

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

胡夏嵩^{1,2}, 陈桂琛³, 周国英³, 徐文华³, 李国荣¹, 乔娜¹, 余芹芹¹

(1. 青海大学地质工程系, 西宁 810016; 2. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008;
3. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810000)

摘要: 以青藏铁路沱沱河段路基边坡作为试验区,且在试验区路基边坡两侧种植了乡土护坡草本植物垂穗披碱草,通过对种植在试验区路基阴坡、阳坡生长 5 年的垂穗披碱草,做了野外原位根系拉拔试验,获得了垂穗披碱草根系抗拔力。研究表明:种植在阳坡的垂穗披碱草根系抗拔力为 30.88N,阴坡抗拔力为 23.52N,即种植在阳坡的垂穗披碱草根系抗拔力显著大于阴坡,影响其抗拔力大小的主要因素与土壤含水量及其变化有密切关系,试验区阳坡接受光照时间、程度均强于阴坡,试验区阳坡坡面土壤水分蒸发量大于阴坡这种差异形成阴坡、阳坡坡体土壤含水量不同的主要原因;垂穗披碱草根系抗拔力大小与须根数量、根径、根长、株高、根表面积、分蘖数之间均呈线性关系,其中抗拔力与须根数量之间呈显著性线性相关,阳坡垂穗披碱草抗拔力随根系数量增加的幅度显著大于阴坡,即当须根数量为 40~60 条时,阳坡垂穗披碱草的抗拔力集中分布在 11~25N,阴坡抗拔力分布在 8~15N;当须根数量为 60~140 条时,阳坡垂穗披碱草的抗拔力分布在 30~70N,阴坡抗拔力为 20~50N。根据路基边坡阴坡、阳坡垂穗披碱草根系抗拔力试验结果,评价了阴、阳两种坡向条件下垂穗披碱草根系护坡力学贡献,这对青藏铁路路基边坡种植草本植物实现该边坡与周边自然生态环境之间的协调发展具有理论指导意义。

关键词: 青藏铁路; 沱沱河; 路基边坡; 植物护坡; 根系力学强度

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)01-0107-07

青藏铁路格唐段(格尔木—唐古拉山垭口),地处世界上海拔最高、气候条件恶劣有世界屋脊之称的青藏高原^[1],跨越长江源多年冻土区的高寒植被生态系统和昆仑山北麓柴达木盆地南缘的荒漠生态系统,沿线植被与生态具有独特性、原始性和脆弱性等特点^[2],青藏铁路是一条从北到南横穿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 591.58km,线路跨越地处长江源多年冻土区的沱沱河^[3]。青藏铁路沿线的沱沱河一带,草地生态环境脆弱,对该段采用人工播种植被护坡方式,可有

效防治坡面因雨水溅蚀作用造成的路基边坡碎石、砂砾、土体填筑物质流失,以及在坡面形成的各种规模的冲沟、小规模塌陷,同时对进一步提高路基边坡的稳定程度起到重要作用;此外,采用人工播种植被护坡方式,还将有利于协调青藏铁路沱沱河段沿线及其与周边生态环境的一致性,这对于保护区域生态环境协调发展具有重要意义。

采用植被防治坡面水土流失与增加边坡稳定方面的应用和研究,得到了国内外学者普遍关注^[4-13]。植被增强边坡稳定的显著贡献主要表现在两个方面,即植被构成“土壤—植被—大气”之间连续循环的主要成分与植物根系对土壤的加强作用^[5]。植被稳定边坡的作用功能普遍认可的是其力学和水文效应,因此植被被认为是一种自然的、有益的生态工程的方法并以此来防治边坡发生水土流失和浅层滑坡现象^[6]。植物根系的这种加筋作用进而稳定边坡效应大小的评价,它则是通过根系自身所提供的附加抗剪强度的大小所决定的^[6,15],影响根系加筋土体抗剪力的主要因素表现在根系在土体中的数量、根系方向、根系抗拉强度、土体抗剪强度以及根—土相互作用^[7],其中根系

收稿日期: 2011-05-23; 修订日期: 2011-09-22

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAC07B00); 国家自然科学基金资助项目(40762002); 中国博士后科学基金资助项目(20060390306); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-04-G983)

作者简介: 胡夏嵩(1965-),男,教授,博士后,主要从事环境岩土工程与工程地质、固体力学与岩土工程稳定性数值模拟计算等方面的教学和研究工作。

E-mail: hxs@mail.tsinghua.edu.cn

抗拉强度是影响土体稳定、根系固土强度的重要因素,因此在该方面已有相当的研究成果^[7,14-16]。植物根系重要力学特征之一体现在它具有较强的抗拉性,作为土体它具有较强的抗压性和弱的抗拉性,这种根系与土的联合效应导致土体的加筋性能。当土体受到剪切作用时,根系可以起到改变土体抗拉强度的作用,这种作用主要是通过土壤中的剪应力沿着根系长度通过根-土之间的界面传递到根系纤维,进而实现增强土体抗剪强度的作用^[15]。这种根系的增强作用的量值主要取决于根系形态特征、根系抗拉强度、根系抗拉模量、根系弯曲度、根和土之间的界面摩擦力、根系的方向^[15]。因此通过本项研究,可以定量评价植物根系与土体界面摩擦力大小,这将有助于进一步研究根系加固土体抗剪强度提高的程度,同时这也将有助于进一步深入研究植物根系加固土体的边坡稳定的力学护坡机理。

以青藏铁路沱沱河段路基边坡为例,对种植在路基边坡阴坡和阳坡生长 5 年的垂穗披碱草,分别做了野外现场拉拔试验,获得了路基阴坡和阳坡垂穗披碱草根系抗拔力试验值,在此基础上评价了种植在路基阴坡和阳坡的垂穗披碱草护坡力学贡献。青藏铁路路基边坡实施人工播种植被护坡对边坡防护具有重要意义。

1 试验区自然概况

试验区位于格尔木市唐古拉乡北 10km 处沱沱河青藏铁路路基边坡,地理位置在 34°16'04"N 92°29'47"E 附近,海拔约 4560m。作为试验区的青藏铁路沱沱河段路基边坡位于沱沱河盆地冲洪积平原上,地形开阔,稍有起伏;地层主要为第四系全新统粉质粘土、细砂、砾砂、圆砾土以及新近、古近系互层泥岩、砂岩^[11];试验地段为多年冻土向沱沱河融区过渡地带,主要表现为岛状多年冻土与融区交错分布,融区主要分布于部位较高、排水条件良好、土层较干燥的低缓丘陵^[3]。试验区水资源主要受大气降水及暖季冻结层融化水补给,不良地质现象主要为半固定沙丘、沙地,特殊地质问题主要为冻土^[11]。试验段气候属高原大陆性气候类型,具有寒冷、干旱、多风等主要特点。根据沱沱河气象站资料,年平均气温为 -4.0℃,极端最低气温 -45.2℃,极端最高温 24.7℃,最热月(7 月)平均气温 7.6℃,最冷月(1 月)平均气温 -16.2℃;年平均降水量 248.5mm,年平均蒸发量 1638.9mm,年平均相对湿度 53%,年平均大风日数 178d^[3]。

2 试验区草本植物选取与种植

2.1 草本植物选取

青藏铁路沱沱河段路基边坡填筑材料,主要来源于其东侧约 220m 处的取土场,主要成分为红色、紫红色的粉质粘土、粉砂土、细砂、砂砾石等成分构成。此外,青藏铁路格拉段即从格尔木至拉萨方向,将位于路基左侧坡视为阳坡,右侧坡视为阴坡^[17]。根据研究区沱沱河青藏铁路沿线气象、水文特点,选取高原乡土植物垂穗披碱草(*Elymus nutans*)作为供试种^[3]。青藏铁路沱沱河段选取的试验段路基边坡全长约为 200m,试验区路基边坡结构剖面示意如图 1 所示。

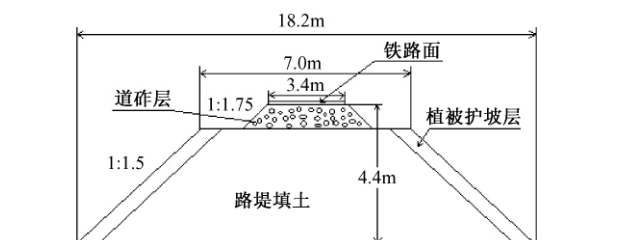


图 1 试验区路基边坡结构剖面示意
Fig.1 Structural elements section of railway roadbed slope in testing area

2.2 试验区草本植物种植

青藏铁路沱沱河段路基边坡种植垂穗披碱草,所采用的种植方法是首先将试验区路基边坡坡面填土适度平整,撒播垂穗披碱草种子后进行耙磨,水分主要靠天然降水。青藏铁路沱沱河段路基边坡试验区如图 2、图 3 所示。此外,试验区路基边坡土壤含水量、密度分别为:阳坡土壤含水量为 12.8% ~ 24.5%,密度为 1.38 ~ 1.64g/cm³,阴坡土壤含水量 14.7% ~ 26.8%,



图 2 路基边坡阴坡试验区
Fig.2 Railway roadbed slope(for shady slope)

密度为 1.36 ~ 1.65g/cm³。



图 3 路基边坡阳坡试验区

Fig. 3 Railway roadbed slope(for solar slope)

2.3 试验区草本植物现场拉拔试验

采用野外现场根系拉拔试验装置,对人工恢复植物垂穗披碱草进行拉拔试验,测定植株被拔出时的最大抗拔力,并统计其根系数量、根径、分蘖数等相关参

数。现场试验过程中,阴、阳坡各拉拔 36 株植物。试验步骤如下:选择生长正常的植株,将植物地上部分夹持在传感器下端的夹具上,然后通过传感器对植株施加拉力,直到整株被拔出为止,整株被拔出时的抗拔力大小可直接通过传感器由试验数据采集显示仪显示^[18]。

3 试验结果与分析

3.1 试验区草本植物根系地下生长量特征

种植在铁路路基边坡试验区垂穗披碱草,其生长量指标如表 1 所示。其中种植在阴坡的垂穗披碱草其平均株高、分蘖数均大于种植在阳坡的垂穗披碱草,平均株高、平均分蘖数阴坡分别是阳坡的 1.1 倍。此外,种植在阳坡的垂穗披碱草,其平均须根数、平均根径大于阴坡垂穗披碱草的平均须根数、平均根径,其中平均须根数、平均根径是阴坡的 1.1 倍和 1.0 倍。总之,通过以上对比可知:种植在阴坡的垂穗披碱草其株高、分蘖数均大于阳坡,这种现象的产生是与阴坡土壤含水量高于阳坡有直接关系。

表 1 试验区路基边坡生长 5 年垂穗披碱草生长量与野外拉拔试验结果

Table 1 Measured results of growth and field pull-out testing for five-year *Elymus nutans* on the railway roadbed slopes in testing area

植物名称	株高 (cm)	分蘖数 (个)	须根数 (条)	根径 (mm)	根长 (cm)	总表面积 (cm ²)	抗拔力 (N)	样本数量 (株)
垂穗披碱草(阴坡)	33.39	18	65.39	0.44	10.17	99.20	23.52	36
垂穗披碱草(阳坡)	30.78	17	72.88	0.45	11.86	148.42	37.87	36

注:生长量及抗拔力均为平均值

3.2 草本植物野外原位拉拔试验结果

青藏铁路沱沱河段路基边坡生长 5 年的垂穗披碱草,其根系野外现场拉拔试验结果如表 1 所示。由表 1 可知:种植在阳坡的垂穗披碱草平均抗拔力明显大于阴坡的垂穗披碱草的平均抗拔力,且阳坡的垂穗披碱草平均抗拔力是阴坡平均抗拔力的 1.6 倍。

通过分析表 1 中抗拔力与草本生长指标之间的关系,还能够反映出抗拔力与平均须根数、平均根径、平均株高、平均分蘖数之间的变化关系。种植在阴坡和阳坡生长期相同的垂穗披碱草,影响其抗拔力大小的主要因素与土壤含水量、土壤密度大小及其变化有直接关系,同时试验区路基边坡阴坡、阳坡接受光照时间、程度有别,这样形成了试验区阴坡和阳坡路基坡面土壤水分蒸发量存在差异,这种差异是产生试验区路基阴坡、阳坡坡体土壤含水量不同的主要原因。

3.2.1 草本植物抗拔力与须根数量之间关系

种植在试验区路基边坡阴、阳坡的垂穗披碱草抗拔力,与平均须根数量、平均根径呈线性关系。由生长 5 年的垂穗披碱草抗拔力与须根数量之间的拟合方程可知:垂穗披碱草抗拔力与须根数量呈线性关系,且相关指数较高,垂穗披碱草抗拔力与须根数量之间的拟合方程如表 2 所示。

表 2 试验区路基边坡生长 5 年垂穗披碱草抗拔力与须根数量间拟合方程

Table 2 Fitted relationship between the pull-out force and the number of roots for five-year *Elymus nutans* on the railway roadbed slopes in testing area

植物名称	回归方程	根数范围(条)	R ²	n
垂穗披碱草(阴坡)	$F = 0.3381x - 6.9584$	40 ~ 154	0.9399	23
垂穗披碱草(阳坡)	$F = 0.5874x - 8.8857$	38 ~ 132	0.9097	22

注: F—抗拔力/N, x—须根数/条, R²—相关指数, n—样本数量/株

根据试验区路基边坡阴、阳坡两侧生长 5 年的垂穗披碱草抗拔力与须根数量关系,如图 4 所示,种植在

阴、阳两坡垂穗披碱草抗拔力与须根数量之间呈线性关系,表现出抗拔力随根系数量增加而增大,其中阳坡垂穗披碱草抗拔力随须根数量增加幅度比阴坡大,且抗拔力随须根数量增加幅度的变化具有如下规律性:当须根数量为40~60条时,阳坡垂穗披碱草抗拔力随须根数量增幅不很显著,且阳坡垂穗披碱草的抗拔力集中分布在11~25N,阴坡抗拔力分布在8~15N;当须根数量为60~140条时,阳坡垂穗披碱草抗拔力随须根数量增幅较为显著,且阳坡垂穗披碱草的抗拔力分布在30~70N,阴坡抗拔力为20~50N。

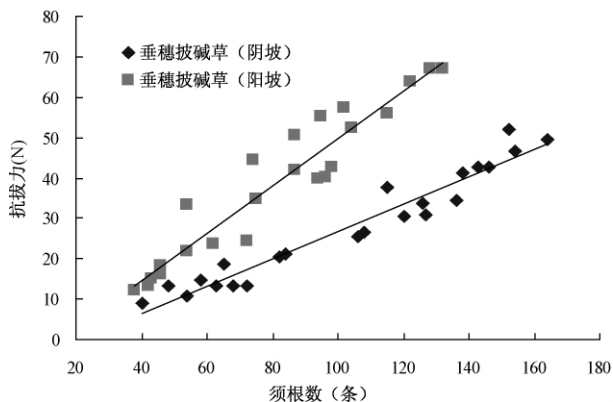


图4 试验区路基边坡垂穗披碱草抗拔力与须根数量关系
Fig.4 Relationship between the pull-out force and the number of roots for *Elymus nutans* in testing area

3.2.2 草本植物抗拔力与根径之间关系

种植在试验区路基边坡阳、阴坡的垂穗披碱草,其各自所具有的根径是存在差异的,且根径变化对植物抗拔力具有一定的影响。种植在阳、阴坡的垂穗披碱草,其抗拔力与平均根径呈线性关系,如图5所示。

3.2.3 草本植物抗拔力与根长之间关系

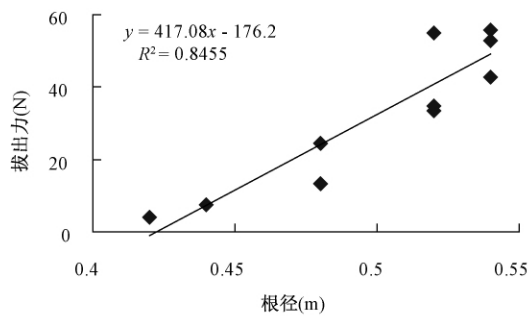
种植在路基边坡阳、阴坡试验区的垂穗披碱草,其各自所具有的根长是不相同的。阳、阴坡试验区的垂穗披碱草,其抗拔力与平均根长呈线性关系。如图6所示。

3.2.4 草本植物抗拔力与株高之间关系

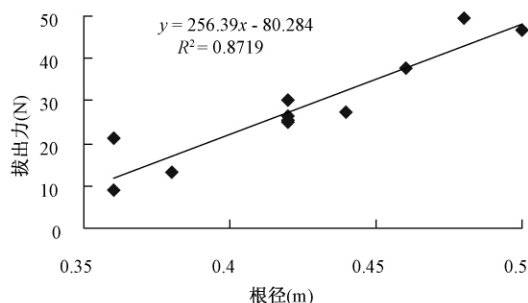
种植在路基边坡阳、阴坡试验区的垂穗披碱草,在相同生长期内各自所具有的株高是不相同的。阳、阴坡试验区的垂穗披碱草,其抗拔力与平均株高呈线性关系,如图7所示。

3.2.5 草本植物抗拔力与总表面积之间关系

种植在路基边坡阳、阴坡试验区的垂穗披碱草,由于其各自的根径存在差异,因此相同属种所具有的总表面积是不相同的。阳、阴坡试验区的垂穗披碱草,其抗拔力与平均总表面积呈线性关系,如图8所示。

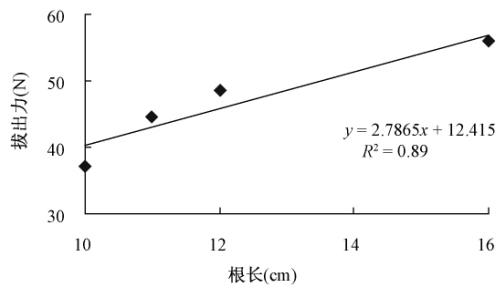


(a) 垂穗披碱草(阳坡)

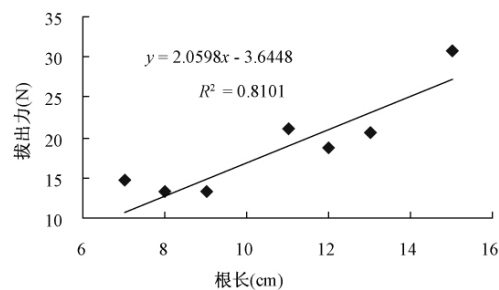


(b) 垂穗披碱草(阴坡)

图5 试验区路基边坡垂穗披碱草拔出力与根径关系
Fig.5 Relationship between pull out force and root diameter of *Elymus nutans* in testing area



(a) 垂穗披碱草(阳坡)



(b) 垂穗披碱草

图6 试验区路基边坡垂穗披碱草拔出力与根长关系
Fig.6 Relationship between pull out force and root length of *Elymus nutans* in testing area

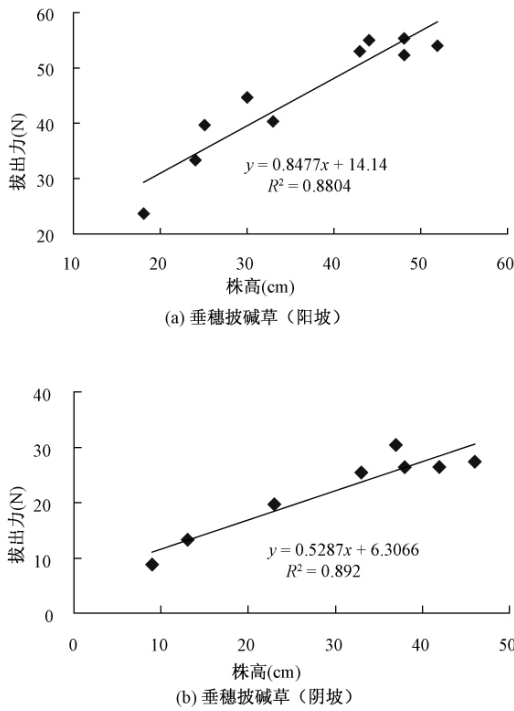


图 7 试验区路基边坡垂穗披碱草拔出力与株高关系
 Fig. 7 Relationship between pull out force and above-ground biomass tall of *Elymus nutans* in testing area

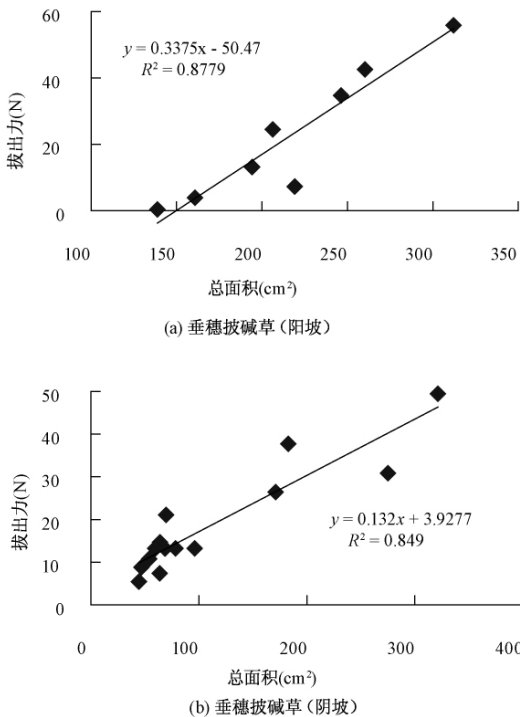


图 8 试验区路基边坡垂穗披碱草拔出力与总表面积关系
 Fig. 8 Relationship between pull out force and total surface area of *Elymus nutans* in testing area

3.2.6 草本植物抗拔力与分蘖数之间关系

种植在路基边坡阳、阴坡试验区的垂穗披碱草,其抗拔力与平均分蘖数呈线性关系,如图 9 所示。

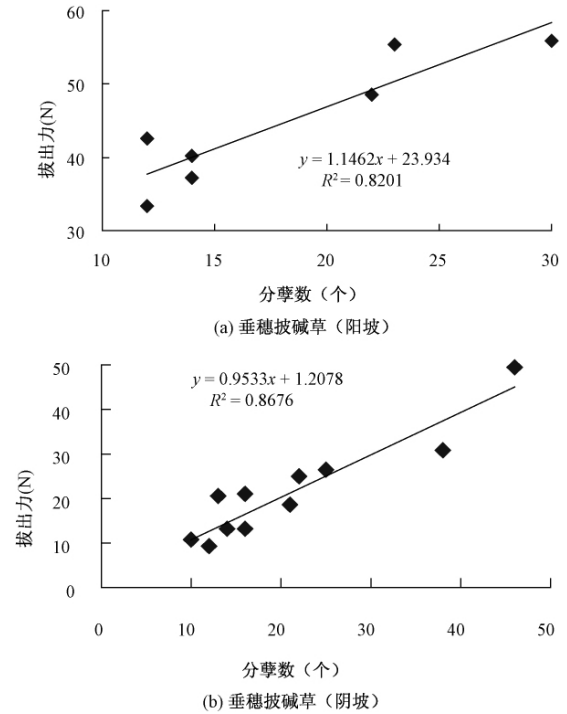


图 9 试验区路基边坡垂穗披碱草拔出力与分蘖数关系

Fig. 9 Relationship between pull out force and the number of tillering for *Elymus nutans* in testing area

3.3 试验区草本植物护坡力学贡献评价

沱沱河段路基边坡生长 5 年的垂穗披碱草,其根系野外现场拉拔试验结果如表 1 所示。种植在试验区路基阴坡和阳坡两侧的垂穗披碱草抗拔力随根系数量的增加而增大,其中阳坡垂穗披碱草抗拔力的增加幅度明显大于阴坡,且阳坡垂穗披碱草抗拔力是阴坡的 1.6 倍。以上特征说明随着试验区种植在路基阴、阳边坡两侧的垂穗披碱草生长期不断增加,其须根数量也相应增加。种植在青藏铁路沱沱河段路基边坡阳坡的垂穗披碱草抗拔力明显大于阴坡,这也一定程度说明了阳坡垂穗披碱草护坡力学贡献相对显著于阴坡。

4 结论

(1) 沱沱河铁路边坡试验区种植在路基边坡阴坡的垂穗披碱草,平均株高、分蘖数均大于阳坡的垂穗披碱草;阳坡的垂穗披碱草,其平均须根数、根径则大于阴坡垂穗披碱草;种植在阳坡的垂穗披碱草平均抗拔力大于阴坡的垂穗披碱草;种植在阳坡的垂穗披碱草

抗拔力与其平均须根数量、平均株高、平均根长、总面积和分蘖数均呈线性关系,这种现象说明了影响垂穗披碱草抗拔力因素,分别与阴坡和阳坡土壤含水量、土壤密度变化有着密切关系。

(2) 沱沱河铁路边坡试验区种植在试验区路基边坡阴、阳两侧的垂穗披碱草抗拔力随根系数量的增加而增大,其中阳坡垂穗披碱草抗拔力随须根数量增加幅度比阴坡大,且当须根数量为40~60条时,阳坡垂穗披碱草抗拔力随须根数量增幅不很显著;当须根数量为60~140条时,阳坡垂穗披碱草抗拔力随须根数量增幅较为显著。种植在试验区阳坡的垂穗披碱草抗拔力增加幅度明显大于阴坡,随着垂穗披碱草生长期的不断增加,其须根数量、根径也不断增加,种植在阳坡的垂穗披碱草抗拔力显著大于阴坡。

(3) 种植在试验区阳坡的垂穗披碱草抗拔力增加幅度大于阴坡,随着垂穗披碱草生长期的不断增加,其须根数量、根径也不断增加,种植在阳坡的垂穗披碱草抗拔力大于阴坡,这说明了阳坡垂穗披碱草护坡力学贡献相对显著于阴坡。

参考文献:

- [1] 魏静,许兆义,包黎明,等. 青藏铁路多年冻土区土工格室护坡试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3168-3173. [WEI J, XU Z Y, BAO L M, et al. Experimental study on embankment slope protection with geocell in permafrost regions of Qinghai-Tibet railway [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2006, 25(S1): 3168-3173. (in Chinese)]
- [2] 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 G C, ZHOU G Y, SONG Q, 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)]
- [3] 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. [HEN G C, ZHOU G Y, SONG Q, et al. Progress of study on slope protection by vegetation and its expectation [J]. Soil and Water Conservation in China, 2007, 28(4): 26-29. (in Chinese)]
- [4] Operstein V, Frydman S. The influence of vegetation on soil strength[J]. Ground Improvement, 2000(4): 81-89.
- [5] Normaniza Osman, Barakbah S S. Parameters to predict slope stability-soil water and root profiles [J]. Ecological engineering, 2006, 28: 90-95.
- [6] Fan Chia-Cheng, Su Chih-Feng. Role of Roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content [J]. Ecological engineering, 2008, 33: 157-166.
- [7] Marie Genet, Alexia Stokes, Franck Salin, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots [J]. Plant and Soil, 2005, 278: 1-9.
- [8] 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 K J, LEE, C F. Brief mechanical analysis of bioengineering techniques for slope protection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 687-691. (in Chinese)]
- [9] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 坡面岩体-基质-根系互作的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2074-2081. [LI S C, SUN H L, YANG Z R, et al. Interactional mechanical characteristics of rock-substrate-root system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2074-2081. (in Chinese)]
- [10] 周跃,骆华松,徐强,等. 乔木的斜向支撑效能及其坡面稳定意义[J]. 山地学报, 2000, 18(4): 306-312. [ZHOU Y, LUO H S, XU Q, et al. Lateral supporting of trees and its slope stability significance [J]. Journal of mountain science, 2000, 18(4): 306-312. (in Chinese)]
- [11] 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, 27(S2): 3445-3452. [ZHU H L, HU X S, MAO X Q, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Qinghai-Tibet plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3445-3452. (in Chinese)]
- [12] 杨璞,向志海,胡夏嵩,等. 根对土壤的加强作用研究[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2009, 49(1): 94-97. [YANG P, XIANG Z H, HU X S, et al. A study of the mechanical effects of shrub roots for slope protection in frigid and arid-semiarid loess area [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(1): 94-97. (in Chinese)]
- [13] 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 Y B, SHI B, YANG W D, et al. The Method of Vegetation for Slope Protection in Slope Treatment [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,

- 2002, 29(1): 64–67. (in Chinese)]
- [14] Nilaweera N S, Nutalaya P. Role of tree roots in slope stabilization [J]. Bull Eng Geol Env, 1999, 57: 337–342.
- [15] Baets De 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 Soil, 2008, 315(1): 207–226.
- [16] Bruce Abernethy, Rutherford Ian D. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement [J]. Hydrological processes, 2001, 15(1): 63–79.
- [17] 魏静, 许兆义, 包黎明, 等. 青藏铁路片石护坡路堤温度特性分析, 工程地质学报, 2005, 13(4): 494–501. [WEI J, XU Z Y, BAO L M, et al. Characterization of temperature of embankment with riprap slope protection along Qinghai-Tibet railway [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(4): 494–501. (in Chinese)]
- [18] 李国荣, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 寒旱环境黄土区灌木根系护坡力学效应研究 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(1): 94–97. [LI G R, HU X S, MAO X Q, et al. A study of the mechanical effects of shrub roots for slope protection in frigid and arid-semiarid loess area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(1): 94–97. (in Chinese)]

A study of the mechanic strength of vegetation roots for roadbed slope protection in the Tuotuohe river region along the Qinghai-Tibet railway

HU Xia-song^{1,2}, CHEN Gui-chen³, ZHOU Guo-ying³, XU Wen-hua³, LI Guo-rong¹, QIAO Na¹, YU Qin-qin¹

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Qinghai Institute of salt lake, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;

3. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810000, China)

Abstract: The Tuotuohe river region roadbed slopes lying along the Qinghai-Tibet railway were taken as the testing area, and *Elymus nutans* was planted at both sides of the slopes. The pull-out resistance was obtained by the in situ pull-out test in the testing area where five-year growth period *Elymus nutans* was planted at both the shading and the solar roadbed slopes, and the pull-out resistance value was obtained. The pull-out resistance value for solar roadbed slope is 30.88 N and 23.52 N for shading roadbed slopes, which shows that the soil moisture is the key factor affecting the roots' pull-out resistance. The longer shining time, the stronger intensity, and the larger evaporating amount of the solar slope contribute greatly to the different soil moisture in the solar and shading slopes. There exists a linear relationship between the pull-out resistance and the fibrous roots quantity, the roots diameter, the roots length, the above-ground biomass tall, the number of tillering and the roots surface area. The higher increasing amplitude exists between the pull-resistance and the fibrous roots quantity in the solar roadbed slope, which is obviously larger than that in the shading roadbed slope. When the number of fibrous roots ranges from 40 to 60, the roots pull-out resistance value of solar roadbed slope is between 11 N and 25 N, the roots pull-out resistance value of the shading roadbed slope ranges from 8 N to 15 N; when the number of fibrous roots ranges from 60 to 140, the roots pull-out resistance value of solar roadbed slope is between 30 N and 70 N, and the roots pull-out resistance value of shading roadbed slope is between 20 N and 50 N. According to the roots mechanical strength of *Elymus nutans*, the mechanical contribution for slopes stability of *Elymus nutans* planted at the solar roadbed slope is relatively greater than that in the shading roadbed slope. The achievements can provide a theoretical guide for the research region and areas with the same ecological and geological environments for sowing herb species seeds for slope protection with vegetation.

Key words: the Qinghai-Tibet railway; the Tuotuohe river; roadbed slopes; slope protection with vegetation; roots mechanic strength

责任编辑: 张若琳