

DOI: 10.11779/CJGE2022S1006

边坡植被恢复中 MICP 表层矿化格构填土的水土保持 模型试验

刘诗雅¹, 刘家庆², 周成^{*1}, 王一冰¹, 陈群¹, 钟启明³

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029; 3. 南京水利科学研究院,
江苏 南京 210029)

摘要: 目前岩质边坡植被恢复常用格构内填土覆植的技术, 但普通填土容易发生水土流失, 因此开展了不同坡度、降雨强度、MICP 表层矿化程度及植被覆盖度影响下格构梁内填土的降雨冲刷模型试验, 探究利用微生物矿化填土表层进行创面植被恢复的可行性。研究结果表明: 坡度的增加会加剧坡面的侵蚀, 降雨强度的增加会导致填土破坏时间的提前。表层矿化作用提高坡面径流, 纯填土和表层矿化填土的平均径流率分别为 0.59 L/min 和 0.64 L/min, 且表层矿化后径流更稳定, 矿化作用通过加固表层土, 增强填土抗侵蚀力。与纯填土相比, 在降雨 55 min 后, 有植被覆盖减少了约 58%~72% 的坡土侵蚀量, 植被覆盖度越大坡面侵蚀模数越小, 表层矿化处理后减小了约 86% 的坡土侵蚀量, 表层矿化+植被作用减少了约 99% 的坡土侵蚀量, 矿化作用的抗冲刷效果优于植被作用。因此, 将矿化技术联合植被作用运用于边坡创面的植被恢复, 可有效降低坡面的侵蚀程度, 该方法抗冲刷效果显著, 具有一定的工程实用价值。

关键词: 边坡植被恢复; 格构填土; 微生物矿化; 降雨冲刷试验; 抗冲刷性能

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S1-0029-06

作者简介: 刘诗雅(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: liushiya641@163.com。

Experimental study on water and soil retention of slopes by MICP surface mineralization combined with vegetation

LIU Shi-ya¹, LIU Jia-qing², ZHOU Cheng¹, WANG Yi-bing¹, CHEN Qun¹, ZHONG Qi-ming³

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Guangxi New Development

Transportation Group Co., Ltd., Nanning 530029, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The ecological restoration is popular by means of grid beams on slopes with earth fill and plant. The rainfall erosion tests are carried out on the slope models with different slope gradients, rainfall intensities, microbial mineralizations and vegetation coverages, so that the feasibility is explored by using the microbial mineralization and vegetation restoration on slope surface. The results show that the increase of the slope gradient will aggravate erosion of the filled soil, and the increase of the rainfall intensity will lead to the advance of the failure time. The surface mineralization can improve slope runoff, and the average runoff rate of pure soil and surface mineralized soil is 0.59 L/min and 0.64 L/min, respectively, and the runoff after the surface mineralization is more stable. The mineralization enhances erosion resistance of the soil by strengthening the loose soil particles on the slope. The larger the vegetation coverage is, the smaller the slope erosion modulus is. Compared with that of the pure soil, the erosion of the improved slope soil is reduced by 58%~72% with vegetation coverage, and 86% after the surface mineralization, and 99% under the surface mineralization plus vegetation. The soil conservation effect of the mineralization is better than that with the vegetation only. The rehabilitation effect in the ecological restoration of slopes is remarkable by use of the soil surface mineralization combined with the vegetation, which is of certain practical engineering values.

Key words: vegetation restoration of slope; earth fill in lattice; microbial mineralization; rain erosion test; erosion resistance

0 引言

岩坡创面生态环境脆弱, 边坡创面植被修复技术应运而生^[1-2]。在工程建设中会产生大量弃土, 可被用作边坡格构内植被恢复的基质从而达到植被恢复的目

基金项目: 国家自然科学基金/联合基金项目(U22A20602, 41977239);
2020年度第三批广西交通运输行业重点科技项目(XFZ-KY-LYH-20200112); 四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目(2019YFH0076)

收稿日期: 2022-09-28

*通信作者 (E-mail: czhou@scu.edu.cn)

的^[3]。但是格构内填土在降雨冲刷作用下水土流失严重，因此需要进行填土的加固。

格构内填土可以通过碾压、水泥固化、注浆等方式进行加固，本文选择微生物矿化技术进行填土加固。微生物矿化技术，又称 MICP 技术，作为一种新型的环保固土技术，利用能发挥矿化作用的微生物，诱导生成具有黏结能力且难以溶解的碳酸钙结晶，填充土颗粒间的孔隙并黏结松散土体颗粒，有效增强了土体的力学强度、抗渗能力和抗冲蚀性^[4-5]。李驰等^[6]提出利用微生物矿化技术固化沙漠表层风沙土，防止风沙土流动。Maleki 等^[7]将微生物矿化反应液均匀喷洒在沙质土壤表层，发现经 MICP 作用形成的团聚体结构可以显著降低土壤侵蚀量。

本文拟基于课题组提出的边坡格构内填土进行蓄水型植被恢复的发明专利新技术^[8]开展研究。将工程弃土再利用作为边坡创面格构内的填土基质，采用坡面喷洒的方式对格构内填土表层进行微生物矿化加固，然后在预留孔中种植植株进行边坡创面的植被恢复（见图 1）。该技术中矿化的土层具有较好的抗雨水冲刷能力，能减少坡面侵蚀，同时植株孔的坡面积水漏斗效应也能消纳坡面径流，提高填土层的持水能力。

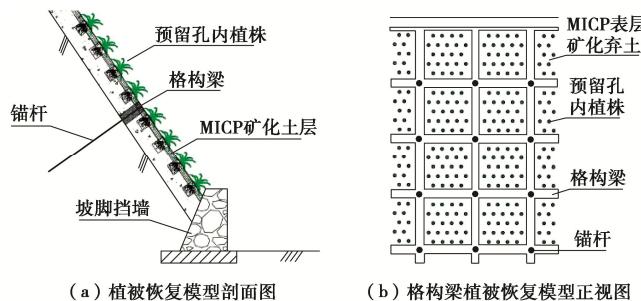


图 1 微生物矿化边坡格构内填土进行蓄水型植被恢复

Fig. 1 Vegetation restoration with water-storage in microbial-mineralized soil in rocky slope lattice

为探究边坡创面植被恢复工程中填土生态修复层在降雨条件下的抗冲刷性能，本文取一个边坡格构内填土为研究对象，设计并开展了在不同坡度、降雨强度、MICP 表层矿化程度及植被覆盖度影响下填土的降雨冲刷模型试验。通过收集降雨过程中坡面径流和侵蚀数据，探究坡度和雨强对填土生态层侵蚀破坏的影响；在固定坡度和降雨强度条件下，进行不同植被覆盖度和有无矿化处理的填土层坡面降雨冲刷模型试验，探究微生物矿化和植被作用在填土生态层中发挥的水土保持能力。

1 模型试验整体方案设计

1.1 试验方案设计

在考虑坡度、降雨强度、植被覆盖度和表层矿化等因素影响下，设计 4 类坡面降雨模型，试验方案如

表 1 所示，植被覆盖度设计如图 2 所示。

表 1 坡面降雨试验方案设计

Table 1 Design of slope rainfall test schemes

方案 编号	试验变量			
	坡度 (°)	降雨强度 (mm·min ⁻¹)	植被覆盖度	有无矿化
S-G ₁	40			
S-G ₂	50	3.72	无植被覆盖	无矿化处理
S-G ₃	60			
S-R ₁		3.72		
S-R ₂	60	4.46	无植被覆盖	无矿化处理
S-R ₃		5.57		
S-P ₀			无植被覆盖	
S-P ₁	50	3.72	植被覆盖度 1	无矿化处理
S-P ₂			植被覆盖度 2	
S-M			无植被覆盖	表层矿化
S-M+P ₁	50	3.72	植被覆盖度 1	(矿化深度
S-M+P ₂			植被覆盖度 2	3 cm)

注：P₀、P₁、P₂ 分别代表无植被、植被覆盖度 1、植被覆盖度 2 条件下的填土层；M、M+P₁、M+P₂ 分别代表无植被、植被覆盖度 1、植被覆盖度 2 条件下的表层矿化土层。

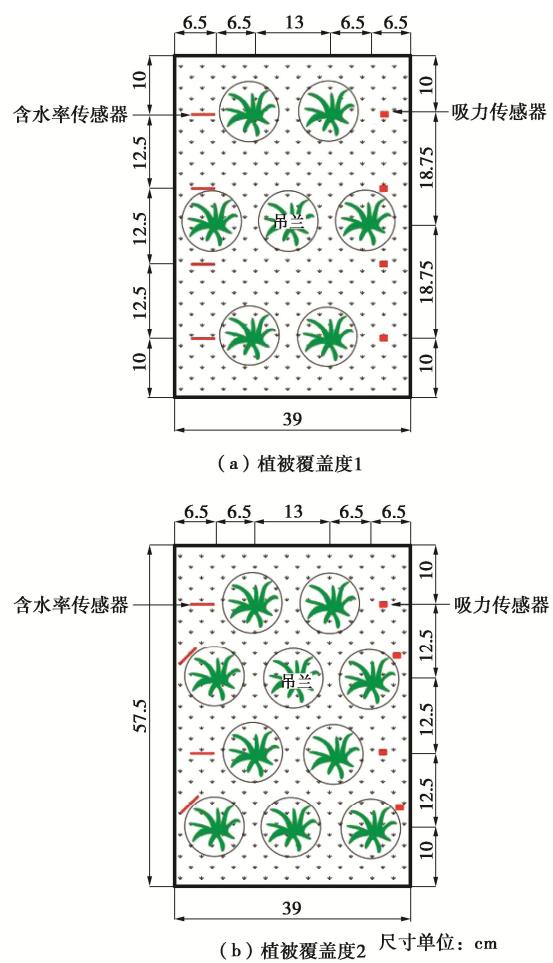


图 2 模型植被覆盖度设计

Fig. 2 Vegetation coverage design of model tests

1.2 试验模型及数据采集系统

坡面降雨模型试验装置主要由模型台、模型箱、降雨系统、水力特性监测系统和径流收集装置共五部分组成，如图 3 所示，用以模拟 3 m×2 m 实际边坡

格构梁。通过改变试验模型箱的倾斜程度控制坡度。水力特性监测系统包括含水率传感器和吸力传感器, 沿坡面两侧不同位置布设。降雨系统采用喷头式降雨系统, 通过旋转降雨喷头可以控制降雨雾化效果和有效降雨面积, 通过改变阀门开度控制试验过程中的降雨强度大小。降雨强度的大小通过量程为 0~100 L/h 的 LZS-15 型浮子流量计读取, 降雨强度控制在 3.72~5.57 mm/min。每隔 5 min 收集一次坡面径流数据, 将收集到的雨水和泥沙静置 24 h 后分离, 用烘干法测定径流产生的泥沙数据。

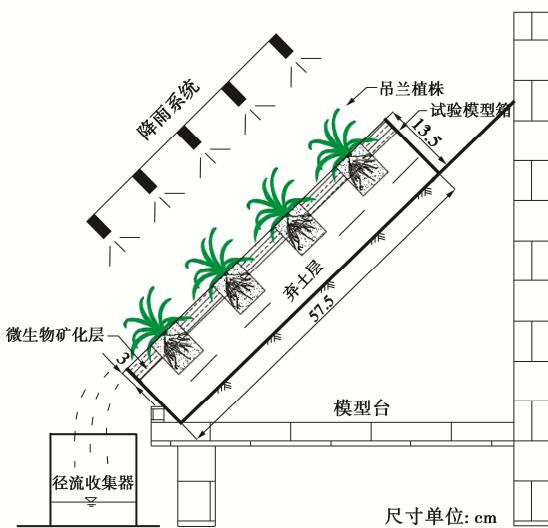


图 3 坡面降雨试验模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of slope rainfall test model

1.3 试验过程

(1) 模型填筑。模型的填筑干密度和制样含水率分别为 1.4 g/cm^3 , 8%。分两层进行填筑, 层厚分别为 6.5, 7.0 cm。

(2) 表层矿化。模型中填土层厚 13.5 cm, 表层矿化深度为 3 cm, 矿化反应液的浓度配比分别为菌液浓度 100%、尿素浓度 0.75 mol/L、氯化钙浓度 0.5 mol/L, 矿化方式为间歇式喷洒。

(3) 植株种植。完成矿化后在模型的预留植被种植孔内种植吊兰, 植被种植孔直径 6 cm, 深 7 cm。吊兰叶片数量控制在 12~15 片, 叶长为 15~20 cm。

(4) 传感器埋设。埋设吸力和含水率传感器, 传感器埋深 6.5 cm。对于纯填土层, 距模型底部 10, 29, 48 cm 位置分别布设 3 处测点。对于考虑植被作用的模型, 距模型底部 10, 22.5, 35, 47.5 cm 位置分别布设四处测点。

2 试验结果与分析

2.1 降雨条件下坡面水土保持及坡面侵蚀变化规律

通过径流收集器收集雨水径流量, 除以收集时间得到径流率, 如图 4 所示。分析径流率随时间的变化规律可以发现, 降雨初期径流率随降雨历时的增加而增大, 这是因为开始降雨时大部分雨水渗入填土层, 导致径流率较小。随着填土表层逐渐饱和, 坡面径流开始增大。此后坡面在雨滴溅蚀和坡面流作用下土体结构发生破坏, 并伴随片蚀和细沟发育, 进一步改变坡土雨水入渗情况, 同时影响坡面径流, 因此径流率随时间也产生一定波动。

对比不同坡度和降雨强度下坡面径流率数据可以发现, 坡度 40° , 50° , 60° 下平均径流率分别为 0.58, 0.59, 0.65 L/min, 雨强 3.72, 4.46, 5.57 mm/min 下平均径流率分别为 0.65, 0.7, 0.9 L/min, 降雨强度对径流率的影响大于坡度的影响, 如图 4 (a), (b) 所示。

对比有无矿化土层径流率数据发现, 进行矿化处理后土层的径流率得到提高, 在降雨 5 min 时, 填土层径流率为 0.42 L/mm, 而矿化土层径流率达 0.6 L/min; 在降雨结束后, 填土层和矿化土层的平均径流率分别为 0.59, 0.64 L/min, 如图 4 (c), (d) 所示。

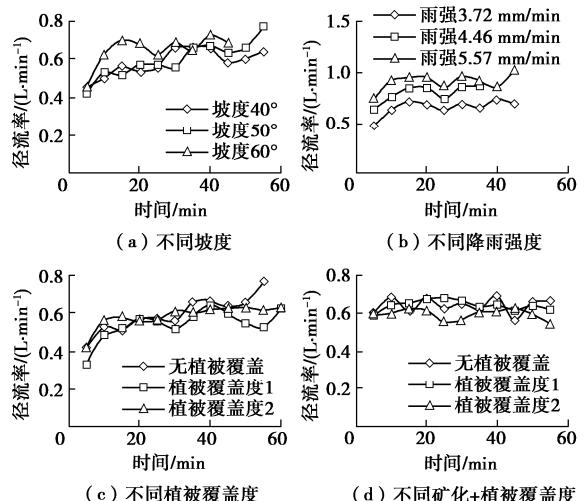


图 4 坡面降雨过程中径流率随时间的变化

Fig. 4 Change of runoff rate with time in slope rainfall process

与纯填土相比, 在降雨过程中矿化土层径流率更稳定, 整体波动较小。植被对坡面径流率的影响较小, 这是因为一方面植被茎叶发挥降雨截流作用, 减少雨水入渗, 另一方面植株种植孔又加速蓄纳坡面径流。

利用烘干法测定被剥蚀并发生流失的土壤侵蚀量, 除以降雨时间和弃土层正视面积, 得到侵蚀模数。由图 5 (a) 可知, 在坡度 40° 条件下, 坡面侵蚀发展较为稳定, 侵蚀模数随降雨历时的增加而逐渐减小; 而随着坡度的增加 (坡度 50° 和 60°), 坡面侵蚀程度加剧, 且侵蚀模数随时间产生不稳定波动。其中坡

度 50° 时土层在降雨约 45 min 后坡脚土体垮塌, 侵蚀模数产生大幅增长; 坡度 60° 时土层在降雨约 45 min 后发生整体破坏。在降雨过程中, 随着坡度的增加, 填土层更易发生破坏。

观察图 5 (b) 发现, 随着降雨强度的增加, 侵蚀模数呈现明显上升趋势, 在降雨初期表现得尤为明显, 如在降雨 5 min 后, 雨强 4.46 mm/min 和 5.57 mm/min 的侵蚀模数分别较雨强 3.72 mm/min 增加了约 77% 和 206%。降雨中后期, 由于坡面侵蚀冲沟发展的差异性, 侵蚀模数表现出一定波动, 但雨强 4.46 mm/min 和 5.57 mm/min 的侵蚀模数大于雨强 3.72 mm/min 。

观察图 5 (c) 可以看出, 有植被土层较纯填土层减小了约 53% 的平均侵蚀模数, 且侵蚀模数波动更小, 说明植被能发挥抑制雨水侵蚀、提高坡面稳定性的作用。进一步对比不同植被覆盖度下侵蚀数据, 在降雨前期, 植被覆盖度的增加提高了土体侵蚀模数, 说明植被布置过密易在移栽过程中造成土体扰动, 增加表层不稳定浮土降雨冲蚀流失的风险, 如图 5 (d) 所示。

观察图 5 (e), (f) 发现, 与纯填土层相比, 仅考虑矿化作用时平均侵蚀模数减小了约 76%, 矿化作用联合植被作用时平均侵蚀模数减小了约 98%, 且植被覆盖度越大坡面侵蚀模数越小。

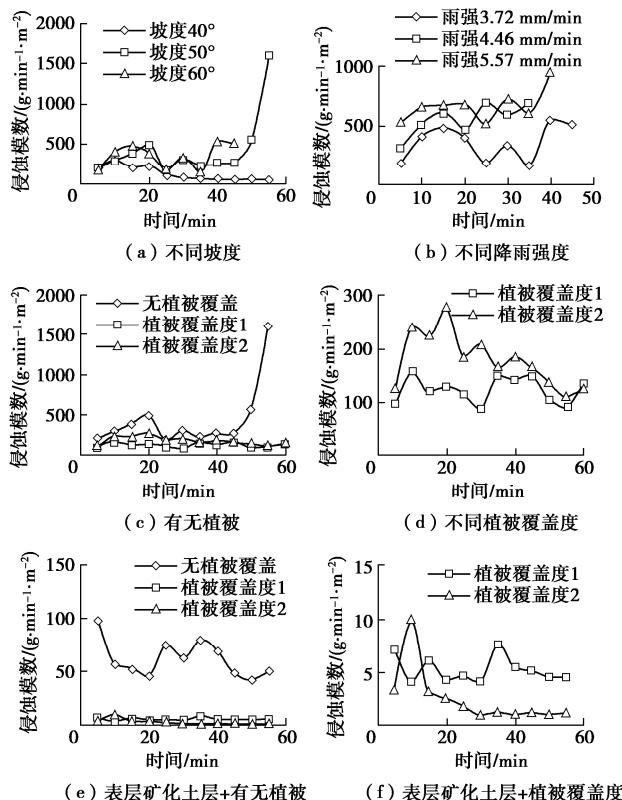


图 5 坡面降雨过程中侵蚀模数随时间的变化

Fig. 5 Change of erosion modulus with time during rainfall on slope

对比不同坡度下土体累计侵蚀量数据发现, 50° 为填土层临界侵蚀坡度, 当坡度小于 50° 时, 累计侵蚀量随坡度的增加而增大; 当坡度大于 50° 时, 坡度不再明显影响坡面侵蚀量, 但会增加填土破坏风险, 如图 6 (a) 所示。

对比不同降雨强度下坡土累计侵蚀量数据发现, 累计侵蚀量随雨强的增大而增大, 在大雨强作用下土层短时间内均发生了破坏, 如图 6 (b) 所示。

植被和矿化作用对填土累计侵蚀量的影响依次为: 矿化联合植被作用 > 矿化作用 > 植被作用, 如图 6 (c), (d) 所示。

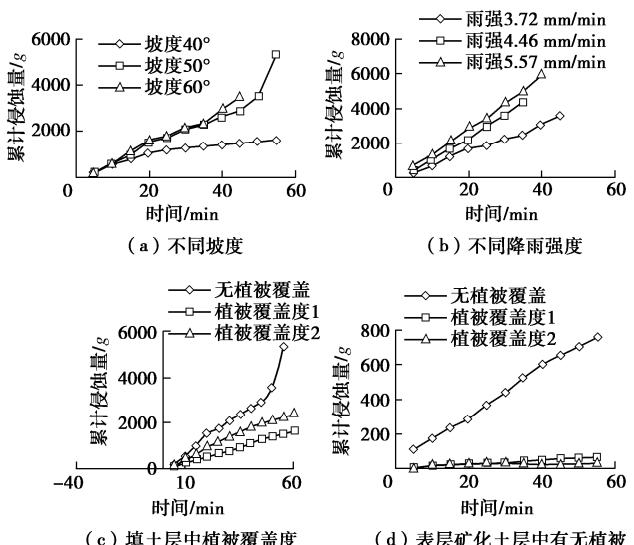


图 6 坡面降雨过程中累计侵蚀量随时间的变化

Fig. 6 Change of cumulative erosion over time during rainfall on slope

同时, 矿化作用能加固填土表层浮土, 抵消植被布置过密施工带来的扰动影响, 更有效发挥植被的积极作用。最后将有无表层矿化及不同植被覆盖度下的填土生态层坡面径流和侵蚀数据汇总至图 7 中, 以便更直观展示矿化及植被作用对边坡格构内填土水土保持的影响。数据显示, 进行表层矿化后填土层坡面径流量提高、侵蚀率降低, 其中表层矿化+植被覆盖度 2 ($M+P2$) 条件下的填土生态层抗侵蚀能力最强。

2.2 降雨过程中填土层含水率变化情况

图 8 展示了坡度和降雨强度对填土水分变化的影响。以 40° 边坡 (图 8 (a)) 为例, 分析模型坡面不同位置处水分变化情况, 模型底、中、顶土体含水率分别在降雨约 20, 25, 30 min 后开始响应, 并在含水率响应约 20 min 后基本达到饱和状态。

40° , 60° 填土层模型底部土体含水率分别在降雨约 20, 10 min 后开始响应, 说明随着坡度的增加, 模型底部土体含水率响应时间提前, 土体在雨水作用下强度逐渐丧失, 更易发生水土流失破坏。

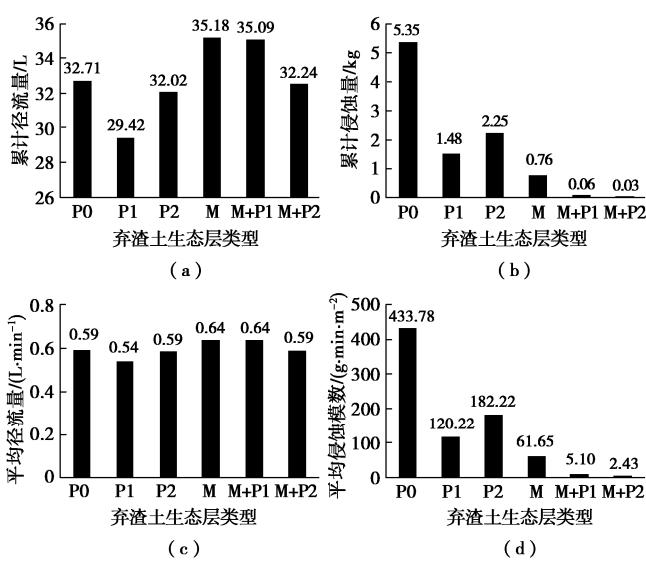


图 7 填土各种表层的坡面径流及侵蚀数据对比 (坡度 50°、降雨强度 3.72 mm/min)

Fig. 7 Comparison of runoff and erosion data on different surface layers of fill (slope 50°, rainfall intensity 3.72 mm/min)

对于不同降雨强度的填土层, 以降雨强度 5.57 mm/min 为例分析不同位置处含水率变化情况。观察图 8 (d) 可知, 各测点含水率变化经历了初始平稳期、上升期和最终稳定期, 其中模型顶部和中部土体含水率在降雨约 15 min 后开始上升, 于降雨约 25 min 后土体接近饱和状态; 模型底部土体含水率则在降雨约 10 min 后开始增加, 在降雨约 20 min 后含水率值基本稳定, 但未达到饱和状态。总的来看, 降雨强度 5.57 mm/min 土体含水率先达到稳定状态, 因此也较快发生水土流失破坏。

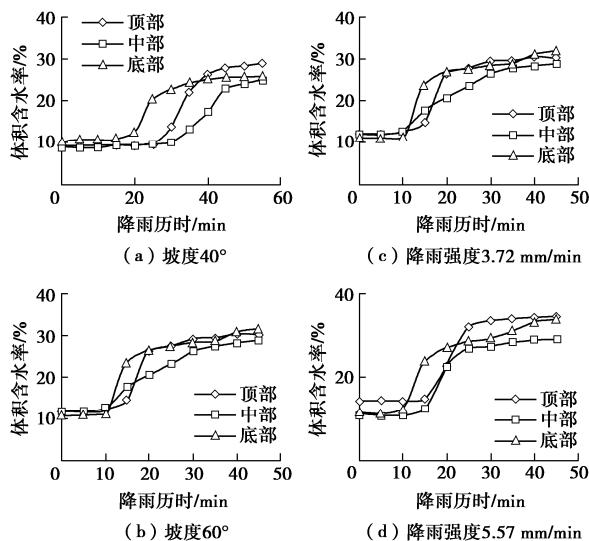


图 8 坡度和降雨强度对填土层含水率变化的影响

Fig. 8 Effects of slope gradient and rainfall intensity on water content of soil

观测图 9 可以发现, 由于对表层填土进行了微生物矿化处理, 反应液的下渗增加了土体含水率, 导致

矿化土层含水率较填土层提高了约 10%。与纯填土层相比, 进行矿化处理后填土的入渗能力降低, 底部土体含水率响应时间延后了约 15 min。对比有无植被的表层矿化土层可以发现, 植株根系的促渗作用强于茎叶截流作用, 如植被覆盖度 2 的土层在降雨约 25 min 后土体含水率开始增加, 较无植被土层含水率响应时间提前了约 5 min。

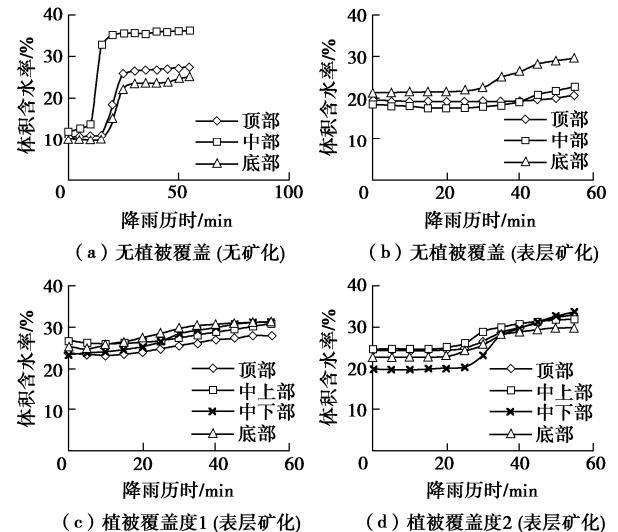


图 9 填土层和表层矿化土层含水率随降雨历时的变化

Fig. 9 Change of water content of soil layer and surface mineralized soil layer with rainfall duration

2.3 降雨过程中吸力变化情况

利用降雨过程中采集到的吸力变化数据绘制图 10 (a), (b)。在降雨强度 3.72 mm/min 条件下, 坡度 50° 时填土层在降雨 55 min 后模型底部附近土体基质吸力由 72.7 kPa 降至 10.9 kPa; 坡度 60° 时填土层在降雨约 25 min 后, 深度 6.5 cm 范围内土体基质吸力基本全部丧失, 于降雨 45 min 后发生水土流失破坏。

由图 10 (c), (d) 知, 在 60° 坡度条件下, 降雨强度为 3.72 mm/min 时土体基质吸力在降雨约 25 min 后基本丧失; 降雨强度 5.57 mm/min 时, 模型底部、中部、顶部土体吸力在约 20, 25, 35 min 后基本丧失, 填土层在降雨约 45 min 后发生水土流失破坏。

图 10 (e), (f) 为植被覆盖度 2 条件下, 有无表层矿化的填土层吸力变化情况。植被填土层吸力在降雨约 30 min 后开始减小, 与含水率变化时间相比延后了约 5 min, 体现出吸力变化的滞后性。而表层矿化+植被填土层在模型中部位置和底部的吸力与含水率均在降雨约 25 min 后开始响应, 顶部土体吸力在降雨约 40 min 后开始响应。无论是填土层还是表层矿化土层, 在降雨约 45 min 后, 中部土体吸力均产生大幅下降, 表明在高植被覆盖度情况下, 由于植被孔蓄水作用, 大部分雨水通过植被土下渗至填土深处。

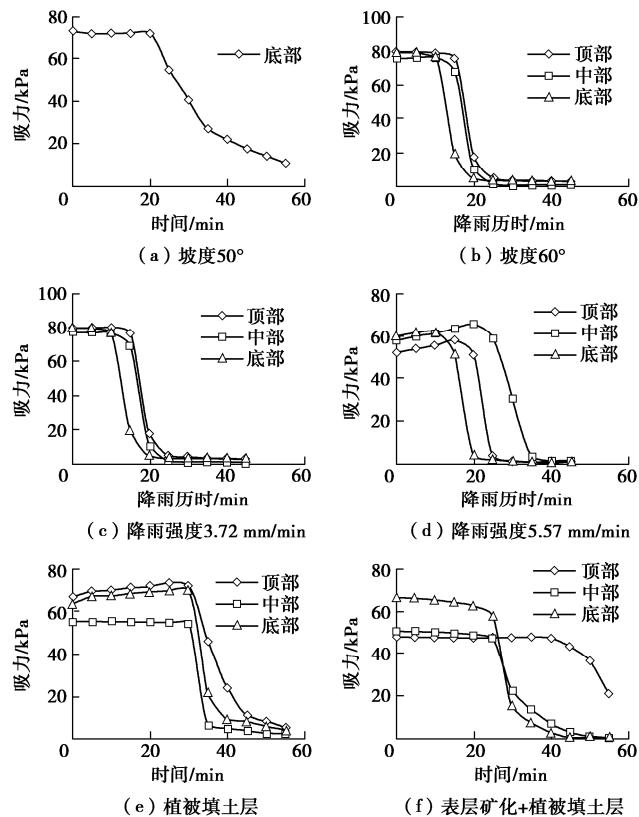


图 10 坡面降雨过程中吸力随时间的变化

Fig. 10 Change of suction over time during rainfall

3 结 论

(1) 坡度的增加会加剧坡面的侵蚀, 填土层越容易发生水土流失破坏; 降雨强度的增加会导致填土层破坏的时间提前, 对侵蚀形态影响越大。

(2) 降雨强度对坡面径流的影响最大。矿化作用提高了径流量, 填土层和矿化土层的平均径流率为 0.59 L/min 和 0.64 L/min, 表层矿化后径流更稳定。

(3) 矿化作用能加固坡面松散土颗粒, 增强坡土抗侵蚀力, 且植被覆盖度越大坡面侵蚀越小。植被和矿化作用发挥的坡面保土效果依次为: 矿化+植被作用>矿化作用>植被作用。与纯填土层相比, 在降雨 55 min 后, 植被作用减少了约 58%~72% 的坡土侵蚀量, 表层矿化作用减小了约 86% 的坡土侵蚀量, 表层矿化联合植被作用减少了约 99% 的坡土侵蚀量。

(4) 表层矿化联合植被作用时, 植株孔发挥蓄水作用, 将矿化技术联合植被作用运用于边坡创面植被恢复中, 一方面, 填土层经表层矿化后抗冲蚀力增强, 坡面侵蚀程度降低, 坡土流失量减少, 在降雨过程中水土保持效果显著; 另一方面, 通过预留孔的方式种植植株能提供雨水入渗通道, 保证较深处土体的水分供给, 满足植株生长。

参考文献:

- [1] 余海龙, 顾卫, 李哲峰. 我国工程创面生态恢复中存在的问题及研究展望[J]. 中国水土保持, 2010(4): 29~31. (YU Hai-long, GU Wei, LI Zhe-feng. Problems and research prospects of ecological restoration of engineering wounds in China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2010(4): 29~31. (in Chinese))
- [2] 张俊云, 周德培, 李绍才. 高速公路岩石边坡绿化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1400~1403. (ZHANG Jun-yun, ZHOU De-pei, LI Shao-cai. Study on greening method for rock slope in highway project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1400~1403. (in Chinese))
- [3] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (ZHOU De-pei, ZHANG Jun-yun. Vegetation Slope Protection Engineering Technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [4] MIFTAH A, KHODADADI TIRKOLAEI H, BILSEL H. Bio-precipitation of CaCO₃ for soil improvement: a review[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 800(1): 012037.
- [5] JIANG N J, SOGA K. Erosional behavior of gravel-sand mixtures stabilized by microbially induced calcite precipitation (MICP)[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(3): 699~709.
- [6] 李驰, 刘世慧, 周团结, 等. 微生物矿化风沙土强度及孔隙特性的试验研究[J]. 力学与实践, 2017, 39(2): 165~171, 184. (LI Chi, LIU Shi-hui, ZHOU Tuan-jie, et al. The strength and porosity properties of micp-treated aeolian sandy soil[J]. Mechanics in Engineering, 2017, 39(2): 165~171, 184. (in Chinese))
- [7] MALEKI M, EBRAHIMI S, ASADZADEH F, et al. Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2016, 13(3): 937~944.
- [8] 周成, 丁建彤, 陈群, 等. 蓄排水管联合多功能汲水加筋带的框格式植被水泥土护坡方法及设施: CN110219310B[P]. 2020-08-21. (ZHOU Cheng, DING Jian-tong, CHEN Qun, et al. Lattice-Type Vegetation Cement Soil Slope Protection Method and Facility Employing Combination of Water Storage and Drainage Pipes and Multifunctional Water Drawing Reinforced Belts: CN110219310B[P]. 2020-08-21. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)