

陕北黄土区护坡植物根系分布和抗剪增强分析

潘天辉¹, 杜峰^{1,2}, 王月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:林草一体生态护坡是广泛应用的边坡防护模式,科学选择护坡植物并且合理有效的空间配置对提高坡体稳定性具有重要意义。试验选取黄土区自然坡体常见护坡植物小叶杨和白羊草为研究对象,利用三维坐标采样法,通过洗根—扫描—图像分析—根—土复合体抗剪增强试验,研究二者根系形态分布以及相应的根土复合体的抗剪增强作用,以为护坡植物选择和栽植模式提供依据。结果表明:(1)根长、根表面积以及根系直径与距离小叶杨主根距离的关系均表现为指数函数显著下降($p < 0.05$);其与土层深度的关系同样表现为指数函数显著下降($p < 0.05$)。植物根系主要分布在 0—60 cm 的土层深度中,根长和根表面积二者分别占其总量的 75.49%,73.92%。(2)根—土复合体的根长和根表面积与残余抗剪强度均表现为线性函数显著上升($p < 0.05$)。在 0—30 cm 的土层深度中,根—土复合体的最大抗剪强度较素土提升了约 11 倍,在 40—60 cm 的土层深度,最大抗剪强度较素土提升了 8~9 倍,在 70—100 cm 的土层深度中,其最大抗剪强度约为素土的 3 倍。因此说明小叶杨和白羊草作为护坡植物具有较好的固土能力和抗剪能力,是较合理的护坡植物选择以及合适的植物配置方式,这对于边坡的生态防护也具有一定的指导意义。

关键词:根系形态分布; 抗剪强度; 根—土复合体; 护坡植物

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0357-07

Analysis of Root Distributions and Shear Strengths of Slope Protection Plants in the Loess Region of Northern Shaanxi

PAN Tianhui¹, DU Feng^{1,2}, WANG Yue¹

(1.College of Forestry, Northwest of 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: Forest-grass integrated ecological slope protection is a widely used slope protection mode. Scientific selection of slope protection plants and rational and effective spatial allocation are of great significance to improve slope stability. In this experiment, *Populus simonii* Carr. and *Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng, the common slope protection plants in the Loess region, were selected as the research samples. By using three-dimensional coordinate sampling method, root-washing-scanning-image analysis and root-soil composite shear-strengthening test, the root morphology distributions and the corresponding shear-strengthening effects of root-soil composite were examine in order to provide the basis of selection and planting pattern of for slope protection plants. The main results were as follows. (1) The relationships between root length, root surface area, root diameter and distance from the main root of *Populus simonii* Carr. show a significant decrease which can be described by exponential function ($p < 0.05$); the relationship between root length and soil depth also showed a significant decrease which can be described by exponential function ($p < 0.05$). Root length and root surface area in depth of 0—60 cm account for 75.49% of and 73.92% of the total values, respectively. (2) The root length, root surface area and residual shear strength of root-soil composite increased linearly ($p < 0.05$). The maximum shear strength of root-soil composite is about 11 times higher than that of pure soil in the depth of 0—30 cm, 8~9 times higher than that of pure soil in the depth of 40—60 cm, and 3 times higher than that of pure soil in the depth of 70—100 cm. Therefore, as the slope protection plants, *Populus simonii* Carr. and *Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng, have better abilities of soil consolidation and shear resistance, and are more reasonably selected slope protection plants and the appropriate plant allocation

收稿日期:2019-07-25

修回日期:2019-08-22

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

第一作者:潘天辉(1993—),男,内蒙古阿拉善盟人,硕士研究生,研究方向:植物生理生态。E-mail:1406234356@qq.com

通信作者:杜峰(1971—),男,内蒙古乌兰察布人,博士,副研究员,主要从事植物种群、群落生态及生理生态的研究。E-mail:dufeng@ms.iswc.ac.cn

patterns, which has a certain guiding significance for slope ecological protection.

Keywords: root morphological distribution; shear strength; root-soil composite; slope protection plants

黄土高原沟壑纵横,坡体众多,其中修建高等公路经陕西省境内的部分国道主干线中,约 70% 的里程需经过黄土台塬、黄土高原沟壑区和黄土丘陵沟壑区^[1-2]。在此修建高速公路时,开挖过程中常会形成大量的人工坡体,许多居民点距离坡体较近,面临坡体坍塌的风险较大,威胁着居民生命和财产的安全。据调查统计,截至 2008 年,黄土区已建公路高边坡数量共有 250 余处,其中属于高速公路的有 130 余处,在公路高边坡中,坡高在 $20\text{ m} < H \leq 30\text{ m}$ 的有 65 处,坡高在 $30\text{ m} < H \leq 40\text{ m}$ 的有 54 处,坡高在 $40\text{ m} < H \leq 50\text{ m}$ 的有 40 处,坡高在 $50\text{ m} < H \leq 60\text{ m}$ 的有 28 处,大于 60 m 的有 29 处,小于 20 m 的有 35 处,有 1/3 以上的公路边坡高度大于 50 m^[3]。在 2005 年公布的《国家高速公路网规划》总里程达 8.5 万 km 国家高速公路网中,西部待建里程长达 2.4 万 km。因此黄土区公路高边坡未来的稳定性以及坡体的防护将直接影响到公路安全的运行和国家对西部基础建设投资的效益。

高速公路边坡产生滑塌主要是因为坡体失稳,坍塌的因素主要有坡体坡度较大、坡体发生变形、土壤本身、力学性能以及土壤含水量等^[4]。目前常见的边坡防护手段主要有两种,即工程防护和生态防护。其中生态防护具有经济、长效以及可持续等优点,同时也是符合国家“十一五”期间提出的“生态、环保、绿色、高效”的要求^[5]。但目前生态防护还存在一些问题,如在植被恢复的初期,植物配置上常采用单一或混合草种的情况;植物选择上过多的选择国外草种,对于乡土草种的选择利用和开发较少;工程上生态防护技术的适应性研究还不够;缺少对生态防护的较系统的、全面的认识^[6]。

近年来,我国许多学者已投入较大精力在植物根系与土壤结合形成根—土复合体来提高边坡坡体稳定性等方面的研究。王金霞等^[7]认为植物根系深入到土壤中后,会与土壤中的各个物质充分的接触,二者会形成一个有机复合体,这种方式构成了植物根系的固土性。杨亚川等^[8]人提出了“土壤—根系复合体”的概念,即把根系与土壤视为一个整体,同时将这种根—土复合体能够抵抗剪切破坏的极限能力称为土壤—根系复合体的抗剪强度。在护坡的过程中,主要是采用植被护坡为主同时辅以工程技术的护坡形式,其护坡机理是利用植物的根系穿插在土壤中形成对土体类似于“加筋”和“锚固”的作用,从而达到护坡的

目的^[9]。Operstein V 等^[10]认为植物的根系密度、根径、长度以及根系在地下分布越深,其保持水土的能力越强,植物抗旱、抗寒等抗逆性也会越强。Roboert 等^[11]学者也通过试验发现,植物的根系作用和植物对土壤饱和度指标的改变会对边坡起到很强的加固作用。Diti Heng 等^[12]在研究了不同种类的植物根系对土壤的作用后,发现不同的植物根系在土壤中相互交错和穿插后,土壤的抗剪强度会明显提高,且由于草本植物的根系密度较大,根系交错生长,数量庞大,因此有草本科植物的根土复合体的土壤抗剪强度会明显高于只有木本科植物的根土复合体。由于草本植物根系主要分布在坡体的浅层部分,其根系可以对表层土壤固持,起到了增加坡体的抗剪强度和坡体稳定的作用;木本植物根系较粗壮,深入土层较深,对土壤进行锚固,使得根—土复合体的抗剪强度显著增强^[13]。在生态护坡中通常利用木本植物深根的锚固作用以及草本植物浅根加筋作用来稳固边坡^[14]。

在生态防护中,植物根系指标是坡面滑塌的主要因素,且植物的根系指标,如根长、根表面积、根直径等,对于植物是否适应边坡具有重要的理论指导意义。须根系植物一般适于种植在浅坡,在植物配置上一般采用直根系的木本植物和须根系的草本植物混配方式,其次还要考虑到植物的适应性。植物的适应性也是本试验的研究内容。许多研究均以重塑土为研究材料,重塑土不适于当地的实际研究情况,研究略有偏差。本试验选取当地植物白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng.) 和小叶杨(*Populus simonii* Carr) 的原状土作为研究对象,能够较准确的反映乡土植物与土壤的内在关系。除需考虑其生态适应性外,从其功能性上还需考虑护坡植物根系三维分布,及其在根际范围内的抗剪增强作用。土壤抗剪增强能力是边坡稳定的控制性指标也是机械力学最主要的因素。本试验通过对护坡植物根系抗剪强度的分布以及在根系范围内的抗剪增强做研究,并对选择合适的护坡植物类型以及配置方式提出探讨,以期为林草一体化边坡护坡技术的开发与利用提供理论依据,对陕北地区的防治水土流失,提高浅层坡体稳定性和生态环境的恢复提供一定的理论基础^[15]。

1 材料与方 法

1.1 试验样地概况

试验样地位于陕西省延安市安塞区高桥乡(108°

5°44′—109°26′18″E, 36°30′45″—37°19′31″N), 安塞区属陕北黄土高原丘陵沟壑地区, 地貌复杂多样, 境内沟壑纵横、川道狭长、梁峁遍布, 由南向北呈梁、峁、湾、坪、川等地貌, 其特点是山高、坡陡、沟深。气候特点是四季长短不等, 干湿分明。年平均气温8.8℃(极端最高温36.8℃, 极端最低温-23.6℃), 平均年降水量505.3 mm(最多为645 mm, 最少为296.6 mm), 年日照时数为2 395.6 h, 全年无霜期157 d。试验区植被种类较多, 覆盖面积较大, 主要有小叶杨(*Populus simonii* Carr), 刺槐(*Robinia pseud-acacia* L.), 沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.), 沙打旺(*Leguminosae*), 黑麦草(*Lolium perenne* L.), 白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng.), 达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)以及早熟禾(*Poa annua* L.)等。

1.2 样品的采集与测定

于安塞区高桥乡荒山小叶杨—白羊草群落内选取一株小叶杨为主要试验对象, 在小叶杨植株1 m范围内生长有白羊草三株, 无其他植物生长。在当年7月—10月期间, 利用方形取样器(10 cm×10 cm×10 cm)从上到下, 从内向外取原状土, 带回实验室进行根系形态分析, 根系抗拉强度和根—土复合体室内直剪试验。具体试验过程如下: (1) 试验对象地上个体大小取样测量。量取小叶杨株高和基径, 分别为4.5 m和10 cm。根据解析木公式估算小叶杨生物量, 三株白羊草地上生物量为0.36 kg/m²。(2) 原状土取样。使用方形取样器以小叶杨个体基部为正方形一个端点, 向下向外取原状根—土复合体, 取样间隔10 cm, 向下取样深度到100 cm, 向外取样长度100 cm。共取样10×10×10个, 样品用塑料薄膜密封, 带回实验室以备分析。除每层原状土随机留下10个样用于根—土复合体剪切试验外, 其余90个样先洗根, 进行根系形态分析和力学特征。(3) 洗根后进行根系形态分析和根系抗拉力学特征测定。将方形原状土样置于直径为1 mm的网筛上冲洗并拣去其他草本杂质, 直到只剩活体根系, 晾干后称重(天平, 感量), 使用扫描仪(MICROTEK生产的ScanMaker, 6180)在6 200×3 400 dpi下进行灰度扫描, 以备图像分析。(4) 根—土复合体剪切试验。在方形原状土样中用剪切仪配套环刀仔细取样, 转入剪切杯, 以备剪切试验, 测定不同法向压力条件下抗剪强度。取样后的原状土样称湿重, 然后烘干称干重, 计算剪切时原状土含水率。之后利用手动剪切仪(ZJ-2型等应变直剪仪, 南京宁曦土壤仪器有限公司, 量力环率定系数为1.801 kPa/0.01 mm, 剪切杯规格: 底面积30 cm², 高2 cm), 对原状

土进行剪切, 并测得其抗剪强度值。

1.3 数据处理与统计分析

1.3.1 植物根系形态分布 使用图像分析软件Image Pro Plus 6.0分析并计算根系根长、根表面积以及直径。在1 m³的正方体土样中, 每隔10 cm选取原状土样本, 并将样本进行处理, 测其样本根长、根表面积以及直径数据, 分别求其平均值。使用Origin 9.0软件绘制植物根系形态分布图。

1.3.2 小叶杨—白羊草混合植被根—土复合体实测抗剪强度分布 根据小叶杨—白羊草试验对象根际范围内随机位置取样测得的抗剪强度, 使用Origin 9.0软件绘制抗剪强度分布图。且在分析林草复合体抗剪强度时, 由于水平方向上, 植物根系的分布情况受当地环境、地形、水分等的影响较大, 其结果有较大局限性, 因此研究垂直方向植物根系抗剪强度的分布更具有实际意义。

1.3.3 林草混合根系抗剪增强作用模拟分布

(1) 内摩擦角 φ 和粘聚力 c 的计算。土壤内摩擦角主要受土壤机械组成等物理性质影响, 植物根系基本无影响; 但会影响土壤粘聚力。根据不同法向压力下测得的剪应力或抗剪强度, 利用库伦公式计算根土复合体的抗剪强度指标(内摩擦角和粘聚力。计算公式为:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中: τ 为土的抗剪强度(kPa); σ 为作用在剪切面上的法向应力(kPa); φ 为土壤内摩擦角(°); c 为土壤粘聚力(kPa)。

(2) 抗剪增强作用计算。根据Wu-Waldron^[16-17]根系抗剪增强作用公式, 使用以上计算公式为:

$$Cr = RAR \cdot Tr \cdot (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \beta) \quad (2)$$

式中: Cr 为根系抗剪增强强度(kPa); RAR 为根面积比; Tr 为单位面积上根系抗拉强度(kPa); β 为根穿过滑动面的剪切变形角(°); β 为土壤内摩擦角(°)。当 β 值变化时, $\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \beta$ 的值改变不明显, 所以取其值为1.2($48^\circ \leq \theta \leq 72^\circ$), 即 $K = 1.2$ 。因此可以推导出公式为:

$$Cr = 1.2 RAR \cdot Tr \quad (3)$$

(3) 植物根系拟合方法。植物根系需通过相应的根系分布模型进行拟合。目前, 代表性的根系分布模型有Page等^[18]、Gerwitz等^[19]、Monteith等^[20]、Nielson等^[21]提出的模型。本试验对植物根系拟合时, 采用了Gerwitz和Page^[18-19]提出的指数函数变化模型: $y = a e^{bx}$, 其中 a, b 为常数, x 为植物形态参数, y 为因变量。使用Origin 9.0软件对数据进行非线性拟合。

2 结果与分析

2.1 植物根系形态分布

由图 1 可知,植物根系的根长密度、根表面积密度以及根系直径与土层深度经非线性拟合分析后发现,均遵从 $y = ae^{bx}$ 指数函数的变化规律。由根长密度、根表面积密度以及根系直径随土层深度的变化经非线性函数拟合后得出函数式分别为: $y = 86.65e^{-9.4x}$, $r = 0.68$ ($p < 0.05$); $y = 76.91e^{-1.94x}$, $r = 0.82$ ($p < 0.05$); $y = 106.57e^{-2165.93x}$, $r = 0.84$ ($p < 0.05$),三者与土层深度变化均表现为显著相关。当土层深度逐渐增加时,根长密度总体表现为逐渐减小的变化过程这与韩凤鹏^[22]、袁雪红^[23]等研究结果均相似。且在土层深度为 10 cm 时,根长密度最大为 0.57 cm/cm³,当深度为 100 cm 时,根长密度最小为 0.080 cm/cm³。当土层深度逐渐增加时,根表面积密度为逐渐减小。其中,在土层深度为 10 cm 时根表面积密度最大

为 0.82 cm²/cm³,当深度为 100 cm 时,根表面积密度最小为 0.15 cm²/cm³。植物复合根系的根长密度、根表面积密度以及根系直径随土层深度的变化均呈指数函数下降,符合 Gerwitz 和 Page^[18-19]提出的指数函数变化模型。

由根长密度、根表面积密度以及根系直径随距主根距离的变化经非线性函数拟合后(图 2)得出函数式分别为: $y = e^{3.92+0.17x}$, $r = 0.66$ ($p < 0.05$); $y = e^{3.93+1.03x}$, $r = 0.7$ ($p < 0.05$); $y = e^{3.3+2101.9x}$, $r = 0.96$ ($p < 0.05$),三者随距主根距离的变化均表现为显著相关。在距主根距离逐渐增加时,其根长密度先增加后减小,其中最大根长密度为 1.40 cm/cm³,距主根距离为 60 cm。在距主根距离逐渐增加时,其根表面积密度先增加后减小,其中最大根表面积密度为 0.19 cm²/cm³。由图可知,植物根长密度、根表面积密度以及根系直径与距主根距离的变化经非线性拟合分析发现后,均符合指数函数的变化规律。

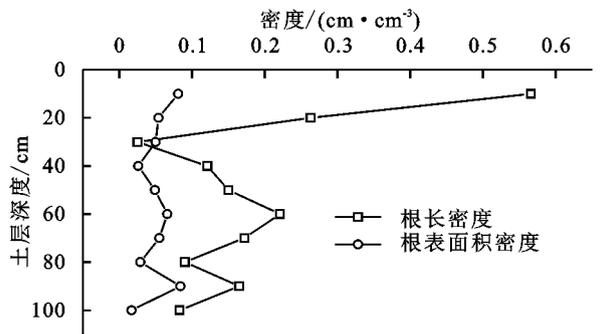


图 1 小叶杨(单株)一白羊草复合根系形态参数随土层深度变化

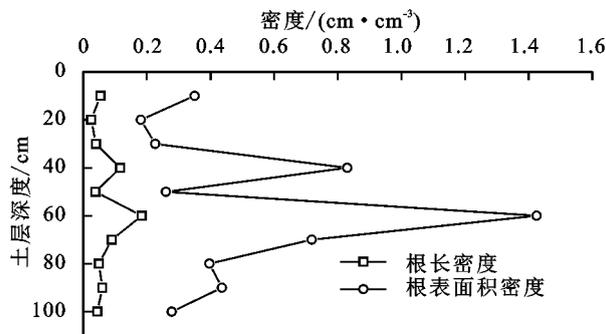


图 2 小叶杨(单株)一白羊草复合根系形态参数随距主根距离的变化

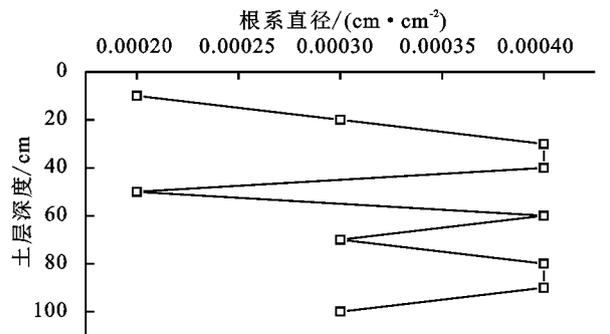
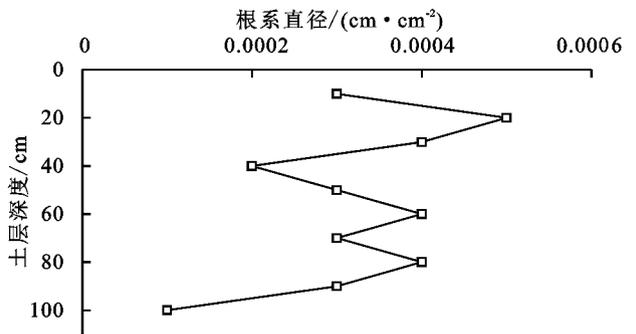


表 1 为以小叶杨为基点,以距地面为 1 m 的垂直范围内的根系形态参数的平均值分布调查表。由表 1 可以看出,植物复合根系形态参数在垂直分布上,随土层深度的变化趋势为:随着土层深度的增加,根长密度表现为逐渐减少;根表面积密度的变化幅度较大,但总体上仍表现为逐渐减小;根系直径变化趋势较不明显,但仍随土层深度增加其变化值逐渐减小。根长密度在 0—60 cm 的土层中约占总量的 75.49%,其中在 0—10 cm 的土层深度,根长密度为 0.566 cm/cm³;10—20 cm 的深度根长密度次之,为 0.26

cm/cm³,在 100 cm 的土层深度根长密度最小,仅为 0.083 cm/cm³。根表面积密度在 0—60 cm 的土层中约占总量的 73.92%,且在土层中变化幅度较大,其中最大值为 0.081 cm²/cm³,其次为 0.054 cm²/cm³,最小值为 0.017 cm²/cm³。根系直径在 0—30 cm 的土层深度中,根系直径较大,在 10—20 cm 的土层中,根系直径最大,为 0.000 5 cm/cm²,其次为 20—30 cm 的土层,根系直径为 0.000 4 cm/cm²,在 1 m 的土层时有最小值为 0.000 1 cm/cm²。

表 1 复合根系形态参数垂直分布调查

深度/ cm	根长密度/ ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$)	根系直径/ ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-2}$)	根表面积密度/ ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{cm}^{-3}$)
0—10	0.566	0.0003	0.081
10—20	0.263	0.0005	0.054
20—30	0.025	0.0004	0.050
30—40	0.121	0.0002	0.046
40—50	0.150	0.0003	0.049
50—60	0.221	0.0004	0.046
60—70	0.172	0.0003	0.035
70—80	0.090	0.0004	0.029
80—90	0.165	0.0003	0.034
90—100	0.083	0.0001	0.017

2.2 植物根—土复合体抗剪强度分布

由图 3 可知,剪切应力随剪切位移的增加而先增加后迅速下降,最后曲线几乎平行于横轴。在剪切过程中,林草根—土复合体主要受到根—土界面的摩擦力、土壤粘聚力以及根系抗拉力等的共同作用。因此,在剪切起初,由于 3 种抗剪力同时存在,剪应力—位移斜率较大,随着剪切位移的增加,土壤粘聚力下降很快,但根系抗拉力逐渐增大,剪应力—位移斜率变化逐渐变缓。在根系的抗剪切过程中,根系起抗拉作用的是当剪切应

力随剪切位移达到极限值后下降的部分。并且当剪应力—位移曲线几乎与横轴平行时,最后有极值出现,说明该剪切过程中根土复合体中存在粗根^[23-24]。

图 4 中 A,B,C 三图是小叶杨(单株)—白羊草复合根系的形态参数—根长密度、根表面积密度和根系直径与根—土复合体的残余抗剪强度关系的线性拟合分析。由于黄土区土壤为粘性土,在剪切过程中常会出现较大的峰值,在超过峰值后,抗剪强度不再变,此时稳定的最小抗剪强度则为本试验选取的残余抗剪强度。所选样本的含水量均为 3.7% 左右,残余抗剪强度指标—残余内摩擦角 φ 和残余粘聚力 C 通过库伦公式计算得出,其平均值分别为 0.56° 和 0.23 kPa。

经线性拟合分析,植物根—土复合体根系形态参数—根长密度、根表面积密度与残余抗剪强度函数式分别为: $y=1205.7x-18.57, r=0.75 (p<0.05)$; $y=12647.1x-352.53, r=0.91 (p<0.05)$, 由此可知,植物根系复合体形态参数—根长密度和根表面积密度均随残余抗剪强度的增大而表现为显著的增大。而根系直径离散程度大与残余抗剪强度未发现线性相关性。当根系直径为 0.000 3 cm/cm² 时,残余抗剪强度最大值是 755 kPa。

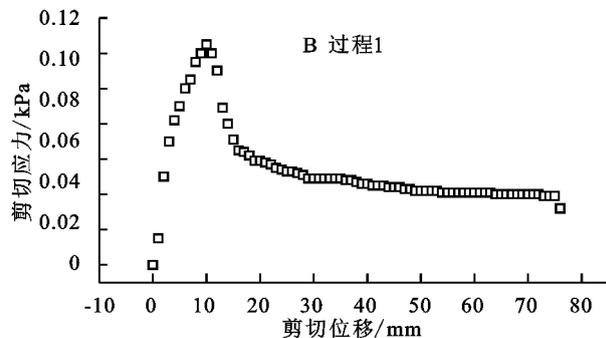
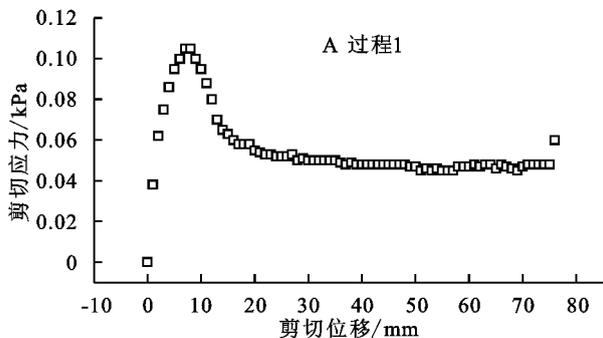


图 3 小叶杨(单株)—白羊草复合根系剪切过程

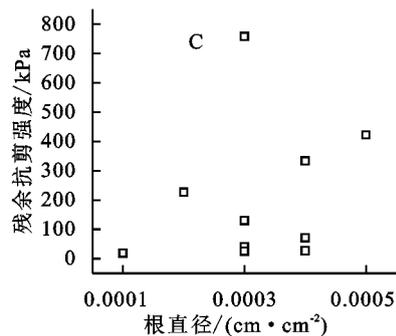
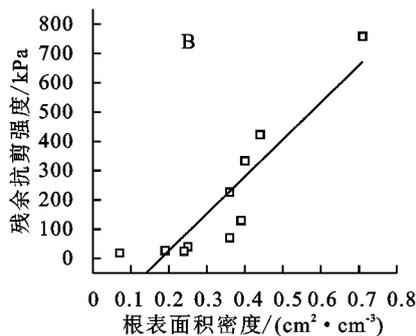
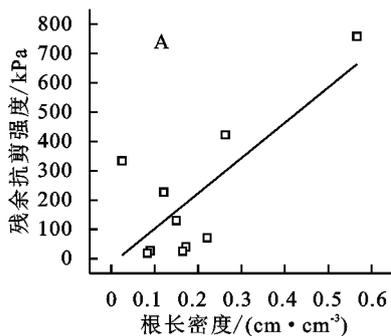


图 4 小叶杨(单株)—白羊草复合根系形态参数与残余抗剪强度

由图 5 可知,小叶杨的抗剪强度随土层深度增加而表现为先增大后减小。其中,当土层深度为 0.5 m 时,小叶杨的抗剪强度达到最大约为 320 kPa;在 0.9 m 的土层深度时,小叶杨的抗剪强度最小,约为 90 kPa。白羊草的抗剪强度表现为先迅速下降后下降趋势逐渐变缓,最

终趋于零。白羊草为须根系草本植物,根系分布范围为 0—50 cm,在 0—30 cm 的土层深度,白羊草的根系分布最广。在 0—20 cm 的土层深度时白羊草根系的抗剪强度最大,约为 4.1 MPa。林草复合体的抗剪强度为小叶杨和白羊草抗剪强度的累加。通过抗剪强度的累

加分析后,林草复合体的抗剪强度随土层深度的增加而表现为逐渐下降,在 0—20 cm 和 50 cm 的土层深度时,林草复合体的抗剪强度均取得较大值,其中在 0—20 cm 时最大,这是由于在这个深度,小叶杨的根系分布较少,主要是白羊草的须根。在 50 cm 的土层深度时,林草复合体的根系主要是小叶杨的根系,而白羊草的根系无法达到该深度。

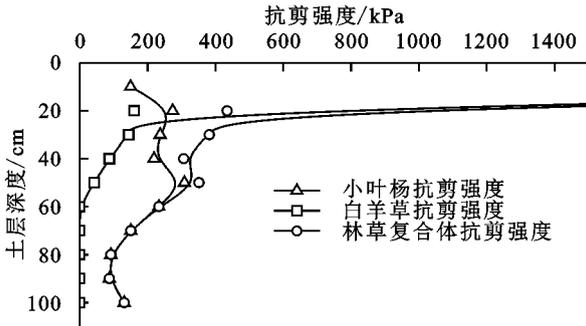


图 5 小叶杨(单株)—白羊草复合根系根际范围内实测最大抗剪强度

本试验地点为陕北黄土高原安塞,其素土的抗剪强度约为 29.5 kPa^[25]。经分析发现,小叶杨—白羊草复合体根系的抗剪强度较素土增强了许多。其中,在 0—30 cm 的土层深度中,林草复合体的抗剪强度较素土提升了约 11 倍,在 40—60 cm 的土层深度中,林草复合体的抗剪强度较素土提升了约 8~9 倍,在 70—100 cm 的土层深度中,其抗剪强度约为素土的 3 倍。

3 讨论

植物根系形态参数是研究护坡植物的重要指标之一,根长密度、根直径、根表面积密度均对选取合适的护坡植物有重要的作用。根长密度反映了根系对土壤的缠绕,伸展的能力;根表面积密度反映了根系于土壤的接触紧实程度;根直径反映了根系粗细对抗拉能力的大小。在选取护坡植物时,我们通常选取乡土适生植物;其次是,根据植物的根系指标进行搭配种植,以求最大化的效益。

本试验中选取的乡土木本植物为小叶杨,其根系主要分布范围为 0.5—1 m,乡土草本植物为白羊草,其根系集中分布在 0—30 cm 的土层深度,这与刘子壮^[26]等研究结果一致。通过对小叶杨和白羊草构成的根—土复合体的研究,结果表明植物根系形态参数—根长、根系表面积及根系直径随距主根的距离的增加均表现为指数函数显著下降的变化规律;且根长、根系表面积及根系直径随土层深度的增加同样符合指数函数显著下降的变化规律,这与刘鑫^[27]、李建兴^[28]等所研究的结果相似。但是指数函数拟合相关性系数较小,这是由于表层分布有较多白羊草根系,

从而影响了拟合效果。根—土复合体的根长密度、根表面积密度主要分布在 0—60 cm 的土层深度中,且二者分别占其总量的 75.49%, 73.92%, 这与刘秀萍^[29]所研究结果相似。

植物根系的抗剪强度是植物护坡力学的另一重要指标之一,根系抗剪强度的强弱反应了根系抵抗外力而保持边坡稳定性的能力。本试验区域为黄土高原,其土壤自身的抗剪能力较弱、抗压能力较强,通过小叶杨和白羊草根系构成的根—土复合体,可以使根—土复合体的增强许多^[30]。黄土高原土壤多为粘性土,且坡体众多,对于滑坡的稳定性分析,常通过考虑土体的残余抗剪强度^[31]。根—土复合体根系形态参数与残余抗剪强度经线性拟合发现,根土复合体根长密度、根表面积密度与残余抗剪强度均表现为线性函数显著上升的变化规律,这与李建兴^[32]、王月^[24]等研究结果一致。但根直径与残余抗剪强度尚未发现有线性相关性。

在白羊草和小叶杨的根系和土壤形成的根—土复合体中:白羊草的根系较细,且其繁密的根系和较大的根系密度能够抓紧土壤,使白羊草的抗拉力发挥了抗剪力的作用^[33]。白羊草的须根与土体紧密缠绕,形成网絮状,使根系复合体对土壤起到“加筋”的作用,提升土体的抗剪强度^[32,34]。因此,白羊草对土壤的“加筋”效应能使边坡的稳定性提高 2%~10%^[35]。小叶杨在中深层土壤中的根系较大,并且在中深层的土壤中植物的根系较粗,抗拉强度较大,主根周围分出许多较细的侧根,能深入到土壤毛孔中,对土壤起到网络作用,从而增强了整体素土的抗剪强度。通过研究林草复合体在根际范围内实测的抗剪强度后发现,在 0—30 cm 的土层深度中,林草复合体的抗剪强度较素土提升了约 11 倍,在 40—60 cm 的土层深度,较素土提升了 8~9 倍,在 70—100 cm 的土层深度中,其抗剪强度约为素土的 3 倍,这与张超波等^[36]研究结果相似。

综上所述,在 0—40 cm 的土壤中禾本科植物白羊草根系分布较多,木本科植物小叶杨根系分布在 50—100 cm 的土壤中,两者构成的根土复合体能够在 0—1 m 的土层深度范围内对土体起到显著的抗剪增强的作用,对于边坡的稳定性提高起到了关键作用,因此小叶杨和白羊草的混配种植是较为理想的护坡配置方式。

4 结论

(1) 通过对小叶杨以及白羊草的根系分布范围的研究,发现白羊草根系集中分布在 0—30 cm 的土层

深度,小叶杨的根系主要分布范围为0.5—1 m,这表明小叶杨和白羊草的混合根系能够对地下1 m的土壤起到稳固护坡的作用。植物根系形态参数—根长、根系表面积及根系直径随距主根的距离的增加均表现为指数函数显著下降的变化规律;且根长、根系表面积及根系直径随土层深度的增加同样符合指数函数显著下降的变化规律。在0—60 cm的土层深度中,根—土复合体的根长密度、根表面积密度二者分别占其总量的75.49%,73.92%,这表明林草混合根系在0—60 cm的土层深度范围内对土壤的加筋效果最好。

(2)通过对根—土复合体根系形态参数与残余抗剪强度经线性拟合发现,根土复合体根长密度、根表面积密度与残余抗剪强度均表现为线性函数显著上升的变化规律,但根直径与残余抗剪强度尚未发现有线性相关性。由此可得,小叶杨和白羊草的根系能够显著的提高边坡稳定性。通过研究林草复合体在根际范围内实测的抗剪强度后发现,在0—30 cm的土层深度中,林草复合体的抗剪强度较素土提升了约11倍,在40—60 cm的土层深度,较素土提升了约8~9倍,在70—100 cm的土层深度中,其抗剪强度约为素土的3倍,这表明小叶杨和白羊草的组合对于边坡的抗剪强度的提升较大,能够显著增强边坡的抗剪能力。

参考文献:

- [1] 安登奎,王玉宏.陕西黄土高原地区高速公路高陡边坡绿化技术[J].水土保持通报,2004,24(6):49-52.
- [2] 刘敏侠,孙亚超.浅析陕北黄土高原边坡绿化形式及常用植物种类[J].农家科技,2015(8), doi:10.3969/j.issn.1003-6989.2015.08.220.
- [3] 高德彬.公路黄土路堑高边坡稳定性研究[D].西安:长安大学,2008.
- [4] 曹婧,曹云武.关于公路边坡坍塌问题的探讨[J].中国新技术新产品,2010(21):75-75.
- [5] 刘世奇.植被护坡技术及综合防护体系研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2004.
- [6] 兰明雄.植被护坡技术及工程绿色机理研究[D].福建泉州:华侨大学,2008.
- [7] 王金霞,杨旸,李亚伟,等.含根系土体抗剪强度试验研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(18):36-39.
- [8] 杨亚川,莫永京,王芝芳,等.土壤—草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J].中国农业大学学报,1996,1(2):31-38.
- [9] 陈终达,肖宏彬,张春晓,等.根系分布方式对根—土复合体抗剪强度的影响[J].中南林业科技大学学报,2016,36(8):130-135.
- [10] Frydman S, Operstein V. The influence of vegetation on soil strength[J]. Proceedings of the Ice-Ground Improvement, 2000,4(2):81-89.
- [11] Robert Ziemer. The role of vegetation in the stability of forested slopes[C]. Proceedings XVII IUFRO World Congress, 1981.
- [12] Heng Chao, Vanich D V. Bioengineering and phytoremediation option for the new Millennium[R]. Thailand: IVC2 Plenary Pa Pers., 2002.
- [13] 瞿文斌.黄土高原植物根系增强土体抗剪强度的模型与试验研究[J].北京林业大学学报,2017,39(12):79-87.
- [14] 戚国庆,胡利文.植被护坡机制及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(11):2220-2225.
- [15] 贺振昭,党生,刘昌义,等.青海湖地区草本植物根系力学特性试验研究[J].中国水土保持,2017(4):44-48,69.
- [16] Wu T H. Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska[M]. USA:Ohio State University, 1976.
- [17] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977,41(5):843-849.
- [18] Page E R, Gerwitz A. Mathematical models, based on diffusion equations, to describe root systems of isolated plants, row crops, and swards[J]. Plant & Soil, 1974,41(2):243-254.
- [19] Page A G R. An empirical mathematical model to describe plant root systems[J]. Journal of Applied Ecology, 1974,11(2):773-781.
- [20] Monthithj L, Hudaak S, Midya D. Rescap: A resource capture model for sorghum and pearl millet[M]. Austria Laksenberg: Virmanism, Tandonhls, Alagarwamyg. Modeling the growth and development of sorghum and pearl Millet. Austria Laksenberg: Research Bulletin(Icrisat),1989.
- [21] Neilson H N, Mackenthung. Die horizontale variation derfeinwurzelintensit in waldb den in abh ngigkeit von derbestockungsdichte[J]. Allg Forst_Jagd Ztg, 1991, 162:112-119.
- [22] 韩凤朋,郑纪勇,张兴昌.黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):50-55.
- [23] 袁雪红,高照良,张翔,等.护坡植物根系分布及抗拉力学特性[J].南水北调与水利科技,2016,14(5):117-123.
- [24] 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.
- [25] 范兴科,蒋定生,赵合理.黄土高原浅层原状土抗剪强度浅析[J].水土保持学报,1997,3(4):69-75.
- [26] 刘子壮,高照良,杜峰,等.黄土高原高速公路护坡植物根系分布及力学特性研究[J].水土保持学报,2014,28(4):66-71.
- [27] 刘鑫,满秀玲.毛乌素沙地梁地上小叶杨根系分布特征[J].中国水土保持科学,2008,6(4):48-53.

- 麦产量及土壤水分的影响[J].麦类作物学报,2016,36(6):765-772.
- [14] 白雪峰,赵雨森,戚颖.秸秆覆盖对土壤水分动态变化及玉米产量的影响[J].安徽农业科学,2014,42(36):12843-12845.
- [15] 鲁向晖,隋艳艳,王飞,等.秸秆覆盖对旱地玉米休闲田土壤水分状况影响研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(3):156-159.
- [16] 高飞,贾志宽,韩清芳,等.秸秆覆盖量对土壤水分利用及春玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):104-111.
- [17] 刘许辉,何雪丹,蒋明健,等.秸秆覆盖与氮肥配施对大豆产量的影响[J].作物研究,2017,31(3):272-273.
- [18] 高亚军,李生秀.旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J].农业工程学报,2005,21(7):15-19.
- [19] 杜吉到,吕静.肥密因素对耕层内大豆根部性状的影响[J].黑龙江八一农垦大学学报,2011,23(4):1-6.
- [20] 金剑,王光华,刘晓冰,等.东北黑土区高产大豆 R5 期根系分布特征[J].中国油料作物学报,2007,29(3):266-271.
- [21] 金剑,刘晓冰,王光华,等.大豆生殖生长期根系形态性状与产量关系研究[J].大豆科学,2004,23(4):253-257.
- [22] 王同朝,李小艳,李仟,等.秸秆覆盖和土壤水分互作对夏玉米水分利用效率及产量的影响[J].河南农业大学学报,2014,48(3):280-287.
- [23] 白玮.不同秸秆和砂石覆盖厚度对土壤水分蒸发的影响[J].价值工程,2016,35(023):253-256.
- [24] 任冬莲,刘学义,王瑞.地膜覆盖春大豆增产效应研究[J].山西农业科学,2006,34(1):35-37.
- [25] 李丽君,高聚林,武向良,等.不同覆膜方式对大豆田水分动态及利用效率的影响[J].大豆科学,2008,27(2):262-265.
- [26] 刘祖贵,肖俊夫,孙景生,等.土壤水分与覆盖对夏玉米生长及水分利用效率的影响[J].玉米科学,2012,20(3):86-91.
- [27] 陈兰详,夏淑芬,许松林.小麦一玉米轮作覆盖稻草对土壤肥力及产量的影响[J].土壤,1996,28(3):156-159.
- [28] 袁家福.麦田秸秆覆盖效应及增产作用[J].生态农业研究,1996,4(3):61-65.
- [29] 宋秀丽,王冰雪,陆杰,等.化肥与秸秆配施对大豆生长及产量的影响[J].黑龙江农业科学,2015(7):35-39.
- [30] 杨长刚,柴守玺,常磊,等.半干旱雨养区不同覆膜方式对冬小麦土壤水分利用及产量的影响[J].生态学报,2015,35(8):2676-2685.
- [31] Gao Z Q, Yin J, Miao G Y, et al. Effects of tillage and mulch methods on soil moisture in wheat fields of Loess Plateau, China[J]. Pedosphere, 1999,9(2):161-168.
- [32] 张雨蒙,申丽霞.农田土壤残膜的污染现状及应对措施[J].天津农业科学,2017,24(2):86-90.
- [33] Limon-Ortega A, Govaerts B, Sayre K D. Straw management, crop rotation, and nitrogen source effect on wheat grain yield and nitrogen use efficiency[J]. European Journal of Agronomy, 2008,29(1):21-28.
- [34] 于庆峰,苗庆丰,史海滨,等.秸秆覆盖量对土壤温度和春玉米耗水规律及产量的影响[J].水土保持研究,2018,25(3):111-116.
- [35] 魏欢欢.黄土高原地区秸秆覆盖技术研究[J].土地开发工程研究,2018,3(9):62-66.

(上接第 363 页)

- [28] 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):144-151.
- [29] 刘秀萍,陈丽华,陈吉虎.刺槐和油松根系密度分布特征研究[J].干旱区研究,2007,24(5):647-651.
- [30] Thornes J B. Vegetation and erosion. Processes and environments[M]. Manhattan, USA: John Wiley and Sons Ltd, 1990.
- [31] 朱琪,易文.灌草混交根系提高高速公路边坡残余抗剪强度研究[D].长沙:中南林业科技大学,2018.
- [32] 王月,杜峰.植物根系形态和力学特性对黄土区浅层边坡土体的抗剪增强作用[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [33] Zhang C, Jiang J, Ma J, et al. Evaluating soil reinforcement by plant roots using artificial neural networks[J]. Soil Use and Management, 2015, 31(3): 408-416.
- [34] 刘小燕,桂勇,罗嗣海,等.植物根系固土护坡抗剪强度试验研究[J].江西理工大学学报,2013,34(3):32-37.
- [35] 周锡九,赵晓峰.坡面植草防护的浅层加固作用[J].北方交通大学学报,1995,19(2):143-146.
- [36] 张超波,陈丽华,刘秀萍.黄土高原刺槐根系固土的力学增强效应评价[J].水土保持学报,2009,23(2):57-60.