

黄土坡面的微生物矿化加固及抗侵蚀性能试验研究

段金贵¹, 王怀星², 姚姬璇¹, 王昕宇², 赵晓娟¹, 白旭龙¹, 田堪良^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究黄土坡面的微生物矿化加固及抗侵蚀性能, 为该区域坡面土壤侵蚀的防治提供防治技术。[方法] 采用微生物矿化技术对黄土坡面进行加固, 通过光学显微镜和扫描电子显微镜(SEM), 从微观角度探究微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术对黄土坡面矿化加固的作用机制, 并结合室内人工模拟降雨测试分析了加固坡面的抗侵蚀性能。[结果] 采用微生物矿化技术固化黄土坡面, 能够有效提高坡面的抗侵蚀性能; 随着固化处理次数的增加, 固化层厚度逐渐增加, 坡面渗透性逐渐降低, 坡面总产流量逐渐增加, 从 38.5 L/h 增加到 44.4 L/h, 增加了 15.6%, 而坡面总产沙量逐渐减少, 从 480.64 g/h 减少到 17.1 g/h, 减少了 96.5%。固化处理 7 次及以上的坡面, 经雨强为 120 mm/h 的降雨持续冲刷 1 h, 坡面均没有发生明显的土壤侵蚀, 坡面径流量与径流含沙量几乎不随降雨历时的增加而变化, 分别稳定在 0.72~0.74 L/min 和 0.001~0.002 g/ml 之间。固化处理次数达 7 次及以上时, 固化处理次数对总产沙量有显著影响, 随着固化处理次数的增加, 总产沙量不断减小。[结论] MICP 技术可为黄土丘陵沟壑区临时和永久边坡土壤侵蚀的防治, 黄土坡面的加固提供新方法和新技术, 具有较广阔的实际应用前景。

关键词: 黄土坡面; 微生物矿化; 加固技术; 人工模拟降雨; 抗侵蚀性能

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0033-08

中图分类号: S157.1, S423+.9

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.005; 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.

Experimental Study on Microbial Mineralization Reinforcement and Erosion Resistance of Loess Slope Surface

Duan Jingui¹, Wang Huaixing², Yao Jixuan¹,

Wang Xinyu², Zhao Xiaojuan¹, Bai Xulong¹, Tian Kanliang^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese

Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The microbial mineralization reinforcement and erosion resistance of loess slope were studied in order to provide technology for the prevention and control of slope soil erosion in this region. [Methods] Microbial mineralization technology was used to reinforce a loess slope. The mechanism of microbially induced calcite precipitation (MICP) technology on the mineralization and reinforcement of a loess slope was determined from a microscopic point of view with the use of an optical microscope and a scanning electron microscope. Erosion resistance of the reinforced slope was analyzed combined with an indoor simulated rainfall test. [Results] The erosion resistance of a loess slope could be effectively improved by using microbial mineralization technology to solidify the loess slope. As curing times increased, the thickness of the cured layer gradually increased. The permeability of the slope gradually decreased, and the total production flow gradually increased from 38.5 to 44.4 L/h, with an increase ratio of 15.6%. At the same time, total sediment

收稿日期: 2022-03-02

修回日期: 2022-03-29

资助项目: 国家重点研发计划“黄土丘陵沟壑区沟道及坡面治理工程的生态安全保障技术与示范”(2017YFC0504703); 国家重点研发计划(2016YFE0203400); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTDZ03-03-01)

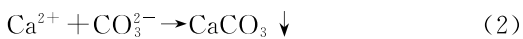
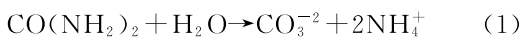
第一作者: 段金贵(1997—), 男, 甘肃省庆阳市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程及技术研究。Email: djingui@163.com。

通信作者: 田堪良(1968—), 男, 陕西省周至县人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水土保持科学及工程技术研究。Email: tiankanliang@163.com。

yield gradually decreased from 480.64 to 17.1 g/h, with a decrease of 96.5%. No obvious soil erosion occurred on the slope after seven solidification treatments and one hour of continuous scouring with a rainfall intensity of 120 mm/h. The runoff and sediment concentration on the slope hardly changed with increased rainfall duration, and were stable between 0.72 and 0.74 L/min and between 0.001 and 0.002 g/ml, respectively. When the number of curing treatments reached seven or more, the number of curing treatments had a significant effect on total sediment yield, and total sediment yield decreased with increasing number of curing treatments. [Conclusion] MICP technology provides a new method and technology for reinforcement of loess slopes in the loess hilly and gully region that will prevent and control soil erosion on temporary and permanent slopes. This technology would be certain to have practical applications.

Keywords: loess slope surface; microbial mineralization; strengthening technique; artificial rainfall; erosion resistance

随着社会经济快速发展,中国黄土丘陵沟壑区在工程建设过程中出现大面积裸露黄土边坡,导致坡体稳定性变差,再加上降雨的冲刷,人类活动和冻融等影响,极易发生重力侵蚀、垮塌、滑坡、崩塌等水土流失现象^[1-3],使得黄土丘陵沟壑区成为中国生态环境极其脆弱的地区之一,严重威胁当地居民生命财产安全,制约黄土区经济和农业的可持续发展^[4-6]。传统的黄土边坡加固和防护措施在黄土丘陵区得到了广泛的应用并取得了良好的成效,但是存在施工复杂、费用高昂、工程量以及周期长等不足之处^[7-8]。因此,向成本低、周期短、施工简单易行的坡面加固技术转变有着重要的意义。微生物诱导碳酸钙沉淀(microbially induced calcite precipitation, MICP)是近年来兴起的一种新型微生物矿化加固技术,该技术利用脲酶菌等微生物通过自身一系列新陈代谢活动后产生脲酶,尿素在脲酶催化作用下水解生成碳酸根离子和铵根离子,在引入游离的钙离子后发生化学反应,生成碳酸钙结晶,将松散的相邻土壤颗粒胶结在一起,从而可以提高黄土坡面的强度和黄土边坡的稳定性^[9-11]。



袁翔等^[12]利用 MICP 技术对巴东组第三段软弱夹层土体进行固化处理,结果发现采用 MICP 技术可以改良岩土体的工程地质性质;李驰等^[13]利用 MICP 技术对内蒙古乌兰布和沙漠地区进行了表层覆膜固化试验,发现利用 MICP 技术可在沙漠表面形成一层稳定强度和厚度的保护膜;景天宇等^[14]利用 MICP 技术对黄河泥沙进行了加固,发现可提升泥沙的无侧限抗压强度和抗剪强度。Bernardi 等^[15]采用在沙土中注入细菌和营养液的方法,诱导生成碳酸钙沉淀将砂颗粒胶结在一起,制成的微生物矿化胶结砖的抗压强度可以控制达到 1 MPa 到 2 MPa;吴超传等^[16]研

究发现,固化沙土的强度与胶结水平呈正相关,固化沙土的强度越高,其脆弱性越明显;张世参等^[17]利用 MICP 技术对风积沙沙柱进行加固试验,发现沙柱不同深度的无侧限抗压强度不同,在(0.43~7.13) MPa 之间;杨恒等^[18]先在红黏土中加入活性炭,再利用 MICP 技术进行固化处理,发现活性炭的孔隙特性为微生物提供了良好的生存环境,为 CaCO_3 沉淀提供附着点位,从而增强了固化效果;王怀星^[19]利用 MICP 技术对黄土坡面进行矿化固化处理,结果发现 MICP 技术可以提高黄土坡面的强度,坡面的渗透系数降低,经过 4 次及以上固化处理的坡面,与原状黄土坡面相比,其渗透系数最大减少 90% 以上。

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术已经较为成熟,上述研究中,MICP 技术的应用研究主要集中在砂土等粗粒土方面,对黄土坡面矿化加固的研究较少。基于此,本试验研究以黄土坡面为研究对象,采用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术对黄土坡面进行不同固化处理,利用光学显微镜和扫描电子显微镜(SEM),从微观角度探究 MICP 技术对黄土坡面矿化加固的作用机制,并结合室内人工模拟降雨试验,研究不同固化处理条件下黄土坡面的抗侵蚀性能,以期对黄土坡面加固和土壤侵蚀防治提供新方法和新技术。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 巴氏芽孢杆菌 试验所用的细菌为巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*),编号 ATCC 11859,源自美国菌种保藏中心。因固化黄土边坡需要大量的巴氏芽孢杆菌菌液,菌种经过活化后,进行培养扩繁,采用大豆胰蛋白胨琼脂培养基(CASOAGAR),配比为:尿素 20 g,琼脂 20 (仅在固体培养基中添加),酪蛋白胨 15 g,大豆蛋白胨 5 g,氯化钠 5 g,蒸馏

水 1 L。在温度 30 ℃, 转速 200 rpm 的振荡培养箱中恒温培养 48 h。培养好的菌液呈浅黄色, 放入 4 ℃ 的冰箱保存备用。

在巴氏芽孢杆菌培养过程中, 利用可见光分光光度计测定菌液中细菌的浓度, 即菌液在波长 600 nm 的吸光度 (OD600), 并同时利用 pH 计测定菌液的 pH 值, 间隔 2 h 测定一次, 每次测定 3 个重复, 取均值, 测得 0—46 h 内菌液的 pH 值与 OD600 值随培养时间的变化结果 (图 1)。由图 1 可知, 菌液的 pH 值和 OD600 值随培养时间的变化趋势基本相同, 菌液 pH 值在 2—6 h 内迅速增长, 6—32 h 增长速度减缓, OD600 值在 2—32 h 内迅速增长, 而且两者都在 32 h 后进入稳定期, 最终 pH 值稳定在 9.1, OD600 值稳定在 2.14。

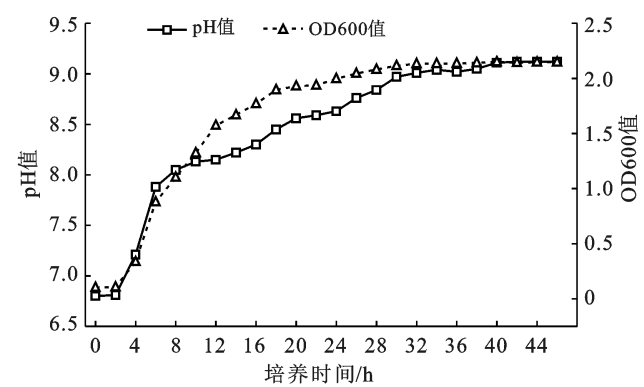


图 1 菌液 pH 值与 OD600 值随培养时间变化特征

1.1.2 胶结液 在固化试验中, 需要加入胶结液, 胶结液的作用主要是为 MICP 过程提供尿素和钙源, Abo-El-Enin 等^[20] 研究发现使用氯化钙作为钙源能够得到更好的固化效果, 根据尿素水解的化学反应方程式可知, 消耗的氯化钙和尿素的物质的量应相等, 最佳摩尔比为 1 : 1。王怀星^[19] 利用 MICP 技术对黄土坡面固化后发现, 采用 1.2 mol/L 的氯化钙和尿素混合溶液固化黄土坡面效果最好。故本试验中胶结液的浓度为 1.2 mol/L 的氯化钙和尿素的混合溶液。

1.1.3 土壤 试验所用土壤采样点位于陕西省延安市宝塔区李渠镇羊圈沟村 (109°31'E, 36°42'N), 所取土壤为黄绵土, 天然含水率 12%; 干密度 1.3 g/cm³; 容重 1.35 g/cm³; pH 值 7.22。土壤粒径机械组成: 黏粒 ($d \leq 0.005$ mm) 16.66%, 粉粒 (0.005 mm $\leq d \leq 0.075$ mm) 73.36%, 砂粒 (0.075 mm $\leq d \leq 0.25$ mm) 9.98%。

1.2 试验方法

1.2.1 黄土的微生物固化试验 试验于 2020 年 9—11 月在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。试验之

前先将土样过 10 mm 筛, 除去土样中的杂质和石块, 用喷壶向土样中加水并拌匀, 覆盖塑薄膜静置 24 h, 使土样恢复天然含水率 12%。试验所用土槽为铁质土槽, 土槽规格为: 长 1 m, 宽 0.5 m, 高 0.3 m。装填土样前, 先在土槽内垫一层无纺布, 装填土样高度为 25 cm, 分 5 层进行装填, 控制土壤容重为 1.51 g/cm³, 每层装填土样 37.75 kg。总共制样 6 个。土样装填完成以后, 覆盖塑料薄膜静置 24 h, 使土体内部的含水率分配均匀, 静置 24 h 后, 使用菌液对 6 个土样进行固化处理, 固化处理次数分别为 0, 1, 3, 5, 7, 9 次, 并在土槽外壁分别编号 A₀, A₁, A₃, A₅, A₇, A₉, 其中 A₀ 为对照组。固化所需要的菌液体积和胶结液体积相等, 固化过程中, 首先用喷壶将菌液均匀喷洒在土样表面, 覆盖塑料薄膜静置 2 h, 让菌液更好地渗入土样内, 静置 2 h 后再喷洒胶结液, 喷洒完成后覆盖塑料薄膜, 静置一段时间, 让细菌和胶结液充分反应, 再进行下一次固化处理, 固化处理 3 次及以下, 每次处理间隔时间为 24 h, 处理 3 次以上, 每次处理间隔 48 h。

1.2.2 人工模拟降雨试验 人工模拟降雨试验在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的人工模拟降雨大厅进行, 降雨采用下喷式降雨系统, 降雨高度为 18 m, 能够模拟自然降雨状态下雨滴到达地面的终点速度, 降雨覆盖面积为 27 m × 18 m, 最大连续工作时间为 12 h, 降雨强度可变范围: 40~260 mm/h, 降雨均匀度 > 80%^[21]。固化处理完成以后, 进行人工模拟降雨, 调整土槽倾斜角度为 30°, 模拟坡度为 30°的黄土边坡。采用降雨强度为 120 mm/h, 为了确保降雨强度的准确性, 在试验开始前对降雨强度进行校准, 当降雨均匀度 > 80%, 实际降雨强度与设定降雨强度误差不超过 5% 时开始正式降雨试验。当坡面产流时开始计时, 每 3 min 用集流桶收集一次径流泥沙样品, 总降雨历时为 1 h。降雨试验结束后, 关闭降雨设备, 测量集流桶的总质量, 静置 12 h 后, 倒掉上清液, 将剩余的泥水倒入标记并称重过的金属铝盒内, 放入烘箱烘干, 称量得到泥沙质量。

1.3 数据统计与分析

利用 Excel 2016 软件对试验数据进行整理与分析, 利用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

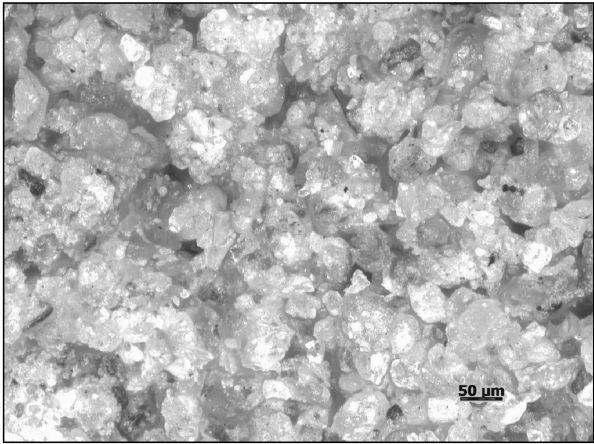
2.1 黄土的微生物固化效果

固化处理完成以后, 在黄土坡面上形成了不同厚度的固化层, 对固化层的厚度测量后发现, 随着固化

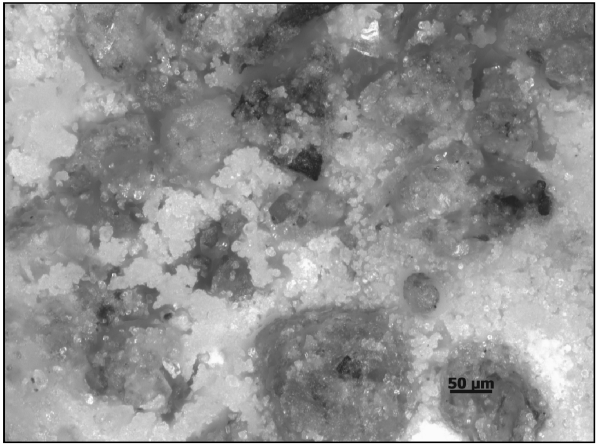
处理次数的增加,固化层的厚度逐渐增加,最大厚度为 0.2 cm。随着固化处理次数的增加,固化层中碳酸钙的生成量逐渐增大,固化坡面的渗透性随着固化处理次数的增加而逐渐降低,最终稳定在 7.00×10^{-5} cm/s,固化层的干密度随着固化处理次数的增加而逐渐增大,最大值为 1.55 g/cm^3 。

为了进一步探究固化处理前后黄土试样内部结构变化和生成的 CaCO_3 晶体的分布情况。利用蔡司 AXIO Scope.A1 型光学显微镜将试样放大 200 倍,得到固化处理前后黄土试样表面形态的变化情况(图 2)。由图 2 可知,没有进行固化处理的黄土表面土壤颗粒松散,颗粒之间相互分离,没有连接成为一

个整体,因土壤中存在不同类型的矿物而呈现不同的颜色(图 2a)。固化处理后的黄土表面生成大量白色的方解石晶体,土壤颗粒之间的空隙被方解石晶体填充,将相邻松散的土壤颗粒胶结在一起,在黄土表面形成致密的固化层(图 2b)。利用 JSM-6360 LV 型扫描电子显微镜(SEM)对固化处理试样分别放大 500 倍和 2 000 倍后得到电子显微镜图像(图 3)。由图 3 可知,固化处理后,在黄土颗粒表面及松散的土壤颗粒之间的空隙中生成大量的方解石晶体,将相邻的土壤颗粒连接在一起,生成的方解石晶体大致呈斜方六面体型,直径在 $3\sim 8\text{ }\mu\text{m}$ 之间,并且在方解石晶体表面和内部有大量巴氏芽孢杆菌死亡后留下的孔洞。

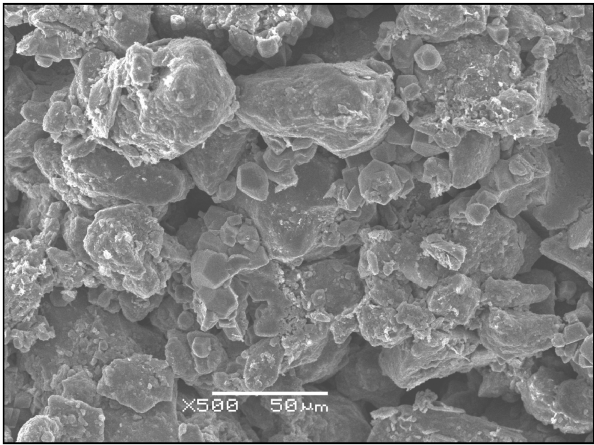


a 固化处理前

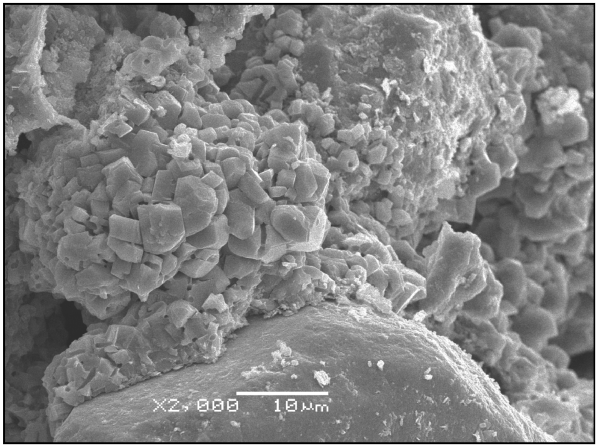


b 固化处理后

图 2 黄土坡面固化处理前后光学显微镜($\times 200$)图像



a 固化处理前($\times 500$)



b 固化处理后($\times 2\,000$)

图 3 黄土坡面固化处理后的扫描电子显微镜(SEM)图像

经过雨强为 120 mm/h 的降雨持续冲刷 1 h 后,对黄土坡面的形态进行观察(图 4)。由图 4 可知,没有进行固化处理的坡面在降雨冲刷作用下,随着降雨历时的增加,坡面逐渐出现细沟,进而演化成细沟侵

蚀,坡面的完整性遭到了破坏,变得凹凸不平(图 4a)。然而进行固化处理的坡面基本保持完整,在整个降雨历时内,坡面上几乎没有出现细沟,而且在坡面上可以明显看到大片的白色的方解石晶体(图 4b)。

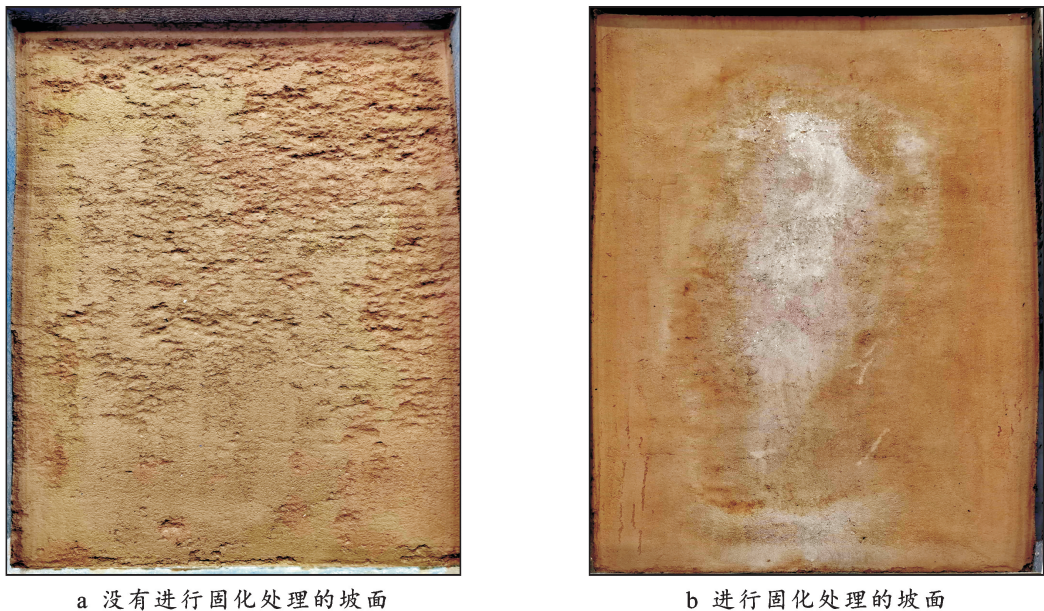


图 4 降雨冲刷后黄土坡面形态

2.2 径流量和径流含沙量随降雨历时的变化

2.2.1 径流量随降雨历时的变化 径流量随降雨历时的变化如图 5 所示。由图 5 可知,在整个降雨历时的增加而增加,最终都趋于一个定值。

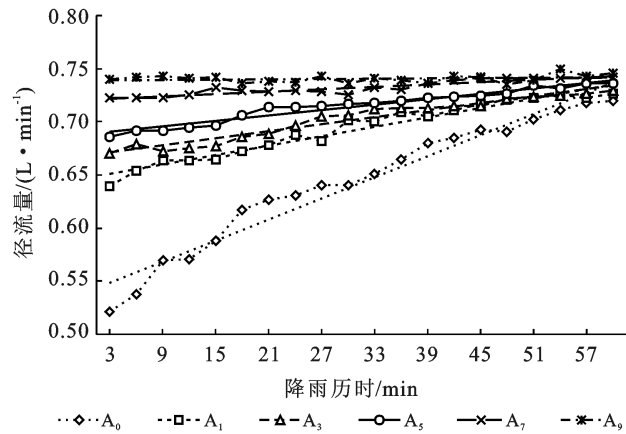


图 5 固化处理黄土径流量随降雨历时的变化特征

在降雨初期, A₀ 处理组产生的径流量最少,为 0.52 L/min,随着降雨历时增加,其径流量迅速增加,最终径流量稳定在 0.71 L/min 左右,其余处理组径流量随降雨历时的变化趋势与 A₀ 处理组相似,径流量与降雨历时均呈现正相关关系,当固化处理次数达 7 次及以上,其径流量几乎没有发生变化,从降雨初期到降雨结束,基本稳定在 0.72~0.74 L/min 之间。造成整个降雨历时长径流量的这种变化趋势的原因是不进行固化处理的黄土坡面在降雨前期土体内部的水分未达到饱和状态,其渗透性明显比固化处理后的坡面大,所以在降雨初期径流量比较小,随着降雨历

时的增加,土体水分逐渐饱和,同时,在降雨雨滴击溅作用下,疏松的表土逐渐变得密实形成表土结皮层^[22],形成超渗产流,坡面径流量随之迅速增大。对于固化处理的坡面,由于固化处理后在坡面形成固化层,且固化层的厚度和强度随固化处理次数的增加而增加,相对应的渗透性随之变小,所以,在整个降雨历时长,各固化处理组的径流量比 A₀ 处理组的净流量都大。

2.2.2 径流含沙量随降雨历时的变化 径流含沙量随降雨历时的变化如图 6 所示。由图 6 可知,在整个降雨时段内,径流含沙量随着降雨历时的增加而增加,最终趋于稳定值,在降雨初期, A₀ 处理组的径流含沙量最大,为 0.007 3 g/ml,随着降雨历时的增加而迅速增长,最终稳定在 0.014 g/ml 左右。

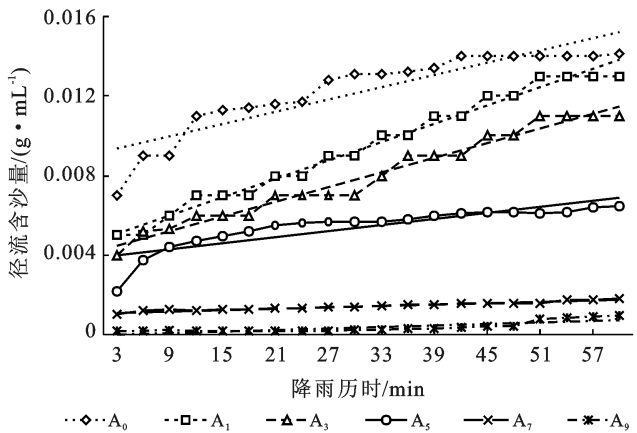


图 6 固化处理黄土径流含沙量随降雨历时的变化特征

在整个降雨历时长,固化处理次数达 7 次及以上的坡面径流含沙量基本没有发生变化,稳定在 0.001

~0.002 g/ml 之间。 A_1 和 A_3 处理组在降雨 30 min 后, 径流含沙量迅速增加, 最终趋于稳定值, 原因是固化处理 1 次和 3 次的坡面形成的固化层厚度薄, 强度弱, 随着降雨的冲刷, 在降雨后期, 固化层被破坏, 坡面出现细沟, 径流含沙量迅速增加。

2.3 固化黄土的抗侵蚀性能

2.3.1 固化处理次数对总产流量的影响 黄土坡面在降雨历时内产生的总产流量随固化处理次数的变化如图 7 所示。由图 7 可知, 随着固化处理次数的增加, 坡面总产流量逐渐增加, 与 A_0 处理组的坡面总产流量 38.5 L/h 相比较, 其他固化处理组的坡面总产流量分别为 41.6, 42.1, 42.8, 43.9, 44.4 L/h, 分别增加 8.1%, 9.3%, 11.2%, 11.4%, 15.3%。其中, A_9 处理组的坡面总产流量变化幅度最大, 为 15.3%。固化处理次数达 3 次及以上的坡面总产流量的变化幅度不大。产生上述结果的原因是没有固化处理的黄土坡面, 由于黄绵土自身疏松多孔, 增加了坡面降雨的入渗, 从而减少坡面径流量的产生, 随着固化处理次数的增加, 巴氏芽孢杆菌与胶结液反应生成的碳酸钙结晶充满土壤空隙, 将相邻土壤颗粒胶结在一块, 在坡面上形成致密的固化层, 使得坡面土壤的渗透性降低, 减少了坡面降雨的入渗, 从而使得坡面径流量增加, 坡面总产流量增加。

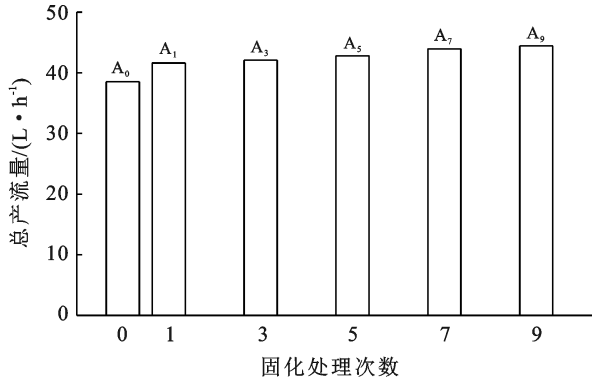


图 7 不同固化处理次数下黄土坡面总产流量变化

2.3.2 固化处理次数对总产沙量的影响 黄土坡面在降雨历时内的总产沙量随固化处理次数的变化如图 8 所示。由图 8 可知。随着固化处理次数的增加, 坡面总产沙量逐渐减少, 其中, 没有进行固化处理的坡面总产沙量最大, 为 480.64 g/h, 其他处理组的总产沙量分别为 402.48, 343.2, 232.41, 63.73, 17.1 g/h。与 A_0 相比较, 分别减少 16.3%, 28.6%, 51.7%, 86.8%, 96.5%。固化处理次数达 7 次及以上的坡面, 其坡面总产沙量下降幅度都很大, 其中 A_9 处理组的下降幅度最大, 达 96.5%。原因是没有进行固化处理

的坡面, 坡面自身抗冲刷能力弱, 随着降雨的进行, 在坡面径流的冲刷作用下, 在降雨试验过程中发现坡面逐渐出现细沟, 进而形成细沟侵蚀, 细沟侵蚀中径流的冲刷作用远大于坡面径流的冲刷作用^[23], 导致产沙量最大。与 A_0 处理组相比较, A_1 和 A_3 处理组总产沙量仅减少 16.3% 和 28.6%, 原因是进行 1 次和 3 次固化处理的坡面, 在坡面上形成的固化层比较薄, 强度不大, 随着坡面径流的冲刷, 在降雨试验后期, 坡面上同样也出现了细沟, 继而发展为细沟侵蚀, 然而在试验过程中固化处理次数达 7 次及以上的坡面上几乎没有出现细沟, 坡面基本保持完整。表明随着固化处理次数达 7 次及以上, 坡面形成的固化层厚度越厚, 强度越大, 不易形成细沟侵蚀, 其总产沙量比 A_0 处理组明显减少。

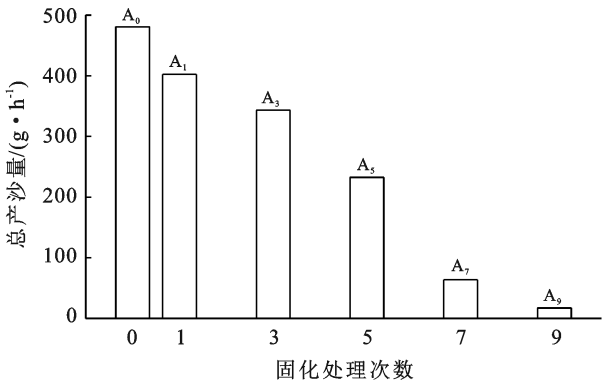


图 8 不同固化处理次数下黄土坡面总产沙量变化

2.4 总产流量与总产沙量的关系

将不同固化处理坡面的总产流量与总产沙量进行多项式拟合, 得到拟合结果见图 9。由图 9 可知, 总产流量与总产沙量之间呈现二次函数关系, 在整个降雨试验中, 没有进行固化处理的黄土坡面总产流量最小, 为 39.5 L/h, 但其总产沙量却最大, 为 0.48 kg/h。对于固化处理的黄土坡面, 随着固化处理次数的增加, 总产流量增大, 总产沙量减少, 其中 A_9 处理组总产流量最大, 总产沙量最小。产生上述结果的原因在于, 在降雨开始阶段, 没有进行固化处理的黄土坡面的土壤颗粒在降雨雨滴的击溅作用下, 被溅起和分散, 随着坡面径流的冲刷作用被剥离和搬运, 直至随径流转移到出水口断面外^[24]。同时, 由于没有进行固化处理的坡面其渗透性较好, 在降雨开始阶段, 当降雨雨滴到达坡面后, 更容易渗入土体, 从而导致坡面产流较少, 而经过固化处理的坡面所形成的固化层, 能够抵挡雨滴的溅蚀破坏, 使得总产沙量较小, 但是固化坡面的渗透性降低, 降雨入渗减少, 导致总产流量较大。

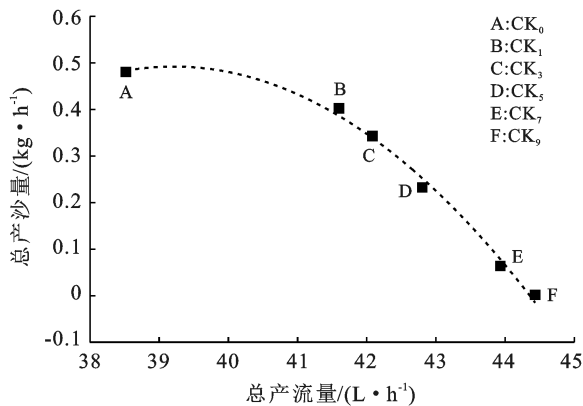


图9 固化处理坡面总产流量与总产沙量的关系

3 讨论

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术在固化砂土方面研究较多,黄土边坡的微生物矿化加固研究较少,本研究结果表明,固化处理的黄土坡面能生成大量白色的方解石晶体,这些方解石晶体充满土壤空隙,将松散的相邻土壤颗粒胶结在一起,在黄土坡面形成一层致密的固化层,从而提高了坡面的抗侵蚀性能,并且随着固化处理次数的增加,固化层的厚度、干密度、碳酸钙的生成量都逐渐增大,坡面的渗透性逐渐减小,这与胡乾亮^[25]研究结果相类似。坡面产流产沙受到多个因素的共同作用^[26],本研究结果表明,随着固化次数的增加,坡面总产流量逐渐增大,总产沙量逐渐减少,固化处理7次及以上的坡面可以抵抗雨强120 mm/h的降雨持续冲刷1 h以上。在降雨前期,各处理组的坡面都比较完整,随着降雨的进行,没有进行固化处理的坡面逐渐出现细沟,进而演化为细沟侵蚀,导致产沙量迅速增加。固化处理次数达5次及以上的坡面,从降雨开始直至结束,坡面几乎没有出现细沟,所以其总产流量和总产沙量基本保持不变。研究表明,微生物矿化加固黄土坡面,可以有效地防治坡面侵蚀。

在黄土丘陵沟壑区,降雨是诱发黄土边坡失稳的主要因素之一,降雨入渗会导致边坡土体的含水率增大、强度降低、而自重增加,因此易发生滑坡^[27]。采用微生物固化处理加固黄土坡面,可有效降低土体的渗透系数,减少坡面的降雨入渗,同时,提高了黄土坡面的强度,从而提高了黄土边坡的稳定性。因此,微生物矿化加固黄土坡面为黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀及滑坡的防治提供了新方法和新技术,具有一定的实际应用价值。

MICP技术对于黄土丘陵沟壑区临时边坡的防治是一种良好的选择,首先对坡面进行平整压实处理后,可以直接对坡面进行固化处理,结合本试验研究

结果、固化成本、周期、固化效果等,建议固化处理次数为5次及以上,固化厚度达2 mm及以上,固化完成后,为了进一步提高临时坡面防治效果,在固化坡面上种植能在短时间内恢复的草本等。对于永久边坡的防治也可以利用MICP技术进行固化处理,并在固化坡面上种植草本、乔木和灌木相结合的植被,将MICP技术与林草措施相结合,从而达到持续有效的综合防治效果。而且微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术在固化坡面过程中,不会产生对环境有害的污染物,节能环保,还具有施工简单、成本低廉、耐久性好等优点,适合推广应用。

4 结论

(1) 采用微生物矿化加固黄土坡面,可在坡面表层土体中生成方解石晶体,将松散的土壤颗粒胶结在一起,形成致密的固化层,提高了坡面土体的整体强度,降低了渗透性,可有效提高坡面的抗侵蚀性能和边坡稳定性。

(2) 随着固化处理次数增加,坡面固化层的厚度逐渐增加,最大厚度为2 mm,坡面渗透性逐渐降低,渗透系数减小为 7.00×10^{-5} cm/s。

(3) 固化处理次数越多,坡面总产流量越大,从38.5 L/h增加到44.4 L/h,增加15.6%。坡面总产沙量越小,从480.64 g/h逐渐减少到17.1 g/h,减少96.5%。

(4) 当固化处理次数小于6次时,坡面径流量和径流含沙量随降雨历时的增加而增加,降雨后期增长缓慢并趋于稳定,固化处理次数达7次及以上时,坡面径流量与径流含沙量几乎不随降雨历时的增加而变化,稳定在0.72~0.74 L/min和0.001~0.002 g/ml之间。

(5) MICP技术为黄土丘陵沟壑区临时和永久边坡土壤侵蚀的防治,坡面加固以及滑坡的防治提供新方法和新技术,具有一定的实际应用价值和推广前景。

[参 考 文 献]

- [1] 刘慧,李振国,宋万增,等.边坡固结植生生态防护技术试验研究及应用[J].人民黄河,2020,42(9):151-154.
- [2] 曹永强,倪广恒,胡和平.水利水电工程建设对生态环境的影响分析[J].人民黄河,2005,27(1):56-58.
- [3] 裴向军,袁广,张晓超,等.坡脚开挖诱发滑坡机理:以沙井驿滑坡为例[J].山地学报,2017,35(2):195-202.
- [4] 邱海军,崔鹏,胡胜,等.陕北黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡频率分布[J].地球科学,2016,41(2):343-350.
- [5] Guo Zhonglu, Ma Meijing, Cai Chongfa, et al. Combined effects of simulated rainfall and overland flow on sediment and solute transport in hillslope erosion [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018,18(3):1120-1132.

- [6] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.黄土丘陵沟壑区黄土坡面侵蚀过程及其影响因素[J].应用生态学报,2021,32(8):2886-2894.
- [7] 赵宽耀,许强,亓星,等.甘肃黑方台黄土滑坡类型及其发育特征研究[J].人民长江,2016,47(14):46-50.
- [8] 许元珺,谷天峰,王家鼎,等.黄土裂隙的漫灌效应对斜坡稳定性的影响分析[J].水文地质工程地质,2017,44(4):153-159.
- [9] Çabalar A F. Discussion of “biological considerations in geotechnical engineering” by James K. Mitchell and J. Carlos santamarina [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007,133(4):485.
- [10] 崔明娟,郑俊杰,赖汉江.菌液注射方式对微生物固化砂土动力特性影响试验研究[J].岩土力学,2017,38(11):3173-3178.
- [11] 刘鹏,邵光辉,黄容聘.微生物沉积碳酸钙胶结砂土力学特性及本构模型[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(4):720-726.
- [12] 袁翔,滕伟福,俞伟,等.MICP 技术对巴东组第三段软弱夹层土体的加固试验研究[J].安全与环境工程,2021,28(5):101-106.
- [13] 李驰,王硕,王燕星,等.沙漠微生物矿化覆膜及其稳定性的现场试验研究[J].岩土力学,2019,40(4):1291-1298.
- [14] 景天宇,姜哈琳,李振山.微生物诱导碳酸钙沉淀固结黄河泥沙试验研究[J].人民黄河,2019,41(11):11-16.
- [15] Bernardi D, DeJong J T, Montoya B M, et al. Bio-bricks: Biologically cemented sandstone bricks [J]. Construction and Building Materials, 2014,55:462-469.
- [16] 吴超传,郑俊杰,赖汉江,等.微生物固化砂土强度增长机理及影响因素试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(1):31-38.
- [17] 张世参,骆亚生,田堪良,等.风积沙的微生物固化试验研究[J].人民黄河,2021,43(10):144-149.
- [18] 杨恒,陈筠,白文胜,等.活性炭固定微生物固化贵阳红黏土力学特性[J].中国岩溶,2019,38(4):619-626.
- [19] 王怀星.黄土的微生物固化及抗侵蚀性能试验研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2021.
- [20] Abo-El-Enin S A, Ali A H, Talkhan F N, et al. Utilization of microbial induced calcite precipitation for sand consolidation and mortar crack remediation [J]. HBRC Journal, 2012,8(3):185-192.
- [21] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J].水土保持研究,2004,11(4):177-178.
- [22] 牛永振,李张楠,栾清华,等.不同坡面单元人工降雨产流试验与分析[J].科学技术与工程,2021,21(20):8389-8394.
- [23] 周凡凡,高建恩,王照润,等.坡面降雨径流侵蚀输沙的不平衡特性研究[J].水土保持学报,2021,35(6):95-100.
- [24] 付兴涛,王奇花,王锦志.降雨条件下晋西黄绵土坡面室内外径流侵蚀试验差异分析[J].农业工程学报,2021,37(1):116-124.
- [25] 胡乾亮.降雨对固化黄土边坡稳定性的影响[D].山西太原:太原理工大学,2016.
- [26] 付兴涛,张丽萍.红壤丘陵区坡长对作物覆盖坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(5):91-98.
- [27] 张珊,杨树文,王恒亮.顾及黄土滑坡的兰州市不同等级降雨时空变化特征[J].水土保持研究,2019,26(1):184-191.

(上接第 32 页)

- [29] 薛凯,杨明义,张凤宝,等.利用淤地坝泥沙沉积旋迴反演小流域侵蚀历史[J].核农学报,2011,25(1):115-120.
- [30] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3):96-103.
- [31] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.
- [32] 严晰芹,焦菊英,唐柄哲,等.泥沙连通性研究方法进展[J].泥沙研究,2021,46(2):59-65.
- [33] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A Guide to Conservation Planning [M]. US Washington D C: Agriculture Handbook, 1978: 537.
- [34] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation [C]// Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference. Tsinghua University Press. Beijing, China, 2002:21-25.
- [35] 曾奕.黄土丘陵区侵蚀环境下的流域土壤有机碳动态变化及其影响机制[D].湖北 武汉:华中农业大学,2021.
- [36] 刘宇.土壤侵蚀研究中的景观连通度:概念、作用及定量[J].地理研究,2016,35(1):195-202.
- [37] Keesstra S, Nunes J P, Saco P, et al. The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics? [J]. Science of the Total Environment, 2018,644:1557-1572.
- [38] Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments [J]. Geomorphology, 2013, 188:31-41.
- [39] Alfonso-Torreño A, Gómez-Gutiérrez Á, Schnabel S, et al. SUAS, SfM-MVS photogrammetry and a topographic algorithm method to quantify the volume of sediments retained in check-dams [J]. Science of the Total Environment, 2019,678:369-382.
- [40] Deng Lei, Kim D G, Li Miaoyu, et al. Land-use changes driven by ‘Grain for Green’ program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China [J]. Global and Planetary Change, 2019,177:101-115.