

马蔺根系固土护坡效应研究

石川¹, 李湘¹, 余冬梅^{2,3}, 马政¹, 吉海龙¹, 王芃¹,
刘亚斌^{1*}, 胡夏嵩^{1*}, 朱海丽¹, 李国荣¹

(1. 青海大学地质工程系, 青海西宁 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, 青海西宁 810008;
3. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海西宁 810008)

摘要:研究以青藏高原东北部观赏地被植物马蔺为研究对象,通过野外调查和材料力学、土力学试验,定量评价了野生马蔺植株和根系生长特征、单根抗拉特性以及根系对土体抗剪强度的增强效应。结果表明,马蔺平均株高、冠幅和植株密度分别为 (75.22 ± 11.40) cm、 (106.09 ± 25.62) cm和 (1.51 ± 0.55) 株/m²;马蔺标准株根系分布深度可达50 cm,主要分布在0~30 cm深度范围内,根幅约40~50 cm。马蔺根径为0.20~0.70 mm,单根抗拉力、抗拉强度和延伸率平均值分别为 (7.94 ± 2.91) N、 (46.30 ± 11.06) MPa和 $54.17\% \pm 17.08\%$ 。随着根径的增大,单根抗拉力和单根抗拉强度分别呈幂函数增大和幂函数降低趋势,单根极限延伸率随着根径的增大呈逐渐增大变化趋势,但二者之间未表现出相对显著性的关系。马蔺根系对土体黏聚力和内摩擦角均有增强作用,可分别显著增强0~30 cm和0~10 cm深度范围内土体黏聚力和内摩擦角,增长率分别为9.48%~17.40%和7.62%。本文研究成果对马蔺用于坡面水土流失、浅层滑坡等地质灾害现象的生态防护工作,具有实际指导意义。

关键词:马蔺;生长特征;单根抗拉特性;根—土复合体;固土护坡

中图分类号:TU 43

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2022)03-0098-09

前言

青藏高原东北部地区气候寒冷干旱,黄土地貌广泛发育,生态、地质环境相对脆弱^[1]。近年来,随着青藏高原东北部地区经济快速发展,区内基础设施建设力度亦不断加大。大规模工程建设活动的开展,不可避免地会对原始地形地貌进行一定程度的改造,在改变原始地貌和地表植被覆盖条件的同时,亦会形成大量裸露人工边坡,从而进一步加剧了区内水土流失、滑坡、泥石流等地质灾害现象的发生,也对区内地质环境和生态环境

产生了直接影响和破坏作用^[2,3]。

诸多研究及大量工程实践表明,植被护坡工程是实现基础工程建设与生态环境保护两者兼顾目标的有效工程手段^[4,5]。在青藏高原东北部地区,由于特殊的气候水文及地质条件,区内适用于植被护坡工程的草本植物类型相对单一,主要以一些已被驯化的优势乡土草本植物和能够适应区内条件的引进草本植物作为先锋植物,例如紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、老芒麦(*Elymus sibiricus* L.)、细茎冰草(*Agropyron trachycaulum* Linn. Gaertn.)、中华羊茅(*Festuca sinensis* Keng ex S. L. Lu)、黑麦草

收稿日期:2021-03-10;修回日期:2021-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42002283,42062019);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905);青海大学地质资源与地质工程重点学科建设项目(41250103)

作者简介:石川(1997-),男,硕士生,研究方向:地质灾害及其防治。Email:shichuanwj@163.com。

通信作者:刘亚斌(1987-),男,博士,副教授,主要从事环境岩土工程与岩土体工程稳定性分析等方面的研究工作。Email:liuyabincug@163.com。

胡夏嵩(1965-),男,博士,教授,主要从事环境岩土工程与地质工程等方面的教学与研究工作。Email:huxiasong@tsinghua.org.cn。

(*Lolium perenne* L.)、冷地早熟禾(*Poa crymophila* Keng)、星星草(*Puccinellia tenuiflora* (Griseb.) Scribn. et Merr.)、碱茅(*Puccinellia distanx* (L.))以及芨芨草(*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski)等。然而,这些植物虽然都具有耐寒旱、适应性强、根系相对发达、护坡效果好等优点,但是景观相对单调,缺乏一定的观赏性。因此,有必要筛选出适合的植物以丰富区内植被护坡工程植物选择,推动区内植被护坡工程实用性和观赏性兼顾发展。

马蔺(*Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.)为多年生草本植物,亦称马莲、马兰,属于鸢尾科鸢尾属植物^[6,7]。马蔺是青藏高原东北部最具有代表性的观赏地被草本植物之一^[8,9],具有寿命长(可达60年以上)^[10]以及叶片返青早、绿期长、花色淡雅倩丽^[11]等特征。马蔺根系发达,且能够适应较广泛的生态环境,具有耐寒旱、耐涝、耐盐碱、耐践踏、耐贫瘠、抗病虫害等特点^[6,7,12]。然而,诸多研究均指出马蔺在水土保持和植被护坡工程中具有较为良好的应用前景^[10,11,13,14],但是多为定性评价,而鲜有从力学效应的角度系统地定量评价马蔺根系固土护坡效

应的研究,无法为其工程应用提供理论依据。基于此,该项研究以青藏高原东北部地区野生马蔺为研究对象,在野外调查和相关试验的基础上,通过分析评价马蔺生长特征、根系抗拉力学特性和根系固土效应,较为系统性地评价马蔺根系固土护坡效应。该项研究成果对于选用观赏地被植物马蔺进行研究区坡面水土流失、浅层滑坡等地质灾害现象的生态防护工作,具有实际指导意义。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省大通县朔北藏族乡至东峡镇之间,处于青藏高原和黄土高原过渡地带。研究区海拔2 570~3 585 m,属高原大陆性气候,年均气温4.9℃,年降水量523.3 mm,年平均蒸发量1 762.8 mm。选择两处具有代表性的区域作为试验区,开展马蔺生长特征调查。两处试验区分别位于105省道道旁(试验区A,36°58′38.47″N,101°44′5.51″E)和Y026乡道道旁(试验区B,37°3′10.63″N,101°49′26.99″E)。



a. 试验区 A
a. Test area A



b. 试验区 B
b. Test area B

图1 试验区地貌

Fig. 1 Landform of test areas

1.2 马蔺生长特征调查

在试验区内分别划定20 m×20 m的样方开展马蔺生长特征调查。在样方内随机选取20~30株马蔺植株进行株高、冠幅统计(冠幅取南北

和东西方向宽度的平均值);同时,在每个区域内随机设置10个3 m×3 m小样方,统计各样方内生长的马蔺株数,计算其植物分布密度。在获得马蔺平均株高和冠幅的基础上,在试验区B选取3株具有平均株高和冠幅的标准植株进行根系调

查。根系调查主要为获取根系分布特征和根系生物量(根系质量密度、根长密度、体积密度和根面积比)。其中,根系分布特征采用剖面挖掘法调查,即沿着马蔺冠幅直径地表投影线挖掘垂直剖面,通过剖面观察即可明确马蔺根系在土体中的

分布深度和根幅等特征。根系生物量采用环刀法进行测量(环刀规格 $\varphi 100 \text{ mm} \times 63.7 \text{ mm}$)。采集试样时,环刀轴向与剖面平行,从地表向下按 10 cm 的间距采集,直至没有植物根系为止。每层取 3 个环刀试样。



图 2 马蔺生长特征调查

Fig. 2 Growth characteristics of *Iris lactea*

1.3 马蔺单根抗拉力学特性研究

在试验区 B 进行根系调查的同时,将剖面挖掘过程中挖掘出的根系采集回实验室。在室内将马蔺根系用清水洗净后,从根系试样中随机剪取根长为 8 ~ 10 cm 且未受损伤的单根进行拉伸试验。该项研究以 0.1 mm 为单位将马蔺根径 D (mm) 划分为不同根径级别进行单根拉伸试验。在开展单根拉伸试验时,首先将单根夹持在上、下拉伸夹具之间,同时保证位于上、下两夹具之间的根段标距为 20 mm (夹具间根段保持顺直状态,同时做到避免根段在拉伸试验开始前受拉力作用);试验过程中,上夹具以 20 mm/min 的速率匀速上行,以使位于上、下夹具间的根段承受拉伸作用,直至该根段被拉断为止。由于单根拉伸试验仪在计算单根抗拉强度时,需提前测得单根根径,故在每根单根进行拉伸试验前,先用记号笔在其中部位置做出 2 个标记(标记间距为 20 mm),然后在 2 个标记间的 3 个不同位置处使用游标卡尺测量其根径,以 3 次测量的平均值作为该 20 mm 长根段根径,最后按单根根径级别依次进行相应归类^[15]。单根拉伸试验结束后试验仪自动记录单根抗拉力,然后在此基础上计算得到单根抗拉

强度、单根极限延伸率等单根抗拉力学特性指标。单根抗拉力学特性试验采用深圳瑞格尔仪器有限公司制造的 RWT—6010 微机控制电子万能试验机(量程 10 kN,精度 1 N,误差 $\pm 0.5\%$)。

该项研究中马蔺单根抗拉强度计算公式为^[16],

$$T = \frac{4F_{\max}}{\pi D^2}, \quad (1)$$

马蔺单根极限延伸率计算公式为^[16],

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta L_{\max}}{20}, \quad (2)$$

式中 $F_{\max}$ 表示单根抗拉力, N; D 表示上、下两夹具间根段的平均根径, mm; T 表示单根抗拉强度, MPa; $\Delta L_{\max}$ 表示单根处于极限状态时的根长增长量, mm; $\varepsilon_{\max}$ 表示单根极限延伸率, %。

1.4 马蔺根系固土效应评价

由于试验区马蔺根系分布层土体中含有一定数量的砾石(直径为 2 ~ 60 mm 的砾粒质量百分含量约为 15% ~ 23%),故不易采取原状直剪和三轴压缩试验试样。因此,在明确马蔺根系分布特征的基础上,该项研究通过重塑土三轴压缩试验来评价马蔺根系对不同深度土体抗剪强度的增强效应。重塑三轴压缩试样含根量由根系调查结

果确定,试样土体含水量和密度取试验区地表以下0~50 cm深度土体含水量和密度平均值,分别为17.68%, 1.86 g/cm^3 。

三轴压缩试样制备参照《公路土工试验规程》^[17]进行。试样尺寸为 $\varphi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。三轴压缩试样制备前,将野外采集到的土体试样烘干碾散后过2 mm筛,并制备成一定含水量的土体试样;同时将马蔺根系制备为5~7 cm的根段备用。三轴压缩试样制备时,将已制备好的土体和根系试样平均分为4部分。首先,在三轴剪切试验制样筒内放入1/4质量的土体,然后用镊子将1/4质量的根段插入土体中,为了模拟马蔺根系在土体中实际分布情况,将根段随机以竖直、水平和倾斜3种方式随机置入土体试样中。待1/4质量的马蔺根段全部插入后,对该层根—土复合体进行击实,每层复合体的厚度控制为 $(2.0 \pm 0.3) \text{ cm}$,击实完毕后使用钢尺进行高度校正。在完成第一层试样置入后,按照相同的方法进行第二层根—土复合体的制样。在将第二层土体放入制样筒前,使用刮刀刨毛下一层土体表面,并将下层复合体中的根段露出土体表面,以使上、下层土体紧密接触,同时使根段能够贯穿上、下两层土体。

根据马蔺根系实际分布特征,三轴压缩试验中共设置0、0.002、0.006、0.010、0.014和 0.018 g/cm^3 6个含根量梯度,每组试验进行3次重复。试验采用不固结不排水三轴剪切试验,试验采用4级连续加载方式,综合考虑根系埋深和仪器操作等因素,4级围压分别设置为10、20、30和40 kPa。三轴压缩试验剪切应变速率为 0.9 mm/min ,具体试验操作方法按照《公路土工试验规程》^[17]进行。试验仪器采用SLB—1型应变控制式三轴仪(最大载荷20 kN,最大围压1.0 MPa)。

2 试验结果与分析

2.1 生长环境

野外调查发现,马蔺主要分布在研究区内洪积扇、坡积裙和河漫滩等地貌单元。其立地条件包括上述地貌单元内的林下坡地、田间、道旁、湿地、荒地等,说明马蔺对不同立地条件均具有较强

的适应性。在不同的生长环境条件下,马蔺均为群落优势种^[7]。在调查中,还发现一些生长在乡间道路中的马蔺在受到农机和牲畜踩踏后依然正常生长,该现象说明马蔺具有较强的耐踩踏能力。试验区A属于山前洪积扇地貌(如图1a所示),试验区地面坡度约 $5^\circ \sim 15^\circ$,坡向NW,属于浅阴缓斜坡^[18]。该试验区乔木和草本植物共生,其中乔木为白桦,草本植物以马蔺为主。试验区B属于冲洪积地貌,地势较平坦(如图1b所示)。该试验区主要以草本植物为主,马蔺为群落优势种。两处试验区土质类型均为中砂,土样累计曲线如图3所示。

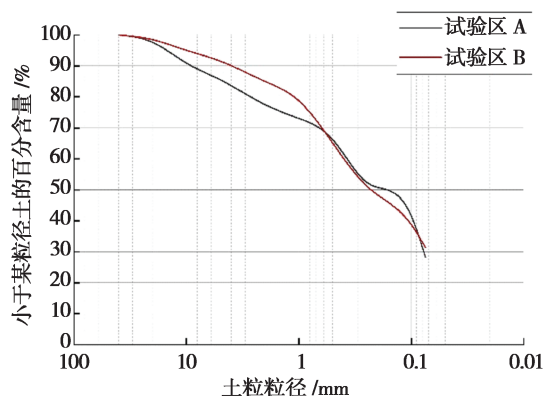


图3 试验区土体级配曲线

Fig. 3 Soil gradation curve of test area

2.2 生长特征

试验区马蔺生长特征调查结果如表1和表2所示。由表1可知,试验区A和试验区B马蔺株高分别为 $(78.73 \pm 11.31) \text{ cm}$ 和 $(68.00 \pm 7.76) \text{ cm}$,试验区A马蔺株高显著高于试验区B($P < 0.05$, ANOVA),两处试验区马蔺株高平均值为 $(75.22 \pm 11.40) \text{ cm}$ 。试验区A和试验区B马蔺冠幅和植株密度分别为 $(104.83 \pm 20.79) \text{ cm}$ 、 $(108.69 \pm 29.20) \text{ cm}$ 和 $(1.66 \pm 0.61) \text{ 株/m}^2$ 、 $(1.37 \pm 0.46) \text{ 株/m}^2$ (两处试验区马蔺冠幅和植株密度平均值为 $(106.09 \pm 25.62) \text{ cm}$ 和 $(1.51 \pm 0.55) \text{ 株/m}^2$)。在显著性水平为0.05时,试验区A和试验区B马蔺冠幅和植株密度均不存在显著性差异($P > 0.05$, ANOVA)。总体而言,两处试验区内所生长的马蔺其地上部分生长特征未表现出较大的差异性。与试验区其他草本植物相比较,马蔺冠幅明显较大。植物冠幅越大,

则单株降雨截流能力越强,越能够起到缓解降雨对坡面侵蚀的作用^[19,20]。在实际植被护坡工程

设计和实施中,相对于其他禾本科草本植物,可使用较小的马蔺种植密度,达到覆盖坡面的效果。

表 1 马蔺生长特征统计结果

Table 1 Statistical results of growth characteristics of *Iris lactea*

统计指标	试验区 A	试验区 B	平均值
株高/cm	78.73 ± 11.31	68.00 ± 7.76	75.22 ± 11.40
冠幅/cm	104.83 ± 20.79	108.69 ± 29.20	106.09 ± 25.62
植株密度/(株/m ²)	1.66 ± 0.61	1.37 ± 0.46	1.51 ± 0.55

由表 2 可知试验区内马蔺标准株根系分布深度可达 50 cm 以下,主要分布在 0 ~ 30 cm 深度范围内,根幅约 40 ~ 50 cm。在 0 ~ 30 cm 内,马蔺根系的含根量、根长密度、根体积比和根面积比分别为 0 ~ 50 cm 深度范围内相对应指标总量的 83.39%、81.75%、83.07% 和 87.34%,是其根系

的主要分布深度。随着深度的增加,含根量、根长密度、根体积比和根面积比均呈线性函数降低趋势,回归模型分别为: $RD = 0.027e^{-0.048x}$, $R^2 = 0.938$; $RLD = 5.077e^{-0.043x}$, $R^2 = 0.915$; $RVR = 2.933e^{-0.047x}$, $R^2 = 0.935$; $RAR = 0.803e^{-0.063x}$, $R^2 = 0.924$ 。

表 2 马蔺根系生长特征统计结果

Table 2 Statistical results of growth characteristics of roots of *Iris lactea*

统计指标	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	40 ~ 50 cm
含根量 $RD/(g \cdot cm^{-3})$	0.018 ± 0.003	0.014 ± 0.002	0.010 ± 0.004	0.006 ± 0.001	0.002 ± 0.000 2
根长密度 $RLD/(cm \cdot cm^{-3})$	3.365 ± 0.632	2.798 ± 0.423	2.156 ± 0.819	1.292 ± 0.295	0.565 ± 0.046
根体积比 $RVR/\%$	1.913 ± 0.337	1.548 ± 0.205	1.087 ± 0.426	0.652 ± 0.094	0.275 ± 0.022
根面积比 $RAR/\%$	0.455 ± 0.099	0.335 ± 0.049	0.223 ± 0.103	0.113 ± 0.034	0.034 ± 0.003

2.3 单根抗拉力学特性

本次试验共进行了 550 组单根拉伸试验,其中,从单根中间部位断裂的有 301 组,试验成功率 54.73%。对 301 组有效数据进行单根抗拉力箱型图排查出 4 个异常值数据(如图 4 所示),剔除后最终对 297 组有效数据进行分析。由于马蔺单根实际根径范围为 0.20 ~ 0.70 mm,故将马蔺根径 D (mm) 依次划分为 (0.20, 0.30]、(0.30, 0.40]、(0.40, 0.50]、(0.50, 0.60] 和 (0.60, 0.70) mm 5 个根径级别进行单根拉伸试验数据分析。由表 3 可知,在 5 个根径级别条件下,马蔺单根对应的抗拉力、抗拉强度和延伸率分别为 (3.57 ± 1.05) ~ (12.51 ± 2.58) N, (60.55 ± 12.62) ~ (41.27 ± 8.22) MPa, (36.28% ± 13.92%) ~ (65.45% ± 22.91%)。在 0.20 ~

0.70 mm 范围内,单根抗拉力、抗拉强度和延伸率平均值分别为 (7.94 ± 2.91) N, (46.30 ± 11.06) MPa 和 54.17% ± 17.08%。

图 5 为马蔺单根抗拉力、抗拉强度和单根极限延伸率与根径之间的关系。由图 5a 和 5b 可知,随着根径的增大,单根抗拉力呈幂函数增大趋势;单根抗拉强度呈幂函数降低趋势;单根极限延伸率与根径之间的关系未表现出相对显著性,即未出现决定系数 R^2 大于 0.5 的函数关系。但由图 5c 可知,在根径为 0.20 ~ 0.70 mm 条件下,马蔺单根极限延伸率表现出随着根径增加而逐渐增大的变化趋势。通过与文献^[15]对比分析可知,在相同的根径级别条件下,马蔺单根抗拉力学特性指标与根径之间的关系,与垂穗披碱草、细茎冰草和紫花苜蓿 3 种草本植物相一致。

表 3 马蔺单根抗拉力学特性指标试验结果

Table 3 Single root tensile mechanical property indexes of *Iris lactea*

根径级别/mm	抗拉力/N	抗拉强度/MPa	延伸率/%	样本数量
0.20 < D ≤ 0.30	3.57 ± 1.05e	60.55 ± 12.62a	36.28 ± 13.92c	18
0.30 < D ≤ 0.40	5.64 ± 1.63d	51.41 ± 11.58b	50.91 ± 15.78b	64
0.40 < D ≤ 0.50	7.51 ± 1.95c	44.91 ± 9.67c	55.81 ± 15.40ab	105
0.50 < D ≤ 0.60	10.18 ± 2.08b	42.43 ± 8.69c	56.54 ± 17.13a	99
0.60 < D < 0.70	12.51 ± 2.58a	41.27 ± 8.22c	65.45 ± 22.91a	11

注:表中同列小写字母表示在不同根径级别条件下,马蔺单根抗拉力测量指标之间、单根抗拉强度测量指标之间及单根延伸率测量指标之间的差异显著性结果(LSD法), $P < 0.05$;单根抗拉强度和单根极限延伸率分别由公式(1)、(2)计算得到; D 为上、下两夹具间根段的平均根径,mm。

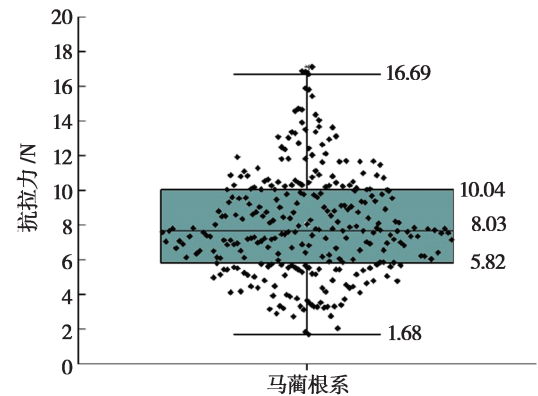


图 4 马蔺单根抗拉力箱型图

Fig. 4 The box plot of single tensile force of *Iris lactea*

进一步与文献^[15]中相同根径级别条件下垂穗披碱草、细茎冰草和紫花苜蓿 3 种草本植物单根抗拉力、抗拉强度和极限延伸率对比可知,马蔺单根抗拉力在(0.20, 0.30]、(0.30, 0.40]、(0.40, 0.50]和(0.50, 0.60]mm 4 个根径级别均大于垂穗披碱草和细茎冰草,但小于紫花苜蓿;除根径级别为(0.20, 0.30]mm 以外,马蔺单根抗拉强度在(0.30, 0.40]、(0.40, 0.50]和(0.50, 0.60]mm 3 个根径级别均大于垂穗披碱草和细茎冰草,同样,也小于紫花苜蓿;而马蔺单根极限延伸率在(0.20, 0.30]、(0.30, 0.40]、(0.40, 0.50]和(0.50, 0.60]mm 4 个根径级别条件下,均小于垂穗披碱草和细茎冰草,但大于紫花苜蓿。

上述对比结果表明,在根径为 0.20 ~ 0.60 mm 条件下,马蔺单根抗拉力学特性总体相

对优于区内常见的护坡禾本科草本植物垂穗披碱草和细茎冰草,而低于豆科植物紫花苜蓿。单根抗拉特性是评价植物根系固土护坡能力的基本参数之一,在根面积比相同情况下,单根抗拉力和单根抗拉强度越大,则越能够起到增强土体抗剪强度的作用^[21]。相应地,单根极限延伸率愈小,则单根在较小变形的条件下,就能够将其自身的单根抗拉力或根—土界面摩擦力发挥出来,从而以起到有效抑制土体变形进一步发展的作用。

2.4 植物根系固土效应

该项研究中,重塑三轴压缩试验根—土复合体试样含根量参见表 2。三轴压缩试验结果如图 6 所示。由图 6 所示,随着含根量的增加,根—土复合体黏聚力和内摩擦角均表现出线性增大的变化趋势,随着含根量由 0.002 g/cm³ 增长到 0.018 g/cm³,复合体粘聚力由 14.08 kPa 增长至 16.20 kPa,较素土而言,增长 2.02% ~ 17.40%。通过与素土黏聚力进行方差分析可知,在 0 ~ 30 cm 深度范围内,马蔺根系能够显著增强土体黏聚力($P < 0.05$, ANOVA)。随着含根量由 0.002 g/cm³ 增长到 0.018 g/cm³,复合体内摩擦角由 8.78° 增长至 9.35°,较素土增长 1.01% ~ 7.62%,根据方差分析可知,马蔺根系仅能够在 0 ~ 10 cm 深度范围内显著增强土体内摩擦角($P < 0.05$, ANOVA)。上述试验数据表明,马蔺根系对土体黏聚力和内摩擦角均有增强作用,且对土体黏聚力的增强作用较为显著。

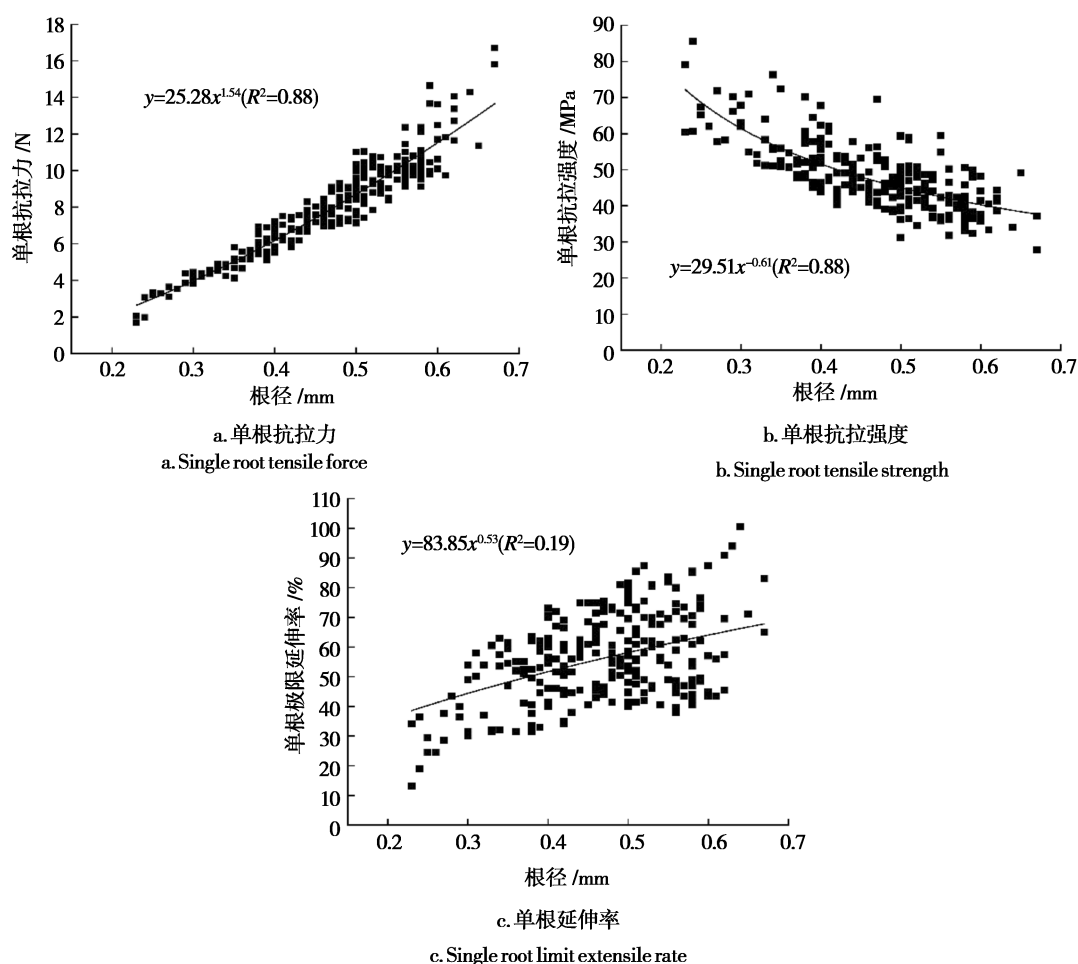


图 5 马蔺单根抗拉力学特性指标与根径关系

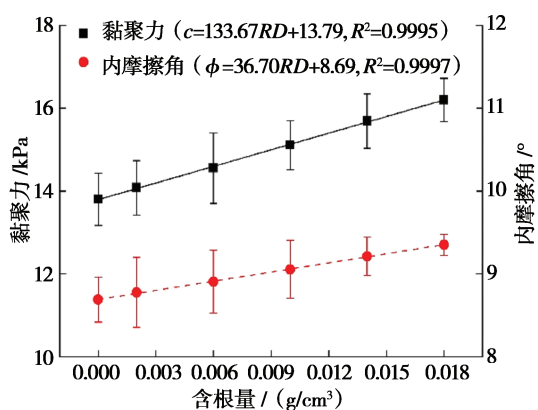
Fig. 5 Relationship between Single root tensile mechanical property indexes and root diameter of *Iris lactea*

图 6 重塑三轴压缩试验结果

Fig. 6 Results of remolded triaxial compression test

由三轴压缩试验可知,马蔺根系能够同时起到增强土体抗剪强度指标的作用,从而提高土体

抗剪强度。表 4 所示为在自重应力作用下,含马蔺根系土体与素土抗剪强度对比分析结果。由该表所知,在 0 ~ 50 cm 根系分布深度范围内,含马蔺根系土体抗剪强度较素土可提高 1.92% ~ 17.20%,其中在 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 3 个根系主要分布深度,能够分别提高 17.20%、13.38% 和 9.17%。说明马蔺根系能够有效增强 0 ~ 30 cm 深度范围内的土体抗剪强度。

综上所述,马蔺除具备较好的观赏价值、抗逆性强、适应性强等优点以外,还具有冠幅、根幅和根系分布深度较大的特点。与此同时,从植被护坡力学效应的角度而言,其根系亦具有相对较强的单根抗拉力学特性,且能够起到显著增强浅表层土体抗剪强度指标和抗剪强度的作用。

表4 含马蔺根系土体与素土抗剪强度对比分析结果

Table 4 Comparative analysis results of the shear strength of the rooted soil of *Iris lactea* and the soil without roots

深度/cm	自重应力/kPa	复合体抗剪强度/kPa	素土抗剪强度/kPa	抗剪强度增长率/%
10	1.86	16.51	14.08	17.20
20	3.72	16.29	14.37	13.38
30	5.58	16.00	14.65	9.17
40	7.44	15.72	14.94	5.22
50	9.30	15.51	15.22	1.92

注:表中各深度土体自重应力计算均采用试验区地表以下0~50 cm深度土体密度平均值1.86 g/cm³;土体抗剪强度计算公式参见文献^[22]。

3 结 论

1)马蔺主要分布在研究区内洪积扇、坡积裙和河漫滩等地貌单元,立地条件包括上述地貌单元内的林下坡地、田间、道旁、湿地、荒地等,说明马蔺对不同立地条件均具有较强的适应性。

2)在两处试验区内马蔺株高存在显著性差异,而冠幅和植株密度均不存在显著性差异,其平均株高、冠幅和植株密度,分别为(75.22±11.40)cm、(106.09±25.62)cm和(1.51±0.55)株/m²;马蔺标准株根系分布深度可达50 cm以下,主要分布在0~30 cm深度范围内,根幅约40~50 cm。

3)在根径为0.20~0.70 mm范围内,单根抗拉力、抗拉强度和延伸率平均值分别为(7.94±2.91)N,(46.30±11.06)MPa和54.17%±17.08%。随着根径的增大,单根抗拉力呈幂函数增大趋势,单根抗拉强度呈幂函数降低趋势,单根极限延伸率与根径之间的关系未表现出相对显著性;马蔺根系对土体黏聚力和内摩擦角均有增强作用,能够分别显著增强0~30 cm和0~10 cm深度范围内土体黏聚力(增长率为9.48%~17.40%)和内摩擦角(增长率为7.62%),且对土体黏聚力的增强作用较为显著。

该项研究成果对于选用观赏地被植物马蔺进行研究区坡面水土流失、浅层滑坡等地质灾害现象的生态防护工作,具有理论研究价值和实际指导意义。

参考文献:

[1] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告[M]. 北京:科学出版社,2002:4-6.

[2] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2007:1-2.

[3] 胡晋茹. 高速公路水土保持损益分析—以新建西宁南绕城公路为例[J]. 水利发展研究,2012,12(5):55-58.

[4] 余冬梅,付江涛,胡夏嵩,等. 柴达木盆地大柴旦盐湖区盐生植物根—土复合体力学强度试验研究[J]. 盐湖研究,2017,25(1):37-48.

[5] 姜德文. 论新时代水土保持学科发展[J]. 中国水土保持,2021,(1):9-14+5.

[6] 侯向阳,孙海群. 青海主要草地类型及常见植物图谱[M]. 中国农业科学技术出版社,2012:590.

[7] 陈世鑽. 中国北方草地植物根系[M]. 长春:吉林大学出版社,2001:105-106.

[8] 向日群,杨晓琴. 优良观赏地被植物马蔺的繁殖及园林应用[J]. 现代农业科技,2017(17):167-170.

[9] 赵珊. 西宁市绿道系统植物景观规划设计研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.

[10] 李彬彬. 马蔺草在城市绿化美化和生态建设上的应用[J]. 防护林科技,2016(2):72-73.

[11] 王亚娟. 护坡植物马蔺的生物学特性及应用前景[J]. 水土保持应用技术,2005(4):29-31.

[12] 张英. 马蔺的抗旱性研究[J]. 黑龙江畜牧兽医,2010(09):79-80.

[13] 岳星慧. 草本植物在工程边坡生态恢复上的试验研究[J]. 青海草业,2006(02):5-7.

[14] 谭雪红,高艳鹏,郭小平,等. 五种高速公路边坡绿化植物的生理特性及抗旱性综合评价[J]. 生态学报,2012,32(16):5076-5076.

[15] 刘亚斌,李淑霞,余冬梅,等. 西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J]. 农业工程学报,2018,34(15):157-166.

[16] 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(增刊2):3445-3452.

[17] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程 JTG E40-2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007.

[18] 曹荣旺. 黄土高寒区人工林群落多样性及生态位特征研究[D]. 北京:北京林业大学,2019.

- [19] Chau N L, Chu L M. Fern cover and the importance of plant traits in reducing erosion on steep soil slopes [J]. Catena, 2017, 151: 98–106.
- [20] Halim A, Normaniza O. The effects of plant density of *Melastoma malabathricum* on the erosion rate of slope soil at different slope orientations [J]. International Journal of Sediment Research, 2015, 30(2): 131–141.
- [21] 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.
- [22] 林彤, 谭松林, 马淑芝. 土力学 [M]. 2 版. 武汉: 中国地质大学出版社, 2012: 130.

Effects of Roots of *Iris Lactea* Pall. Var. *Chinensis* (Fisch.) Koidz. on Soil Reinforcement and Slope Protection

SHI Chuan¹, LI Xiang¹, YU Dong-mei^{2,3}, MA Zheng¹, JI Hai-long¹,

WANG Peng¹, LIU Ya-bin^{1*}, HU Xia-song^{1*}, ZHU Hai-li¹, LI Guo-rong¹

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

2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Science, Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Xining, 810008, China; 3. Qinghai Provincial

Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining, 810008, China)

Abstract: In order to select ideal plant for slope protection in Northeast Qinghai Tibet Plateau, and promoting both practicality and ornamental development of slope protection by vegetation. In this study, the ornamental ground cover plant *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz. was selected as the research object. The plant characteristics, root distribution characteristics, single root tensile properties and the effects of roots on soil reinforcement of *Iris lactea* were evaluated quantitatively via field survey, the single root tensile test and the remolded triaxial compression test. The average plant height, crown width and plant density of *Iris lactea* are 5.22 ± 11.40 cm, 106.09 ± 25.62 cm and 1.51 ± 0.55 plants/m², respectively. The root distribution depth of standard plant of *Iris lactea* can reach 50 cm below the ground, mainly in the depth range of 0 ~ 30 cm, and the root width is about 40 ~ 50 cm. The root diameter of *Iris lactea* ranged from 0.20 mm to 0.70 mm. The average values of single root tensile force, single root tensile strength and single root limit extensile rate of *Iris lactea* are 7.94 ± 2.91 N, 46.30 ± 11.06 MPa and $54.17\% \pm 17.08\%$, respectively. In addition, when the root diameter is 0.20 to 0.70 mm, the single root tensile forces of *Iris lactea* increase with the root diameter increasing, with a power relationship between single root tensile forces and root diameters. Meanwhile, the single root tensile strengths of *Iris lactea* increase with the root diameter decreasing, and a power relationship exists between single root tensile strengths and root diameters; moreover, the single root limit extensile rate of *Iris lactea* increases with the increasing of the root diameter, but there is no significant functional relationship between them. The roots of *Iris lactea* can enhance both of the cohesion and the internal friction angle of soil. The roots of *Iris lactea* can significantly enhance the soil cohesion and internal friction angle in the depth range of 0 ~ 30 cm (The growth rate of the cohesion is 9.48% ~ 17.40%) and 0 ~ 10 cm (The growth rate of the internal friction angle is 7.62%) respectively, and the enhancement effect on the soil cohesion is more significant. The results of this study have theoretical research value and practical guiding significance for the selection of the ornamental ground cover plant *Iris lactea* for the ecological protection of soil erosion, shallow landslides and other geological disaster phenomena in the study area.

Key words: *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz.; Growth characteristics; Single root tensile properties; Rooted soil; Soil reinforcement and slope protection