

聚丙烯酰胺(PAM)对三峡库区紫色土坡面片蚀的影响

肖海^{1,2}, 向瑞¹, 刘畅¹, 叶朝欢¹, 高峰¹, 张伦¹, 夏振尧^{1,2}, 崔磊³

(1.三峡库区地质灾害教育部重点实验室,湖北宜昌 443002;

2.三峡大学土木与建筑学院,湖北宜昌 443002;3.水电水利规划设计总院,北京 100120)

摘要: 设置不同 PAM 施加量(0, 0.4, 0.8, 1.6 g/m²),在不同坡度(15°, 20°, 25°)条件下开展不同雨强(60, 90, 120 mm/h)的模拟降雨试验。研究不同 PAM 施加量紫色土坡面片蚀产流产沙过程及其对产流产沙量的影响程度和主要因素,并分析了 PAM 对坡面片蚀可蚀性的影响。结果表明:坡面产流过程呈现先持续增加后趋于波动稳定的变化趋势,产沙过程则呈现先迅速减少并趋于稳定的变化趋势,PAM 对片蚀的产流产沙过程变化趋势没有影响。和空白对照组相比,PAM 施加量为 0.4, 0.8, 1.6 g/m² 的产流总量平均分别减小 7.71%, 35.16%, 21.12%, 产沙总量平均分别减小 35.80%, 49.39%, 17.85%, PAM 施加量为 0.8 g/m² 时产流总量和产沙总量最小。同种雨强下,不同施加量减流效益的大小顺序为 0.8 g/m² > 1.6 g/m² > 0.4 g/m², 而减沙效益则受到坡度影响,在 15°坡面减沙效益大小顺序是 0.8 g/m² > 1.6 g/m² > 0.4 g/m², 在 20°和 25°坡面减沙效益大小顺序为 0.8 g/m² > 0.4 g/m² > 1.6 g/m²。施加 PAM 能有效降低片蚀可蚀性,与空白对照组相比,施加 PAM 后降低效果依次为 0.8 g/m² > 0.4 g/m² > 1.6 g/m², 片蚀可蚀性依次降低 54.40%, 40.94%, 18.21%。

关键词: 聚丙烯酰胺(PAM); 片蚀; 紫色土; 片蚀可蚀性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)05-0032-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.005

Influence of Polyacrylamide (PAM) on the Sheet Erosion Process of Purple Soil in Three Gorges Reservoir Area

XIAO Hai^{1,2}, XIANG Rui¹, LIU Chang¹, YE Chaohuan¹,

GAO Feng¹, ZHANG Lun¹, XIA Zhenyao^{1,2}, CUI Lei³

(1.Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education,

Yichang, Hubei 443002; 2.College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges

University, Yichang, Hubei 443002; 3.China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120)

Abstract: The simulated rainfall experiments were conducted under different slopes (15°, 20° and 25°) combined with different Polyacrylamide (PAM) application rates (0, 0.4, 0.8 and 1.6 g/m²) and different rainfall intensities (60, 90 and 120 mm/h) in this research. The process of runoff and erosion for the sheet erosion of purple soil slopes under different PAM application rates, the influence degree of PAM on the erosion and runoff and their main influence factors were analyzed. Also, the interrill soil erodibility under different PAM application rates was also evaluated. The results showed that the processes of runoff rate and erosion rate increased at first and then was stable with fluctuation, and decreased rapidly at first and was stable with fluctuation, respectively. PAM did not affect the runoff and erosion process of sheet erosion. The runoff amount and erosion amount decreased by 7.71%, 35.16% and 21.12% and by 35.80%, 49.39% and 17.85% for the PAM application rate of 0.4, 0.8 and 1.6 g/m², respectively, when compared with the no PAM application condition. The runoff reduction benefits of different PAM application rates followed the sequence of 0.8 g/m² > 1.6 g/m² > 0.4 g/m² for different rainfall intensities, while the sediment reduction benefits were affected by the slope. On the 15° slope, the order of magnitude of sediment reduction benefit of PAM application was 0.8 g/m² > 1.6 g/m² > 0.4 g/m², while the order of magnitude was 0.8 g/m² > 0.4 g/m² > 1.6 g/m² on the 20°

收稿日期: 2022-01-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2040207, 41807068); 中国三峡建设管理有限公司科研项目(BHT/0869); 土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范基地(2021EJD026)

第一作者: 肖海(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与生态防护研究。E-mail: oceanshawctgu@163.com

通信作者: 夏振尧(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事边坡生态防护研究。E-mail: xzy_yc@126.com

and 25° slopes. The application of PAM could effectively reduce the interrill soil erodibility. The order of magnitude of the effect was $0.8 \text{ g/m}^2 > 0.4 \text{ g/m}^2 > 1.6 \text{ g/m}^2$, which was reduced by 54.40%, 40.94% and 18.21%, respectively, when compared with the no PAM application condition.

Keywords: polyacrylamide (PAM); sheet erosion; purple soil; interrill soil erodibility

三峡库区是长江中上游四大重点水土流失片区之一,长江中上游坡耕地是长江泥沙的主要策源地,水土流失面积占库区总土地面积的 66.8%。三峡库区紫色土为库区的主要土壤类型,具有成土性能差、土层薄且易侵蚀等特点,因此紫色土坡耕地水土流失严重、土地退化严重,已经严重威胁三峡工程安全运行^[1]。片蚀即片状侵蚀或层状侵蚀,即地表土壤发生薄层剥蚀悬移的现象,是坡面水蚀最为复杂的过程之一^[2]。目前紫色土片蚀关于雨强和地形的影响已有许多研究,也有学者^[3-6]对各种水土保持措施的减蚀效应进行了评价,如坡改梯、林草措施、植物篱等,但是关于雨强、坡度和水土保持措施 3 因子对紫色土坡面片蚀影响的研究相对较少。

应用聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)是目前常用的水土保持化学措施,具有明显地减少土壤侵蚀和改善土壤质量的效果^[7]。施用适量的 PAM 可增加表层土壤颗粒之间的凝聚力,维持良好的土壤结构及其稳定性,以防止土壤结皮,从而增加土壤入渗能力,减少地表径流和土壤流失^[8-9]。目前 PAM 针对紫色土的研究多集于在土壤结构改良^[10]和减少养分流失^[11]等方面,且已有研究^[12-13]表明,PAM 存在一个最优施用量,但是针对紫色土坡面片蚀的影响程度,尤其是否存在最优 PAM 施用量尚不明确。因此,本文以三峡库区紫色土为研究对象,采用人工模拟降雨试验,设置 3 个坡度(15°, 20°, 25°)、3 个雨强(60, 90, 120 mm/h)和 3 个 PAM 施加量(0.4, 0.8, 1.6 g/m²),并设置空白对照组(PAM 施加量为 0),研究 PAM、雨强以及坡度因素对紫色土片蚀的影响及贡献并分析 PAM 对紫色土侵蚀性能的作用机理,以期治理紫色土边坡侵蚀提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用土于 2019 年 7 月取自湖北省秭归县新垦桔园(110°40′32″E, 31°03′32″N),是侏罗系上统蓬莱镇组紫色砂泥岩发育的 A-C 型石灰性紫色土,属于三峡库区典型土壤。土样经自然风干并人工剔除土壤中小石子及根系等杂质后过 5 mm 筛网备用。本研究使用重铬酸钾氧化外加热法^[14]测定有机质含量,采用 pH 计测定 pH,利用 TopSizer 激光粒度分析仪

(SCF-108, 珠海欧美克仪器公司, 中国)扫描法测定土壤颗粒体积分数(国际制)。经测定,所用土壤有机质为 6.75 g/kg,土壤 pH 为 6.87,含有黏粒(<0.002 mm)16.50%,粉粒(0.002~0.050 mm)25.65%和砂粒(0.050~2.000 mm)44.36%,属于砂质黏壤土。所用 PAM(巩义腾龙环保科技有限公司)为阴离子型白色粉末状固体,分子式为(C₃H₅ON)_n,1 500 万单位,水解度为 20%。

1.2 试验方法

本研究所用径流小区采用钢板焊接而成,有效尺寸为长 0.75 m、宽 0.5 m、深 0.3 m,长度小于紫色土坡面细沟发生的临界坡长以保证试验过程中所产生的侵蚀为片蚀。降雨设施采用中国科学院水利部水土保持研究所研制的 BX-1 型组合侧喷式降雨器,降雨高度 7 m,降雨均匀度大于 80%,雨强调控范围 20~200 mm/h^[15]。三峡库区湖北段 1 h 最大降雨量在 55~110 mm^[16],区域内紫色土坡耕地在坡度为 15°~25°发生严重的水土流失^[17]。因此,本试验共设置 3 个坡度(15°, 20°, 25°)、3 个雨强(60, 90, 120 mm/h)和 3 个 PAM 施加量(0.4, 0.8, 1.6 g/m²),并设置空白对照组(PAM 施加量为 0 g/m²),交叉设置 36 场模拟降雨试验,并重复试验 2 次(使用 2 次重复试验数据的平均值分析),共计设置 72 场模拟降雨试验。人工降雨试验于 2019 年 9—11 月在三峡大学人工模拟降雨试验场开展。

试验前将径流小区坡度调整到设计坡度,在径流小区底部铺设 10 cm 厚的粗砂,用透水纱网覆盖以保证坡面顺利透水。上层填土采用分层方式,在装填上层土壤前先对下层土壤压实抹平并洒水湿润,保证各层土壤紧密贴合,最终铺填形成 20 cm 厚的紫色土层。填土完毕后将设定施加量的 PAM 与 1 kg 过 5 mm 筛的土壤均匀混合后撒施在土壤表面,再使用电动喷雾器形成雾状降雨对土壤进行湿润至坡面即将产流为止,以减小土壤前期含水率以及装填过程对试验结果造成的影响。然后使用塑料膜覆盖实体模型并静置 24 h 后正式开始模拟降雨试验。正式试验前调整雨强,在径流小区四周使用量筒测量实际雨强,待实际雨强与设计雨强误差小于 5%且均匀度大于 85%时掀起塑料膜开始降雨试验。产流开始后以 2 min 为时间间隔接取全部泥沙样品以待测试,产流开始至产流 30 min 时结束降雨,每次降雨共接 15 个泥沙过程样。对每个泥沙过

程样进行称重,减去塑料桶重后为侵蚀量和径流量的总重,静置一段时间后(24 h 左右)倒掉上清液,使用精度为 0.01 g 的电子秤称取烘干泥沙样获得侵蚀量,并计算相应的径流量。

1.3 数据处理

根据公式(1)和公式(2)计算不同 PAM 施加量的减流效益和减沙效益。

CL = (L_d - L_n) / L_d (1)

CS = (S_d - S_n) / S_d (2)

式中:CL 为减流效益(%);L_d 为空白对照组的径流量(g);L_n 为不同 PAM 施加量组的径流量(g);CS 为减沙效益(%),S_d 为空白对照组的侵蚀量(g);S_n 为不同 PAM 施加量组的侵蚀量(g)。

同时,为评估 PAM 对片蚀的综合影响,利用 WEPP(water erosion prediction project)模型中细沟间侵蚀模型方程[公式(3)][18] 计算确定不同 PAM 施加量条件下坡面片蚀可蚀性。

D_i = K_i I^2 S_f (3)

式中:D_i 为土壤片蚀侵蚀率[kg/(m^2 · s)];K_i 为土壤片蚀可蚀性[(kg · s)/m^4];I 为雨强(m/s);S_f 为坡度因子,采用公式(4)计算确定。

S_f = 1.05 - 0.85e^(-4 sin φ) (4)

式中:φ 为径流小区坡度(°)。

2 结果与分析

2.1 PAM 施加对片蚀过程的影响

不同坡度条件下相同雨强的坡面径流率和产沙率随降雨时间的变化趋势基本一致,因此本文以雨强为 90 mm/h 为例,分析不同坡度和 PAM 施加量条件下径流率(图 1)和产沙率(图 2)变化过程。径流率随降雨时间增加均呈现先持续增加后趋于波动稳定的变化趋势。空白对照以及 PAM 施加量为 0.4, 0.8, 1.6 g/m^2 坡面径流率分别为 0.93~1.68, 0.80~1.42, 0.50~1.11, 0.61~1.19 L/(m^2 · min),表明随着 PAM 施加量的增加,坡面径流率呈先减小后增大的趋势,各施加量下径流率均小于未施加 PAM 坡面的径流率,在施加量为 0.8 g/m^2 时径流率达到最小。坡面产沙率则随着降雨历时的增加呈现先迅速减少并趋于稳定的变化趋势。空白对照以及 PAM 施加量为 0.4, 0.8, 1.6 g/m^2 坡面产沙率分别为 0.65~12.01, 0.27~10.44, 0.11~10.07, 0.28~10.68 g/(m^2 · min),表明随着 PAM 施加量的增加,坡面产沙率呈先减小后增大的趋势,各施加量下产沙率均小于未施加 PAM 坡面的产沙率,在施加量为 0.8 g/m^2 时产沙率达到最小。

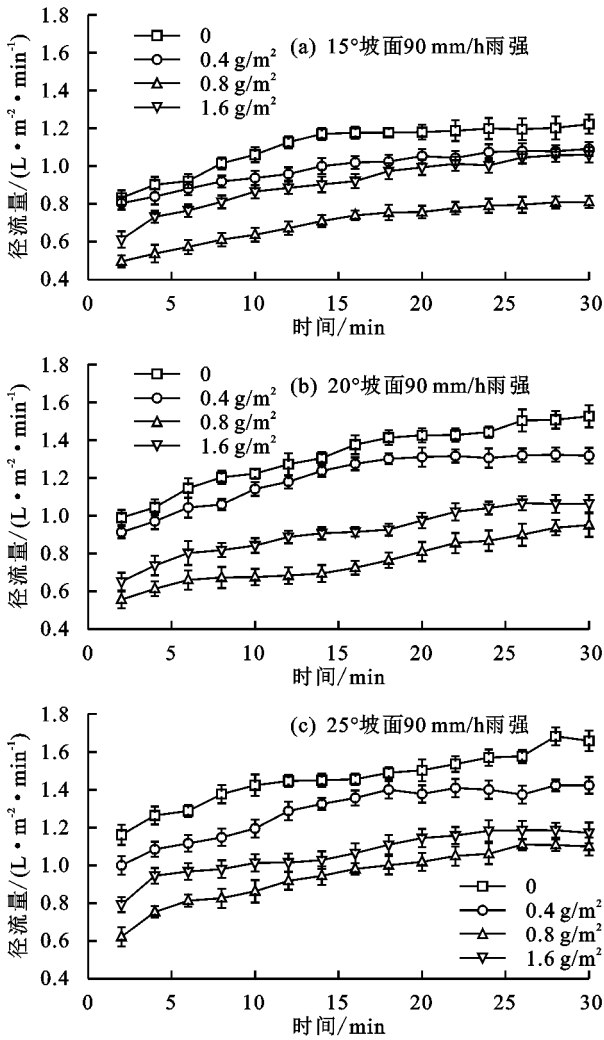


图 1 不同坡度条件下径流率随降雨时间的变化

2.2 PAM 施加对产流产沙总量的影响

各坡面条件下坡面产流总量和产沙总量均随着雨强和坡度的增加而增大(图 3 和图 4)。与 60 mm/h 降雨条件相比,90, 120 mm/h 产流总量平均分别增加 49.48%和 65.60%,产沙总量平均分别增加 36.67%和 166.47%。与 15°坡面相比,20°和 25°坡面产流总量平均分别增加 16.76%和 28.98%,产沙总量平均分别增加 62.75%和 188.48%。随着 PAM 施加量的增加,产流总量和产沙总量呈先减小后增大的趋势,各施加量下产流量和产沙量均小于未施加 PAM 坡面的产流量和产沙量,在施加量为 0.8 g/m^2 时产流总量和产沙总量最小。与空白对照相比,PAM 施加量为 0.4, 0.8, 1.6 g/m^2 的产流总量平均分别减小 7.71%, 35.16%, 21.12%,产沙总量平均分别减小 35.80%, 49.39%, 17.85%。

方差分析表明雨强、坡度和 PAM 施加量单一和复合作用均对坡面产流量和产沙量有显著性影响(表 1)。径流率的影响因素显著性排序为雨强>PAM>坡度,产沙率的影响因素显著性排序为雨强>坡度>PAM。

PAM 施加对坡面减流效益和减沙效益受到雨强、坡

度和施加量的影响(表2)。同种雨强下,不同施加量减流效益的大小顺序为 $0.8\text{ g/m}^2 > 1.6\text{ g/m}^2 > 0.4\text{ g/m}^2$,而减沙效益则受到坡度影响,在 15° 坡面减沙效益大小顺序为 $0.8\text{ g/m}^2 > 1.6\text{ g/m}^2 > 0.4\text{ g/m}^2$,在 20° 和 25° 坡面减沙效益大小顺序为 $0.8\text{ g/m}^2 > 0.4\text{ g/m}^2 > 1.6\text{ g/m}^2$ 。

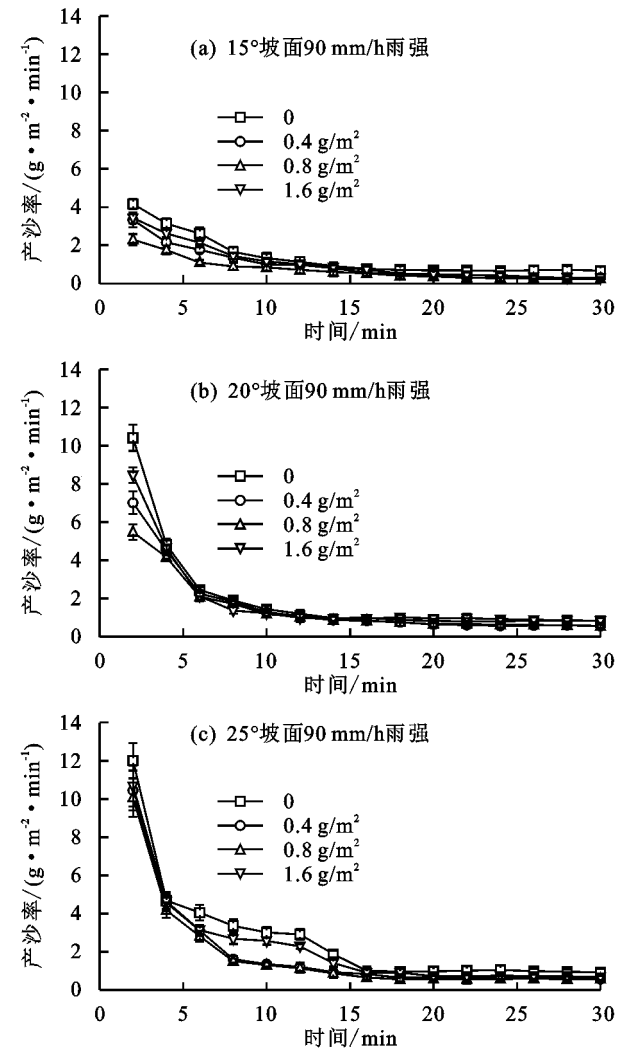


图2 不同坡度条件下产沙率随降雨时间的变化

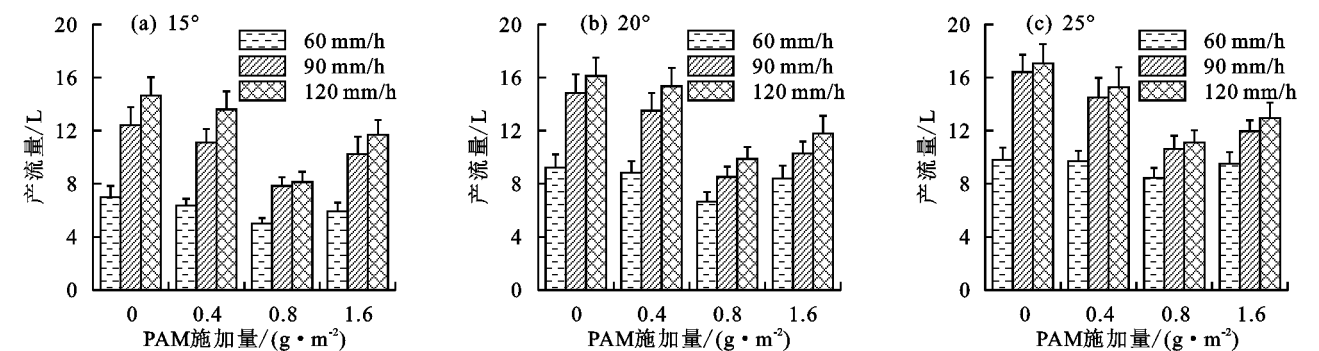


图3 不同坡度条件下产流总量

坡面产沙率则随着降雨历时的增加呈现先迅速减少并趋于稳定的变化趋势。在降雨初期阶段,空白对照坡面易被搬移的分散土壤颗粒经坡面径流冲刷,从而产沙率较大,随着降雨时间的增加,空白坡面形成了不易流失的薄层结皮,因此后续的产沙率整体较低^[3]。而对

2.3 PAM 施加对坡面片蚀可蚀性的影响

不同坡面条件下片蚀量(D_i)随着 I^2S_f 的增加而增加(图5),线性函数能够很好地描述两者之间的关系(决定系数均 > 0.90 , $p < 0.01$)。根据 WEPP 模型中细沟间侵蚀预测方程,计算得到不同坡面条件下片蚀可蚀性的变化范围为 $37\ 170 \sim 81\ 516\ (\text{kg} \cdot \text{s})/\text{m}^4$ 。空白对照以及 PAM 施加量为 $0.4, 0.8, 1.6\text{ g/m}^2$ 坡面片蚀可蚀性分别为 $81\ 516, 48\ 139, 37\ 170, 66\ 672\ (\text{kg} \cdot \text{s})/\text{m}^4$ 。与空白对照相比,施加 PAM 能有效降低片蚀可蚀性,PAM 施加量为 $0.4, 0.8, 1.6\text{ g/m}^2$ 坡面片蚀可蚀性分别减小 $40.94\%, 54.40\%, 18.21\%$ 。降低效果依次为 PAM 施加量为 $0.8\text{ g/m}^2 > 0.4\text{ g/m}^2 > 1.6\text{ g/m}^2$ 。

3 讨论

坡面径流率随降雨时间的增加均呈现先持续增加后趋于波动稳定的变化趋势。空白对照坡面在降雨初期受到雨滴打击作用,在坡面表层形成结皮并持续发育,结皮层降低坡面入渗率造成坡面径流持续增加,在降雨的中后期,结皮层发育基本完全,但在雨滴打击下被破坏和重新发育,故最后呈现波动稳定的趋势,这与前人^[19]研究的空白坡面产流趋势类似。施加 PAM 的坡面产流趋势和空白坡面一样,但径流率整体降低,这主要是在降雨初期,PAM 促进了土壤团聚体和土壤结构的稳定,从而维持坡面的入渗能力,随着降雨时间的增加,其形成的大团聚体及大团聚体被不断拆解为小粒径的颗粒一并被搬移,随入渗水流下渗导致孔隙率下降,坡面形成了发育不完全的结皮,径流率也逐渐增加后趋于稳定。这与施用适量的 PAM 可以增强入渗^[20]、延缓结皮的产生^[19] 研究结果类似。有研究^[12-13]表明,过量的 PAM 形成的人工结皮降低入渗能力,但本试验的 PAM 施加量未达到对土壤入渗产生阻碍的施加量。

施加 PAM 坡面来说,降雨初期阶段,坡面仍然存在部分松散土壤颗粒,因此初始产沙率也较大,随着降雨时间的增加,依靠 PAM 的胶结作用和絮凝作用把表层细小颗粒团聚成大颗粒骨架,使得坡面形成一层 PAM 胶结结皮层,因此后续的产沙率也变低了。

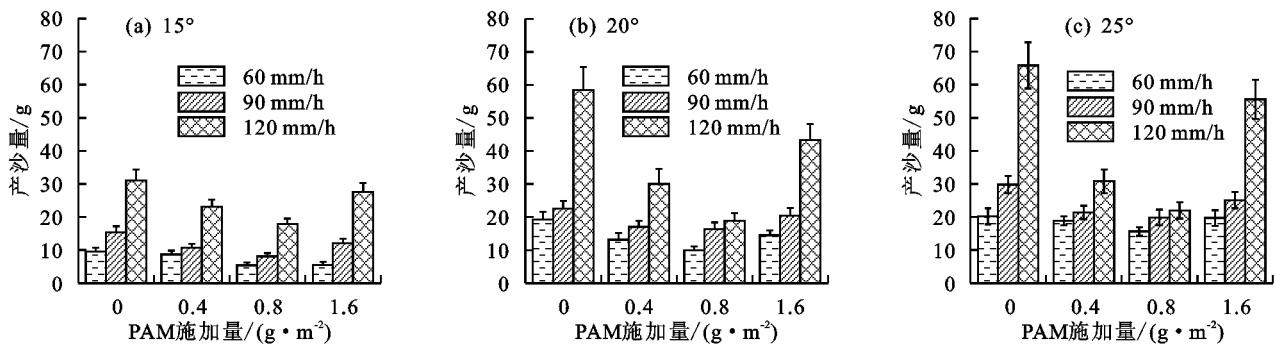


图 4 不同坡度条件下产沙总量

表 1 径流率和产沙率方差分析

侵蚀特征	项目	PAM	坡度	雨强	PAM * 坡度	PAM * 雨强	坡度 * 雨强	PAM * 坡度 * 雨强
径流量	<i>F</i>	10024.54	6282.84	24060.34	101.17	909.16	130.99	56.04
	<i>P</i>	0	0	0	0	0	0	0
产沙量	<i>F</i>	107.23	181.28	463.59	7.67	35.65	5.91	4.84
	<i>P</i>	0	0	0	0	0	0	0

注：* 表示因素间的复合作用。

表 2 不同 PAM 施加量作用下减流减沙效益

PAM 施加量/ (g·m ⁻²)	雨强/ (mm·h ⁻¹)	15°		20°		25°	
		减流效益/%	减沙效益/%	减流效益/%	减沙效益/%	减流效益/%	减沙效益/%
0.4	60	9.35	9.20	4.15	31.64	1.09	6.68
	90	10.65	21.43	9.05	24.36	11.71	28.34
	120	7.02	25.71	4.82	48.58	10.57	53.20
0.8	60	28.50	43.89	27.73	48.34	14.07	22.56
	90	36.82	47.23	42.60	27.29	35.26	33.33
	120	44.44	42.40	38.76	69.38	34.88	60.94
1.6	60	15.40	42.74	8.87	24.74	3.20	2.57
	90	17.67	30.03	30.74	9.51	27.15	15.76
	120	20.16	11.05	26.92	25.80	24.09	15.64

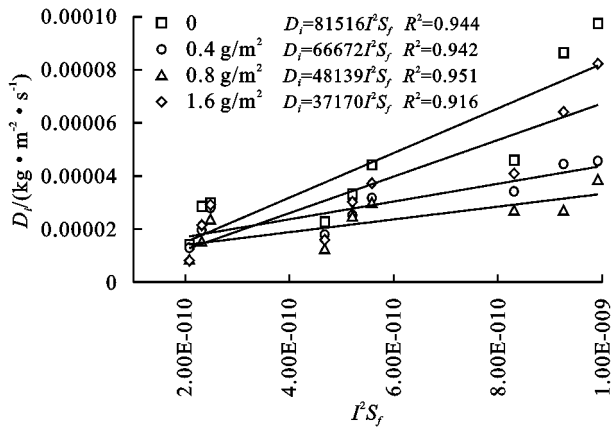


图 5 片蚀与影响因子拟合关系

各坡面条件下产流总量随着雨强和坡度的增加而增大,但是产流量增长速率没有增大,分析其原因主要是大雨强的径流入渗速率高于中小雨强^[21],而坡度的增加减小了承雨面积。各坡面条件下产沙总量同样随着雨强和坡度的增加而增大,且产沙量增长速率进一步增大,分析其原因主要是大雨强增加径流冲刷能力的同时增加了雨滴溅蚀量^[15],大坡度增加水流侵蚀能力的同时降低了坡面稳定性^[22]。

同种雨强下,不同施加量减流效益的大小顺序为 0.8 g/m² > 1.6 g/m² > 0.4 g/m²,平均减流效益为 33.67%, 19.36%, 7.60%,这与陈渠昌等^[12]得出的 0.86 g/m²的 PAM 可使得土壤入渗率最大的结论较为一致。然而,陈渠昌等^[12]得到的最佳减流效益超过 90%,远大于本研究中的 33.67%,所得结果存在差异可能与试验对象不同有关。本研究使用的是具有较好结构性的紫色土,而陈渠昌等^[12]所用的是结构性极差的风沙土,在裸坡时更容易发生侵蚀。同种雨强下,减沙效益受到坡度影响,15°坡面减沙效益大小顺序为 0.8 g/m² > 1.6 g/m² > 0.4 g/m², 20°和 25°坡面减沙效益大小顺序为 0.8 g/m² > 0.4 g/m² > 1.6 g/m²。本研究中的施用 PAM 在 20°时有最大的减沙效益,这和王丽等^[23]研究认为,坡度的改变对减少产沙量具有显著性影响结果一致。3 种坡度下 PAM 施加量为 0.8 g/m²时减沙效益均为最好,这与 PAM 施加量为 0.8 g/m²时坡面径流率最小但片蚀可蚀性最大有关(图 3 和图 5),径流量的减少和片蚀可蚀性增加均能有效减少坡面侵蚀的产生。

片蚀可蚀性随着 PAM 施加量的增加呈现先减小后增加的变化趋势,在施加量为 0.8 g/m^2 最小。PAM 施加量太少时难以与土壤表层颗粒充分发生理化反应,导致减蚀效果较差,而施加量过大时则容易在土体表面形成糊状结皮层,造成入渗率下降,导致径流量和径流动能增加,携沙能力变强,产流产沙增加^[24]。本研究结果表明,PAM 施加量为 0.8 g/m^2 时,可以充分改善坡面理化结构,依靠其胶结作用和絮凝作用把表层细小颗粒团聚成大颗粒骨架,其形成的胶结结皮层在保持良好入渗能力的同时能够抑制水流对表层土壤的剥离能力作用和雨滴对土壤颗粒机械破坏作用,具有良好的减蚀效果。

4 结论

(1)紫色土坡面片蚀过程中,坡面径流率随降雨时间的增加呈现先持续增加后趋于波动稳定的变化趋势,坡面产沙率随着降雨历时的增加呈现先迅速减少并趋于稳定的变化趋势,施加 PAM 对片蚀的产流产沙过程变化趋势没有影响。

(2)随着 PAM 施加量的增加,坡面产流总量和产沙总量均呈现先减小后增加的变化趋势。与空白对照相比,PAM 施加量为 $0.4, 0.8, 1.6\text{ g/m}^2$ 的产流总量平均分别减小 $7.71\%, 35.16\%, 21.12\%$,产沙总量平均分别减小 $35.80\%, 49.39\%, 17.85\%$,PAM 施加量为 0.8 g/m^2 时具有最优的减流减沙效益。

(3)对紫色土径流率的影响因素显著性排序为雨强>PAM>坡度,产沙率的影响因素显著性排序为雨强>坡度>PAM。

(4)施加 PAM 能有效降低片蚀可蚀性,与裸坡对照相比,施加 PAM 后降低效果依次为 $0.8\text{ g/m}^2 > 0.4\text{ g/m}^2 > 1.6\text{ g/m}^2$,片蚀可蚀性依次降低 $54.40\%, 40.94\%, 18.21\%$ 。

参考文献:

[1] 周涛,湛芸,王润泽,等.种草和施用聚丙烯酰胺对荒坡紫色土抗剪和抗蚀性能的影响研究[J].草业学报,2019,28(3):62-73.

[2] 李芦嶝,吴冰,李鑫璐,等.土壤侵蚀中的片蚀研究综述[J].地球科学进展,2021,36(7):712-726.

[3] 陈晓燕,王茹,卓素娟,等.不同降雨强度下紫色土陡坡地侵蚀泥沙养分特征[J].水土保持学报,2012,26(6):1-5.

[4] 李进林,韦杰.三峡库区坡耕地埂坎类型、结构与利用状况[J].水土保持通报,2017,37(1):229-233.

[5] 郑江坤,李静苑,秦伟,等.川北紫色土小流域植被建设的水土保持效应[J].农业工程学报,2017,33(2):141-147.

[6] 郭萍,夏振尧,高峰,等.香根草植物篱对三峡库区坡地紫色土侵蚀的影响[J].农业工程学报,2021,37(19):105-112.

[7] 周继,陈晓燕,谢德体,等.土壤改良剂聚丙烯酰胺对紫色土物理性质及其空间变异的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):171-177.

[8] Wang A P, Li F H, Yang S M. Effect of polyacrylamide application on runoff, erosion, and soil nutrient loss under simulated rainfall [J].Pedosphere,2011,21(5):628-638.

[9] Zhao Y G, Xu M X. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the hilly Loess Plateau region, China: Influence of biocrust patches and plant canopies [J].Journal of Hydrologic Engineering,2013,18(4):387-393.

[10] 王勇,李富程,汪璇,等.聚丙烯酰胺对紫色土坡地耕作位移及土壤结构的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):51-56.

[11] 李雪梅,江韬,滕玲玲,等.模拟降雨条件下不同 PAM 用量及其与强化剂联用对紫色土磷素流失的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):1-6,61.

[12] 陈渠昌,雷廷武,李瑞平.PAM 对坡地降雨径流入渗和水力侵蚀的影响研究[J].水利学报,2006,37(11):1290-1296.

[13] 吕威,李淑芹,雷廷武,等.聚丙烯酰胺应用对黄土复合坡面降雨产流的影响[J].农业工程学报,2014,30(6):71-79.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019:292-294.

[15] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):18-23.

[16] 罗先启,葛修润.滑坡模型试验理论与实践[M].北京:水利水电出版社,2008:94-96.

[17] 李秋艳,蔡强国,方海燕,等.长江上游紫色土地区不同坡度坡耕地水土保持措施的适宜性分析[J].资源科学,2009,31(12):2157-2163.

[18] Zhang F B, Wang Z L, Yang M Y. Validating and improving interrill erosion equations [J]. PLoS One, 2014,9(2):e88275.

[19] 于健,雷廷武,张俊生,等.不同 PAM 施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J].农业工程学报,2010,26(7):38-44.

[20] 王辉,王全九,邵明安,等.表土结皮影响坡地产流产沙及养分流失的试验研究[J].水土保持学报,2008,22(4):35-38.

[21] 胡霞,蔡强国,刘连友,等.聚丙烯酰胺(PAM)对黄土结皮形成的影响[J].水土保持学报,2004,18(4):65-68.

[22] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.

[23] 王丽,王力,王全九.PAM 对不同坡度坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J].环境科学学报,2015,35(12):3956-3964.

[24] 杨永辉,武继承,赵世伟,等.PAM 的土壤保水性能研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(12):120-124.