

黄土区 3 种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究

杨路¹, 杜峰^{1,2}, 秦晶晶¹, 程帅¹, 李宏斌¹

(1.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:黄土区水土流失严重,生态护坡是比较推崇的防护手段,特别是灌木具有发达的根系,对含根土体有较为明显的抗剪增强作用,因此,比较自然条件下区域适生优势灌木的根土复合体抗剪强度,对于合理选择固土护坡植物具有重要意义。以黄土区常见的优势乡土灌木达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、中国沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和狼牙刺(*Sophora viciifolia*)为研究对象,野外采用三维土柱挖取灌木的根系,进行不同直径单根抗拉试验和根土复合体的剪切试验。结果表明:(1)达乌里胡枝子、沙棘和狼牙刺的根系集中分布于 0—40 cm 土层中,它们的根长密度、根表面积密度和生物量密度随着土层深度的增加表现出整体递减的趋势。(2)达乌里胡枝子、沙棘和狼牙刺根系的抗拉力(Tensile Resistance, TR)与抗拉强度(Tensile Strength, TS)都表现为关于直径(D)的幂函数(aD^b),其中抗拉力与根径呈正相关($b>1$),而抗拉强度与根径呈负相关($b<1$)。(3)不同灌木根土复合体的抗剪强度在地下分布是不同的,在根际范围内随土层加深,达乌里胡枝子根土复合体的抗剪强度表现出先增加后减少而后增加又减少的趋势,最大抗剪强度的土层是 20—30 cm 和 50—70 cm,沙棘和狼牙刺根土复合体的抗剪强度表现出先增加后减少的趋势,最大抗剪强度的土层分别是 30—50 cm, 0—20 cm。说明灌木的细根可以更好地起到固土护坡的作用,建议在黄土区优先选择达乌里胡枝子和沙棘作为护坡植物,从而为生态护坡提供一些参考。

关键词:灌木; 根系; 抗拉强度; 根土复合体; 抗剪强度

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0295-06

Research on Shear Strengths of Root-Soil Complexes of Three Dominant Shrubs in Loess Region

YANG Lu¹, DU Feng^{1,2}, QIN Jingjing¹, CHENG Shuai¹, LI Hongbin¹

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil erosion in the loess region is serious. Ecological slope protection is a more respected protection method. In particular, shrubs have a developed root system and have obvious shear resistance enhancement to the soil with roots. Therefore, comparing the shear strengths of the root-soil complexes of the regionally suitable dominant shrubs under natural conditions is of great significance for the rational selection of soil-fixing and slope-protecting plants. We took three dominant native shrubs in Loess Region, *Lespedeza dahurica*, *Hippophae rhamnoides* and *Sophora viciifolia* as the research samples, tensile test of single roots with different diameters and shearing test of root-soil columns were conducted. The results showed that: (1) the root systems of *Lespedeza dahurica*, *Hippophae rhamnoides* and *Sophora viciifolia* mainly distributed in the 0—40 cm soil layer; their root length densities, root surface area densities and biomass densities showed overall decrease with the increase of soil depth; (2) the tensile resistances (TR) and tensile strengths (TS) of *Lespedeza dahurica*, *Hippophae rhamnoides* and *Sophora viciifolia* had the power function (aD^b) relations with the diameters (D), the tensile strength was positively correlated with the diameter ($b>1$), while the tensile strength was negatively correlated with the diameter ($b<1$); (3) the shear strengths of different shrubs root-soil complexes were different in the underground distribution; in the rhizosphere, the shear strength of *Lespedeza dahurica* root-soil complex showed a trend of first increasing, then decreasing, then

收稿日期:2021-04-21

修回日期:2021-05-09

资助项目:国家自然科学基金(41771322);国家重点研发计划项目(2017YFC0504504)

第一作者:杨路(1994—),男,山西晋中人,在读硕士研究生,主要从事植物根系构型和抗剪增强的研究。E-mail:xinongyanglu@163.com

通信作者:杜峰(1971—),男,内蒙古乌兰察布人,副研究员,博士,主要从事水土保持和群落生态的研究。E-mail:dufeng@ms.iswc.ac.cn

increasing and decreasing with the increase of soil layer; the maximum shear strength was found in 20—30 cm and 50—70 cm soil layers; the shear strengths of root-soil complexes of *Hippophae rhamnoides* and *Sophora viciifolia* showed a trend of first increasing and then decreasing, the maximum shear strength was found in 30—50 cm and 0—20 cm soil layers, respectively. It can be seen that the fine roots of shrubs can better play the roles in soil consolidation and slope protection. It is suggested that *Lespedeza davurica* and *Hippophae rhamnoides* should be preferentially selected as slope protection plants in the loess area, so as to provide some references for ecological slope protection.

Keywords: shrub; root system; tensile strength; root-soil complex; shear strength

由于黄土丘陵区地形和气候的原因,存在很多潜在滑塌的坡体,使得水土流失成为该地区十分突出的环境问题。目前,这些坡体需要进行稳定性评价、监测与护坡加固。随着国家乡村振兴和西部大开发战略的实施,中西部黄土区的项目建设越来越重视。但由于黄土区地质构造的特点,这些项目建设会严重破坏当地的生态环境,形成滑坡等自然灾害^[1]。为了解决这一问题,在建设会修建很多工程坡体。对于这些工程坡体的坡面防护,在施工上主要采用工程措施,这种施工方式投资大、生态效益低、养护的成本高^[2]。因此,工程坡体应以低成本的生物防护为主^[3]。在今后的水土保持工程设计上护坡植物作为一种环境友好、功能可持续的生物措施,应予大力提倡,所以研究护坡植物对固土护坡的影响就显得尤为重要^[4]。

护坡植物主要是通过不同直径根系与土壤错综复杂连接在一起形成根土复合体,其中细根主要通过内聚力、摩擦力和剪胀力,对土壤起到“加筋”的作用;较粗的深根系主要通过抗拉拔力将土壤“锚定”在较深的土层中^[5-6]。粗根和细根分别通过抗屈服力和抗剪增强作用对浅层潜在剪切面起抗剪增强作用。因而,护坡植物根系的形态指标如根径、地下垂直分布和根长密度等都对边坡加固起到重要影响^[7],而能够量化这些因素对边坡稳定性影响的手段就是进行抗拉和抗剪切的试验,国内外已经有大量研究表明植物根系的抗拉强度和根土复合体的抗剪强度是决定不同植物根系提高坡体稳定性的重要因素^[8-10]。以往学者对灌木根系的力学特性进行了很多研究,其中,王剑敏等^[8]对中亚热带的3种灌木进行了根土复合体抗剪切的研究,其没有分析不同土层剪切强度的变化规律;李佳等^[11]对浅层滑坡多发区的4种典型灌木和赵玉娇等^[12]对寒旱环境下的两种灌木进行了抗剪强度特征分析,他们都是通过在实验室中对重塑土进行根土复合体的抗剪研究,但是重塑土与原状土在抗剪特性方面还是有一些差别^[13]。针对以上情况,本文选取黄土区3种常见的乡土护坡灌木达乌里胡枝子、沙棘和狼牙刺作为研究对象,野外采用三维土

柱挖取灌木的根系,并对其进行单根抗拉试验和基于原状土的根土复合体剪切试验,探寻不同灌木在不同土层对土壤力学特性作用的特征,从而为护坡灌木的选择和配置提供一些建议,以便更合理进行水土保持工程设计。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于陕北安塞区高桥乡(108°6′54″—109°19′23″E, 36°30.45″—37°19′3″N),地处内陆黄土丘区,地貌复杂多样,境内沟壑纵横。全区四季长短不等,干湿分明,年平均气温 8.8℃,年日照时数 2 395.6 h。当地的优势物种有达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、中国沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和狼牙刺(*Sophora viciifolia*)等。

在对当地植被分布进行广泛的野外踏查基础上,在天然坡体的样地选取3个典型的有达乌里胡枝子、中国沙棘和狼牙刺分布的单株,每种选三株作为研究对象,植株所在区域为黄棉土。于2018年和2019年对样地进行预处理:在选定灌木周围3 m内,使用人工拔除和塑料膜上覆土遮阳的方法去除其他草本植物活体根系,2020年6—10月进行正式野外和室内作业试验。

1.2 样品采集

在对植物处理之前,将各个植物地上部分的株高、基径和生物量等进行记录(表1),之后将植物的地上部分进行切除。随后在各个植物根系某个固定方向,沿着植物的基部画一条直线,在直线的一侧,用定制环刀(10 cm×10 cm×10 cm)逐层从上向下取原状土做剖面,直至取到水平和垂直方向上没有目标植物根系的分布为止,将取好的土柱进行方位上的三维坐标标记,并装入不透光的密封袋带回实验室。使用剪切仪(ZJ-2等应变直剪仪,南京宁曦土壤仪器有限公司)配套的环刀(30 cm×2 cm)随机对每层的原状土进行取样,测量当地土壤的含水量。

1.3 样品分析

从上到下算出各土层的自重应力大小分别为0,

1.47,2.94,4.41,5.88,7.35,8.82,10.29,11.76,12.23 kPa 荷载,利用剪切仪对配套环刀内的土样进行直剪试验,测定土壤的抗剪强度。直剪试验结束后,将剪切后的土样和各个土层的土样置于孔径为 0.1 mm 的网筛中去除土壤,从筛选出来的每种植物根系中选取 20~30 个根段并用清水洗干净,用数显的游标卡尺(精度 0.01 mm)测定根系的直径,然后将根段放在拉力仪(东莞市智取精密仪器有限公司生产的 ZQ-

21B 型,精度 0.5 级,分度值 0.001 N)固定夹子中,拉伸的长度统一设置为 5 cm,直到把各个根段拉断,记录单根被拉断时所受的最大抗拉力。将剩余根系进行清洗并把根系上残留水分蒸发掉,随后将所有的根系分批次放在扫描仪(EPSON 生产的 V33)上扫描,获取根系的二维根系扫描图像。最后,将各个土层中根系分别放在烘箱里面烘干,用分析天平(千分之一)测量根系的干重,用来计算根系生物量。

表 1 3 种优势灌木的基本情况

植物种	株高/cm	基径/mm	生物量/ (kg·m ⁻²)	坡度/°	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	含水量/%	总孔隙度/%
达乌里胡枝子	138.4	6.8	0.28	19	1.34	14.5	58.2
沙棘	112.5	5.1	0.54	24	1.36	12.6	56.8
狼牙刺	142.8	10.85	0.98	23	1.35	10.8	57.6

1.4 试验方法

1.4.1 根系形态参数的计算 借助环刀对根系进行逐层取样,3 种灌木根系形态参数计算公式如下:

$$\rho_{\text{根长}}=L_{\text{根长}}/V$$
 (1)

$$\rho_{\text{表面积}}=S_{\text{表面积}}/V$$
 (2)

$$\rho_{\text{根径}}=D_{\text{直径}}/V$$
 (3)

$$\rho_{\text{生物量}}=B_{\text{生物量}}/V$$
 (4)

式中: $\rho_{\text{根长}}$ 表示根长密度; $L_{\text{根长}}$ 表示环刀内根系的长度; V 表示环刀体积; $\rho_{\text{表面积}}$ 表示根表面积密度; $S_{\text{表面积}}$ 表示环刀内根系的表面积; $\rho_{\text{根径}}$ 表示根径密度; $D_{\text{直径}}$ 表示环刀内根系的直径; $\rho_{\text{生物量}}$ 表示根生物量密度; $B_{\text{生物量}}$ 表示环刀内烘干根系的生物量。

1.4.2 单根抗拉强度的计算: 利用拉力仪测不同径级根系的最大抗拉力,用游标卡尺测定拉断时根系的直径,单根的抗拉强度计算公式如下:

$$P_i=\frac{4F_i}{\pi D_i^2}$$
 (5)

式中: P_i 为第 i 根的单根抗拉强度(MPa); F_i 为第 i 根的最大抗拉力(N); D_i 为第 i 根的根径(mm)。

1.4.3 剪应力的计算: 剪应力的计算公式如下:

$$\tau=\frac{CR}{A_0\times 10}$$
 (6)

式中: τ 为剪切力(kPa); C 为测力计率定系数(N/0.01 mm); R 为测力计读数(0.01 mm); A_0 为试样面积(本文中的试样面积为 30 cm²);10 为单位换算系数。

1.5 数据处理

利用 Image-Pro Plus 6.0 对不同植物的根系扫描图像进行形态参数的分析,测定的指标包括根系长度、根系直径和根表面积等^[3]。使用 Excel 2019 对测出的基础数据进行汇总整理,采用 Origin 2019 对最后数据进行做图和回归分析。

2 结果与分析

2.1 3 种灌木根系垂直分布特征

由图 1A 和图 1B 可知,沙棘的根长集中位于 0—40 cm 的土层,占总根长的 72.5%,达乌里胡枝子和狼牙刺相对于沙棘根系分布较深。随着土层深度的增加,达乌里胡枝子和狼牙刺的根长密度与根表面积密度都有整体逐渐减小的趋势,其中达乌里胡枝子在 30—40 cm 的土层深度,最大根长密度为 2.29 cm/cm³,最大根表面积密度为 0.67 cm²/cm³,狼牙刺在 0—10 cm 的土层深度,最大根长密度为 3.905 cm/cm³,最大根表面积密度为 1.09 cm²/cm³。狼牙刺根长密度与土层多项式拟合为 $y=0.0006x^2-0.0754x+4.7817(R^2=0.783,p<0.05)$,随着土层深度的增加,呈先减后增的变化趋势,狼牙刺根表面积与土层拟合为 $y=-0.0078x+1.1401(R^2=0.7914,p<0.05)$,随着土层深度的增加,呈负相关线性逐渐递减的变化趋势。而沙棘根长密度和根表面积密度表现为先增加后减少而后又增又减的特征,在 30—40 cm 的土层深度,最大根长密度为 7.75 cm/cm³,最大根表面积密度为 0.97 cm²/cm³。由图 1C 可知,随着土层深度的增加,达乌里胡枝子根径密度没有显著的变化规律,基本稳定在 0.05 cm/cm³ 左右,而沙棘和狼牙刺的根径密度表现出先增后减的变化趋势,其中在 30—40 cm 的土层深度,沙棘最大的根径密度为 0.103 cm/cm³,狼牙刺最大的根径密度为 0.085 cm/cm³。由图 1D 可知,达乌里胡枝子生物量密度与土层拟合为 $y=305.69x^{-1.98}(R^2=0.9026,p<0.05)$,随着土层深度的增加,呈负相关幂函数下降的趋势,沙棘生物量密度与土层多项式函数拟合为 $y=-0.0005x^2+0.0335x+0.323(R^2=0.6362,p<0.05)$,随着土层深

度的增加,呈先增后减的下降的趋势,狼牙刺生物量密度与土层拟合为 $y = -0.1864x + 15.918 (R^2 = 0.9539, p < 0.05)$,随着土层深度的增加,呈负相关性函数下降的趋势,且 3 种灌木集中位于 0—40

cm 的土层中,生物量密度分别约占总量的 91.34%, 89.92% 和 73.89%,其中在 0—10 cm 的土层深度,达乌里胡枝子和狼牙刺的最大生物量密度分别为 2.49 g/cm^3 和 14.77 g/cm^3 。

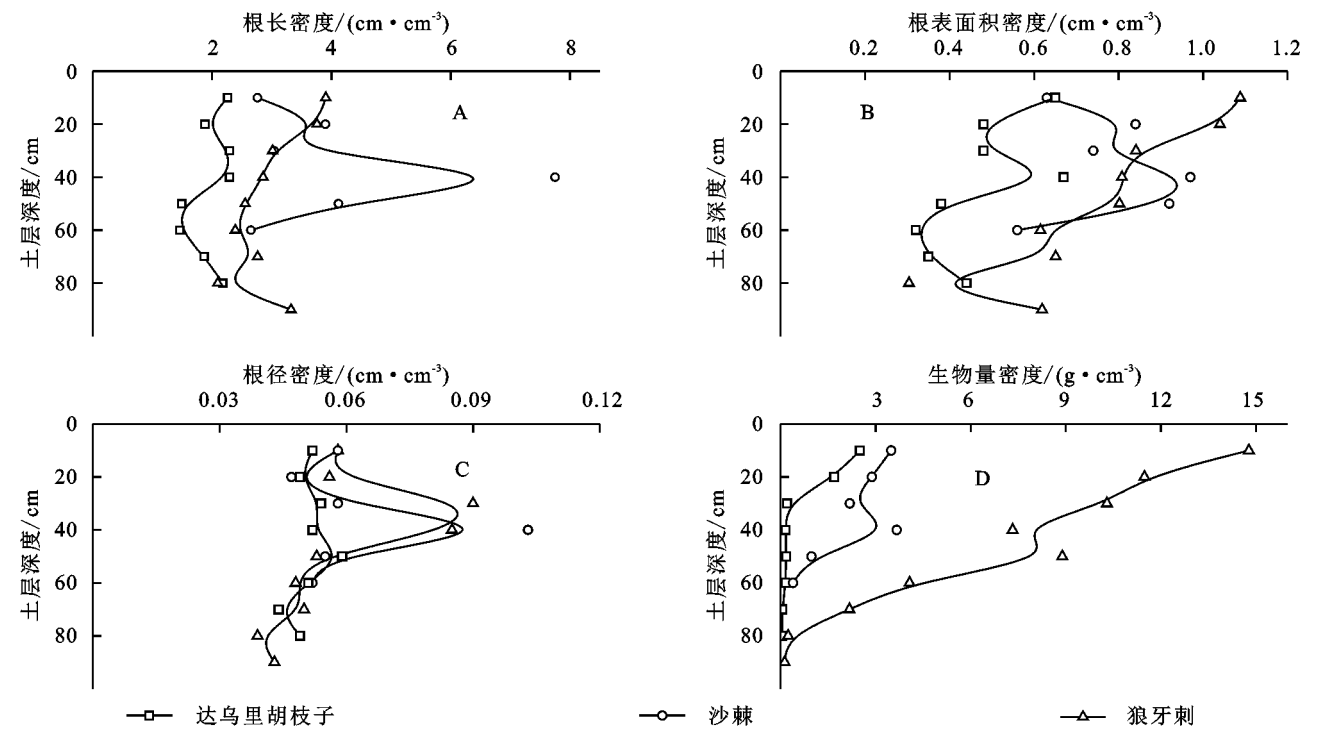


图 1 3 种灌木根系形态参数随土层的垂直变化

2.2 3 种灌木根系单根抗拉力学特征

在试验中测出来的达乌里胡枝子、沙棘和狼牙刺的根径区间分别为 0.16~1.12 mm,0.28~1.16 mm,0.34~2.18 mm,排除在抗拉试验中拉坏的根系,达乌里胡枝子、沙棘和狼牙刺的样本量分别为 21,15,19。从表 2 和图 2A 可以看出,3 种灌木的抗拉力随着直径(D)的增大而增大,且变化的趋势越来越大,均呈现正相关的幂函数关系($aD^b, b > 1$),单根抗拉力的相关系数大于 0.967 9。3 种灌木单根最大的抗拉力区间分别为 2.2~56 N,3.42~18.6 N 和 2.1~48.3 N,在相同根径下,最大抗拉力从大到小为达乌里胡枝子>沙棘>狼牙刺。从表 2 和图 2B 可以得出,3 种灌木的抗拉强度随着直径(D)的增大而减小,且变化的趋势越来越小,均呈现负相关的幂函数关系($aD^b, b < 1$),单根抗拉强度的相关系数大于 0.839 4。3 种灌木单根最大的抗拉强度区间为 56.87~109.47 MPa,17.61~55.25 MPa 和 12.87~41.88 MPa,当相同根径时,它们的最大抗拉强度表现为达乌里胡枝子>沙棘>狼牙刺。

2.3 3 种灌木根际范围内根—土复合体抗剪强度的垂直分布特征

3 种灌木根际范围内垂直土层的含水量在 9%~17%,由图 3 可知,随着土层的深入,达乌里胡枝子根

土复合体的抗剪强度表现出先增加后减少,而后又增加又减少的趋势,在 20—30 cm 和 50—70 cm 的土层深度,相对于其他两个灌木,达乌里胡枝子根土复合体的抗剪强度最大,直到土层 70 cm 以下,达乌里胡枝子根系分布很少,其根土复合的抗剪强度逐渐减小。在黄土区测得素土的抗剪强度为 29.5 kPa,在土层深度为 30 cm 时,达乌里胡枝子根土复合体的抗剪强度最大为 73.16 kPa,较素土提高了 2.48 倍。沙棘根土复合体的抗剪强度随着土层的深入,表现出先增加后减少的趋势,沙棘根土复合体的抗剪强度最大为 76.6 kPa,较素土提高了 2.59 倍,在 30—50 cm 的土层深度,相对于其他两个灌木,沙棘根土复合体的抗剪强度最大。狼牙刺根土复合体的抗剪强度随着土层的深入,表现出逐渐递减的趋势,狼牙刺根土复合体的抗剪强度最大为 65.13 kPa,较素土提高了 2.21 倍,在 0—20 cm 的土层深度,相对于其他两个灌木,狼牙刺根土复合体的抗剪强度最大。

表 2 3 种灌木抗拉力、抗拉强度与根径的回归方程

植物名	回归方程			
	抗拉力/N	R^2	抗拉强度/MPa	R^2
达乌里胡枝子	$y = 45.77x^{1.7379}$	0.9957	$y = 58.306x^{-0.262}$	0.8394
沙棘	$y = 15.194x^{1.3263}$	0.9679	$y = 19.355x^{-0.674}$	0.8862
狼牙刺	$y = 13.878x^{1.3642}$	0.9701	$y = 17.679x^{-0.636}$	0.8756

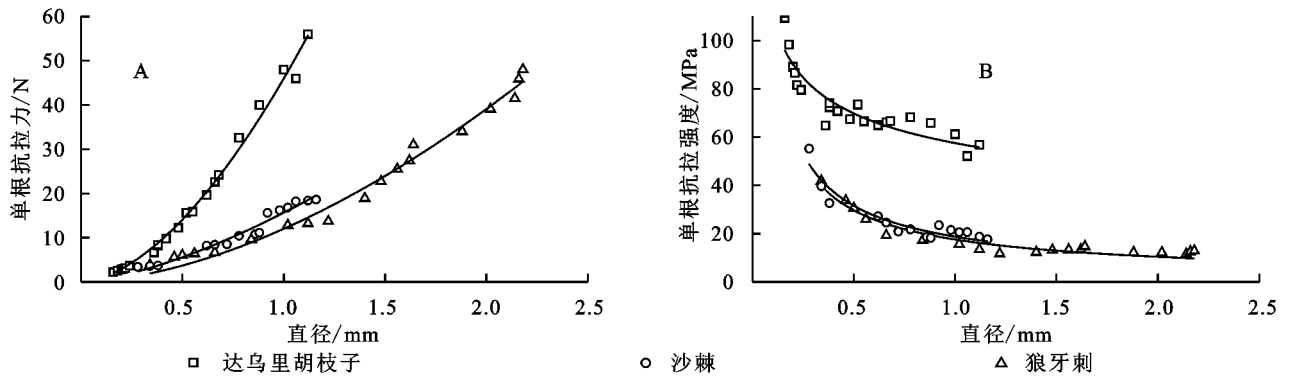


图 2 3 种灌木抗拉力和抗拉强度与根径的相关关系

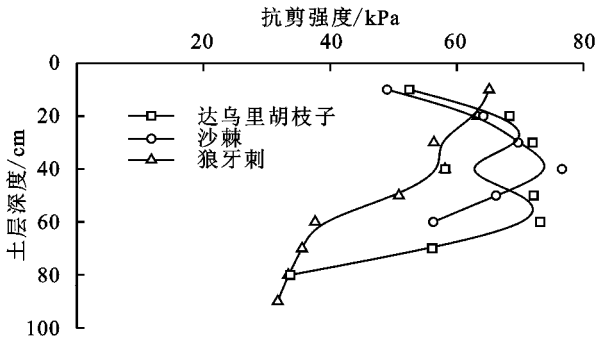


图 3 3 种灌木根际范围内根土复合体抗剪强度垂直分布特征

3 讨论

不同护坡植物的根系形态特点,可以通过根系的形态指标来反映,其中包括根长、根表面积、根径等。根长越长可以增加根系的拓展延伸能力,更大的总表面积可以增加根系土体的接触面积,更长的根系直径可以提高根系锚定土壤的能力,根长、根表面积、根径与固土护坡的能力密切相关,有研究发现根长密度和根表面积密度可以很好地解释根系的固土机理^[14-15]。本研究对 3 种灌木根系的形态参数进行研究,发现 3 种灌木主要分布在 0—40 cm 的土层中,分别约占总生物量密度的 91.34%,89.92%和 73.89%,这个结论和史敏华等^[16]的研究结论一致。随着土层深度的增加,达乌里胡枝子和狼牙刺的根长密度和根表面积密度都呈逐渐减小的趋势,且沙棘和达乌里胡枝子在 30~40 cm 的土层深度,都达到最大的根长密度和最大根表面积,达乌里胡枝子的分别为 2.29 cm/cm³和 0.67 cm²/cm³,沙棘的分别为 7.75 cm/cm³,0.97 cm²/cm³,说明沙棘和达乌里胡枝子在 30~40 cm 的土层深度中分布比较集中,对土壤起到加固的作用最大。狼牙刺的根长密度随着土层深度的增加,呈先减后增的变化趋势,3 种灌木中狼牙刺的分根较深,根系分布深度不同也直接影响到固土护坡作用的范围^[17]。沙棘和狼牙刺的根径密度表现出先增后减的变化趋势,其中在 30~40 cm 的土层深度,沙棘最大的根径密度为 0.103 cm/cm³,狼牙刺最大的根径密

度为 0.085 cm/cm³。说明沙棘和狼牙刺在这个深度内,对土壤的锚定作用最好^[18]。

植物根系的单根抗拉力和抗拉强度可以反映其对边坡稳定性的贡献大小,根系对边坡的力学特性主要表现在浅根系“加筋作用”和深根系“锚定”的作用,植物的抗拉特性受多种因素影响,其中包括根系形态、木质素和纤维素的含量、根系直径等^[19]。3 种灌木的抗拉力随着根径(D)的增大而增大,且变化的趋势越来越大,均呈现正相关的幂函数关系($aD^b, b > 1$),单根抗拉力与直径拟合时的相关系数都大于 0.967 9,说明拟合的效果都很好,造成上述这种情况主要是粗根相比较细根横截面积的迅速增加导致的,这与薛杨^[20]、冯国建^[21]等的研究结论相一致。3 种灌木的抗拉强度随着根径(D)的增大而减小,且变化的趋势越来越小,均呈现负相关的幂函数关系($aD^b, b < 1$),单根抗拉强度的相关系数大于 0.839 4,在相同根径下,最大抗拉强度从大到小为达乌里胡枝子>沙棘>狼牙刺,这与李佳等^[11]的研究结论相似。表明根径较小的达乌里胡枝子根系有更多的细根,可以更好地吸附土壤,增加了根系的抗拉强度,同时也反映出细根和毛根提供的抗拉强度要大于粗根系,这个主要是因为直径较小的根系,与土壤颗粒接触的更加充分,相比于狼牙刺的粗根在产生位移时会产生更大的摩擦力,在产生剪切时细根往往会拉断,但是细根的柔韧性更好,而直径较大的根系容易被整体拔出,而产生的抗拉强度很小^[22-23]。

根系在土壤中起到明显的加筋作用,使得土壤的抗剪强度显著增加,从而让根系与土壤形成互相作用的整体,既土壤—根系复合体^[24]。根土复合体的抗剪强度是衡量边坡稳定性的重要因素,其值越大根系的抗剪切能力越强,越有助于对坡体的稳固^[11]。在本研究中,可以发现 3 种灌木都显著提高了根土复合体的抗剪强度,可以有效提高坡体的稳定性,根系的存在对于提高浅层坡体的稳定性作用更加的明显^[25]。达乌里胡枝子根土复合体的抗剪强度随着土

层的深入,表现出先增加后减少,而后又增加又减少的趋势,在20—30 cm和50—70 cm的土层深度,相对于其他两个灌木,达乌里胡枝子根土复合体的抗剪强度最大。由于达乌里胡枝子的根系主要分布在地下30 cm以内,所以在这个深度区间达乌里胡枝子根土复合体的抗剪强度逐渐增加,而到了40 cm以下的土层深度,随着达乌里胡枝子根系毛细根的增加,又会使其根土复合体的抗剪强度增加,直到土层70 cm以下,达乌里胡枝子根系分布很少了,其根土复合体的抗剪强度比较小,进而也说明细根对于土壤的抗剪作用更大一些^[26]。在30—50 cm的土层深度,相对于其他两种灌木,沙棘根土复合体的抗剪强度最大,在本文中沙棘根系分布的土层最浅,是由于沙棘的水平根系发达,且本文中研究的沙棘是一个分株没有明确主根,在垂直方向上根系分布有限,同时在浅层坡体根系分布也相对较细,所以也很好地提高了土壤的抗剪强度。狼牙刺根土复合体的抗剪强度随着土层的深入,表现出逐渐递减的趋势,在0—20 cm的土层深度,相对于其他两个灌木,狼牙刺根土复合体的抗剪强度最大。对比可以发现不同灌木最大抗剪强度的土层深度不同,这个和植物的种属性有关,使得不同灌木根系的构型特点和分根类型有很大的差别。

4 结论

(1) 本文通过三维坐标土柱挖掘法探究达乌里胡枝子、沙棘和狼牙刺根系在垂直方向上分布的特点,研究发现3种灌木主要分布在0—40 cm的土层中,生物量密度分别约占总量的91.34%,89.92%和73.89%,沙棘和狼牙刺的根长密度、根表面积密度和生物量密度大于达乌里胡枝子,3种灌木的根长密度、根表面积密度和生物量密度随着土层深度的增加而表现出整体递减的趋势。

(2) 达乌里胡枝子、沙棘和狼牙刺的抗拉力随着根径的增大而增大,且变化的趋势越来越大,均呈现正相关的幂函数($aD^b, b>1$)关系,不同灌木的抗拉强度随着根径的增大而减小,且变化的趋势越来越小,均呈现负相关的幂函数关系($aD^b, b<1$),当根径相同时,3种灌木的最大抗拉强度表现为达乌里胡枝子>沙棘>狼牙刺,说明达乌里胡枝子和沙棘的细根具有更好的固土护坡能力。

(3) 3种灌木都提高了根土复合体的抗剪强度,可以有效提高坡体的稳定性,且不同灌木根土复合体的抗剪强度在地下垂直分布是不同的。随着土层的深入,达乌里胡枝子根土复合体的抗剪强度,表现出先增后减而后又增又减的趋势,沙棘根土复合体的抗

剪强度表现出先增后减的趋势,狼牙刺根土复合体的抗剪强度表现出逐渐递减的趋势。不同灌木根土复合体最大抗剪强度的土层都不相同,达乌里胡枝子的土层深度区间是20—30 cm和50—70 cm,沙棘的土层深度是30—50 cm,狼牙刺的土层深度是0—20 cm。从不同灌木根土复合体的抗剪强度垂直分布特征来看,达乌里胡枝子和沙棘的根系更显著提高了土体的抗剪强度,建议在黄土区生态护坡中优先选择达乌里胡枝子和沙棘,可以为护坡植物的选择和配置提供一些参考。

参考文献:

- [1] 梁亚红.黄土山区公路滑坡稳定性分析与防治研究[J].建材与装饰,2020(12):238-239.
- [2] 张家明,陈积普,杨继清,等.中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J].水土保持学报,2019,33(5):1-7.
- [3] 赵东晓,蔡建勤,土小宁,等.黄土高原水土保持植被建设问题及建议[J].中国水土保持,2020(5):7-9.
- [4] Jiao Z, Wang D, Xie H, et al. Experimental analysis of shear strength of undisturbed soil in leucaena forest in Jiangjia Ravine, Yunnan, China[J]. Journal of Mountain Science, 2010,7(4):386-395.
- [5] 唐娴.公路边坡植物防护的水土保持机理[J].水土保持研究,2006,13(5):64-65.
- [6] 曹波,曹志东,王黎明,等.植物根系固土作用研究进展[J].水土保持应用技术,2009(1):26-28.
- [7] 周云艳,陈建平,王晓梅.植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J].生态环境学报,2012,21(6):1171-1177.
- [8] 王剑敏,沈烈英,赵广琦.中亚热带优势灌木根系对土壤抗剪切力的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(2):47-50.
- [9] Ali F H, Osman N. Shear strength of a soil containing vegetation roots[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(4):587-596.
- [10] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture[J]. Catena, 2007,69(3):197-205.
- [11] 李佳,汪霞,贾海霞,等.浅层滑坡多发区典型灌木根系对边坡土体抗剪强度的影响[J].生态学报,2019,39(14):5117-5126.
- [12] 赵玉娇,胡夏嵩,李华坦,等.寒旱环境灌木根系增强边坡土体抗剪强度特征[J].农业工程学报,2016,32(11):174-180.
- [13] 张晓明,王玉杰,夏一平,等.重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究[J].农业工程学报,2006,22(11):6-9.
- [14] 王月,杜峰,周敏,等.陕北林草混交根土复合体抗剪强度研究[J].水土保持研究,2018,25(2):213-219.

- [28] 王越,宋戈,吕冰.基于多智能体粒子群算法的松嫩平原土地利用格局优化[J].资源科学,2019,41(4):729-739.
- [29] Guan D J, Li H F, Inohae T, et al. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model [J]. Ecological Modelling, 2011,222(20):3761-3772.
- [30] Meiyappan P, Dalton M, O'Neill B C, et al. Spatial modeling of agricultural land use change at global scale [J]. Ecological Modelling, 2014,291:152-174.
- [31] Letourneau A, Verburg P H, Stehfest E. A land-use systems approach to represent land-use dynamics at continental and global scales[J]. Environmental Modelling and Software, 2012,33:61-79.
- [32] 余珮珩,冯明雪,刘斌,等.顾及生态安全格局的流域生态保护红线划定及管控研究:以云南杞麓湖流域为例[J].湖泊科学,2020,32(1):89-99.
- [33] 刘斌,白少云,余珮珩,等.结合高分遥感和多源数据的高原湖泊流域土地利用分析[J].测绘通报,2019(12):77-82.
- [34] Yang C, Li Q Q, Chen J Y, et al. Spatiotemporal characteristics of land degradation in the Fuxian Lake Basin, China: Past and future[J]. Land Degradation & Development, 2020,32(16):2446-2460.
- [35] Chen Y M, Li X, Liu X P, et al. Modeling urban land-use dynamics in a fast developing city using the modified logistic cellular automaton with a patch-based simulation strategy[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2014,28(2):234-255.
- [36] Li X C, Le Y, Sohl T, et al. A cellular automata downscaling based 1 km global land use datasets (2010—2100) [J]. Science Bulletin, 2016, 61 (21): 1651-1661.
- [37] 张云鹏,孙燕,陈振杰.基于多智能体的土地利用变化模拟[J].农业工程学报,2013,29(4):255-265.
- [38] Li C C, Gong P, Wang J, et al. The first all-season sample set for mapping global land cover with Landsat-8 data[J]. Science Bulletin, 2017,62(7):508-515.
- [39] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017,168:94-116.
- [40] 吴欣昕,刘小平,梁迅,等. FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J].地球信息科学学报,2018,20(4):532-542.
- [41] 白少云,刘斌,余珮珩,等.融合多尺度影像数据的杞麓湖流域景观格局分析[J].测绘通报,2020(2):90-95.
- [42] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-650.

~~~~~  
(上接第 300 页)

- [15] 李建兴,何丙辉,湛芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
- [16] 史敏华,王棣,李任敏.石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J].山西林业科技,1994(1):17-19.
- [17] 赵倩,伍红燕,宋桂龙,等.胡枝子和荆条不同植物配置的根系垂直空间分布特征[J].草业科学,2019,36(9):2183-2192.
- [18] 潘天辉,杜峰,王月.陕北黄土区护坡植物根系分布和抗剪增强分析[J].水土保持研究,2020,27(3):357-363,371.
- [19] 周萍,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡耕地草地本地埂植物根系分布及抗拉力学特征[J].水土保持通报,2017,37(3):1-6.
- [20] 薛杨,赵洋毅,王克勤,等.磨盘山典型灌草根系抗拉力学特性及其影响因素研究[J].西南林业大学学报:自然科学,2019,39(2):99-107.
- [21] 冯国建,沈凡,王世通.护坡植物根系分布特征及抗拉强度研究[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2013,30(2):115-118.
- [22] 徐洪雨,王英宇,宋桂龙,等.华北土石山区公路边坡常见植物根系地下分布特征[J].中国水土保持科学,2013,11(2):51-58.
- [23] 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2):3445-3452.
- [24] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰.林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J].北京林业大学学报,2006,28(5):67-72.
- [25] 周霞,魏杨,李东崃,等.黄土区紫花苜蓿根系对土体抗剪性能的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(2):53-59.
- [26] 赵岩,周文渊,孙保平,等.毛乌素沙地3种荒漠灌木根系分布特征与土壤水分研究[J].水土保持研究,2010,17(4):129-133.