

# 陕北林草混交根土复合体抗剪强度研究

王月<sup>1,2,4</sup>, 杜峰<sup>1,2,3,4</sup>, 周敏<sup>1,2,4</sup>, 张馨月<sup>1,2,4</sup>, 张贇贇<sup>1,2,4</sup>

(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; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与  
干旱农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为进一步探讨林草混合根系的护坡力学效应,选取陕北乡土植物小叶杨和白羊草为试验目标,分别进行室内单根拉伸试验以及原状林草混合根土复合体的慢剪试验,较为系统地分析了小叶杨和白羊草根系的抗拉强度特征和根土复合体的抗剪强度特征。结果表明:小叶杨和白羊草的单根抗拉力与根径之间呈近似幂函数的正相关关系,而两者单根抗拉强度与根径之间均表现为近似负相关的对数关系,且在根径小于 0.75 mm 时白羊草的单根抗拉强度远大于相同根径的小叶杨;随着根长密度、根表面积密度的增大,土壤内摩擦角  $\varphi$  随之均呈对数增长,而土壤粘聚力  $c$  则均呈直线增长趋势。说明林草混合根系的加入可以有效提高土体的抗剪强度,且有助于增强边坡稳定性,同时为林草一体化的护坡技术提供理论依据。

**关键词:**林草混合根系; 慢剪; 根长密度; 根面积密度; 抗剪强度

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)02-0213-07

## Research on Shear Strength of Root-Soil Composite in a Forest and Grass Standing Site in Northern Shaanxi

WANG Yue<sup>1,2,4</sup>, DU Feng<sup>1,2,3,4</sup>, ZHOU Min<sup>1,2,4</sup>, ZHANG Xinyue<sup>1,2,4</sup>, ZHANG Yunyun<sup>1,2,4</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To further explore the mechanical effects of the soil reinforced by mixed forest and grass in slope protection in Northern Shaanxi, annual plants of *Populus simonii* Car. and *Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng were selected as the samples. The single tensile tests and slow shear tests were carried out to systematically analyze the single root tensile resistances of *Populus simonii* Car. and *Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng, and the strength characteristics of root-soil composites of forest and grass. The results indicate that the single root tensile resistances increase with the increase of diameter, and power relations exist between diameter and tensile resistance of the roots of forest and grass, respectively; meanwhile, tensile strength and the diameter of the single root of the forest and grass showed the negative logarithm relations, respectively; especially, when root diameters were less than 0.75 mm, the single root tensile strength of *Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng was much greater than that of *Populus simonii* Car. under the condition of same root diameter. The internal friction angle  $\varphi$  was logarithmic growth and cohesion  $c$  was linear growth with the increase of root length density and root surface area density. These results also show that roots of mixed forest and grass can improve the shear strength in the loess slope in Northern Shaanxi and enhance the slope stability, and this research may have important theoretical implications for future study of exploring high stable slope protection technology of forest-grass integration.

**Keywords:** roots of mixed forest and grass; slow shear tests; root length density; root surface density; shear strength

我国黄土区植被退化严重,土质疏松且裂隙发育,透水性极强,加之多暴雨等天气的作用,滑坡、崩塌、水土流失等地质灾害频发。同时黄土区长期受到西部大开发等人为活动的干扰,大量的施工、建设项目等不可避免地出现了一些人工坡面,这些边坡若不加以合理保护,将进一步加剧黄土区地质灾害的发育<sup>[1-2]</sup>。以抗滑桩、挡土墙等为代表的传统刚性护坡方式,存在造价高且破坏原有生态环境的弊端,而植被护坡的生态措施对小型边坡进行治理不仅能有效地恢复和改善生态环境,且造价相对较低<sup>[3-6]</sup>。

植被护坡是以植物或植物与工程措施相结合的形式来提高坡体的稳定性和抗侵蚀能力的一种生物工程措施,其主要机理是利用植物的根系根植在土壤中,既能在边坡生态防护的前期起到了较大的“加筋”作用又能在后期起到一定的“锚固”作用,从而提高边坡根土复合体的抗剪强度,达到加固边坡的目的<sup>[7-8]</sup>。国内外大量研究和实践表明,采用乔、灌、藤、草的林草一体化高稳定生态护坡模式进行生态恢复,不仅能有效地降低在采矿区、路基边坡以及渠道等地区的山体滑坡、水土流失等地质灾害的发生频率和程度,还能有效地快速恢复植被、改善生态环境,其已成为边坡生态重建的技术发展方向<sup>[9-15]</sup>。然而,关于乔、灌、藤、草的林草一体化高稳定生态护坡模式的开发和应用,尤其是关于林草混合根系的力学效应研究,我国仍处于探索阶段。这主要是由于林草一体化生态护坡模式的植被种类复杂多样、根系网络盘根错节,使根系的护坡性能呈现复杂多变的特征,特别是植被护坡中的根土相互作用机理的研究尚不全面<sup>[16-17]</sup>。

林草混交根系与根土复合体的抗剪强度的定性定量的研究,是林草护坡技术的开发和应用的基础理论工作,对治理黄土边坡水土流失、防止滑坡和崩塌以及改善生态环境具有重要的理论价值和广阔的工程应用前景<sup>[17-18]</sup>。本研究所处地区为陕北黄土高原地区,其90%以上为黄绵土,透水性极强,因此试验选择适用的慢剪操作进行抗剪强度试验,同时选取黄土边坡本土乔木——小叶杨和树下常见草本植物——白羊草的林草混合原状土为研究对象,对原状土进行室内慢剪试验和单根的抗拉试验,研究林草混交根系的护坡规律。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验样地概况

研究区位于陕西省延安市安塞县高桥乡(109°11.168'—109°12.585'E,36°39.143'—36°40.226'N),属于典型

的黄土丘陵沟壑区。年平均降水量在490.5~663.3 mm,其中6—8月降水量占全年降水的60%~80%,且多以暴雨形式出现,年际变化大;土壤以黄绵土为主,占90%以上,基本处于半熟化状态且肥力低下,土壤容重约为1.12 g/cm<sup>3</sup>,土壤孔隙度为57.77%。研究区人工植被多为21世纪初进行“陕北地区退耕还林还草工程”时所栽植,人工栽植及当地地带性植被主要种有林木:小叶杨(*Populus simonii* Carr.)、山杨(*Populus davidiana*)、刺槐(*Robinia pseud-oacacia*)等;灌木:狼牙刺(*Sophora vicii folia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)等;林下草本植物有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza dahurica*)、长芒草(*Stipa bungeana*)和硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)等。2016年7月,为研究具有不同根系分布特征的乔草混植对根—土复合体的抗剪增强作用,分析二者根系形态和力学特征参数对抗剪增强的贡献和作用方式,试验样地选择除小叶杨和白羊草外,无其他植物生长,且所选取的单株小叶杨距周围其他乔灌木4 m左右。样地立地条件具体情况如下:试验样地位于半阳坡,坡度35°左右。小叶杨胸径为10 cm,树龄为14 a,株高4.5 m;林下白羊草有4丛,高达1.3 m,地上生物量为0.36 kg/m<sup>2</sup>,其中林下盖度达70%左右。

### 1.2 样品采集

为方便取样,割除白羊草的地上茎叶部分后,在西北上坡方向,以小叶杨为起点,画出边长为1 m的正方形,在此区间内竖直向下分层(每层为10 cm:分别按0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60,60—70,70—80,80—90,90—100 cm的土壤层进行取样)。首先利用手动剪切仪(南京宁曦土壤仪器有限公司生产的ZJ-2型等应变直剪仪,量力环率定系数为1.801 kPa/0.01 mm)配套的环刀(底面积30 cm<sup>2</sup>,高2 cm)随机取各土层的原状土样,每层取10个重复,共计100个土样,样品用塑料薄膜密封,带回实验室在慢剪条件下测定根土复合体抗剪特性。然后,在每一层采用10 cm×10 cm×10 cm的方形环刀,以小叶杨的主根为出发点,依次连续不间断的在西北上坡方向取样,直至取至1 m距离,在1立方体积内每层取100个样本,共计1 000个土样,并带回实验室分析小叶杨和白羊草混合林草根系的分布特征;在对根系分布特征进行探究的同时,随机选取各个径阶表皮完好的小叶杨和白羊草新鲜根系,各选取80个左右根段,利用拉力仪(东莞市智取精密仪器有

限公司生产的 ZQ-21B 型拉力试验机,精度为 0.01,拉力量程为 0~200 N,测试行程为 0—200 mm 进行单根拉伸试验。

1.3 样品测定和分析方法

剪切原状土样带回实验室后,根据土力学中自重应力公式推求出根系分布层的自重应力,从上到下依次为 0,1.47,2.94,4.41,5.88,7.35,8.82,10.29,11.76,12.23 kPa 荷载,利用 ZJ-2 型等应变直剪仪进行剪切试验,测定土样的抗剪强度,并由库伦公式计算内摩擦角  $\varphi$  和粘聚力  $c$ 。试验结束后,取出环刀内的土壤,置于 1 mm 的网筛内进行冲洗,直至洗出所有根系并晾干,然后将根系放在扫描仪(MICROTEK 生产的 ScanMaker,6180)上,在 6 200×3 400 dpi 下进行灰度扫描。扫描完成后,使用感量为 0.01 g 电子天平,称取各个环刀内的根系生物量。0 cm×10 cm×10 cm 的方形环刀内的土样利用相同的方法进行冲洗、晾晒、称量和扫描。

小叶杨和白羊草的单根带回实验室后,试验前用游标卡尺(精度 0.01 mm)测量拟进行拉伸试验的单根根径,然后将根段夹持在拉伸夹具间,确定受拉长度统一为 5 cm,通过转动手轮使夹具向上移动,直至该单根被拉断为止。记录单根产生的最大变形和被拉断时所受的拉力即该根所能承受的最大抗拉力。

1.4 数据处理与统计分析

将根系扫描图像采用 Image-Pro Plus 6.0 根系分析软件对根系长度、根表面积等各参数进行分析。采用 Excel 2013 软件对测定数据进行汇总处理,用 Origin 9.0 进行图像处理和回归分析。

根系的抗拉强度采用如下公式进行计算:

$$P_i=4F_i/(\pi D_i^2) \tag{1}$$

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)。

土壤抗剪强度采用库伦公式计算:

$$\tau=\sigma\tan\varphi+c \tag{2}$$

式中: $\tau$  为土的抗剪强度(kPa); $\sigma$  为作用在剪切面上

的法向应力(kPa); $\varphi$  为土壤内摩擦角( $^{\circ}$ ); $c$  为土壤粘聚力(kPa)。

2 结果与分析

2.1 林草混交根系分布特征

试验区小叶杨和白羊草具有较发达的根系,根据图 1 可知,小叶杨和白羊草在 1 m<sup>3</sup> 体积内有发达的根系,根生物量密度、根表面积密度和根长密度总值分别为 12.85 g/m<sup>3</sup>,838.02 cm<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>,2 993.20 cm/m<sup>3</sup>。林草根系分布随土壤剖面深度的增加呈现出 3 个显著特点:根系集中分布在 0—30 cm 土层,根系生物量密度、根表面积密度和根长密度分别占总量的 0.51,0.57,0.66;在 40—70 cm 土层根系逐渐减少,根系生物量密度、根表面积密度和根长密度分别占总量的 0.35,0.30,0.24;在 70 cm 以下土层根系保持最低水平,根系生物量密度、根表面积密度和根长密度分别仅占总量的 0.13,0.13,0.10。由图 1 可以看出,在 20—30 cm 土层的根系生物量密度达到最大值(3.15 g/dm<sup>3</sup>),其次为 10—20 cm 土层(2.08 g/dm<sup>3</sup>),最小为 90—100 cm 土层(1.74 g/dm<sup>3</sup>)。而根表面积密度在 10—20 cm 土层达到最大值(177.70 cm<sup>2</sup>/dm<sup>3</sup>),其次为 0—10 cm 土层(为 177.52 cm<sup>2</sup>/dm<sup>3</sup>),根表面积密度在 70 cm 以下的每个土层平均保持在 37.33 cm<sup>2</sup>/dm<sup>3</sup> 左右。根长密度在 0—10 cm 最大(1 071.37 cm/dm<sup>3</sup>),其次为 10—20 cm(497.68 cm/dm<sup>3</sup>),在 70 cm 以下的每个土层平均保持在 100.52 cm/dm<sup>3</sup> 左右。进一步研究发现,小叶杨和白羊草混合根系的生物量密度、根表面积密度和根长密度随着土层深度的增加,各个方块土之间的标准差呈现逐渐降低的趋势,表明其离散程度和差异性的逐渐减小,反映了林草根系分布状况对土体的影响随土层深度增加逐步减小。同时,在对根系各参数进行曲线拟合时发现,根长密度和根表面积密度随土层深度的增加表现为指数函数或对数函数的递减规律,这与李建兴等<sup>[18]</sup> 研究结果相类似。

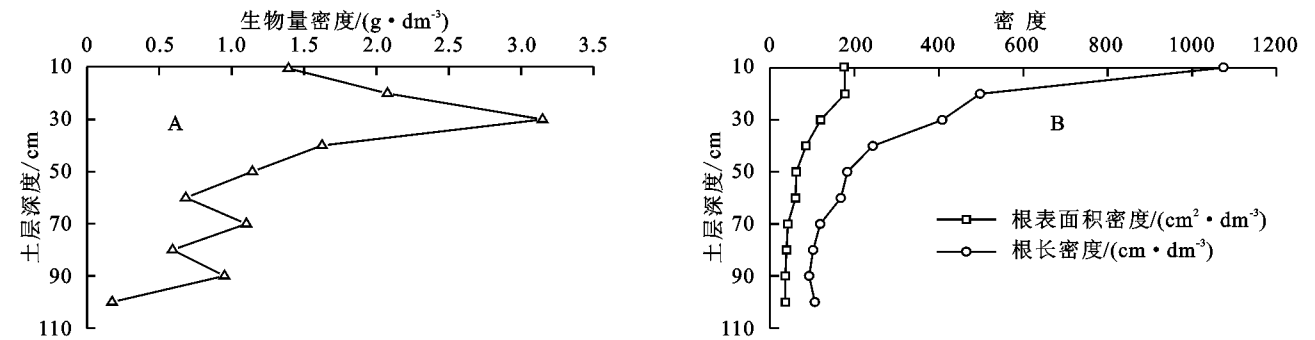


图 1 小叶杨和白羊草混合根系生物量密度和根表面积密度、根长密度分布特征。

## 2.2 林草单根力学特性分析

由图 2 可得,本次试验所测得的小叶杨和白羊草根系的根径范围分别为 0.39~2.45 mm 和 0.11~0.82 mm,单根最大抗拉力范围分别为 5.1~97.3 N 和 1.7~17.8 N,抗拉强度的范围分别为 15.03~37.59 MPa 和 26.14~178.98 MPa,其抗拉强度的平均值分别为 28.47 MPa 和 95.50 MPa。因此,在一定程度上小叶杨和白羊草有助于提高浅层土体的抗剪强度值,从而达到稳定边坡的目的。

从图 2A 中可以看出根系的单根抗拉力,随着根系直径的增大而增大,抗拉力与根径近似呈正相关幂函数关系,且随着根径的增大单根抗拉力增长速度加快。在根径小于 0.5 mm 条件下,小叶杨的单根最大抗拉力较白羊草小,随着根径增大,小叶杨单根抗拉力逐渐大于白羊草,且两者之间的差值逐渐增大。

图 2B 显示小叶杨和白羊草的单根抗拉强度与

根径均表现为对数函数关系,且随根径的增加而减小,随着根径的增大抗拉强度减小的速度降低。小叶杨的单根抗拉强度在小于 0.75 mm 时远小于相同根径的白羊草的单根抗拉强度,由于白羊草根系的抗拉强度降低速度大于小叶杨,在大于 0.75 mm 后小叶杨单根抗拉强度逐渐大于白羊草。由图 2B 可得根系抗拉强度随根径的增大而降低,这与以往研究者研究结果相似,主要是由于根土复合体抗剪强度的大小与根系和土体间的摩阻力有关,而须根系的存在能增加根土之间的接触面积,使根系在受到外界拉力作用时,根土界面产生的竖向摩擦力和横向挤压剪切力增大,继而增强抗剪强度。因此,在根径小于 0.75 mm 条件下白羊草的单根抗拉强度大于相同根径条件下小叶杨的单根抗拉强度,在一定程度上反映了前者相对更能增强根土复合体的抗剪强度,从而表现出更为明显的浅层固土护坡作用。

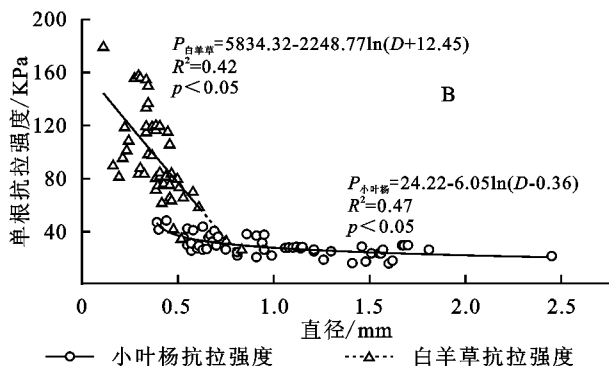
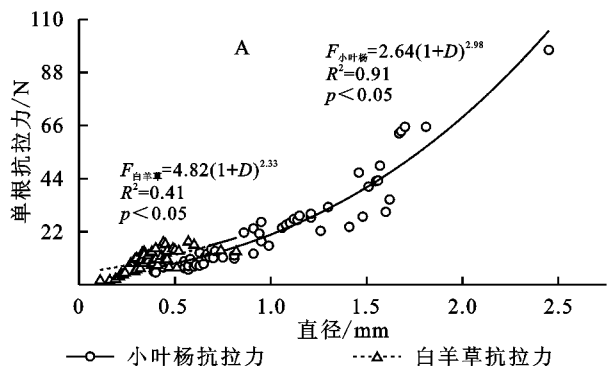


图 2 试验区小叶杨和白羊草单根抗拉力和抗拉强度与根径的关系。

## 2.3 垂直压力对抗剪强度的影响

图 3A 为施加的垂直压力对林草混合根土复合体的剪应力—剪切位移曲线的影响,所选样本含水量在 6% 左右和含根生物量为 0.94 g/dm<sup>3</sup> (由于篇幅所限,且试样的试验结果相近,因此图 3 仅绘出施加垂直压力在  $P=0, 4.41, 8.82, 13.23$  kPa 的典型试样的试验结果)。小叶杨和白羊草的混合根土复合体剪应力—剪切位移曲线在一定的垂直压力、土壤含水量和根系含量条件下,表现为:随着剪切位移的增加剪应力逐渐增大,且曲线增大的斜率逐渐减小,当剪应力达到峰值时,斜率为零,土体破坏,之后剪应力随着位移增加而迅速降低,并最终达到稳定值,此时林草混合根土复合体的应力—应变曲线几乎平行于横轴。如在 8.82 kPa 的垂直压力作用下,剪切位移每前进 1 mm,其剪应力—剪切位移曲线的斜率变化为 10, 8.7, 5.75, 当达到剪切位移 4 mm 时斜率为零,土体破坏。这主要是因为,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、粘聚力以及根系抗拉力等的共同作用,随着剪切位移的增加,根土复合体受

到不同程度的破坏但根系抗拉力逐渐增大,并在根土复合体发生剪切破坏时达到最大值,继续施加外力,根土复合体仍具有一定的抵抗外力的能力,植物根系在很大程度上仍然发挥着固土的作用。

进一步分析发现(图 3A),随着施加的法向压力的增大,剪应力—剪切位移曲线的斜率逐渐增大(曲线平均斜率依次 1, 2.8, 11, 14),剪应力达到峰值时的剪切位移量  $\Delta L$  呈现逐渐变短的趋势(剪切位移量  $\Delta L$  依次为 8, 5, 4, 2 mm)。其原因在于,浅层土体中土壤的粘聚力较小,且多细根分布,细根因具有良好的延展性在受到外力作用时拉伸率较高但抗拉力小。因此,在相同根系含量和土壤含水量条件下,土层越深,根土复合体所承受的垂直荷载增大,导致土壤粘聚力越大,所含根系的直径较上层土壤大,其拉伸率较小但抗拉力大,从而出现剪应力—剪切位移曲线在到达峰值时的斜率较大,位移较小的现象。

图 3B 为不同垂直荷载作用下小叶杨和白羊草混合根土复合体的剪切强度的变化,所选样本含水量在 6% 左右和含根生物量为 0.94 g/dm<sup>3</sup>。在小叶杨

和白羊草的混合根土复合体的含根量和土壤含水量一定时,根土复合体的抗剪强度随着垂直压力的增大而增大,且呈线性函数关系,其拟合函数为:

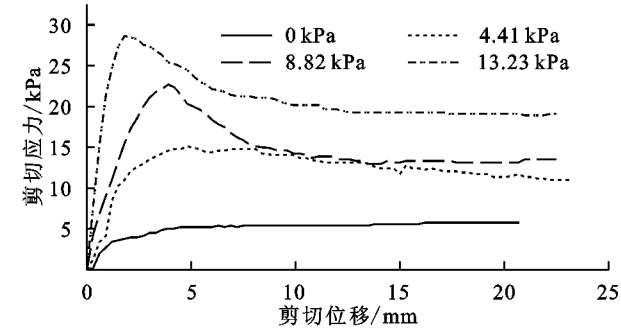


图 3 林草混合根土复合体在不同垂直压力下的变化

2.4 根系参数对抗剪强度的影响

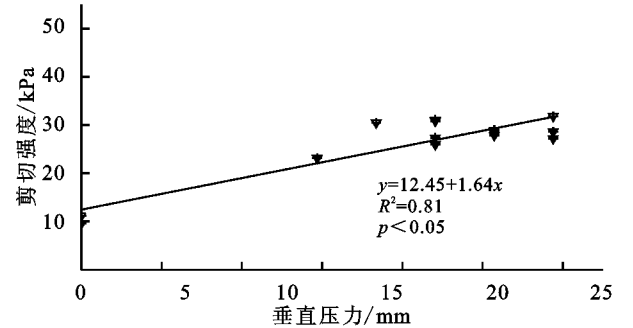
调查样地在调查期间的平均含水量为 9%左右,因此本文选取含水量在 9%左右的小叶杨和白羊草林草混合根土复合体进行根系参数对抗剪强度的影响分析,根据库伦公式计算得出抗剪强度的平均指标——平均内摩擦角  $\varphi$  和粘聚力  $c$  分别为 0.83°和 11.89 KPa。然后分别对内摩擦角  $\varphi$  和粘聚力  $c$  与根长密度和根表面积密度进行回归分析,回归方程和决定系数见图 4A—4D 所示。

小叶杨和白羊草林草混合根系的根长密度与根表面积密度和内摩擦角  $\varphi$  呈现较好的对数函数关系(图 3A 和 3B),内摩擦角  $\varphi$  随着根长密度和根表面积密度的增大而增大,两者的增长速率逐渐降低,说明根长密度和根面积密度增大到一定程度后,其对  $\varphi$  增长速度的影响效应减小。这主要是由于内摩擦角的大小与根土界面的接触面积有很大关系,植物根系在土体中穿插、缠绕、延伸,随着单位体积内的根系长度和表面积的增加,根土界面的接触面积和两者之间的摩擦力和咬合力将增大,导致土壤内摩擦角随之增大,而当根长和表面积密度增加到一定范围时,单位体积内的土壤变少,根土的接触面积一定,导致土壤内摩擦角将不再增大。

小叶杨和白羊草混合根系的根长密度和根表面积密度与土壤粘聚力  $c$  呈线性关系(图 2C 和 2D),随着根长密度的增大, $c$  值呈逐渐增大的趋势。主要是因为土壤粘聚力  $c$  的大小取决于土壤颗粒间的各种胶结作用,除却不同黄土土层的胶结状态,主要还是由于根系分泌的高、低分子量分泌物可作为有机胶结剂,能够增加土壤颗粒的结合强度。因此根长密度和根表面积密度越大,其根系分泌的有机胶结剂越多,所产生的结果为土壤粘聚力  $c$  越大。

$$Y=12.45+1.64x \quad (R^2=0.81, p<0.05)$$

说明小叶杨和白羊草的混合根土复合体的抗剪强度也符合库伦定律  $\tau=c+\sigma\tan\varphi$ 。



3 讨论

根长密度能反映根系在土壤中的穿插、伸展和缠绕能力,而根表面积密度能反映根系与土体接触的紧密程度,它们是表征土壤抗剪切增强效应的重要参数。本研究对不同土层深度的小叶杨和白羊草混合根系的生物量密度、根长密度和根面积密度进行了比较,结果表明三者主要分布于 0—30 cm 土层,但是其最大值出现的土层深度却不尽相同,其中,根系生物量密度在 20—30 cm 土层的达到最大值(3.15 g/dm<sup>3</sup>),而根表面积密度在 10—20 cm 土层达到最大值(177.70 cm<sup>2</sup>/dm<sup>3</sup>),其接近 0—10 cm 土层(177.52 cm<sup>2</sup>/dm<sup>3</sup>),根长密度在 0—10 cm 最大(1 071.37 cm/dm<sup>3</sup>)。由此可以看出根长密度和根表面积密度与根生物量密度并不是正相关关系,即根系生物量密度在表征林草混合根土复合体的力学特性方面不是一个很好的指标,这与刘鑫等<sup>[19]</sup>研究结果不同,主要是由于本研究为林草混合根系,其根系形态和构型分布复杂多变。

单根抗拉力和抗拉强度是最重要的护坡力学指标之一,主要是由于植物根系与所接触的土体之间相互羁绊所产生,从而达到固土护坡的护坡效果。本研究分别对小叶杨和白羊草的单根抗拉力和抗拉强度进行了测定,研究的小叶杨和白羊草根系的根径范围分别为 0.39~2.45 mm 和 0.11~0.82 mm,其抗拉强度的平均值分别为 28.47 MPa 和 95.50 MPa。通过比较根系最大抗拉力与根径之间的关系可以看出,小叶杨和白羊草的单根抗拉力与根系之间近似呈正相关的幂函数关系,且随着根径的增大单根抗拉力增长速度加快,这与刘昌义等<sup>[20]</sup>的研究结果相似,但是小叶杨的单根抗拉力增长速度大于白羊草。在根径小于 0.5 mm 条件下,小叶杨的单根最大抗拉力值较白羊草小,随着根径增大,由于小叶杨增长速度大于白

羊草,其单根抗拉力逐渐大于白羊草,且两者之间的差值逐渐增大。小叶杨和白羊草的单根抗拉强度均随根径的增加而减小,均表现为对数函数关系,且随着根径的增大抗拉强度减小的速度降低,说明根系越细,其单根抗拉强度越好,且白羊草单根抗拉强度的降低速率大于小叶杨。尤其是白羊草的单根抗拉强度在根径小于 0.75 mm 时,其值远大于小叶杨的单根抗拉强度,当根径大于 0.75 mm 后,白羊草单根抗拉强度小于小叶杨且差值逐渐增大。由此可以看出白羊草根系作为细根表现出更为明显的浅层固土护坡作用。这主要是由于根径较小的根能与土壤颗粒较为紧密

的结合,加大根土之间的摩擦力,且弹性较好,在土体受到剪切力时,细根被拉断而发挥出抗拉强度;而根系较为粗大时,容易被完整拔出,其只表现出部分抗拉作用,达不到抗拉强度值,因此粗根的抗拉强度对固坡效果的贡献没有细根明显。所以草本植物根系相对于林木根系在提高浅层边坡抗剪强度方面具有更大的贡献,这为在黄土区建造林草混合体系的植被模式提供理论依据。刘昌义等<sup>[20]</sup>对灌木和草本植物(各自直径为 0.15~0.4 mm 和 0.5~3 mm)的根系进行单根抗拉力学观测,也发现较细根系对固结土壤起着巨大作用,这与本研究结果一致。

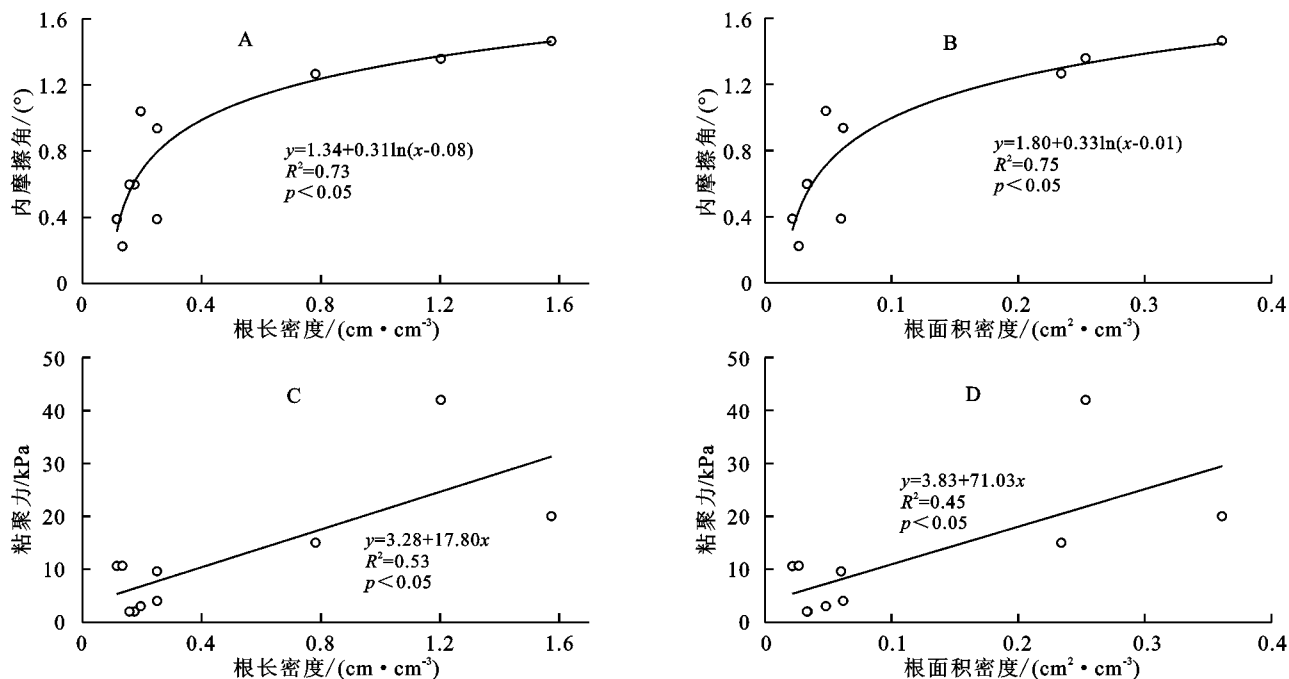


图 4 根系参数与土壤抗剪强度指标的回归分析。

根土复合体的抗剪强度是植被护坡的重要量度指标,其值越大,边坡抵抗剪切破坏的能力也就越强。本研究对小叶杨和白羊草混合根土复合体抗剪强度的研究中发现,随着垂直压力的增加抗剪强度增大,且垂直压力与抗剪强度呈现线性关系,小叶杨和白羊草的混合根土复合体的抗剪强度符合库仑定律  $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 。通过库仑公式计算抗剪强度指标—土壤内摩擦角  $\varphi$  和土壤粘聚力  $c$ 。在对土壤内摩擦角  $\varphi$  和土壤粘聚力  $c$  与根系参数进行曲线拟合时发现,随着根长密度和根表面积密度的增加,土壤内摩擦角  $\varphi$  近似呈对数增长,而土壤粘聚力  $c$  呈线性增长。这个结论与大多数研究者的结果相似,特别是与肖宏彬等<sup>[17]</sup>、李建兴等<sup>[18]</sup>研究发现草本和木本植物根系对抗剪强度的贡献分别是提高了其粘聚力和内摩擦角。由此可以推断出,小叶杨根系表面积和根长的增大,可有效增大根系与土壤颗粒的摩擦力和咬合力,土壤

内摩擦角随之增大,但是当增加到一定范围时,单位体积内的土壤变少,土壤内摩擦角将不再增大;白羊草根系的增多可导致土壤颗粒间的各种胶结作用增大,从而导致土壤粘聚力越大。

本研究是对陕北黄土边坡自然环境中小叶杨和白羊草混合根系的分布特征、单根抗拉强度以及林草混合根系的抗剪强度进行的初步分析,结果表明林草混合根系具有很好的护坡作用。而关于林草混合根土复合体的抗剪特性的研究,本人只发现肖宏彬等<sup>[17]</sup>的一篇报道,其对香根草和小叶女贞的单独根系和混交根系构成的根土复合体进行直剪试验,发现林草混交根土复合体的抗剪强度和固土深度因林草根系配比的不同而不同,而关于两种植物根系如何配比才能达到最佳抗剪强度并未分析。本研究由于时间等原因,缺少小叶杨和白羊草各自根土复合体抗剪强度的特性研究,所以有必要进一步扩大取样范围,

增加试验材料,对比小叶杨、白羊草和混合根土复合体的护坡特性,为揭示林草一体化植物根系提高边坡稳定性的力学特性提供理论依据。此外,在护坡作用过程中,植物地上部分可以减少风力和雨水等对坡面的破坏能力,在增强边坡稳定性方面也具有重要作用,因此,在下一步研究中需综合植物地上部分和地下部分的进行分析,从而更全面地评价小叶杨和白羊草林草一体化的固土护坡能力。

## 4 结论

(1) 通过对试验样地进行  $1\text{ m}^3$  体积内的竖向向下分层取样,发现小叶杨与白羊草具有较发达的根系,其主要集中分布在  $0\sim 30\text{ cm}$  土层,表明小叶杨和白羊草的林草混合根系在浅层边坡主要起到“加筋”的护坡作用;

(2) 通过对多组林草单根的抗拉力与抗拉强度和根径进行的曲线拟合,得到小叶杨和白羊草单根抗拉力与根径呈正相关的幂函数关系,小叶杨和白羊草的单根抗拉强度与根径之间均表现为负相关的对数函数关系。由此可得,由于白羊草的单根较小叶杨的细,具有较强的抗拉强度,前者在浅层边坡更能增强根土复合体的抗剪强度,表现出较强的固土护坡作用;

(3) 林草根土混合体的剪应力—剪切位移曲线达到最大抗剪强度的位移随着垂直压力的增大而变短,主要体现在土壤粘聚力随土层深度增加而增大。在对根土复合体抗剪强度指标—内摩擦角  $\varphi$  和土壤粘聚力  $c$  研究发现,土壤内摩擦角  $\varphi$  随根长密度和根表面积密度呈对数增长,且增长速率逐渐降低;而土壤粘聚力  $c$  与根长密度和根表面积密度均呈线性增长。

### 参考文献:

- [1] 苏娅雯,沈秀珍,揭汴荣,等.西部大开发与黄土高原的生态环境建设[J].山西水土保持科技,2002(1):36-38.
- [2] 丁琳霞.生态环境建设与西部大开发的战略思考[J].水土保持研究,2002,9(3):241-242,248.
- [3] 王友顺.生态防护技术在公路边坡工程中的应用研究[J].公路与汽运,2017(5):123-126.
- [4] 董琪,许锐,郭璐,等.植物护坡技术用于黄土干旱地区边坡工程的调查研究[J].路基工程,2016(1):1-6.
- [5] 师东强,赵力天,张譔.边坡生态防护工程植物护坡技术研究[J].内蒙古林业科技,2012,38(1):56-58.
- [6] 许锐,李寻昌,吴瑞芳,等.陕北黄土地区护坡植物适应性研究[J].长安大学学报:自然科学版,2016,36(4):26-32.
- [7] 汤劲松,刘松玉,童立元.植物根系的加筋作用对浅埋公路隧道施工稳定的影响[J].东南大学学报:自然科学版,2009,39(2):334-339.
- [8] 付江涛,李光莹,虎啸天,等.植物固土护坡效应的研究现状及发展趋势[J].工程地质学报,2014,22(6):1135-1146.
- [9] John R. Greenwood SLIP4 EX-A program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2006,24(3):449-465.
- [10] 李富平,夏冬.采矿迹地生态重建模式研究[J].化工矿物与加工,2010,39(5):25-28.
- [11] 张金桃.大宝山排土场复垦绿化实用技术探究[J].有色冶金设计与研究,2009,30(5):11-12,18.
- [12] 赵毓璋.宝天高速公路红砂岩边坡生态植被恢复技术研究[J].公路交通科技:应用技术版,2009(11):204-207.
- [13] 徐国钢,朱兆华,赖庆旺,等.我国工程边坡生态修复几个重大技术问题的认知与实践[J].江西农业学报,2016,28(5):88-94.
- [14] 闫晓玲,杜新源,刘海燕,等.黄土高塬沟壑区水土保持林草措施配置模式[J].人民黄河,2011,33(11):107-108,111.
- [15] 罗歆,代数.重庆市水库建设区土壤侵蚀特征及水土保持探讨[J].人民长江,2015,46(5):97-101.
- [16] Danjon F, Barker D H, Drexhage M, et al. Using three-dimensional plant root architecture in models of shallow-slope stability[J]. Annals of Botany,2008,101(8):1281-1293.
- [17] 肖宏彬,田青青,李珍玉,等.林草混交根—土复合体的抗剪强度特性[J].中南林业科技大学学报,2014,34(2):1-5.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 刘昌义,胡夏嵩,赵玉娇,等.寒旱环境草本与灌木植物单根拉伸试验强度特征研究[J].工程地质学报,2017,25(1):1-10.