

岩石边坡坡度对紫花苜蓿根系生长特征及拉拔力的影响

李义强¹, 伍红燕², 赵斌¹, 李一为¹, 夏宇¹, 孙盛年¹,
梁燕宁¹, 王玉¹

(1. 北京市首发天人生态景观有限公司, 北京 102600; 2. 北京林业大学 草坪研究所, 北京 100083)

摘要:为掌握岩石边坡植被恢复过程中, 坡度对植物根系生长特征及其国土护坡效果的影响, 以京承三期高速公路边坡植被恢复工程为依托, 采用根系挖掘法对 40°、50°和 60°岩石边坡生长 3 年的紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 根系生长特征进行研究, 并采用液压式拉力计测定根系拉拔力。结果表明: 随着坡度增大, 紫花苜蓿主根直径逐渐增大, I 级和 II 级侧根直径逐渐减小; 主根长度比例逐渐减小, 侧根长度比例逐渐增大, 同时细根 ($0\text{ mm} < d \leq 2\text{ mm}$) 的长度比例逐渐增大, 中根 ($2\text{ mm} < d \leq 5\text{ mm}$) 的长度比例逐渐减小; 主根生长方向未随坡度改变而改变; 侧根生物量远小于主根生物量, 40°边坡条件下主根生物量显著小于 50°和 60°边坡 ($P < 0.05$)。随着坡度增大, 根系拉拔力呈逐渐增大趋势。

关键词: 岩石边坡; 坡度; 根系特征; 拉拔力; 紫花苜蓿

中图分类号: S541 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2020)03-0009-06

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2020.03.002

边坡植被恢复技术在我国已经有 20 多年的发展, 在公路、矿山、铁路和河湖边坡的生态治理中发挥着非常重要的作用。植物对边坡具有很好的防护作用, 包括茎叶水文效应和根系力学效应。根系发挥力学效应主要体现在以下两方面: 1) 浅细根系的三维加筋作用和深粗根系的锚固作用^[1-2]; 2) 根系本身的抗拉、抗剪性能, 可以提高土体的抗剪强度^[3-4]。

边坡生境中, 坡度、坡向和坡位等会直接影响到植物生长^[5-6], 尤其是在植被恢复初期, 坡度对植被与环境的构建影响最为明显^[7-8]。研究发现, 在相同生境下, 坡度越大越易发生水土侵蚀, 植物肥岛效应越明显^[9]。坡度不仅影响植物地上生长, 同时还影响根系

分布, 使植物形成独特的根系适应性策略^[10]。植物上坡根系强度、长度、数量和生物量随着坡度的增加而增加, 以抵消植物的自负荷, 有利于植物发挥根系国土护坡效应^[5,10]。拉拔力是植物根系国土效应的综合表现^[11], 研究发现拉拔力与根系构型、直径、数量、分布等显著相关^[12-14]。综上所述, 边坡环境能够改变根系的结构和分布, 从而影响植物的锚固功能。紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 是我国北方地区裸露边坡植被恢复常用植物之一, 其根系发达, 繁殖能力强, 护坡效应好^[15], 但是关于坡度是如何影响紫花苜蓿根系生长及拉拔力方面的研究鲜见报道。

本研究以京承三期高速公路 3 年植被恢复期的岩石边坡为依托, 选择边坡优势植物紫花苜蓿为研究对象, 通过根系原位挖掘法, 对比 3 种坡度边坡紫花苜蓿根系地下分布特征及其拉拔力大小, 为边坡植被恢复评价提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

京承高速公路是“国家高速公路网规划”中大庆一

收稿日期: 2019-11-26; **修回日期:** 2019-12-13

基金项目: 北京市首发天人生态景观有限公司(2018HXF-WLXT031); 国家自然科学基金(31570610)

作者简介: 李义强(1963-), 男, 北京人, 硕士, 园林绿化高级工程师, 主要从事园林景观建造, 植被恢复理论与技术研究。

E-mail: 1552010606@qq.com

宋桂龙为通讯作者。E-mail: syihan@163.com

广州的重要组成部分,全长 210 km。在京承高速公路修建的过程中,因工程建设产生了大量工程边坡,包括挖方边坡和填方边坡。本研究所选的试验边坡是由风化的凝灰岩和花岗岩组成的岩质挖方边坡。岩石边坡的植被恢复采用厚层基材喷播技术,试验研究选择 3 年期恢复植被。

表 1 试验边坡基本状况

Table 1 Basic condition of the tested slopes

试验边坡	具体位置	坡质	坡向	坡度/°	基材厚度(底层+种子层)/cm
1	K121+100-K121+200	岩石	阴坡	40	10.8
2	K122+000-K122+100	岩石	阴坡	50	10.7
3	K123+500-K123+700	岩石	阴坡	60	11.0

1.2.2 试验植株选择 采用生态学的方法^[17]先对边坡紫花苜蓿群落特征进行调查,根据平均株高确定紫花苜蓿标准株的规格^[18],最终选择与标准株规格相近的植株作为本研究的供试植株,且供试植物中心 1 m 范围内无其他木本植物。3 个试验边坡(40°、50°和 60°),每个边坡选择 6 株供试紫花苜蓿。其中,3 株用于根系分布特征研究,3 株用于根系拉拔试验。试验结束时将地上部收获装入信封带回实验室进行烘干称重,每个试验边坡 6 株供试紫花苜蓿植株地上部特征见表 2。

表 2 不同坡度条件下紫花苜蓿基本生长状况

Table 2 Basic growth status of *Medicago sativa* at different slope sites

边坡/°	年龄/a	高度/cm	地上生物量/g
40	3	25.4	12.3
50	3	41.5	15.4
60	3	40.7	17.7

1.2.3 根系生长特征 根系生长特征采用原位全根系挖掘法,使用工具包括螺丝刀、镊子、小铁铲、毛刷、直尺、卷尺、游标卡尺和量角器等。调查前一天,将根系基部 2 m 范围内的喷播基材浇透水,目的为降低基质过干对根系挖掘的影响。从植物根基部进行全根系挖掘取样,直至无根系出现。现场调查指标包括根系分支特征、根系分布范围、主根与坡面夹角。挖掘完成后,将采回的根系进行根系序级的分类且利用湿纸巾清洗表面杂质后进行相关指标的测定。在实验室内测定的指标包括不同序级根系直径、根系干重和不同序

1.2 试验设计

1.2.1 试验地选择 坡向和坡度的调查使用地质罗盘仪 DQY-1(哈尔滨光学仪器),坡向的判断根据宋桂龙对边坡的分类^[16],喷播基材的厚度采用挖掘法进行确定。经过调查,选择坡质、坡向、基材喷播厚度基本一致,坡度分别为 40°、50°、60° 3 个边坡,其立地条件见表 1。

级以及不同径级根系长度。根系直径采用游标卡尺进行测定。根系干重和地上部生物量测定采用烘干法,将根系和植株地上部置于烘箱 105℃杀青 30 min 后,80℃烘至恒重,最后用电子天平(0.000 1 g)称重,得到根系生物量。不同序级以及不同径级根系长度测定使用根系扫描仪(Epson Scan V700)及其根系分析系统 Win-RHIZO PRO 2013(Regent Instruments Inc., Canada)共同完成。根系扫描时,径级划分根据根系直径(d)按如下标准进行:0 mm < d ≤ 2 mm 为细根,2 mm < d ≤ 5 mm 为中根,d > 5 mm 为粗根^[19]。序级划分按如下标准进行:从主根或根颈伸出的第 1 侧根称为一级根,从一级根伸出的侧根称为二级根,以此类推^[20]。

1.2.4 根系拉拔 根系拉拔试验参考李绍才的边坡植物根系拉拔力试验方法^[1,5],并在此基础上加以改进。改进后的根系拉拔试验装置如图 1 所示,包括液压式拉力计(HC-V1,海创高科)和自制辅助装置^[22]。紫花苜蓿根系拉拔试验共计 3 个边坡,每个边坡选取 3 株紫花苜蓿。为降低边坡间基材含水量差异给根系拉拔试验带来的误差,在试验前一天,将试验植株根系基部 2 m 范围内的喷播基材浇透水。每个边坡紫花苜蓿根系进行拉拔试验时,还需做无根系拉拔的空白对照试验,试验后对根系拉拔力进行数据修正。表 3 为在每个试验边坡所做空白试验的测试结果。调查发现,试验地点对空白试验的测试结果影响不大,因此对 3 个边坡空白试验数据取平均值,平均值为 1.58 kN,使用此数值对每个边坡植物或锚杆的拉拔力大小进行修正,即植株实际拉拔力为植株根系拉拔测定值减去空白值。

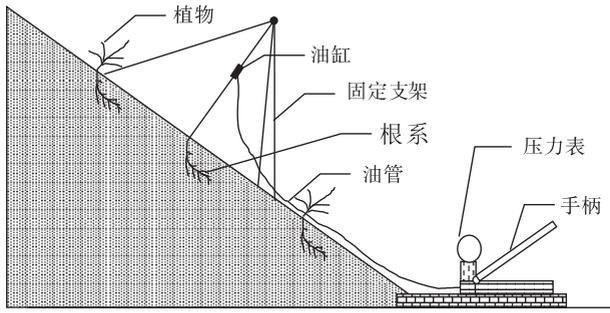


图 1 植物根系拉拔试验装置示意图

Figure 1 Sketch map of plant root pull-out test device

表 3 拉拔试验的空白试验

Table 3 Blank test of pull-out test

边坡/ $^{\circ}$	T-1/kN	T-2/kN	T-3/kN
40	1.58	1.51	1.55
50	1.58	1.61	1.53
60	1.60	1.67	1.55

1.2.5 数据分析 试验所得数据使用 Excel 2013 和 SPSS 23.0 软件进行统计分析,采用 Excel 2013 作表, Origin 9.0 制图。显著性水平设定为 $\alpha=0.05$,对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并利用最小显著差异法(LSD)检验不同数据组间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 坡度对根系特征影响

2.1.1 根系直径 紫花苜蓿主根直径随边坡坡度增大逐渐增大,40 $^{\circ}$ 和 60 $^{\circ}$ 边坡之间存在显著差异($P < 0.05$)。紫花苜蓿侧根中 I 级根和 II 级根的直径随着坡度增大逐渐减小, I 级根直径在 3 个边坡之间无显著差异($P > 0.05$),40 $^{\circ}$ 边坡 II 级根直径显著大于 60 $^{\circ}$ 边坡($P < 0.05$)(图 2)。

2.1.2 主根生长方向 3 个试验边坡紫花苜蓿主根与边坡的夹角分别为 50 $^{\circ}$ 、40 $^{\circ}$ 和 30 $^{\circ}$,主根的生长方向是向 Down-slope 方向生长。从主根与边坡的夹角可以看出,紫花苜蓿主根在基质层中呈竖直向下生长,主根方向并未受边坡坡度大小影响(表 4)。

2.1.3 根系长度比例 与 40 $^{\circ}$ 边坡相比,50 $^{\circ}$ 和 60 $^{\circ}$ 边坡侧根占总根长的比例有所增加,3 个边坡之间存在显著差异($P < 0.05$)。侧根长占总根长的比例远大于主根,主根占总根长的比例较小,随着边坡坡度的变化,主根长度比例有所减少,在 3 个边坡之间存在显著差异($P < 0.05$)(图 3)。

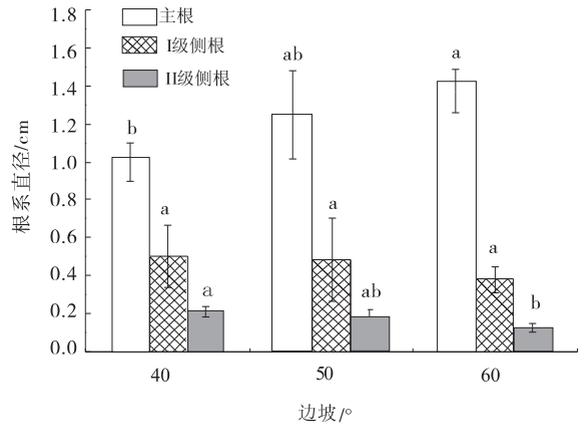


图 2 紫花苜蓿根系直径

Figure 2 Root diameter of *Medicago sativa*

注:不同小写字母表示各指标在不同坡度条件下存在显著差异($P < 0.05$),下同

表 4 紫花苜蓿主根生长角度

Table 4 The growth angle of *Medicago sativa* taproot

边坡/ $^{\circ}$	与边坡夹角/ $^{\circ}$	方向	绝对方向
40	50	Down-slope	竖直向下
50	40	Down-slope	竖直向下
60	30	Down-slope	竖直向下

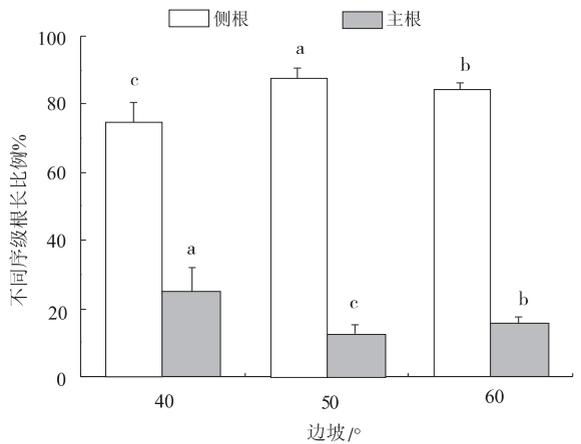


图 3 紫花苜蓿不同序级根系长度比例

Figure 3 The proportion of taproot and lateral roots of *Medicago sativa*

随着坡度增大,紫花苜蓿细根($0 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$)所占比例逐渐增大,40 $^{\circ}$ 边坡和 60 $^{\circ}$ 边坡之间存在显著差异($P < 0.05$);紫花苜蓿中根($2 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$)比例逐渐减小,3 个边坡之间存在显著差异($P < 0.05$);紫花苜蓿粗根($d > 5 \text{ mm}$)长度比例无明显规律性变化,50 $^{\circ}$ 边坡分别与 40 $^{\circ}$ 和 60 $^{\circ}$ 边坡存在显著差异($P < 0.05$)。

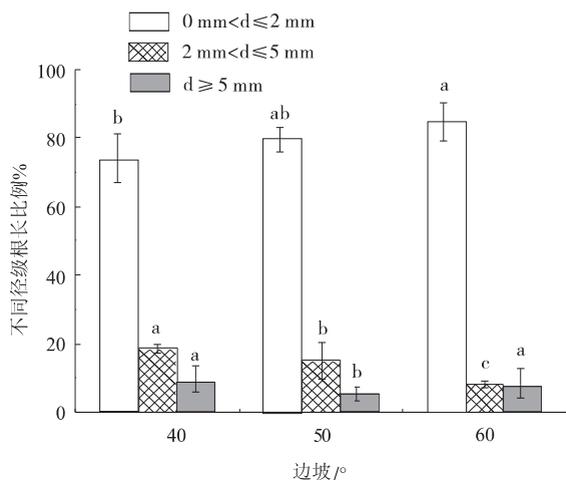


图4 紫花苜蓿不同径级根系长度比例

Figure 4 The root length proportion of different diameter classes of *Medicago sativa*

2.1.4 根系生物量 侧根生物量远小于主根生物量,其中40°边坡条件下主根生物量显著小于50°和60°边坡($P < 0.05$),50°和60°边坡之间无显著差异($P > 0.05$)。侧根生物量,50°边坡显著大于40°与60°边坡($P < 0.05$),40°与60°边坡之间无显著差异($P > 0.05$)。根系总生物量,50°边坡最大,其次是60°边坡,40°边坡最小,边坡之间存在显著差异($P < 0.05$) (图5)。

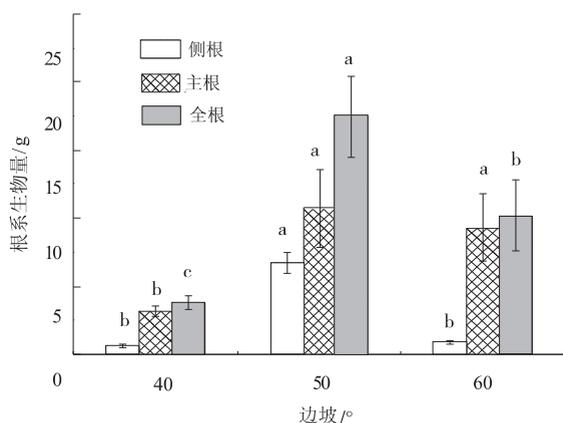


图5 紫花苜蓿根系生物量

Figure 5 Root biomass of *Medicago sativa*

2.2 坡度对紫花苜蓿根系拉拔力影响

50°与60°边坡根系拉拔力显著大于40°边坡($P < 0.05$),50°与60°边坡之间无显著差异($P > 0.05$)。其中随着边坡坡度的增大,紫花苜蓿根系拉拔力的大小呈逐渐增大的趋势,分别为0.34、0.56、0.63 kN (图6)。

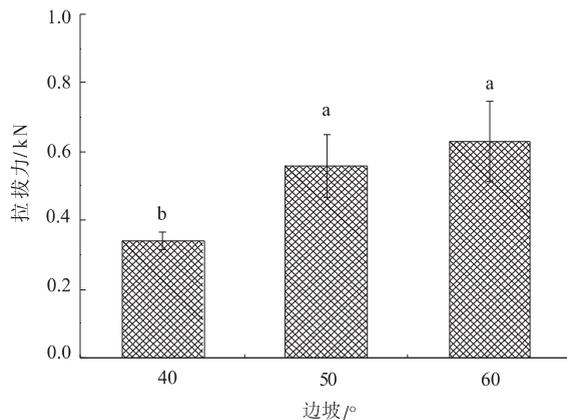


图6 紫花苜蓿根系拉拔力

Figure 6 Root pull-out resistance of *Medicago sativa*

3 讨论

不同立地条件影响着植物根系的生长,同时植物也产生出相应的适应性策略^[10],本研究发现,随着坡度的增大,紫花苜蓿主根直径逐渐增大,I级根和II级根的直径逐渐减小。这可能是由于坡度影响了坡面喷播基材的水分条件。边坡坡度越大,不仅不利于养护浇水措施的实施,还会影响喷播基材的储水能力,从而影响植物根系的生长。深粗根系发挥着锚固作用^[2],并且坡度越高,紫花苜蓿受胁迫程度越大,为了更好地支撑植株其主根直径也相应增加,从而发挥更好的固土护坡效应。边坡条件下,紫花苜蓿主根的生长方向垂直向下,不随边坡坡度的改变而改变。在根系挖掘过程中发现主根垂直向下生长,在遇到岩体界面之前,主根在基质内的生长方向基本不变,呈垂直向下生长。当主根遇到坚硬岩体界面后,其生长方向会发生改变,沿着界面顺势向Down-slope方向生长。当主根遇到岩缝时,可能会扎入岩缝生长,也可能会沿着周围坚硬的岩体界面向Down-slope方向生长。试验边坡岩体有风化现象,多裂缝,紫花苜蓿部分根系会扎入裂缝生长。其中扎入裂缝中的紫花苜蓿主根会由于受到岩石压力而产生分叉现象,同时由于受到岩石的挤压而产生伤痕,根系变扁,较脆弱,因此容易断裂。

根系长度能反映根系的生长状况,体现植物根系获取和吸收土壤中水分及养分的能力^[23]。本研究发现紫花苜蓿侧根长度比例远大于主根。随着坡度的增大,侧根长度比例逐渐增加,主根的长度比例逐渐减少。且随着坡度的增大,细根的比例逐渐增大,中根的比例逐渐减小,粗根的长度比例无明显规律性变化。

这可能是因为在不利的生长环境下,为了能够汲取大量的水分,细根的生长得以促进。王浩^[24]对砒砂岩区沙棘(*Hippophae rhamnoides*)根系构型的研究中发现坡度的增大会降低边坡土壤水分状况,细根的数量大幅提高。同时李文尧等^[25]研究发现干旱胁迫会促进紫花苜蓿侧根的伸长生长。紫花苜蓿侧根生物量远小于主根生物量,这是因为紫花苜蓿为轴根型植物,主根较粗壮。其中40°边坡条件下主根生物量显著小于50°和60°边坡($P<0.05$)。从根系总生物量大小可以看出50°边坡根系生物量最大,其次是60°,40°边坡的最小。几个边坡紫花苜蓿根系生物量的比较结果与根系长度的比较结果相似,可能是40°边坡灌木生长茂盛,草本植物有退化现象的原因。

边坡植物根系在受到外部拉拔力时,地下全部根系都会与土壤或岩石发生摩擦^[26],其中各个单根将拉拔力分解,总根系拉拔力的大小是单根拉拔力的综合体现。有研究者发现植物根系拉拔力的大小与其数量、长度和直径都存在密不可分的联系^[21,27-28]。本研究发现,紫花苜蓿拉拔力大小随着坡度的增大逐渐增大,紫花苜蓿根系为主直根型,主根发达,随着边坡坡度的增大,紫花苜蓿根系主根的直径逐渐增大,因此紫花苜蓿根系拉拔力的变化可能与其主根的直径变化有直接的关系。

植物根系在稳定边坡和减少水土流失等方面具有重要贡献,本研究选取的紫花苜蓿为草本植物,在边坡修复过程中灌木和乔木根系的生长也至关重要,因此进一步对多种植物种类进行根系特征以及其护坡效应的研究很有必要。且根系的生长受生境条件的影响,在根系的研究中完整地展示出根系具有一定困难,因此需要加大对植物根系在生态及生理方面的进一步探索。

4 结论

1)随着坡度增大,紫花苜蓿主根的直径逐渐增大,I级根和II级直径逐渐减小。

2)随着坡度增大,侧根长度比例逐渐增大,主根长度比例逐渐减少,同时细根($0\text{ mm}<d\leq 2\text{ mm}$)的长度比例逐渐增大,中根($2\text{ mm}<d\leq 5\text{ mm}$)的长度比例逐渐减小。3个坡度不同径级类型根系长度占总根长比例大小为,细根>中根>粗根。

3)紫花苜蓿侧根生物量远小于主根生物量,主根

发达。其中40°边坡条件下主根生物量显著小于50°和60°边坡($P<0.05$)。对于侧根生物量,50°边坡显著大于40°与60°边坡($P<0.05$)。

4)紫花苜蓿根系拉拔力随着坡度的增大逐渐增大,40°、50°、60°坡度分别为0.34,0.56,0.63 kN。

参考文献:

- [1] 姜志强. 植被根系固土机理及护坡稳定性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [2] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [3] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, *et al.* Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(2): 189-217.
- [4] Cammeraat E, Beek R V, Kooijman A. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain [J]. *Plant and Soil*, 2005, 278(1-2): 135-147.
- [5] Sun H L, Li S C, Xiong W L, *et al.* Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis* [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32(1): 60-67.
- [6] 裴娟, 艾应伟, 刘浩, 等. 坡面和坡向对遂渝铁路岩石边坡创面人工土壤植被恢复的影响[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(2): 197-201.
- [7] 张旭, 国庆喜. 地形对天然次生林空间格局的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2007, 35(1): 68-70.
- [8] 陈瑶, 胥晓, 张德然, 等. 四川龙门山西北部植被分布与地形因子的相关性[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1052-1055.
- [9] 方超, 袁自强, 刘雪伟, 等. 坡度对藏锦鸡儿(*Caragana tibetica*)灌丛土壤属性和植物间相互作用的影响[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1607-1611.
- [10] 伍红燕, 赵倩, 宋桂龙, 等. 平地与边坡条件下野生胡枝子根构型特征研究[J]. *草业科学*, 2019, 36(7): 1725-1733.
- [11] 罗春燕, 吴楚, 芦光新, 等. 三江源区植物根-土复合体的抗拉拔力特征及影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(5): 260-271.
- [12] 徐洪雨. 坡度对岩石边坡植物根系分布及抗拔力的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [13] 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*, 2012, 28(4): 136-141.
- [14] 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.
- [15] 周霞,李东嵘,蒋静,等.紫花苜蓿根系拉拔试验研究[J].人民长江,2019,50(7):185—188.
- [16] 宋桂龙,裴大伟,孟强.边坡分类体系及其与稳定性关系探讨[J].中国水土保持科学,2010,8(1):105—111.
- [17] 刘春霞.高速公路裸露坡面植被恢复机理的研究[D].北京:北京林业大学,2006.
- [18] 梁同江.几种灌木根系分布对高速公路生态边坡的影响[D].南京:南京林业大学,2010.
- [19] 张彦东,沈有信,白尚斌,等.混交条件下水曲柳落叶松根系的生长与分布[J].林业科学,2001(5):16—23.
- [20] Stokes A, Atger C, Bengough A G, *et al.* Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides[J]. Plant and Soil, 2009, 324(1—2): 1—30.
- [21] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等.护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J].岩石力学与工程学报,2006,25(10):2051—2057.
- [22] 宋桂龙,徐洪雨.锚杆拉拔仪使用的辅助支架:中国专利,CN202974756U[P].2013-06-05.
- [23] García A, Gonzalez M C. Morphological markers for the early selection of drought-tolerant rice varieties[J]. Cultivate Tropical, 1997, 18(2): 47—50.
- [24] 王浩.砒砂岩区不同生境条件下沙棘根系构型特征研究[D].西安:西北大学,2018.
- [25] 李文娆,张岁岐,丁圣彦,等.干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J].生态学报,2010,30(19):5140—5150.
- [26] 丁伟,孙树林,陈择旸,等.木本植物根系对边坡稳定性影响分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2017,34(3):27—31.
- [27] Long F, Sun H L, Li S C. Influence of rocky slope gradient on root anchorage of *Vitex negundo* L. [J]. Plant Biosystems, 2011, 145(3): 532—539.
- [28] 李臻,余芹芹,杨占风,等.西宁盆地两种灌木植物原位拉拔试验及其护坡效应[J].水土保持研究,2011,18(3):206—209.

Effect of rocky slope gradient on growth characteristics and pull-out resistance of *Medicago sativa* roots

LI Yi-qiang¹, WU Hong-yan², ZHAO Bin¹, LI Yi-wei¹, XIA Yu¹,
SUN Sheng-nian¹, LIANG Yan-ning¹, WANG Yu¹

(1. Beijing Shoufa Tianren Ecological Landscape Limited Company, Beijing 102600, China; 2. Institute of Turfgrass Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of slope gradient on the growth characteristics and slope protection of *Medicago sativa* roots in the process of vegetation restoration on rocky slopes was studied by investigating the root characteristics of three years old *M. sativa* growing on 40°, 50° and 60° rock slopes using excavating whole root systems method along the Beijing-Chengde Expressway. The pull-out resistance of roots was measured by hydraulic tension meter. The results showed that with the increase of slope gradient, the diameter of taproot tended to increase, the diameter of grade I and grade II lateral roots decreased. With the increase of slope gradient, the length proportion of lateral root tended to increase, taproot decreased, fine root (0 mm < d ≤ 2 mm) increased, medium root (2 mm < d ≤ 5 mm) decreases gradually. The growth direction of taproot did not change with the change of slope. The biomass of lateral root was much less than taproot, and under the condition of 40° slope, the biomass of taproot was significantly less than that of 50° and 60° slopes ($P < 0.05$). With the increase of slope gradient, the root pull-out resistance increased gradually.

Key words: rocky slope; gradient; root characteristics; pulling-out resistance; *Medicago sativa*