

季冻区公路边坡植物根系对冻融作用的影响

李云鹏¹, 李劲松², 张利东², 王新军¹

(1. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 2. 吉林省高等级公路建设管理局, 吉林 长春 130022)

摘要: [目的] 探究季冻区公路边坡植物根系对冻融作用影响, 为季冻区边坡防护工程的植物选择提供科学参考。[方法] 通过调查季冻区高速公路边坡土壤及植被特征, 采用对比分析的方法研究不同植物根系对冻融循环作用的影响。[结果] 3种试验植物根系抵抗冻融破坏的强弱关系依次表现为: 刺槐>胡枝子>紫穗槐。植物根系通过调节土壤物理性质以及发挥根系结构作用影响冻融循环过程, 根系的存在调节了土壤含水率从而降低了土体发生融沉或裂缝的概率。[结论] 在季冻区公路边坡冻融破坏防治中, 垂直根系生长较深, 根系分布范围更广的植物能够提供更好的抵抗冻融破坏的能力。

关键词: 公路边坡; 冻融破坏; 根系结构; 根系力学特性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)02-0134-06

中图分类号: S714

文献参数: 李云鹏, 李劲松, 张利东, 等. 季冻区公路边坡植物根系对冻融作用的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 134-139. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.019; Li Yunpeng, Li Jinsong, Zhang Lidong, et al. Effects of plant roots on freeze-thaw damage in seasonal-frozen highway slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 134-139.

Effects of Plant Roots on Freeze-thaw Damage in Seasonal-frozen Highway Slope

Li Yunpeng¹, Li Jinsong², Zhang Lidong², Wang Xinjun¹

(1. China Academy of Transportation Science, Beijing 100029, China;

2. Jilin Provincial High Class Highway Construction Bureau, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: [Objective] The effects of plant root system on freeze-thaw damage in seasonal-frozen highway slope were explored, in order to provide basis for plant selection of slope protection project. [Methods] The characteristics of soil and plant roots on highway slope in seasonal freezing area were investigated, effects of plant on freeze-thaw cycle were discussed by comparative analysis. [Results] The resistances of three plants to freeze-thaw damage were showed as follows: *Robinia pseudoacacia* > *Lespedeza bicolor* > *Amorpha fruticosa*. Plant roots affected the process of freeze-thaw destruction by regulating soil physical properties and constituting soil-root structure. The existence of roots regulated soil moisture content and thus reduced the probability of soil settlement or crack. [Conclusion] Plants with deeper vertical root and wider root distribution were recommended to prevent freeze-thaw damage on highway slope in seasonal frozen area.

Keywords: highway slope; freeze-thaw damage; root structure; root mechanical properties

季节性冻土区(季冻区)广泛的分布于我国的西北和东北地区。对于季冻区公路边坡的防护,在植物种类选择中除了要考虑耐寒,耐旱以及耐贫瘠等特性外,还需考虑由于气候或其他变化对坡体稳定性的影响。冻融循环作用是一种典型的发生在季冻区的破坏形式,当公路边坡土体发生冻融循环时,很可能形成土体的剥落、开裂甚至小型滑坡等^[1-2]。因此对于季冻区公路边坡的防护,如何科学而有效的防止冻融

破坏的发生是学者们关注的重点问题。植被被认为是能有效提高坡体稳定的手段,植被的存在增加了地表糙率,进而减少了坡面土壤侵蚀^[3]。此外,植被的生长改善了土壤条件,有利于水分在土壤内部的传导,有效的保证了坡体稳定^[4]。植物根系在土壤中交互连结,形成网状结构增加了土体抵抗剪切破坏的能力。

在公路建设过程中,大量的植物被应用于边坡生

收稿日期: 2019-09-29

修回日期: 2019-12-12

资助项目: 交通运输部重点科技项目(2018-MS2-054)/中央级公益性科研院所基本科研业务费项目“公路边坡植被防护评价与改进研究”(20160630Y); 吉林省交通运输科技项目“季冻区高速公路典型边坡破坏特征及生态防护优化技术研究”(2017-1-6)

第一作者: 李云鹏(1989—),男(汉族),河北省承德市人,博士,助理研究员,主要从事水土保持方面研究。Email: 303156042@qq.com。

态防护,尤其是一些抗寒、抗旱能力强,景观效果好的植物被广泛的应用。然而随着时间的推移,很多种植了植物的季冻区边坡发生了小型崩塌或滑落,如何合理选择植物种类从而有效的防护以冻融破坏为主要诱因的坡体失稳现象是现阶段研究的重点。王明明等^[5]人研究了不同植被盖度的草地对土壤水分的影响,结果表明植被盖度对土壤水分的影响存在一个阈值,超过或是低于这个阈值时土壤水分会随着植被高度的变化而降低。王小云^[6]研究了 5 种植物对土壤水分的影响,在同一自然条件下种植了不同植物种类后,土壤含水量的大小关系为:紫花苜蓿>侧柏>欧李>柠条>油松。植物根系能够有效的稳固土体,在发生剪切破坏时,由于具备很好的抗拉和抗剪性能,能够为土体提供良好的抵抗破坏的作用^[7]。然而,植物根系对季节性冻土区公路边坡冻融循环影响的相关研究较少。基于此,本文通过调查季冻区高速公路边坡常见植物根系的结构和力学特性,通过分析不同植物根系结构特征,结合土壤物理性质变化,探究根系影响冻融循环作用的主要因素,为季冻区边坡防护工程的植物选择提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鹤岗至大连高速(G11,以下简称鹤大高速)大蒲

柴河至抚松段,途径沿江乡、露水河、万良镇、抚松县等地。项开工时间为 2014 年 4 月,2016 年 10 月建成通车。公路沿线属于典型的微丘及低山丘陵区,平均海拔在 400~830 m 之间。该区属于中温带大陆性季风气候,春季干燥多风,夏季炎热多雨,7—8 月为雨季,年平均气温 2.8℃,年平均降雨量 760~830 mm,最大冻土深度 1.26 m。研究区域内植被类型为天然次生林及人工林,主要植被种类有长白落叶松、红松、大青杨、毛榛、五加、刺五加、卫矛、山茄子、子棉马、木贼蕨、掌叶铁蕨、阴地苔等,土壤以为暗棕色森林土、棕色针叶林土、山地生草森林土为主,少部分为沼泽土和草甸土,试验边坡土壤为黄壤。

1.2 试验边坡特征

通过实地调查研究区域公路边坡主要护坡植物种类以及分布,结合已经发生冻融破坏的边坡调查,选取了鹤大高速抚松段内 5 处具有代表性的边坡作为调查对象,5 处试验边坡的位置和基本特征详见表 1。其中仅有边坡 I 无冻融破坏情况发生,其他 3 处边坡皆发生了不同程度的冻融破坏情况,坡面 II 为对照组。6 种常见植物为 3 种灌(乔)木和 3 种草本,分别为胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)和紫羊茅(*Festuca rubra*)。

表 1 调查边坡基本特征

编号	桩号	土壤质地	坡度/ (°)	坡向	坡长/ m	工程措施类型	主要植物种类	有无冻融破坏
坡面 I	K773+600	黄壤	30	朝南	6	草灌	刺槐,狗牙根	无
坡面 II	K770+350	黄壤	30	朝南	6	—	—	无
坡面 III	K784+200	黄壤	45	朝南	8	草灌	胡枝子,狗牙根	有
坡面 IV	K756+350	黄壤	45	朝北	8	草灌	紫穗槐,紫羊茅	有
坡面 V	K792+100	砂壤	45	朝北	8	草灌	胡枝子,披碱草	有

1.3 根系结构特征测量

根系结构特征主要包括最大根系直径、根系最大水平延伸长度、根系最大垂直延伸长度,根系数量和根系分枝角度(图 1)。其中最大根系直径一般指靠近地茎处的根系直径,根系最大水平延伸长度、根系最大垂直延伸长度指水平及垂直所能生长多的最大长度。根系数量的测量采用截面计数法,对存在于土壤深度 0.1 以及 0.3 m 截面处的根系进行计数,而根系分枝角度则指整株植物根系在土壤中的空间分布角度,通常取最大水平延伸根系所在平面为测量标准。野外取样过程中,采用人工挖掘的方式,以单株

植物主茎为原点,挖掘半径为 0.4 m,挖掘深度为 0.5 m,当水平或垂直根系超过挖掘规格时,继续沿根系挖掘直到挖出完整根系为止,现场测量根系结构特征后采集根系装于塑封袋中用于后续试验。对于每种植物结构特征的测量样本数应不小于 3 株,统计值采用平均值代替。

1.4 根系力学特性测定

对于根系力学特性的测量主要包括根系抗拉强度测量以及根系拔出强度测量。对于每种植物结构特征的测量样本数不能满足根系力学特性的测定要求,实际试验中同时也采集了其他植物样本测定力学特性。

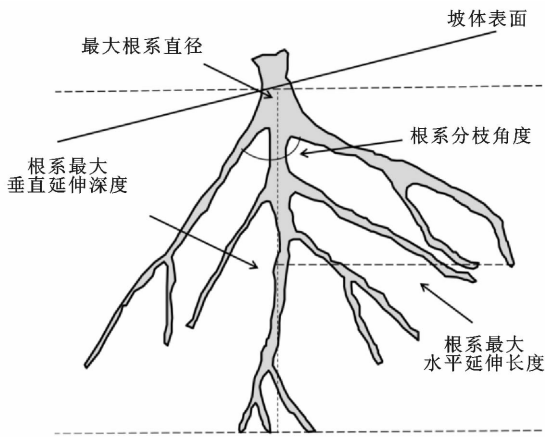


图1 根系结构测量示意图

1.4.1 根系抗拉强度 在测量完植物结构特征后,选择长度超过0.06 m,直径范围在0~8 mm的根系进行抗拉试验,试验所采用的仪器为S9 M型万能机械试验机(Shanghai, China)。试验前检查根系的完整情况,将破损根系从样本中排除。试验开始前在根系两端捆绑胶布以增加摩擦力,拉伸的速度为0.02 m/min。待根系破裂后,用游标卡尺测量断裂处直径以及记录此时的抗拉强度值。对于每种植物测量试验的次数在30左右。根据前人的研究^[8-9]结果,根系的极限抗拉强度和根系直径的关系为:

$$T_R = aD^{-b} \quad (1)$$

式中: T_R 为根系抗拉强度(MPa); D 为根系直径(mm); a, b 为常数。

1.4.2 根系拔出强度 对于根系拔出强度的测量,采用野外试验的方法对根系进行拔出试验^[10]。试验采用手持拉力计进行测量,在测量开始时,人工将野外生长的植物地上部分去除,剪短枝根使得枝根露出土壤表面长度大于0.03 m。测量前用自封布缠绕露出的根系以增加摩擦力。根系的拔出方向为与根系生长的方向平行且相反,待根系被拔出或是拔断后,记录出现的最大拉力、裸露枝根部分的直径以及断裂处的根系直径。对于每种植物测量试验的次数在5左右。由于草本植物根系生长密集,采用原位拔出时

相邻根系影响较大,故本研究仅对灌(乔)木根系进行拔出试验。

1.5 土壤含水率测定

由于野外无条件采用烘干法测量土壤含水率,为了得到更准确的土壤含水率数据,本研究采用酒精燃烧法测定土壤含水率。试验前分别取代表性土样10 g放入蒸发皿中,并用滴管将浓度为95%的酒精注入蒸发皿中,直至出现自由液面为止。随后点燃酒精燃至火焰熄灭,待冷却后重复以上步骤重新燃烧2次。最后将第3次火焰熄灭后的土样进行称重,则含水率可用公式(2)计算,试验中共采集土样20个,每个采样点设置5个重复,则每个采样点的土壤含水率采用算数平均值计算。

$$w = (m_2 - m_1) / m_2 \times 100\% \quad (2)$$

式中: w 为土壤含水率(%); m_2 为土样质量(g); m_1 为灼烧后的土样质量(g)。

2 结果与分析

2.1 植物根系结构

表2为6种调查植物种的根系结构特征。由表2可知,在3种灌(乔)木根系中,仅刺槐和紫穗槐土壤深度0.3 m以下存在根系,紫穗槐的根系直径为4.75 mm,是3种灌木中最大根系直径最小的,但其在土壤深度为0.3 m截面内根系数量最大,平均值为12.67,说明紫穗槐根系分枝数量最多。根系最大垂直深度平均值最大的为刺槐,但其在土壤深度为0.1 m和0.3 m截面内的根系数量最少,但其根系分枝角度平均值最大(149°),这说明刺槐的倾斜根系多朝水平方向生长,在土壤中的分布范围最大。3种草本植物根系多分布在土壤深度为0.2 m附近。3种草本植物的根系分枝角度差异不大,紫羊茅的根系最大垂直和水平深度均小于另外2种草本植物,但是其在土壤深度0.1 m截面内的根系数量最多,平均值达到了15.67。狗牙根的根系在土壤中的分布范围最广,但是其根系数量较少,根系分枝角度的平均值为116.7,说明其在土壤中的分布范围最大。

表2 不同植物根系结构特征

根系结构特征	胡枝子	刺槐	紫穗槐	紫羊茅	狗牙根	披碱草
最大根系直径/mm	5.86 ^{ab}	5.98 ^b	4.75 ^a	2.22 ^A	2.15 ^A	2.05 ^{AB}
根系最大垂直深度/cm	25.30 ^c	52.77 ^a	37.57 ^{bc}	17.40 ^A	26.30 ^C	21.70 ^{AB}
根系最大水平深度/cm	43.43 ^b	17.90 ^a	24.23 ^{ab}	9.20 ^A	20.83 ^C	16.53 ^{AB}
0.1 m 根系数量	9.67 ^a	4.67 ^b	9.33 ^{ab}	15.67 ^B	7.00 ^A	9.00 ^A
0.3 m 根系数量	4.67 ^a	5.00 ^{ab}	12.67 ^c	—	—	—
根系分枝角度/(°)	132.67 ^b	149.00 ^{bc}	124.00 ^a	115.33 ^A	116.67 ^{AB}	122.33 ^B

注:不同大小写字母表示不同特征指标在5%水平上的差异。下同。

2.2 根系抗拉强度

表 3 为 6 种植物的根系抗拉强度曲线,6 种植物根系的直径和抗拉强度均存在较好的函数关系,灌(乔)木根系的 a 值均大于草本植物根系,但其 b 值均小于草本植物。 a 值越大,则表明相同根系直径条件下,其抗拉强度越强; b 值越大,则表明根系直径的变化对根系抗拉强度的影响越强。因此,在相同根系直径条件下,3 种灌(乔)木根系的抗拉强弱大小关系为:紫穗槐>刺槐>胡枝子,3 种草本植物根系的抗拉强弱大小关系为:紫羊茅>披碱草>狗牙根。随着根系直径的变化,草本植物根系的抗拉强度提升明显,3 种草本植物根系直径变化对根系抗拉强度的影响的强弱关系为:紫羊茅>披碱草>狗牙根。草本植物根系的抗拉强度的变化会明显强于灌木根系植物,3 种灌(乔)木植物根系直径变化对根系抗拉强度的影响强弱关系为:紫穗槐>胡枝子>刺槐。

表 3 不同植物抗拉强度曲线

植物种	抗拉强度曲线	R^2
胡枝子	$y=41.27x^{-0.54}$	0.64
刺槐	$y=43.24x^{-0.35}$	0.67
紫穗槐	$y=134.12x^{-0.89}$	0.72
紫羊茅	$y=14.37x^{-1.67}$	0.83
狗牙根	$y=12.02x^{-1.11}$	0.51
披碱草	$y=12.83x^{-1.12}$	0.70

2.3 根系拔出强度

图 2—4 为 3 种灌(乔)木植物根系的拔出力与根系直径和根系长度的关系。随着根系直径和根系长度的增加,拔出力也表现出增加的趋势,但增加的幅度在 3 种灌(乔)木植物根系间存在差别。对于同一种植物,根系直径和根系长度对拔出力的影响也不尽相同,胡枝子存在最大的拔出力,其值达到了 128 N,最小值出现在刺槐中,其值为 12 N。仅考虑根系直径对与拔出力的关系,刺槐根系直径变化对拔出力的影响最大,其次为紫穗槐,根系直径对拔出力影响最小的为胡枝子。而当仅考虑根系长度对与拔出力的关系,胡枝子根系长度变化对拔出力的影响最大,其次是刺槐和紫穗槐。由于刺槐和紫穗槐的根系长度和根系直径接近,因此可以看出在相似根系长度或根系直径条件下,紫穗槐表现出更好的抵抗拔出的强度;而胡枝子和刺槐根系直接接近,具有更长的根系长度的植物具备更强的抵抗拔出的强度。

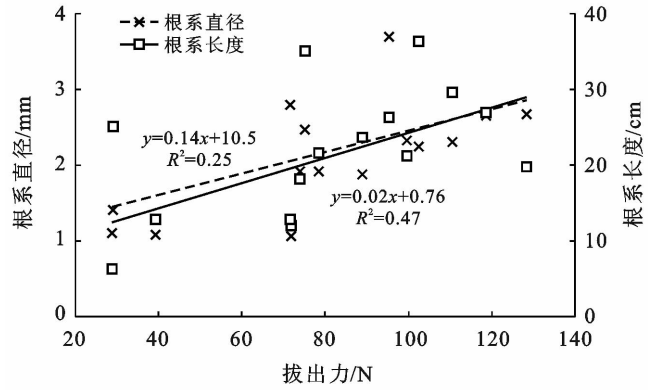


图 2 胡枝子根系的拔出力与根系直径和根系长度间关系

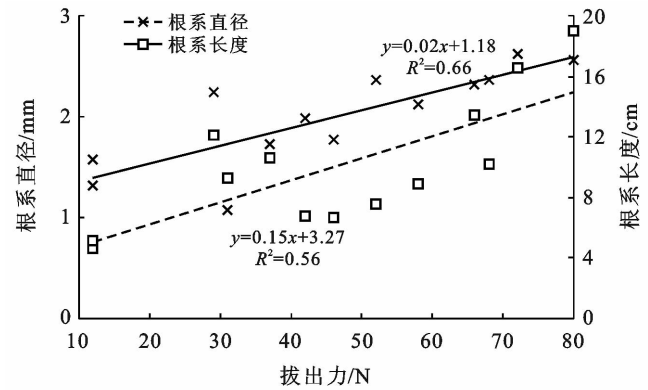


图 3 刺槐根系的拔出力与根系直径和根系长度间关系

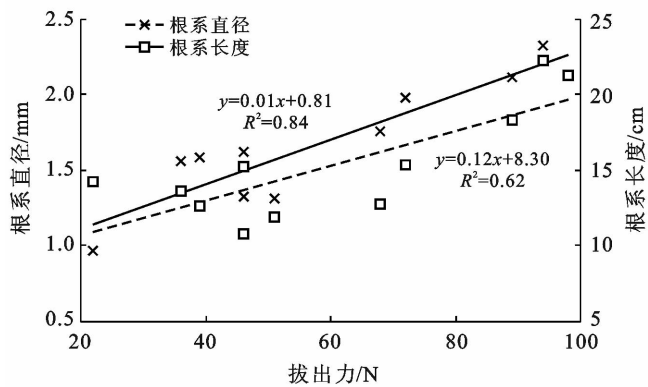


图 4 紫穗槐根系的拔出力与根系直径和根系长度间关系

2.4 不同坡面土壤物理性质

通过对比不同坡面条件下土壤的物理性质可知(表 4),在不同土壤深度内,土壤容重、土壤含水率以及土壤临界剪切应力都存在较大差异。土壤容重的最大值出现在坡面 I 的 0.2—0.4 m 土壤深度内,为 1.37 g/cm³,最小值出现在坡面 V 的 0—0.2 m 土壤深度内,为 0.96 g/cm³。在不同边坡条件下,土壤容重都随着土壤深度的增加而增加,而除坡面 V 以外,其他边坡土壤含水率都随着土壤深度的增加而减小,但减小的程度存在较大差异。坡面 I 的土壤含水率在不同

土壤深度内差异较小,其次是坡面Ⅱ,坡面Ⅲ和坡面Ⅳ的土壤含水率随土壤深度的增加而减小的趋势最大。土壤临界剪切应力最大值出现在坡面Ⅰ的

0.2—0.4 m 土壤深度(78.2 kPa)。其次是坡面Ⅲ(66.8 kPa),最小值出现在坡面Ⅴ的 0—0.2 m 土壤深度内(37.4 kPa)。

表 4 不同坡面各土层土壤物理性质

项目	土壤容重/(g·cm ⁻³)		土壤含水率/%		土壤临界剪切应力/kPa	
	0—0.2 m	0.2—0.4 m	0—0.2 m	0.2—0.4 m	0—0.2 m	0.2—0.4 m
坡面Ⅰ	1.28 ^a	1.37 ^A	20.46 ^a	18.24 ^A	47.1 ^a	78.2 ^A
坡面Ⅱ	1.15 ^b	1.29 ^B	18.99 ^b	17.67 ^B	40.6 ^b	66.5 ^B
坡面Ⅲ	1.10 ^c	1.21 ^{BC}	19.08 ^c	15.77 ^C	46.6 ^{bc}	66.8 ^B
坡面Ⅳ	1.08 ^c	1.16 ^C	17.49 ^d	13.14 ^D	42.5 ^c	61.2 ^C
坡面Ⅴ	0.96 ^d	1.04 ^D	18.70 ^e	24.30 ^E	37.4 ^d	56.3 ^D

3 讨论

3.1 不同植物根系的固土护坡作用

3 种灌(乔)木根系在根系的分布方面呈现出不同的特点,主要差异表现在水平和垂直生长深度这两个指标上。胡枝子的水平生长深度远远大于其垂直生长深度,而刺槐则与胡枝子相反,紫穗槐则表现出较为均衡的分布情况。在 Li 等^[3]人的研究中将不同根系的分布按照其分布特征分成了多种根系结构类型,通常生长较深的垂直根系对于土体起到良好的锚固作用,而水平以及倾斜根系发达的植物,则提供给土体较好的加筋作用。因此对于胡枝子来说,其更够给土体提供较好的锚固力,但水平根系较不发达,而刺槐和紫穗槐则能够提供较好的加筋力。本研究所选草本皆为单株生长形式,3 种草本植物根系空间分布差异较小,且都存在于 0—0.2 m 土壤深度内,对于表层土壤起到良好的稳固作用,杨帆等^[11]人的研究认为,草本植物的存在,会很好的抵抗径流冲刷和土壤侵蚀,但草本植物根系对于坡面稳定的作用较小,抵抗水土流失的强弱主要取决于地表覆盖度。对比 6 种植物根系的力学特性差异可知,草本植物根系的抗拉强度对于根系直径变化的影响更明显。因此在植物生长过程中,草本植物根系的抗拉强度要优于灌(乔)木植物根系,这与雷相科等^[12]人的研究一致。但是在土体发生崩坏的过程中,植物根系除了受到法向的剪切力以及径向的拉拔外,根系与土壤接触的部分还会产生摩擦阻力,当这种摩擦阻力大于根系的抗拉强度时,根系的抗拉强度起到主要的抵抗土体崩坏的作用,反之则摩擦阻力起到主要的抵抗土体崩坏的作用^[13],因此摩擦阻力也是决定根系对土体稳固作用的主要因素。在测量的根系中,胡枝子的水平根系长度普遍要大于刺槐和紫穗槐,因此胡枝子根系能够提供的抵抗土体崩坏的作用要明显优于其他

2 种植物。对于草本,王恒星等^[14]人通过直剪试验证明草本植物能够提供很好的抵抗土体剪切破坏的作用,但是在实际的土体破坏过程中,剪切面与草本植物根系接触位置不固定,草本植物根系与土壤间的摩擦阻力多在滑动体内部,并未参与抵抗滑动破坏的过程。因此,对于季冻区边坡植被防护,灌(乔)木植物比草本植物具有更好的护坡作用,胡枝子根系的固土效果最好,建议优先选择。

3.2 植物根系抵抗冻融破坏作用

通过对 5 个不同坡面的土壤以及植被根系的研究表明,植物根系通过影响土壤物理性质和土壤结构进而影响坡体抵冻融破坏的过程。根系在土壤中生长能够有效的调节土壤水分,在发生冻融破坏过程中,土壤含水率的变化直接影响土体抵抗冻融破坏的强度^[15]。植被根系生长在一定程度上改善了土壤的水分条件,除坡面Ⅰ和Ⅴ外,其他有植被覆盖的坡面土壤含水率随土壤深度增加而降低,含水量的减少使得土体发生融沉或裂缝的概率减小,从而在一定程度上防止了冻融破坏的发生。同样的,根温在一定程度上也调节了土壤的温度,从而影响土壤冰冻稳定的时间以及冻土的形变量变化^[16]。根系对土壤物理性质的影响还体现在对土壤临界剪切应力的影响,由表 4 可知,有植被存在条件下的土壤临界剪切应力普遍高于没有植被覆盖的条件,尤其是在浅层土壤中这种关系更为明显,坡面Ⅰ具有最大的土壤临界剪切应力且没有发生冻融破坏现象,这都说明根系的存在一定程度上提高了土壤抗剪切破坏的能力。影响土壤临界剪切应力的因素有很多,土壤含水率的变化是一个主要因素^[17],但本文中土壤含水率的变化并未导致土壤临界剪切应力发生较大变化,因此植物根系对土壤临界剪切应力的影响还需进一步研究。

植物根系影响土壤结构从而抵抗冻融破坏的发生,在所选的 3 种灌(乔)木中,刺槐存在最长的垂直

根系,其生长深度超过研究区域内发生冻融破坏剥落的土层厚度(通常为0.2—0.3 m)^[18],在发生土体崩塌时,这些垂直根系提供了很好的锚固作用。而对于坡面Ⅲ来说,尽管胡枝子存在最长的水平根系,但在发生冻融破坏时,垂直根系无法深入到表层剥落的土体滑动面上,从而对冻融破坏的影响较小。紫穗槐具备最优的根系抗拉强度和最多的根系数量,在冻融破坏剥落过程中,受到拔出力的根系越多,其抵抗冻融破坏的作用越好,但季冻区边坡冻融破坏多呈现块状剥落^[19],因此这种根系结构抵抗冻融破坏的能力有限。草本植物由于其生长深度较浅,当发生冻融破坏剥落时,其仅在剥落块体上存在,滑动面上无草本植物根系存在,因此其对冻融破坏的影响主要体现在调节土壤含水率在垂直深度内的变化。

4 结论

本文通过调查季冻区高速公路边坡土壤及植被特征,采用对比分析的方法研究了植被根系对边坡冻融破坏的影响,结果表明植物根系的主要作用体现在对土壤含水率的调节以及自身结构特性的影响两方面。根系的存在使得表层土壤含水率降低,从而影响冻融破坏过程。同时,垂直根系生长较深,根系分布范围更广的植物能够更好的抵抗冻融循环破坏所产生的裂缝。

[参 考 文 献]

- [1] 王宁,毛云程,张得文,等. 冻融循环对季节冻土区黄土路堑边坡的影响[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011,7(4):79-84.
- [2] 许健,郑翔,张辉. 黄土地区边坡冻融剥落病害机理及稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018,50(4):477-484.
- [3] Li Yunpeng, Wang Yunqi, Ma Chao, et al. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability [J]. Ecological Engineering, 2016,91(6):477-486.
- [4] 陈寿明. 公路边坡化学固土喷植防冻融侵蚀技术的应用研究[J]. 福建交通科技, 2017,10(2):10-12.
- [5] 王明明,刘新平,李玉霖,等. 不同植被盖度沙质草地生长季土壤水分动态[J]. 中国沙漠, 2019,39(5):1-8.
- [6] 王小云. 不同水土保持植物种类对土壤物理性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2018,46(26):113-115.
- [7] Schwarz M, Rist A, Cohen D, et al. Root reinforcement of soils under compression [J]. Journal of Geophysical Research (Earth Surface), 2015,120(10):2103-2120.
- [8] Cazzuffi D, Crippa E. Contribution of vegetation to slope stability: An overview of experimental studies carried out on different types of plants [J]. Geotechnical Special Publication, 2005,130(6):130-142.
- [9] Hubble T C T, Docker B B, Rutherford I D. The role of riparian trees in maintaining riverbank stability: A review of Australian experience and practice [J]. Ecological Engineering, 2010,36(3):292-304.
- [10] Li Yunpeng, Wang Yunqi, Wang Yujie, et al. Effects of Vitex negundo root properties on soil resistance caused by pull-out forces at different positions around the stem [J]. Catena, 2017,158(6):148-160.
- [11] 杨帆,程金花,张洪江,等. 坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J]. 农业机械学报, 2016,47(5):129-137.
- [12] 雷相科,张雪彪,杨启红,等. 植物根系抗拉力学性能研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2016,33(4):703-711.
- [13] Schwarz M, Giadrossich F, Cohen D. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013,17(11):4367-4377.
- [14] 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.
- [15] 马巍,王大雁. 冻土力学[M]. 北京,科学出版社,2014.
- [16] 辛旋. 耐冬根系—土壤热湿耦合迁移规律及其对植物抗寒性影响的研究[D]. 山东 青岛:青岛科技大学, 2016.
- [17] 王楠,赵友朋,郭晓平,等. 土壤含水率和干容重对不同植被类型边坡土壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2018,38(6):94-100.
- [18] 葛琪,李京子,武鹤,等. 基于有限差分法的季冻区公路土质路堑边坡稳定性分析[J]. 黑龙江工程学院学报, 2017,31(1):12-18.
- [19] 王超. 季冻区哈大高铁边坡冻融滑塌机理研究[D]. 黑龙江 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.