

甘肃天水浅表层滑坡易发区滑坡分布与植被根系特征

李牧阳^{1,2}, 王云琦^{1,2}, 王玉杰^{1,2}, 张建华³, 代智盛^{1,2}, 王丽娟^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院重庆三峡库区森林生态系统教育部野外科学观测研究站,北京 100083;

2.北京林业大学水土保持学院重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083;

3.甘肃省小陇山林业实验局林业科学研究所,甘肃 天水 741022)

摘要:为探究甘肃天水浅表层滑坡易发区滑坡分布特征与植被的关系,选取典型滑坡区域和典型植被类型进行研究。油松、华山松、日本落叶松和锐齿槲栎为研究区内典型乔木类型,针对种间根系分布特征和力学特性展开研究。首先,通过无人机获取区域不同植被类型分布,统计得到不同林分类型下的滑坡密度;其次,通过剖面法调查0—100 cm土层深度内的根系数量与直径分布,进行了单根抗拉试验测得抗拉强度,并分层量化为根系附加黏聚力;最后,结合林分调查结果和岩土体力学性质,计算不同植被类型边坡在不同水分条件下和坡度下的安全系数。结果表明:(1)在滑坡高密度区和滑坡低密度区,油松×华山松林地的滑坡密度均高于日本落叶松×锐齿槲栎林地;(2)锐齿槲栎根系数量、分布深度和单根抗拉强度显著高于油松、华山松和日本落叶松,其根系垂直分布深度超过100 cm,抗拉强度最大可达 (32.551 ± 7.551) MPa,0—100 cm土层深度内提供的平均附加黏聚力达9.364 kPa;(3)当岩土体处于饱和的极端降水条件时,油松、华山松、日本落叶松对坡体稳定的作用效果为负,而锐齿槲栎能有效加固边坡,在当地具有防治浅表层滑坡的良好功能。

关键词:浅表层滑坡;根系固坡;生态减灾;边坡稳定

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)06-0101-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.016

Landslide Distribution and Vegetation Root Characteristics in Shallow Landslide-prone Area of Tianshui, Gansu

LI Muyang^{1,2}, WANG Yunqi^{1,2}, WANG Yujie^{1,2},

ZHANG Jianhua³, DAI Zhisheng^{1,2}, WANG Lijuan^{1,2}

(1.Three-gorgesarea (Chongqing) Forest Eco-system Research Station of Ministry of

Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Chongqing Jinyun Forest Eco-system Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry

University, Beijing 100083; 3.Xiaolongshan Forestry Research Institute of Gansu Province, Tianshui, Gansu 741022)

Abstract: Aimed to analyze the relationship between landslide distribution and vegetation types, typical landslide areas and tree species was chosen in this research. *Pinus tabulaeformis*, *Pinus armandi*, *Larix kaempferi*, and *Quercus aliena* are 4 typical tree species widespread in the study area, and their root distributions and mechanical characteristics among species were analyzed. The unmanned aerial vehicle images were used to obtain the landslide density in different vegetation areas according to different physiological characteristics of leaves. Root investigation within 100 cm depth soil by soil profile method was used to quantify root number and diameter distribution, indoor experiments were conducted to test the tensile strength of each single root for root additional cohesion evaluation. Finally, the safety factors of slopes with different vegetation types under different water conditions and slopes were calculated combining with forest survey results and the mechanical properties of rock and soil. The results showed that: (1) The *P. tabulaeformis* and *P. armandi* forests have higher landslide density than the *L. kaempferi* and *Q. aliena* forests in both high and low landslide density areas. (2) The root number, distribution depth, and tensile strength of single root of *Q. aliena*

收稿日期:2020-03-30

资助项目:国家自然科学基金项目“降雨条件下植物根系动态固土效应研究”(31971726);中央高校基本科研业务费专项“山地灾害和植被间的相互响应机制”(2018BLCB03)

第一作者:李牧阳(1997—),女,硕士研究生,主要从事植被与山地灾害研究。E-mail:limuyang@bjfu.edu.cn

通信作者:王云琦(1979—),女,教授,主要从事水土保持工程研究。E-mail:wangyunqishuibao@bjfu.edu.cn

was significantly greater than those of *P. tabulaeformis*, *P. armandi*, and *L. kaempferi*. The root vertical distribution of *Q. aliena* was more than 100 cm, the root maximum tensile strength was (32.551 ± 7.551) MPa, and the root average cohesion was 9.364 kPa in 100 cm depth. (3) When the rock and soil were in saturated extreme precipitation condition, the contributions of *P. tabuleaformis*, *P. armandi*, and *L. kaempferi* to slope stability were negative, while *Q. aliena* could efficiently reinforce the slope and had good function of preventing and controlling the shallow landslide.

Keywords: shallow landslide; root reinforcement to slope; ecological disaster mitigation; slope stability

滑坡是全球常见的山地灾害,黄土高原地区是中国滑坡、泥石流、崩塌等灾害频发的关键区域^[1]。滑坡常由降雨、地震、台风等原因触发^[2],其中降雨是最主要的致灾因子之一。近 10 年来,国内外极端降雨事件的频发加剧了滑坡灾害的发生^[3],如 2010 年甘肃舟曲特大暴雨、2012 年北京特大暴雨、2013 年陕西延安特大暴雨、2013 年甘肃天水特大暴雨、2013 年美国科罗拉多州特大暴雨等。这些极端事件造成的山地灾害不仅导致了人员伤亡和财产损失,更加剧了生态环境退化,对于基础设施重建及植被恢复都造成了一定难度。出于防灾减灾的迫切需要,在灾害敏感区域展开研究显得尤为重要。

随着生态文明建设的推进和退耕还林政策的落实,植被常被用来防治水土流失。植被(草本、灌木、乔木)稳定边坡和减少土壤侵蚀的功能被普遍认可,且结合土壤生物工程措施进行了广泛应用^[4]。植物根系对边坡稳定性作用的定量研究始于 40 年前,已有研究^[5-6]对含根土进行了剪切试验,原位土和重塑土的野外试验结果表明,含根土的抗剪强度远大于素土。根土复合体可以视为加筋土,当土体遭受外力发生变形时,根系部分为土体提供附加黏聚力。根系与土壤间的相互作用以及根系的强度特性,增强了土体抵抗变形的能力。植物根系形态及力学特性的差异,造成了不同植物种固坡效应的差异。有研究^[7]发现,浅根云杉(*Picea sitchensis*)根系分布的不对称性容易导致锚固能力的降低;而刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)是黄土高原的常见水土保持树种,对于加固边坡具有积极作用^[8]。整体而言,植物极大地增强了边坡的稳定性,突出了坡面植被恢复对防治浅层滑坡的重要性^[9]。我国造林立地复杂,不合理植被配置方式的生态减灾效益不理想。因此,针对不同地质环境条件下的坡体,合理配置植物种是目前工程实践中亟待解决的问题。

甘肃天水曾在 2013 年 7 月遭遇了大规模暴雨群发性滑坡泥石流灾害,即使在植被覆盖良好的区域也发育了大量浅表层滑坡。为定量分析林地滑坡发生频率与植被类型间的关系,本研究从根系力学角度针对该区域典型乔木的根系分布特征及力学特性展开

研究,并结合区域岩土体力学特性和不同的水分条件,基于无限斜坡模型评价不同植物种的固坡效应差异,以期为该区域灾后生态修复和重建提供技术支撑,研究结论拟为评价当地造林边坡的稳定性及水土保持工程的生产实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省天水市秦州区,地处黄土高原西南部($105^{\circ}48'36''\text{E}$, $34^{\circ}19'10''\text{N}$),是黄河流域和嘉陵江流域的交界地带,海拔 1 485~1 970 m,属中山区,地势北高南低。该区域地质构造复杂,软弱岩土广泛分布,是我国崩塌、滑坡、泥石流灾害多发区之一。气候受控于冷温带大陆气团,属于典型温带半湿润半干旱气候,雨季集中在 6—8 月,年降水量 700~900 mm,年均气温 19℃。自 20 世纪七八十年代开展人工造林工程以来,区域植被覆盖率较高。人工造林工程主要树种有松科油松(*Pinus tabulaeformis*)和松科日本落叶松(*Larix kaempferi*)。天然树种有松科华山松(*Pinus armandi*)、壳斗科锐齿槲栎(*Quercus aliena*)、豆科刺槐和杨柳科毛白杨(*Populus tomentosa*)等。选取研究区内分布最广泛的油松、华山松、日本落叶松和锐齿槲栎作为研究对象,树种信息见表 1。

表 1 典型乔木类型

树种	林分类型	科	属	叶片生理特征
油松	人工纯林	松科	松属	常绿针叶
华山松	次生混交林	松科	松属	常绿针叶
日本落叶松	人工纯林	松科	落叶松属	落叶针叶
锐齿槲栎	次生混交林	壳斗科	栎属	落叶阔叶

1.2 材料与方法

1.2.1 滑坡实地调查 通过谷歌地球(Google Earth)历史影像,对比滑坡前后遥感图像选择典型滑坡区域。使用大疆无人机对典型滑坡区域进行航拍,通过 Pix4D 软件进行拍摄影像的拼接,影像拍摄时间为 2019 年 5 月。根据不同树种叶片颜色差异区分不同树种,并结合谷歌地球中不同季节的历史影像进行验证。以此获取不同林分类型的空间分布特征,并进行滑坡密度统计。研究中的滑坡区域 I、II 分别位于为天水市秦州区的林梢坝和马家坝附近。

1.2.2 植物根系分布调查 在典型滑坡的滑坡边界外缘设置 20 m×20 m 大小的样方,并选择具有相近林龄的不同树种的标准样地。选取长势良好的标准木进行根系调查,在距离树干 50,100 cm 的位置挖掘垂直土壤剖面,避免将剖面上根系挖断。在根系剖面上,使用 50 cm×50 cm 的金属框架统计根系数量,利用游标卡尺对根系的直径进行测量。由于水分差异可能导致根系空间分布的不均匀性,因此本研究调查了不同坡位的根系剖面,以提高统计结果的准确和科学性。在距离树干 50,100 cm 位置处,围绕树干分别挖掘至少 3 个剖面,其中包括上坡位、中坡位和下坡位。根系截面积比 RAR(root area ratio)反映了根系面积占截面面积的比例,距离树干 50 cm 处的根系分布用于计算 RAR(无量纲):

$$RAR = \frac{A_r}{A_t} = \frac{\sum_{i=1}^N \pi D_i^2}{4a \times b} \quad (1)$$

式中: A_r 为土壤截面上所有根系的总面积(mm^2); A_t 为土壤截面面积(mm^2); D_i 为根系直径(mm); a 为土壤截面的长度(mm); b 为土壤截面的宽度(mm)。

1.2.3 根系抗拉强度测试 在土壤剖面上采集不同直径的根系,随机采集生长良好、单根通直均匀且直径 <10 mm 的根样。利用万能试验机进行单根拉伸试验,拉伸速率为 1 mm/min,直到根系拉伸断裂为止,以根系在拉伸过程中于夹具间断裂为有效的抗拉强度数据。根系样品采集于 2019 年 7 月,并于当月完成全部根系样品的测试。单根抗拉强度计算公式为:

$$T_r = \frac{4F_{\max}}{\pi D^2} \quad (2)$$

式中: T_r 为单根抗拉强度(MPa); $F_{\max}$ 为根系断裂时的最大峰值拉力(N); D 为单根直径(mm)。

根系附加黏聚力由 Wu 等^[10]提出的根土复合体模型(Wu-Waldron 模型)量化。由于各个根径内的平均抗剪强度存在差异,因此将根系平均抗拉强度分为不同径级^[8],分别为 0~1.0,1.0~2.0,2.0~5.0,5.0~10.0 mm。Wu-Waldron 模型设定了一些假设条件:(1)所有根系垂直于破坏面;(2)不存在滑动拔出的根系;(3)破坏面上所有根系都被拉断。基于以上假设,导致 Wu-Waldron 模型高估了实际的附加黏聚力值。国内学者^[11]对 Wu-Waldron 模型进行试验修正,得到的修正系数取值范围为 0.55~0.82。附加黏聚力 c_r (kPa) 计算公式为:

$$c_r = k'' \cdot k \cdot RAR \cdot T_r = \frac{k}{A} k'' \cdot \sum_{i=1}^N (\overline{T_{ri}} \sum_{j=1}^N A_{rj}) \quad (3)$$

式中: k'' 为根系附加黏聚力理论和断裂修正系数(无量纲),本研究中取值 0.6; k 为根系与破坏面间夹角

相关系数(无量纲),取值范围为 1.1~1.3,本研究中取值 1.2; $\overline{T_{ri}}$ 为第 i 个径级的平均抗拉强度(MPa); A_{rj} 为剖面第 j 个根系在剖面上的截面积(mm^2); A 为统计根系剖面的面积(mm^2)。

1.2.4 稳定性计算 为表征不同林分类型下的边坡稳定情况,通过计算抗滑力和下滑力的比值(安全系数)来反映边坡稳定性。一般认为安全系数 >1.2 时,达到土质边坡工程安全等级(三级边坡标准)^[12];反之,则说明坡体不稳定。本研究考虑了乔木自重^[13]对坡体稳定性的影响,在计算中加入地上部分的树重,量化为地上部分生物量。基于 Fredlund 等^[14]理论计算非饱和土的抗剪强度,因此安全系数 F_s (无量纲)计算公式为:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{c_s + c_r + (\gamma h \cos^2 \beta + W_t \cos \beta - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b}{\gamma h \sin \beta \cdot \cos \beta + W_t \sin \beta} \quad (4)$$

式中: c_s 为土壤有效黏聚力(kPa); γ 为土壤重度(kN/m^3); h 为滑动面距坡面的垂直深度(m); β 为坡面与水平地面的夹角($^\circ$); W_t 为乔木地上部分单位生物量(kPa); φ' 为土壤有效内摩擦角($^\circ$); u_a 为孔隙气压力(kPa); u_w 为孔隙水压力(kPa); φ^b 为似黏聚力摩擦角($^\circ$)。其中,土壤有效黏聚力 c_s 和有效内摩擦角 φ' 参数使用 GDS 应力路径三轴仪通过饱和和不排水试验获取。采用反压力饱和法,分别设置有效围压为 50,100,150,200 kPa,剪切速率为 0.2 mm/min^[15]。原状土样品采集于 2019 年 11 月,并于同年 12 月完成了测试。

孔隙水压力与孔隙气压力的差值($u_a - u_w$)为基质吸力。土壤在非饱和情况下,认为与大气压连通,则 $u_a = 0$,即基质吸力为孔隙水压力 u_w 的负值。似黏聚力摩擦角 φ^b 同样基于 Fredlund 等^[14]的理论进行计算,计算公式为:

$$\tan \varphi^b = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tan \varphi' \quad (5)$$

式中: θ 为土壤体积含水量(%); θ_r 为土壤残余含水量(%); θ_s 为土壤饱和含水量(%)。

基质吸力($u_a - u_w$)首先通过 H-1400PF 型土壤高速离心机试验测定不同含原状土不同含水量对应的吸力^[16],再利用美国盐度实验室(USSL)研发的 RETC 软件以 V-G 模型作为本构,以率定出土壤的水-力耦所需的参数。V-G 模型的计算公式为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha |H|)^n} \right]^{(1 - \frac{1}{n})} \quad (6)$$

式中: α 为进气值的倒数($1/\text{cm}$); H 为压力水头(cm); n 为孔隙直径分布参数(无量纲)。

此外,为定量描述林分特征,在选取的标准样地内进行每木检尺。根据中华人民共和国农林部标准 LY

208—1977《二元立木材积表》^[17]计算立木材积,再由立木材积计算立木地上部分整体重量(仅以胸径和树高作为指标,未考虑树种间差异),包括树干、叶片等的重量。立木地上部分重量 $W(\text{kg})$ 计算公式为^[18]:

$$W=547.75166V^{1.044341} \tag{7}$$

式中: V 为立木材积(m^3)。

本研究设置了不同水分条件下的无限边坡,研究不同林分类型边坡安全系数随土层深度的变化。以 3 种不同水分条件和 3 种不同坡度为例进行稳定性计算,不同水分条件下的含水量在降雨前及降雨过程中使用土壤水分速测仪测得。

1.2.5 数据分析 使用 IBM SPSS Statistics 24 软件进行显著性分析,并通过 K—S 检验进行方差齐性检验和均匀性检验,判断数据是否符合正态分布;对不符合正态分布的数据,经过对数转换后再进行分析。本研究将根系径级和土层深度分别作为自变量或协变量,使用单因素方差分析(ANOVA)和协方差分析(ANOCOVA)来检验不同树种根系特性的种间差异。

2 结果与分析

2.1 滑坡分布特征

实地考察发现,滑坡区域植被类型主要为油松、华山松、日本落叶松和锐齿槲栎 4 种树种分布的林地。依据不同树种的叶片生理特征和叶片颜色解译出不同树种的分布范围,并对不同林分区域和滑坡区域进行矢量化。从表 2 可以看出,深色常绿林分类型(油松、华山松)下的滑坡密度在不同区域均高于浅色落叶林分类型(日本落叶松、锐齿槲栎)。其中,区域 I 为滑坡较为密集的区域,区域 II 滑坡相对区域 I 滑坡密度小,各林分下的滑坡规模无显著差异。

2.2 根系分布特征

由图 1 可知,锐齿槲栎在距树干 50 cm 处 100 cm 深度具有最大根系数量,其次分别为油松、日本落叶松和

华山松。4 种树种根系数量在距离树干 50 cm 处 100 cm 深度范围内表现为锐齿槲栎(165 根) $>$ 油松(82 根) $>$ 日本落叶松(59 根) $>$ 华山松(50 根);在距离树干 100 cm 处 100 cm 深度范围内表现为锐齿槲栎(111 根) $>$ 油松(58 根) $>$ 日本落叶松(41 根) $>$ 华山松(32 根)。

表 2 不同植被覆盖区域的滑坡密度统计

主要树种	单位:%		
	区域 I	区域 II	平均密度
	(0.91 km ²)	(2.82 km ²)	(3.73 km ²)
油松×华山松	22.37	8.31	17.61
日本落叶松×锐齿槲栎	11.89	3.56	4.99

注:滑坡密度为区域滑坡面积与区域总面积的比值。

由图 2 可知,油松根系数量在距离树干 50 cm 和 100 cm 处均表现为 0—30 cm 土层中显著大于 30—100 cm 土层。华山松根系数量在距离树干 50 cm 和 100 cm 深度处表现为 0—20 cm 土层中显著大于 20—100 cm 土层。日本落叶松根系数量在距离树干 50 cm 处表现为 0—30 cm 土层显著大于 30—100 cm 土层;在距离树干 100 cm 处表现为 0—20 cm 土层显著大于 20—100 cm 土层。锐齿槲栎根系数量在距离树干 50 cm 处表现为 0—20 cm 土层显著大于 20—100 cm 土层,且 20—100 cm 土层深度内各土层间根系数量无显著差异。在距离树干 50 cm 和 100 cm 处,树种间根系数量差异随土层深度增加而增大。4 种树种根系均在 0—30 cm 土层内表现为集中分布,在 30—100 cm 土层表现为锐齿槲栎根系显著大于其他 3 种树种。油松、华山松根系分布在垂直方向和水平方向上均呈现随深度、距离减小的趋势;日本落叶松根系呈现 0—40 cm 垂直方向和 0—100 cm 水平方向聚集分布;锐齿槲栎根系分布最多,在水平和垂直方向上均随距离递减,在距离树干 50 cm 剖面位置处,20—100 cm 土层深度根系数量分布无显著差异,锐齿槲栎分布的根系密度和深度均显著大于其他 3 种树种。

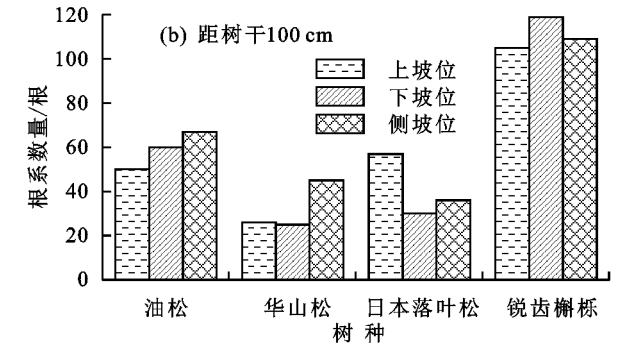
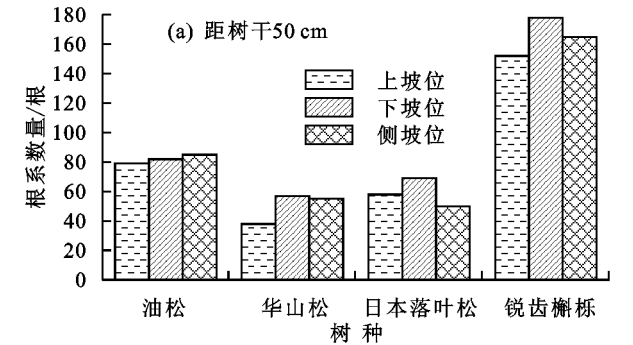


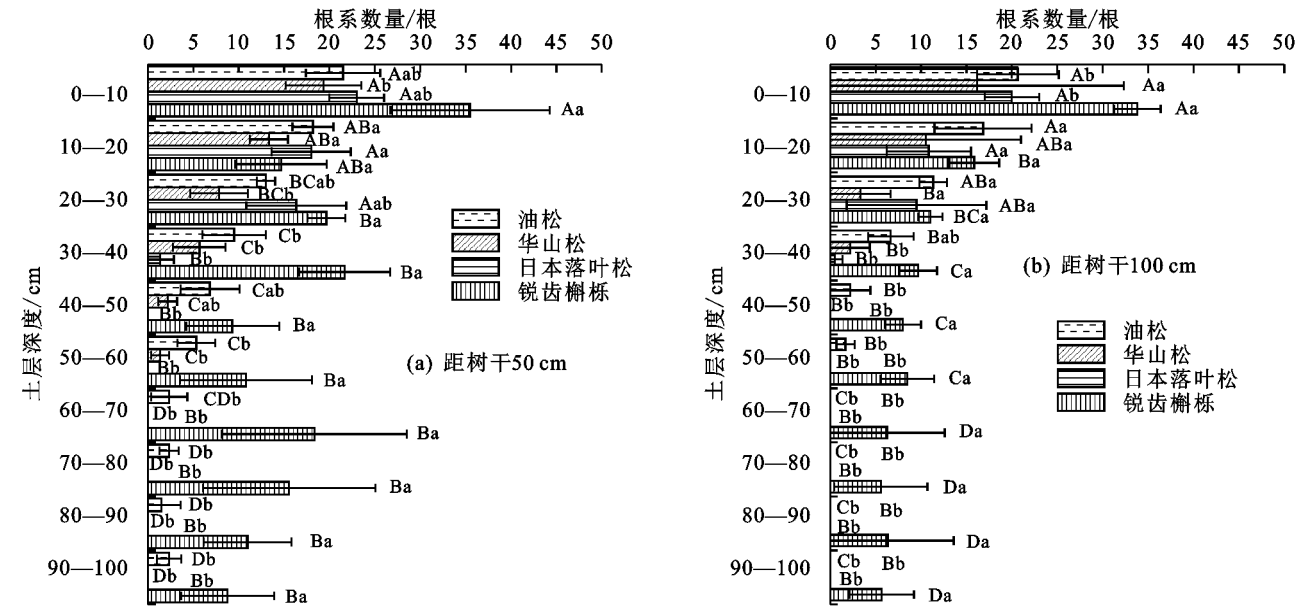
图 1 不同坡位根系数量统计

由图 3 可知,4 种树种在 0—30 cm 土层中均以毛细根为主($1\text{ mm}\leq d<5\text{ mm}$),其中油松、华山松和日本落叶松在 0—30 cm 土层内以直径 1~2 mm 的根系为主。由图 4 可知,各植物种的 RAR 随土层深度减小,

ANOCOVA 结果表明,RAR 与土层深度间存在明显的线性关系($P_{50\text{ cm}}=0.185$, $P_{100\text{ cm}}=0.207$),方差为齐性。以土层深度作为协变量对不同树种 RAR 进行方差分析,结果表明,RAR 在距离树干 50 cm($F=$

8.954, $P < 0.01$) 和 100 cm ($F = 7.900, P < 0.01$) 处在树种间存在显著差异, 距树干 50 cm 和 100 cm 处均

表现为锐齿槲栎 RAR 显著大于油松、华山松和落叶松 ($P_{50\text{ cm}} < 0.01, P_{100\text{ cm}} < 0.05$)。



注: 图中不同大写字母表示同一树种在不同土层深度的根系数量差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一土层不同树种间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同土层深度根系数量统计

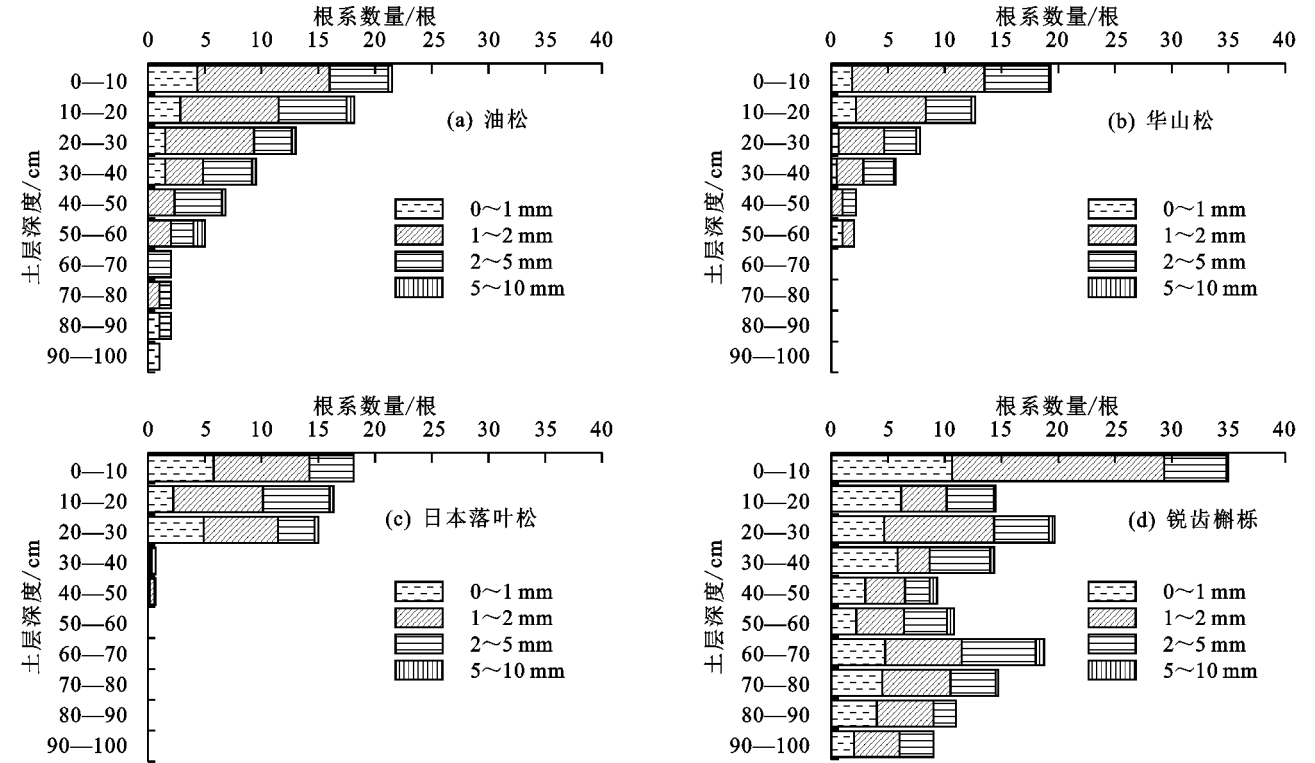


图 3 不同土层深度不同径级根系数量统计

2.3 根系抗拉强度特征

试验共成功测试了 33 根油松根系, 21 根华山松, 28 根日本落叶松和 37 根锐齿槲栎根系样品的抗拉强度。由表 3 可知, 根系抗拉力随根径增大呈现幂指数正相关关系, 拟合度 R^2 均大于 0.500。其中, 锐齿槲栎的根系抗拉力随直径增大的变化幅度最大, 说明不同径级间抗拉力差异大; 而日本落叶松的变化幅度较小, 说明该树种不同径级间抗拉力相对均一。

由图 5 可知, 4 种树种的单根抗拉强度随着根径的增大而减小, 呈幂指数负相关关系, 拟合度 R^2 均大于 0.500。由于抗拉强度与根径间无明显线性关系, 故对抗拉强度进行对数变换。以根径作为协方差对不同树种间抗拉强度进行方差分析, ANOCOVA 结果表明, 不同树种间的抗拉强度具有显著差异 ($F = 4.576, P < 0.05$), 表现为锐齿槲栎 $>$ 日本落叶松 $>$ 油松 $>$ 华山松。

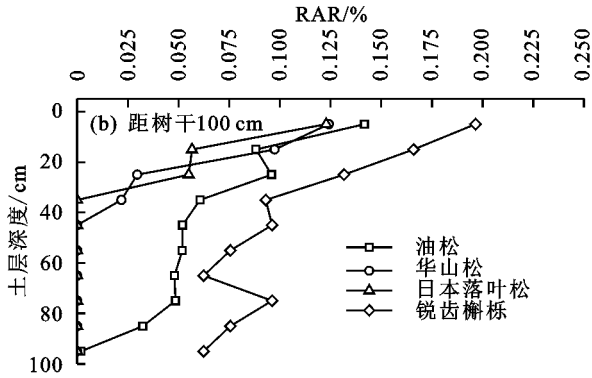
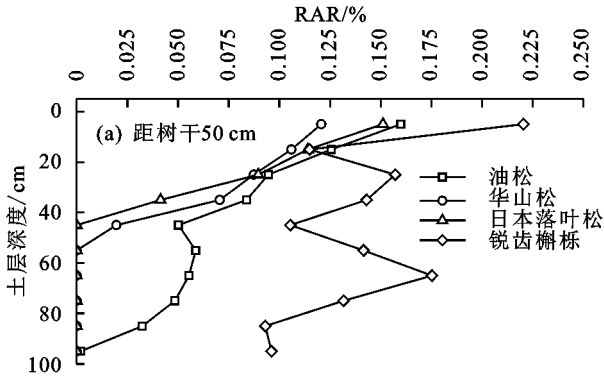


图 4 距离树干 50 cm 处不同坡位 RAR 统计

表 3 不同树种根系抗拉力与直径的回归方程

树种	拟合方程	R^2	平均直径/mm
油松	$F=11.234D^{1.410}$	0.818	4.176 ± 1.769
华山松	$F=9.270D^{1.591}$	0.874	3.654 ± 1.612
日本落叶松	$F=3.311D^{2.294}$	0.880	3.008 ± 1.577
锐齿槲栎	$F=19.399D^{1.166}$	0.554	2.628 ± 1.600

注:拟合方程中 F 为根系抗拉力(N); D 为根系直径(mm);平均直径值为平均值±标准差。

由表 4 可知,锐齿槲栎 0~1 mm 直径单根抗拉强度可达到油松和华山松抗拉强度的 2 倍以上;抗拉强度表现为锐齿槲栎和日本落叶松在所有径级内显

著大于油松和华山松。

2.4 根系附加黏聚力特征

以土层深度作为协方差对根系附加黏聚力进行方差分析,ANOCOVA 结果显示,4 种树种随土层深度变化根系附加黏聚力具有显著差异($F=15.672,P<0.01$),表现为锐齿槲栎>日本落叶松>油松>华山松。锐齿槲栎根系在 0—100 cm 土层深度在 4 种树种中具有最大附加黏聚力,平均可达 10.934 kPa。由图 6 可知,在垂直方向上,油松、华山松和日本落叶松的附加黏聚力都随土层深度增加而减少,而锐齿槲栎附加黏聚力随土层深度变化无显著差异($P=0.207$)。

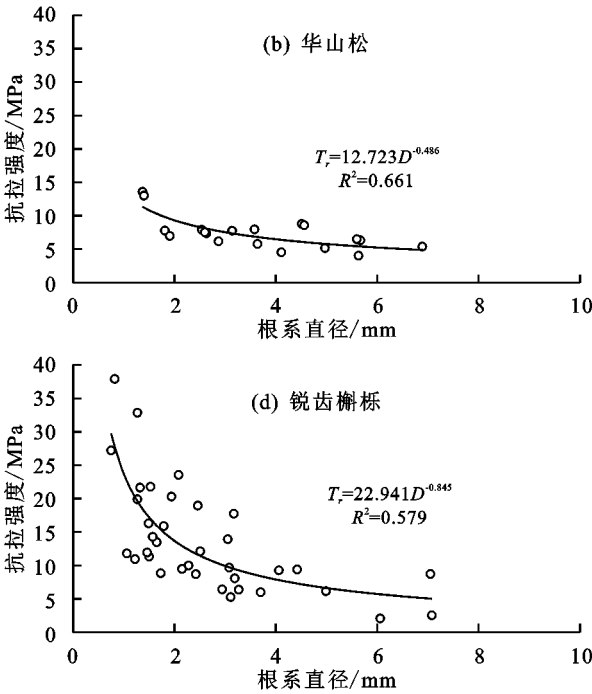
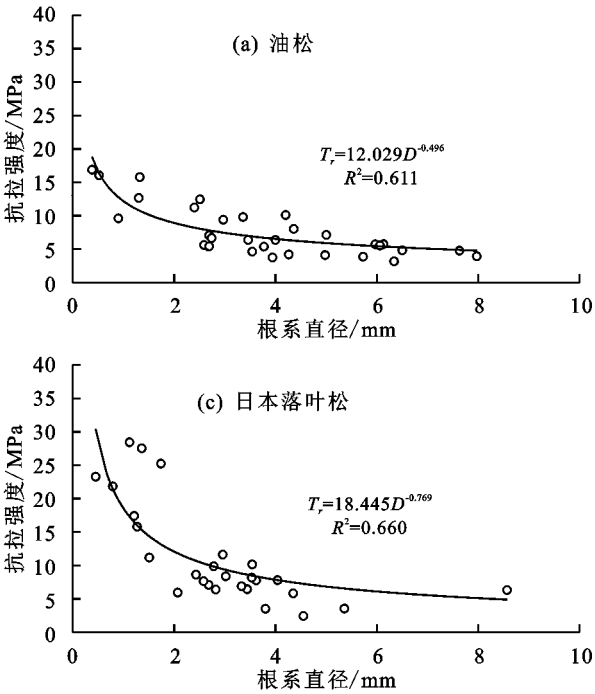


图 5 不同树种根系单根抗拉强度

表 4 不同树种根系不同径级平均抗拉强度

单位:MPa				
根径/mm	油松	华山松	日本落叶松	锐齿槲栎
0~1	15.178 ± 2.262	14.100 ± 2.393	23.284 ± 1.465	32.551 ± 7.551
1~2	14.221 ± 2.211	10.328 ± 3.432	20.922 ± 7.104	16.480 ± 6.104
2~5	7.004 ± 2.526	7.041 ± 1.413	7.333 ± 2.253	10.653 ± 5.137
5~10	4.701 ± 0.965	5.553 ± 1.140	4.935 ± 1.959	4.446 ± 3.704

注:表中数据为平均值±标准差。

由表 5 可知,油松、华山松、日本落叶松和锐齿槲栎的平均根系附加黏聚力分别为 4.096,3.066,3.043 和 9.364 kPa。

4 种树种间的根系附加黏聚力具有显著差异,表现为锐齿槲栎具有最大根系附加黏聚力($P<0.01$),其次为日本落叶松、油松和华山松;且这 3 种树种间,根系附加黏聚力无显著差异。

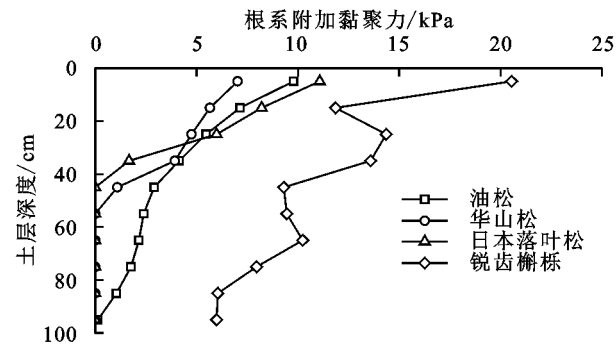


图6 不同树种根系附加黏聚力随土层深度变化

2.5 边坡稳定性评估

土壤剖面调查和固结不排水三轴试验结果显示,研究区内分布为花岗岩残积土,岩土体抗剪强度随土层深度增大递减。使用岩土参数(表6)、水力学参数(表7)结合土水特征曲线(图7)计算不同水分条件下

不同树种(表8)边坡的安全系数。

表5 估计边际平均根系附加黏聚力

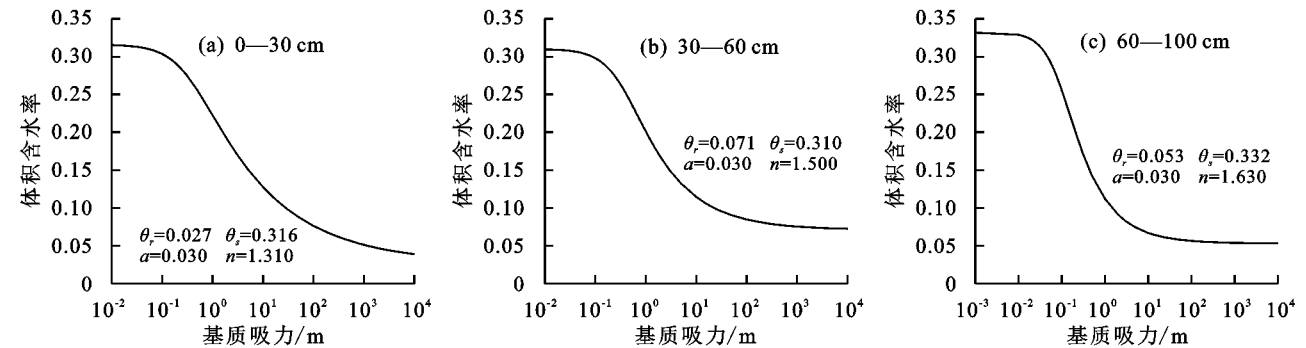
树种	平均根系附加黏聚力	标准差	99%置信区间	
			下限	上限
油松	4.096	0.789	1.947	6.244
华山松	3.066	0.789	0.918	5.215
日本落叶松	3.043	0.789	0.895	5.192
锐齿槲栎	9.364	0.789	7.216	11.513

表6 岩土参数

土层深度/cm	有效黏聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)	干重度/(kN·m ⁻³)
0—30	16.958	20.911	14.817
30—60	11.662	26.401	14.430
60—100	2.935	32.465	16.767

表7 不同土层体积含水量

水分条件	裸土			植被土		
	0—30	30—60	60—100	0—30	30—60	60—100
非饱和状态(降雨前)	15.567	10.365	8.837	19.693	13.266	9.613
近饱和状态(降雨期间)	29.768	22.469	13.657	26.850	19.903	12.704
饱和状态(极端降雨事件)	31.600	31.000	33.200	31.600	31.000	33.200



注:图中 α 的单位为1/cm。

图7 土水特征曲线

表8 不同树种立木地上部分生物量

树种	立木材积方程/m ³	树高/m	胸径/cm	地上生物量/kPa
油松	$V=0.000066492455D^{1.8566617}H^{0.93768879}$	10.20±1.26	14.26±3.38	2.50±0.35
华山松	$V=0.000059973839D^{1.8334312}H^{1.0295315}$	5.97±2.51	14.06±1.15	1.48±0.72
日本落叶松	$V=0.000054381398D^{1.8288952}H^{1.0666428}$	9.12±2.18	7.34±0.76	2.41±0.52
锐齿槲栎	$V=0.000060970532D^{1.87350780}H^{0.9415747}$	9.64±3.80	13.22±6.05	2.29±0.20

注:立木材积方程中 D 为标准木的胸径(cm); H 为标准木的树高(m)。

由图8可知,随着坡度及含水量的增加,4种树种边坡及无林地的安全系数均减小。其中,锐齿槲栎的固坡效果最好,100 cm土层内在不同水分条件和坡度条件下均未出现失稳情况。在非极端降水条件下,即非饱和状态下,4种树种边坡均可以提高浅层边坡的稳定性。其中,油松、华山松和日本落叶松边坡稳定性在潜在滑动面深度与无林地相近,固坡效果弱于锐齿槲栎,这主要与根系分布深度有关。在近饱和的降水条件下,林冠截留作用可以减少降雨的入渗。因此,根系附加黏聚力和林冠截留作用可以提高

浅层边坡的稳定性;油松、华山松和日本落叶松根系对坡体稳定的加固作用减弱,随坡度增加逐渐趋于不稳定状态。在极端降水条件下,油松、华山松和日本落叶松边坡的稳定性低于无林地,说明在极端条件下,根系附加黏聚力差异和树重对边坡稳定性的作用更显著。根系分布较深且根系强度较大的锐齿槲栎,在3种水分条件下均可以有效加固边坡。在不同水分条件下,潜在滑动面出现的深度随坡度的增加而变浅,且随含水量的增加而变浅。此外,由岩土性质(表6)可知,研究区下层土壤抗剪强度低,而下层是潜在

破坏面发育的关键部位。因此,深根性树种锐齿槲栎在区域内能发挥较好的固坡作用。该结果与不同林分类型内的滑坡密度相对应,即稳定性越差的植物种

类边坡产生的滑坡多于稳定性强的边坡。具体表现为油松和华山松林地滑坡密度大于日本落叶松和锐齿槲栎林地。

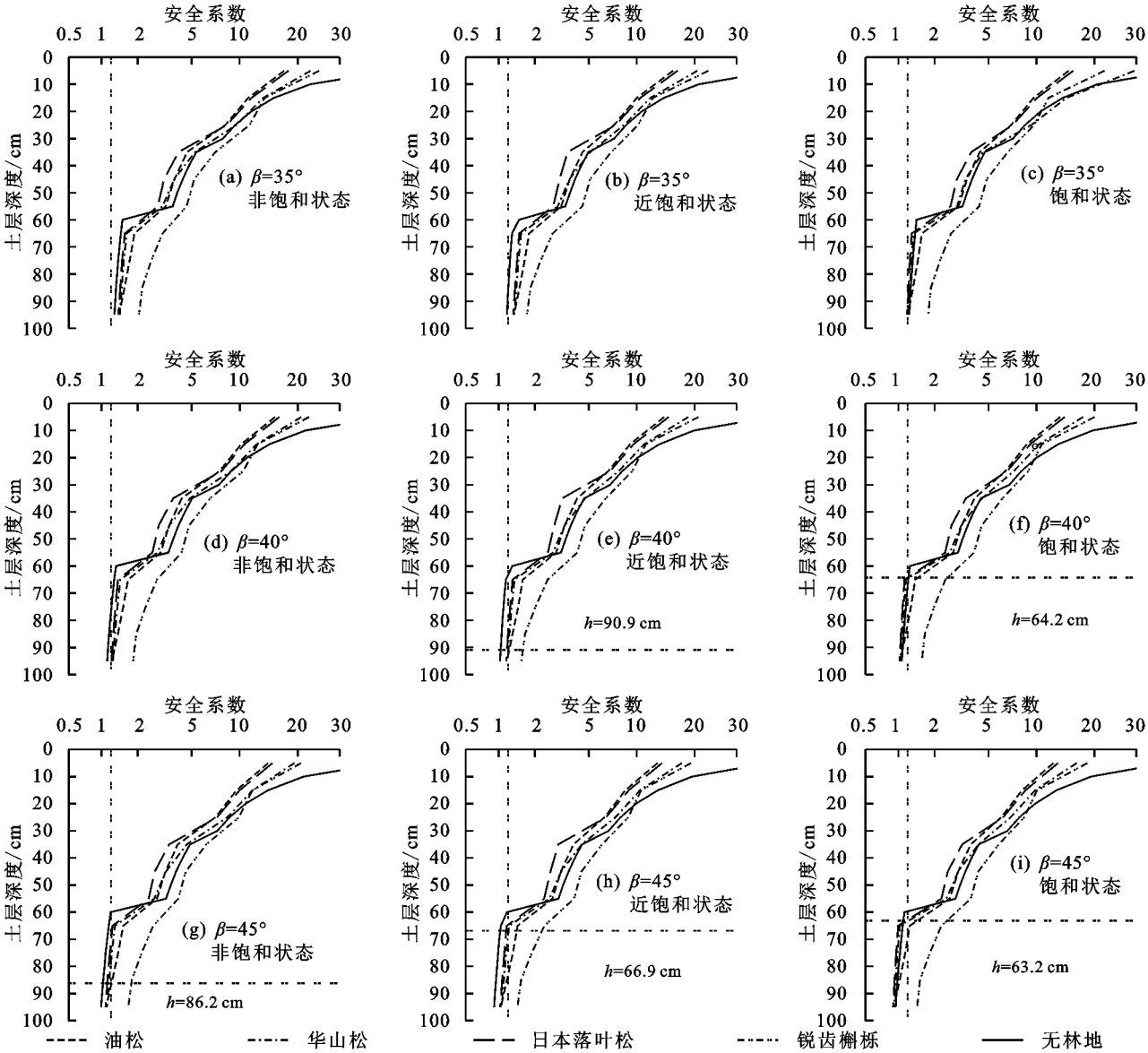


图 8 不同水分条件、坡度下的安全系数

3 讨论

本研究进一步证实了根系抗拉强度随根径增加呈负指数减少,即细根比粗根的抗拉强度更大,该结论与已有研究结论^[13,19]一致。对于针叶树种,已有研究^[20-21]中显示,油松的抗拉强度范围为 10~25 MPa,与本研究结果基本一致;华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)为 8~15 MPa,本研究中日本落叶松根系抗拉强度大于华北落叶松。这可能是同科不同属植物种间生物特性差异,生长环境差异将导致生长特征的差异,区域间的差异也将导致物种内部的差异^[13]。对于阔叶树种^[6,20-21],蒙古栎(*Quercus mongolica*)的抗拉强度达 15~25 MPa,榆树(*Ulmus pumila*)可达 15~45 MPa,毛白杨可达 20~50

MPa,刺槐可达 40~80 MPa,本研究中的锐齿槲栎抗拉强度最大可达 49 MPa。Genet 等^[22]提出,抗拉强度随根径的递减规律可能与根系材料的强度和尺度效应有关。有研究^[20,23]发现,一般针叶树种木材纤维素含量较阔叶树种高,且根系的抗拉强度与纤维素含量成反比。本研究中,锐齿槲栎的抗拉强度显著大于其他 3 种树种,说明其根系中的纤维素和木质素含量可能与其他 3 种树种有差异。而锐齿槲栎为阔叶树种,其纤维素含量可能低于其他 3 种树种,因此具有更大的抗拉强度。本研究中对根系附加黏聚力的量化基于 Wu-Waldron 模型,该模型对于实际的根土摩擦力考虑有一定限制。在实际工程与林木栽植应用中,移栽时间较短的乔木根系较浅,且根土间摩擦力较小。已有研究^[13]指出,天然树种的根系分布较

深与土壤的接触更紧密,具有更大的固土能力。

根土复合体比素土具有更大的黏聚力,种间根系分布及抗拉强度差异导致不同树种对边坡稳定的作用效果不同。有研究^[22]表明,水平方向和垂直方向上的根系分布与土壤水分分布有关,根系分布通过影响水分分布影响坡面尺度的基质吸力。已有研究^[8]表明,刺槐、侧柏的最大根密度区出现在表土层 30 cm 以上区域。本研究中的油松、华山松和日本落叶松的最大根密度区同样出现在表土层 30 cm 左右,差别在于锐齿槲栎的根系分布较深,其最大根密度区范围可达 100 cm。有研究^[22]表明,发挥固土效应的 RAR 阈值为 0.1%,且当根系分布深度穿过潜在滑动面时可以发挥较好的固坡效应。本研究结果表明,锐齿槲栎在 0—100 cm 的不同土层内最小 RAR 大于且趋近于 0.1%,且根系分布深度大于潜在滑动面深度。锐齿槲栎是区域内根系十分发达的乡土树种之一,该树种极强的固坡效果对当地造林具有一定指导意义。

地下水位以上一般为非饱和土,在降雨过程中,非饱和土饱和度逐渐升高,致使边坡失稳。Genet 等^[24]研究指出,根的抗拉强度差异对边坡稳定性影响并不显著;Ji 等^[19]指出,较明显的根系抗拉强度差异在边坡治理中应予以考虑;而本研究认为,根系分布深度和抗拉强度的综合作用差异是边坡治理中应予以考虑的关键性问题。因此,不同区域地质环境差异导致的边坡失稳还需要更深入的研究。在今后的研究中,可以考虑在边坡稳定性计算中加入风荷载作为计算指标,因为在季风气候区成树的连根拔起也是常见的锚固失效类型^[5],如本研究中的日本落叶松,根据其水平 100 cm 范围内的根系数量特征,推断该树种边坡也可能发生连根拔起的失稳情况。此外,根土复合体黏聚力随着含水量的变化过程也可以纳入考虑范围。本研究中假设根系附加黏聚力恒定,而在实际情况中由于水分影响根土摩擦力使得根系附加黏聚力随含水量增加而减少^[25]。综合考虑植被的固土效应及经济效益,日本落叶松应该种植在坡度较缓的区域。鉴于不同林地滑坡的易发性,研究区内用材林种植区域也需要进行合理规划和措施保护。

4 结论

(1)在高密度和低密度的滑坡易发区,油松×华山松林地的滑坡密度均高于日本落叶松×锐齿槲栎林地,但不同林分类型下产生滑坡规模无显著差异。

(2)0—100 cm 土层内根系分布数量表现为锐齿槲栎>油松>华山松>日本落叶松。根系的抗拉强度与直径呈负相关关系,回归曲线以幂函数拟合。锐齿槲栎根系数量、分布深度和单根抗拉强度显著高于油

松、华山松和日本落叶松,其根系垂直分布深度超过 100 cm,抗拉强度最大可达 (32.551 ± 7.551) MPa,0—100 cm 土层深度提供的平均附加黏聚力达 9.364 kPa。

(3)当岩土体处于饱和的极端降水条件时,油松、华山松、日本落叶松对坡体稳定的作用效果为负,而根系分布较深且根系强度较大的锐齿槲栎根系可以穿过潜在滑动面。因此,锐齿槲栎能有效加固边坡,在当地具有防治浅表层滑坡的良好功能。

参考文献:

- [1] Zhuang J Q, Peng J B, Wang G H, et al. Distribution and characteristics of landslide in Loess Plateau: A case study in Shaanxi province [J]. Engineering Geology, 2017, 236(26): 89-96.
- [2] 崔鹏,邓宏艳,王成华,等.山地灾害[M].北京:高等教育出版社,2018:67-70.
- [3] Rengers F K, McGuire L A, Coe J A, et al. The influence of vegetation on debris-flow initiation during extreme rainfall in the northern Colorado Front Range[J]. Geology, 2016, 44(10): 823-826.
- [4] Denis C, Massimiliano S. Tree-root control of shallow landslides[J]. Earth Surface Dynamics, 2017, 5(3): 451-477.
- [5] 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.
- [6] Sidle R C, Bogaard T A. Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides[J]. Earth Science Reviews, 2016, 159: 275-291.
- [7] Yang M, Défossez P, Danjon F, et al. Analyzing key factors of roots and soil contributing to tree anchorage of *Pinus* species[J]. Trees, 2018, 32(3): 703-712.
- [8] Ji J N, 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: 139-154.
- [9] Zhu H, Zhang L M, Xiao T, et al. Enhancement of slope stability by vegetation considering uncertainties in root distribution[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 85: 84-89.
- [10] Wu T H, McKinnell III W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 19-33.
- [11] 朱锦奇,王云琦,王玉杰,等.基于植物生长过程的根系固土机制及 Wu 模型参数优化[J].林业科学, 2018, 54(4): 49-57.
- [12] 李广信,张丙印,于玉贞,等.土力学[M].北京:清华大学出版社,2013:274-275.

- the simulated meteorology at the SIRTa atmospheric observatory[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 40 (9/10): 2251-2269.
- [14] Liu Z, Ma D, Hu W, et al. Land use dependent variation of soil water infiltration characteristics and their scale-specific controls[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178:139-149.
- [15] Vesterdal L, Elberling B, Christiansen J R, et al. Soil respiration and rates of soil carbon turnover differ among six common European tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264:185-196.
- [16] Kan Z R, Virk A L, Wu G, et al. Priming effect intensity of soil organic carbon mineralization under no-till and residue retention[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 147:103445.
- [17] Boluwade A, Madramootoo C A. Independent principal component analysis for simulation of soil water content and bulk density in a Canadian Watershed[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2016, 4 (3):151-158.
- [18] Latorre B, Peña C, Lassabatere L, et al. Estimate of soil hydraulic properties from disc infiltrometer three-dimensional infiltration curve. Numerical analysis and field application[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527:1-12.
- [19] Neris J, Jiménez C, Fuentes J, et al. Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain)[J]. *Catena*, 2012, 98:55-62.
- [20] Huang L, Zhang P, Hu Y, et al. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 4:255-263.
- [21] Hu W, Biswas A, Si B C. Application of multivariate empirical mode decomposition for revealing scale- and season-specific time stability of soil water storage[J]. *Catena*, 2014, 113:377-385.
- [22] Zolfaghari A A, Taghizadeh-Mehrjardi R, Asadzadeh F, et al. Soil structure changes due to different land-use practices in the central Zagros region, Iran[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(2):163-175.
- (上接第 109 页)
- [13] Leung F T Y, Yan W M, Hau B C H, et al. Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability[J]. *Catena*, 2015, 125:102-110.
- [14] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15(3):313-321.
- [15] Xia J W, Cai C F, Wei Y J, et al. Granite residual soil properties in collapsing gullies of south China: Spatial variations and effects on collapsing gully erosion[J]. *Catena*, 2019, 174:469-477.
- [16] 尚嫚廷, 冯杰, 刘佩贵, 等. SWCC 测定时吸力计算公式与最佳离心时间的探讨[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(1):12-15.
- [17] 中华人民共和国农林部. LY 208—1977 立木材积表[S]. 北京: 中国标准出版社, 1978:215-276.
- [18] 郭力勤, 肖杨. 华北落叶松天然林立木重量表的试编[J]. *林业资源管理*, 1989(5):36-39.
- [19] Ji J N, Mao Z, Qu W B, et al. Energy-based fibre bundle model algorithms to predict soil reinforcement by roots[J]. *Plant Soil*, 2020, 446(1):307-329.
- [20] 吕春娟, 陈丽华. 华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 69-78.
- [21] 洪苗苗, 汪霞, 赵云飞, 等. 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[J]. *山地学报*, 2018, 36(1):107-115.
- [22] Genet M, Kokutse N, Stokes A, et al. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: Effect of tree age and stand structure on slope stability[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(8): 1517-1526.
- [23] 张乔艳, 唐丽霞, 潘露, 等. 基于根系化学组成的抗拉力学特性分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(1):186-192.
- [24] Genet M, Stokes A, Fourcaud T, et al. The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36 (3):265-275.
- [25] Zhu J Q, Wang Y Q, Wang Y J, et al. How does root biodegradation after plant felling change root reinforcement to soil? [J]. *Plant Soil*, 2019, 466:211-227.