

DOI: 10.20103/j.stxb.202310242318

宁伟豪, 颜哲豪, 谌芸, 魏艳. 草本植物根系对喀斯特边坡浅层稳定性的影响. 生态学报, 2024, 44(15): 6722-6730.

Ning W H, Yan Z H, Chen Y, Wei Y. Effects of herbaceous plant roots on the stability of shallow layer on karst slopes. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6722-6730.

草本植物根系对喀斯特边坡浅层稳定性的影响

宁伟豪, 颜哲豪, 谌芸*, 魏艳

西南大学资源环境学院, 水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 为明确草本植物根系对喀斯特边坡浅层稳定性的影响规律, 在重庆酉阳选取典型喀斯特坡地分上、中、下坡位种植沿阶草 (*Ophiopogon bodinieri* H.) 和拉巴豆 (*Dolichos lablab* L.), 并以裸地为对照, 取样测定土壤性质和根系性状, 利用无限边坡稳定分析模型计算边坡安全系数, 通过建立结构方程模型确定影响边坡稳定的关键根系性状。结果表明: (1) 沿阶草和拉巴豆处理的边坡安全系数较对照分别提高了 149.97%—179.96% 和 52.27%—75.53%, 二者提高效果最优的坡位分别是下坡和上坡; (2) 两种草处理的土壤粘聚力是对照的 1.97—5.11 倍, 沿阶草的根质量密度显著大于拉巴豆, 是拉巴豆的 2.78—5.99 倍; (3) 土壤粘聚力与边坡安全系数相关性最强, 二者呈对数函数关系, 结构方程模型表明根质量密度是影响边坡稳定的关键根系性状。研究认为喀斯特坡地上坡宜选择直根系草本植物, 而下坡宜选择须根系草本植物, 且根系质量密度大的植物有利于边坡稳定。本研究可为科学应用草本植物解决喀斯特坡地边坡失稳提供理论依据。

关键词: 根-土复合体; 土壤粘聚力; 根质量密度; 无限边坡模型; 结构方程模型

Effects of herbaceous plant roots on the stability of shallow layer on karst slopes

NING Weihao, YAN Zhehao, CHEN Yun*, WEI Yan

Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration of Chongqing, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Plant roots play an important role in preventing and controlling slope instability. This study was conducted on a typical karst slope in Youyang Tujia and Miao Autonomous County, Chongqing to determine the effects of herbaceous roots on the stability of shallow layer on slopes. *Ophiopogon bodinieri* H. and *Dolichos lablab* L. were planted on the up-, mid-, and down-slopes, and bare soils corresponding to these slope positions were selected as the control (CK). Composite soil samples were collected and tested for soil properties. Root-soil composites were sampled and subjected to the direct shear tests, and then roots in these composites were picked and measured for root mass, root length, root surface area, and root volume. Slope stability factors of safety were calculated using the infinite slope stability analysis model. The key root traits affecting slope stability were determined by the structural equation model. The results showed that: (1) *Ophiopogon bodinieri* H. and *Dolichos lablab* L. improved the stability of shallow layer on slopes and the former with a fibrous root system performed better than the latter with a tap root system. Compared with CK, the slope safety factors of *Ophiopogon bodinieri* H. and *Dolichos lablab* L. increased by 149.97% to 179.96% and 52.27% to 75.53%, respectively. The maximum increment of the slope safety factors occurred at the downslope for *Ophiopogon bodinieri* H. and the upslope for *Dolichos lablab* L. (2) The roots of *Ophiopogon bodinieri* H. and *Dolichos lablab* L. increased the soil cohesion but did not significantly affect the soil internal friction angle ($P > 0.05$). The soil cohesion of *Ophiopogon bodinieri* H. and *Dolichos*

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42377324); 西南大学教育教学改革研究项目 (2022JY074); 中央高校基本业务费专项资金项目 (XDJK2018B044)

收稿日期: 2023-10-24; **网络出版日期:** 2024-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sy22478@126.com

lablab L. was 1.97 to 5.11 times higher than that of CK. The root mass density of *Ophiopogon bodinieri* H. was 2.78 to 5.99 times higher than that of *Dolichos lablab* L. (3) The correlation between soil cohesion and slope safety factor was the strongest ($r=0.95$, $P<0.01$), and their relationship could be described by the positive logarithmic function ($R^2=0.91$, $P<0.01$). The structural equation model showed that root mass density was the key root trait affecting the stability of shallow layer on karst slopes, with a standardized path coefficient of 0.85 ($P<0.01$). The optimal slope stabilization effect of herbaceous plants with a tap root system occurs on the upslope and that of herbaceous plants with a fibrous root system occurs on the downslope. Additionally, herbaceous plants with high root mass density are beneficial for slope stability. Our study can provide a theoretical basis for the scientific application of herbaceous plants on controlling karst slope instability.

Key Words: root-soil composite; soil cohesion; root mass density; infinite slope model; structural equation model

喀斯特地区的二元结构背景及化学溶蚀、重力侵蚀和水力侵蚀综合作用导致水土流失严重且特殊^[1],一直是学术界关注的热点。治理水土流失的核心是生态修复,关键是恢复林草^[2]。植物措施不仅能控制土壤侵蚀,还能增强生态系统稳定性和生物多样性,增加土壤有机碳含量与储量^[3],其在防治土壤侵蚀和增强边坡稳定性等方面的作用已经被广泛认可^[4-6]。根系对于植物发挥固土固坡作用至关重要,有研究表明草原植被因素导致的土壤侵蚀减少量中有一半以上是源于根系^[7]。植物通过根系的物理和化学作用增强土体稳定,有效防治浅层滑坡和减少水土流失。植物措施还具有低成本和良好生态效益等优点,广泛应用于边坡防护工程^[8]。探究影响边坡稳定的根系性状,可为喀斯特地区因地制宜进行浅层滑坡和水土流失治理提供理论支持。

目前,国内外学者对于影响植物根系固土固坡的因素进行了大量研究。一些研究表明,林冠宽度和根土盘直径会影响乔木边坡的稳定性^[9];植被边坡的安全系数随着树木间距的增加而降低^[10];随着生长时间增加,刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)^[11]和紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)^[12]根系对边坡加固效果增强;坡度影响树木对边坡的加固效果^[13];不同根系形态中指数形根系形态的植被对增强边坡稳定性效果最好^[14];边坡安全系数随土壤饱和度的增加和土壤含盐量的降低而降低^[15];Temgoua 等人^[16]的研究表明根系产生的附加粘聚力显著提高了边坡稳定性。大量研究表明根系性状如根体积密度^[17]和根表面积密度^[18]与根-土复合体抗剪强度密切相关。前人研究多集中于坡度、土壤饱和度、生长时间和植物种类等对边坡稳定的影响以及根系性状对土体抗剪强度的影响,而综合考虑草本植物根系性状、土壤理化力学性质和边坡稳定性的研究较少。鉴于此,本研究在重庆市酉阳土家族苗族自治县泔溪镇选取典型喀斯特坡地开展试验,以 50 m 高差划分上、中、下三个坡位并种植沿阶草(*Ophiopogon bodinieri* H.)和拉巴豆(*Dolichos lablab* L.)两种草本植物,通过直剪试验、根系灰度扫描、无限边坡稳定分析模型和结构方程模型分析草本植物根系性状和土壤理化力学性质对边坡稳定的影响,探究影响边坡稳定的关键根系性状及根系在不同坡位的作用。以期为喀斯特地区生态恢复及因地制宜布设植物措施治理喀斯特坡地浅层滑坡和水土流失提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于重庆市酉阳土家族苗族自治县泔溪镇一典型喀斯特坡地,岩体为碳酸盐岩,基岩裸露率约为 25%,坡度约 30°,海拔为 350—513 m。以 50 m 高差将坡地分为上、中、下三个坡位,上坡和中坡土层平均厚度约 25 cm,下坡土层平均厚度约 30 cm。土壤为石灰性黄壤,pH 为 7.37,全氮含量为 2.19 g/kg,全磷含量为 0.59 g/kg,全钾含量为 19.14 g/kg,有机质含量为 11.52 g/kg。酉阳地处亚热带季风气候区,年均气温约 14.6 °C,年均降水量 1200 mm,其中 80%以上发生在 4 月至 10 月,年均日照时长 1131 h,无霜期 261 d。

1.2 试验设计

基于生态和经济效益原则选择沿阶草和拉巴豆两种草本植物。沿阶草为当地优势物种^[6],根系发达,耐

旱能力强。拉巴豆具有固氮功能,茎叶可作优质牧草,可以适应典型的石灰性和酸性黄壤条件,在风化石砾中也能较好生长^[19]。试验区于 2021 年 4 月移栽沿阶草(株行距为 5 cm、成活率 90%),撒播拉巴豆(密度 30 g/m²、成活率 80%)。两种植物在上坡、中坡和下坡各种 1 带,共布设 6 带植物,以三个坡位的裸地为对照处理(CK)。植物带宽度设计为 20—30 cm,长度为 200 m 左右。2021 年 9 月采集沿阶草、拉巴豆土壤样品和根-土复合体样品,采样时植物均处于生长旺盛期,沿阶草覆盖率约 60%,拉巴豆覆盖率约 65%。

1.3 样品采集

土壤样品采集:每种处理每个坡位采集 3 个容重环刀(底面积 20 cm²,高 5 cm)、3 个铝盒和 3 袋散土,共采集 27 个容重环刀、27 个铝盒以及 27 袋散土。

抗剪土样采集:在每带植物的两端和中间选取 4 个点,每点采集 1 个抗剪环刀(底面积 30 cm²,高 2 cm),这 4 个抗剪环刀为一组,每个坡位各采集 3 组重复,共计采集 27 组抗剪土样(108 个抗剪环刀)。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤理化性质

采用环刀法和烘干法测定土壤容重和含水率;采用吸管法测定土壤机械组成;采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体含量^[20];采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量。

1.4.2 根-土复合体抗剪强度指标

采用 ZJ 型应变控制式直剪仪测定并根据库伦定律计算内摩擦角 φ 和粘聚力 c ,具体方法见文献^[6]。

1.4.3 根-土复合体根系性状

测定土体抗剪强度指标后,将根系清洗出来,采用 EPSON(PERFECTION C700)根系扫描仪对根系进行灰度扫描,再利用 WinRHIZO(Pro.2009)根系分析软件对图像进行分析,从而获得根表面积、根体积和根长。扫描结束后,将根系样品在 65 ℃烘箱中烘干 48 h 后称重,以获得根干质量。由于抗剪环刀中的根系样品不是整株根系,故使用根长密度、根体积比和根表面积密度作为根系形态性状,将根质量密度作为根系生物量性状,将比根长和根组织密度作为根系功能性状^[21]。

1.4.4 边坡安全系数计算

采用无限边坡稳定分析模型计算安全系数(slope stability factor of safety, F_s),该模型假定边坡任意铅直断面的材料组成、强度参数以及所受荷载均相同,它是一种边坡稳定性分析的实用简化模型。该模型同时考虑了根系拉力和土壤吸力的作用,因本文仅考虑根系的机械作用力,不考虑孔隙水压力的公式为^[22]:

$$F_s = \frac{\tan\varphi}{\tan\beta} + \frac{c}{\gamma H \sin\beta \cos\beta} \quad (1)$$

式中, F_s 为边坡安全系数; φ 为土壤内摩擦角,°; β 为坡度,°; c 为土壤粘聚力, kPa; H 为土层厚度, cm; γ 为土壤容重, g/cm³。

1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2021 对数据进行统计分析; IBM SPSS Statistics 27.0 进行差异显著性检验(Duncan 法, $P < 0.05$) 和 Pearson 相关分析; Origin 2022 作图; R 4.2.3 软件 lavaan 包实现结构方程模型。

2 结果与分析

2.1 边坡稳定性分析

边坡安全系数在同一坡位不同处理之间均表现为沿阶草>拉巴豆>CK,且沿阶草处理与 CK 存在显著性差异(图 1)。沿阶草处理上、中、下坡的边坡安全系数较 CK 分别提高了 149.97%、150.21% 和 179.96%,拉巴豆处理的则分别提高了 75.53%、54.23% 和 52.27%。可见,沿阶草和拉巴豆均能提高边坡稳定性,且沿阶草的效果好于拉巴豆。沿阶草对下坡安全系数提升最大,而拉巴豆对上坡安全系数提升最大。

三种处理的边坡安全系数在坡位间呈现不同规律。CK 处理,中坡和下坡的边坡安全系数显著大于上

坡,分别较上坡提高了 25.94%和 34.42%;沿阶草处理,下坡的边坡安全系数显著大于上坡,中坡和下坡间则无显著性差异;拉巴豆处理的边坡安全系数在各坡位间均无显著性差异。

2.2 土壤理化力学性质

由表 1 可知,下坡拉巴豆处理的容重显著高于 CK,上坡拉巴豆处理的水稳性团聚体含量显著高于 CK,中坡沿阶草和拉巴豆处理的粉粒含量显著高于 CK。三个坡位有机质含量表现为 CK 大于沿阶草和拉巴豆处理,其中在下坡表现出显著性差异。不同坡位间,CK 和沿阶草处理上坡容重大于中坡和下坡,CK 处理下坡含水率显著高于上坡。黏粒含量在不同坡位间均表现为下坡大于中坡和上坡,其中 CK 处理下坡显著大于中坡和上坡。

三种处理的土壤内摩擦角和粘聚力如图 2 所示。同一坡位不同处理之间的土壤内摩擦角均无显著差异,说明草本植物根系对土壤内摩擦角并未产生显著影响。根系的加固主要影响粘聚力,而对内摩擦角没有显著影响^[18]。

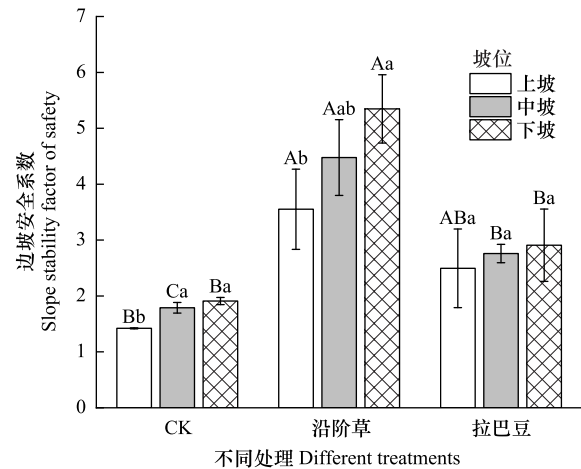


图 1 三种处理边坡不同坡位的安全系数

Fig.1 Slope stability factor of safety for different slope positions of three treatments

图中不同小写字母表示同一处理不同坡位之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一坡位不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

表 1 土壤理化性质

Table 1 Soil physic and chemical properties

处理 Treatments	坡位 Slope position	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	含水率 Soil water content/%	>0.25 mm 水稳 性团聚体 >0.25 mm water- stable aggregates/%	粒径分布 Size distribution/%			有机质 Soil organic matter/ (g/kg)
					砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	
CK	上坡	1.39±0.02Aa	24.26±0.64Ab	82.77±2.46Ba	21.54±2.23Ab	66.60±2.55Aa	11.86±4.78Ab	11.75±1.77Aa
	中坡	1.28±0.12Aa	26.93±1.23Aab	82.49±2.92Aa	31.80±3.51Aa	57.02±0.25Bb	11.18±3.76Ab	11.45±1.34Aa
	下坡	1.11±0.06Bb	30.56±3.79Aa	80.37±1.93Aa	12.88±2.38Bb	52.22±4.33Ab	34.90±1.95Aa	11.35±1.20Aa
沿阶草 <i>Ophiopogon bodinieri</i> H.	上坡	1.33±0.05Aa	23.67±1.00Aa	85.65±1.97ABa	20.56±1.98Aa	65.94±7.61Aa	13.50±5.63Aa	9.95±0.64Aa
	中坡	1.14±0.08Ab	32.22±7.15Aa	82.86±4.07Aa	15.80±5.37Ba	71.62±5.23Aa	12.58±0.14Aa	8.85±0.78Aa
	下坡	1.22±0.08ABab	26.23±3.10Aa	82.00±1.16Aa	17.44±2.09Ba	65.48±7.47Aa	17.08±5.37Ba	7.55±1.48Ba
拉巴豆 <i>Dolichos lablab</i> L.	上坡	1.22±0.17Aa	28.84±5.73Aa	89.37±3.47Aa	9.64±10.35Aa	76.70±5.06Aa	13.66±5.29Aa	9.80±0.28Aa
	中坡	1.26±0.09Aa	23.20±2.62Aa	85.59±5.08Aab	20.62±1.44ABa	71.88±0.91Aab	7.50±0.54Aa	8.65±0.49Aa
	下坡	1.27±0.01Aa	26.68±5.84Aa	81.34±2.32Ab	23.46±0.08Aa	60.32±6.84Ab	16.22±6.76Ba	9.60±0.28ABa

数据为均值±标准差。砂粒粒径为 2—0.05 mm, 粉粒粒径为 0.05—0.002 mm, 黏粒粒径为 <0.002 mm; 表中不同小写字母表示同一处理不同坡位之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一坡位不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

土壤粘聚力在不同处理间均表现为沿阶草>拉巴豆>CK。沿阶草处理上、中、下坡的土壤粘聚力分别是 CK 的 5.11、3.37 和 4.34 倍, 拉巴豆处理分别是 CK 的 2.98、2.24 和 1.97 倍。上坡仅沿阶草和 CK 处理之间差异显著, 而中坡和下坡三种处理土壤粘聚力之间差异显著。三种处理土壤粘聚力均表现为下坡>中坡>上坡, 且下坡均显著大于上坡。沿阶草、拉巴豆和 CK 处理下坡土壤粘聚力较上坡分别提高了 78.67%、38.62% 和 109.97%。

2.3 根系性状

如图 3 所示, 两种植物下坡根系均较上坡和中坡发达, 这与前人^[6]在喀斯特地区的研究一致, 根系形态受

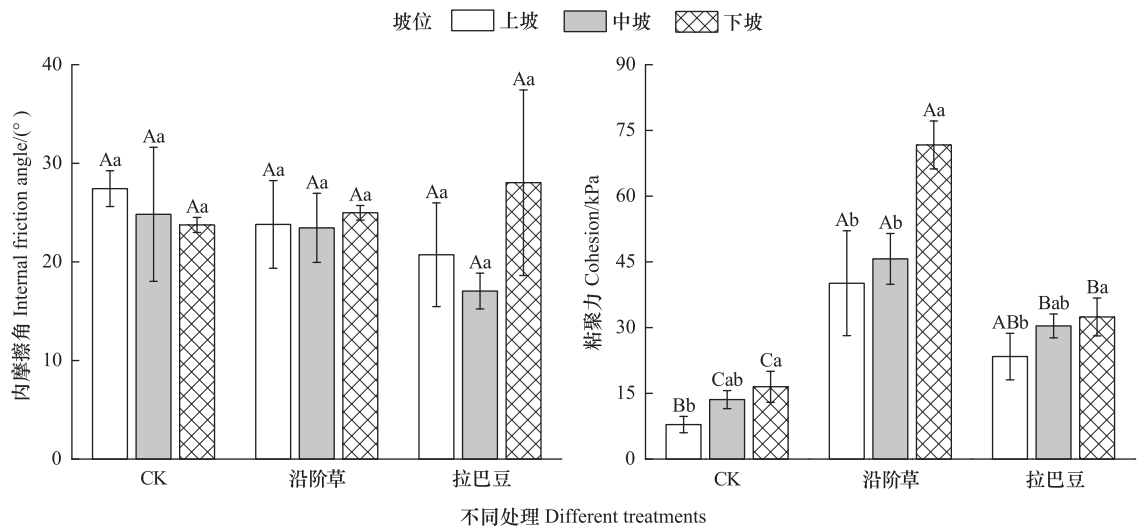


图2 不同坡位三种处理的土壤内摩擦角和粘聚力

Fig.2 Soil internal friction angle and cohesion of three treatments in different slope positions

土壤环境的影响而变化^[23]。在根系生物量方面,沿阶草和拉巴豆的根质量密度均表现为下坡>中坡>上坡,且下坡显著大于上坡,分别是上坡的 1.67 和 2.71 倍。沿阶草处理的根质量密度在上、中、下坡均显著大于拉巴豆,分别是拉巴豆的 5.99、2.78 和 3.70 倍。在根系形态性状方面,不同坡位间,沿阶草仅根表面积密度在下坡显著大于上坡,是上坡的 2.05 倍。拉巴豆的根长密度和根表面积密度在中坡和下坡显著高于上坡,而根体积比在中坡显著高于上坡和下坡。在根系功能性状方面,两种草本植物的比根长和根组织密度在坡位间差异不显著。拉巴豆的比根长在上、中、下坡均显著大于沿阶草,分别是沿阶草的 3.36、2.85 和 2.24 倍。

2.4 边坡稳定影响因素分析

由表 2 可知,边坡安全系数与土壤粘聚力极显著正相关,与土壤粉粒含量极显著负相关($P<0.01$),与土壤黏粒显著正相关,与大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量显著负相关($P<0.05$)。边坡安全系数与土壤粘聚力相关性最强,拟合结果表明两者呈对数函数关系(图 4)。

表 2 边坡安全系数与土壤理化化学性质相关分析

Table 2 Correlation analysis between slope stability factor of safety and soil physicochemical and mechanical properties

指标 Index	容重 Bulk density	含水率 Soil water content	>0.25 mm 水稳性团聚体 >0.25 mm water-stable aggregates	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	有机质 Soil organic matter	粘聚力 Cohesion	内摩擦角 Internal friction angle
F_s	-0.37	0.22	-0.51 *	0.08	-0.78 **	0.61 *	0.55	0.95 **	0.37

F_s :边坡安全系数,slope stability factor of safety; *:相关性在 0.05 水平下显著; **:相关性在 0.01 水平下显著

如表 3 所示,边坡安全系数与根长密度、根表面积密度和根质量密度极显著正相关,与比根长极显著负相关($P<0.01$),其中与根质量密度相关性最强,相关系数为 0.85。

表 3 边坡安全系数与草本植物根系性状相关分析

Table 3 Correlation analysis between slope stability factor of safety and herbaceous root traits

指标 Index	根长密度 Root length density	根表面积密度 Root surface area density	根体积比 Root volume rate	根质量密度 Root mass density	比根长 Specific root length	根组织密度 Root tissue density
F_s	0.61 **	0.71 **	0.42	0.85 **	-0.72 **	0.38

应用卡方检验 P 值、拟合优度指数和近似误差均方根等指标^[24] 评估结构方程模型的拟合优度,表明模型

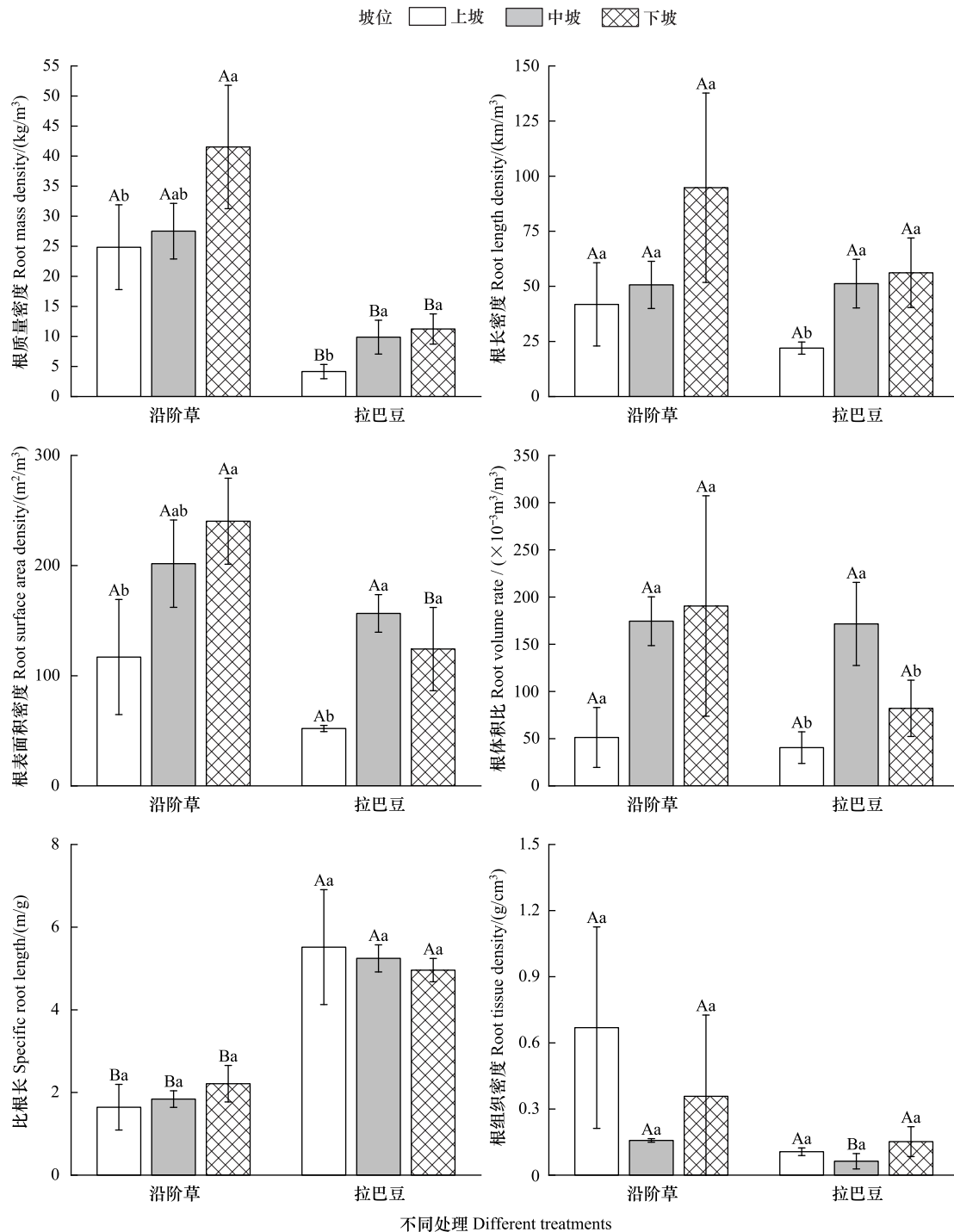


图3 不同坡位两种根-土复合体的根系性状

Fig.3 Root traits of two root-soil complexes at different slope positions

与数据拟合较好 ($P=0.419>0.05$, $GFI=0.988>0.9$, $RMSEA=0.032<0.06$)。结构方程模型表明仅根质量密度对边坡安全系数的直接影响极显著 ($P<0.01$), 标准化路径系数为 0.85。根长密度和比根长通过根质量密度间接影响边坡安全系数, 根表面积密度和根组织密度通过比根长间接影响边坡安全系数, 根体积比对边坡安全系数的影响不显著 (图 5)。综上所述, 根质量密度是影响边坡稳定的关键根系性状。

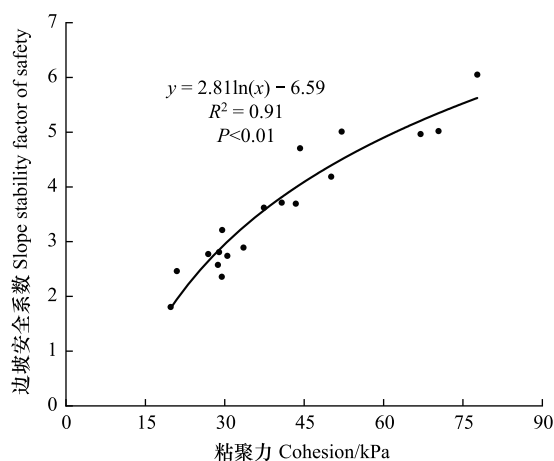


图4 边坡安全系数与土壤粘聚力的对数函数拟合

Fig.4 Logarithmic function fitting of slope stability factor of safety to soil cohesion

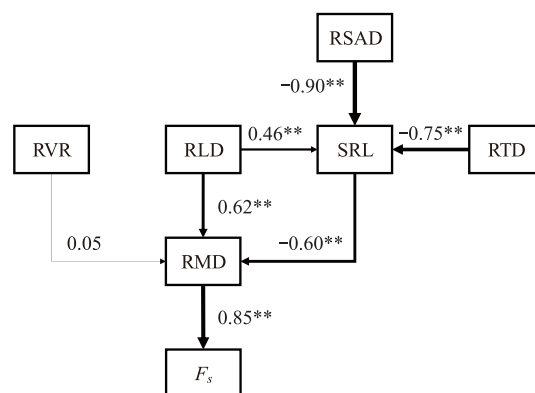


图5 结构方程模型

Fig.5 Structural equation model

F_s : 边坡安全系数; RMD: 根质量密度; RVR: 根体积比; RLD: 根长密度; SRL: 比根长; RTD: 根组织密度; RSAD: 根表面积密度

3 讨论

研究结果表明在喀斯特地区种植草本植物可以提高边坡安全系数且须根系的提高效果好于直根系。前人研究也证实刺槐^[11]、紫花苜蓿^[12]和柠条(*Caragana korshinskii* K.)^[25]等植物均能提高边坡安全系数。张立芸等人^[26]的研究也表明须根系比直根系固定表土的能力更强。这主要是因为须根系植物根系发达,很少出现为发展部分根系而牺牲细根和单根的情况。喀斯特地区土层浅薄^[27],须根系能在浅土层形成致密的根系网络进而有效固持土壤。研究还表明沿阶草处理对下坡安全系数提升最大,而拉巴豆处理对上坡安全系数提升最大。这是由于根系通过加筋和锚固两方面作用以增强土体抗剪强度和提高了边坡浅层稳定性^[28],须根系植物的细根主要发挥加筋作用而直根系的主根主要发挥锚固作用^[25]。下坡土壤水肥条件较优^[29],根系生长不受限。细根数量多更能发挥须根系的加筋效果进而增强边坡稳定性^[30]。上坡通常面临更恶劣的生长环境,植物主要通过根系伸长和提高深层根占比的方式适应恶劣环境^[31–32]。上坡直根系的主根必须纵向生长,以便它们可以扩展到更深的岩石缝隙中吸收水分和养分。这造成直根系植物对上坡的锚固作用优于中、下坡。因此,须根系在下坡能发挥最优的加筋作用,直根系在上坡能最大发挥锚固作用。

试验区土壤理化性质表明两种草处理的土壤有机质含量较 CK 略有下降。而前人^[3]研究表明生态恢复增加了石漠化地区土壤有机碳含量。这可能与本研究两种草处理存在人为收割用于试验有关,人为收割减少土壤有机质通过根系和地上生物量分解返回土壤。与对照相比,人为收割造成土壤有机质转移。虽然根系腐殖质和分泌物可以增加土壤有机质含量,但由于植物种植时间短,其增加量可能低于人为收割造成的减少量。Wang 等人^[33]在西南典型喀斯特植被修复区的研究也表明无植被覆盖的土壤有机质含量高于皇竹草(*Pennisetum sinense* R.)和砂仁(*Amomum villosum* L.)两个草地恢复区。在土壤力学性质中,边坡安全系数与土壤粘聚力相关性最强,相关系数达到 0.95 ($P < 0.01$),由土壤粘聚力所代表的土体抗剪强度不仅是评估土壤可蚀性的指标,也是边坡稳定性分析的重要输入参数^[15]。边坡安全系数与土壤粘聚力呈对数函数关系,这与人^[34]对刺槐和侧柏(*Platycladus orientalis* F.)的研究结果相似。边坡稳定性受多种因素影响,土壤粘聚力是关键因素之一,含水量和地下水位等其他因素也影响边坡稳定性^[9–15]。因此,虽然增加土壤粘聚力有助于提高边坡稳定性,但这一效果存在上限。

结构方程模型表明根质量密度是影响边坡稳定的关键根系性状,植物根系通过其生物物理及化学效应在减少土壤侵蚀和增强边坡稳定方面发挥着重要作用^[35–36]。根系在生长过程中与土体形成网状结构,通过物

理上结合土壤颗粒提供加筋和锚固作用。同时,根系分泌物通过范德华力粘附土壤颗粒,增强土壤抗侵蚀能力和稳定性^[37]。高根质量密度意味着更多植物根系参与了加固坡面土体的过程,从而使坡面更能抵抗边坡失稳,并提高边坡安全系数。根质量密度从坡上到坡下逐渐增加,所以随着坡位降低,边坡稳定性增强。根质量密度随着坡位变化与不同坡位的根系生长环境有关,这与 Geng 等人^[38]在黄土高原对华扁穗草(*Blysmus sinocompressus* T. et W.)、早熟禾(*Poa annua* L.)和长芒草(*Stipa bungeana* T.)的研究结果一致,其研究表明根质量密度与海拔负相关。本研究位于喀斯特地区,降雨集中,水土流失严重。土壤水分和养分由于水土流失自然向边坡上的低洼处移动,导致中、下坡的环境比上坡好^[29],植物根系生长更发达。坡位间根系形态变化是土壤水分和养分含量空间变异的反映。拉巴豆的根长密度和根表面积密度在中坡和下坡显著高于上坡,这与颜哲豪等人^[6]在同一地区的研究结果一致。而沿阶草处理的根系形态在坡位之间差异不显著,这表明沿阶草能较好地适应喀斯特地区不同坡位的生境,而拉巴豆受坡位间生境影响较大。两种草处理之间的根系形态没有表现出显著性差异,这与 Wang 等人^[21]在黄土高原的研究结果不同,这一方面由于本研究所在喀斯特地区的环境与黄土高原不同,土层浅薄且具有地表地下二元结构^[1],植物生长存在限制。另一方面可能由采样方法不同造成,Wang 等人^[21]使用 5 cm 高的抗冲环刀采集根-土复合体样本,而本研究使用 2 cm 高的抗剪环刀采集样本。

4 结论

(1)沿阶草和拉巴豆均提高了喀斯特边坡浅层稳定性。两种草处理的边坡安全系数是对照的 1.52—2.80 倍,其中须根系沿阶草的固坡效果显著优于直根系的拉巴豆。沿阶草和拉巴豆处理的最优坡位分别是下坡和上坡,二者的边坡安全系数相较于对照分别提高了 179.96%和 75.53%。

(2)沿阶草和拉巴豆均显著提高了土壤粘聚力,两种草处理的土壤粘聚力是对照的 1.97—5.11 倍。沿阶草的根质量密度显著大于拉巴豆,是拉巴豆的 2.78—5.99 倍。不同坡位间,两种草处理的根质量密度、根表面积密度和土壤粘聚力均表现为下坡显著大于上坡。

(3)土壤粘聚力和根质量密度是影响边坡浅层稳定性的关键指标。边坡安全系数与土壤粘聚力正相关,且呈对数函数关系($R^2=0.91, P<0.01$)。结构方程模型中仅根质量密度对边坡安全系数的直接影响显著,标准化路径系数为 0.85($P<0.01$)。喀斯特地区边坡浅层防护宜分坡位选取不同根系类型的草本植物,且根质量密度高的植物有利于边坡稳定。

参考文献(References):

- [1] 何江湖,张科利.西南喀斯特地区地下水土流失研究综述.泥沙研究,2022,47(5):66-73.
- [2] 李先琨,何成新,蒋忠诚.岩溶脆弱生态区生态恢复、重建的原理与方法.中国岩溶,2003,22(1):12-17.
- [3] 龙启霞,蓝家程,姜勇祥.生态恢复对石漠化地区土壤有机碳累积特征及其机制的影响.生态学报,2022,42(18):7390-7402.
- [4] 娄义宝,康宏亮,王文龙,沙小燕,冯兰茜,聂慧莹,史倩华.黄土高原沟壑区沟头植被根系垂直分布及其对土壤抗侵蚀性的影响.中国农业科学,2023,56(1):90-103.
- [5] 毛正君,张瑾鸽,毕银丽,孙伟博,安宁.紫花苜蓿对黄土边坡浅层破坏防护时间效应的数值分析.农业工程学报,2022,38(15):72-83.
- [6] 颜哲豪,谌芸,刘泉宏,何丙辉,唐菡,强娇娇.喀斯特坡地 2 种地埂篱根-土复合体抗剪和抗冲性能综合评价.生态学报,2022,42(5):1811-1820.
- [7] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, Li Z W, Shan Z J. Effects of near soil surface characteristics on the soil detachment process in a chronological series of vegetation restoration. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(4): 1213-1222.
- [8] 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.水土保持研究,2020,27(3):357-363,371.
- [9] 李通,王云琦,何相昌,祁子寒,骆丕昭.风荷载作用下三种乔木对边坡变形和稳定的影响.农业工程学报,2023,39(5):110-119.
- [10] Fan C C, Lai Y F. Influence of the spatial layout of vegetation on the stability of slopes. Plant and Soil, 2014, 377(1): 83-95.
- [11] 雷磊,万昊,江涛,师一卿,吕平海,田堪良,王晓东,杨傲秋.不同生长年限的刺槐根系对黄土边坡加固作用的研究.水资源与水工程学报,2022,33(5):183-188,199.

- [12] Mao Z J, Bi Y L, Geng M M, An N. Pull-out characteristics of herbaceous roots of alfalfa on the loess in different growth stages and their impacts on slope stability. *Soil and Tillage Research*, 2023, 225: 105542.
- [13] Lan H J, Wang D J, He S T, Fang Y C, Chen W L, Zhao P, Qi Y C. Experimental study on the effects of tree planting on slope stability. *Landslides*, 2020, 17(4): 1021-1035.
- [14] 钟彩尹, 崔鹏, 朱帅润, 卿毅伟, 吴礼舟. 植物根系吸水对非饱和土边坡稳定性影响的分析. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 99-105.
- [15] Wang H D, She D L, Sun X Q, Tang S Q, Zheng Y P. Analysis of unsaturated shear strength and slope stability considering soil desalinization in a reclamation area in China. *CATENA*, 2021, 196: 104949.
- [16] Temgoua A G T, Kokutse N K, Kavazović Z, Richard M. A 3D model applied to analyze the mechanical stability of real-world forested hillslopes prone to landslides. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 609-619.
- [17] Forster M, Ugarte C, Lamandé M, Faucon M P. Root traits of crop species contributing to soil shear strength. *Geoderma*, 2022, 409: 115642.
- [18] Su X M, Zhou Z C, Liu J E, Wang P P, Liu J Y, Li Q J, Zhao F W. The role of roots traits of climax community species to shear strength in the Loess Hilly Region, China. *Soil and Tillage Research*, 2022, 221: 105417.
- [19] 张淑卿, 臧丹丹, 李剑峰, 郭金梅. 耐旱根瘤菌对于旱胁迫下拉巴豆植株生长的影响. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(6): 39-45.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978: 11-99.
- [21] Wang B, Li P P, Huang C H, Liu G B, Yang Y F. Effects of root morphological traits on soil detachment for ten herbaceous species in the Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142304.
- [22] 唐小松, 李典庆, 周创兵, 方国光. 基于 Copula 函数的抗剪强度参数间相关性模拟及边坡可靠度分析. *岩土工程学报*, 2012, 34(12): 2284-2291.
- [23] Wen X C, Wang X, Ye M T, Liu H, He W C, Wang Y, Li T Y, Zhao K J, Hou G R, Chen G, Li X W, Fan C. Response strategies of fine root morphology of *Cupressus funebris* to the different soil environment. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1077090.
- [24] Xing S K, Zhang G H, Zhu P Z, Wang L L, Wang Z G, Wang C S. Shear strength of soil-root system under different vegetation restoration modes on the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 2023, 228: 105648.
- [25] 梁燊, 刘亚斌, 石川, 庞景豪, 李国荣, 朱海丽, 胡夏嵩. 黄土区不同龄期灌木柠条锦鸡儿根系的分布特征及其固土护坡效果. *农业工程学报*, 2023, 39(15): 114-124.
- [26] 张立芸, 段青松, 范茂攀, 杨亚丽, 程伟威, 李永梅. 玉米和大豆根系对滇中地区坡耕地红黏土抗剪强度的影响. *土壤学报*, 2022, 59(6): 1527-1539.
- [27] 罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 谭秋, 冉晨, 陈欢, 习慧鹏, 陈飞, 操玥, 吴路华, 李汇文, 钟昕. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析. *生态学报*, 2021, 41(2): 680-693.
- [28] 肖海, 张千恒, 夏振尧, 胡欢, 朱庆文, 闫茹冰, 张伦, 杨悦舒. 拉拔作用下护坡植物香根草根系的力学性能. *农业工程学报*, 2022, 38(11): 91-97.
- [29] Chen Y, Tang H, He B H, Yan Z H, Liu X H, Qiang J J. Root tensile strength of terrace hedgerow plants in the karst trough valleys of SW China: Relation with root morphology and fiber content. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(4): 677-686.
- [30] 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 黄茹, 陶俊, 田太强. 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. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 144-152.
- [31] 席璐璐, 侯倩倩, 王国华, 宋冰. 荒漠绿洲过渡带一年生草本植物对干旱胁迫的响应. *生态学报*, 2021, 41(13): 5425-5434.
- [32] 侯立伟, 鲁绍伟, 李少宁, 赵娜, 徐晓天. 干旱对 3 种灌木干质量分配和根系分布的影响. *植物资源与环境学报*, 2023, 32(6): 34-42.
- [33] Wang L J, Luo N N, Shi Q L, Sheng M Y. Responses of soil labile organic carbon fractions and enzyme activities to long-term vegetation restorations in the karst ecosystems, Southwest China. *Ecological Engineering*, 2023, 194: 107034.
- [34] 及金楠, 张志强, 郭军庭, 田佳. 黄土高原刺槐和侧柏根系固坡的有限元数值模拟. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 146-154.
- [35] De Baets S, Poesen J, Gyssels G, Knapen A. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 2006, 76(1/2): 54-67.
- [36] Bordoni M, Vivaldi V, Giarola A, Valentino R, Bittelli M, Meisina C. Comparison between mechanical and hydrological reinforcement effects of cultivated plants on shallow slope stability. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 168999.
- [37] Wang B, Zhang G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(6): 1567-1576.
- [38] Geng R, Zhang G H, Ma Q H, Wang H. Effects of landscape positions on soil resistance to rill erosion in a small catchment on the Loess Plateau. *Biosystems Engineering*, 2017, 160: 95-108.