采用植物固土护坡的方法被广泛使用。植被护坡技术是近年来被国内外学者广泛关注和工程界普遍使用的一种有效的固土护坡措施, 该方法是利用植被涵水固土的原理稳定岩土边坡, 其作用主要表现在植物茎叶降雨截留、削弱溅蚀、抑制地表径流和根系吸水等水文效应, 以及根系加筋、锚固和牵拉作用等力学效应^[5-7]。该

方法不仅有利于植被生态恢复, 而且是有效防治坡面水土流失、土壤侵蚀等灾害现象发生的重要手段, 将其科学合理地应用于黄河源区的自然或人工边坡的保护及生态恢复, 将有利于区域基础设施建设与生态环境保护之间的协调发展。

土体具有抗压能力较强, 但抗剪强度相对较弱的特性^[8-10], 而植物生长过程中能够通过根系对土体的加筋、锚固和牵拉作用达到提高土体抗剪强度的效果。国内外学者从植物单根抗拉试验以及根-土复合体抗剪试验等方面对植物护坡的力学效应开展了大量的理论和实践研究。其中有关植物单根抗拉试验方面的研究成果主要表现在: 刘国彬、程洪、

收稿日期 (Received date): 2013 - 10 - 10; **修回日期** (Accepted): 2014 - 02 - 18。

基金项目 (Foundation item): 国家国际科技合作计划资助项目 (2011DFG93160); 国家自然科学基金资助项目 (41162010, 41302258); 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室开放基金资助 (CHD2011SY016)。[Supported by the National and International Scientific and Technological Cooperation Plan Projects (No. 2011DFG93160); National Natural Science Foundation of China (No. 41162010, 41302258); Open Foundation of Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University (No. CHD2011SY016).]

作者简介 (Biography): 李光莹 (1989 -), 男, 硕士研究生, 主要从事地质工程等方面的研究工作。[Li Guangying (1989 -), male, postgraduate, major in Geological Engineering.] E-mail: liguangying11@mails.ucas.cn

*** 通信作者** (Corresponding author): 胡夏嵩 (1965 -), 男, 教授。[Hu Xiasong (1965 -), male, professor, major in Geological Engineering.] E-mail: hxs@mail.tsinghua.edu.cn

赵丽兵等^[9, 11-12]通过单根拉伸试验得出草本植物根系具有较强的抗拉能力;Wu、Nilaweera、朱海丽等^[9, 13-18]对植物根系的抗拉力、抗拉强度进行了研究,得出单根抗拉力随根径增大而增大,抗拉强度则随根径增大而减小;Waldron、Yan Z、解明曙等^[12, 19-21]认为,根系受土体运动而产生的抗拉力是植物根系的主要固土力学效应,故反映根系受力潜能单根抗拉强度,可作为评判根系固土能力的一个有效指标。植物根-土复合体抗剪试验研究成果主要表现在:Wu、Ziemer、周云艳等^[19-25]通过对植物根-土复合体进行原位或室内剪切试验,认为根-土复合体的抗剪强度包括土体的抗剪强度和根系作用产生的抗剪强度两部分;Nilaweera、De Baets S、解明曙等^[10, 13, 19-20, 25-27]认为土壤中根系密度、根系数量、单根抗拉强度以及根系的空间分布等因素影响根-土复合体的抗剪强度。

国内外诸研究成果中涉及黄河源区高寒草地植物根系的单根抗拉及根-土复合体的抗剪强度等力学效应方面的研究还相对较少。本文主要研究了黄河源玛沁地区高寒草地植物护坡的力学效应,选取未退化、轻度退化、重度退化的草地优势种草本植物各2种为试验供试种,即通过单根拉伸试验以及根-土复合体的直接剪切试验,研究分析了试验区6种供试种的单根抗拉强度和其根-土复合体抗剪强度大小及变化规律,在此基础上探讨了研究区6种草本植物的固土护坡能力及其与高寒草地退化之间的关系。

1 试验区概况

于2012年7—8月间,在黄河源区开展野外调查及取样工作。试验区位于青海省玛沁县优云乡,99°11.601'~99°11.393'E, 34°19.929'~34°19.713'N,平均海拔为4240 m。优云乡位于玛沁县西部,距县城160 km,省道S101、S205是玛沁县的两条主要交通道路,其中S205省道穿过优云乡。研究区为典型的高原大陆性气候,冷暖季分明,冷季漫长,暖季短暂,太阳辐射强烈,年日照平均值在2500 h以上,年平均气温-1.7℃^[28];多年平均降水量420~560 mm,多集中在5—10月,多年平均蒸发量为1142~1578 mm^[29];试验区为典型的高寒草地分布区域,土壤为高山草甸土和高山灌丛草甸土^[29-30];区内常住人口以藏族为主,人口密度相对

较低,以传统畜牧业为主要经济模式^[28-30]。由于研究区特殊的自然气候环境以及存在过度放牧、基础设施建设等方面的影响,使得区内草地退化面积近年来呈显著增加趋势,植被退化现象较严重,在试验区可明显地将草地划分出未退化、轻度退化和重度退化草地三个区域,如图1所示,研究区的现有草地退化现象在黄河源区具有一定的代表性。



图1 研究区不同程度退化草地分布及其植物生长情况

Fig. 1 The distribution of different degraded grassland and the growth situation of the herbs in the study area

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

分别选取不同程度退化草地的优势种草本植物作为供试种,其中未退化草地选取的优势种为小嵩草(*Kobresia pygmaea* C. B. Clarke)、紫花针茅(*Stipa purpurea* Griseb.),轻度退化草地选取的优势种为矮火绒草(*Leontopodium nanum* (Hook. f. et Thoms.) Hand. - Mazz.),二裂委陵菜(*Potentilla bifurca* L.),重度退化草地选取的优势种为细叶亚菊(*Ajania tenuifolia* (Jacq.) Tzvel.)、盐地风毛菊(*Saussurea salsa* (Pall) Spreng),如图2所示。鉴于不同生长期的植物其地下根系的生长情况是有差异的,这种差异性,一方面会影响植物根系的单根力学强度,另一方面也会影响植物根-土复合体试样的抗剪强度,从而会对试验结果造成一定程度的影响^[6, 11, 16, 26, 31-33]。故本项研究对试验区6种草本根-土复合体试样的野外取样均在同一时间背景下完成,以实现所得到的相关试验数据之间具有可对比性。野外取样工作于同一天内完成,即2012-07-30完成了供试种的取样工作。取样时针对选取的

各供试种,采用切土刀等工具制取直径为 25 cm,深度为 20 cm 的含根系试样柱,取样过程中保持植物根系及其地上部分的完整性,然后将含根系试样柱放置于试验样盆中带回实验室,并及时进行室内单根拉伸试验及根-土复合体直接剪切试验。

2.2 单根抗拉强度试验

试验采用课题组自行设计加工的室内拉伸与剪切测试仪,该仪器的工作原理依据电子万能试验机的工作原理和基本结构制成,即仪器主要由数据采集系统和工作系统两部分组成,其工作原理如图 3



a. 小嵩草 (*Kobresia pygmaea*)



b. 紫花针茅 (*Stipa purpurea*)



c. 矮火绒草 (*Leontopodium nanum*)



d. 二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*)



e. 细叶亚菊 (*Ajanía tenuifolia*)



f. 盐地风毛菊 (*Saussurea salsa*)

图 2 试验区不同程度退化草地的优势种草本植物
Fig.2 Growth situation of the dominant plants of different degraded grassland in the study area

所示。试验通过数据采集系统记录整个单根拉伸过程中,在不同时间和不同拉力作用下的单根位移以及破坏时的最大拉力^[18]。

单根抗拉试验的具体步骤是:从试验样盆中选取根长为 5 ~ 10 cm、表皮完好的新鲜根系,去除表面的泥土,测量其根径后将根段夹持在工作台上的拉伸夹具间,通过转动手轮使夹具向上移动,使夹具

间的根段受到拉力,直到根系破坏为止^[18]。试验过程中,在夹具两端黏贴胶皮,增大根系两端与夹具间的摩擦,以有效防止根系受力时打滑或在夹具两端处发生破坏现象;详细记录每次试验中根系被拉断时的情况,并挑选植物单根在夹具中间或接近中间位置发生断裂的试验结果进行分析。

依据试验得到的相关数据,如单根直径、单根破坏时的最大抗拉力等,可由公式(1)计算单根抗拉强度^[18]

$$P=\frac{4F}{\pi D^2}$$

(1)

式中 P 为单根抗拉强度(MPa), F 为单根最大抗拉力(N), D 为根系的直径(mm)。

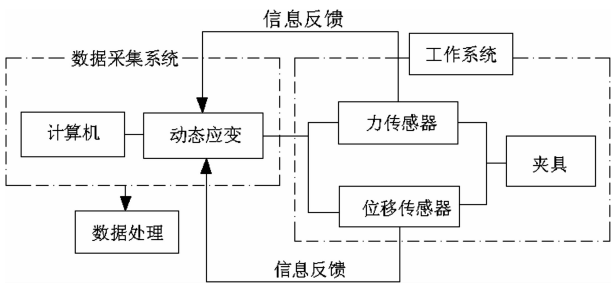


图3 单根拉伸与剪切试验仪工作原理图^[18]

Fig.3 Operating principle of single root tensile and shear test apparatus

2.3 根-土复合体直接剪切试验

对试验区小嵩草、紫花针茅、矮火绒草、二裂委陵菜、细叶亚菊、盐地风毛菊等6种草本植物的根-土复合体原状试样和素土试样分别进行了直接剪切试验。

试样的制备步骤是:采用取样器、钢锯及剪刀等工具将试验样盆中的根-土复合体原状试样削成含根系试样柱,然后用内径为61.8 mm,高为20 mm的环刀从含根系试样柱中制取原状根-土复合体试样,每种草本植物分别制取4个原状试样作为一组,并分别称其重量,计算其密度;将取样时剥离的土收集、碾碎,并过2 mm筛,清除其中的根系用以制备不含根系的素土扰动试样。根据实际观察,原状试样的密度越大,其含有的根系越少,因此选取未退化草地的根-土复合体原状试样中根系含量最少的试样的密度作为素土试样的密度值,素土试样的含水率与未退化草地的根-土复合体原状试样含水率一致,根据确定的素土密度和含水率计算并称量一定重量的土样,采用击实法制取4个扰动素土试样作为一组。

试验采用应变控制式直接剪切仪,每组试验取4个试样,分别在50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa等四级垂直压力下 进行剪切试验。待试验结束后,将剪切破坏的含根系试样用水冲洗,并从中清选出根系,然后统计每个试样中根系的根径、根长以及根系鲜重等相关参数。

3 结果与分析

3.1 单根抗拉力与根径关系

试验区6种草本植物单根抗拉试验结果如表1。由表可知,6种草本植物的根系表现出不同的抗拉力,其抗拉力由大至小依次为二裂委陵菜>小嵩草>盐地风毛菊>矮火绒草>细叶亚菊>紫花针茅。对6种草本的单根抗拉力与根径之间的关系进行拟合分析,结果如图4。由图4可知:单根的抗拉力随根径的增大而增大,且6种草本的单根抗拉力与根径之间均存在指数或幂函数关系,该结果与Wu(1979)、Hengchaovanich、Nilaweera等^[11, 13-15, 18]等多位学者关于具翼龙脑香(*Dipterocarpus alatus*)等植物的单根抗拉力与根径关系的研究结果具有一致性的规律。

表1 试验区6种草本植物单根抗拉试验结果

Table 1 Test results of single root tensile resistance of six herbs in the study area

植物名称	平均根径/mm	平均单根抗拉力/N	平均单根抗拉强度/MPa	样本数量
小嵩草	0.53	7.54	36.26	40
紫花针茅	0.33	3.87	45.67	30
矮火绒草	0.58	6.38	25.61	30
二裂委陵菜	1.17	13.78	13.28	20
细叶亚菊	0.95	4.94	9.15	30
盐地风毛菊	1.47	7.53	5.11	30

3.2 单根抗拉强度与根径关系

试验区6种草本单根抗拉试验结果表明,6种草本植物的单根抗拉强度随根径增大而减小,如图5所示。由单根抗拉强度与根径之间的拟合方程可知,6种草本单根抗拉强度与根径之间均呈幂函数关系。该结果与以Nillaweera、Genet、De Baets等^[9, 13, 15-16, 18, 26]为代表的诸多国内外学者在关于海岸松(*Pinus pinaster* Ait)等植物单根抗拉强度与根径的关系研究中得到的结果一致。试验区6种草

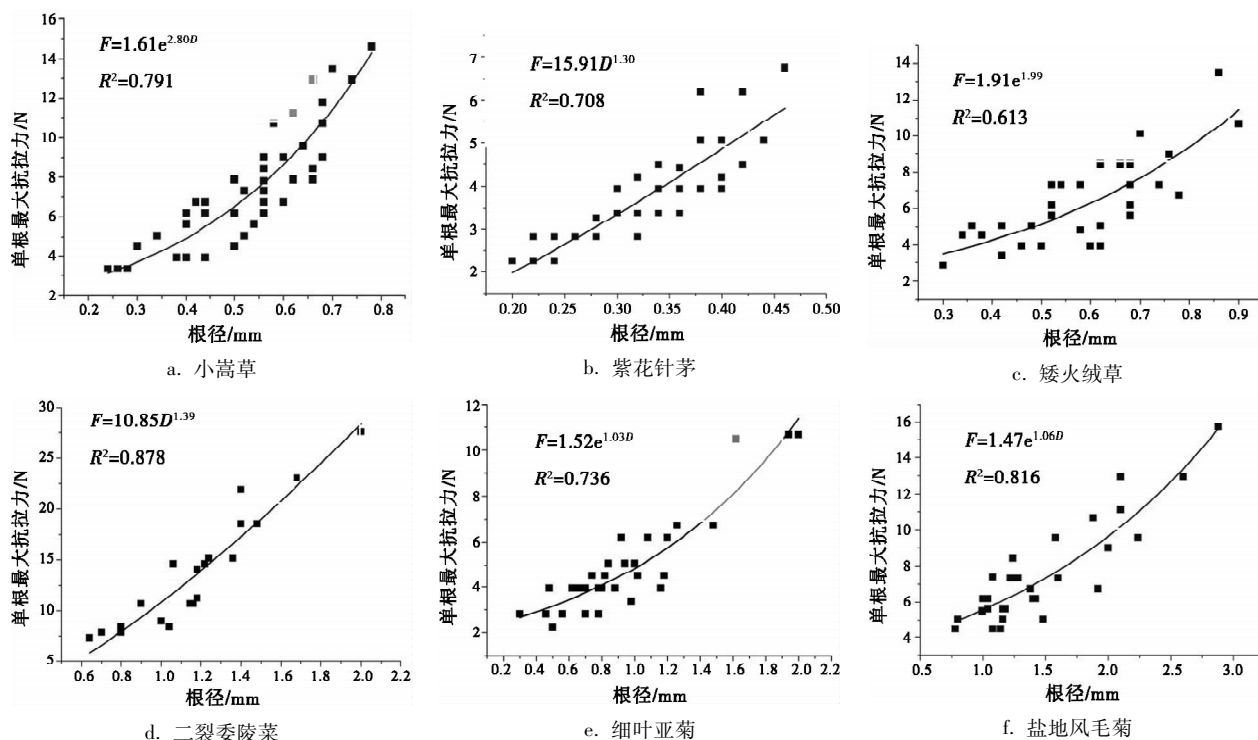


图4 试验区6种草本植物单根抗拉力与根径关系

Fig. 4 Relationship between single root tensile resistance and root diameter of six herbs in the study area

本的平均单根抗拉强度由大至小依次为紫花针茅 > 小嵩草 > 矮火绒草 > 二裂委陵菜 > 细叶亚菊 > 盐地风毛菊。单根抗拉强度能反映根系材料的受力潜能,可作为评价根系固土能力的一个有效指标^[12, 19-21]。试验区6种草本中,紫花针茅、小嵩草的单根抗拉强度显著高于矮火绒草、二裂委陵菜、细叶亚菊、盐地风毛菊等其他4种植物,且具有根系发达、分布密集的特征,故试验区小嵩草、紫花针茅较其他4种草本表现出相对显著的固土护坡能力;矮火绒草、二裂委陵菜的单根抗拉强度仅次于紫花针茅、小嵩草,且矮火绒草、二裂委陵菜的根系分布亦相对较稀疏,反映出其固土护坡能力相对不及紫花针茅、小嵩草;细叶亚菊、盐地风毛菊的单根抗拉强度在6种草本中均相对较小,且其根系较前4种草本相对不发达,故表现出其固土护坡能力相对不及前4种植物显著。由上述分析可知,试验区6种草本植物通过其单根抗拉强度所反映出的根系固土护坡能力的相对大小依次为紫花针茅 > 小嵩草 > 矮火绒草 > 二裂委陵菜 > 细叶亚菊 > 盐地风毛菊。

进一步研究表明,6种草本植物的单根抗拉强度受其根径大小的影响较为显著,如图5所示,小嵩草的根径主要集中在0.5~0.7 mm,当根径由0.2

mm 增大到0.5 mm 时,单根抗拉强度随根径增大呈显著降低趋势,且单根抗拉强度值在75~35 MPa,表明根径在0.2~0.5 mm 范围时根系单根抗拉强度相对较大,能够发挥出相对较好的加筋作用,提高根-土复合体强度;而在根径 > 0.5 mm 时,小嵩草单根抗拉强度随根径增大而呈进一步降低趋势,且单根抗拉强度值相对较小,即在40~25 MPa。类似地,试验区其他5种草本植物根系单根抗拉强度受其根径大小的影响均表现出与小嵩草相似的变化规律性。以上分析说明,植物根径相对较小时,植物根系具有相对显著的加筋固土作用,而根径增大到一定程度后,根系加筋固土作用则受根径变化的影响相对较小。

3.3 根-土复合体与素土抗剪强度试验结果对比

对试验区6种草本的根-土复合体原状试样以及不含根系的素土试样分别进行了直接剪切试验,直剪试验结果如表2所示;同时由试验得到的剪应力与剪切位移关系如图6所示,试样抗剪强度与垂直压力关系图如7所示。

3.3.1 根-土复合体抗剪强度的增强效应

如图6所示,6种草本的根-土复合体原状试样及素土试样在剪切初始阶段,剪应力与剪切位移

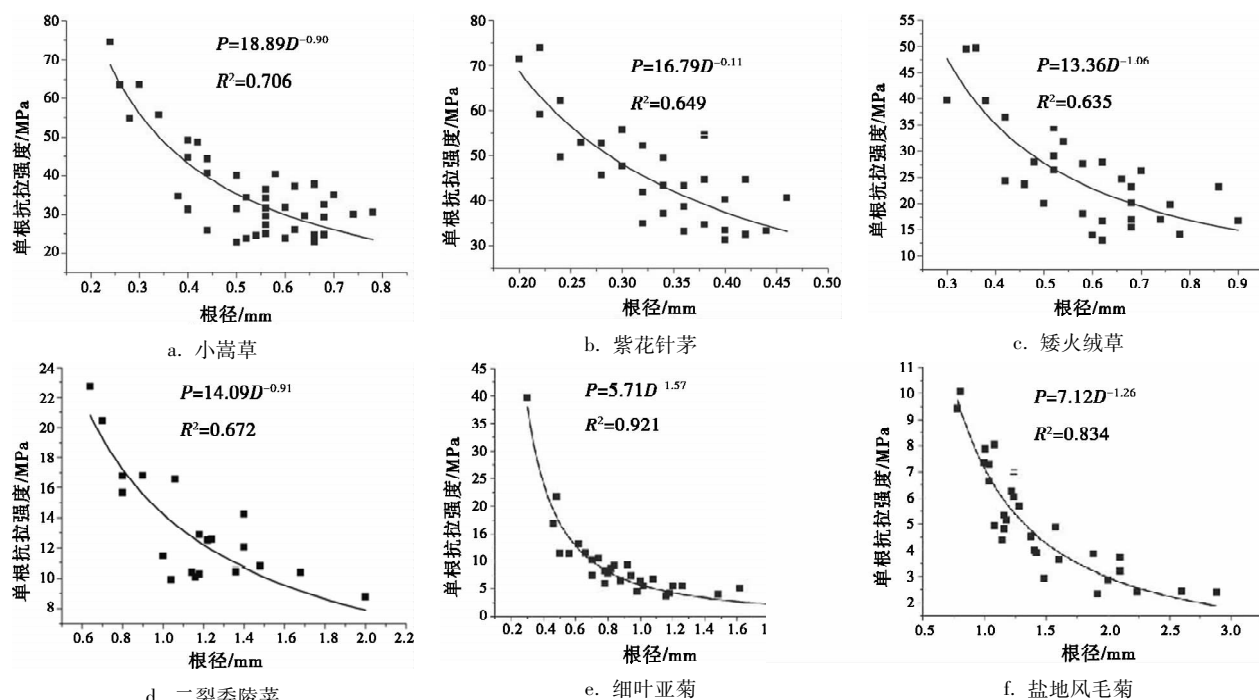


图5 试验区6种草本植物根系单根抗拉强度与根径关系

Fig. 5 Relationship between single root tensile strength and root diameter of six herbs in the study area

呈线性关系,随着剪切位移进一步增大,剪应力与剪切位移的关系表现为非线性;与素土试样相比,6种草本根-土复合体试样在达到相同剪应力时,素土试样的剪切位移相对较大,如在300 kPa垂直压力下(即图中P4曲线),在剪应力达到80 kPa时,素土的剪切位移为0.95 mm,紫花针茅根-土复合体为0.65 mm,小嵩草为0.80 mm,矮火绒草为0.80 mm,二裂委陵菜为0.85 mm,细叶亚菊为0.90 mm,盐地风毛菊为0.95 mm。由此可知,在达到相同的剪应力时,由于根系的加筋作用,使得根-土复合体的剪切位移较素土试样为小,且紫花针茅和小嵩草根-土复合体在相同剪应力下的剪切位移较矮火绒草等4种草本表现出相对略小的特征,矮火绒草和二裂委陵菜根-土复合体在相同剪应力下的剪切位移较细叶亚菊和盐地风毛菊亦表现出相对略小的特征。

由图7可知,6种草本根-土复合体与素土的抗剪强度均随围压增大而呈线性增大趋势,且符合莫尔-库伦强度理论,即 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 。小嵩草等6种草本根-土复合体的抗剪强度均显著大于素土,这在一定程度上说明了由于根系的存在,6种植物均不同程度地增大了土体的抗剪强度,从而增强了土体的稳定性。在垂直压力较小时,即在50 kPa时,6种草本根-土复合体抗剪强度由大至小依次为小嵩草>紫花针茅>矮火绒草>二裂委陵菜>细叶

亚菊>盐地风毛菊,而在垂直压力较大时,即从100 kPa到300 kPa时,6种草本根-土复合体抗剪强度由大至小依次为紫花针茅>小嵩草>矮火绒草>二裂委陵菜>盐地风毛菊>细叶亚菊。以上分析说明在不同垂直压力下,6种草本植物表现出的固土护坡作用基本一致,但在垂直压力较低时小嵩草的固土力学强度相对最大,而在垂直压力较大时,紫花针茅的固土力学强度要显著高于其他5种草本。此外,在50~300 kPa的垂直压力下小嵩草和紫花针茅根-土复合体的抗剪强度均显著高于其他4种草本,且矮火绒草和二裂委陵菜的固土力学强度要显著高于细叶亚菊和盐地风毛菊。这反映出相对于退化草地的矮火绒草、细叶亚菊等优势草本,未退化草地的小嵩草等优势草本的根-土复合体抗剪强度相对较大,则有利于植物生长区土体的稳定性,且相对于重度退化草地的细叶亚菊、盐地风毛菊等优势种草本,轻度退化草地的矮火绒草、二裂委陵菜等优势草本相对有利于生长区土体稳定。

6种草本根-土复合体原状试样及素土试样的直剪试验结果如表2所示。通过对比6种草本根-土复合体与素土试样的粘聚力(C)和内摩擦角(φ)可知,6种草本根-土复合体的粘聚力(C)均显著大于素土,且相对于素土,根-土复合体粘聚力的增长幅度为26%~85%,其增幅由大至小依次为小嵩

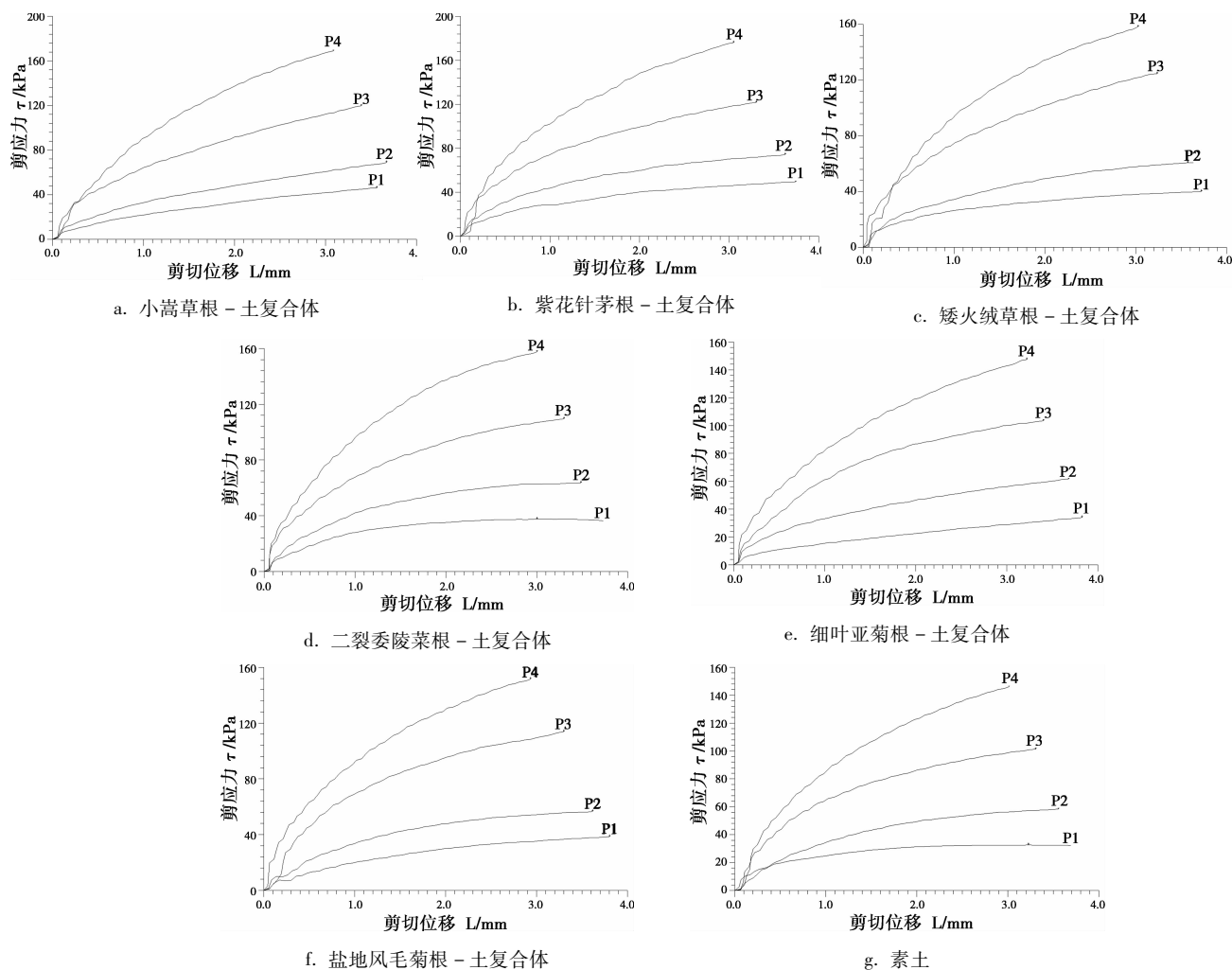


图6 试验区6种草本根-土复合体及素土试样的剪应力与剪切位移关系

Fig. 6 Relationship between shear resistance and shear displacement of root-soil composite systems of six herbs and soil without root in the study area

草为 84.3%, 紫花针茅为 69.3%, 矮火绒草为 44.5%, 二裂委陵菜为 31.6%, 细叶亚菊为 28.2%, 盐地风毛菊为 26.4%。该规律一定程度上反映了小嵩草和紫花针茅根系的固土护坡效应相对显著, 其次为矮火绒草和二裂委陵菜, 而细叶亚菊和盐地风毛菊根系的固土护坡效应相对不及前4种草本; 内摩擦角(φ)的变化未体现出一定的规律性。由6种草本根-土复合体粘聚力增幅的变化关系, 反映出在自然生长状态下, 试验区以小嵩草、紫花针茅为优势种的未退化草地的土壤稳定性相对较好, 其次为矮火绒草和二裂委陵菜, 而以细叶亚菊和盐地风毛菊为优势种的轻度退化草地则相对易于形成土壤侵蚀等现象。

3.3.2 根系密度、根系数量及单根抗拉强度对根-土复合体抗剪强度的影响

根系对土体抗剪强度的增强效应可通过土体中

的根系密度、根系数量以及单根抗拉强度等相关指

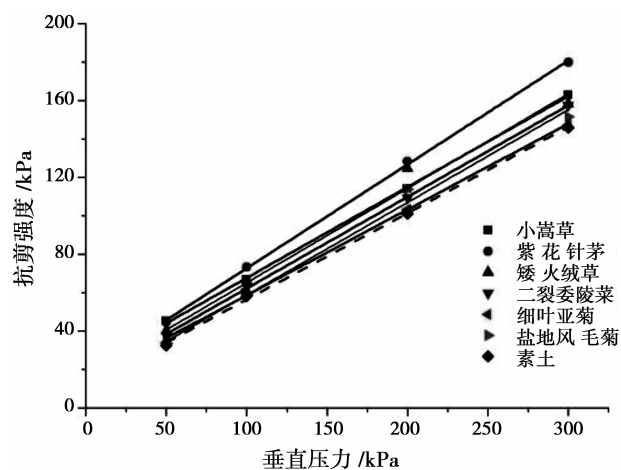


图7 试验区6种草本根-土复合体及素土试样的抗剪强度与垂直压力关系

Fig. 7 Relationship between shear strength and vertical pressure of root-soil composite systems of six herbs and soil without root in the study area

表 2 试验区 6 种草本根-土复合体和素土直接剪切试验结果

Table 2 Direct shear test results of root-soil composite systems of six herbs and soil without root in the study area

试样类型	密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	根系密度 /(g/cm ³)	根系数量 /根	粘聚力 C 值 /kPa	粘聚力 C 值增长幅度 /%	内摩擦角 φ 值 /°
小嵩草根-土复合体	1.20	20.5	0.039	108	20.42	84.3	25.3
紫花针茅根-土复合体	1.27	20.5	0.015	134	18.76	69.3	28.4
矮火绒草根-土复合体	1.31	13.6	0.024	84	16.01	44.5	26.2
二裂委陵草根-土复合体	1.51	13.2	0.022	8	14.58	31.6	25.5
细叶亚菊根-土复合体	1.47	13.2	0.020	13	14.01	26.4	24.1
盐地风毛菊根-土复合体	1.43	12.8	0.017	11	14.01	26.4	25.0
素土	1.31	20.5	—	—	11.08	—	26.1

注:①根系密度为根-土复合体单位体积内所含根系的鲜重(即环刀内根-土复合体中根系的鲜重除以环刀的体积得到);②根系数量指的是试样体积为 60 cm³(即环刀的体积)内的根系的平均数量,即由试样全部根系鲜重除以其中 10 根根系的鲜重,然后乘以 10 计算而得;③粘聚力 C 值增长幅度是指植物根-土复合体 C 值相对于素土的 C 值增长的百分比,即根-土复合体 C 值的增长量与素土 C 值的比值。

标来进行评价^[9, 11, 17-18, 23-25]。试验区未退化草地的 2 种草本植物中,小嵩草根-土复合体在试样体积为 60 cm³ 中的根系数量为 108 根,小于紫花针茅根-土复合体在相同试样体积中的根系数量 134 根,且小嵩草的单根抗拉强度为 36.26 MPa,亦不及紫花针茅的单根抗拉强度为 45.67 MPa,但其根-土复合体的抗剪强度则高于紫花针茅,这主要是由于小嵩草的根系密度为 0.039 g/cm³,而紫花针茅为 0.015 g/cm³,小嵩草根系密度是紫花针茅的 2.6 倍,这在一定程度上反映出根系密度愈大,则根系对土体抗剪强度的增强效应亦愈显著。未退化草地的紫花针茅与轻度退化及重度退化草地的矮火绒草等 4 种优势种草本相比,紫花针茅的根系密度为 0.015 g/cm³ 相对较小,但其根-土复合体的抗剪强度是 4 种草本的 1.2~1.4 倍左右,这主要是由于紫花针茅的根系数量是 4 种草本的 1.6~16.7 倍,单根抗拉强度是 4 种草本的 1.8~8.9 倍,这在一定程度上说明了根系数量和单根抗拉强度愈大,则根-土复合体的抗剪强度愈大的特点。由以上分析可知,根系密度、根系数量及单根抗拉强度等三个因素对根-土复合体抗剪强度的影响均具有一定程度的相关性,即土体中根系密度愈大、根系数量愈多、根系的单根抗拉强度愈大,则植物的固土护坡力学效应愈显著。通过本文研究进一步可知,对于生长环境相同的植物,即均生长在未退化草地或生长在同一退化程度草地的植物,对其根-土复合体抗剪强度影响相对较大的因素是根系密度,其次是单根抗拉强度和根系数量。

3.4 试验区植物固土护坡力学效应与土壤退化之间的关系

本项研究所选取的草本植物为试验区不同程度退化高寒草地的优势草本种,其中小嵩草、紫花针茅是未退化草地的优势种,矮火绒草、二裂委陵菜是轻度退化草地的优势种,细叶亚菊、盐地风毛菊是重度退化草地的优势种。由 6 种草本的单根抗拉试验结果可知,单根抗拉强度由大至小依次为紫花针茅>小嵩草>矮火绒草>二裂委陵菜>细叶亚菊>盐地风毛菊;由 6 种草本的原状根-土复合体试样的直接剪切试验结果可知,根-土复合体抗剪强度由大至小依次为小嵩草>紫花针茅>矮火绒草>二裂委陵菜>细叶亚菊>盐地风毛菊。上述草本植物的单根抗拉强度和根-土复合体抗剪强度的变化规律具有较好的一致性,说明了试验区 6 种草本的综合固土护坡能力由大至小依次为小嵩草>紫花针茅>矮火绒草>二裂委陵菜>细叶亚菊>盐地风毛菊,且这种固土护坡能力的变化规律又与 6 种草本生长区草地的退化程度具有很好的一致性,故试验区优势种草本固土力学强度的大小,与草地的退化程度之间存在着相对应的关系。周华坤等^[34-35]研究表明,植被退化是导致土壤退化的原因之一,而土壤退化也必然引起植被退化,二者互为因果。由上述分析可知,从植物单根抗拉强度及根-土复合体抗剪强度等力学效应角度,亦可反映试验区草本植物退化会导致土壤退化,即植物根系固土力学强度因植被退化而发生相应的变化,如小嵩草、紫花针茅等原生优势种被矮火绒草、二裂委陵菜等次生优势种取代,由于矮火绒草、二裂委陵菜根系的固土强度相对较低于小嵩草、紫花针茅,使得矮火绒草、二裂委陵菜生长区的土壤相对易于受侵蚀而加剧土壤退化现象的发生,土壤退化进一步加剧植物退化,如矮火绒草、

二裂委陵菜等轻度退化草地的优势种植物被细叶亚菊、盐地风毛菊等植物取代,而细叶亚菊、盐地风毛菊根系的固土强度相对低于矮火绒草、二裂委陵菜,使得细叶亚菊、盐地风毛菊生长区的土壤更易于受侵蚀而加剧土壤退化现象的发生,从而形成不良循环。

4 结 论

1. 试验区 6 种草本的单根抗拉力与根径呈指数或幂函数正相关关系,单根抗拉强度与根径均呈幂函数负相关关系;且单根抗拉强度的由大至小依次为紫花针茅为 45.67 MPa、小嵩草为 36.26 MPa、矮火绒草为 25.61 MPa、二裂委陵菜为 13.28 MPa、细叶亚菊为 9.15 MPa、盐地风毛菊为 5.11 MPa。

2. 6 种草本植物的根-土复合体及素土的粘聚力由大至小依次为小嵩草为 20.42 kPa、紫花针茅为 18.76 kPa、二裂委陵菜为 14.58 kPa、矮火绒草为 16.01 kPa、细叶亚菊为 14.21 kPa、盐地风毛菊为 14.01 kPa、素土为 11.08 kPa。此外,6 种草本根-土复合体抗剪强度受垂直压力大小影响,即垂直压力较小时 4 种草本根-土复合体抗剪强度由大至小依次为小嵩草>紫花针茅>矮火绒草>二裂委陵菜>细叶亚菊>盐地风毛菊,而垂直压力较大时由大至小依次为紫花针茅>小嵩草>矮火绒草>二裂委陵菜>盐地风毛菊>细叶亚菊。

3. 6 种草本中小嵩草的根-土复合体粘聚力相对于素土的增大幅度相对较大,为 84.3%,其次为紫花针茅 69.3%,矮火绒草为 44.5%,二裂委陵菜为 31.6%,细叶亚菊和盐地风毛菊相对较小,分别为 28.2% 和 26.4%。

4. 6 种草本根-土复合体的根系密度由大至小依次为小嵩草>矮火绒草>二裂委陵菜>细叶亚菊>盐地风毛菊>紫花针茅;6 种草本根-土复合体在试样体积为 60 cm³ 内的根系数量由大至小依次为紫花针茅>小嵩草>矮火绒草>细叶亚菊>盐地风毛菊>二裂委陵菜。直剪试验结果表明,根系密度、根系数量及单根抗拉强度等三个因素的增大均能使试样抗剪强度得到一定程度增大,其中根系密度对根-土复合体抗剪强度的影响相对较大,其次为单根抗拉强度,而根系数量对根-土复合体抗剪强度的影响则相对较小。

5. 综合分析 6 种优势种植物的单根抗拉强度

及根-土复合体抗剪强度等力学强度指标,可知其固土护坡能力由大至小依次为小嵩草>紫花针茅>矮火绒草>二裂委陵菜>细叶亚菊>盐地风毛菊;对比 6 种草本植物生长区的退化程度可知,优势种草本的固土力学强度愈低,则在一定程度上可反映出相应的植物生长区根系增强土体强度和抵御土壤受侵蚀作用的能力也相应呈降低趋势。这从植物根系的固土力学效应角度反映了植物固土力学强度的大小与植物生长区草地的退化程度之间存在着密切关系。

参考文献 (References)

- [1] Yan Musui, Xu Feng, Zhang Wei, et al. Soil erosion analysis in headstream basin of the Yellow River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(06):75-78[严慕绥, 许峰, 张卫, 等. 黄河源头区土壤侵蚀现状分析[J]. 水土保持通报, 2004, 24(06):75-78]
- [2] Zhang Yili, Liu Linshan, Bai Wanqi, et al. Grassland degradation in the source region of the Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(01):3-14[张懿锂, 刘林山, 摆万奇, 等. 黄河源地区草地退化空间特征[J]. 地理学报, 2006, 61(01):3-14]
- [3] Zhang Shuai, Shao Quanqin, Liu Jiyan, et al. Land use and landscape pattern change in Maduo County, the Source Region of the Yellow River[J]. Journal of Geo-information Science, 2007, 9(04):109-115[张帅, 邵全琴, 刘纪远, 等. 黄河源区玛多县土地利用/覆被及景观格局变化的遥感分析[J]. 地球信息科学, 2007, 9(04):109-115]
- [4] Li X, Perry G, Brierley G, et al. Grassland degradation of alpine meadow in the Sanjiangyuan region, Qinghai[G]// Landscape and environment science and management in the Sanjiangyuan region. Brierley G, Li X, Chen G. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2010: 138-147
- [5] Zhou Depei, Zhang Junyun. The engineering technique for slope protection with vegetation[M]. Beijing: China Communications Press, 2003:4-11[周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003:4-11]
- [6] Chen Lihua, Yu Xinxiao, Song Weifeng, et al. Mechanics of Root-Soil[M]. Beijing: Science Press, 2008:2-28[陈丽华, 余新晓, 宋维峰, 等. 林木根系固土力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008:2-28]
- [7] Hu Xiasong, Mao Xiaqing, Zhu Haili, et al. Slope protection with vegetation in Qinghai-Tibet plateau[M]. Beijing: Geological Public House, 2011:1-8[胡夏嵩, 毛小青, 朱海丽, 等. 青藏高原植被护坡[M]. 北京: 地质出版社, 2011:1-8]
- [8] Chen Xizhe. Soil mechanics and geotechnical engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998:40-41[陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998:40-41]
- [9] Zhao Libing, Zhang Baogui. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of *Medicago sativa* and *Digitaria sanguinalis*

- nalis [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(09):7-12 [赵丽兵, 张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(09):7-12]
- [10] Song Weifeng, Chen Lihua, Liu Xiuping. Review of theories of soil reinforcement by root system in forest[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6):180-186 [宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 林木根系固土的理论基础[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6):180-186]
- [11] Liu Guobin, Jiang Dingsheng, Zhu Xianmo. Study on grasses root bio-mechanics in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 2(03):21-28 [刘国彬, 蒋定生, 朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(03):21-28]
- [12] Cheng Hong, Zhang Xinquan. An experimental study on herb plant root system for strength principle of soil-fixation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(05):20-23 [程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(05):20-23]
- [13] Nilaweera N S, Nulalaya P. Role of tree roots in slope stabilisation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, 57(4):337-342
- [14] Wu T H, McKinnell W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1):19-33
- [15] Hengchaovanich D, Nilaweera N S. An assessment of strength properties of vetiver grass roots in relation to slope stabilization [G]//International Conference on Vetiver, Chain Kai, Thailand. 1996.
- [16] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1):1-9
- [17] Wang Kejun, Li Zhuofen. Brief mechanics analysis on bioengineering techniques for slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(06):687-691 [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(06):687-691]
- [18] Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoping, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, (Suppl. 2):3445-3452 [朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, (增2):3445-3452]
- [19] Xie Mingshu. A study on the soil mechanical role of tree roots in the stability of slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(03):7-14 [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(03):7-14]
- [20] Yan Z, Song Y, Jiang P, et al. Mechanical analysis of interaction between plant roots and rock and soil mass in slope vegetation[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(05):617-622
- [21] 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
- [22] Wu T H, Watson A. In situ shear tests of soil blocks with roots [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(4):579-590
- [23] Terwilliger V J, Waldron L J. Effects of root reinforcement on soil-slip patterns in the Transverse Ranges of southern California[J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103(6):775-785
- [24] Ziemer R. Roots and the stability of forested slopes[J]. Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands, IAHS Publ, 1981, (132):343-361
- [25] 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 CSAE, 2006, 22(11):6-9 [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]
- [26] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2008, 305(1):207-226.
- [27] Qiao Na, Yu Qinqin, Hu Xiasong, et al. Vegetation reinforcement to soil and a review on its effect for slope protection[J]. Yellow River, 2011, 33(07):106-109 [乔娜, 余芹芹, 胡夏嵩, 等. 植物对土壤加强作用及其生态护坡研究综述[J]. 人民黄河, 2011, 33(07):106-109]
- [28] Wang Changting, Wang Genxu, Liu Wei, et al. Vegetation roots and soil physical and chemical characteristics in degeneration succession of the *Kobresia pygmaea* meadow[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(03):409-416 [王长庭, 王根绪, 刘伟, 等. 植被根系及其土壤理化特征在高寒小嵩草草甸退化演替过程中的变化[J]. 生态环境学报, 2012, 21(03):409-416]
- [29] Qiao Y, Wang Q. Driving forces of alpine meadow degradation in the Yellow River headwaters [G]// Landscape and environment science and management in the Sanjiangyuan region. Brierley G, Li X, Chen G. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2010: 149-165
- [30] Hu Guangyin, Dong Zhibao, Lu Junfeng, et al. Desertification and change of landscape pattern in the source region of the Yellow River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14):3872-3881 [胡光印, 董治宝, 逯军峰, 等. 黄河源区沙漠化及其景观格局的变化[J]. 生态学报, 2011, 31(14):3872-3881]
- [31] Xie Chunhua, Guan Wenbin, Zhang Dongsheng, et al. Structure of root system of major trees and stability of soil-body dominated by them in dark coniferous ecosystem in upper reach of the Yangtze River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(2):76-79 [谢春华, 关文彬, 张东升, 等. 长江上游暗针叶林生态系统主要树种的根系结构与土体稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2):76-79]
- [32] Zhang Xingling, Hu Xiasong, Li Guorong, et al. Time effect of young shrub roots on slope protection of loess area in Northeast Qinghai-Tibetan plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4):136-141 [张兴玲, 胡夏嵩, 李国荣, 等. 青藏高原东北部黄土区灌木幼林根系护坡的时间效应[J]. 农业工程学报

- 报, 2012, 28(4):136-141]
- [33] Jiao Zhen, Wang Daojie, Xie Hong, et al. Experimental analysis of shear strength of undisturbed soil in Leucaena Forest in Jiangjia Ravine, Yunnan, China[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 7(4):386-395
- [34] Zhou Huakun, Zhao Xinquan, Wen Jun, et al. The characteristics of soil and vegetation of degenerated alpine steppe in the Yellow River Source Region [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(05):1-11[周华坤, 赵新全, 温军, 等. 黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征[J]. 草业学报, 2012, 21(05):1-11]
- [35] Li Shaoliang, Chen Youjun, Guan Shiyong, et al. Relationships between soil degradation and rangeland degradation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(01):92-95 [李绍良, 陈有君, 关世英, 等. 土壤退化与草地退化关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(01):92-95]

Mechanical Effects of Alpine Grassland Plants in Slope Protection in Maqin County of the Source Area of the Yellow River

LI Guangying¹, HU Xiaotian¹, LI Xilai², YU Dongmei¹, FU Jiangtao¹, ZHU Haili¹, HU Xiasong^{1,2}

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008 Qinghai, China;

2. Qinghai University, Xining, 810016 Qinghai, China)

Abstract: Mechanical strength tests have been conducted on grass roots of alpine grassland plants in Maqin County to study their mechanical effects in soil fixation and slope protection in the source area of the Yellow River. Three representative sampling plots were selected according to the degradation degrees which were marked as non-degraded grassland, lightly degraded grassland and heavily degraded grassland. The root tensile strength and shear strength of the dominant plants in this alpine grassland was studied to estimate the contribution to soil fixation and slope protection. The selected dominant plants in non-degraded grassland were *Kobresia pygmaea* C. B. Clarke and *Stipa purpurea* Griseb., in lightly degraded grassland *Leontopodium nanum* (Hook. f. et Thoms.) Hand. - Mazz. and *Ajania tenuifolia* (Jacq.) Tzvel were chosen, *Potentilla bifurca* L. and *Saussurea arenaria* Maxim were the dominant in heavily degraded grassland. The result of single root tensile test shows that the descending order of single root strength of these plants is *Stipa purpurea* Griseb. > *Kobresia pygmaea* C. B. Clarke > *Leontopodium nanum* (Hook. f. et Thoms.) Hand. - Mazz. > *Potentilla bifurca* L. > *Ajania tenuifolia* (Jacq.) Tzvel. > *Saussurea salsa* (Pall) Spreng, while the result of direct shear test shows that the descending order of root-soil composite systems shear strength is *Kobresia pygmaea* C. B. Clarke > *Stipa purpurea* Griseb. > *Leontopodium nanum* (Hook. f. et Thoms.) Hand. - Mazz. > *Potentilla bifurca* L. > *Ajania tenuifolia* (Jacq.) Tzvel > *Saussurea salsa* (Pall) Spreng. The study has theoretical significance in investigating the mechanism of the alpine grassland plants for slope protection and in prevention and control of geological disasters such as water and soil loss, and shallow landslide in the region and other regions with the similar environmental conditions.

Key words: the source area of the Yellow River; alpine grassland; slope protection with vegetation; root-soil composite systems; tensile strength; shear strength; mechanical effects