

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20240229.001

两种草本植物对红黏土边坡的固土护坡效应

王连锐¹, 严亚¹, 商崇菊¹, 谭娟¹, 杨永宇²

(1.贵州省水利科学研究院, 贵州 贵阳 550002; 2.贵州省油气勘查开发工程研究院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: [目的] 探讨两种草本植物对红黏土边坡的固土护坡效应, 为该类型边坡、河道、大坝的生态治理提供科学参考。[方法] 以红黏土边坡为研究对象, 选取狗牙根和香根草作为护坡植物, 通过种植试验、根系拉伸试验、直剪试验、室内模拟冲刷试验, 探讨两种草本植物的护坡效应。[结果] ①种植 150 d 内, 两种草本植物均稳定生长, 根系抗拉强度持续增加; 生长 30~150 d, 狗牙根的最大抗拉力从 0.84 N 增至 8.59 N, 香根草的最大抗拉力从 4.78 N 增至 89.89 N。②生长 120 d 时, 对比无根土, 狗牙根根土复合体的黏聚力提升 91.1%, 内摩擦角提升 12.45%; 香根草根土复合体的黏聚力提升 107.47%, 内摩擦角提升 12.74%。③生长 150 d 时, 对比裸坡, 狗牙根坡的径流速率降低 45.02%~54.15%, 产沙速率降低 58.3%~93.85%, 60 min 累计产沙量降低 81.02%; 香根草坡的径流速率降低 35.46%~46.48%, 产沙速率降低 46.8%~89.44%, 60 min 累计产沙量降低 74.61%。[结论] 两种草本植物对红黏土边坡都具有良好的固土护坡效应, 香根草对土体抗剪强度的增益效果更明显, 狗牙根的水土保持效果更显著。

关键词: 红黏土; 植物护坡; 根系抗拉力; 抗剪强度; 水土保持

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0146-09

中图分类号: S157.2, TU42

文献参数: 王连锐, 严亚, 商崇菊, 等. 两种草本植物对红黏土边坡的固土护坡效应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 146-154. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240229.001; Wang Lianrui, Yan Ya, Shang Chongju, et al. Soil strengthening and slope protection effect of two types of herbaceous plants on red clay slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 146-154.

Soil Strengthening and Slope Protection Effect of Two Types of Herbaceous Plants on Red Clay Slopes

Wang Lianrui¹, Yan Ya¹, Shang Chongju¹, Tan Juan¹, Yang Yongyu²

(1. Guizhou Institute of Water Resources Science, Guiyang, Guizhou 550002, China;

2. Guizhou Institute of Petroleum Exploration and Development Engineering, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: [Objective] Soil strengthening and slope protection effects of two kinds of herbaceous plants were explored on red clay slope in order to provide scientific references for the ecological management of this type of slope, river channel, and dam. [Methods] With red clay slope as the research object, *Cynodon dactylon* and vetiver grass were selected as slope protection plants. The slope protection effect of the two herbaceous plants was determined through planting tests, root tensile tests, direct shear tests, and indoor simulated scouring tests. [Results] ① Within 150 days of planting, both herbaceous plants grew steadily and the tensile strength of the root system continued to increase. From 30 to 150 days of growth, the maximum tensile strength of *Cynodon dactylon* roots increased from 0.84 N to 8.59 N, and that of vetiver grass increased from 4.78 N to 89.89 N. ② At 120 days of growth, the cohesion of the *Cynodon dactylon* root-soil complex was 91.1% greater than the cohesion of rootless soil, and the angle of internal friction increased by 12.45%. The cohesion of the vetiver grass root-soil complex was 107.47% greater than that of rootless soil, and the angle of internal friction increased by 12.74%. ③ The runoff rate of the *Cynodon dactylon* slope at

收稿日期: 2023-06-21

修回日期: 2023-10-02

资助项目: 贵州省科技厅项目“喀斯特地区黄壤坡面细沟发育及其对植被生长的影响”(黔科合基础-ZK[2023]237); 贵州省水利科技项目“土壤侵蚀模型中喀斯特地区黄壤坡面细沟侵蚀参数研究”(KT202205)

第一作者: 王连锐(1997—), 男(汉族), 贵州省遵义市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水旱灾害防御、水土保持研究。Email: wlrygy@163.com。

通信作者: 严亚(1985—), 女(汉族), 贵州省安顺市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水旱灾害防御、节约用水研究。Email: 310796829@qq.com。

150 days of growth was 45.02% to 54.15% less than observed on a bare slope, while the sediment yield rate was 58.3% to 93.85% less, and the 60 min cumulative sediment yield was 81.02% less. Similarly, the runoff rate of the vetiver grass slope was 35.46% to 46.48% less than observed on a bare slope, while the sediment yield was 46.8% to 89.44% less, and the 60 min have sediment yield was 74.61% less. [Conclusion] Both herbaceous plants had excellent soil consolidation and slope protection effects on red clay slopes, with vetiver grass having a more pronounced effect on the increase in soil shear strength, and *Cynodon dactylon* having a more significant effect on soil and water conservation.

Keywords: red clay; plant slope protection; root tensile strength; shear strength; soil and water conservation

近年来,贵州省在推进公路、铁路、水利等基础设施建设过程中,产生了大量的边坡。边坡开挖破坏了坡体结构和坡面植被覆盖层,导致水土流失和浅层滑坡问题突出。以往多采用砌石、护面墙、框格等硬质措施进行边坡防护,随着生态文明建设的理念深入人心,植物护坡越来越受到人们的青睐^[1]。国内外诸多试验与工程实例证明,植物的存在能有效防治坡面水土流失和浅层滑坡^[2-3]。相较于传统的硬质护坡,植物护坡在节约成本,提升自然景观,改善生态环境等方面更具优势^[4]。植物对边坡的防护主要体现在力学效应和水文效应两方面^[5]。力学效应方面,穿插在土壤中的植物根系,对土体具有浅根加筋、深根锚固和侧根牵引作用,能有效增强土体的抗剪强度^[6-7]。强度提升效果与根径、根长、生长角度、种植间距等诸多因素有关^[8]。Baets 等^[9]对地中海 25 种典型植物研究发现,植物根系能提高表层土体的抗剪强度,且主要体现在土壤黏聚力的强化上。李珍玉等^[10]利用水肥组合调控香根草根系生长构型,并研究根系构型对边坡土体强度的影响,指出自然生长的单株香根草根系,对土体抗剪强度的增量大致为 5.28~8.62 kPa,调控后香根草增生了大量的 2 级和 3 级根,对土体抗剪强度的增量达到了 17.59~33.97 kPa。王一兵等^[11]为量化根系倾角对边坡土体强度的影响,对 30°,45°和 60°共 3 种不同侧根倾角的组合根系开展大型直剪试验和数值模拟,指出侧根倾角越大,根系对土体抗剪强度的提升效果越明显,峰值强度最大增幅为 81.1%,根系对抗剪强度的贡献依次为前侧根、主根、后侧根。水文效应方面,植物的茎叶和枯枝能削弱雨滴溅蚀,抑制地表径流;根系能增强土壤水分下渗能力,改善土壤的理化性质,减少坡面水土流失^[12-13]。何伟鹏等^[14]通过人工模拟降雨试验,探讨不同草本植物对坡面产流产沙的影响,指出种植草本植物能显著抑制坡面产流产沙,生长期两年的老芒麦直形边坡平均产流率较裸坡降幅最大为 73.83%。杨庆楠等^[15]以无芒雀麦、紫花苜蓿和早熟禾 3 种草本植物边坡为研究对象,观察天然降雨下的产沙产流特

征,指出草本植物径流小区与裸地小区相比,产流量减少了 27%~41%,产沙量减少了 60%~70%。Li 和 Peng^[16]通过模拟降雨—冲刷试验,探讨 3 种禾本科植物对减少地表径流和侵蚀的相对贡献,认为地上草对降低径流率和径流量的贡献较大,平均相对贡献率分别为 64%和 86%;根系在减少土壤侵蚀中起主导作用,平均贡献率为 84%。综上所述,植物对增强边坡土体强度,抑制水土流失有明显效果。但目前的研究多针对黄土、黑土和膨胀土等地区,对红黏土地区的研究尚有欠缺。红黏土是贵州省分布最广的土壤资源^[17],研究红黏土地区的植物护坡效应,对于贵州省的生态文明建设、水土流失和石漠化治理以及人与自然和谐发展都具有重要意义。本文以红黏土边坡为研究对象,选取香根草和狗牙根作为护坡植物,通过种植试验、根系拉伸试验、根土复合体直剪试验、室内模拟冲刷试验,探讨两种草本植物的护坡效应,试验结果可为红黏土边坡、河道、大坝的生态治理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 红黏土 试验土样取自贵州大学西校区物探试验区(106°39′30.16″,26°26′38.40″),取土深度 1—2 m,土样呈黄棕色,原状土样的含水比为 0.6,将其划分为硬塑状态(工程地质手册,第 5 版)。根据土工试验方法标准(GBT50123—2019),求得该红黏土的基本物理性质参数详见表 1。

表 1 红黏土的物理性质参数

Table 1 Physical parameters of red clay

土壤容重/ (g·cm ⁻³)	天然含 水率/%	塑限/%	液限/%	含水比
1.83	37.80	42.10	63.03	0.6

1.1.2 草本植物 护坡植物的选择一定要遵循自然规律,适应当地气候条件,能长期健康生长^[18]。同时要考虑植物的固土性,选择的植物要具备保水固土、

稳定边坡的作用^[19]。综合考虑,选择香根草和狗牙根两种根系发达、适应性强的草本植物作为研究对象。香根草,属多年生禾本科草本植物,生长速度快、适应性强、根系发达,多数为原生根,分支根系较少,根系可深入土层 2~3 m,具有较好的固土保水功能^[20]。狗牙根,属多年生草本植物,生长快、产量高、适应性强、根系发达、茎蔓生,具有根状茎和匍匐茎,匍匐方向茎秆可长达 2 m,节上产生分支根系,可生长新珠,是一种优良的护坡植物。

1.2 试验方法

1.2.1 草本植物的种植 2020 年 6—11 月进行种植试验,为避免试验错误损坏样本,共种植两批植物,批次间隔 15 d。种植场地选在贵州大学资源与环境工程学院楼顶试验场,可接受自然条件下的日照、通风和降雨。为更好地研究草本植物在红黏土中的生长情况,土壤采用均质土。将红黏土晒干、磨碎,过 2 mm 的筛,然后装入种植箱中种上草本植物。香根草种植箱大小为 195 cm×39 cm×81 cm,狗牙根种植箱大小为 195 cm×39 cm×51 cm(图 1)。在种植初期进行饱和浇水,保证植物成活。待植物成活后停止浇水,让其在自然环境中生长。考虑边坡土体贫瘠情况,种植时未施肥。种植观察期设置为 30, 60, 90, 120 和 150 d,在相应时间节点开展根系生长状态观察试验、根系拉伸试验、根土复合体抗剪强度试验。

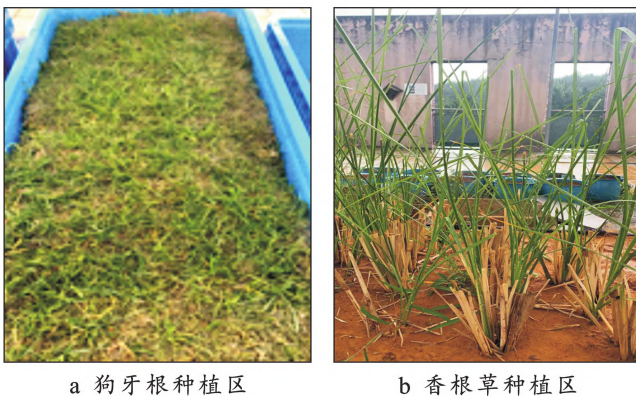


图 1 草本植物种植图

Fig.1 Herbaceous plants planting plots

1.2.2 根系的生长形态及力学特性测量 根系的生长形态特征包括数量、长度、体积、表面积、空间分布等,其中根系空间分布的复杂度可用盒维数来定量分析。通常情况下,分形维数与根系的复杂度成正比,分形维数越大,说明植物根系生长能力更强,侧根数量更多,根系分布更产^[21]。大量的研究表明,植物的生长形态和力学特性与其护坡效应存在明显的关联性^[22],因此有必要对不同生长时期草本植物的根系

形态及力学特性开展研究。植物根系的力学特性主要体现在抗拉力和抗拉强度两方面,由于草本植物的根径过小,常用的土工试验仪器无法准确测量其抗拉力,因此根系直径利用数显游标卡尺进行测量,根系强度利用中国水利水电科学研究院的电子式万能试验机(CMT 4000 系列)进行测量。测量前利用刷子将土颗粒分离,取出植物根系。香根草取主根中心段进行试验,狗牙根取直径大致相同的须根段进行试验(图 2)。为保证试验的准确性,设有 4 组平行试验,具体的试验方法参考文献^[23]。

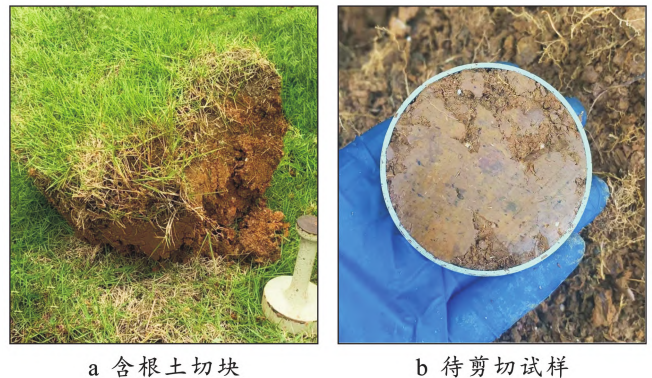


图 2 直剪试验取样图解

Fig.2 Sampling diagram for straight shear test

1.2.3 根土复合体的抗剪强度试验 通过浇水、蒸发等手段,控制根土复合体的含水率尽量靠近红黏土的天然含水率 37.8%,在不同的生长时期(30, 60, 90, 120 和 150 d),于种植箱中取样进行直剪试验,以获取根土复合体的抗剪强度。取样时随机在不同位置,用铁锹取出 30 cm×30 cm×30 cm 大小的含根土切块,然后利用环刀在切块中心部位取出直剪试样。设置无根土为对照组,制样时控制含水率和干密度与根土复合体保持一致。试验仪器采用南京土壤仪器厂生产的单联 ZJ 型应变控制式直剪仪,取样、制样及试验方法参考《土工试验方法标准(GB/T50123—2019)》,根据试验结果绘制 τ — σ 关系曲线,确定土体的抗剪强度。为保证试验准确性,设有 3 组平行样,剔除误差较大数据并补做试验,结果取平均值。

1.2.4 植物护坡的降雨冲刷试验 2020 年 11—12 月开展室内人工模拟降雨冲刷试验,探讨不同草本植物对红黏土边坡的水土保持效果,此时植物生长时期为 150 d。自行设计的试验装置如图 3 所示,主要部件包括给水流量控制装置、降雨装置、降雨冲刷槽、径流收集槽。在冲刷槽上方,均匀布置 12 个降雨喷头,旋转喷头可调节降雨直径。在冲刷槽中随机放置 11 个雨量筒,用于计算降雨均匀系数和标定雨强,均匀系数计算公式参考文献^[24]。

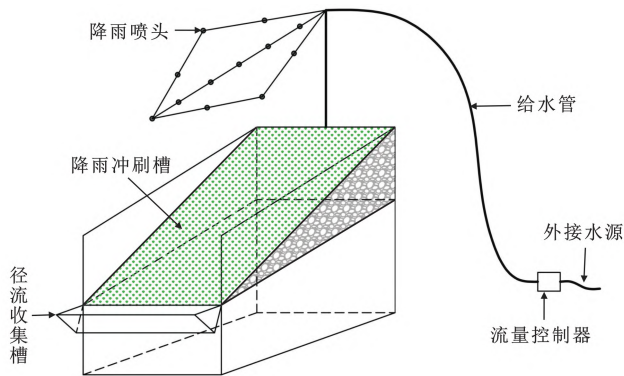


图 3 降雨装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of rainfall device

经测定,降雨均匀系数均大于 0.8,满足试验要求。将种植箱中的土体移至冲刷槽中,根据贵阳市花溪区气象局资料及相关文献^[25],设计雨强为 72 mm/h(暴雨级别)、坡度为 30°。设置裸坡为对照组,将相同含水率的红黏土,按照种植箱中红黏土密度(1.83 g/cm³),分 5 层铺入冲刷槽中,层间刮毛压实并静置 24 h。待准备工作完成后,开展降雨冲刷试验。设置两组平行试验,结果取平均值。自坡面产生径流开始,每隔 5 min 收集一次径流,总降雨历时 60 min。对收集到的径流,先测定其体积,然后静置 12 h,待径流中挟带的红黏土颗粒沉淀至杯底后,倒掉上清液,烘干浑浊

液并称量干土质量。根据试验结果,计算坡面径流速率和产沙速率。径流速率指一段时间内收集的径流体积(L)与接样时间(min)的比值,用来衡量降雨对径流的影响;产沙速率指一段时间内被径流冲刷搬运的泥沙质量(g)与接样时间(min)的比值,用来衡量土体的抗冲刷性能。

2 结果及分析

2.1 根系的生长形态及力学特性分析

由表 2 可知,种植 150 d 内,香根草和狗牙根都处于稳定生长期,其根系的长度、表面积、体积、空间分布复杂度都随生长历时增大。且在相同时期内,香根草的根系生长状态都远优于狗牙根。根系的生长状态直接影响到根系吸水性能、固土效果。随植物根系生长,其抗拉能力也逐渐增大,这是因为植物根系在生长过程中,其直径变大、木质化程度增加、细胞排列更紧密。生长期 30—150 d,狗牙根的最大抗拉力从 0.84 N 增至 8.59 N,香根草的最大抗拉力从 4.78 N 增至 89.89 N。生长时期相同时,香根草的最大抗拉力大于狗牙根,而抗拉强度小于狗牙根,这是因为香根草主根优势明显,主根的最大抗拉力大于狗牙根的须根根系,但狗牙根须根根系直径远小于香根草主根,经公式换算后,其单位面积的抗拉强度大于香根草根系。

表 2 草本植物的生长形态及力学特性

Table 2 Growth patterns and mechanical properties of herbaceous plants

植物	生长时期/d	平均直径/mm	总根系长度/cm	总根系表面积/cm ²	总根系体积/cm ³	根系形态分形维数	最大抗拉力/N	最大抗拉强度/MPa
狗牙根	30	0.18±0.02	24.05±3.62	2.80±0.23	0.05±0.01	1.21±0.02	0.84±0.08	33.01
	60	0.24±0.04	29.14±3.59	5.35±0.15	0.20±0.02	1.31±0.02	1.59±0.24	35.24
	90	0.28±0.04	50.92±2.72	7.88±0.18	0.18±0.01	1.35±0.05	2.81±0.26	45.68
	120	0.37±0.05	44.07±5.84	7.50±0.35	0.25±0.02	1.37±0.03	5.31±0.39	49.39
	150	0.45±0.05	51.65±2.45	7.61±0.23	0.23±0.02	1.39±0.02	8.59±0.36	54.01
香根草	30	0.62±0.03	126.79±11.74	19.21±2.12	0.58±0.13	1.33±0.03	4.78±0.41	16.13
	60	0.87±0.01	200.91±26.51	33.14±3.92	1.00±0.12	1.37±0.03	10.84±1.57	18.39
	90	1.20±0.1	239.58±14.76	48.42±3.49	2.27±0.25	1.41±0.02	22.95±2.58	20.29
	120	1.49±0.08	257.76±23.23	72.35±4.04	2.79±0.23	1.44±0.03	40.17±3.16	23.19
	150	2.00±0.1	309.42±17.72	89.02±5.27	4.02±0.26	1.47±0.01	89.89±5.01	28.61

注:①表中数据为平均值±标准偏差。②最大抗拉强度由公式 $p=4F/\pi D^2$ 计算得出,其中 P 为最大抗拉强度件; F 为最大抗拉力平均值; D 为平均直径。下同。

图 4 为两种草本植物根系的形貌图,香根草根系拍摄时生长时期为 150 d,而狗牙根根系是生长 300 d 余后补拍的图片。可见,即使未施肥,两种草本植物在红黏土中生长状态依然良好。

2.2 根土复合体的抗剪强度分析

土体的抗剪强度是量化土壤边坡稳定性的重要指标之一,抗剪强度越大,边坡越稳定。由表 3 可知,

相同垂直压力下,根土复合体的抗剪强度均大于无根土,说明穿插在土壤中的根系,对红黏土的抗剪强度有明显的增益效果。生长时期相同时,两种草本植物根土复合体的抗剪强度也大致相等,总体来说香根草根系对土体强度的增益作用略优于狗牙根。生长 120 d 内,随草本植物生长两种根土复合体的抗剪强度增加。结合表 2 可知此时期内草本植物的根系正

处于快速生长期,说明随着植物根系长粗长密,对土体的加固效应也越发明显。但根系生长对土体抗剪强度的增益效果并非持续增加,因为在生长时期 150

d 时,虽然两种草本植物的根系相较于 120 d 仍在快速生长,但其根土复合体的抗剪强度变化不明显,甚至在部分垂直压力下略有下降。



a 香根草根系



b 狗牙根根系

图 4 两种草本植物根系形貌

Fig.4 Root morphology of two herbaceous plants

表 3 不同垂直压力下的抗剪强度

Table 3 Shear strength at different vertical pressures

土体类别	生长时期/d	垂直压力			
		100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
无根土	—	58.40±3.75	74.88±4.14	99.48±7.02	131.20±3.31
	30	63.28±3.62	79.46±3.11	103.29±3.63	137.03±4.89
	60	70.27±3.04	98.80±4.21	116.50±5.74	147.44±3.32
	90	77.40±2.95	110.60±4.68	125.36±3.83	162.12±4.68
	120	83.58±1.06	118.08±4.49	134.51±2.69	169.67±4.08
	150	85.12±2.74	119.88±4.04	132.23±5.60	172.46±1.56
狗牙根的根土复合体	30	61.78±4.25	78.92±3.64	106.66±3.33	136.73±2.89
	60	68.80±3.50	92.68±4.16	113.60±5.10	144.05±3.49
	90	82.40±3.73	117.36±0.42	131.04±4.58	169.60±5.32
	120	87.42±2.33	124.80±3.78	140.32±6.92	174.16±4.05
	150	89.52±3.16	117.42±2.86	147.40±1.96	173.28±2.69
	香根草的根土复合体	30	61.78±4.25	78.92±3.64	106.66±3.33
60		68.80±3.50	92.68±4.16	113.60±5.10	144.05±3.49
90		82.40±3.73	117.36±0.42	131.04±4.58	169.60±5.32
120		87.42±2.33	124.80±3.78	140.32±6.92	174.16±4.05
150		89.52±3.16	117.42±2.86	147.40±1.96	173.28±2.69

由图 5 可知,不同生长时期两种根土复合体的黏聚力和内摩擦角均大于无根土,其中黏聚力的提升更为明显。生长 120 d 时,相较于无根土,狗牙根根土复合体的黏聚力提升 91.1%,内摩擦角提升 12.45%;香根草根土复合体的黏聚力提升 107.47%,内摩擦角提升 12.74%。可见,草本植物对红黏土边坡强度的提升,主要体现在黏聚力的强化上,而对内摩擦角的影响不大,这一发现与郑启萍^[26]、张兴玲^[27]的研究结果一致。

2.3 降雨冲刷试验结果与分析

2.3.1 径流速率 坡面径流会冲刷表层土壤,搬运

土颗粒,从而侵蚀边坡土体造成水土流失,分析坡面径流速率的变化能更好地认识边坡的侵蚀过程。由图 6 可知,3 组边坡的坡面径流速率变化趋势,均可分为前期快速上升和后期波动稳定两个阶段,这是因为前期土壤较为干燥,雨水落到坡面快速下渗被土壤吸收,因而径流速率较小;后期土壤吸水逐渐饱和,径流速率随之变大并趋于稳定。相较于裸坡径流速率,香根草坡降低 35.46%~46.48%,狗牙根坡降低 45.02%~54.15%,说明植物具有良好的阻水效应,能阻扰坡面径流的形成,且狗牙根的阻水效应更明显。

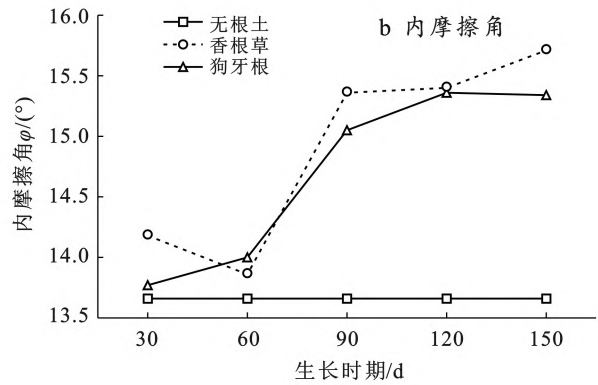
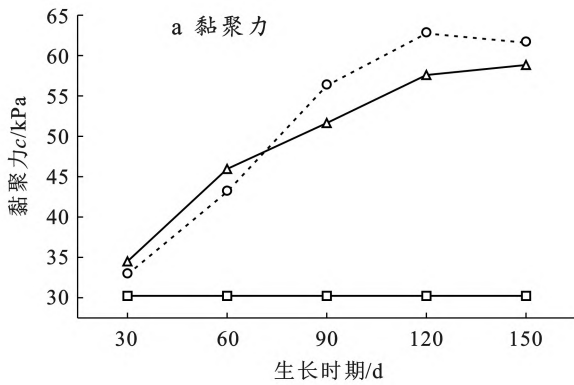


图 5 三种根土复合体的抗剪强度指标

Fig.5 Shear strength index of three kinds of root and soil complex

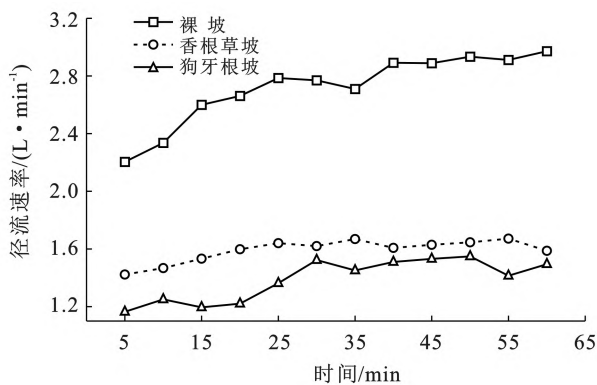


图 6 不同类型边坡坡面径流速率

Fig.6 Runoff rate on different types of slope faces

2.3.2 产沙速率 产沙速率指的是单位时间内坡面径流对沿途土壤分散、剥离和搬运产生的泥沙量,研究产沙速率可以更好地分析径流冲刷对边坡土壤的侵蚀作用。由图 7 可知,随降雨时间延长,3 组边坡的产沙速率均呈前期快速下降,后期趋于稳定的变化趋势。前期,原始状态的坡面本身存在部分松散土颗粒,径流一旦形成,这些土颗粒便被径流挟带搬运,因此 3 组坡面最初的产沙速率均是最高的。随着这些松散土颗粒被搬走,产沙速率逐渐下降;后期,原有的易破碎的、松散的土颗粒基本消耗殆尽,在雨水的不断湿润和冲击下,原本凝结成块的坡面土壤会逐渐松散解体,产生新的松散土颗粒被径流搬运,产沙速率也达到动态上的平衡。由于裸坡无植物覆盖,受雨水冲击影响的不确定性更明显,因而产沙速率波动性更大。相较于裸坡产沙速率,香根草坡降低 46.8%~89.44%,狗牙根坡降低 58.3%~93.85%,说明草本植物具有良好的减沙效应,能减轻雨水对坡面的侵蚀,降低坡面的产沙速率,且狗牙根的减沙效应更明显。

2.3.3 累计产沙量 表 4 为 72 mm/h 强度降雨冲刷下,3 组边坡的 60 min 累计产沙量。红黏土黏粒含量较高,富含铁、铝质胶结氧化物,这些胶结氧化物将土

颗粒牢牢胶结在一起形成团聚体,结构稳定,因而红黏土的抗冲刷性能较好,72 mm/h 强度降雨冲刷下,裸坡 60 min 累计产沙量也仅有 230.8 g。相对于裸坡,香根草坡的 60 min 累计产沙量为 58.6 g,降低 74.61%;狗牙根坡的 60 min 累计产沙量为 43.8 g,降低 81.02%。结合图 5—7 的试验结果综合分析,两种草本植物均有明显的水土保持作用,且狗牙根略优于香根草,这与植物间的茎、叶、根等综合作用效应差异有关。

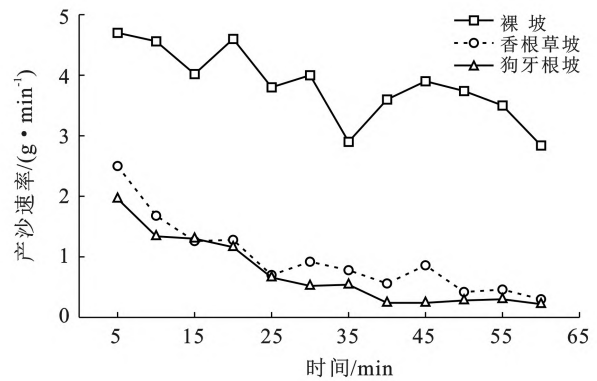


图 7 不同类型边坡产沙速率

Fig.7 Sediment yield rate of different types of slopes

表 4 不同类型边坡在 72 mm/h 强度降雨冲刷下的 60min 累积产沙量

Table 4 Cumulative sediment yield of different types of slopes in 60 minutes under 72 mm/h rainfall

边坡类型	裸坡	香根草坡	狗牙根坡
60 min 累积产沙量/g	230.8	58.6	43.8

3 讨论

3.1 植物对抗剪强度的影响

植物对边坡红黏土抗剪强度的影响,主要体现在根系的加筋作用和锚固作用两方面。密集的浅根穿插盘结在表层土体中,形成加筋根土复合体保护层,

同时这些植物根系如同网兜一样将土体紧紧包裹,避免了土颗粒的离散,增加土体的抗剪强度^[28]。部分垂直深根穿过软弱层或滑动面,类似扎入土层的锚杆或抗滑桩,起到锚固作用,提高边坡的稳定性。狗牙根根系发达,须根细而坚韧,对土体起到良好的加筋作用;香根草的优势主根深入土层,锚固土体,发达的侧根连结周围土颗粒,因而两种根土复合体的抗剪强度较无根土均显著提高。但根系在发挥固土作用的同时,其生长也会破坏土体结构。当其固土效应不再明显增加,而破坏效应仍继续加大时,根土复合体的抗剪强度便不再增加,甚至开始下降。植物根系的固土机制极其复杂,一方面根系在红黏土中穿插生长,与土壤的接触面积增加,根—土界面的摩擦力和咬合力增加^[29];另一方面根土复合体受到外部荷载发生剪切变形时,根的变形远小于土,因而部分外部荷载转化为根的抗拉力;此外,草本植物在生长过程中,根系会产生分泌物胶结土体颗粒、充填土体孔隙,形成土壤团聚体^[30]。受限于时间与试验条件,本研究并未深入探讨草本植物根系的固土机制,根—土界面的摩擦特性、根系固土的力学模型等研究有待进一步开展。

3.2 植物对抗冲刷性的影响

坡面覆盖植物时,一方面植物的茎叶能起到截留和缓冲作用,截留部分雨水的同时,削减雨滴的动能,从而影响坡面径流的形成,降低雨水对土体的破坏^[31];另一方面植物根系及其腐殖质能有效吸收水分,增加坡面粗糙度,减缓水流速度,降低径流速率,发达的根系在土中穿插缠绕,还可以提高土体的稳定性;此外,植物的生长也能改变土壤的理化性质、降低有机质的分解,影响水分的蒸发和储存,促进微生物的活动等^[32]。在多方面作用的共同影响下,植物边坡呈现良好的固土保水效应,径流速率和产沙速率大幅度降低。两种草本植物均有明显的水土保持作用,相比之下狗牙根坡的径流速率、产沙速率、产沙量更低,水土保持效果略优于香根草,这是因为狗牙根根系密集匍匐在地面,形成良好的下渗通道便于雨水下渗,同时密集生长的狗牙根形成坡面覆盖层,降低雨滴动能的同时增加坡面粗糙度,导致径流路径更长,径流速率更低。受限于模型大小和样本数量,本研究未探讨不同坡度、不同种植密度下的植物护坡效应,根土复合体水力学特征也有待进一步研究。

4 结论

(1) 种植 150 d 内,两种草本植物根系都在稳定生长,力学性质也在持续变好,香根草根系生长状态

优于狗牙根。生长 30~150 d,狗牙根的最大抗拉力由 0.84 N 增至 8.59 N,香根草的最大抗拉力由 4.78 N 增至 89.89 N。

(2) 对比无根土、种植 120 d 内两种草本植物根土复合体的抗剪强度均显著提高,且强度提高主要体现在黏聚力的强化上。120~150 d,根系持续生长,但根土复合体的抗剪强度不再增加,甚至略有下降。总的来说香根草对土体抗剪强度的增益效果略优于狗牙根。

(3) 两种草本植物均有良好的水土保持效应,对比裸坡,植物边坡的径流速率和产沙速率均大幅度下降。裸坡的 60 min 累计产沙量为 230.8 g,香根草坡为 58.6 g,降低 74.61%;狗牙根坡为 43.8 g,降低 81.02%,狗牙根坡的水土保持效果略优于香根草坡。

(4) 总的来说,狗牙根和香根草均有良好的护坡效应,在实际应用中应综合考虑自然环境、水文气象、经济效益、人文景观等因素来选择护坡植物。

参考文献 (References)

- [1] Yang Yang, Yang Jianying, Zhao Tingning, et al. Ecological restoration of highway slope by covering with straw-mat and seeding with grass-legume mixture [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 68-76.
- [2] 郭洋楠, 宫传刚, 杨剑, 等. 草本植物对边坡稳定性影响研究进展 [J]. *草地学报*, 2022, 30(4): 841-849. Guo Yangnan, Gong Chuangang, Yang Jian, et al. Research progress on influence of herbaceous vegetation on slope stability [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(4): 841-849.
- [3] Bordoloi S, Ng C W W. The effects of vegetation traits and their stability functions in bio-engineered slopes: A perspective review [J]. *Engineering Geology*, 2020, 275: 105742.
- [4] 范昕然, 王海琳. 植物型生态护坡在河道治理中的应用 [J]. *水运工程*, 2023(增刊 2): 15-19. Fan Xinran, Wang Hailin. Application of plant-based ecological slope protection in river management [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2023(Suppl.2): 15-19.
- [5] 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. Fu Jiangtao, Li Guangying, Hu Xiaotian, et al. Research status and development tendency of vegetation effects to soil reinforcement and slope stabilization [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6): 1135-1146.
- [6] 栗岳洲, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 土体粒径对盐生植物根—土复合体抗剪强度影响的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 403-412. Li Yuezhou, Fu Jiangtao, Hu Xiasong, et al. Experi-

- mental study of the influence of grain size on the shear strength of rooted soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(2):403-412.
- [7] Stokes A, Atger C, Bengough A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides [J]. Plant & Soil, 2009,324(1/2):1-30.
- [8] 李珍玉, 欧阳森, 肖宏彬, 等. 植物根系生长形态对膨胀土边坡土体抗剪强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022,53(1):181-189.
- Li Zhenyu, Ouyang Miao, Xiao Hongbin, et al. Influence of root growth configuration on shear strength of expansive soil slope [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022,53(1):181-189.
- [9] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength [J]. Plant & Soil, 2008,305(S1-2):207-226.
- [10] 李珍玉, 欧阳森, 肖宏彬, 等. 基于根系构型的调控提高植物边坡根系固土能力[J]. 岩土力学, 2021,42(12):3271-3280,3290.
- Li Zhenyu, Ouyang Miao, Xiao Hongbin, et al. Improvement of slope soil consolidation capacity of plant root system based on regulation of root architecture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 42(12):3271-3280,3290.
- [11] 王一冰, 吴美苏, 周成. 组合根系加固坡土的直剪试验及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2020,42(增刊1):177-182.
- Wang Yibing, Wu Meisu, Zhou Cheng. Direct shear tests and numerical simulation on slope soils reinforced by composite roots [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020,42(Suppl.1):177-182.
- [12] 单炜, 孙玉英, 王强, 等. 高等级公路边坡植物护坡机理与深根锚固作用[J]. 东北林业大学学报, 2008,36(11):59-60,63.
- Shan Wei, Sun Yuying, Wang Qiang, et al. Mechanism of biotechnical slope protection for highway slope and anchorage effect of deep-rooted plants [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008,36(11):59-60,63.
- [13] 陈钰馨, 郑博福, 傅赫, 等. 不同植被类型根系对土壤水分分布的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023,21(1):37-46.
- Chen Yuxin, Zheng Bofu, Fu He, et al. Effects of roots in different vegetation types on soil water distribution [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023,21(1):37-46.
- [14] 何伟鹏, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 不同植物对黄土边坡产流产沙与抗剪强度的影响[J]. 水土保持研究, 2023,30(4):18-26.
- He Weipeng, Hu Xiasong, Liu Changyi, et al. Effects of different plants on runoff and sediment yield and shear strength of loess slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):18-26.
- [15] 杨庆楠, 徐金忠, 樊华, 等. 3种草本植物根系特征及与径流泥沙关系[J]. 中国水土保持, 2021(9):47-52,9.
- Yang Qingnan, Xu Jinzhong, Fan Hua, et al. Root characteristics of three herbaceous plants and their relationship with runoff and sediment [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(9):47-52,9.
- [16] Li Changjia, Pan Chengzhong. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2018,558:90-103.
- [17] 廖义玲, 朱立军. 贵州碳酸盐岩红土[M]. 贵州: 贵州人民出版社, 2004:132-135.
- Liao Yiling, Zhu Lijun. Carbonate laterite in Guizhou [M]. Guiyang, Guizhou: Guizhou People's Publishing House, 2004:132-135.
- [18] 段晓明, 苗增健, 刘连新, 等. 生态护坡应用及护坡植物群落的选择[J]. 安徽农业科学, 2009,37(31):15327-15329,15339.
- Duan Xiaoming, Miao Zengjian, Liu Lianxin, et al. Ecological application of ecological slope protection and vegetation community selection for slope protection [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009,37(31):15327-15329,15339.
- [19] 马安卫, 陈淑焯, 蔡峰. 浅析河道护坡植物选择与河道养护关联性[J]. 人民长江, 2011,42(4):20-22.
- Ma Anwei, Chen Shuyue, Cai Feng. Analysis of correlation between slope-protection plant selection and river channel maintenance [J]. Yangtze River, 2011,42(4):20-22.
- [20] 王轩, 李珍玉, 肖宏彬, 等. 基于土-水特征曲线的植物边坡抗剪强度研究[J]. 水土保持学报, 2021,35(5):57-62,71.
- Wang Xuan, Li Zhenyu, Xiao Hongbin, et al. Study on shear strength of plant slope based on soil-water characteristic curve [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):57-62,71.
- [21] 崔远远, 张征云, 刘鹏, 等. 镉与聚乙烯微塑料胁迫对小白菜根系的形态特征和分形维数的影响[J]. 生态环境学报, 2023,32(1):158-165.
- Cui Yuanyuan, Zhang Zhengyun, Liu Peng, et al. Morphological characteristics and fractal dimension of *Brassica chinensis* root system under cadmium and polyethylene microplastic stress [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019,32(1):158-165.
- [22] 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[J].水土保持研究,2020,27(3):357-363,371.
- Pan Tianhui, Du Feng, Wang Yue. Analysis of Root distributions and shear strengths of slope protection plants in the loess region of Northern Shaanxi [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(3): 357-363,371.
- [23] 黄洋,陈筠,黄阳,等.草本植物在贵阳红黏土的形态分布与力学性能研究[J].中国水运(下半月),2022,22(1):45-47.
- Huang Yang, Chen Jun, Huang Yang, et al. Morphological distribution and mechanical properties of herbs in Guiyang red clay [J]. China Water Transport, 2022, 22(1):45-47.
- [24] 任树梅,刘洪禄,顾涛.人工模拟降雨技术研究综述[J].中国农村水利水电,2003(3):73-75.
- Ren Shumei, Liu Honglu, Gu Tao. Summary of research on artificial simulation of rainfall [J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(3):73-75.
- [25] 张东海,段莹,周文钰,等.贵阳市暴雨强度公式推求[J].城市道桥与防洪,2016(1):95-99,11-12.
- Zhang Donghai, Duan Ying, Zhou Wenyu, et al. Study of rainstorm intensity formula in Guiyang City [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016(1):95-99,11-12.
- [26] 郑启萍,徐得潜.草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(2):225-228.
- Zheng Qiping, Xu Deqian. Experimental research on the mechanism of herb ecological slope protection and the effect of roots on slope reinforcement [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2014,37(2):225-228.
- [27] 张兴玲,胡夏嵩.青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J].水土保持通报,2013,33(4):185-188.
- Zhang Xingling, Hu Xiasong. Shear characteristics of reinforced soil of herb roots in loess area of northeast Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(4):185-188.
- [28] 王文生,杨晓华,谢永利.公路边坡植物的护坡机理[J].长安大学学报(自然科学版),2005,25(4):26-30.
- Wang Wensheng, Yang Xiaohua, Xie Yongli. Mechanism of biotechnical protection for highway slope [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2005,25(4):26-30.
- [29] 程洪,谢涛,唐春,等.植物根系力学与固土作用机理研究综述[J].水土保持通报,2006,26(1):97-102.
- Cheng Hong, Xie Tao, Tang Chun, et al. Overview of mechanism of plant roots improving soil reinforcement and slope stabilization [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006,26(1):97-102.
- [30] Morel J L, Habib L, Plantureux S, et al. Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability [J]. Plant & Soil, 1991,136(1):111-119.
- [31] Wang Yanguang, Liu Xiaoxia. Plant slope protection in highway engineering [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018,170(5),052038.
- [32] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].水土保持学报,2020,34(3):267-273,298.
- Liu Junyang, Zhou Zhengchao, Su Xuemeng. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,34(3):267-273,298.

(上接第 145 页)

- [42] 张萍,哈斯额尔敦,杨一,等.小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛沙堆形态对沙源供给形式和丰富度的响应[J].中国沙漠,2015,35(6):1453-1460.
- Zhang Ping, Hasi Eerdun, Yang Yi, et al. Responses of nebkhas morphology to the mode and richness of sand supply [J]. Journal of Desert Research, 2015,35(6):1453-1460.
- [43] 谢国勋,罗维成,赵文智.荒漠草原带沙源及灌丛对灌丛沙堆形态的影响[J].中国沙漠,2015,35(3):573-581.
- Xie Guoxun, Luo Weicheng, Zhao Wenzhi. Effect of sand source and shrub features on nebkha morphological characteristics in desert steppe [J]. Journal of Desert Research, 2015,35(3):573-581.
- [44] 党晶晶.荒漠草地合头草枝系构型与个体大小之间关系的探讨[D].甘肃兰州:西北师范大学,2015.
- Dang Jingjing. Analysis of the relationship between branch in garchitecture and individual size of desert plants, *Sympegma regelii* [D]. Lanzhou, Gansu: Northwest Normal University, 2015.
- [45] 左合君,杨阳,张宏飞,等.阿拉善戈壁区白刺灌丛沙堆形态特征研究[J].水土保持研究,2018,25(1):263-269.
- Zuo Hejun, Yang Yang, Zhang Hongfei, et al. Morphological characters of *Nitraria* dune in Gobi of Alxa [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1):263-269.