

文章编号: 1001-4888(2019)03-0526-11

# 铁尾矿库无土植被护坡力学加固效应分析\*

康璞<sup>1</sup>, 金佳旭<sup>1</sup>, 梁冰<sup>2</sup>, 张平怡<sup>1</sup>, 孙杨<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000;  
3. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110000)

**摘要:** 针对铁尾矿库水土流失和库区生态环境的修复问题, 通过开展水力侵蚀室内试验, 研究了高羊茅、星星草、野牛草和裸坡 4 种工况下尾矿库边坡的径流模数时变规律、侵蚀模数时变规律、入渗与植被截流率和植被全截流规律。通过开展根-尾矿砂复合体的室内直剪试验, 研究在不同含根量和不同生长时间的情况下野牛草根-尾矿砂复合体黏聚力和内摩擦角的变化规律, 分析野牛草根含量和生长时间对铁尾矿砂抗剪强度的影响, 进而分析野牛草根含量和生长时间对铁尾矿砂抗侵蚀能力的影响。确定了提高铁尾矿砂抗剪强度和边坡抗侵蚀能力的最佳含根量及根系最佳生长时间。结果表明: 野牛草是铁尾矿库无土植被护坡工程中的优选草种, 野牛草根作为铁尾矿砂的加筋材料能够明显提高尾矿砂的抗剪强度和边坡的抗侵蚀能力; 根-尾矿砂复合体的黏聚力随根系的生长时间和含根量的增加先逐渐增大, 后逐渐减小, 但均高于未加野牛草根时的黏聚力; 野牛草的最优生长时间为 3 个月、最优含根量为 0.20%, 野牛草根系的生长时间和含根量对铁尾矿砂内摩擦角的影响很小。

**关键词:** 环境岩土工程; 铁尾矿库; 优选草种; 水力侵蚀; 抗剪强度

**中图分类号:** TU411      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-189

## 0 引言

尾矿库不仅会对周围环境造成严重危害, 而且由于其坝体的不稳定性, 会使下游农田和居民安全受到了严重的威胁。植物因具有降雨截流<sup>[1]</sup>、削弱冲刷<sup>[2]</sup>、减缓坡面径流<sup>[3]</sup>和降低坡体深层孔隙水压力<sup>[4]</sup>的优点, 被视作生态护坡的最佳方式。对尾矿坝进行植被护坡, 既可以稳固尾矿坝表层, 又可以控制粉尘污染、修复被破坏的生态环境。目前, 国内外许多学者在边坡生态防护方面进行了大量的理论和试验研究<sup>[5-13]</sup>。肖盛燮等<sup>[14]</sup>基于植被护坡的作用机制, 通过进行应力、应变模式分析, 建立了植被护坡力学加固作用模型, 推导出了植物根系加固能力的计算式和植物根系的抗滑力计算式。戚国庆等<sup>[15]</sup>探讨了植被护坡技术的工艺模式和环境适应性, 提出将植被护坡技术与传统的边坡加固技术有机地结合起来。龙凤等<sup>[16]</sup>站在系统工程学的角度, 建立了岩石边坡生态护坡的效果评价指标体系。封金财<sup>[17]</sup>采用有限元手段模拟植物根系加固边坡, 并对其作用规律进行了分析。刘杰<sup>[18]</sup>对土壤的加固效果与植物根系含量、根系的抗拉强度和根系额外黏聚力的关系进行了探讨。刘志勇等<sup>[19]</sup>基于强度折减法探究了植被根系在不同加固深度下某边坡抗滑安全系数及边坡塑性区发育规律。贺茜<sup>[20]</sup>探索了混交根系含量、密度、分布形态和含水量的变化等因素对边坡变形和稳定性的影响规律。但以上研究多涉及河道坡

\* 收稿日期: 2018-08-16; 修回日期: 2018-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(51574145); 国家自然科学基金青年基金(51504123); 辽宁省自然科学基金(20170540417); 辽宁省教育厅一般项目(LJYL029)

通讯作者: 金佳旭(1984-), 男, 工学博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为尾矿库安全与环境。Email: jjx\_605@163.com

岸<sup>[21]</sup>、岩质边坡<sup>[22]</sup>和高速公路边坡等,且所涉及试验基材多为黏土<sup>[23]</sup>、淤泥等性质良好的材料,针对尾矿库无土植被护坡<sup>[24-25]</sup>的研究较少,其可行性及相关机理尚待进一步探讨,因此针对尾矿库无土植被护坡力学加固效应的研究非常必要。

本文选取高羊茅、星星草和野牛草作为试验草种,通过开展不同植被护坡条件下的水力侵蚀室内试验,并与裸坡状态进行对比,分析了4种工况下尾矿库边坡的径流模数时变规律、侵蚀模数时变规律、入渗与植被截流率和植被全截流规律,优选出了最优护坡植被。此外,将优选出的最优护坡植被与铁尾矿砂按照一定比例进行混合后形成根-尾矿砂复合体,进行室内直剪试验,确定了提高根-尾矿砂复合体抗剪强度最佳含根量和根系最佳生长时间。本文成果对尾矿坝边坡生态环境的修复和可持续发展的研究有一定参考价值。

## 1 植被护坡情况下边坡水力侵蚀室内试验

### 1.1 试验准备

#### 1.1.1 材料选择

(1) 试验用尾矿砂取自辽宁开原铁矿,取铁尾矿砂原样,按照《土工试验方法标准》<sup>[26]</sup>进行试验,测得该尾矿砂相对密度为3.01、天然含水率为14.5%、干密度为1.73g/cm<sup>3</sup>,最大孔隙比为0.74、最小孔隙比为0.45,液限为34.1%,塑限为16.7%。经烘干筛分处理得到铁尾矿砂粒径级配曲线,如图1所示。经计算,不均匀系数 $C_u=12.93$ ,曲率系数 $C_c=0.48$ 。

取适量烘干的铁尾矿砂,使用MZ-100型制样粉磨机研磨,采用北京众合创业科技发展有限责任公司的ZHY401/601A型制样机制样,然后采用日本理学公司生产的D/MAX-2400型X光粉粒衍射仪(工作条件为:Cu K $\alpha$ 线),测定试样的XRD图谱,并判别矿物成分,分析结果见表1。

考虑到取样深度的限制和从现场取样、运输再到测定含水率过程中水分的损失,将试验用尾矿砂含水率提高到20%,根据铁尾矿砂的初始含水率,计算所需补水量,将所需补充水量均匀喷洒在铁尾矿砂上,搅拌均匀后装入桶中,密封存放24h。通过上述方法,可获得含水量分布均匀、含水量值达到控制要求的铁尾矿砂。

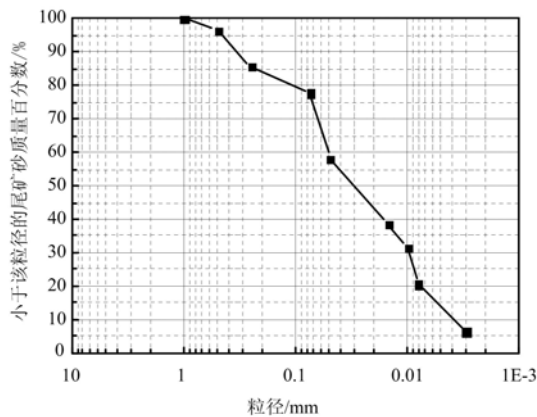


图1 粒径级配曲线

Fig. 1 Particle size grading curve

表1 尾矿砂矿物成分(ω/%)

Tab. 1 Iron tailings mineral composition (ω/%)

化学式	名称	含量/%
(K,Na) <sub>2</sub> (Fe,Mg) <sub>5</sub>	Merrihueite	5.5
SiO <sub>2</sub>	Quartz, syh	72
(K, H <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO	Illite-2M#1(伊利石)	15
CaSiO <sub>3</sub>	Wollastonite(钙硅石)	6.6

(2) 适生品种的筛选。主要是要筛选出耐瘠薄、耐酸性强、发芽率高、繁衍快、分蘖能力强、根系发达的品种。考虑到草种的实际适应性及尾矿库生态特征现场调研情况,试验草种选择高羊茅、星星草和野牛草,均按30g/m<sup>2</sup>进行播种;肥料选用普通草坪专用肥,按220g/m<sup>2</sup>进行施肥。

#### 1.1.2 试验仪器

侵蚀试验采用自主研发的模拟降雨条件下尾矿坝植被护坡系统。试验装置由降雨系统、监测系统、可变坡试验架和试验槽组成,降雨系统由降雨架、水泵、蠕动泵、马氏瓶、带孔管路、连通管路、储水仓、带

孔平板及若干个球针组成,监测系统包括尾矿砂回收箱、BNNS-10 型水土流失自动监测系统、QYLS-303 型薄层水流测速仪、雨量测量装置及计算机。试验架上可并排摆放三个试验槽,每个试验槽的尺寸都为长 1.5m,宽 0.8m,高 0.4m。

径流模数和侵蚀模数的时空变化过程可由水土流失自动监测系统实时监测。



图 2 模拟降雨条件下尾矿坝植被护坡系统

Fig. 2 Tailings dam vegetation slope protection system under simulated rainfall conditions



图 3 BNNS-10 型水土流失自动监测系统

Fig. 3 BNNS-10 soil erosion automatic monitoring system

### 1.1.3 试验方案

#### (1) 土槽装填及植被培育

通过分析铁尾矿砂的理化性质和实地考察,可知铁尾矿库可以直接种植植物。植草可参照如下方法:将尾矿砂缓慢填入槽内,填至距试验槽上边缘 0.3m,之后在尾矿砂上施肥,用于改善尾矿基质中养分低的情况,以使植被更好地生长。均匀施肥,使肥料均匀地分布在尾矿砂中。然后,按照 5cm 的行距和列距种植草种,将试验土槽置于室外,使植物更好地生长。

#### (2) 植被覆盖率测试

植被在试验槽的垂直投影面积与试验槽面积的百分比即为植被覆盖率。试验植被覆盖率共设置 5 个梯度:100%、75%、50%、25% 和 0%。在试验槽上方固定高分辨率数码相机,垂直于试验槽拍摄照片,处理图像确定各试验槽的植被覆盖率。然后换上新的试样,均匀地剪掉部分植被,测定植被覆盖率,直至满足设置梯度要求。

#### (3) 侵蚀试验

在不同覆盖率下进行高羊茅、星星草、野牛草和裸坡的侵蚀试验,共 20 种工况,试验分组如表 2 所示。试验坡度设置为 45 度,试验前先将试验槽固定于可变坡试验架上,然后用塑料布覆盖,启动降雨系统,将降雨强度调至 60mm/h,待降雨稳定后,揭开塑料布开始试验。水土流失自动监测系统可对径流和侵蚀进行自动监测和记录;尾矿砂回收箱采集的泥水经过沉淀、烘干后,称重并记录尾矿砂的质量。

### 1.2 试验结果与分析

试验选定的降雨强度为 60mm/h,属于强降雨,短时间内能在坡面能形成较大径流,故不需要考虑试验槽的尺寸效应<sup>[27]</sup>。

表 2 试验分组

Tab. 2 Experimental grouping

植被	覆盖率/%				
	0	25	50	75	100
高羊茅	A1	A2	A3	A4	A5
星星草	B1	B2	B3	B4	B5
野牛草	C1	C2	C3	C4	C5
裸坡	D1	D2	D3	D4	D5

1.2.1 边坡径流模数时变规律

径流模数是指单位时间内单位面积的径流量,反映坡面汇水产流的特性。试验结果如图 4~图 8 所示,可知不同工况下的径流产生时间和径流模数时变规律不同。

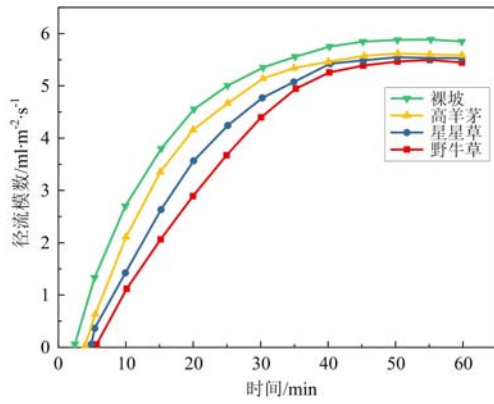


图 4 植被覆盖率 100%条件下径流模数时变规律

Fig. 4 Time-varying law of runoff modulus under 100% vegetation coverage

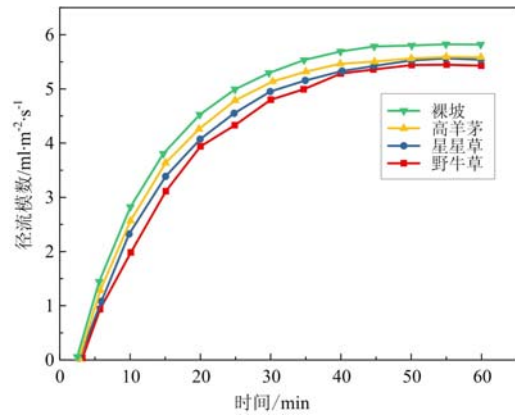


图 5 植被覆盖率 0%条件下径流模数时变规律

Fig. 5 Time-varying law of runoff modulus under 0% vegetation coverage

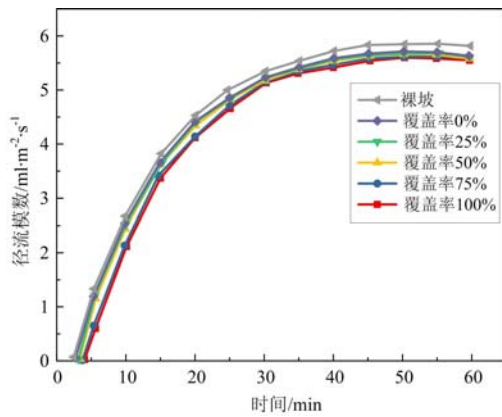


图 6 不同覆盖率条件下高羊茅径流模数时变规律

Fig. 6 Time-varying law of runoff modulus of Festuca arundinacea under different coverage conditions

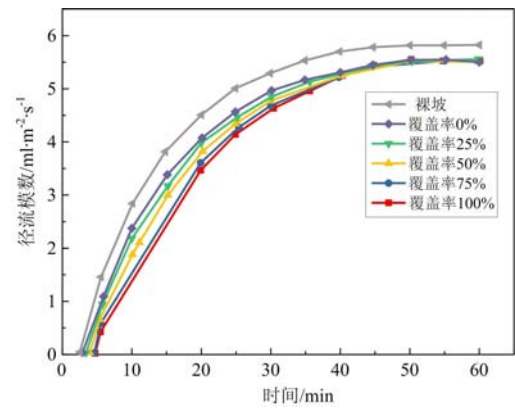


图 7 不同覆盖率条件下星星草径流模数时变规律

Fig. 7 Time-varying law of runoff modulus of Puccinellia tenuiflora under different coverage conditions

由图 4 可知,当覆盖率为 100%时,径流开始的时间:  $t(\text{裸坡}) < t(\text{高羊茅}) < t(\text{星星草}) < t(\text{野牛草})$  ( $<$ 表示早于),主要原因是单位面积植被质量: 裸坡  $<$  高羊茅  $<$  星星草  $<$  野牛草;径流增速: 裸坡  $>$  高羊茅  $>$  星星草  $>$  野牛草,相比之下,裸坡的径流增速比高羊茅、星星草和野牛草快得多,呈对数增长趋势。

由图 5 可知,当覆盖率为 0%时,种植高羊茅、星星草和野牛草的试验槽径流开始时间与裸坡的径流开始时间相接近;在相同植被覆盖率下,边坡的稳定径流模数: 裸坡  $>$  高羊茅  $>$  星星草  $>$  野牛草。由于根系具有涵养水分的作用,可能是单位体积含根量的差异导致了根系涵养水分的效果不同,

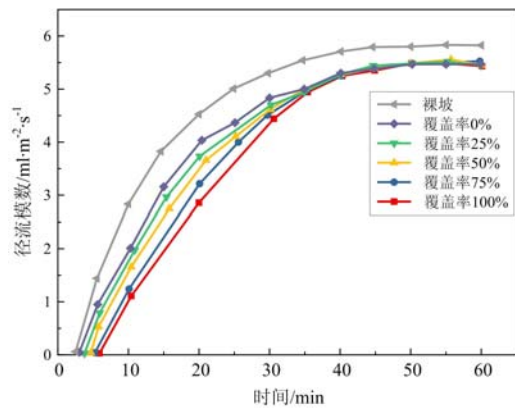


图 8 不同覆盖率条件下野牛草径流模数时变规律

Fig. 8 Time-varying law of runoff modulus of Buchloea dactyloides under different coverage conditions

在一定范围内单位体积含根量越大,根系涵养水分的作用越明显,稳定径流模数就越小。

各工况下的径流在 50min 左右趋于稳定,径流开始的时间随着植被覆盖率的增大而相应延后,植被覆盖率越大,径流开始越晚,通过对各工况进行比较可以得出结论:径流开始的时间: $t(\text{裸坡}) < t(\text{高羊茅}) < t(\text{星星草}) < t(\text{野牛草})$ ( $<$ 表示早于);径流增速:裸坡 $>$ 高羊茅 $>$ 星星草 $>$ 野牛草。

### 1.2.2 边坡侵蚀模数时变规律

侵蚀模数是指单位时间内单位面积的侵蚀量,反映坡面侵蚀强度特性。侵蚀试验结果如图 9~图 13 所示,由图可知不同工况下的侵蚀模数时变规律基本一致,侵蚀模数随着时间的推移,先增大再减小最后趋于稳定;但不同工况下的侵蚀开始时间和侵蚀量各不相同,侵蚀开始时间: $t(\text{裸坡}) < t(\text{高羊茅}) < t(\text{星星草}) < t(\text{野牛草})$ ( $<$ 表示早于),主要是因为侵蚀开始时间与径流产生时间是同步的,径流产生时间的差异导致侵蚀开始时间的不同;侵蚀量:裸坡 $>$ 高羊茅 $>$ 星星草 $>$ 野牛草,主要是单位面积植被质量的差异导致了根-尾矿砂复合体抗冲刷能力的不同,抗冲刷能力越强,侵蚀量越小。

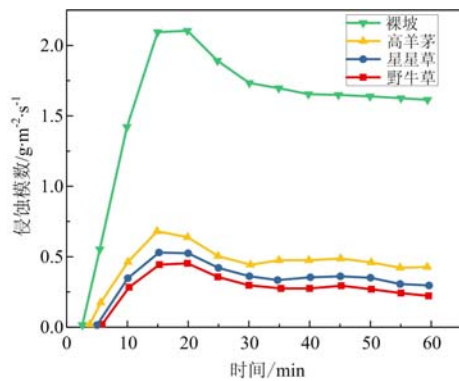


图 9 植被覆盖率 100%条件下侵蚀模数时变规律  
Fig. 9 Time-varying law of erosion modulus under 100% vegetation coverage

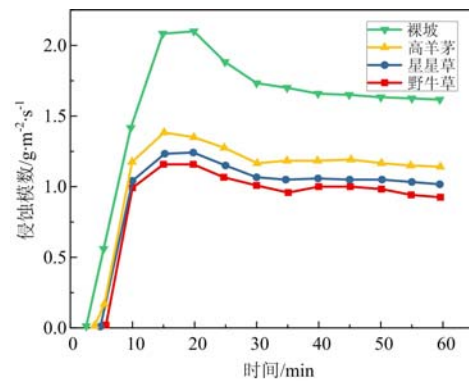


图 10 植被覆盖率 0%条件下侵蚀模数时变规律  
Fig. 10 Time-varying law of erosion modulus under 0% vegetation coverage

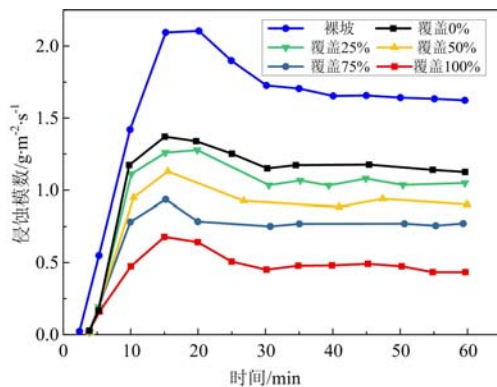


图 11 不同覆盖率条件下高羊茅侵蚀模数时变规律  
Fig. 11 Time-varying law of erosion modulus of Festuca arundinacea under different coverage conditions

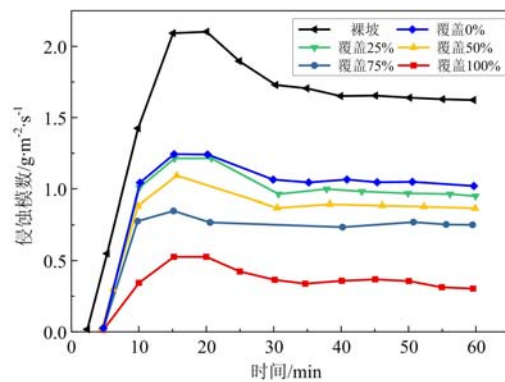


图 12 不同覆盖率条件下星星草侵蚀模数时变规律  
Fig. 12 Time-varying law of erosion modulus of Puccinellia tenuiflora under different coverage conditions

由图 9~10 可知,裸坡的侵蚀量远大于高羊茅、星星草和野牛草的侵蚀量;植被覆盖率越低,侵蚀量越大,当覆盖率为 0%时,种植高羊茅、星星草和野牛草的试验槽的侵蚀量仍然远小于裸坡的侵蚀量,约为裸坡侵蚀量的一半,主要是由于植被能够减弱降雨对坡面的侵蚀。试验结果说明:植被覆盖率越大,降雨对边坡的溅蚀作用越弱,边坡的抗侵蚀能力越强。

### 1.2.3 边坡入渗与植被截流率

将入渗和植被截流综合考虑,入渗和植被截流总量可以用试验槽授雨面积的降雨强度减去径流得到。入渗和植被截流率是指单位时间内单位面积的入渗和植被截流总量,反映坡面涵养水分的特性。

以覆盖率为 100% 和 0% 的两种情况为例,对入渗和植被截流率进行分析,试验结果如图 14 和图 15 所示。

由图 14 和图 15 可知,降雨开始的前几分钟没有径流,原因有两个,一是坡面不够平整,降雨将坡面的低洼处填平;二是入渗和植被截流。相同覆盖率下入渗和植被截流率:野牛草>星星草>高羊茅>裸坡,由于根系具有涵养水分的作用,可能是单位体积含根量的差异导致了根-尾矿砂复合体涵养水分的效果不同,在一定范围内单位体积含根量越大,涵养水分的作用越明显,入渗和植被截流率就越大。而对于同种植被,覆盖率为 100% 时的入渗和植被截流率比覆盖率为 0% 时的大,主要原因是覆盖率为 100% 时的单位面积植被质量大于覆盖率为 0% 时的单位面积植被质量,而单位面积植被质量越大,植被截流率就越大。

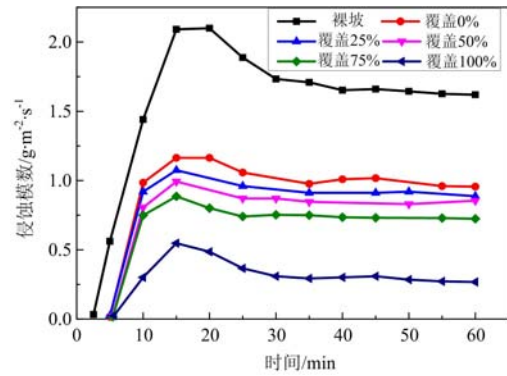


图 13 不同覆盖率条件下野牛草侵蚀模数时变规律  
Fig. 13 Time-varying law of erosion modulus of *Buchloe dactyloides* under different coverage conditions

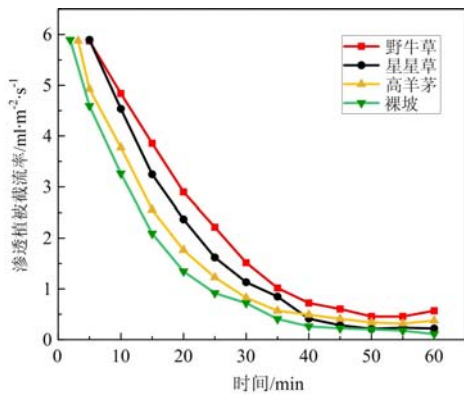


图 14 覆盖率为 100% 时的入渗和植被截流率  
Fig. 14 The rate of infiltration and vegetation interception at 100% coverage

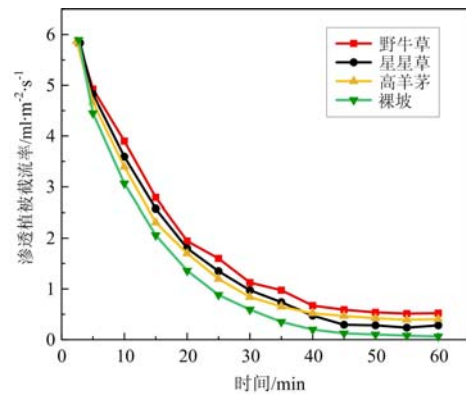


图 15 覆盖率为 0% 时的入渗和植被截流率  
Fig. 15 The rate of infiltration and vegetation interception at 0% coverage

### 1.2.4 不同工况下边坡植被全截流

植被全截流是指所有降雨全部被植被的枝叶截住,雨水没有渗透到土壤或者形成径流,只有当植被覆盖率为 100% 时才可能发生全截流。植被形态和植被密度是影响全截流时间的主要因素,全截流时间随单位面积上的植被体积密度的增大而增加。可通过对高羊茅、星星草、野牛草分别在 100% 的覆盖率与 0% 的覆盖率条件下径流发生时间进行对比,来确定植被的全截流时间,由图 6~图 8 可知,全截流时间:  $t(\text{高羊茅}) < t(\text{星星草}) < t(\text{野牛草})$ , 主要原因是坡面单位面积上的植被体积密度: 野牛草 > 星星草 > 高羊茅。

综合分析可知:野牛草耐瘠薄,分蘖能力强,长势旺盛,根系发达,具有较强的水土保持能力,在铁尾矿砂表面形成三维网状结构,有利于尾矿库边坡的稳定,是铁尾矿库无土植被护坡工程中的优选草种,而高羊茅和星星草的护坡能力明显弱于野牛草。植物的覆盖率和抗性是影响边坡生态防护效果的重要因素,植物的抗性强、长势好,覆盖率就好,植物茎叶削弱雨水对边坡尾矿砂侵蚀的效果更显著,同时植物的根系可以减缓径流,从而减弱雨水对坡面的冲刷。

## 2 根-尾矿砂复合体的室内直接剪切试验

边坡侵蚀过程主要是物理侵蚀过程,即径流冲刷破坏坡面的过程,而坡面的破坏过程是尾矿砂抗剪

能力丧失的过程。故抗剪能力越强,抗侵蚀能力越强。反映尾矿砂抗剪能力的指标是抗剪强度,尾矿砂抗剪强度指标是在受到外力(降雨冲刷、重力等)作用时,尾矿砂抗拒发生剪切破坏而脱离母体的一种强度指标性能<sup>[28]</sup>,因此,研究尾矿砂的抗剪强度很有必要。

通过对野牛草根系与铁尾矿砂按一定比例混合后的根-尾矿砂复合体进行室内直接剪切试验,研究在不同含根量和不同生长时间的情况下,野牛草根-尾矿砂复合体黏聚力和内摩擦角的变化规律,得到野牛草根系含量和生长时间对根-尾矿砂复合体抗剪强度的影响,进而得到野牛草根系含量和生长时间对根-尾矿砂复合体抗侵蚀能力的影响,并确定最佳含根量和最佳生长时间。



图 16 DSJ-2 电动四联等应变直剪仪  
Fig. 16 DSJ-2 Electric quadruple strain straight shear instrument

## 2.1 试验部分

### 2.1.1 材料及试验设备

材料:试验采用生长时间分别为 1 个月、2 个月、3 个月、4 个月和 5 个月的野牛草根;试验用尾矿砂与上文相同。

试验设备:采用北京航天华宇试验仪器有限公司生产的 DSJ-2 电动四联等应变直剪仪,如图 16 所示。该仪器最大垂直载荷为 400kPa,最大水平剪切力为 1.2 kN,压力分级为 100kPa、200kPa、300kPa、400 kPa,剪切速率为 0.02~2.4mm/min。

### 2.1.2 试验方法

将生长时间为 1 个月、2 个月、3 个月、4 个月、5 个月的野牛草根分别以 0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30% 的含量标准与天然条件下的尾矿砂均匀混合,然后利用直剪仪自带的环刀把混合好的尾矿砂加工成标准试样进行直剪试验,试验分组如表 3 所示,未添加野牛草根的组为 F 组。每组 4 个试样,分别在 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa 的垂直压力下进行直剪试验,试样如图 17 所示。



图 17 直剪试样  
Fig. 17 The Sample of straight shear test

表 3 试验分组  
Tab. 3 Experimental grouping

含根量/%	生长时间/月				
	1	2	3	4	5
0.10	A1	A2	A3	A4	A5
0.15	B1	B2	B3	B4	B5
0.20	C1	C2	C3	C4	C5
0.25	D1	D2	D3	D4	D5
0.30	E1	E2	E3	E4	E5

## 2.2 试验结果与分析

### 2.2.1 黏聚力

根-尾矿砂复合体的黏聚力与野牛草生长时间和含根量的关系如图 18 和图 19 所示。由图 18 可知,当含根量恒定时,根-尾矿砂复合体的黏聚力随着生长时间的推移先增大后减小,且均大于未掺加野牛草根时的黏聚力。不同含根量下的黏聚力在生长时间为 3 个月时均达到峰值,说明 3 个月是野牛草提高铁尾矿砂黏聚力的最佳生长时间。由图 19 可知,相同生长时间的条件下,根-尾矿砂复合体的黏聚力随着含根量的增加先增大后减小,且均大于未掺加野牛草根时的黏聚力。当根系生长时间为 3 个月、尾矿砂含根量为 0.20% 时,根-尾矿砂复合体的黏聚力达到最大值,约为 73kPa。综上所述,在本试验所设计的 5 种生长时间、5 种含根量的工况中,生长时间为 3 个月、含根量为 0.2% 的野牛草可以最大程度地提高铁尾矿砂的黏聚力。

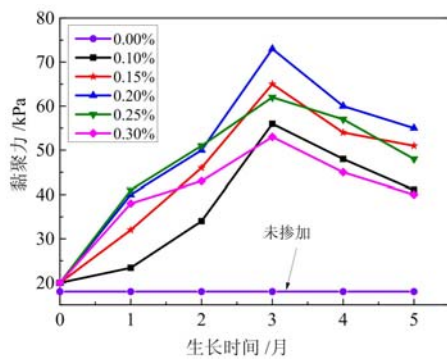


图 18 黏聚力与野牛草生长时间的关系  
Fig. 18 Relationship between cohesion and growth time of *Buchloe dactyloides*

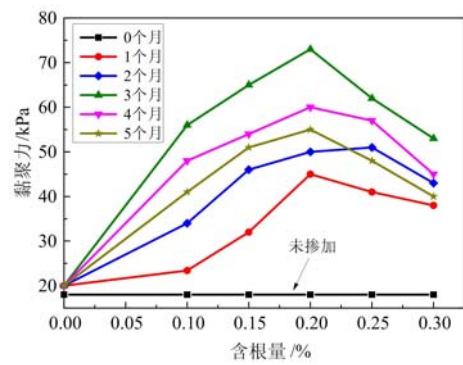


图 19 黏聚力与含根量的关系  
Fig. 19 Relationship between cohesion and root content

### 2.2.2 内摩擦角

根-尾矿砂复合体的内摩擦角与野牛草生长时间和含根量的关系如图 20 和图 21 所示。由图 20 和图 21 可知,不同生长时间和含根量工况下,根-尾矿砂复合体的内摩擦角与未掺野牛草根时的内摩擦角相差不大,说明根系生长时间和含根量不是影响尾矿砂内摩擦角的主要因素。

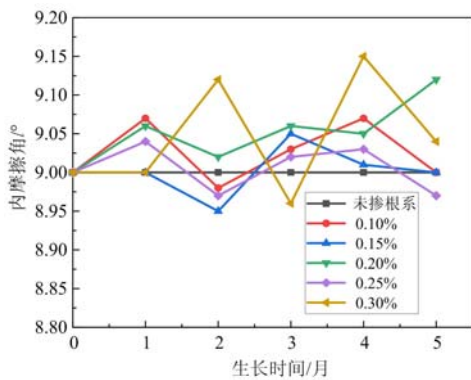


图 20 内摩擦角与生长时间的关系  
Fig. 20 Relationship between internal friction angle and growth time

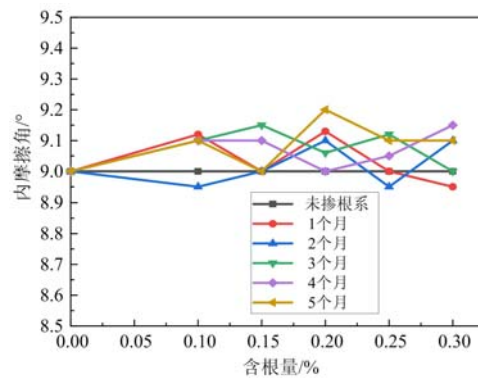


图 21 内摩擦角与含根量之间的关系  
Fig. 21 Relationship between internal friction angle and root content

综合分析,根系生长时间和含根量不是影响根-尾矿砂复合体内摩擦角的主要因素。而在本试验所设计的 5 种生长时间和 5 种含根量的工况中,3 个月的生长时间和 0.20% 的含根量为提高根-尾矿砂复合体黏聚力的最佳搭配,可以最大程度地提高尾矿砂的黏聚力,进而提高尾矿砂的抗剪强度。由于抗侵蚀能力与抗剪能力呈正相关性,故 3 个月的生长时间和 0.20% 的含根量为提高根-尾矿砂复合体抗侵蚀能力的最佳搭配,可以最大程度地提高尾矿砂的抗侵蚀能力。

## 3 结论

(1) 通过开展植被护坡情况下水力侵蚀室内试验研究,得到 4 种工况下径流产生时间: $t(\text{裸坡}) > t(\text{高羊茅}) > t(\text{星星草}) > t(\text{野牛草})$ ;径流增速:裸坡 > 高羊茅 > 星星草 > 野牛草。4 种工况下侵蚀开始时间: $t(\text{裸坡}) < t(\text{高羊茅}) < t(\text{星星草}) < t(\text{野牛草})$ ( $<$ 表示早于);侵蚀量:裸坡 > 高羊茅 > 星星草 > 野牛草,主要是由于单位面积植被质量的差异导致了根-尾矿砂复合体抗冲刷能力的不同,植被覆盖率越大,降雨对边坡的溅蚀作用越弱,边坡的抗冲刷能力越强,产砂量越小。

(2) 入渗和植被截流率:野牛草 > 星星草 > 高羊茅 > 裸坡,可能是由于单位体积含根量的差异导致根系涵养水分的效果不同,在一定范围内单位体积含根量越大,根系涵养水分的作用越明显,入渗和植



被截流率就越大。对于同种植被,覆盖率为100%时的入渗和植被截流率比覆盖率为0%时的大,主要是由于覆盖率越高,单位面积植被质量越大;单位体积含根量越大,根-尾矿砂复合体涵养水分的能力就越强。全截流时间: $t(\text{高羊茅}) < t(\text{星星草}) < t(\text{野牛草})$ ,主要原因是单位面积植被体积密度:野牛草>星星草>高羊茅。坡面单位面积的植被体积密度越大,植被的全截流时间越长。

(3) 野牛草是铁尾矿库无土植被护坡工程中的优选草种,野牛草根作为尾矿砂的加筋材料能够明显提高尾矿砂的黏聚力。当含根量恒定时,根-尾矿砂复合体的黏聚力随着生长时间的增大,先增大后减小,且均大于未掺加野牛草根时的黏聚力。在相同生长时间的条件下,根-尾矿砂复合体的黏聚力随着含根量的增加先增大后减小,且均大于未掺加野牛草根时的黏聚力。当生长时间为3个月、含根量为0.20%时,根-尾矿砂复合体的黏聚力达到最大值,约为73kPa。在本试验所设计的工况中,3个月的生长时间和0.20%的含根量为提高根-尾矿砂复合体黏聚力的最佳搭配,可以最大程度地提高铁尾矿砂的黏聚力。

(4) 野牛草根的添加对尾矿砂的内摩擦角影响很小,根系的生长时间和含根量并不是影响内摩擦角的主要因素,故3个月的生长时间和0.20%的含根量为提高根-尾矿砂复合体抗剪强度的最佳搭配,可以最大程度地提高铁尾矿砂的抗剪强度。由于抗侵蚀能力与抗剪能力呈正相关性,故3个月的生长时间和0.20%的含根量为提高根-尾矿砂复合体抗侵蚀能力的最佳搭配,可以最大程度地提高尾矿砂的抗侵蚀能力。

#### 参考文献:

- [1] Halim A, Normaniza O. The effects of plant density of *Melastoma malabathricum* on the erosion rate of slope soil at different slope orientations[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2015, 30(2):131-141.
- [2] Han Luo, Tingning Zhao, Mei Dong, et al. Field studies on the effects of three geotextiles on runoff and erosion of road slope in Beijing, China[J]. *Catena*, 2013, 109:150-156.
- [3] Rong Y, Liu J, Liu Q. Types of ecological revetments in hydraulic engineering[J]. *Journal of Landscape Research*, 2018, 10(2):1-4.
- [4] Ren Z, Li Z, Liu X, et al. Comparing watershed afforestation and natural revegetation impacts on soil moisture in the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):2972.
- [5] Schwarz M, Lehmann P, Or D. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes-from a bundle of roots to tree stands[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010, 35(3):354-367.
- [6] Thomas R E, Pollenbankhead N. Modeling root-reinforcement with a fiber-bundle model and Monte Carlo simulation[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(1):47-61.
- [7] Khan Y A, Lateh H. Plant root reinforcement against local failure mechanism of natural slope[M]. *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2*. Springer International Publishing, 2015:1275-1280.
- [8] Chok Y H, Jaksa M B, Kaggwa W S, et al. Assessing the influence of root reinforcement on slope stability by finite elements[J]. *International Journal of Geo-Engineering*, 2015, 6(1):1-13.
- [9] Veylon G, Ghestem M, Stokes A, et al. Quantification of mechanical and hydric components of soil reinforcement by plant roots[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(11):1839-1849.
- [10] Chok Y H, Jaksa M B, Kaggwa W S, et al. Assessing the influence of root reinforcement on slope stability by finite elements[J]. *International Journal of Geo-Engineering*, 2015, 6(1):1-13.
- [11] Askarinejad A, Springman S M. Centrifuge modelling of the effects of vegetation on the response of a silty sand slope subjected to rainfall[C]. *Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics*, 2015.
- [12] Schwarz M, Phillips C, Marden M, et al. Modelling of root reinforcement and erosion control by 'Veronese' poplar on pastoral hill country in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2016, 46(1):1-17.
- [13] 谢宝琮, 张向东, 杜常博. 不同含水率下尾矿与土工格栅界面特性的试验研究[J]. *实验力学*, 2018, 33(1):127-133 (XIE Baojin, ZHANG Xiangdong, DU Changbo. Experimental study of interface characteristics between geogrid and tailings with different water contents[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(1):127-133 (in Chinese))

- [14] 肖盛燮, 周辉, 凌天清. 边坡防护工程中植物根系的加固机制与能力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(s1):2670-2674 (XIAO Shengxie, ZHOU Hui, LING Tinaqing. Mechanism and ability analysis of plant root reinforcement in slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(s1):2670-2674 (in Chinese))
- [15] 戚国庆, 胡利文. 植被护坡机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11):2220-2225 (QI Guoqing, HU Liwen. Study on mechanism and application of slope protection with vegeiation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11):220-2225 (in Chinese))
- [16] 龙凤, 李绍才, 孙海龙, 等. 岩石边坡生态护坡效果评价指标体系及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(s1):3095-3101 (LONG Feng, LI Shaocai, SUN Hailong, et al. Evaluation indicator system for effect of eco-engineering for rock slope protection and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(s1):3095-3101 (in Chinese))
- [17] 封金财. 植物根系对边坡的加固作用模拟分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2005, 17(3):27-29 (FENG Jincai. Analogue analysis of roots' reinforcement to the slope stability[J]. Journal of Jiangsu Polytechnic University, 2005, 17(3):27-29 (in Chinese))
- [18] 刘杰. 柳杉根系加固边坡土壤的试验研究[J]. 路基工程, 2017(3):103-106 (LIU Jie. Experimental study on the soil of reinforced slope of cryptomeria fortunei root system[J]. Subgrade Engineering, 2017(3):103-106 (in Chinese))
- [19] 刘志勇, 肖明砾, 谭海燕, 等. 植被根系不同加固深度下边坡抗滑稳定性研究[J]. 施工技术, 2016(s1):867-870 (LIU Zhiyong, XIAO Mingshuo, TAN Haiyan, et al. The investigation of slope stabilization under different strengthened zone by plant root system [J]. Construction Technology, 2016(s1):867-870 (in Chinese))
- [20] 贺茜. 林草混交根系加固边坡的机理研究[D]. 中南林业科技大学, 2015 (HE Qian. Study on the mechanism of the tree grass mixture slope with root reinforcement[D]. Central South University of Forestry & Technology, 2015 (in Chinese))
- [21] 余能海, 周雷, 王国林. 不同植被根系对河堤岸坡加固效果[J]. 中国水能及电气化, 2017(9):40-43 (YU Nenghai, ZHOU Lei, WANG Guolin. Reinforcement effect of root system of different vegetation on river levee bank slope[J]. China Water Power & Electrification, 2017(9):40-43 (in Chinese))
- [22] 张俊云. 岩石边坡植被护坡系统的水分平衡及控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9):1729-1735 (ZHANG Junyun. Moisture balance and control of bio-slope-engineering system for rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9):1729-1735 (in Chinese))
- [23] 姚鑫. 植物根系对红粘土边坡的加固效应研究[D]. 合肥工业大学, 2017 (YAO Xin. Study on reinforcement effect of plant roots on red clay slope[D]. Hefei University of Technology, 2017 (in Chinese))
- [24] 过仕民. 杨山冲尾矿库无土植被及其效果[J]. 有色金属工程, 2004, 56(4):126-128 (GUO Shimin. Application of running microcell electrolysis technology to dyestuff wastewater treatment [J]. Nonferrous Metals, 2004, 56(4):126-128 (in Chinese))
- [25] 过仕民, 李冬. 尾矿库无土植被护坡工程技术研究[J]. 矿业快报, 2005, 21(10):23-27 (GUO Shimin. Research on landless vegetation slope protection engineering technology of tailing dam[J]. Xpress Information of Mining Industry, 2005, 21(10):23-27 (in Chinese))
- [26] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1999 (GB/T 50123-1999, Standard for soil test method[M]. Beijing: China Planning Press, 1999 (in Chinese))
- [27] Baker C.J. Some effects of cover, seed size, and soil moisture status on establishment of seedlings by direct drilling [J]. New Zealand journal of experimental agriculture, 1977, 5(1):47-53.
- [28] 夏艳华. 黄土抗侵蚀能力与抗剪强度的关系研究[D]. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2003 (XIA Yanhua. Study on the relationship between erosion resistance and shear strength of loess[D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics), 2003 (in Chinese))

## Analysis of reinforcement effect of soilless vegetation slope protection in iron tailings reservoir

KANG Pu<sup>1</sup>, JIN Jia-xu<sup>1</sup>, LIANG Bing<sup>2</sup>, ZHANG Ping-yi<sup>1</sup>, SUN Yang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110000, Liaoning, China)

**Abstract:** Hydraulic erosion indoor experiments are conducted by considering the soil erosion of the iron tailings pond and the restoration of the ecological environment of the reservoir area. The time-varying law of runoff modulus, the time-varying law of erosion modulus, the rate of total infiltration and vegetation interception and full interception of vegetation of the tailings pond slope are studied under the four working conditions of tall fescue, star grass, bison grass and bare slope. Based on the indoor direct shear test of root-tailing sand complex, the variation of cohesion and internal friction angle of buffalo root-tailing sand complex under different root contents and growth times are studied. Furthermore, the effects of root content and growth time of the buffalo grass on the erosion resistance of iron tailings sand are analyzed. The optimum root content and root growth time of the root-tailing sand shear strength and slope erosion resistance are determined. The results show that the buffalo grass is the preferred grass species in the soilless vegetation slope protection project of iron tailings reservoir. The buffalo grass root serving as the reinforcement material of iron tailings sand can dramatically improve the cohesive force of tailings sand and the slope erosion resistance. The cohesive force of root-tailing sand gradually increases and then decreases with the increase of root growth time and root content, which is always higher than that without buffalo grass. The optimal growth time of the buffalo grass is three months, and the optimal root amount is about 0.20%, which has little effect on the internal friction angle of iron tailings reservoir.

**Keywords:** environmental geotechnical engineering; iron tailings pond; preferred grass species; hydraulic erosion; shear strength