

聚丙烯酰胺对花岗岩砂土分离与产沙过程的影响

张澍¹, 张光辉^{2,3}, 张勇⁴, 陈新², 戴中山², 徐俊康², 魏玉杰²

(1.长江勘测规划设计设计有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2.华中农业大学

资源与环境学院, 湖北 武汉 430070; 3.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,

浙江 杭州 311100; 4.长江水利委员会 长江流域水土保持监测中心站, 湖北 武汉 430010)

摘要: [目的] 探究聚丙烯酰胺(PAM)施用对花岗岩母质发育砂土分离与产沙过程的影响, 明确 PAM 改良砂土抗蚀性的浓度阈值, 为崩岗侵蚀防治提供依据。[方法] 选取崩岗侵蚀区花岗岩母质发育的砂土, 设置 5 个 PAM 施入水平(0%, 1%, 3%, 5%, 7%), 通过径流冲刷模拟试验, 研究不同水力条件下砂土产沙速率、分离速率及细沟可蚀性对 PAM 施用浓度的响应规律。[结果] ① PAM 显著降低了砂土的产沙速率、分离速率和细沟可蚀性, 且显著提高了临界剪切力($p < 0.01$)。PAM 的减沙效应随冲刷时间的增加呈降低后稳定的趋势, 而随其施用浓度的增加逐渐增大。当 PAM 施用浓度在 5% 以内时平均减沙效果最明显。② 土壤分离速率与 PAM 施用浓度呈极显著的负相关关系($p < 0.001$), 但随着 PAM 施用浓度的增加, 分离速率的降低速率逐渐减缓, 且 PAM($F = 37.39, p < 0.001$)对土壤分离与产沙过程的作用大于水流剪切力($F = 15.38, p < 0.001$)。③ PAM 处理组与 CK 的细沟可蚀性之比与 PAM 浓度呈二次函数关系($R^2 = 0.996, p < 0.001$), 且 5% 的 PAM 对细沟可蚀性的降低效率最显著。[结论] 施用 PAM 有效降低了花岗岩砂土的产沙速率、分离速率与细沟可蚀性, 提高了其临界剪切力, 改良效果在 PAM 施用浓度低于 5% 时呈不断增加的趋势, 而 PAM 施用浓度大于 5% 时改良效果没有明显变化。因此, 建议 5% 为 PAM 改良花岗岩砂土抗蚀性的浓度阈值。

关键词: 崩岗侵蚀; 花岗岩红壤; 土壤分离能力; 径流冲刷; 产沙速率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0068-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 张澍, 张光辉, 张勇, 等. 聚丙烯酰胺对花岗岩砂土分离与产沙过程的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 68-75. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.008; Zhang Shu, Zhang Guanghui, Zhang Yong, et al. Effects of Polyacrylamide on detachment and sediment production process of granite-derived sandy soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 68-75.

Effects of Polyacrylamide on Detachment and Sediment Production Process of Granite-derived Sandy Soil

Zhang Shu¹, Zhang Guanghui^{2,3}, Zhang Yong⁴,

Chen Xin², Dai Zhongshan², Xu Junkang², Wei Yujie²

(1. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Wuhan, Hubei 430010, China;

2. College of Resources & Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;

3. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 311100, China; 4. Yangtze River Basin Monitoring Center Station for Soil and Water Conservation, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: [Objective] The effects of Polyacrylamide (PAM) applied in separation and sediment yield process of sandy soil developed from granite parent material were determined, and the concentration threshold of PAM to increase erosion resistance of sandy soil was clarified to provide a basis for the control of Benggang erosion. [Method] Sandy soil developed from granite parent materials in Benggang erosion areas was selected. Five levels of PAM application concentrations (0%, 1%, 3%, 5%, 7%) were set. Through

收稿日期: 2023-09-29

修回日期: 2024-01-03

资助项目: 国家重点研发计划“长江中下游坡耕地红壤与中低产稻田产能提升技术模式及应用”(2021YFD1901201); 国家自然科学基金面上项目“花岗岩风化土体裂隙演化机制及其对崩岗侵蚀的影响”(42277329)

第一作者: 张澍(1971—), 男(汉族), 上海市人, 学士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程的研究。Email: zhangshu@cjwsjy.com.cn.

通信作者: 魏玉杰(1988—), 女(汉族), 湖北武汉市人, 博士, 副教授, 主要从事岩土体稳定性与土壤侵蚀机理的研究。Email: wyj@mail.hzau.edu.cn.

runoff scouring simulation experiments, the response patterns of sediment yield rate, detachment rate, and rill erodibility of sandy soils to PAM concentration under different hydraulic conditions were studied. [Results] ① PAM significantly reduced sediment yield, detachment rate, and rill erodibility, but dramatically increased critical shear strength ($p < 0.01$). Additionally, the sediment yield reduction effect of PAM showed a decreasing and stabilizing trend with increasing scouring time, but gradually increased with increasing application concentration, with the most pronounced average sediment reduction effect observed when PAM concentration was within 5%. ② There was a highly significant negative correlation between soil detachment rate and PAM application concentration ($p < 0.001$). However, as PAM application concentration increased, the rate of decrease in soil detachment rate gradually slowed down, and the effect of PAM ($F = 37.39$, $p < 0.001$) on soil detachment and sediment yield processes was greater than the shear strength of runoff ($F = 15.38$, $p < 0.001$). ③ The ratio of rill erodibility between the PAM-treated groups and the control showed a quadratic function relationship with PAM concentration ($R^2 = 0.996$, $p < 0.001$), and the efficiency of reducing rill erodibility was most significant at 5% PAM. [Conclusion] The application of PAM effectively reduced the sediment yield rate, detachment rate, and rill erodibility of granite-derived sandy soil and increased its critical shear force. The improvement effect of PAM application showed a continuous increasing trend when the PAM application concentration was below 5%. However, when the PAM application concentration exceeded 5%, the improvement effect showed only a slight change. Therefore, 5% should be considered as the concentration threshold for PAM to improve the erosion resistance of granite-derived sandy soil.

Keywords: Benggang erosion; granite red soil; soil detachment ability; runoff scoring; sediment speed

崩岗侵蚀是中国南方地区水土流失的重要来源^[1-2]。已有研究表明热带、亚热带地区疏松深厚的花岗岩风化壳是崩岗发育的物质基础^[3],花岗岩出露区域与崩岗集中分布地区有高度的一致性^[4]。花岗岩母质发育的砂土胶结物质含量低,土体力学强度及抗侵蚀能力弱,在降雨及径流冲刷作用下极易发生滑坡、崩塌等灾害。受高温高湿气候条件的影响,花岗岩风化剧烈,风化程度从表层残积土到基岩逐渐降低,土壤颗粒组成、胶结物质、结构稳定性等均呈现明显的剖面垂直分异规律^[5]。Wei Yujie 等^[6-7]对崩岗侵蚀区花岗岩风化壳系统研究发现,表土层黏粒、游离氧化铁铝等胶结物质集中,具有良好的团聚体稳定性,对抑制崩岗形成具有重要作用;砂土层结构松散、抗剪强度及抗侵蚀能力最低,对崩岗发育的敏感性最高。此外,Zhou Xiaoquan 等^[8]及 Tao Yu 等^[9]通过室内及原位监测发现,砂土层在降雨入渗及径流冲刷作用下极易形成窠穴,并促进崩岗进一步发育(图 1)。因此,提高砂土层稳定性是防止崩岗侵蚀发展的关键^[10-11]。

聚丙烯酰胺(简称 PAM)作为应用最广泛的人工合成改良剂,在优化土壤结构^[12],改善土壤水力特性^[13],防治水土流失^[14]等方面具有良好的效果。PAM 由单体丙烯酰胺聚合而成,所含的酰胺基团(CONH_2)极易形成氢键,导致其具有良好的吸附性、絮凝性、水溶性、黏合性^[15]。国内外相关研究表明,

PAM 分子与土壤表面颗粒相互作用,从而提高土壤结构系数和各级水稳性团聚体含量,但不同质地土壤的改良效果及阈值均存在一定差异^[16]。通常,土壤团聚体含量增加后能够有效的改善土壤表面结构,抑制土壤封闭和结皮形成,从而提高土壤渗透性能,减少地表径流^[17]。然而,也有学者表示,PAM 吸水膨胀堵塞表层土壤颗粒孔隙,从而降低土壤入渗率^[18]。总体而言,PAM 提高土壤团聚体结构、降低土壤可蚀性及土壤侵蚀量的作用得到了一致认可,而对土壤入渗及孔隙结构的作用效果尚存在一定的争议。

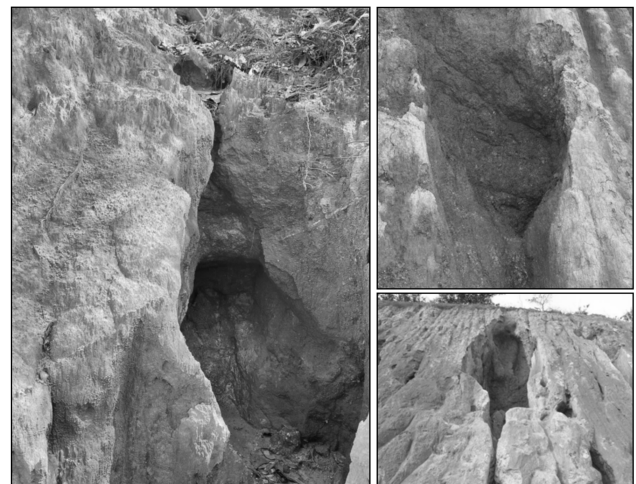


图 1 窠穴地貌

Fig.1 Niche cave landform

PAM 作为土壤改良剂,其安全性和环境友好性已得到广泛认可^[19],但改良效果受其分子量、施用浓度及土壤类型等因素影响^[20]。分子量过小无法形成网状结构,黏结效果差,而分子量过大难以穿透土壤孔隙。张兆福等^[21]通过模拟降雨实验发现,1 200 万分量的 PAM 对崩岗侵蚀的作用效果最佳。夏海江等^[22]则认为 300~400 万分量的 PAM 对辽北棕壤的侵蚀防止效果最好。蔺栓保等^[23]在盐渍化土壤改良中发现,PAM 浓度为 1:7 500 时对土壤容重和孔隙度的改良效果最优,而浓度为 1:2 500 时对饱和导水率的改良效果最好。曹丽花等^[12]在土壤水稳性团聚体结构的改良过程中发现,PAM 浓度为 0.5‰ 时对黄绵土和风沙土的改良效果最明显,而对黑垆土的改良效果则需要达到 2~4‰ 的施用浓度。不同土壤胶结物质含量、结构特性等的差异导致 PAM 的改良效应存在一定的不确定性^[24]。然而,中国对 PAM 的应用研究主要集中于西北干旱和半干旱地区,而在南方地区,尤其是崩岗侵蚀防治方面的研究相对较少。且中国南方地区花岗岩砂土的集中出露是崩岗侵蚀发生发展的重要因素,探究高效、便捷、价格实惠的崩岗侵蚀防治措施对区域生态与经济建设具有重要意义。鉴于此,本研究针对崩岗侵蚀区花岗岩母质发育砂土抗侵蚀能力差的问题,通过控制试验,选择适宜的 PAM 作为改良剂,设置不同的施入浓度,探究不同径流条件下 PAM 施用对砂土抗蚀性的影响,明确 PAM 改良花岗岩砂土抗蚀性的浓度阈值,对丰富崩岗侵蚀治理措施具有重要的实践意义。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验土壤采自江西省赣州市赣县田村镇崩岗侵蚀分布较为集中的金钩形小流域(115°9′—115°11′E, 26°10′—26°13′N)(图 2)。该流域面积为 14.21 km²,气候属亚热带季风湿润气候,地貌类型属丘陵地貌,

海拔为 170~313 m,主要土地利用方式为林地和耕地。流域内共有崩岗 815 处,侵蚀面积占流域总面积的 6.74%。主要土壤类型为花岗岩母质发育的红壤,花岗岩风化壳厚度为 10~50 m^[1]。供试土壤于 2022 年 11 月采自金钩形小流域 C 层砂土,基本性质如表 1 所示,风干后过 2 mm 筛备用。

基于张兆福等^[21]的研究,本试验采用分子量为 1 200 万的阴离子 PAM 作为土壤改良剂,其状态为白色粉末,固含量为 93.3%,水解度为 25.2%,水不溶物为 0.2%。

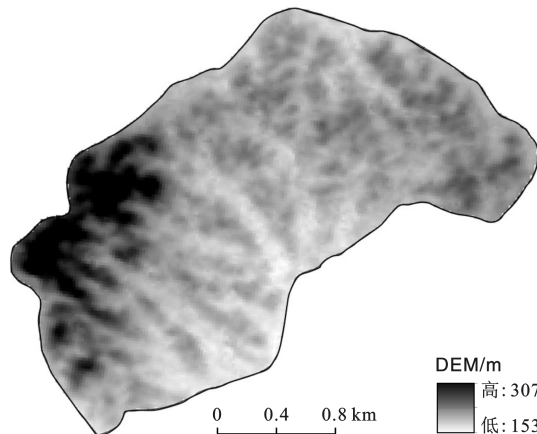


图 2 研究区地形

Fig.2 Topography of study area

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计与样品制备 本试验于 2022 年 12 月在华中农业大学资环楼进行,试验共设置 5 个 PAM 水平,土壤质量/PAM 质量比分别为 1 000:0 (CK),1 000:1(P₁),1 000:3(P₂),1 000:5(P₃),1 000:7(P₄)。据此称取相应重量的干粉 PAM 溶于水,将溶解后的溶液装于喷壶中,使用喷壶将溶液均匀喷洒于土壤表面并不断搅拌,待到充分拌匀后用保鲜膜将土壤封口静置培养 48 h,最后将培养好后的改良砂土采用击实法分 3 层击实,制备成容重为 1.35 g/cm³的环刀土样。

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of tested soil

颗粒密度	容重/ (g·cm ⁻³)	颗粒组成			黏土矿物组成			
		黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	高岭石/%	蛭石/%	伊利石/%	1.4 nm 过渡矿物/%
2.54±0.00	1.35±0.05	8.85±0.17	27.55±0.12	63.60±0.18	94.0	0.0	6.0	0.0

1.2.2 土壤抗蚀性试验 土壤抗蚀性测定采用自制的土壤分离试验装置(图 3),由长×宽×高分别为 380 cm×20 cm×20 cm 的钢制边坡水槽以及相对应的供水装置组成。在水槽顶部设有一个长×宽×高分别为 40 cm×20 cm×40 cm 的水箱,水槽下部距出

口 20 cm 处有一个直径为 10 cm,高为 6.18 cm 的放样室,水槽装置整体放于可移动支架上。样品处理及具体试验方法参考 Zhang Guanghui 等的研究^[25]。

本试验固定 20°的坡度,设计 5 组不同的流量与流速,模拟冲刷对应的水流剪切力如表 2 所示,每组

试验进行 3 次重复。流量和流速分别采用称重法和高锰酸钾示踪法确定^[26]。由于不同 PAM 施用浓度下土壤产沙特性差异较大,因此,本试验以冲刷深度为 2 cm 为试验终点^[27]。试验前进行流量率定,0~30 s 内每 10 s 接 1 次径流泥沙样,30~240 s 每 30 s 采接 1 次样,用烘干法测定泥沙质量,采用置换法确定各时段泥沙总质量,并据此计算产沙速率^[28]。

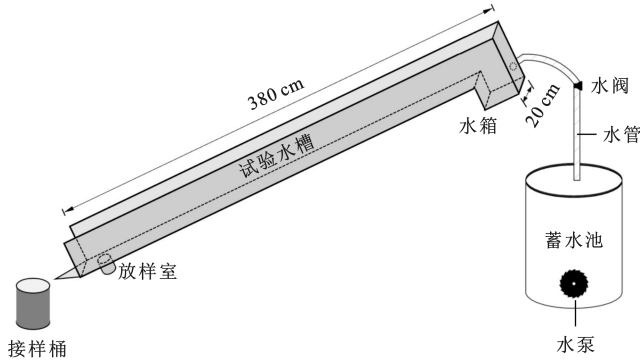


图 3 土壤分离试验装置

Fig.3 Soil separation test equipment

表 2 测定土壤分离速率的水力参数

Table 2 Hydraulic parameters of determined soil separation rate

水密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	流量/ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水槽宽/ m	剪切力/ Pa
0.998	0.2	0.27	0.2	11.95
0.998	0.3	0.36	0.2	13.55
0.998	0.5	0.38	0.2	20.44
0.998	0.7	0.45	0.2	23.99
0.998	0.9	0.54	0.2	25.74

1.3 数据处理与分析

根据设计流量和流速以及水槽的规格计算水深,再通过水流剪切力计算对应的水流剪切力。

(1) 流量 Q : 单位时间水体积(L/s)。

$$Q = A \times V \quad (1)$$

式中: A 为过水断面面积(m^2), $A = H \times L$; V 为径流流速(m/s); H 为水深(m); L 为水槽宽(m)。

(2) 水流剪切力 τ : 水流在沿坡面梯度在其运动方向上产生的作用力(Pa)。

$$\tau = \rho \times g \times H \times S \quad (2)$$

式中: ρ 为水流密度(kg/m^3); g 为重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; S 为坡度正切值, 即 $\tan 20^\circ$ 。

(3) 土壤分离速率 D_c : 单位时间单位面积土壤流失量($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

$$D_c = M_c / (A \times T) \quad (3)$$

式中: M_c 为监测时段内产沙质量(g); A 为取样器面积(m^2); T 为冲刷历时(s)。

(4) 基于 WEPP 模型计算土壤可蚀性 K_r :

$$D_c = K_r \times (\tau - \tau_c) \quad (4)$$

式中: τ_c 为临界剪切力(Pa)。

数据分析采用 SPSS 22.0 软件, 方差分析采用 LSD(最小显著差法) 进行多重比较, 回归分析采用 Origin Pro 8.0 进行拟合。

2 结果与分析

2.1 土壤产沙过程

土壤产沙过程受 PAM 施入量与水力条件共同决定(图 4)。CK 处理下, 产沙速率随时间呈近线性减小的变化趋势, 而随流量的增加持续增加, 随着流量的增加最大产沙率也呈现上升趋势分别为 15.79% (0.2 L/s), 18.06% (0.3 L/s), 39.97% (0.5 L/s), 47.46% (0.7 L/s), 57.19% (0.9 L/s)。根据图 4 中 (0.3 L/s) 与 C (0.5 L/s) 产沙率变化趋势图可见, 0.5 与 0.3 L/s 整体变化趋势有显著差别, 产沙率随时间变化下降速率在 0.5 L/s 后明显加快, 而 60s 后, 图 4c, 图 4d, 图 4e 中产沙率随时间变化整体趋势未有明显差异。施入 PAM 后, 产沙率与 CK 比较可见明显减少, 但随时间变化整体趋势未有明显差异。当 PAM 施加浓度 $\leq 3\%$ (即 1% 和 3%) 且流量为 0.2 L/s 时, 产沙速率随时间的变化与 CK 一致, 而流量为 0.3 L/s 以上时, 产沙速率随冲刷时间呈先升高后降低的单峰变化趋势, 且随着流量持续增加, 峰值有提前的趋势。在土壤分离初期产沙率在径流冲刷作用下快速增加, 随着土体表面可蚀性物质的降低, 产沙速率逐渐降低并趋于稳定。当流量较小时, PAM 对提高土壤结构稳定性的作用大于径流冲刷对土壤结构的破坏, 因此初期产生率显著低于 CK 处理, 而随着流量增大, 径流对土壤分离作用力逐渐高于 PAM 对土体侵蚀阻力的增强效果, 土体逐渐呈现出与 CK 接近的产沙率变化趋势。PAM 施入土体明显增强土壤颗粒间胶结作用, 增强土壤黏聚力, 因此对于土壤的冲刷剥蚀需要更大的水流剪切力和能量消耗, 产沙率明显减少。当 PAM 施加浓度为 5% 和 7% 时, 产沙速率随时间呈波动降低的趋势, 但同一流量条件下产沙速率间的差异不显著。同时, PAM 的减沙效应随冲刷时间的增加呈先降低后稳定的趋势, 且减沙率随 PAM 浓度的增加而增大。当 PAM 施用浓度从 1% 增加至 3% 时, 平均减沙率增加了 40.72%~14.12%; 当 PAM 施用浓度从 3% 增加至 5% 时, 平均减沙率增加了 7.73%~16.31%; 当 PAM 施用浓度从 5% 增加至 7% 时, 平均减沙率增加了 4.00%~5.16%。

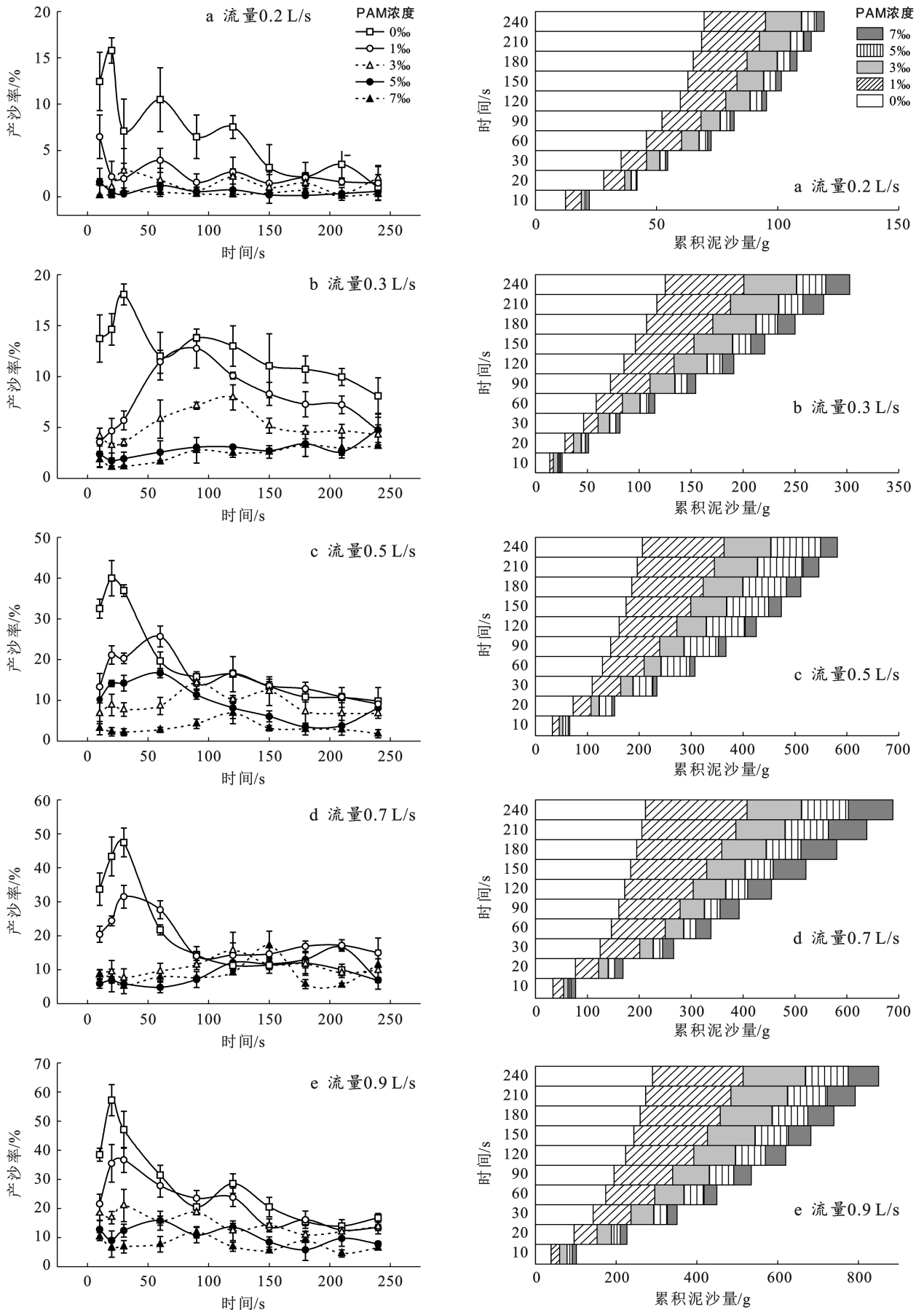


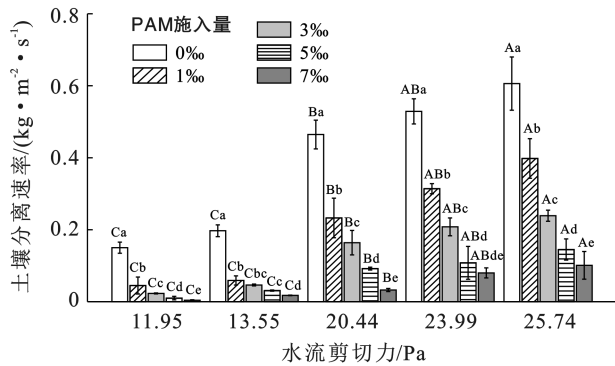
图 4 不同流量下产沙率和累积泥沙量随冲刷时间的变化

Fig.4 Variation of sediment yield and accumulated sediment amount with erosion time under different flow rates

上述结果表明,PAM 施用浓度在 5‰ 以内时减沙效果最明显。此外,PAM 施用浓度 $\leq 1‰$ 时,50% 以上的泥沙产生于 90s 以内,而当 PAM 施用浓度为 5‰~7‰ 时,50% 以上的泥沙产生于 120~150 s 以内,进一步说明 PAM 减缓产沙速率的作用,且这种作用在 0.3 L/s 的流量条件下更明显。

2.2 土壤分离速率

土壤分离是发生水土流失的起步阶段,也是表征土壤抗侵蚀能力的重要指标之一^[27]。土壤分离速率与 PAM 施入量之间呈现明显负相关关系($p < 0.001$)。相对于 CK, P_1, P_2, P_3, P_4 处理下,平均土壤分离速率分别降低了 46.12%, 65.03%, 80.18% 和 87.90% (图 5)。由表 3 中不同处理间方差分析结果对比平均土壤分离速率发现: P_2 (bc), P_3 (c), P_4 (c) 处理下土壤分离速率与 CK(a) 之间存在显著差异,且随着 PAM 施入量的逐渐增大,土壤分离速率的降低速率逐渐变慢。当 PAM 施加浓度由 5‰ 增至 7‰ 时,土壤分离速率的减小率仅为 7.72%,说明过量施入 PAM 并不能达到持续降低土壤分离速率的作用,PAM 对土壤分离速率的影响存在一定的临界效应。



注:a, b 等字母表示不同 PAM 间差异; A, B 等字母表示不同剪切力间差异。

图 5 不同水流剪切力下土壤分离速率

Fig.5 Soil separation rate under different flow shear forces

双因素方差分析进一步表明 PAM 施入量、水流剪切力及其交互效应均对土壤分离速率均存在极显著影响($p < 0.001$) (表 3)。综合对比发现,PAM 施入量对土壤分离速率的影响最大($F = 37.39, p < 0.001$),其次为水流剪切力($F = 15.39, p < 0.001$)。尽管 PAM 的生产成本相对较低,但持续增加 PAM 施用量,同样会导致施用成本的持续增加。然而,综合 PAM 施用对侵蚀泥沙及土壤分离能力减小效率随施用浓度的变化规律,本研究认为 5‰ 为 PAM 改良花岗岩砂土抗蚀性的最优浓度。

表 3 不同 PAM 施入量和水流剪切力作用下土壤分离速率及双因素方差分析

Table 3 Soil separation rate and two-factor variance analysis under different PAM application rate and flow shear force

处理	最大值	最小值	平均值±标准偏差	变异系数
CK	0.606	0.150	0.389±0.18 ^a	0.47
P_1	0.398	0.045	0.210±0.14 ^b	0.66
P_2	0.239	0.023	0.136±0.09 ^{bc}	0.64
P_3	0.145	0.010	0.077±0.05 ^c	0.65
P_4	0.101	0.004	0.047±0.04 ^c	0.79

影响因素	F 值	p 值
PAM	37.39	0.000
水流剪切力	15.39	0.000
PAM×水流剪切力	2.607	0.005

2.3 细沟可蚀性与临界剪切力

基于 WEPP 模型,土壤分离速率与水流剪切力之间存在较好的线性关系,采用简单线性回归可估算不同 PAM 施入量下土壤可蚀性(K_r)和临界剪切力(τ_c),结果如表 4 所示。PAM 的施入在一定程度上降低了土壤可蚀性,且随着 PAM 含量的增大呈现减小速率变缓的趋势。在四个施用浓度(P_1, P_2, P_3, P_4)下:土壤可蚀性范围为 0.006~0.025 s/m,与 CK 相比分别下降了 23.94%, 52.42%, 73.03% 和 80.61%; 临界剪切力范围为 10.765~11.828 Pa,与 CK 相比分别增加了 47.16%, 42.88%, 44.38% 和 61.99%。

表 4 土壤分离速率与水流剪切力间的线性回归

Table 4 Linear regression between soil separation rate and flow shear force

处理	回归方程	K_r (s/m)	τ_c / Pa	R^2
CK	$D_c = K_r(\tau - 7.315)$	0.033	7.315	0.990
P_1	$D_c = K_r(\tau - 10.765)$	0.025	10.765	0.987
P_2	$D_c = K_r(\tau - 10.452)$	0.016	10.452	0.978
P_3	$D_c = K_r(\tau - 10.562)$	0.009	10.562	0.978
P_4	$D_c = K_r(\tau - 11.828)$	0.006	11.828	0.899

进一步采用 PAM 处理组与 CK 的细沟可蚀性之比(相对细沟可蚀性 R_{K_r})来反映 PAM 对土壤可蚀性的作用效率。结果发现, P_1, P_2, P_3, P_4 处理下该比值分别为 0.76, 0.48, 0.27 和 0.19,且与 PAM 的增加呈二次函数递减关系(图 6)。当 PAM 施入量由 0 增加到 5‰ 时,PAM 每增施加 1‰,相对细沟可蚀性下降 14.61%; 而当 PAM 施入量由 5‰ 增加到 7‰ 时,PAM 每增施 1‰,相对细沟可蚀性的并未降低却略有增长约 3.79%。结果进一步证实 PAM 的施入能显著降低土壤可蚀性^[18]。相对细沟可蚀性随 PAM 施加浓度的变化规律表明 5‰ 的 PAM 对花岗岩砂土可蚀性的降低效率最显著。

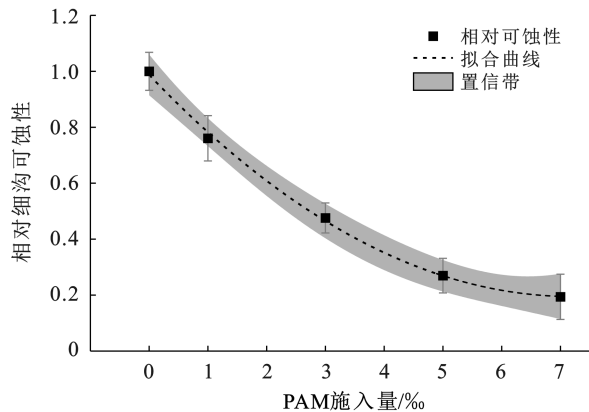


图 6 相对细沟可蚀性随 PAM 添加量的变化

Fig.6 Change of relative rill erodibility with PAM addition

已有文献报道花岗岩发育砂土的细沟可蚀性高达 0.035 s/m,且与砂粒含量和有机质含量分别呈显著的正相关和负相关关系。其中,砂粒,尤其是细砂的存在,直接提高土壤的分散性、增加细沟可蚀性^[29];而有机质则促进颗粒黏结,提高土壤黏聚力,从而降低细沟可蚀性^[30]。PAM 对细沟可蚀性的作用机理与有机质类似,其良好的吸附性、絮凝性和黏合性直接增大了颗粒比表面积,促进砂粒黏结与团粒结构的形成,从而降低细沟可蚀性。此外,PAM 吸水膨胀,填充砂粒间的大孔隙,导致土壤颗粒排列更紧密,从而增加土壤抵抗水流剪切的能力。

3 结论

(1) 花岗岩砂土施入 PAM 显著增强了土壤侵蚀阻力,减小了土壤分离和产沙速率,减沙效应随 PAM 施加浓度的增加而增大,但增大速率逐渐降低。

(2) 土壤分离速率随 PAM 浓度增加呈现指数衰减,且不同水流剪切条件下,土壤分离与产沙过程对 PAM 施加浓度的响应程度不同,但总体上 PAM ($F = 37.39, p < 0.001$) 对土壤分离与产沙过程的作用大于水流剪切力。

(3) PAM 施入显著降低了花岗岩砂土细沟可蚀性(23.94%~80.61%),增加了临界剪切力(42.88%~61.99%) ($p < 0.01$),采用 PAM 处理组与 CK 的细沟可蚀性之比评价 PAM 对降低细沟可蚀性的效率,可见 5% 的 PAM 对细沟可蚀性的降低效率最显著。

[参 考 文 献]

[1] 蔡强国,吴淑安,马绍嘉,等.花岗岩发育红壤坡地侵蚀产沙规律试验研究[J].泥沙研究,1996(1):89-96.
Cai Qiangguo, Wu Shuan, Ma Shaojia, et al. Experimental study on slope soil erosion and sediment yield of granite-developed red soil [J]. Journal of Sediment

Research, 1996(1):89-96.

- [2] Wei Yujie, Liu Zheng, Wu Xinliang, et al. Can Benggang be regarded as gully erosion [J]. Catena, 2021, 207:105648.
- [3] Xu Jiongxin. Benggang erosion: The influencing factors [J]. Catena, 1996,27(3/4):249-263.
- [4] Chen Jialin, Zhou Man, Lin Jinshi, et al. Comparison of soil physicochemical properties and mineralogical compositions between noncollapsible soils and collapsed gullies [J]. Geoderma, 2018,317:56-66.
- [5] 吴志峰,王继增.华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系[J].水土保持学报,2000,14(2):31-35.
Wu Zhifeng, Wang Jizeng. Relationship between slope disintegration and rock soil characteristics of granite weathering mantle in South China [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000,14(2):31-35.
- [6] Wei Yujie, Wu Xinliang, Xia Jinwen, et al. The effect of water content on the shear strength characteristics of granitic soils in South China [J]. Soil and Tillage Research, 2019,187:50-59.
- [7] Wei Yujie, Cai Chongfa, Guo Zhonglu, et al. Linkage between aggregate stability of granitic soils and the permanent gully erosion in Subtropical China [J]. Soil and Tillage Research, 2022,221:105411.
- [8] Zhou Xiaoquan, Wei Yujie, He Jie, et al. Estimation of gully erosion rate and its determinants in a granite area of Southeast China [J]. Geoderma, 2023,429:116223.
- [9] Tao Yu, He Yangbo, Duan Xiaoqian, et al. Preferential flows and soil moistures on a Benggang slope: Determined by the water and temperature co-monitoring [J]. Journal of Hydrology, 2017,553:678-690.
- [10] 张大林,刘希林.崩岗侵蚀地貌的演变过程及阶段划分[J].亚热带资源与环境学报,2011,6(2):23-28.
Zhang Dalin, Liu Xilin. Evolution and phases division of collapsed gully erosion landform [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2011,6(2):23-28.
- [11] Liao Yishan, Yuan Zaijian, Zheng Mingguo, et al. The spatial distribution of Benggang and the factors that influence it [J]. Land Degradation & Development, 2019,30(18):2323-2335.
- [12] 曹丽花,赵世伟,梁向锋,等.PAM 对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J].农业工程学报,2008,24(1):45-49.
Cao Lihua, Zhao Shiwei, Liang Xiangfeng, et al. Improvement effects of PAM on soil water-stable aggregates and its mechanisms in different soils in the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(1):45-49.
- [13] 韩凤朋,郑纪勇,李占斌,等.PAM 对土壤物理性状以及

- 水分分布的影响[J].农业工程学报,2010,26(4):70-74.
- Han Fengpeng, Zheng Jiyong, Li Zhanbin, et al. Effect of PAM on soil physical properties and water distribution [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(4):70-74.
- [14] 陈渠昌,江培福,雷廷武,等.利用PAM防治松散扰动沙土风蚀效果的风洞试验研究[J].农业工程学报,2006,22(10):7-11.
- Chen Quchang, Jiang Peifu, Lei Tingwu, et al. Wind tunnel experiment on the impacts of polyacrylamide on wind erosion of loosen soil materials [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006,22(10):7-11.
- [15] Ben-Hur M. Using synthetic polymers as soil conditioners to control runoff and soil loss in arid and semi-arid regions: A review [J]. Soil Research, 2006, 44(3):191.
- [16] Abrol V, Shainberg I, Lado M, et al. Efficacy of dry granular anionic polyacrylamide (PAM) on infiltration, runoff and erosion [J]. European Journal of Soil Science, 2013,64(5):699-705.
- [17] Mustafa A, Xu Minggang, Ali Shah S A, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of Southern China [J]. Journal of Environmental Management, 2020,270:110894.
- [18] 于健,雷廷武,Isaac Shainberg,等.PAM特性对砂壤土入渗及土壤侵蚀的影响[J].土壤学报,2011,48(1):21-27.
- Yu Jian, Lei Tingwu, Shainberg I, et al. Effects of molecular weight and degree of hydrolysis of PAM on infiltration and erosion of sandy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011,48(1):21-27.
- [19] Zhang Lun, Gao Feng, Liu Deyu, et al. Estimating sheet erosion on purple soil hillslope treated with polyacrylamide (PAM) in the Three Gorges reservoir area [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023,49: 101510.
- [20] Jain R, Mahto V. Evaluation of polyacrylamide/clay composite as a potential drilling fluid additive in inhibitive water based drilling fluid system [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015,133:612-621.
- [21] 张兆福,黄炎和,林金石,等.PAM特性对花岗岩崩岗崩积体径流及产沙的影响[J].水土保持研究,2014,21(3):1-5.
- Zhang Zhaofu, Huang Yanhe, Lin Jinshi, et al. Effects of PAM characteristics on runoff and erosion of colluvial deposits in Benggang [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014,21(3):1-5.
- [22] 夏海江,杜尧东,孟维忠.聚丙烯酰胺防治坡地土壤侵蚀的室内模拟试验[J].水土保持学报,2000,14(3):14-17.
- Xia Haijiang, Du Yaodong, Meng Weizhong. Simulated experiment of preventing soil erosion with polyacrylamide on sloping field [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000,14(3):14-17.
- [23] 蔺栓保,蒲建国,黄伟.聚丙烯酰胺(PAM)对酒泉地区盐渍化土壤物理性状的影响[J].工程技术研究,2021,6(15):244-246.
- Lin Shuanbao, Pu Jianguo, Huang Wei. Effect of polyacrylamide (PAM) on physical properties of salinized soil in Jiuquan area [J]. Engineering and Technological Research, 2021,6(15):244-246.
- [24] Karvelis T, Gasiunas G, Siksny V. Methods for decoding Cas9 protospacer adjacent motif (PAM) sequences: A brief overview [J]. Methods,2017,121/122:3-8.
- [25] Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, Liu Guobin, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(3): 713-719.
- [26] 王瑄,李占斌,尚佰晓,等.坡面土壤剥蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验[J].农业工程学报,2008,24(9): 22-26.
- Wang Xuan, Li Zhanbin, Shang Baixiao, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and water erosion factor [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(9):22-26.
- [27] Wang Bing, Zhang Guanghui, Yang Yanfen, et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 266:68-75.
- [28] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等.降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J].农业工程学报,2017,33(8):134-140.
- Hao Haoxin, Guo Zhonglu, Wang Xianzhou, et al. Rill erosion process on red soil slope under interaction of rainfall and scouring flow [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(8):134-140.
- [29] Liu Fa, Zhang Guanghui, Sun Fubao, et al. Quantifying the surface covering, binding and bonding effects of biological soil crusts on soil detachment by overland flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017,42(15):2640-2648.
- [30] Geng Ren, Zhang Guanghui, Ma Qianhong, et al. Effects of landscape positions on soil resistance to rill erosion in a small catchment on the Loess Plateau [J]. Biosystems Engineering, 2017,160:95-108.