

西宁盆地黄土区 4 种灌木原位拉拔试验

周林虎¹, 胡夏嵩^{1,2}, 刘昌义¹, 徐志闻¹, 许桐¹, 申紫雁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)

摘 要:通过采用原位拉拔试验方法测定了西宁盆地寒冷半干旱气候条件下, 生长期为 3 a 的柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)、中宁枸杞(*Lycium barbarum* L.)、白刺(*Nitraria tangutorum* Bor.)和霸王(*Sarcozygium xanthoxylon* Bunge)4 种灌木植物的抗拔力, 分析了抗拔力与株高、冠幅、地径、根长和侧根数等生长参数之间的关系, 并探讨了 4 种灌木固土护坡效果。结果表明: (1) 区内 4 种灌木抗拔力由大至小依次为柠条锦鸡儿(256.39 N)、中宁枸杞(222.80 N)、白刺(178.52 N)和霸王(134.84 N), 柠条锦鸡儿和中宁枸杞抗拔力相对显著高于白刺和霸王; (2) 4 种灌木抗拔力与株高之间呈指数函数关系, 与地径之间呈幂函数关系, 与冠幅、根长和侧根数之间呈线性函数关系; (3) 通过采用灰色关联分析法, 得到抗拔力与株高、冠幅、地径、根长和侧根数的关联度分别为 0.623, 0.669, 0.629, 0.730, 0.719, 即影响 4 种灌木抗拔力大小的主要因素为根长和侧根数。该研究结果为寒冷半干旱黄土区采用种植灌木植物方式, 科学防治水土流失、浅层滑坡等地质灾害具有理论研究价值和实际指导意义。

关键词:西宁盆地; 黄土区; 灌木植物; 抗拔力; 回归方程; 灰色关联法

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)05-0236-07

In-situ Pull-out Test of Four Shrub Plants in Xining Basin of the Loess Plateau

ZHOU Linhu¹, HU Xiasong^{1,2}, LIU Changyi¹, XU Zhiwen¹, XU Tong¹, SHEN Ziyang¹

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

2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China)

Abstract: We determined the pull-out resistance of four three-year-old shrub plants (*Caragana korshinskii* Kom., *Lycium barbarum* L., *Nitraria tangutorum* Bor. and *Sarcozygium xanthoxylon* Bunge) by the in-situ pull-out test in the cold and semi-arid climate of Xining Basin. The relationship between the pull-out resistance and the growth indexes such as plant height, crown diameter, ground diameter, root length and lateral root number were analyzed, and the effects of four shrubs on soil slope protection were discussed. The results show that: (1) the descending order of pull-out resistance of the four shrubs in the studying area is *Caragana korshinskii* Kom. (256.39 N), *Lycium barbarum* L. (222.80 N), *Nitraria tangutorum* Bor. (178.52 N) and *Sarcozygium xanthoxylon* Bunge (134.84 N), the pull-out resistances of *Caragana korshinskii* Kom. and *Lycium barbarum* L. are relatively greater than those of *Nitraria tangutorum* Bor. and *Sarcozygium xanthoxylon* Bunge; (2) an exponential function relationship between pull-out resistance and plant height is found, a power function relationship between pull-out resistance and ground diameter is found, a linear function relationship between pull-out resistance and crown diameter, root length and lateral root number is found; (3) the correlations obtained by grey correlation analysis method between pull-out resistance and plant height, crown diameter, ground diameter, root length and lateral root number were 0.623, 0.669, 0.629, 0.730 and 0.719, respectively, therefore, the main factors affecting the pull-out resistance of the four shrubs are root length and lateral root number. The results of this study have certain theoretical research value and practical guiding significance for scientific prevention of soil erosion and shallow landslides by planting shrubs in the cold and semi-arid loess areas.

Keywords: Xining Basin; loess region; shrub plants; pull-out resistance; regression equation; grey correlation method

收稿日期: 2018-12-14

修回日期: 2018-12-28

资助项目: 国家自然科学基金(41572306); 中国科学院“百人计划”资助项目(Y110091025); 青海省自然科学基金资助项目(2014-ZJ-906)

第一作者: 周林虎(1995—), 男, 青海省民和县人, 硕士研究生, 主要从事地质工程方面的研究工作。E-mail: 18997295192@163.com

通信作者: 胡夏嵩(1965—), 男, 河南省开封市人, 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。E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

植被护坡技术在有效恢复边坡植被和保护环境的同时,亦能起到加固边坡和提高边坡稳定性的作用,因此在公路、河岸及矿山排土场边坡的生态修复和加固方面得到了广泛地应用^[1-3]。已有研究表明,植物根系可对边坡土体起到显著加筋作用,从而提高边坡稳定性,其抗拔力可作为评价植物增强边坡稳定性的重要指标^[4-5],且根—土间摩擦阻力的存在是根系对土体产生加筋、锚固和牵引作用的一个重要原因^[6-7]。因此开展植物原位拉拔试验,对于进一步研究植物根系在增强边坡稳定性方面有重要意义。

国内外学者在有关植物根系抗拔力方面开展了大量试验研究,且取得了丰富研究成果。胡夏嵩等^[8]对种植于青藏铁路沱沱河段路基边坡,生长期为5a的垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)进行野外现场拉拔试验,结果表明抗拔力与其须根数量、株高、根长、总表面积和分蘖数均呈线性关系。王桂尧等^[4]对生长于湖南长沙市,生长期为1a的湿地松(*Pinus elliottii* Engelm.)进行原位拉拔试验,指出其最大拉拔力与根系体积呈线性关系,且随着土壤含水率增加,其拉拔力表现出单调递减或先增大后减小的变化趋势。冯国建等^[9]采用直接施加竖向荷载的方法对生长于云南昆明学院,生长期为2a的黄茅(*Heteropogon contortus* (L.) Beauv.)进行了野外原位抗拔承载力试验,指出黄茅抗拔承载力与其根系质量存在幂函数关系,与其分枝数存在线性函数关系,与其根冠比之间的关系相对不明显。Lai Fern等^[10]通过对种植于新加坡,生长期为4a的20株雨树(*Samanea saman* Merr.)进行原位拉拔试验,结果表明雨树最大阻力弯矩(树干胸高处最大作用力×树干胸高)与其根系整体尺寸、根径和冠幅之间呈正相关关系。Slobodan B等^[11]对生长于西班牙的香根草(*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash)采用10 mm/min的速率进行原位拉拔试验,结果表明在香根草根系拔出位移小于150 mm时,其拔出力随着拔出位移的增加显著性增大,而当拔出位移大于150 mm直至被完全拔出时,其拔出力随着拔出位移的增加上升缓慢,随后趋于稳定状态。

为了进一步说明植物根系在发生滑坡时的牵引和拉伸作用,Schwarz M等^[12]分析了发生滑坡灾害时不同位置处植物根系的受力状态。如图1所示,为浅层滑坡萌生过程中拉裂区(顶嵌体)和压缩区(底嵌体)根部加固作用示意图^[12]。由该图可知,在滑坡发生过程中,不同位置处土体可能处于3种不同的应力状态:剪切、拉伸或压缩。通常,对于降雨引发的滑坡,其主要原因是土体抗剪强度减小,一旦发生局部

破坏,第一个明显的运动迹象是在滑坡上部形成一个张拉裂缝;同时,破坏稳定的土体会使下坡区的侧向压缩应力增加,当累积的下坡侧向应力达到临界值时,土壤可能会发生破坏,形成一个破坏面(或带)^[12]。而植物根系的拉力对滑坡体起到牵引和拉伸作用,其可有效延缓和防止滑坡灾害发生。受到拉力的灌木根系存在2种破坏形式:断裂破坏和拔出破坏^[13],因灌木根系自身抗拉强度相对较高,且考虑到西宁盆地黄土区滑坡、崩塌等地质灾害通常为降水诱发所致,该条件下边坡土体含水率相对较大,使得边坡浅层土体亦变得相对松软,在多数情况下,灌木根系破坏形式均为拔出破坏,因此对植物抗拔力的研究对于进一步分析边坡变形和失稳具有重要实际意义。

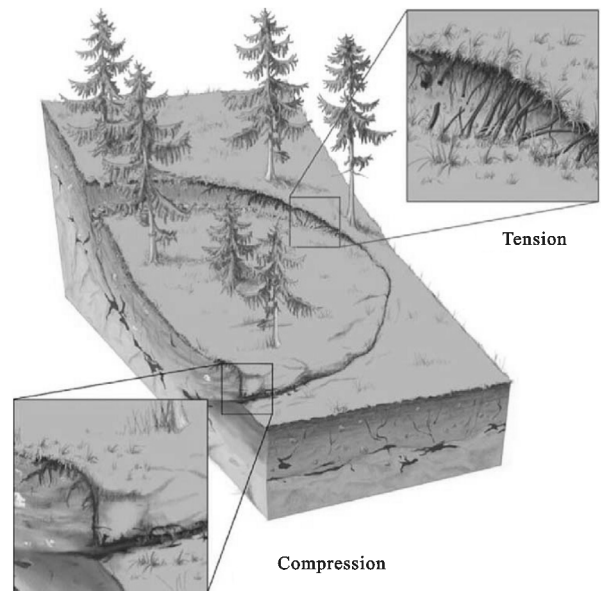


图1 浅层滑坡萌生过程中拉裂区(顶嵌体)和压缩区(底嵌体)根部加固作用^[12]

由上述已有相关研究结果可知,开展植物根系抗拔力试验研究,对于进一步开展植物固土护坡力学机制研究具有重要理论意义。已有研究结果大多集中于气候条件较温和且降水较充足的低海拔地区,且更多的研究主要是探讨植物抗拔力与不同生长参数之间的相关关系,相比较而言,探讨植物抗拔力影响因素,即植物抗拔力与其生长参数之间的关联度及其变化规律尚有待于进一步深入研究。基于上述实际情况,本项研究通过对种植于青藏高原东北部寒冷半干旱黄土区4种生长期为3a的灌木植物进行了原位拉拔试验,得到了其抗拔力值;在此基础上,分析了其抗拔力与株高、冠幅、地径、根长和侧根数等生长参数之间的相关关系;最后通过采用灰色关联分析法,确定了影响4种灌木抗拔力的主要因素。本项研究结果对于高海拔干旱区利用种植灌木植物方法,开展生态修复和增强边坡稳定性方面提供理论参考依据。

1 试验区自然概况

本项研究的试验区位于青藏高原东北部西宁盆地长岭沟流域,其地理位置为北纬 $36^{\circ}36'$,东经 $101^{\circ}42'$,海拔高程约为 $2\,315\sim 2\,570\text{ m}$ ^[14]。区内属寒冷半干旱高原大陆性气候,年平均气温为 $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 386.2 mm ,蒸发量为 $1\,762.8\text{ mm}$,降水主要集中在每年6—9月份,占全年降水量的 $70\%\sim 80\%$,且多以暴雨和阵雨形式出现,具有历时短、强度大、降雨集中等特点^[15-16],在短时间内可形成较大规模洪水,易引发崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害,造成道路堵塞、人员伤亡等情况。

2 材料与方法

2.1 试验材料

依据研究区寒冷半干旱气候条件,本研究筛选出柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王等4种灌木植物作为试验供试种。这4种灌木具有耐寒、耐旱、耐盐碱和耐贫瘠等特性,且根系发达,可作为寒冷半干旱黄土区优势护坡灌木种^[17-22]。本研究自建试验区,边坡为自然土质边坡,土质类型为粉土,坡度为 30° 。4种灌木植物分别种植在4个不同小区,每个种植小区面积为 300 cm (长) $\times 45\text{ cm}$ (宽)。4种灌木均以穴播方式种植,穴间距为 5 cm ,即相邻植株间距均为 5 cm 。如图2所示,为试验区生长期为3a的4种灌木植物生长情况。

2.2 试验方法

(1) 土体密度和含水率试验。为确保所测4种灌木植物生长区边坡土体密度和含水率合理性,分别在距离坡顶和坡低 50 cm 以及坡中3个位置处制取密度和含水率试样,取样深度为地表以下 $0\sim 10\text{ cm}$, $20\sim 30\text{ cm}$ 和 $40\sim 50\text{ cm}$,且每个取样层取3组密度和含水率试样,待试样制取完毕后将密封好,并及时带回实验室开展相应试验。室内试验过程中,按照《土工试验规程》^[23],分别采用环刀法和烘干法测定土体密度和含水率。最后,将距离坡顶和坡低 50 cm 以及坡中3个位置处,同一深度范围土体密度和含水率平均值,作为该种植小区在该深度范围的土体密度和含水率值。

(2) 原位拉拔试验。本研究采用野外原位根系拉拔试验装置,对区内生长期为3a的4种灌木进行原位拉拔试验,测定灌木根系最大抗拔力,并统计其株高、冠幅、地径、根长和侧根数等相关生长参数。原位拉拔试验过程中,选择生长正常的灌木,将灌木地上部分夹持在传感器下端的夹具上,然后通过传感

器对灌木施加垂直向上拉力,直至整株灌木被拔出为止,其被拔出时的抗拔力可直接通过传感器由试验数据采集显示仪显示^[24]。

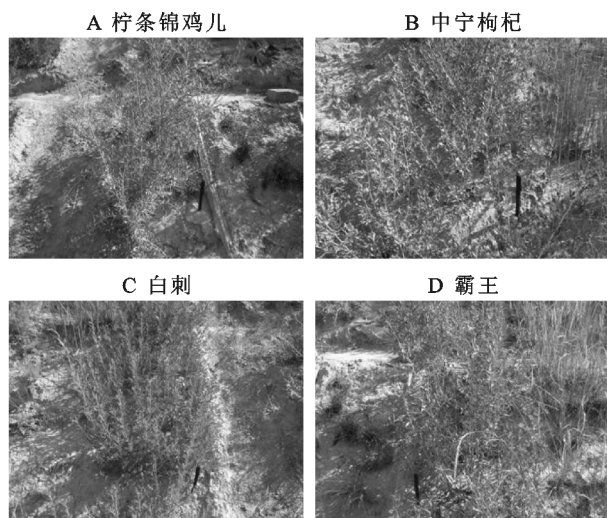


图2 试验区4种灌木植物生长情况

3 结果与分析

3.1 4种灌木林下的土体密度和含水率及其变化特征

由表1可知,随着边坡地表以下取样深度增加,土体密度和含水率均呈逐渐增大的变化规律。且边坡地表以下3个不同深度位置处土体密度平均值由大至小依次为:中宁枸杞(1.410 g/cm^3)、白刺(1.365 g/cm^3)、柠条锦鸡儿(1.336 g/cm^3)、霸王(1.308 g/cm^3),含水率由大至小为:白刺(15.81%)、中宁枸杞(15.21%)、柠条锦鸡儿(15.09%)、霸王(14.54%)。

由边坡地表以下 $5\sim 45\text{ cm}$ 深度位置处,4种灌木土体密度和含水率增加幅度表现出显著差异性,即表现在由地表以下 $5\sim 25\text{ cm}$ 位置处,柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王边坡土体密度增加幅度分别为 4.02% , 7.15% , 4.26% 和 2.18% ,而由地表以下 $25\sim 45\text{ cm}$ 深度位置处,其增加幅度则分别为 1.86% , 3.23% , 2.77% 和 0.84% 。由此分析得出,随着边坡地表以下取样深度的增大,种植4种灌木边坡土体密度增加幅度表现出逐渐减小的变化规律;此外,由边坡地表以下 $5\sim 25\text{ cm}$ 深度位置处,柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王边坡土体含水率增加幅度分别为 14.54% , 20.60% , 17.88% 和 17.18% ,而由地表以下 $25\sim 45\text{ cm}$ 深度位置处,其增加幅度则分别为 5.96% , 7.84% , 5.26% 和 9.40% ,该变化规律与土体密度变化规律表现出一致性。综合分析种植4种灌木边坡土体密度和含水率变化规律得出,边坡浅层土体密度和含水率变化幅度相对较显著,而随着边坡地表以下取样位置深度增加,其变化幅度相对较小。

表 1 试验区种植 4 种灌木植物边坡土体密度和含水率						
植物 名称	密度/(g·cm ⁻³)			含水率/%		
	5 cm	25 cm	45 cm	5 cm	25 cm	45 cm
柠条锦鸡儿	1.293	1.345	1.370	13.480	15.440	16.360
中宁枸杞	1.328	1.423	1.469	13.010	15.690	16.920
白刺	1.315	1.371	1.409	13.870	16.350	17.210
霸王	1.286	1.314	1.325	12.630	14.800	16.190

3.2 4 种灌木植物拔出成功率及其根系特征分析

本项拉拔试验以丛为基础进行,选取正常生长的植株进行拉拔试验。由于生长期为 3 a 的灌木其抗拔力相对较大,拉拔过程中易于出现滑移和断裂,其中,柠条锦鸡儿拉拔试验过程中夹持部位与夹具之间发生滑移现象,而中宁枸杞、白刺和霸王 3 种灌木在拉拔过程中,不同程度地出现滑移和断裂形式,且以滑移形式为主。试验区原位拉拔试验过程中,柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王 4 种灌木均有 10 株被成功拔出时,所重复的次数分别为 32,24,19,16 次,即其拔出成功率分别为 31.25%,41.67%,52.63%和 62.5%。

4 种灌木根系均为主直根型,柠条锦鸡儿^[16]、中宁枸杞^[25]和白刺^[16]属深根型灌木种,主根和侧根较为发达,属于主侧根均衡发育型;而霸王^[16]属浅根型灌木种,主根粗壮但相对不发达,其侧根较为发达,长度超过主根数倍。本项试验所选取的柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王,其平均根长分别为 42.60 cm,57.40 cm,32.20 cm 和 28.10 cm,侧根数分别为 21.9 条,21.8 条,15.7 条和 6.2 条,其中柠条锦鸡儿和中宁枸杞根长相对较长,且侧根数相对较多,且其平均抗拔力由大至小依次为柠条锦鸡儿(256.39 N)、中宁枸杞(222.80 N)、白刺(178.52 N)、霸王(134.84 N)。由此分析可知,柠条锦鸡儿和中宁枸杞根系相对其他 2 种灌木较为发达,说明这 2 种灌木对研究区边坡浅层土体稳定性贡献亦相对较为显著。

3.3 4 种灌木植物抗拔力与其生长参数之间关系

(1) 4 种灌木植物抗拔力与株高之间关系。中宁枸杞平均株高相对较大,分别为柠条锦鸡儿、白刺和霸王的 1.06,1.19,1.59 倍,而其平均抗拔力与株高未表现出一致性变化规律,柠条锦鸡儿平均抗拔力相对较大,分别为中宁枸杞、白刺和霸王的 1.15,1.44,1.90 倍(表 2)。同时,区内 4 种灌木抗拔力与其株高之间呈指数函数关系,且其拟合优度 R^2 为 0.7 以上(表 3),表现出相对较好的拟合关系。该试验结果与李绍才等^[26]对铁仔(*Myrsine africana* Linn.)、黄荆(*Vitex negundo* L.)和羊蹄甲(*Bauhinia* Linn.)等 3 种灌木进行野外原位拉拔试验的结果表现出一致性规律。

柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王其株高分别为 24~72 cm,24~77 cm,24~60 cm 和 21~42 cm,

这说明生长期相同的 4 种灌木其株高存在显著差异,其中中宁枸杞株高变化范围相对较大,而霸王株高变化范围则相对较小。此外,由图 3A 所示的 4 条曲线变化趋势可知,4 种灌木抗拔力均随株高增加而增大,且不同灌木抗拔力随着株高增加,其增长幅度亦存在差异性,主要表现在当中宁枸杞、白刺和霸王株高分别大于 60 cm,40 cm 和 30 cm 时,其抗拔力和株高之间关系曲线斜率显著性增大,即其抗拔力递增幅度显著增大,而柠条锦鸡儿抗拔力与株高关系曲线则呈现出较为平缓状态,即随株高增加,其抗拔力递增幅度未表现出显著变化规律。

(2) 4 种灌木植物抗拔力与冠幅之间关系。通常冠幅指的是苗木南北和东西方向宽度的平均值,是衡量苗木质量和植物生长状况的重要指标^[27]。本项研究所选取的 4 种灌木中白刺平均冠幅相对较大,即分别为霸王、柠条锦鸡儿和中宁枸杞的 1.25,1.71,2.59 倍(表 2)。此外,4 种灌木抗拔力与冠幅之间呈线性函数关系,且随着冠幅的增大,柠条锦鸡儿和中宁枸杞抗拔力递增幅度相对较大,白刺次之,霸王相对较小,说明当冠幅变化相同时,柠条锦鸡儿和中宁枸杞抗拔力变化相对较为显著(图 3B)。

(3) 4 种灌木植物抗拔力与地径之间关系。4 种灌木平均地径由大至小依次为白刺、霸王、中宁枸杞、柠条锦鸡儿,其与平均株高和根长表现出不一致的变化规律;4 种灌木抗拔力与地径之间呈幂函数关系,且拟合优度均为 0.82 以上,霸王抗拔力与地径之间拟合优度相对较高,为 0.883 0(表 3),这与朱清科等(2 002)^[28]对生长于长江上游贡嘎山的峨眉冷杉(*Abies fabri* (Mast.) Craib)和冬瓜杨(*Populus purdomii* Rehd.)2 种乔木原位拉拔试验结果一致。此外,随灌木地径增加,其抗拔力均呈增大变化规律,且其递增幅度由大至小依次为柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺、霸王(图 3C)。由此可知,随着 4 种灌木生长期和地径增加,柠条锦鸡儿和中宁枸杞较其他 2 种灌木相对更能体现出固土护坡优势。

(4) 4 种灌木植物抗拔力与根长之间关系。根长可作为评价植物抗拔力大小的主要因素,且诸多研究结果表明,植株抗拔力随根长的增加呈增大的变化规律^[8,24]。本项研究中,区内 4 种灌木根长由大至小依次为中宁枸杞、柠条锦鸡儿、白刺、霸王,与其株高表现出一致性变化规律,且中宁枸杞平均根长为柠条锦鸡儿、白刺和霸王的 1.35,1.78,2.04 倍(表 2)。此外,由 4 种灌木抗拔力与根长之间的拟合方程式可知,其抗拔力与根长呈线性函数关系,其中柠条锦鸡儿抗拔力与根长之间线性关系相对较为显著,其拟合

优度 R^2 为 0.969 1(表 3)。由 4 条曲线变化趋势可知(图 3D),其曲线斜率由大至小依次为白刺、柠条锦鸡儿、霸王、中宁枸杞,即随着根长增加,白刺抗拔力递增幅度相对较为显著,而中宁枸杞抗拔力递增幅度相对不及前 3 种灌木植物。

(5) 4 种灌木植物抗拔力与侧根数之间关系。中宁枸杞和柠条锦鸡儿平均侧根数基本相同,且中宁枸杞平均侧根数为白刺和霸王的 1.39,3.53 倍(表 2);同时,柠条锦鸡儿、中宁枸杞、白刺和霸王其平均侧根根径依次

为 0.43 mm,0.94 mm,1.10 mm,1.44 mm。由上述分析可知,柠条锦鸡儿侧根数相对较多,其侧根根径相对较小;而霸王侧根数相对较少,但其侧根根径相对较大,因此评价抗拔力影响因素时,要综合考虑其侧根数量及其根径 2 个方面因素对其抗拔力的影响程度。此外,区内 4 种灌木其抗拔力与侧根数均呈线性函数关系(图 3E),该研究结果与李国荣等^[24]对西宁盆地东部地区,生长期为 2 a 的四翅滨藜(*Atriplex canescens*)等 4 种灌木原位拉拔试验结果一致。

表 2 试验区 4 种灌木植物平均生长参数值及抗拔力值

植物名称	平均株高 H/cm	平均冠幅 S/cm	平均地径 D/mm	平均根长 L/cm	平均侧根数 $N/\text{条}$	平均抗拔力 F/N
柠条锦鸡儿	46.30 ± 16.12	12.85 ± 5.47	5.42 ± 0.85	42.60 ± 13.31	21.90 ± 9.98	256.39 ± 107.85
中宁枸杞	49.20 ± 18.72	10.40 ± 4.81	5.62 ± 1.83	57.40 ± 27.88	21.80 ± 13.94	222.80 ± 143.12
白刺	41.50 ± 14.23	26.95 ± 14.45	6.89 ± 1.99	32.20 ± 9.26	16.50 ± 10.59	178.52 ± 132.38
霸王	30.90 ± 6.97	21.50 ± 11.09	6.05 ± 1.38	28.10 ± 10.93	6.20 ± 4.32	134.84 ± 79.21

注:该表采用平均士标准差的写法,其中每种灌木植物样本数量 $n=10$ 。

表 3 试验区 4 种灌木植物抗拔力与生长参数之间拟合方程

植物名称	生长参数				
	株高	冠幅	地径	根长	侧根数
柠条锦鸡儿	$F=91.662\text{e}^{0.021H}$ $R^2=0.7281$	$F=16.822S+40.225$ $R^2=0.7273$	$F=4.535D^{2.367}$ $R^2=0.8255$	$F=7.977L-83.412$ $R^2=0.9691$	$F=10.596n+24.339$ $R^2=0.9620$
中宁枸杞	$F=47.337\text{e}^{0.029H}$ $R^2=0.8007$	$F=27.796S-66.285$ $R^2=0.8714$	$F=11.535D^{1.697}$ $R^2=0.8589$	$F=4.586L-40.434$ $R^2=0.7982$	$F=9.802n+9.110$ $R^2=0.9119$
白刺	$F=18.183\text{e}^{0.050H}$ $R^2=0.8817$	$F=8.515S-50.972$ $R^2=0.8642$	$F=1.014D^{2.602}$ $R^2=0.8425$	$F=12.372L-219.86$ $R^2=0.7493$	$F=11.028n-3.448$ $R^2=0.7777$
霸王	$F=13.653\text{e}^{0.071H}$ $R^2=0.7409$	$F=6.365S-2.010$ $R^2=0.7940$	$F=1.814D^{2.353}$ $R^2=0.8830$	$F=6.655L-52.149$ $R^2=0.8430$	$F=16.795n+30.713$ $R^2=0.8373$

3.4 抗拔力与植株生长参数之间的关联度分析

为进一步分析区内 4 种灌木株高、冠幅、地径、根长和侧根数对其抗拔力影响程度,本项研究采用灰色关联分析法,以株高、冠幅、地径、根长和侧根数作为影响因素,分别计算 4 种灌木抗拔力与 5 种影响因素之间的关联度,从而确定 4 种灌木抗拔力与 5 种影响因素之间的相关程度。本项研究所采用的灰色关联法计算方法如下^[29-33]:

(1) 设参考序列和比较序列:

参考序列:

$$X_0=\{x_0(1),x_0(2),\cdots,x_0(10)\}$$
 (1)

比较序列:

$$X_1=\{x_1(1),x_1(2),\cdots,x_1(10)\}$$
 (2)

$$X_2=\{x_2(1),x_2(2),\cdots,x_2(10)\}$$
 (3)

$$X_3=\{x_3(1),x_3(2),\cdots,x_3(10)\}$$
 (4)

$$X_4=\{x_4(1),x_4(2),\cdots,x_4(10)\}$$
 (5)

$$X_5=\{x_5(1),x_5(2),\cdots,x_5(10)\}$$
 (6)

式中:参考序列 X_0 代表抗拔力值数据列;比较序列 X_1, X_2, \cdots, X_5 分别代表株高、冠幅、地径、根长和侧根数的数据列; $x_i(1), x_i(2), \cdots, x_i(10)$ 分别表示 X_i 中包含的

原始数据,本项研究每组数据列包含 10 项数据。

(2) 数据的无量纲化处理。本项研究中,参考序列和比较序列的量纲数量级均不相同,为避免系统中各因素量纲与量级不同难以进行比较,需对评价指标的原始数据进行预处理,使指标之间可直接进行比较。本项研究采用均值标准化处理方法,其计算公式如下:

$$x'_i(k)=\frac{x_i(k)}{\bar{x_i}} \quad (k=1,2,\cdots,10;i=0,1,\cdots,5)$$
 (7)

式中: $x'_i(k)$ 为无量纲化后的第 i 个数据列中第 k 个数据值; $x_i(k)$ 为第 i 个原始数据列中第 k 个数据值; $\bar{x_i}$ 表示第 i 个数据列中 k 个数据值的平均值。

(3) 关联系数计算。关联系数反映参考序列与比较序列之间每个值的关联程度,计算公式如下:

$$\xi_{oi}(k)=\frac{\Delta\text{min}+\rho\Delta\text{max}}{\Delta\text{oi}(k)+\rho\Delta\text{max}},$$

$$(k=1,2,\cdots,10;i=1,2,\cdots,5)$$
 (8)

式中: $\xi_{oi}(k)$ 为参考数据列与比较数列对应数值的关联系数; $\Delta\text{oi}(k)$ 为参考数据列与比较数据列对应数值的绝对差值; Δmax 为绝对差值中的最大值; Δmin 为绝对差

值中的最小值; ρ 为分辨系数,通常取值为 0.5。

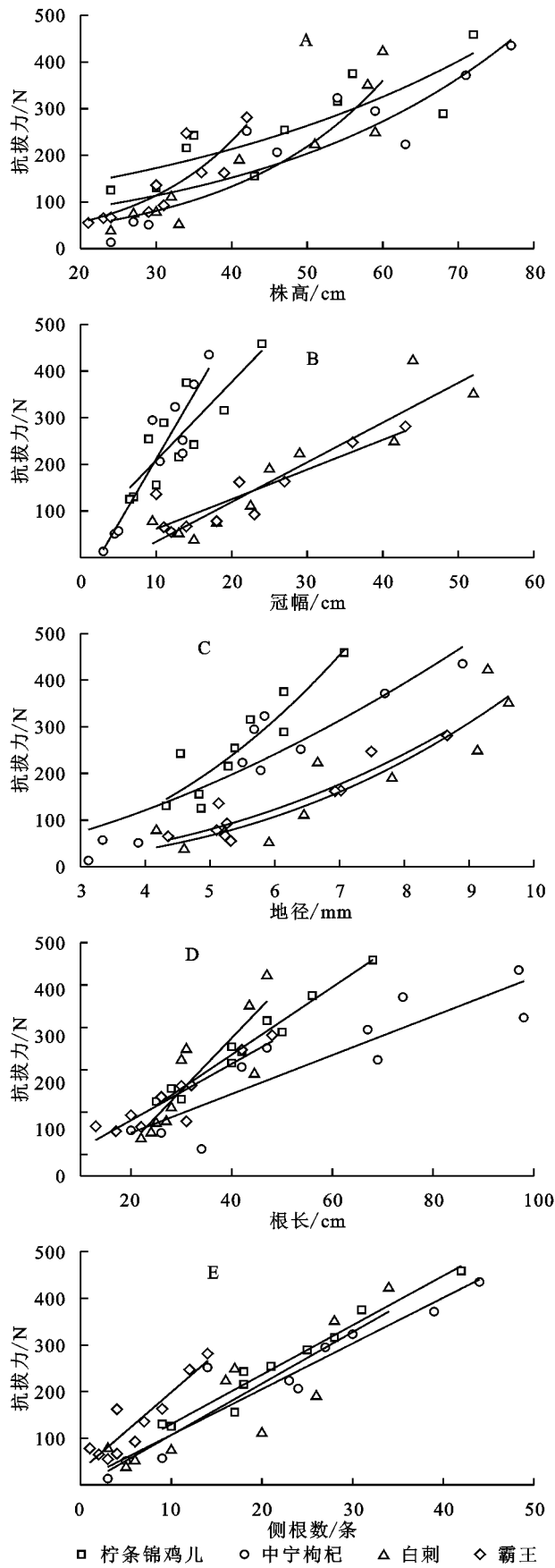


图 3 试验区 4 种灌木植物抗拔力与 5 种生长参数之间关系
(4) 关联度计算。关联度为参考序列与比较序列

之间所有对应数据关联系数的平均值,计算公式如下:

$$\gamma_{oi} = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} \xi_{oi}(k) \quad (k=1,2,\cdots,10; i=1,2,\cdots,5)$$

(9)

式中: γ_{oi} 为比较序列 X_i 与参考序列 X_0 的关联度。

如表 4 所示,为按照以上方法计算得到的 4 种灌木抗拔力与株高、冠幅、地径、根长和侧根数之间的关联度。由该表可知,区内 4 种灌木抗拔力与 5 种影响因素之间的相关程度存在显著性差异,即柠条锦鸡儿、中宁枸杞和白刺抗拔力与根长关联度相对较大,而霸王抗拔力与侧根数关联度相对较大,其原因为霸王主根粗壮但不及前 3 种灌木发达,而其侧根根径相对较大,且其长度可达主根数倍,故受侧根影响亦相对较为显著。此外,白刺与株高、根长、地径和冠幅的关联度均高于其他 3 种灌木,而霸王与侧根数关联度高于其他 3 种灌木;4 种灌木抗拔力与侧根数之间关联度为 0.698~0.746,差异性相对较小,而与其他 4 种影响因素之间关联度差异性较显著。区内 4 种灌木抗拔力与 5 种影响因素之间平均关联度由大至小依次为根长(0.730)、侧根数(0.719)、冠幅(0.669)、地径(0.629)、株高(0.623)。通过上述分析可知,区内 4 种灌木抗拔力受根长和侧根数影响相对较为显著,其可作为评价 4 种灌木抗拔力大小的主要影响因素。

表 4 试验区 4 种灌木抗拔力与株高、冠幅、地径、根长和侧根数之间关联度

植物名称	株高	冠幅	地径	根长	侧根数
柠条锦鸡儿	0.632	0.604	0.591	0.728	0.698
中宁枸杞	0.500	0.671	0.558	0.711	0.707
白 刺	0.687	0.718	0.703	0.802	0.725
霸 王	0.673	0.689	0.662	0.680	0.746
平均关联度	0.623	0.669	0.629	0.730	0.719

4 结 论

(1) 区内 4 种灌木抗拔力由大至小依次为柠条锦鸡儿(256.39 N)、中宁枸杞(222.80 N)、白刺(178.52 N)、霸王(134.84 N);柠条锦鸡儿和中宁枸杞抗拔力显著大于其他 2 种灌木,同时一定程度反映出这 2 种灌木具有相对较显著的固土护坡作用。

(2) 区内 4 种灌木抗拔力与株高呈指数函数关系,与地径呈幂函数关系,与冠幅、根长和侧根数呈线性函数关系;且其与株高、冠幅、地径、根长和侧根数的平均拟合优度分别为 0.778 9,0.814 2,0.852 5,0.839 9,0.872 2,即相对于其他 4 种生长量指标,侧根数与抗拔力之间线性关系相对较为显著。

(3) 通过灰色关联分析法得到,区内 4 种灌木抗拔力受株高、冠幅、地径、根长和侧根数的影响程度存在

较大差异性,柠条锦鸡儿、中宁枸杞和白刺抗拔力与根长关联度相对较大,而霸王抗拔力与侧根数关联度相对较大;此外,4种灌木抗拔力与5种影响因素间平均关联度由大至小为:根长(0.730)、侧根数(0.719)、冠幅(0.669)、地径(0.629)、株高(0.623),即影响区内4种灌木拔出力的最主要因素为根长和侧根数。

参考文献:

- [1] Cazzuffi D, Cardile G, Giofrè D. Geosynthetic engineering and vegetation growth in soil reinforcement applications[J]. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2014, 1(3/4):262-300.
- [2] Stokes A, Douglas G B, Fourcaud T, et al. Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners[J]. *Plant and Soil*, 2014, 377(1/2):1-23.
- [3] 胡夏嵩,李国荣,朱海丽,等.寒旱环境灌木植物根—土相互作用及其护坡力学效应[J].*岩石力学与工程学报*, 2009, 28(3):613-620.
- [4] 王桂尧,胡圣辉,张永杰,等.小乔木根系根土间作用力的室外拉拔试验研究[J].*水文地质工程地质*, 2017, 44(2):64-69.
- [5] Ji X D, Li H C, Zhang A. Anchorage properties at the interface between soil and roots with branches [J]. *Journal of Forestry Research*, 2017, 28(1):83-93.
- [6] Schwarz M, Cohen D, Or D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(2):167-177.
- [7] 刘亚斌,余冬梅,付江涛,等.黄土区灌木柠条锦鸡儿根—土间摩擦力学机制试验研究[J].*农业工程学报*, 2017, 33(10):198-205.
- [8] 胡夏嵩,陈桂琛,周国英,等.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[J].*水文地质工程地质*, 2012, 39(1):107-113.
- [9] 冯国建,朱维伟,杜俊,等.竖向荷载作用下黄茅根系抗拔承载力试验分析[J].*西南大学学报:自然科学版*, 2018, 40(8):154-161.
- [10] Ow L F, Harnas F R, Indrawan I G B, et al. Tree-pulling experiment: an analysis into the mechanical stability of rain trees[J]. *Trees*, 2010, 24(6):1007-1015.
- [11] Mickovski S B, Van Beek L P H. Test data from pullout experiments on vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) grown in semi-arid climate[J]. *Data in Brief*, 2018, 17:463-468.
- [12] 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.
- [13] 肖盛燮,周辉,凌天清.边坡防护工程中植物根系的加固机制与能力分析[J].*岩石力学与工程学报*, 2006, 25(S1):2670-2674.
- [14] 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.
- [15] 孙恺.西宁盆地地下热水循环机制与资源评价[D].西安:西北大学,2015.
- [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(S2):3445-3452.
- [17] 秦晴.晋西北中幼龄柠条人工林细根寿命估计[D].太原:山西大学,2015.
- [18] 程杰,刘永辉,田瑛.宁夏半干旱区柠条锦鸡儿灌木林生长特征[J].*水土保持通报*, 2016, 36(1):332-336.
- [19] 尹志荣,雷金银,桂林国,等.不同滴灌量对不同品种枸杞生长、产量和品质的影响[J].*灌溉排水学报*, 2018, 37(10):28-34.
- [20] 雷玉红,王发科,颜亮东.格尔木地区枸杞生长发育的气象条件及管理措施[J].*青海草业*, 2018, 27(3):49-54.
- [21] 宋晓梅,孙海龙,肖稀,等.13种护坡植物萌发特性研究[J].*种子*, 2014, 33(5):1-7.
- [22] 黄雅茹,刘芳,马迎宾,等.乌兰布和沙漠霸王与白刺秋季光合日变化特征比较[J].*甘肃农业大学学报*, 2016, 51(4):78-83.
- [23] 南京水利科学研究院.土工试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [24] 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.
- [25] 任翠梅,王殿奎,王明泽,等.大庆地区盐渍化土壤状况及盐生植物分类与评价[J].*黑龙江农业科学*, 2009(5):56-60.
- [26] 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.
- [27] 刘玮.试论不同容器和基质处理对乔木胸径和冠幅的影响[J].*内蒙古林业调查设计*, 2018, 41(5):70-72.
- [28] 朱清科,陈丽华,张东升,等.贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J].*北京林业大学学报*, 2002, 24(4):64-67.
- [29] 高明,吴雪萍.基于熵权灰色关联法的北京空气质量影响因素分析[J].*生态经济*, 2017, 33(3):142-147.
- [30] 李桂荣,程珊珊,张少伟,等.葡萄抗寒相关生理生化指标灰色关联分析[J].*东北林业大学学报*, 2018, 6(10):40-47, 53.
- [31] 肖寒.威远区块页岩气水平井基于灰色关联分析的产能评价方法[J].*油气井测试*, 2018, 27(4):73-78.
- [32] 庞园,李志威,曾慧,等.广花盆地浅层地下水环境质量评价[J].*节水灌溉*, 2018(7):56-70.
- [33] 林魁,黄枝,徐永.灰色关联分析法对叶用莴苣生长期光环境的优化[J].*热带作物学报*, 2018, 39(8):1483-1492.