

文章编号: 1008-2786-(2018)1-097-09

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000306

浅层滑坡多发区典型植被恢复树种根系 对土壤抗剪强度影响

洪苗苗¹, 汪霞^{1, 2*}, 赵云飞¹, 欧延升¹, 黄政¹

(1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 为揭示坡面植被根系对土壤抗剪强度的影响及其固坡效应的差异性, 选取白龙江流域浅层滑坡多发区两种典型修复树种刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 和毛白杨 (*Populus tomentosa*) 为研究对象, 通过剖面网格法计算不同树种根系的根截面积比 (*RAR*), 采用万能试验机分析不同根系径级单根抗拉特征, 并运用 RWM 模型计算两种乔木根系对土壤抗剪强度的增加值。结果表明, 两种乔木根系的 *RAR* 值, 刺槐 (0.18%) 和杨树 (0.51%) 均大于发挥固坡效应的阈值 (0.1%)。两种乔木的单根抗拉力 (*TF*) 随着直径的增加而增大, 分布规律表现出明显的幂函数特征, $TF_{R. pseudoacacia}$ (363.6 N) < $TF_{P. tomentosa}$ (419.95 N); 刺槐根系的抗拉强度 (*TS*) 与根系直径正相关, 杨树根系与直径呈负相关关系, 且 $TS_{R. pseudoacacia}$ (25.38 MPa) < $TS_{P. tomentosa}$ (27.62 MPa)。RWM 模型计算得到根系对土壤抗剪强度的增加值为刺槐 (21.93 Kpa) < 杨树 (67.61 Kpa)。在研究区, 两种乔木植物根系均能有效增加土壤抗剪强度, 杨树根系的固坡效应优于刺槐, 研究结果可为浅层滑坡多发区植被根系固土模型的应用和生物工程减灾效果的评价提供一定理论依据。

关键词: 浅层滑坡区; 植被根系; 抗拉强度; RWM 模型

中图分类号: X43

文献标志码: A

突发性的暴雨可能会引起斜坡的失稳甚至泥石流等灾害^[1], 目前, 使用传统土木工程措施减少和防止滑坡等地质灾害的发生^[2]。但是, 一些防护工程寿命较短并且会产生大量的碎片, 甚至引发更为严重的地质灾害^[3]。近年来, 随着水土流失、滑坡和泥石流等山地灾害的频发, 有关生物工程对控制坡面水土流失与坡体失稳机理的研究受到广泛关注^[4]。大量实践研究表明植被可以对坡面表土侵蚀和浅层滑坡起到抑制作用^[4]。植物根系相对土体具有较大的抗拉强度, 在土体抵抗外力加载的过程中, 土体中的抗剪力通过根-土间的相互作用, 逐渐迁移转变到根系中, 使根系受到拉力, 从而增大了

土体的抗剪强度^[5]。国内外学者已对不同类型植物的单根抗拉特性、根系对土壤抗剪强度的增加、根系固土的力学机制、根系护坡固土模型及机理等方面开展了许多研究工作^[6-15], 但是目前的研究大多处于理论阶段, 较少运用于植被固坡的评价中。白龙江流域浅层滑坡治理区已开展了大量植被恢复措施^[16-19], 但是对于这一地区生态恢复典型树种固坡效应的对比研究少有文献报道。本文选取白龙江流域浅层滑坡区两种典型植被恢复树种刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 和杨树 (毛白杨) (*Populus tomentosa*), 通过测定其土壤含水率, 根系空间分布及 *RAR*, 单根抗拉特征等基本因素, 运用 RWM 理论模型, 对比两

收稿日期 (Received date): 2017-6-26; **改回日期** (Accept date): 2017-11-20

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (NSFC41572332); 甘肃省重点研发计划 (17YF1FA131); 兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及兰州大学科研业务费专项资金 (lzujbky-2016-bt01)。[National Nature Science Foundation of China (NSFC41572332); Key Research and Development Program of Gansu Province (17YF1FA131); Open Foundation of MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University (lzujbky-2016-bt01)]

作者简介 (Biography): 洪苗苗 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 环境灾害与生态修复。[Hong Miaomiao (1989-), female, M. Sc. candidate, research on environmental disaster and ecological restoration] Email: hongmm15@lzu.edu.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author): 汪霞 (1976-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 环境灾害与生态修复。[Wang Xia (1976-), female, Ph. D., associate professor, research on environmental disaster and ecological restoration] E-mail: wangxia@lzu.edu.cn

种乔木根系对土壤抗剪强度增加值的变化,并开展了典型生态修复树种固坡效应评价,为今后评价区域植被护坡效果,开展全面的生态修复治理工作提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白龙江流域地处秦巴山区、青藏高原、黄土高原三大地形交汇区域^[20],隶属南秦岭高中山侵蚀、剥蚀构造山地,高中山深切割峡谷地貌类型^[21],属亚热带向暖温带过渡区,气候属北亚热带半湿润气候,是我国水土流失和地质灾害多发区,也是长江上游重要的水源涵养和物种资源生态功能保护区。区内年降水量 400~900 mm,年均温 8.4℃到 14.9℃,无霜期 158 天到 238 天。据 2013 年统计陇南市地质灾害隐患点 3300 处,其中滑坡 1120 处,泥石流 1033 处,崩塌 759 处,地面塌陷、地裂缝等 391 处^[22]。2008 年汶川地震灾后重建工作中,研究区内开展了大量植被恢复工程,本试验点位于陇南市武都区已实施了 8 年的构林坪泥石流生态治理示范区,沟内分布着大量的千枚岩和石灰岩,风化崩塌碎屑是沟内泥石流形成的主要固体颗粒物。

1.2 土壤样品采集

2016 年 5 月,在研究区选取坡角为 25°~30°之间,人工种植 8 年发育良好的生态林坡面两个:其中,刺槐恢复区域长度 1.5 km,面积为 1.23 km²。杨树恢复区域长度 1.7 km,面积为 1.5 km²。在每

个坡面选取刺槐和杨树各 3 棵(表 1),采用剖面法,分层采取土壤样品。选取下坡位距树基 50 cm 处开挖 50 cm 的土壤剖面,研究根系的分布^[23]:(1)本实验选择 50×50 cm 的剖面网格(50 cm 以下未发现植物根系),采集根系样本,所采根系样本为正常发育根系,并且避免机械外力对其产生影响。(2)每 10 cm 取土壤样品,并用自封袋密封。每次取样后,擦除手持采样器上残余土样,保证土样的纯度,所采土样用密封袋封存。

1.3 实验方法

运用野外调查法对研究区的刺槐和杨树的根系径级进行统计(图 1)。用游标卡尺测量网格剖面中单根的直径并且进行统计。采集单根样本,自然风干,用样品袋封存。2016 年 5 月进行室内根系抗拉实验测定。在实验开始前,将所有单根放到水中浸泡 8 小时使得所有根系含水量相同^[24,25]。抗拉试验在兰州大学西部环境教育部重点实验室进行,测量仪器为电子万能试验机(型号:CSS-4100,长春试验机研究所,最小值 0.1 N,最大值 100 KN),实验精度为 1 N。实验中,标距为 50 mm,转速 50 mm/min。在实验过程中,首先在标距内测三个直径并取平均值,在标距内断裂的根系样品视为成功,获得根系样品的力学特征数据。本次实验中,根据研究区的特殊性所研究的根系直径小于 10 mm,将 $d \leq 1$ mm 的植物根系定义为毛根, $1 \leq d < 5$ mm 的根系定义为毛细根, $5 \leq d < 10$ mm 的根系定义为细根^[26]。土壤含水率实验在兰州大学甘肃省环境污染预警与控制重点实验室进行,将所采土样带回实验室,分装

表 1 样地分布图

Tab. 1 Site description and characteristics

植株样本 species	位置 Location	海拔 Elevation(m)	场地 Stand area	树龄 Stand Age(years)	胸径 The tree DBH(cm)	树高 The tree height(m)
杨树 1	33°32′06.01″N 104°38′49.42″E	1200	水保林	8	4.8	4.6
杨树 2	33°32′10.36″N 104°38′46.15″E	1234	水保林	8	7.2	3.8
杨树 3	33°22′10.36″N 104°38′46.22″E	1206	水保林	8	4.6	3.4
刺槐 1	33°32′06.01″N 104°38′49.41″E	1190	水保林	8	4.2	3.0
刺槐 2	33°24′22.58″N 104°48′43.34″E	1100	水保林	8	4.3	2.8
刺槐 3	33°32′06.01″N 104°38′49.41″E	1096	水保林	8	7.7	3.2



图1 刺槐(a)和杨树(b)根系采样剖面图

Fig. 1 Soil vertical profile for *Robinia pseudoacacia* (a) and *Populus tomentosa* (b) root system

至铝盒,称重;在烘箱(型号:DHG-9240A,上海齐欣科学仪器有限公司)105°条件下烘24小时,等其恢复室温,再次称重,测其含水率。

1.4 根系对土壤抗剪强度增加值计算-RWM模型

Wu-waldron^[27]等人以库伦定理为根基,得出单根的抗拉强度与根-土复合体抗剪强度的关系:

$$\tau_{rs} = \Delta S_R + C_s + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

式中, τ_{rs} 为含根土的抗剪强度,KPa; ΔS_R 为由根系提供的抗剪强度,KPa。 $(C_s + \sigma \cdot \tan \varphi)$ 为Mohr-Coulomb准则的基础项,KPa。其中, φ 为土的内摩擦角,(°); σ 为剪切面上的法向应力,Wu-waldron模型中,根系对土壤抗剪力的增加值取决于根系抗拉强度(T_R)和剪切面上的根截面积(RAR), RAR 的计算公式为:

$$RAR = \frac{A_R}{A} \quad (2)$$

式中, A_R/A 为各径级的根截面积比;由此,可得出根系对土壤抗剪力的增加值的计算公式为:

$$\Delta S_R = 1.2 T_R \cdot \frac{A_R}{A} \quad (3)$$

研究发现,虽然WM是使用最广泛的计算根系对与土壤抗剪力增加值的方法^[27],但是这种假设过度估

计了植物根系对土壤抗剪强度的增强作用^[28],所以本研究采取修正的WM模型,简称RWM,修正系数 k 选取0.4^[29]如(4)式:

$$\Delta S_R = K \cdot 1.2 T_R \cdot \frac{A_R}{A} \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 土壤含水率

植物根系能穿过具有不同含水率的土层,能深入地面表层至十几米,植物根系具有吸收土壤水分、减小土壤孔隙水、降低土体含水率的作用^[30]。从图2可以得出刺槐剖面的含水率高于杨树剖面。刺槐剖面含水率在20~30cm最高为14.9%,40~50cm最低为9.2%;杨树剖面含水率在30~40cm时达到最大值13.5%,10~20cm最小7.6%。

2.2 根系径级分布

2.2.1 刺槐和杨树的根系径级分布

土壤剖面上,刺槐根系没有明显变化趋势,表层根系数量最多(图2),占根系总量的36.37%;30~40cm的根系数量最少,占总根系数量7.27%。不大于1mm的根系数量占总根系的81.82%;1~5mm的根

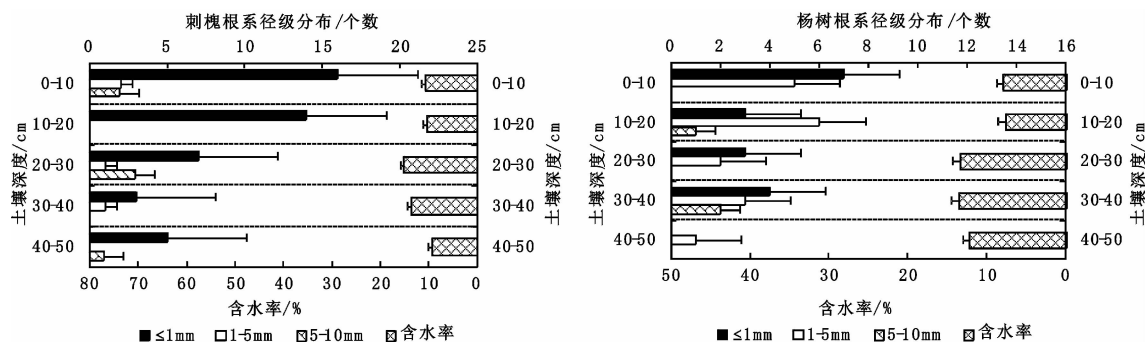


图2 土壤垂直剖面根系径级分布和含水率

Fig. 2 Distribution of root diameter class and the soil moisture content in the vertical profile

系数量占到 7.27%, 5 ~ 10 mm 的根系只占到 10.91%, 刺槐根系主要以毛根和毛细根为主。刺槐根系径级的分布和土壤剖面的含水率显著性并不强。

杨树 0 ~ 10 cm 的根系数量最多(图 2), 占到总根系数量的 32.43%。20 ~ 30 cm 根系数量次之, 占总量 27.03%; 40 ~ 50 cm 的根系数量最少, 为根系总数的 2.71%, 没有明显垂直变化趋势。根系的组成中不大于 1 mm 的根系数量占总根系的 45.95%; 1 ~ 5 mm 的根系数量占到 45.95%, 5 ~ 10 mm 的根系只占到 8.11%。杨树根系的形态主要为毛根和毛细根, 细根数量相对较少, 土壤剖面上径级分布和含水率并无明显相关性。

2.2.2 根数量随土壤剖面变化

随着土壤深度的增加, 刺槐的单根个数呈现递减趋势的幂函数关系。但是, 杨树的单根个数随着深度的增加呈负相关的指数函数(表 2)。其中, H 为土壤深度, x 为根系的数量。刺槐根系的相关性较强, $R^2 = 0.788$; 杨树的相关性较弱, $R^2 = 0.624$ 。

表 2 单根的数量和土壤深度的拟合关系

Tab.2 Relationship of the single root with soil depth

树种	拟合关系式	相关性	P
刺槐	$H = 22.43x^{-0.90}$	$R^2 = 0.788$	$P < 0.01$
杨树	$H = 25.56e^{-0.5x}$	$R^2 = 0.624$	$P = 0.08$

野外实地网格法调查刺槐与杨树根系的 RAR (图 3), 刺槐的 RAR 随着土壤深度的增加逐渐减小 ($p < 0.01$)。杨树的 RAR 随土壤深度的增加先增大后减小, 变化并不显著 ($p = 0.301$)。刺槐与杨树的根系集中于 0 ~ 30 cm。土壤剖面表层刺槐根系 RAR 大于杨树 RAR , 10 ~ 50 cm 杨树根系 RAR 均大于刺槐根系 RAR 。刺槐剖面上 RAR 的最大值出现在土壤表层, 最小值在 40 ~ 50 cm。杨树剖面 RAR

的最大值在 10 ~ 20 cm 土层, 最小值也为土壤剖面底层。

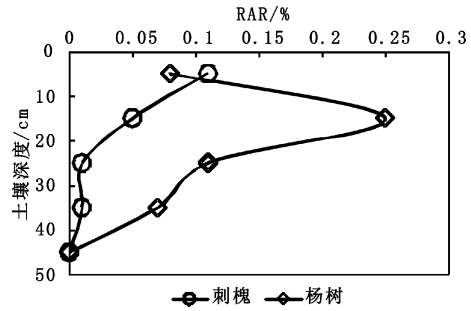


图 3 刺槐和杨树根截面积比 (RAR) 随土壤剖面的变化

Fig.3 Vertical distribution of RAR in *R. pseudoacacia* and *P. tomentosa* stand

2.3 根系抗拉实验测定结果

2.3.1 根系抗拉实验结果

试验中共采集试验样本 128 个, 其中成功样品为 50 个, 成功率为 39.06%。其中, 刺槐样品直径范围从 0.59 mm 到 7.98 mm; 杨树样品的直径范围从 0.35 mm 到 8.34 mm。抗拉试验测得: 刺槐样品的抗拉强度范围为 6.46 MPa 到 56.80 MPa; 杨树样品的抗拉强度范围为 16.77 MPa 到 62.34 MPa。刺槐根系的平均直径为 3.13 ± 2.05 mm (平均值 \pm 标准误差); 杨树根系的平均直径为 4.06 ± 2.28 mm (平均值 \pm 标准误差)。刺槐的抗拉力为 363.6 ± 467.24 N (平均值 \pm 标准误差); 杨树的抗拉力为 419.95 ± 427.80 N (平均值 \pm 标准误差); 刺槐的抗拉强度为 25.38 ± 13.38 MPa (平均值 \pm 标准误差); 杨树的抗拉强度为 27.62 ± 9.93 MPa (平均值 \pm 标准误差)。刺槐抗拉力和抗拉强度随直径的变化规律如图 4 所示; 杨树抗拉力和抗拉强度随直径的变化规律如图 5 所示; 刺槐和杨树的抗拉力都随直径的变化表现出明显增幂函数 ($p < 0.01$) 变化规律;

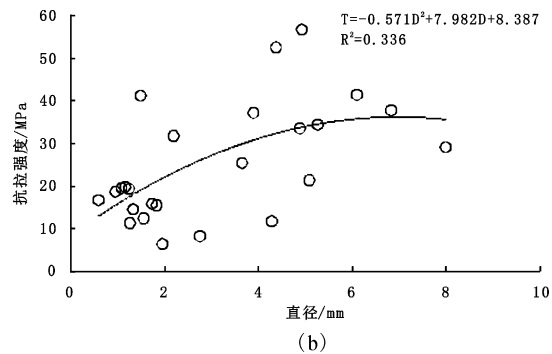
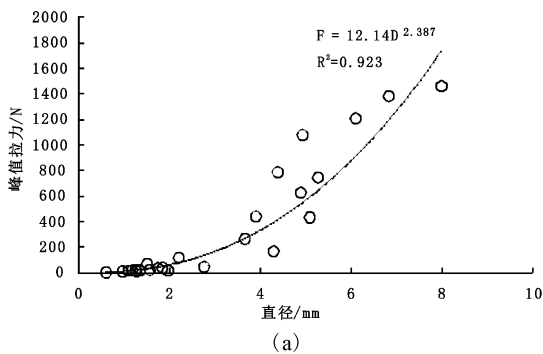


图 4 刺槐抗拉力 (a) 和抗拉强度 (b) 与直径的关系图及幂函数拟合曲线

Fig.4 Regression curves of root diameter vs. tensile force (a) and root diameter vs. tensile strength (b) relationships for *R. pseudoacacia* stand

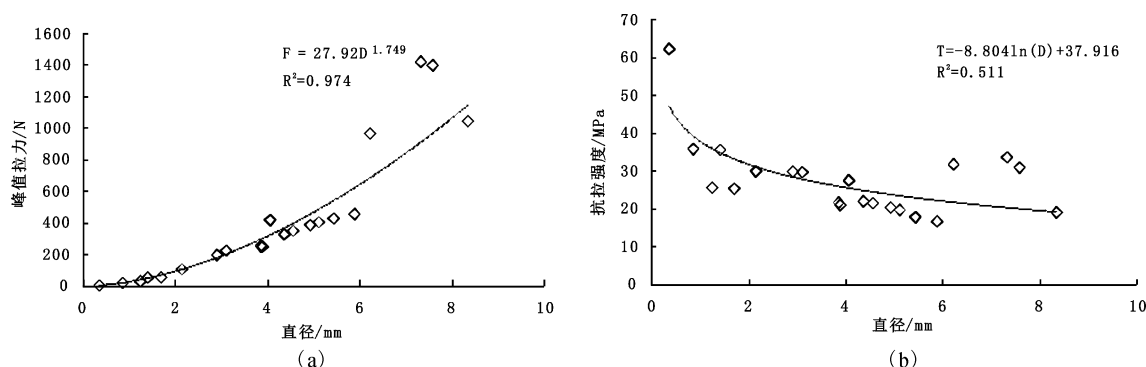


图5 杨树抗拉力(a)和抗拉强度(b)与直径的关系图及幂函数拟合曲线

Fig.5 Regression curves of root diameter vs. tensile force (a) and the root diameter vs. tensile strength (b) relationships for *P. tomentosa* stand

然而刺槐的抗拉强度数据随直径的增加呈增加的二次函数($p=0.14$),规律性并不强;杨树随直径的增加呈现递减的对数函数规律($p<0.05$)。

2.3.2 根系对土壤抗剪强度的增加

由RWM计算得土壤剖面上根系对土壤抗剪切强度的增加值均大于0且呈减小趋势(如表3所示),说明刺槐与杨树的根系增加了土壤抗剪切强度。土壤剖面的表层,刺槐根系对土壤抗剪切强度的增加值大于杨树,10 cm以下土层刺槐根系对土壤抗剪强度的增加值都小于杨树,但是差异性并不显著($p=0.14$)。刺槐根系在土壤表层的抗剪切强度增加值最大为13.4 Kpa,最小值出现在剖面底部,刺槐根-土复合体抗剪强度增加值为21.93 Kpa。杨树根系对土壤抗剪切强度增加值最大为33.14 Kpa,出现在土壤剖面10~20 cm,最小值也是在土壤剖面底部,杨树根-土复合体抗剪强度增加值为67.61 Kpa。

表3 根系对土壤抗剪强度的增加值

Tab.3 Soil reinforced shear strength provided by roots

土壤深度	抗剪切强度增加值 (Kpa)	
	刺槐	杨树
0~10	13.4	10.61
10~20	6.09	33.14
20~30	1.22	14.58
30~40	1.22	9.28
40~50	0.001	0.002

3 讨论

3.1 土壤含水率和根系径级分布

在土壤垂直剖面上,刺槐剖面(0~40 cm)的含

水率高于杨树剖面,说明杨树根系降低土壤剖面水分的能力大于刺槐。植物根系通过自身吸水及蒸腾作用,降水入渗甚至很深土层中的有效渗水都能被消耗掉,土体的抗剪强度提高,边坡的安全系数提高^[30]。随着土壤深度的增加,刺槐和杨树根系的数量总体上是减少的。两种植物单根数量呈递减幂函数关系,这与前人的研究结果相符^[31]。刺槐拟合函数相关性较好($R^2=0.788, p<0.01$),杨树的相关性较差($R^2=0.624, p=0.08$),这可能与杨树的生物遗传因素有关,刺槐根系主要为毛根,杨树的根系主要为毛根和毛细根。刺槐根系主要集中在0~30 cm;杨树根系在0~40 cm基本均匀分布。当 $RAR \geq 0.1\%$ 时根系量才达到了固坡力学强度的有限范围^[32],刺槐的 RAR 的值为0.18%,杨树 RAR 的值0.51%,两者的根系量均大于固坡效应的阈值。

3.2 根系抗拉强度及其影响因素

抗拉力和抗拉强度是影响根系固土效应的重要因素,根系的抗拉力越大,根系的锚固作用越强^[24];植被根系的主根穿过浅层滑坡面,起到锚杆作用,当土壤受到剪切时,将剪切力转移为根系抗拉强度的形式,使得根系增强土壤抗剪强度^[27]。在本次试验中,杨树单根的抗拉力和抗拉强度的平均值都大于刺槐,在根系径级的分布统计中发现,杨树根系的平均直径大于刺槐。实验发现,两种乔木根系的抗拉力随着根系直径的增加符合幂函数,并取得了较好的效果,这与前人的研究相符^[27,31,33]。一般情况下,抗拉强度随着直径的增大而减小的关系,但是不同树种,变化趋势符合函数不同^[5]。本研究发现随着直径的增加,杨树抗拉强度确实存在减小的趋势并符合对数函数关系($p<0.05$);但是,刺槐抗拉强

度和随着直径的增加呈二次函数变化,但数据离散程度高($p = 0.14$)。在采样过程中发现,垂直剖面土层中夹杂岩石碎粒,在刺槐根系的生长过程中可能因为岩石碎粒的挤压,使刺槐根系的内部结构发生变化。有研究表明植物根系的抗拉力与抗拉强度不仅与根系内结构组成物质的含量有关^[23, 34],还取决于根的纤维排列紧密,疏松程度和根的其他物质^[35]。由于植物根系属于高分子生物有机材料,结构具有各向异性及不均匀性特点,引起树种间抗拉强度与直径关系的不同,但这方面的因素还有待更进一步研究^[34]。

3.3 根系对边坡稳定性影响

根-土复合体增加土体的移动阻力,提高外力剪切的抵抗力,增加边坡的稳定性^[6]。由 RWM 模型计算得出,在土壤剖面上,根系对土壤抗剪强度的增加值逐渐减小,这和人研究有所差异^[36]。可能和研究区特殊地质条件有关,两种乔木根系生长土层中含有大量岩石碎粒,使得乔木根系的向下延伸受到阻碍。杨树根系对土壤抗剪强度的增加值大于刺槐根系对土壤抗剪强度的增加值(10 ~ 40 cm),同一研究区所选取的刺槐和杨树树龄,生长环境,气候条件一致,所以抗剪强度的增加值的影响因素与土壤水分,平均抗拉强度,根系的根截面积,数量和形态有关^[25, 37, 38]。土壤水分可以改变水膜粘结力从而影响土壤剪切力,土壤含水率高出一定限度值,阻碍土粒间新的排列,所以土壤抗剪强度随着土壤含水率的增长而下降^[39],实验数据得出刺槐剖面的含水率高于杨树剖面,这可能是影响因素之一。抗拉实验得到杨树的平均抗拉强度大于刺槐,杨树的根截面积比大于刺槐的根截面积比,研究表明乔木根系的抗拉强度和抗拉力主要和根系的数量、直径有关^[40]。一般情况下,植物根系的数量受树种遗传因素的影响^[4],杨树毛细根的数量是刺槐的 6 倍。就植物根系生长形态来说,杨树属垂直根系^[27],根系在土壤剖面上基本均匀分布,通过根-土复合体与土体面的接触增大了根-土复合体的抗滑力,减少变形。杨树根系对土壤抗剪力的增加值在土壤剖面上变化并不显著,可能是由于杨树的根系空间分布受坡度影响较大。属浅层水平根系的刺槐^[35]与表层土壤相互交错形成与坡面平行的根基土层^[5],受到外力的时重点在于增大根-土复合体的摩擦力,从而抵抗剪切力。刺槐土壤剪切力随土

壤深度的增加呈减小趋势,变化明显,符合前人研究^[9],剪切力的增加值集中于 0 ~ 30 cm。两种乔木根系都增加了土体抗剪强度,杨树的根系对土壤抗剪强度的贡献值大于刺槐。

4 结 论

(1) 刺槐 *RAR* 小于杨树 *RAR*, 两者的根系量均发挥一定的固坡效应。两种乔木单根数量随着土壤深度的增加呈现递减趋势,大部分集中在上表层。刺槐根系中以毛根为主,主要集中在 0 ~ 30 cm; 杨树根系中以毛根和毛细根为主,在 0 ~ 40 cm 基本均匀分布,40 ~ 50 cm 单根个数最少,两种乔木根系在垂直剖面上的空间分布是影响 *RAR* 的主要因素。

(2) 两种乔木根系的抗拉力随着直径的增加呈幂函数关系,抗拉强度随直径的变化趋势呈不同函数,由于生境的特殊性刺槐抗拉强度随直径的增长而增加,杨树则表现出减小趋向。两种乔木的抗拉力学特征对研究区的浅层滑坡起到积极作用。抗拉试验成功率较低,需进一步探索试验过程中的影响因素,改进试验方法,提高成功率。

(3) RWM 模型准确模拟两种乔木根系对土壤抗剪强度的增加值,证实刺槐和杨树根系都达到了一定的固坡效应,对于 25° ~ 30° 范围的坡面,杨树固坡效应优于刺槐,但是,坡度在一定程度上影响了杨树根系的空间分布特征,土壤抗剪强度的增加值在土壤剖面变化不显著。两种乔木一定程度上控制白龙江流域的浅层滑坡的发生,随着植物生长周期中根系空间分布特征的变化,植物根系固坡也是一个动态过程,不同护坡植物组合模式,不同坡度对植物根系的影响还有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] CHIRICO G B, BORGA M, TAROLLI P, et al. Role of Vegetation on Slope Stability under Transient Unsaturated Conditions [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, **19** (19): 932 - 941.
- [2] FANG H, CAI Q, LI Q, et al. Causes and countermeasures of giant flash flood and debris flow disaster in Zhouqu County in Gansu Province on August 7, 2010 [J]. *Science of Soil & Water Conservation*, 2010, **8** (6): 14 - 18.
- [3] WANG G L. Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China [J]. *Natural Hazards*, 2013, **69** (3): 1835 - 1847.
- [4] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理

- 研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, **18** (4): 895 - 904 [XIONG Yanmei, XIA Hanping, LI Zhian, et al. Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance: A research review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, **18** (4): 895 - 904.]
- [5] 吕春娟, 陈丽华, 宋恒川, 等. 植物根系固坡力学机理研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2011, **23** (3): 21 - 28 [LU Chunjuan, CHEN Lihua, SONG Hengchuan, et al. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2011, **23** (3): 21 - 28.]
- [6] 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 [ZHOU Yunyan, CHEN Jianping, WANG Xiaomei. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21** (6): 1171 - 1177.]
- [7] GRAY D H, OHASHI H. Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, **109** (3): 335 - 353.
- [8] SHEWBRIDGE S. The influence of fiber properties on the deformation characteristics of a reinforced sand [D]. Berkely: University of California, 1987.
- [9] WU T H, BEAL P E, LAN C. In-situ shear test of soil-root systems [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **114** (12): 1376 - 1394.
- [10] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡水库消落带4种草本根系抗拉特性及根系粘聚力[J]. 水土保持学报, 2015, **29** (4): 188 - 194 [ZHONG Ronghua, BAO Yuhai, HE xiubin, et al. Root tensile properties and root cohesion of 4 herbaceous plant species in the riparian zone of three gorges reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29** (4): 188 - 194.]
- [11] 陆桂红, 欧国强, 杨顺, 等. 泥石流源区典型草本植物根系抗拉试验[J]. 山地学报, 2014, **32** (6): 725 - 731 [LU Guihong, OU Guoqiang, YANG Shun, et al. Root tensile of typical grass in debris flow triggering area. [J] Mountain Research, 2014, **32** (6): 725 - 731.]
- [12] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报, 2002, **22** (5): 20 - 23 [CHENG Hong, ZHANG Xinquan. An experimental study on herb plant root system for strength principle of soil-fixation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, **22** (5): 367 - 369.]
- [13] 李宁, 陈丽华, 杨苑君. 油松、华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2015, **37** (12): 77 - 84 [LI Ning, CHEN Lihua, YANG Yuanjun. Factors influencing root tensile properties of Pinus tabuliformis and Larix principis-rupprechtii [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, **37** (12): 77 - 84.]
- [14] GENET M, STOKES A, SALIN F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots [J]. Plant and Soil, 2005, **278** (1): 1 - 9.
- [15] MATTIA C, BISCHETTI G B, GENTILE F. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species [J]. Plant and Soil, 2005, **278** (1): 23 - 32.
- [16] WANG S, MENG X, CHEN G, et al. Effects of vegetation on debris flow mitigation: A case study from Gansu province, China [J]. Geomorphology, 2016, **282**: 64 - 73.
- [17] 王思源, 曾润强, 乔良, 等. 松散斜坡上刺槐根系分布特征及其抗拉实验[J]. 兰州大学学报(自科版), 2014, **50** (5): 676 - 679 [WANG Siyuan, ZENG Runqiang, QIAO Liang, et al. Root distribution and tensile strength of Robinia pseudo acacia linn. on the debris slopes [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, **50** (5): 676 - 679.]
- [18] XIONG M, MENG X, WANG S, et al. Effectiveness of debris flow mitigation strategies in mountainous regions [J]. Progress in Physical Geography, 2016, **40** (6).
- [19] 黎志恒, 文宝萍, 贾贵义, 等. 甘肃省白龙江流域滑坡分布规律及其主控因素[J]. 兰州大学学报(自科版), 2015, **51** (6): 768 - 776 [LI Zhiheng, WEN Baoping, JIA Guiyi, et al. Characteristics of the landslide distribution along the Bailongjiang river basin and its controlling factors [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, **51** (6): 768 - 776.]
- [20] 温煜华, 王乃昂, 吴吉东, 等. 陇南地区行政中心重建的自然灾害背景分析[J]. 兰州大学学报(自科版), 2009, **45** (s1): 42 - 45 [WEN Yuhua, WANG Naiang, WU Jidong, et al. Affect of natural disasters on administration center selection of longnan region in Gansu Province [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, **45** (s1): 42 - 45.]
- [21] 柳金峰, 黄江成, 欧国强, 等. 甘肃陇南武都区泥石流易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, **21** (4): 8 - 13 [LIU Jinfeng, HUANG Jiangcheng, OU Guoqiang, et al. Susceptibility evaluation of debris flow in the Wudu District, Longnan City, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, **21** (4): 8 - 13.]
- [22] 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 等. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013 (4): 1 - 15 [MENG Xingmin, CHEN Guan, GUOPeng, et al. Research of landslide and debris flows in Bailong river basin: progress and prospect [J]. Marine geology & quaternary geology, 2013, (4): 1 - 15.]
- [23] JI J, KOKUTSE N, GENET M, et al. Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on Black Locust (Robinia pseudoacacia) and Arborvitae (Platycladus orientalis) stands on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2012, **92** (1): 139 - 154.
- [24] BISCHETTI G B, CHIARADIA E A, SIMONATO T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. Plant and Soil, 2005, **278** (1): 11 - 22.
- [25] STOKES A, ATGER C, BENGOUGH, A G., et al. Desirable plant root traits for protecting mountain slopes against landslides [J]. Plant and Soil, 2009, **324**, 1 - 30.

- [26] WU T H, Iii M K, SWANSTON D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, **16** (1): 19–33.
- [27] 及金楠, 张志强, 郭军庭, 等. 黄土高原刺槐和侧柏根系固坡的有限元数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014, **30** (19): 146–154 [JI Jinnan, ZHANG Zhiqiang, GUO Juntao, et al. Finite element numerical simulation of Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) roots on slope stability on Loess Plateau of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, **30** (19): 146–154.]
- [28] POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model [J]. Water Resources Research, 2005, **41** (7): 226–244.
- [29] PRETI F. On the Root Reinforcement Modeling [R]. Geophysical Research Abstracts, 2006, **8**: 4555.
- [30] 韦红波, 李锐, 杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展[J]. 植物生态学报, 2002, **26** (4): 489–496 [WEI Hongbo, LI Rui, YANG Qinke. Research advances of vegetation effect on soil and water conservation in China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, **26** (4): 489–496.]
- [31] 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 [FENG Guojian, SHEN Fan, WANG Shitong. Study on Distribution Characteristic and Tensile Strength of Slope Eco-Engineering Plant Root [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2013, **30** (2): 115–118.]
- [32] 解明曙. 乔灌木根系固坡力学强度的有效范围与最佳组构方式[J]. 水土保持学报, 1990, **4** (1): 17–24 [XIE Mingshu. Study on determining the effective limits of the tree and bush roots of strength and the best distribution roots for stable slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, **4** (1): 17–24.]
- [33] 吕春娟, 陈丽华, 周硕, 等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. 农业工程学报, 2011, (S1): 329–335 [LU Chunjuan, Chen Lihua, Zhou Shou, et al. Root mechanical characteristics of different tree species [J]. Transactions of the CSAE, 2011, (S1): 329–335.]
- [34] GENET M, STOKES A, SALIN F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots [M]// Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability. Springer Netherlands, 2007: 3–11.
- [35] 陈丽华, 及金楠, 冀晓东. 林木根系基本力学性质 [M]. 科学出版社, 2012 [CHEN Lihua, JI Jinnan, JI Xiaodong. Basic mechanics of forest root system [M]. Science press, 2012, 104–105.]
- [36] 刘惠江, 李光范, 胡伟, 等. 红粘土土质边坡乔木根-土复合体剪切试验 [J]. 山地学报, 2016 (6): 757–762 [LIU Huijiang, LI Guangfan, HU Wei, et al. Research on In-situ Shear Test of Root-soil Composites of the Root System of 4 Arbor Species in Red Clay slope [J]. Mountain Research, 2016 (6): 757–762.]
- [37] COPPIN N J, RICHARDS I G. Use of vegetation in civil engineering [M]. Butterworths, 1990.
- [38] GRAY, D H, SOTIR R B. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control. [J]. Soil Science, 1996, **163** (1): 83–85.
- [39] 甘磊, 彭新华, 谢永雄, 等. 放牧对内蒙古大针茅草原土壤剪切力空间分布的影响[J]. 草业科学, 2014, **31** (2): 219–223 [GAN Lei, PENG Xinhua, XIE Yongxiong, et al. Effects of grazing on spatial distribution of shear strength in inner Mongolia Grassland [J]. Pratacultural science, 2014, **31** (2): 219–223.]
- [40] PASSIOURA J B. Soil structure and plant growth. [J]. Australian Journal of Soil Research, 1991, **29** (6): 717–728.

Effect of Ecological Restoration Plants Root on Slope Reinforcement in Shallow Landslide Prone Region

HONG Miaomiao¹, WANG Xia^{1,2*}, ZHAO Yunfei¹, OU Yansheng¹, HUANG Zheng¹

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to reveal the differences in the application of ecological restoration plant roots on the reinforcement effect on soil strength and slope stabilization, the study focused on the biotechnical characteristics of *Robinia pseudoacacia* and *Populus tomentosa* roots on soil reinforcement effect. Field investigations were conducted to estimate the root area ratio (RAR) in vertical soil profile. Laboratory tests were performed to measure the root

tensile force (TF) and the root tensile strength (TS). The root additional shear strength was determined by Revised Wu-waldron (RWM) model. The results indicated that RAR distribution differed significantly with root architecture and was strongly related to soil depth and spatial distribution, while the RAR of *Robinia pseudoacacia* (0.18%) and *Populus tomentosa* (0.51%) were greater than the limitation of slope reinforcement (0.1%). Both tension force (TF) increased with the increasing of root diameter, showing with power function features significantly with $TF_{R. pseudoacacia} (363.6 \text{ N}) < TF_{P. tomentosa} (419.95 \text{ N})$. But the tensile strength (TS) for both root systems didn't show similar trend with $TS_{R. pseudoacacia} (25.38 \text{ Mpa}) < TS_{P. tomentosa} (27.62 \text{ Mpa})$. The root additional shear strength calculated by RWM model showed that $R. pseudoacacia (21.93 \text{ Kpa}) < P. tomentosa (67.61 \text{ Kpa})$. In the study area, the two arbor root systems improved the slope stability effectively and increased the soil shear strength significantly, *Populus tomentosa* root system had more effectiveness of reinforcement for soil stability than *Robinia pseudoacacia* root system. The study could provide theoretical basis and the practical evaluation for biological engineering effect on superficial landslide area.

Key words: superficial landslides; Arbor root systems; tensile strength; RWM model

官亭盆地喇家遗址全新世中期古土壤地层考古炭方剖面

官亭盆地喇家遗址是一处以齐家文化为主的大型史前灾难遗迹,它的发掘具有重要的科研和考古价值。官亭盆地喇家遗址全新世中期古土壤地层考古炭方剖面,可以直观看到全新世中期黑垆土类古土壤地层中夹有两层红粘土质泥流堆积层,记录了两期大型的暴雨泥流事件,为我们揭开了喇家灾难的神秘面纱。

详见本期《青海喇家遗址全新世中期土壤与泥流沉积物地球化学特征》一文。