植物与微生物诱导碳酸钙沉淀协同作用下边坡土壤侵蚀试验与模型研究

陈雅茹[1], 夏传安[1,2], 王 浩[1,2], 陈 垚[3], 王重卿[3], 李 熙[3]

(1.福州大学 紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108; 2.福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350002; 3.国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘 要: [目的]分析植物与微生物诱导碳酸钙沉淀(microbial-induced calcium carbonate precipitation, MICP)协同作用,揭示植物与MICP联合方法的护坡有效性及其对水文与土壤侵蚀过程的影响,为斜坡土壤侵蚀防治提供新思路与新技术。[方法]开展5组试验,包括裸土对照组(CK)、MICP处理组(MR)以及3种植物(高羊茅FA、紫花苜蓿MS、香根草CZ)分别与MICP协同防护试验组(FA-MC, MS-MC和CZ-MC)。基于地表-地下水耦合过程,构建了土壤侵蚀数值模型,用以定量分析不同护坡设计下的土壤侵蚀率。通过直剪试验、显微镜观测与扫描电镜等技术综合分析黏聚力(c)与内摩擦角(φ)的变化规律与机理。[结果]①MICP作用下土壤孔隙填充片状、团絮状的$CaCO_3$沉积物,有效胶结松散土颗粒,提升c值;减少孔隙度与提升粗糙度,使φ值升高;在植物与MICP协同作用下,c与φ均进一步提升,相对于CK组最高分别提升了402.81%和33.91%;②数值模型能较好地模拟五组试验的径流量与土壤侵蚀速率[平均绝对误差最高值分别为2.39×10^{-4} m/s和1.77×10^{-2} g/(m^2·s)],为分析植物与MICP协同作用下的水文与土壤侵蚀过程提供工具;③植物与MICP协同作用既可显著提升土体强度,也能改善土壤渗透性和保水性能,同时在植物截流消能、蓄水绕流、径流拦挡等多重减蚀作用下,发挥强化、保水和减蚀的综合功效。[结论]通过植物与MICP协同作用,改善土壤性质和削弱雨滴对坡面的溅蚀和冲蚀作用,从而调节土壤侵蚀过程。构建的数值模型可作为土壤侵蚀研究过程中分析不同护坡设计下水土保持效果的有效工具。

关键词: 土壤侵蚀; 植物护坡; MICP护坡; 数值模型

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0333-12 **中图分类号:** S157.2, S171.4, X43

文献参数: 陈雅茹, 夏传安, 王浩, 等.植物与微生物诱导碳酸钙沉淀协同作用下边坡土壤侵蚀试验与模型研究[J].水土保持通报,2026,46(4):333-344. Chen Yaru, Xia Chuanan, Wang Hao, et al. Experimental and modeling study on slope soil erosion under synergistic effects of plants and microbial-induced carbonate calcium precipitation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):333-344.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.040 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.040**

Experimental and modeling study on slope soil erosion under synergistic effects of plants and microbial-induced carbonate calcium precipitation

Chen Yaru[1], Xia Chuanan[1,2], Wang Hao[1,2], Chen Yao[3], Wang Zhongqing[3], Li Xi[3]

(1.*Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian* 350108, *China*; 2.*Key Laboratory of Geohazard of Fujian Province, Fuzhou, Fujian* 350002, *China*; 3.*Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co. Ltd., Fuzhou, Fujian* 350007, *China*)

Abstract: [Objective] The synergistic effects of plants and microbial-induced carbonate calcium precipitation (MICP) were analyzed, and the effectiveness of this combined approach for slope protection and its impact on hydrological and soil erosion processes was revealed, in order to provide new insights and technologies for slope soil erosion control. [Methods] Five groups of experiments were conducted, including a bare soil control group

收稿日期:2025-12-29 **修回日期:**2026-02-27 **采用日期:**2026-03-02

资助项目:国家自然科学基金项目"强降雨条件下阶梯状茶园边坡的水文响应及浅层失稳机制"(42477165);国网福建省电力有限公司项目(SGFJDK00DYJS2310139);福建省自然科学基金项目(2024J08113)

第一作者:陈雅茹(1999—),女(汉族),福建省泉州市人,硕士研究生,研究方向为边坡水土保持。Email:chenyaru121@126.com。

通信作者:夏传安(1991—),男(汉族),福建省三明市人,博士,副研究员,主要从事水文与工程地质研究。Email:chuan-an.xia@fzu.edu.cn。

(CK), an MICP treatment group (MR), and three plants (*Festuca arundinacea*, FA; *Medicago sativa*, MS; and *Chrysopogon zizanioides*, CZ) respectively in combination with MICP for protective measures (FA-MC, MS-MC, CZ-MC). Based on a surface water-groundwater coupled model, a soil erosion model was constructed to quantitatively analyze soil erosion rates under different slope protection designs. Techniques including direct shear tests, microscopic observation, and scanning electron microscopy (SEM) were utilized to comprehensively analyze the variation patterns and underlying mechanisms of cohesion (c) and internal friction angle (φ). [Results] ① The MICP treatment effectively cemented loose soil particles by filling soil pores with flaky and flocculent $CaCO_3$ precipitates, leading to a significant increase in c value. It also reduced porosity and increased surface roughness, resulting in a higher φ value. The synergistic action of plants and MICP further enhanced both c and φ, with maximum increases of 402.81% and 33.91%, respectively, compared to the CK group. ② The numerical model effectively simulated the runoff volume and soil erosion rate across the five experimental groups (with maximum mean absolute errors of 2.39×10^{-4} m/s and 1.77×10^{-2} g/m^2/s, respectively), providing a valuable tool for analyzing hydrological and soil erosion processes under the synergistic effects of plants and MICP. ③ The synergistic effects of plants and MICP not only significantly enhanced soil strength but also improved soil permeability and water retention capacity. Moreover, through multiple erosion-reduction mechanisms (including plant interception and energy dissipation, water storage and flow diversion, and runoff interception), this synergistic system delivered integrated benefits of soil reinforcement, water conservation, and erosion mitigation. [Conclusion] The synergistic effects of plants and MICP can improve soil properties and reduce raindrop splash and runoff erosion on slopes, thereby regulating the soil erosion process. The developed numerical model can serve as an important tool for analyzing the soil and water conservation performance of different slope protection designs during soil erosion research.

Keywords: soil erosion; plant slope protection; MICP slope protection; numerical model

土壤侵蚀威胁全球土壤资源安全与生态系统稳定。中国丘陵与沿海地区在交通、水利与土木工程建设中形成大量裸露边坡,其表层长期受到降雨侵蚀作用,导致土体结构持续劣化[1],进而引起水土流失,甚至诱发滑坡、泥石流等地质灾害。同时,降雨侵蚀会破坏土壤生物群落结构,削弱其多样性与功能网络,降低生态多功能性[2]。伴随颗粒迁移与养分或溶质流失[3],进一步造成面源污染与生态退化,使边坡稳定性与区域生态安全面临更大挑战。

在斜面土壤侵蚀防治领域,现有措施主要包括化学固化、生物护坡及复合固化等方法[4]。化学固化能快速提升土体强度,但成本高且容易带来潜在环境负荷。生物护坡主要依靠植被覆盖对雨滴进行拦挡,根系在土壤中形成复杂的加筋网络,改变地表粗糙程度,增加土壤孔隙度并提高水分保持能力[5],具有良好生态效益,但早期固土能力有限,且受季节和气候条件影响显著,难以有效抵御短时强降雨。

近年来,微生物诱导碳酸钙沉淀(microbial-induced carbonate calcium precipitation, MICP)因其原位胶结和生态友好性,被广泛认为是一种有效增强土体强度与抗蚀性的技术。它通过微生物作用促使土颗粒间形成碳酸钙沉淀,可有效提升土体结构稳定性[6]。然而,MICP在实际应用中仍面临矿化分布不均、局部结皮从而导致径流增加[7]、过度胶结引起表层脆性增强等[8]问题,限制了其在工程中的广泛推广。为解决MICP技术应用问题,有些研究[9-10]提出了注浆、表面入渗、拌合等多种方法改善矿化均匀性,通过对不同土壤进行溶液配比、胶结处理次数等试验因素的研究,确定最佳矿化方案。

尽管植物防护和MICP应用在土壤侵蚀防治中各有成效,但由于存在的局限性,单一措施往往难以实现最佳效果,复合固化方法逐渐成为研究热点。Imran等[11]通过无侧限抗压强度试验在MICP矿化基础上掺入黄麻纤维,可通过颗粒孔隙间的连接,促进碳酸钙沉淀,进一步改善土体结构,降低脆性并增强力学性能。与此同时,MICP还可用于污染土修复,减少重金属的活性与迁移性,提升土壤中植物的适生性[12],以实现协同修复。在MICP与植物根系协同加固的研究中,微生物表层胶结与根系深部锚固形成互补作用,有效提升土体保水性与抗蚀性。整体来看,这类复合固化方法虽仍处于发展阶段,但展现出广阔的应用前景。

国内外学者提出了多种基于物理过程的坡面侵蚀模型刻画降雨侵蚀的机理与演化过程,如WEPP[13]、LISEM[14]与EUROSEM[15]等,主要基于小坡度与均质土体的假设,在工程边坡普遍存在的

陡坡、复杂地形和非均质结构条件下适用性受限。传统模型通常还忽略了地表与地下水的耦合过程,无法同时考虑不同防护措施对水文过程和坡面侵蚀的综合影响。本文通过耦合地表-地下水过程,考虑生态防护措施下的水文过程和侵蚀过程,构建植物-微生物矿化协同作用下的坡面土壤侵蚀模型,适用于较大坡度和非均质土体。

本文提出一种新型植物与MICP协同护坡方法,并将其应用于中国东南沿海地区广泛分布的粉质黏土。该方法通过基材喷播恢复草本植被,并利用巴氏芽孢杆菌催化碳酸钙沉淀加速土体胶结,构建协同防护体系,提高土壤抗侵蚀能力。此外,本文基于改进的输沙能力公式[16]建立二维斜坡剖面土壤侵蚀模型,结合室内降雨试验的径流与产沙量等相关数据进行验证。通过分析不同防护措施下的径流特征、产沙规律,揭示植物与MICP协同固土机理,为东南沿海土壤侵蚀防治提供一定的理论参考与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

采样点位于福州大学旗山校区长湾山的一处裸露斜坡,土样于2024年7月完成采集,土壤为粉质黏土,密度(ρ_s)1.74 g/cm^3,比重(G_s)2.68,孔隙比(e)0.74,液限(ω_L)38.60%,塑限(ω_P)24.20%。土样颗粒级配曲线连续且分布较为集中,中值粒径(d_{50})0.015 mm。土样在105 ℃下烘烤24 h,随后碾碎并筛分<2 mm的颗粒作为试验用土。

边坡表层土壤矿化加固采用MICP技术,主要材料包括菌液、胶结液和固定液。菌液选用巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*,菌种编号:ATCC 11859),利用上海仪电721 N可见分光光度计测定菌液中的细菌浓度OD600,即600 nm波长处的光密度值为1.22。

胶结液与固定液均由$CaCl_2$和$CO(NH_2)_2$按1∶1摩尔比配制。其中,Ca^{2+}为碳酸钙($CaCO_3$)结晶成核基础,尿素在脲酶作用下分解生成碳酸根离子,促进沉淀与胶结反应。试验中,MICP喷洒矿化阶段使用的胶结液浓度为0.50 mol/L,喷播基材中掺入0.20 mol/L混合溶液作为微生物的固定液。

不同植被类型对边坡防护效果的影响存在显著差异。为实现粉质黏土边坡防护与生态修复,根据现场调研,并结合控制土壤侵蚀的植物物种开放数据库,选取高羊茅(*Festuca arundinacea*,FA)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*, MS)与香根草(*Chrysopogon zizanioides*, CZ)3种植物。降雨试验前已通过盆栽正交试验优化基材配比。不同植物与基材优化后的配比如表1所示。

表1　3种植物与基材的配比

Table 1　Proportions of three plant species to substrate

植物种类	固定液浓度/(mol·L^{-1})	植物纤维/%	复合微生物肥料/%	保水剂/%
高羊茅	0.20	1.00	2.00	0.09
紫花苜蓿	0.20	3.00	1.00	0.06
香根草	0.20	1.00	2.00	0.09

微生物矿化生态基材由基质土、微生物菌液、固定液、植物纤维、草籽、复合微生物肥料和保水剂组成。植物纤维为稻草纤维与稻壳按质量比1∶1混合而成,用于改善基材的团粒结构和通透性[11];复合微生物肥料由多种功能菌、有机肥和化学肥混合制成,改善土壤环境;保水剂选用聚丙烯酸钾。

1.2　试验装置

降雨冲刷模拟土壤侵蚀试验装置主要由3个关键部件组成:降雨系统、试验土槽和径流收集桶。试验所用降雨设备为ZYJY-DZ02型便携式人工模拟降雨控制器,降雨高度4.00 m,有效面积为2.00 m×3.00 m,降雨均匀度>85%。冲刷槽尺寸参考了现有降雨侵蚀试验研究[17],每套边坡模具设置3个冲刷槽,每个槽长1.00 m,宽0.20 m,深0.15 m,下端通过集流带将含沙水样引入收集桶,以便测量径流体积和含沙量。采用两套模具同时进行试验,获取不同防护条件下的侵蚀数据。

1.3　试验设计

为系统评估不同防护措施对坡面稳定性与生态防护效果的影响,本试验于2024年11月进行,设置裸土坡面作为对照组(CK),并设置无植被的MICP加固组(MR)及3种植物分别与MICP协同防护的试验组(分别记为FA-MC, MS-MC, CZ-MC)。

植物-MICP协同防护试验装置设置步骤如下:将称量后的土体分3层铺设于冲刷槽内,每层厚度控制0.04 m,并逐层夯实;为确保层间结合,每层填筑前均对下层表面进行拉毛处理。底层填筑完成后,在坡面铺设椰丝网作为加筋骨架,并使用U型钉及树脂垫片加以固定。依据前期试验研究[18],MICP矿化按以下步骤进行:先按0.50 L/m^{2}用量在坡面均匀喷洒菌液,8 h后喷洒等体积胶结液,静置12 h后重复该流程;每完成1次胶结液喷洒记为一轮胶结,试验在2 d内共实施3轮。矿化完成后,将按比例混合微生物矿化生态基材均匀喷播于坡面,控制厚度为0.03 m,使其形成连续的保水保肥层,充分压实。在沙箱内

土层累计厚度为0.15 m。

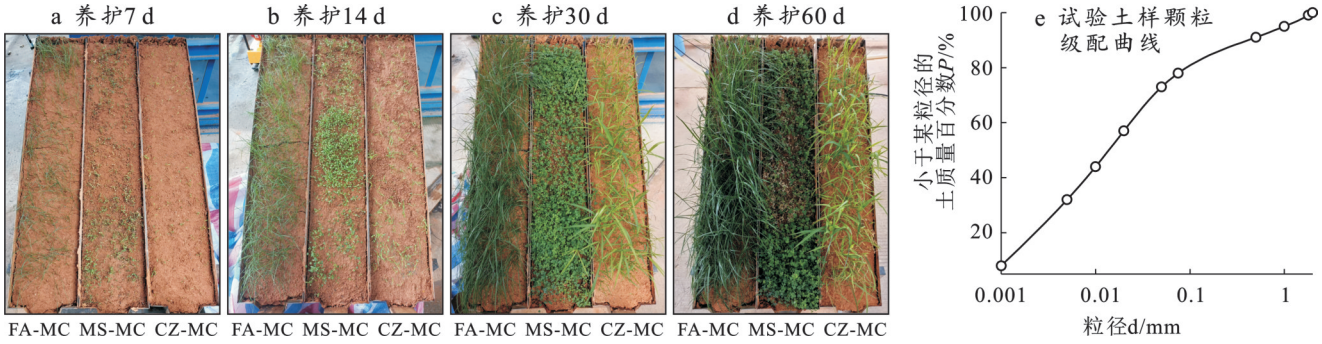
CK与MR试验组的土层设置与上述流程一致，采用相同的填筑流程和土层厚度，但不进行基材喷播。两组的主要差异在于喷洒液体成分：对照组喷洒清水，MR组喷洒等体积的菌液与胶结液。其余步骤与植被-MICP协同试验组相同，确保各组试验条件的一致性。

养护60 d期间，植物-MICP协同防护组植物生长情况见图1。养护结束后采用垂直摄影获取植被覆盖影像，利用PCAS系统[19]计算植被覆盖度（δ），并测量植株有效高度（P_H），3组试验的试验土壤关键参数见表2。CK组与MR组的初始含水量（θ_0）、饱和含水量（θ_s）及残余含水量（θ_r）与表2的3组试验相同。

表2 试验土壤参数

Table 2 Parameters of test soil

试验组	θ_0/（$m^{-3}\cdot m^{-3}$）	θ_s/（$m^{-3}\cdot m^{-3}$）	θ_r/（$m^{-3}\cdot m^{-3}$）	δ/%	P_H/m
FA-MC	0.37	0.43	0.14	60.59	0.25
MS-MC	0.37	0.43	0.14	44.20	0.16
CZ-MC	0.37	0.43	0.14	30.48	0.22



注：图中字母代表3种植物（FA为高羊茅，MS为紫花苜蓿，CZ为香根草）分别与微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP，简写为MC）协同防护试验组（FA-MC，MS-MC，CZ-MC）。下同。

图1 不同养护时间边坡植被生长情况

Fig.1 Plant growth status on slopes under different curing durations

1.4 试验步骤

本研究旨在探讨短时强降雨条件下，不同防护措施对边坡土壤侵蚀特征的影响。短历时强降水具有降雨强度大、雨滴动能高等特征，能迅速破坏表层结构并形成高速径流，是触发坡面侵蚀的重要外因。降雨历时与降雨强度是控制短时侵蚀过程的核心因子。本研究采用30 min降雨历时模拟典型短历时强降水事件，并依据《水土保持监测技术规范》（SL/T 227—2024），设置坡度为30°。降雨强度选定为30 mm/h，处于《短时强降水等级》（GB/T 45842—2025）中值区间，是福建实际降水数据得出的短历时强降水强度的关键阈值。

试验前，以10 mm/h的降雨强度进行预降雨以统一坡面初始含水量。随后在固定坡度下进行持续降雨，每5 min收集径流样品及记录体积V（ml）。试验结束后，为使悬浮泥沙充分沉降，所有样品静置12 h以沉降泥沙，分离上层清液，将沉积物于105 ℃烘干至恒重并称重，获取试验各阶段的径流含沙量M（g）。

2 数值模型

通过耦合地表-地下水构建二维斜坡水文模型，并基于该模型分析不同土壤护坡条件下的水文响应与土壤侵蚀规律。

2.1 斜坡径流

采用一维扩散波近似方程[20]刻画斜坡坡面径流，方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\nabla\cdot(h\vec{u})=R-I \tag{1}$$

式中：$\nabla\cdot$为散度；h为径流深度（m）；R为降雨强度（mm/h）；I为入渗率（mm/h）；$\vec{u}$为径流速度（m/s），由曼宁公式[21]计算：

$$\vec{u}=-\frac{h^{\frac{2}{3}}}{n_m\sqrt{|S|}}\nabla(h+D) \tag{2}$$

式中：n_m为曼宁粗糙系数；D为高程（m）；S为坡度，$S=\nabla D$。

2.2 斜坡地下水渗流

斜坡地下水渗流过程通过二维Richards方程[22]描述，该方程写为

$$\frac{C_m}{g}\frac{\partial p}{\partial t}=\nabla\cdot+\left\{\rho_w\left[\frac{k_rK_s}{\rho_w g}(\nabla p+\rho_w g\nabla D)\right]\right\}+Q_m \tag{3}$$

式中：∇为梯度；p为孔隙水压力（kPa）；C_m为比水容度（1/m）；ρ_w为水的密度（1.00 g/cm^3）；K_s为饱和渗透系数（m/d）；k_r为相对渗透率；g为重力加速度（9.80 m/s^2）；Q_m为源汇项。

非饱和土的土-水特征曲线采用van-Genuchten模型[23]：

$$S_e=\begin{cases}\left(1+\left|\alpha H_p\right|^n\right)^{-m} & (H_p<0)\\ 1 & (H_p\geqslant 0)\end{cases} \tag{4}$$

$$k_r=\begin{cases}S_e^{\frac{1}{2}}\left[1-\left(1-S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 & (H_p<0)\\ 1 & (H_p\geqslant 0)\end{cases} \tag{5}$$

式中:S_e为有效饱和度(%);H_p为压力水头(kPa);土—水特征曲线参数α,n,m取值为0.01 /kPa,1.50,0.33,其中$m=1-1/n$。

2.3　地表-地下水耦合

降雨作用下的边坡水文过程中,径流与渗流在水力梯度作用下发生水量交换。刻画径流的一维扩散波近似方程作为渗流Richards方程的约束边界,在边界处共用相同的数值节点。使用流量与压力转换边界刻画坡面水量交换[24]:

$$I=\begin{cases}K_s & (p_{surf}<0)\\ \dfrac{K_s}{L}\left(h-\dfrac{p_{surf}}{\rho g}\right) & (p_{surf}\geqslant 0)\end{cases} \tag{6}$$

式中:p_{surf}为地表孔隙水压力(kPa);L为耦合长度尺寸,取0.001 m[24]。根据某一时刻的p_{surf}与h,按公式(6)计算该时刻的I,然后按式(3)计算下一时步渗流场以更新p_{surf},按式(1)更新h,实现径流与渗流的耦合。

2.4　土壤侵蚀与迁移

土壤侵蚀过程是水动力作用下土壤颗粒的剥离、迁移与再沉积的综合结果。在降雨侵蚀过程中,将土壤流失量计算为输沙量,通常由径流速率与泥沙浓度共同决定。径流中的泥沙浓度C($\mathrm{m^3/m^3}$)计算基于动态质量平衡方程[15]:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t}+\nabla\cdot(QC)-e(x,t)=q_s(x,t) \tag{7}$$

式中:$A=l\times w$为水流的横截面积($\mathrm{m^2}$),l和w分别是流动长度和宽度,取值为l=1.00 m,w=0.20 m;Q为水流流量($\mathrm{m^3/s}$);E_r为沿坡面各时间步长和各节点计算净侵蚀速率($\mathrm{g/m^2/s}$);q_s为外部输入的水流速率($\mathrm{m^2/s}$)。

本文将降雨作用下的土壤侵蚀分为雨滴溅蚀和径流冲蚀两个部分,侵蚀过程中伴随着坡面土壤颗粒的迁移。其中净侵蚀速率E_r计算如下:

$$E_r=\mathrm{DET}+0.001\rho_s\frac{\mathrm{DF}}{w} \tag{8}$$

式中:DET为雨滴溅蚀作用下土壤颗粒分离速率[$\mathrm{g/(m^2\cdot s)}$];DF为土壤颗粒被冲刷速率与颗粒沉积速率的差值($\mathrm{m^2/s}$)。

2.4.1　雨滴溅蚀

降雨导致土壤侵蚀一个主要表现就是雨滴冲击造成的土壤剥离[25]。雨滴动能的估算基于Brandt(1989)推导的降雨动能公式[26]计算,该公式基于降雨强度R,具体如下:

$$\mathrm{KE(DT)}=8.95+8.44\lg R \tag{9}$$

式中:KE(DT)为单位面积降雨动能($\mathrm{J/m^2/mm}$)。

根据Brandt(1990)通过试验得出边坡坡面植物叶片具有消能作用,KE(LD)为叶片滴落水动能($\mathrm{J/m^2/mm}$),其基于植株平均株高的计算公式如下:

$$\mathrm{KE(LD)}=\left(15.8\sqrt{P_H}\right)-5.87 \tag{10}$$

式中:P_H为植物冠层的有效高度(m)。

为了综合考虑有无植被覆盖对土壤侵蚀的影响,本文通过公式(11)计算单位面积降雨总动能。

$$\mathrm{KE}=(1-\delta)\mathrm{KE(DT)}+\delta\mathrm{KE(LD)} \tag{11}$$

根据降雨总动能即可计算出雨滴溅蚀导致的土壤颗粒脱落速率DET($\mathrm{g/m^2/s}$)。

$$\mathrm{DET}=k(\mathrm{KE})\mathrm{e}^{-bh} \tag{12}$$

式中:剥离指数k(g/J)取值取决于土壤的质地;KE为降雨的总动能($\mathrm{J/m^2}$);降雨过程中将在坡面形成一定深度h的积水,使得雨滴的能量被水面吸收,而不是直接由土壤吸收,取b=2。

2.4.2　径流冲蚀

降雨作用下,侵蚀过程中伴随泥沙沉积,其沉积速率表示为wCv_s,其中v_s为颗粒沉降速度(m/s),根据Zhang Ruijin等[27]提出的泥沙沉积速率公式计算:

$$v_s=\sqrt{\left(13.95\frac{v}{d_{50}}\right)^2+1.09\left(\frac{\rho_s}{\rho_w}-1\right)gd}-13.95\frac{v}{d_{50}} \tag{13}$$

式中:水的运动黏度v取1.00 $\mathrm{cm^2/s}$;d_{50}为试验土样中值粒径;ρ_s为泥沙颗粒密度($\mathrm{kg/m^3}$)。

径流冲蚀产生的输沙量计算采用基于试验的Govers经验公式[15],以单位径流功率T_c为基础。Wang等[16]在此基础上利用修正的输沙量公式建立了二维坡面侵蚀模型,并通过室内黄土坡面侵蚀试验进行验证,结果表明修正后模型可以比较准确地模拟径流和泥沙沉积过程。土壤颗粒被径流冲蚀速率与颗粒沉积速率之间的差值DF($\mathrm{m^2/s}$),由下式表示:

$$\mathrm{DF}=\beta w v_s(\mathrm{TC}-C) \tag{14}$$

$$\beta=\frac{1}{0.89+0.56c} \tag{15}$$

式中:TC代表径流的输沙能力浓度($\mathrm{m^3/m^3}$);β为径流剥离土颗粒的有效系数[28],根据黏聚力(kPa)确定。

修正后的径流输沙能力[16]计算如下:

$$TC=\frac{T_c}{\rho_s q} \tag{16}$$

$$T_c=\rho_s qmS(\vec{u}-u_{cr})^n \tag{17}$$

$$m=\left(\frac{d_{50}+5}{0.32}\right)^{-0.921} \tag{18}$$

$$n=\left(\frac{d_{50}+5}{300}\right)^{0.365} \tag{19}$$

$$u_{cr}=\left(\frac{h}{d_{50}}\right)^{0.14}\left(17.6\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}\cdot d_{50}+\lambda\frac{10+h}{d_{50}^{0.72}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{20}$$

式中：T_c为输沙能力〔kg/(m·s)〕；q为单位宽度输沙速率修正单位(m²/s)；u_{cr}为颗粒产生迁移需要达到的启动流速(m/s)；$\lambda=6.05\times10^{-8}$；$\gamma_s$为沉积物容重(17.00 kN/m³)；$\gamma_w$为水的容重(9.80 kN/m³)。

2.4.3 土壤颗粒迁移

为定量评估特定时段内的土壤流失量，净侵蚀量E(g/m²)计算如下：

$$E=\int \mathrm{DET}+\rho_s\frac{\mathrm{DF}}{w}\mathrm{d}t \tag{21}$$

5组试验数值模拟采用的曼宁粗糙系数、剥落系数、饱和渗透系数，通过人工试错方法进行率定，具体参数见表3。地表径流采用有限差分方法求解，地下渗流采用近场动力学方法[29]。与传统数值方法的微分理念不同，该方法基于积分原理表达质量守恒方程。相对于传统有限差分与有限元方法，具有数值程序编码简单、复杂边界刻画能力强等优势。

表3 数值模型参数

Table 3 Parameters for numerical model

试验组名称	n_m	k/(g·J⁻¹)	c/kPa	K_s/(m·d⁻¹)
CK	0.03	1.16×10^{-6}	19.95	4.32×10^{-4}
MR	0.02	1.11×10^{-7}	53.24	4.30×10^{-5}
FA-MC	0.08	6.50×10^{-8}	69.03	6.05×10^{-4}
MS-MC	0.07	2.25×10^{-8}	100.31	7.34×10^{-4}
CZ-MC	0.04	1.02×10^{-7}	67.18	8.60×10^{-5}

3 结果与分析

3.1 植物与MICP协同作用对土壤强度的影响分析

5组试验土体的直接剪切试验结果如图2所示。CK对照组(图2a)、MR(图2b)、FA-MC(图2c)、MS-MC(图2d)和CZ-MC(图2e)试验组土壤黏聚力c依次为19.95，53.24，69.03，100.31，67.18 kPa；内摩擦角φ为20.88°，25.26°，27.96°，26.10°和27.76°；抗剪强度τ与法向应力σ的线性回归方程的决定性系数R^2依次等于1.00，0.99，1.00，0.98，1.00。

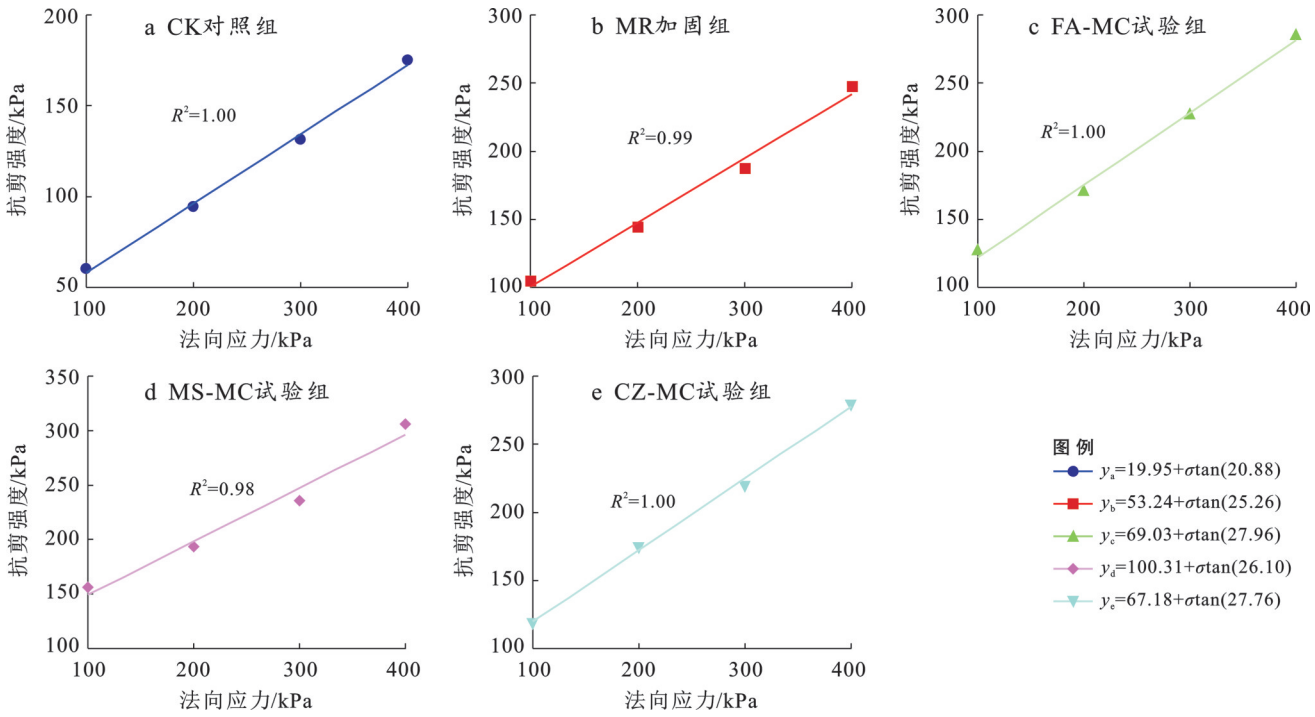


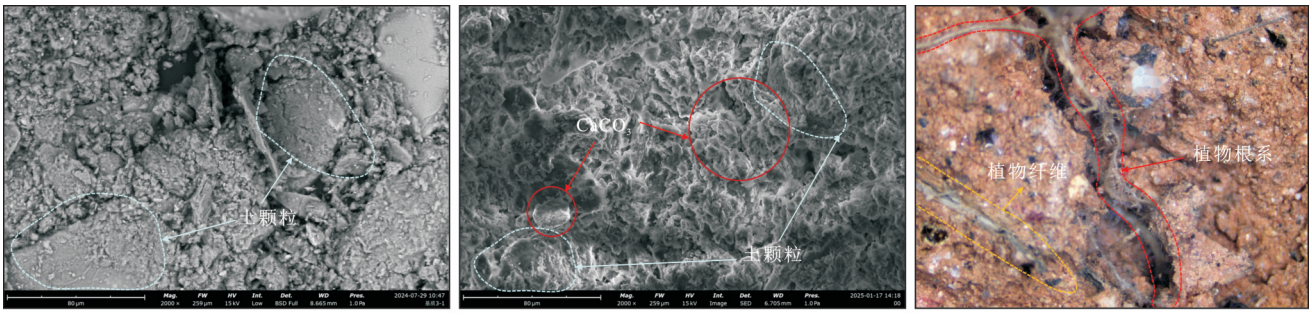
图2 5组试验的抗剪强度与法向应力散点图

Fig.2 Scatter plots of shear strength versus normal stress for five experimental groups

对比CK与MR组，在MICP矿化作用下，$CaCO_3$晶体析出填充土壤孔隙，增强了土壤骨架的稳定性，导致土壤的黏聚力和内摩擦角分别提升了166.87%和20.98%。当考虑植物与MICP协同作用时，FA-

MC, MS-MC 和 CZ-MC 试验组相比于 CK 组,c 依次提升了 246.02%, 402.81% 和 236.74%, φ 提升了 33.91%, 25.00% 和 32.95%。在植物与微生物协同作用下,相对于 MR 组,c 提升量不低于 69.87%,最大提升达到 235.94%(MS-MC 组);φ 提升量不低于 4.02%,最大提升达到 12.93%(FA-MC 组)。结果表明,MICP 对土体 c 与 φ 均具有显著提升效果,而植物与 MICP 的协同作用还可进一步显著提升 c 值,φ 值提升幅度相对较低。

图 3 展示了扫描电镜尺度(80 μm)下,MR 试验组矿化前后(图 3a, 3b)土体结构变化,以及 MS-MC 组的植被根系与岩土体之间的接触关系(图 3c)。



a MICP试验组土样矿化前扫描电镜影像　　b MICP试验组土样矿化后扫描电镜影像　　c 试验土样(MS-MC)显微镜下微观结构

图 3　试验土样微观结构

Fig.3　Microstructure of test soil samples

在 MICP 矿化前,土体骨架松散,颗粒分明,矿化后,土颗粒表面生成大量不规则片状、团絮状 $CaCO_3$ 沉积物,符合张茜等[10]通过试验确定巴氏芽孢杆菌与 $CaCl_2$ 溶液,在较小孔隙土体中矿化时,易生成层状球霰石,有效胶结松散土颗粒,提升土体 c 值,并提升颗粒之间的运动阻力,提高 φ 值。图 3c 显示,MS 发达的根系在土体中形成加筋网络,进一步提高土体抗剪强度。

3.2　不同坡面条件下土壤侵蚀过程分析

图 4 所示为 CK 与 MR 组试验后的坡面照片。在雨滴溅蚀与径流冲蚀共同作用下,CK 坡面出现明显侵蚀细沟(图 4a),且其深度不一;与 CK 组对比,MR 组坡面细沟深度显著降低(图 4b),坡面细颗粒流失减少。CZ-MC 组中 CZ 植株平均高度中等但分布稀疏,覆盖度不足,细沟发育较少(图 1);FA-MC 组整体植被生长最为茂盛,细沟不发育(图 1);MS-MC 组植株相对低矮,在坡面分布较为均匀,细沟基本不发育(图 1)。

图 5a-5d 所示为径流流速 u(图 5a)、径流剪切力 τ_w(图 5b)、土壤侵蚀率 E_r(图 5c)与累计侵蚀量 E(图 5d)随时间的变化曲线。5 组试验(CK, MR, FA-MC, MS-MC 和 CZ-MC)坡面平均径流流速依次为 0.06, 0.08, 0.03, 0.04, 0.05 m/s。MR 平均径流流速最高,FA-MC 组最低,u 降低了 62.50%。在三组协同试验中,根系分布状况与坡面植被生长情况相对应,FA 须根茂盛,MS 主根相对发达,而 CZ 根系长但根系生物量相对较低,对土体渗透性改良效果不同。

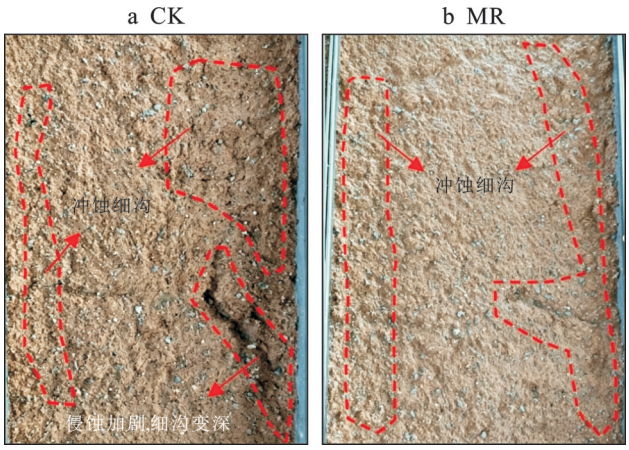


图 4　CK 与 MR 组坡面侵蚀照片

Fig.4　Slope erosion photos of CK and MR groups

坡脚 $\tau_w(=\rho_w g h^o \sin 30^\circ$,其中 h^o 为坡脚观测流量计算得到径流深度)分别为 0.58, 0.45, 1.03, 0.95, 0.68 kPa。植物与 MICP 协同防护组 τ_w 的排序:FA-MC>MS-MC>CZ-MC,相对 CK 组分别提升了 77.59%, 63.79%, 17.24%。可见,植被有效截流的同时也相对增加了径流深度,τ_w 加强,从而弱化协同防护效果。因此,植被生长最为茂盛的 FA-MC 组的侵蚀情况与坡面分布均匀的 MS-MC 组相比较差,更强的 τ_w 作用在裸露坡脚,导致局部冲蚀效果加强,这一现象符合 Li Jing 等[30]通过不同植被覆盖度降雨冲刷试验得到的结论。

土壤侵蚀率根据 $E_r=M/300\ V$ 计算,5 组试验 E_r 范围为[0.17, 0.22][0.02, 0.07][0.02, 0.04][0.01, 0.02]和[0.03, 0.06] g/m²/s。CK 组一直处于较高的

土壤侵蚀率。MR组E_r最低值出现在降雨初期，对比CK组有显著降低，此时坡面矿化层整体性良好，但是随着降雨历时增长，较为薄弱的土层首先受到破坏，形成细小冲蚀沟，导致E_r上升。MS-MC组整体E_r最低，相较于CK组显著降低了8.14～15.91倍；FA-MC组的土壤侵蚀率仅次于MS-MC组。CZ-MC组E_r与MR组接近，相较仅下降了13.28%至25.80%，并且初期E_r相对较高，说明由于植被覆盖度不高，矿化层完整性减弱，在更高的τ_w作用下，对径流冲蚀的防护不足。

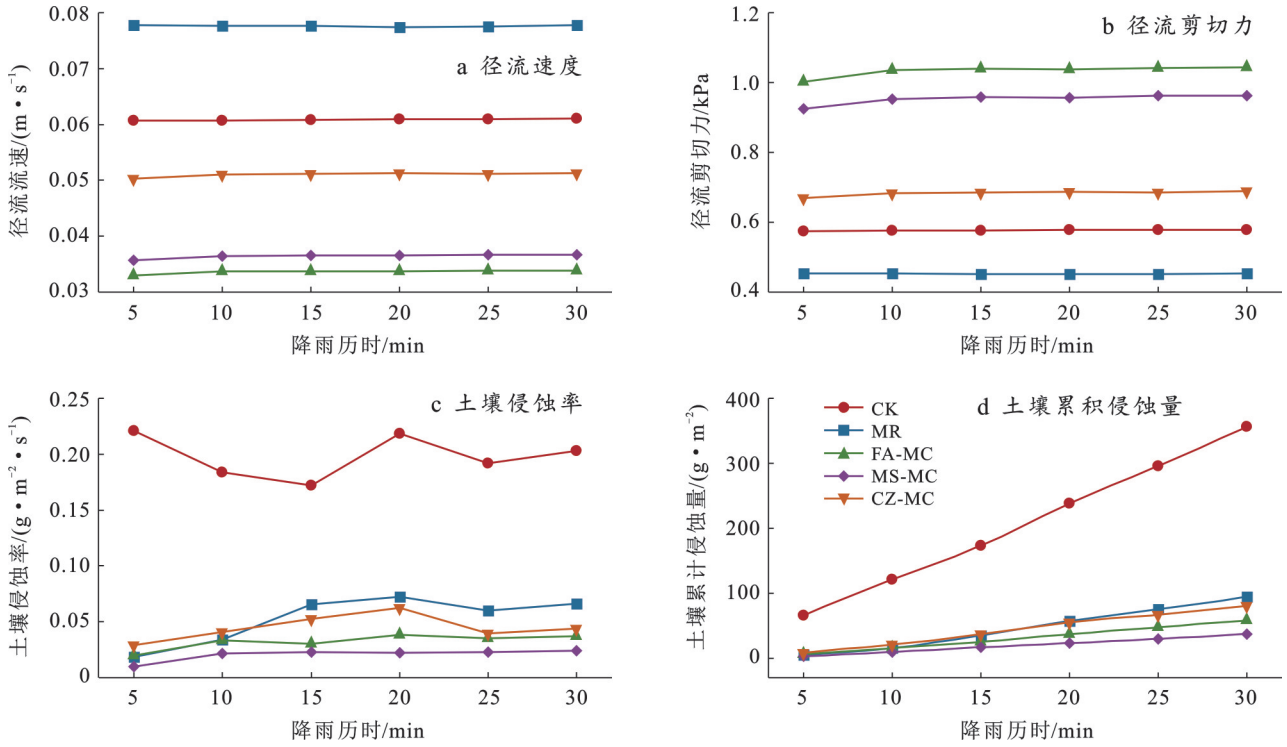


图5 径流流速、径流剪切力、土壤侵蚀速率与累计侵蚀量随时间变化特征

Fig.5 Temporal variation characteristics of runoff velocity, runoff shear stress, soil erosion rate and cumulative erosion amount

试验结束后，5组土壤累计侵蚀量分别为356.80，95.00，58.35，37.10与80.40 g/m²。MS-MC组E最低，仅为土壤累计侵蚀量最高CK组的10.40%，降低了约89.60%；FA-MC次之。高羊茅和紫花苜蓿这两组植物与MICP协同防护坡面具有更好的减蚀效果。

3.3 土壤侵蚀过程模拟分析

为验证二维输沙模型的有效性，将u实测值与模拟值进行对比分析（如图6所示）。在5组试验（CK，MR，FA-MC，MS-MC和CZ-MC）中，u的平均绝对误差（MAE）依次等于1.01×10^{-4}，1.32×10^{-4}，2.27×10^{-4}，2.37×10^{-4}，2.39×10^{-4} m/s，表明模型能够准确捕捉试验的径流动态变化，能够有效预测坡面径流的冲刷过程，为土壤侵蚀过程的定量分析提供了有效支持。

在土壤侵蚀率方面（详见图7），E_r实测值与模拟值的MAE等于1.57×10^{-2}，1.77×10^{-2}，4.90×10^{-3}，3.50×10^{-3}，8.60×10^{-3} g/m²/s，表明模型能合理预测各防护措施的相对效果。值得指出的是，CK与MR的MAE相对较高，部分归因于数值模型忽略了细沟发育对侵蚀过程的影响。FA-MC和MS-MC的试验与模拟结果匹配较好，表明在细沟不发育时模型能有效表达土壤侵蚀过程。

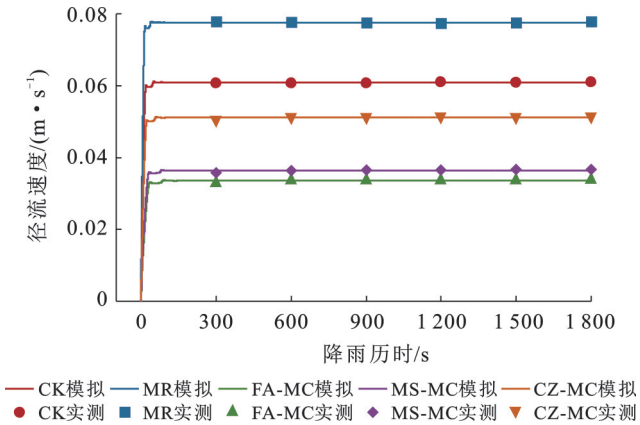


图6 径流流速实测与模拟值随时间变化特征

Fig.6 Temporal variation characteristics of measured and simulated runoff velocity

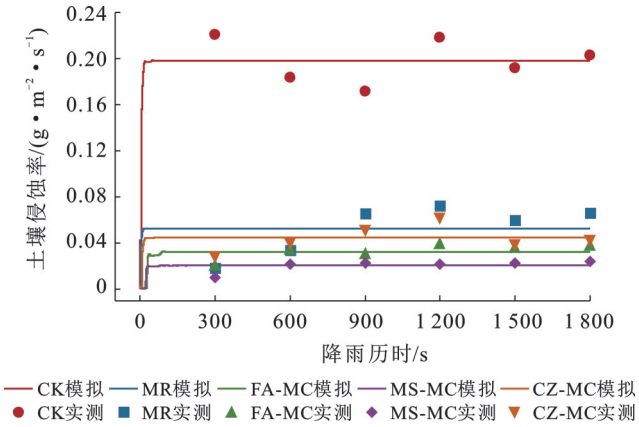


图 7　土壤侵蚀率测试值和模拟值随时间的变化特征

Fig.7　Temporal variation characteristics of measured and simulated soil erosion rates

图 8 所示为最后时刻五组试验的坡面径流深度(h)模拟值(图 8a)与土体孔隙水压力空间分布(CK(图 8b)、MR(图 8c)、FA-MC(图 8d)、MS-MC(图 8e)和 CZ-MC(图 8f))。在重力影响下,h 由坡顶至坡脚逐渐上升。径流深度与植被覆盖度、坡面粗糙度在物理机制上存在正相关关系,MR 坡面 h 最低,FA-MC 组 h 最深,MS-MC 组次之。

5 组试验孔隙水压力(p)模拟结果表明土壤处于负压状态,范围在 −1.90 kPa 至 −1.65 kPa,地下水主流方向为由左上方指向右下方。结合表 3 分析,FA 和 MS 根系能提供相对优势通道,提高土体渗透性,这导致这两组试验的 p 值总体高于其他组。CZ-MC 组的 p 值略低于 CK 组,根系在 MICP 矿化层没有展现明显的促进渗透作用。

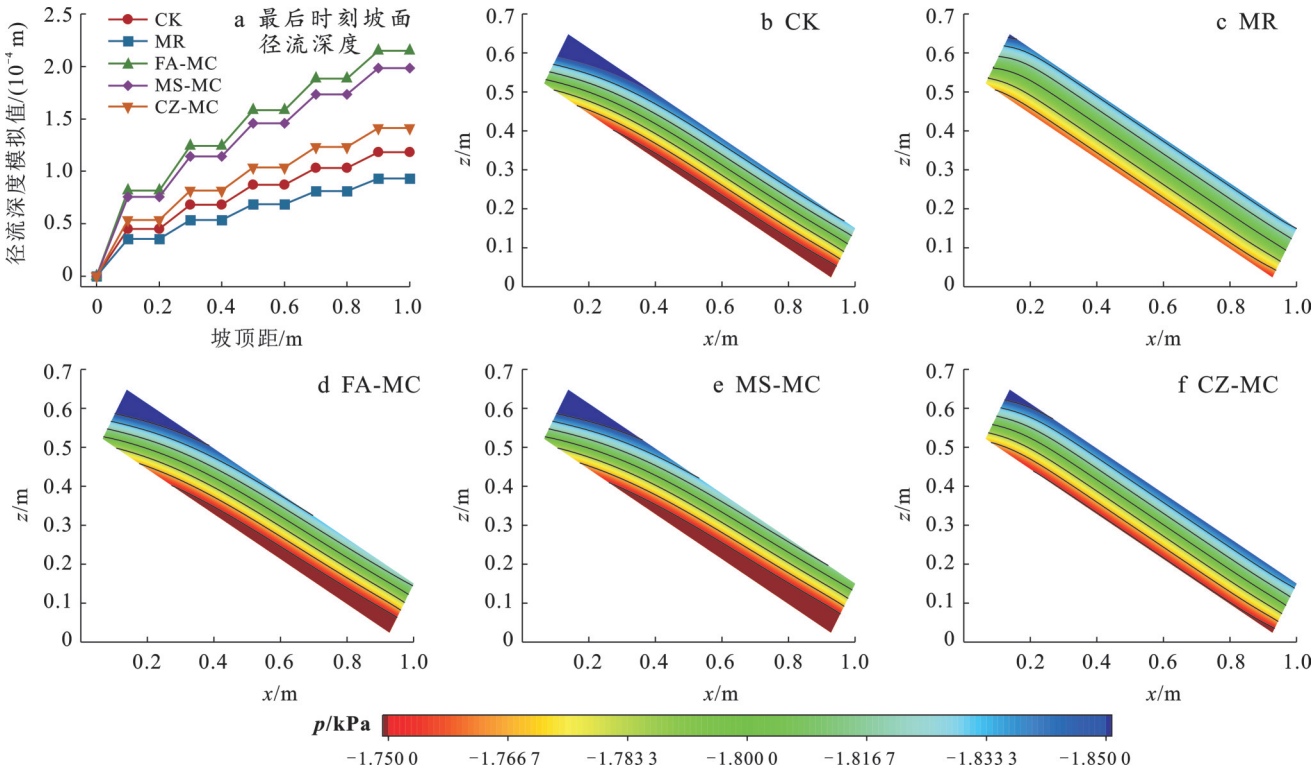


图 8　5 组试验最后时刻径流深度与地下水孔隙水压力分布

Fig.8　Distribution of runoff depth and pore water pressure of groundwater at final moment for five experimental groups

4　讨　论

综合以上结果,植物与 MICP 协同护坡可以提高斜坡坡面水土保持的能力,但还有一些问题值得深入分析与讨论。

4.1　MICP 护坡的水土保持作用

无防护的裸土工况下(CK 组,图 9a),土骨架较为松散,在雨滴溅蚀与径流冲蚀这两种关键降雨侵蚀过程的共同作用下,土颗粒容易脱离母体被径流带走,斜坡表层遭受较强侵蚀。而 MICP 可以提高斜坡表层土体的抗剪强度,结合试验土样微观图像(图 3)和图 9b,矿化后的斜面形成了较为光滑的疏水层结构,有效抑制雨滴溅蚀的产生;同时,也降低坡面剥蚀系数 k,在径流形成初期削弱径流冲蚀作用。但在持续降雨作用下,仅采取 MICP 措施的斜面由于 MICP 矿化不均匀,其薄弱处在两个关键过程的作用下,E_r 逐渐提升。疏水层的存在,减少了雨水入渗量,MR 组 p 值总体低于 CK,降低了土体持水可能性,未能起到真正意义上的既保土又持水的效果。

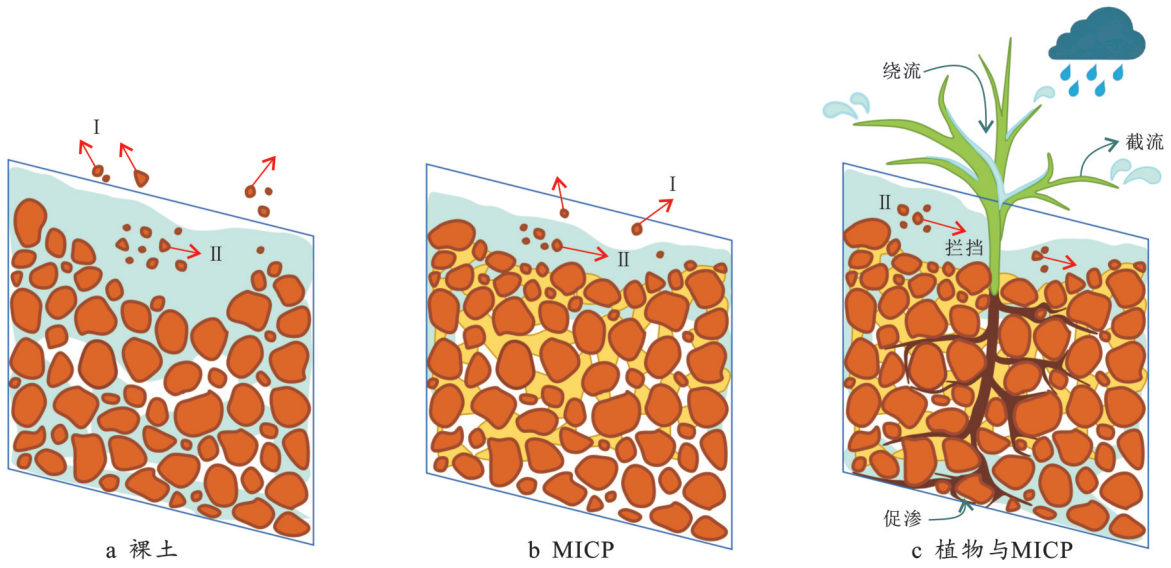


图 9 降雨侵蚀微观概念图(Ⅰ为雨滴溅蚀;Ⅱ为径流冲蚀)

Fig.9 Microscopic conceptual diagram of rainfall erosion (Ⅰ splash erosion by raindrops; Ⅱ flow-induced erosion by runoff)

4.2 植物与MICP协同作用对水文过程的影响

为了提高土体的保水性能,克服单独使用MICP形成疏水层的局限,采用植物-MICP协同防护,显著影响了降雨入渗和地表径流等重要水文过程。图10展示了5组试验在最后时刻的斜坡土体含水量(θ)空间分布,更直观地分析不同护坡设计下土壤含水量的差异。

结果显示,MR组(图10b)土体θ总体最低,CZ-MC组(图10e)次之,比裸土情况下更低。FA-MC组θ总体最高,MS-MC组次之,这与图8结果一致。进一步说明了植物根系可改良土体,加强地表-地下水交互作用,FA与MICP协同作用下,对土体渗透性改良效果最好,这可能是因为其须根茂盛,形成地下水优势通道,促进径流的下渗,提升土体θ值。此外,高的覆盖率,对应强的植物降雨截流作用,延长了部分雨水到达坡面的路径。FA-MC与MS-MC组的叶面覆盖程度高,δ分别达到60.59%和44.20%(表2),雨水被植物截流后可沿着植物叶面和茎部流动,形成绕流(图9c),在地表形成"植物蓄水层",加长了雨水在地表的迁移路径,并增加了蓄水量。相反,CZ-MC组由于植被稀疏,植被消能截流性能不足。

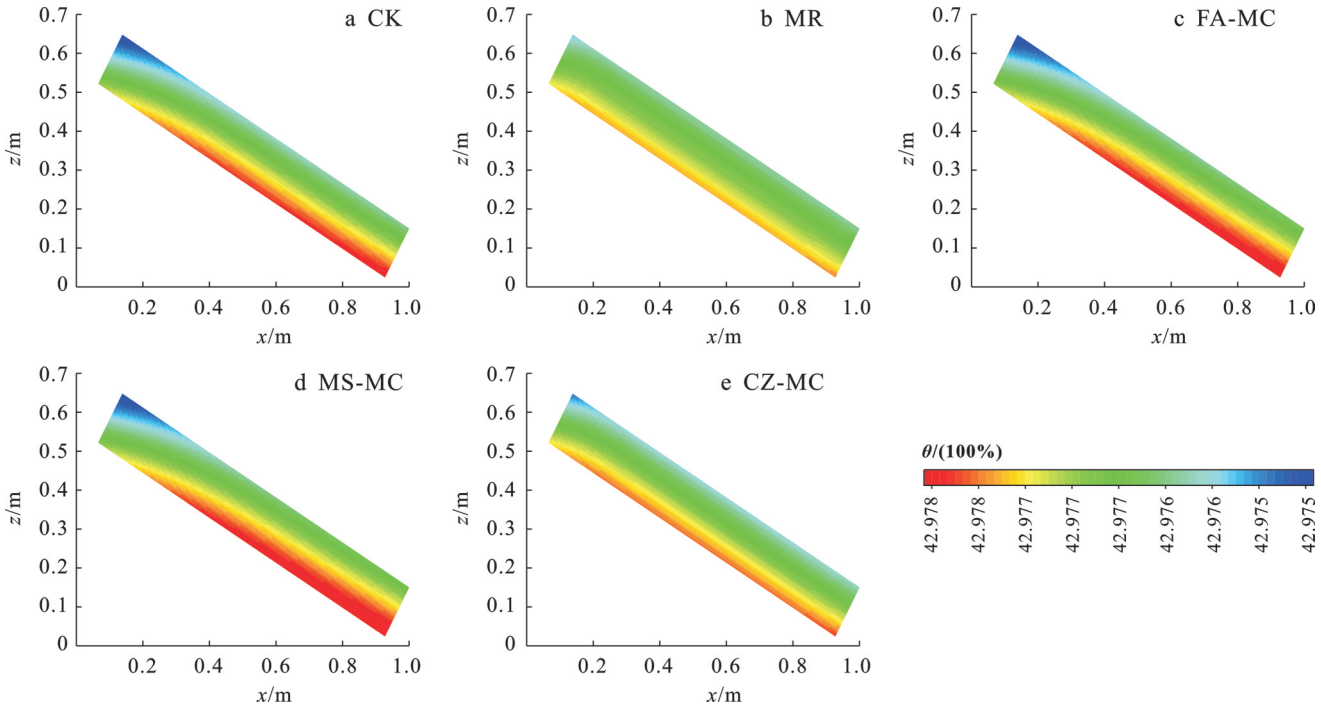


图 10 5组试验最后时刻斜坡剖面含水量

Fig.10 Moisture content distribution along slope profile at final moment for five experimental groups

4.3　植物与MICP协同作用对土壤侵蚀的影响

植物与MICP协同作用影响水文过程的同时也改变各个土壤侵蚀子过程,从而进一步提高坡面抗侵蚀性。在雨滴溅蚀方面,植物通过阻挡雨滴并消耗其动能,有效减弱了溅蚀强度。在物理试验中,具体表现为雨滴击打叶面后破裂飞溅,部分沿叶面流向茎部,部分滴落至坡面。此外,本文采用权重法与PCAS图像识别技术,将植被覆盖率融入物理机制模型,在同一个试验内综合考虑了裸露坡面与植物覆盖两种下垫面条件,成功表达了关键水文过程与土壤侵蚀过程。在数值模型中,雨滴溅蚀的削弱体现在两个方面:①植物消能〔公式(10)和(11)〕;②k值降低(表3)。在径流冲蚀方面,植物茎部对地表径流存在拦挡作用,提高径流深度,但流速降低,导致径流冲蚀减弱〔公式(14)至(20)〕。值得指出的是,植物选择及生长发育情况对坡面护坡有重要影响,需要做好前期遴选与培育工作。

综上所述,植物与MICP的协同作用,可同时减弱雨滴溅蚀和径流冲蚀这两个关键侵蚀过程,显著降低土壤侵蚀率与侵蚀总量,从而实现更为有效的水土保持效果。

5　结　论

(1)植物与MICP协同作用能够显著提高土体的抗剪强度,黏聚力c和内摩擦角φ相对于裸土工况,最高分别提升了402.81%和33.91%,从而有效增强土体的稳定性,减少土壤侵蚀。在土壤改良与抗侵蚀性提升的综合目标下,紫花苜蓿与MICP技术的协同组合是最有效的防护措施。

(2)数值模型能够有效模拟植物与MICP协同作用下的土壤侵蚀过程。5组试验中,地表径流流速模拟值与观测值平均绝对误差(MAE)最高为2.39×10^{-4} m/s,土壤侵蚀速率MAE最高等于1.77×10^{-2} g/m^2/s,具有较高的可靠性和准确性。

(3)植物茎叶对雨滴有截流消能和蓄水绕流作用,能降低雨滴溅蚀强度;茎部对地表径流有拦挡作用,减小径流流速,降低径流冲蚀强度;其根系既能提升土体强度,也能改善土体渗透性,进而提高保水性能。

在实际斜坡护坡设计中,应注意植物类型选择与培育工作,在生态环境友好的前提下优先选择叶面覆盖度高且根系促渗性能强的植物。本文发展的数值模型综合考虑水文过程与土壤侵蚀过程,可作为斜坡水土保持研究与设计工作的有效工具。

此外,本研究存在一定的局限性:①仅聚焦于一种典型的降雨强度和单一坡度下的降雨侵蚀过程,未能全面考虑不同降雨条件与坡度变化对土壤侵蚀的影响;②在建模过程中将三维坡面简化为二维分析,可能忽略了坡面复杂性的影响;③坡面植被覆盖度是通过影像识别技术进行测量,尽管这种方法具有较高的效率,但其在不同地形和气候下的适用性仍需进一步验证;④通过人工试错法率定模型参数,效率低下且科学性较低。未来的研究可以在这些方面进行补充与改进。

参考文献(References)

[1] 闫超,王红雨.含挖填界面边坡三维稳定性上限分析[J].岩土工程学报,2024,46(1):174-181.
Yan Chao, Wang Hongyu. Three-dimensional stability of slopes with cut-fill interface based on upper-bound limit analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024,46(1):174-181.

[2] 杨文博,刘娜,蔡强国,等.水力侵蚀对土壤碳循环及土壤微生物多样性影响的研究进展[J].水土保持学报,2024,38(1):14-21.
Yang Wenbo, Liu Na, Cai Qiangguo, et al. Research progress on the effects of hydraulic erosion on soil carbon cycle and soil microbial diversity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):14-21.

[3] Xia Chuanan, Tong Juxiu, Hu B X, et al. Assessment of alternative adsorption models and global sensitivity analysis to characterize hexavalent chromium loss from soil to surface runoff [J]. Hydrological Processes, 2018, 32(20):3140-3157.

[4] Guan Dawei, Zhang Xuefen, Meng Hao, et al. Review of soil solidification methods in scour and erosion control [J]. International Journal of Sediment Research, 2025,40(6):919-934.

[5] Zhu Yanan, Lou Yibao, Wang Wenlong, et al. Effects of three plant root systems on rill erosion characteristics on coal dump slopes under simulated experiments [J]. International Journal of Sediment Research, 2025, 40(5):718-728.

[6] 段金贵,王怀星,姚姬璇,等.黄土坡面的微生物矿化加固及抗侵蚀性能试验研究[J].水土保持通报,2022,42(5):33-40.
Duan Jingui, Wang Huaixing, Yao Jixuan, et al. Experimental study on microbial mineralization reinforcement and erosion resistance of loess slope surface [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):33-40.

[7] Dubey A A, Dhami N K, Ravi K, et al. Erosion mitigation with biocementation: A review on applications, challenges, & future perspectives [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2023,22(4):1059-1091.

[8] Zhang Yu, Tang Qiang, Shi Peixin, et al. Influence of bio-clogging on permeability characteristics of soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021,49(3):707-721.

[9] 郑俊杰,宋杨,吴超传,等.低胶结水平MICP固化砂土

脆性评价方法研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(11):96-101.
Zheng Junjie, Song Yang, Wu Chaochuan, et al. Study on evaluation method of brittleness of MICP treated sand with low cementation level [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,48(11):96-101.

[10] 张茜,叶为民,刘樟荣,等.基于生物诱导碳酸钙沉淀的土体固化研究进展[J].岩土力学,2022,43(2):345-357.
Zhang Qian, Ye Weimin, Liu Zhangrong, et al. Advances in soil cementation by biologically induced calcium carbonate precipitation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022,43(2):345-357.

[11] Al Imran M, Gowthaman S, Nakashima K, et al. The influence of the addition of plant-based natural fibers (jute) on biocemented sand using MICP method [J]. Materials, 2020,13(18):4198.

[12] Jiang Yi, Liu Song, Cai Changshui, et al. Microbially induced carbonate precipitation balances survival and function: Driven heavy metal remediation and plant growth promotion by *Enterobacter ludwigii* N15 [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025,498:139970.

[13] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. Transactions of the ASAE, 1989,32(5):1587-1593.

[14] DE ROO A P J, Wesseling C G, Ritsema C J. Lisem: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins: Ⅰ. Theory, input and output [J]. Hydrological Processes, 1996,10(8):1107-1117.

[15] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European soil erosion model (EUROSEM): Adynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998,23(6):527-544.

[16] Wang Tian, Hou Jingming, Li Jingsi, et al. A novel two-dimensional numerical model developed for slope soil erosion [J]. Catena, 2023,232:107387.

[17] 刘诗雅,刘家庆,周成,等.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[J].岩土工程学报,2022,44(增刊1):29-34.
Liu Shiya, Liu Jiaqing, Zhou Cheng, et al. Experimental study on water and soil retention of slopes by MICP surface mineralization combined with vegetation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S1):29-34.

[18] 王浩,李流芳,严华祥,等.边坡植被恢复中微生物固化生态基材的配方优化[J].水土保持通报,2025,45(2):159-170.
Wang Hao, Li Liufang, Yan Huaxiang, et al. Optimization of microbial-enhanced ecological substrate formulations for slope vegetation restoration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(2):159-170.

[19] 刘春,许强,施斌,等.岩石颗粒与孔隙系统数字图像识别方法及应用[J].岩土工程学报,2018,40(5):925-931.
Liu Chun, Xu Qiang, Shi Bin, et al. Digital image recognition method of rock particle and pore system and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018,40(5):925-931.

[20] Weill S, Mouche E, Patin J. A generalized Richards equation for surface/subsurface flow modelling [J]. Journal of Hydrology, 2009,366(1/2/3/4):9-20.

[21] Tian Dongfang, Liu Defu. A new integrated surface and subsurface flows model and its verification [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011,35(7):3574-3586.

[22] Gerke H H, van Genuchten M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media [J]. Water Resources Research, 1993,29(2):305-319.

[23] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.

[24] 年庚乾,陈忠辉,张凌凡,等.边坡降雨入渗问题中两种边界条件的处理及应用[J].岩土力学,2020,41(12):4105-4115.
Nian Gengqian, Chen Zhonghui, Zhang Lingfan, et al. Treatment of two boundary conditions for rainfall infiltration in slope and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020,41(12):4105-4115.

[25] Liu Weiping, Sun Jiaxing, Gui Bin, et al. Experimental study on splash erosion resistance of granite residual soil improved by microbially induced carbonate precipitation [J]. Soil and Tillage Research, 2025,254:106758.

[26] Brandt C J. The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies [J]. Catena, 1989,16(4/5):507-524.

[27] Zhang Ruijin, Xie Jianheng. Sedimentation research in China: systematic selections [M]. Beijing: China Water and Power Press, 1993.

[28] Rauws G, Covers G. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils [J]. Journal of Soil Science, 1988,39(1):111-124.

[29] Wang Hao, Yan Xuan, Nikolaev P, et al. Peridynamic modelling of preferential flow in unsaturated fractured soil considering capillary barrier effects [J]. Journal of Hydrology, 2026,664:134628.

[30] Li Jing, Li Zhanbin, Guo Mengjing, et al. Effects of urban grass coverage on rainfall-induced runoff in Xi'an loess region in China [J]. Water Science and Engineering, 2017,10(4):320-325.