

# PAM 对寒区粉壤土堤防护坡产流产沙特征的影响

刘鸿涛<sup>1,2,3</sup>, 李起龙<sup>1,2</sup>, 韩宇<sup>4</sup>, 蔡磔<sup>1,2</sup>, 励其其<sup>4</sup>, 龙昱帆<sup>1,2</sup>

(1.长春工程学院 水利与环境工程学院, 长春 130012;

2.吉林省水工程安全与灾害防治工程实验室, 长春 130012;

3.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 4.中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:**为研究解决寒区粉壤土堤防背水坡面的水土流失问题,基于室外模拟降雨试验,研究第二松花江流域粉壤土堤防坡面施加聚丙烯酰胺(PAM)后在不同坡度和下垫面条件下对坡面侵蚀特征的影响。试验包括 4 个坡度( $10^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$ )和 5 种 PAM 浓度(0, 2, 3, 4, 5 g/m<sup>2</sup>)。结果表明:降雨强度和下垫面条件相同时,坡度从  $10^{\circ}$  增大至  $25^{\circ}$ , 坡面平均产流率先增大后减小,产沙率随坡度增大而增大。降雨强度和坡度相同时,聚丙烯酰胺浓度 2 g/m<sup>2</sup> 增大至 5 g/m<sup>2</sup>, 平均产流率相较于 0 g/m<sup>2</sup> 降低了 10.6%~20%;平均产沙率随浓度的增大而减小。将坡度和浓度的平均产沙率进行拟合,得出产沙率与坡度呈现正相关性,与浓度呈现负相关性。0 g/m<sup>2</sup> 坡面的侵蚀形态主要表现为溅蚀和面蚀特征,施加 PAM 使得坡面侵蚀严重区域面积相较于 0 g/m<sup>2</sup> 减小 54.57%,起到了一定控制侵蚀的效果。可见,在坡面上施加一定量的聚丙烯酰胺可以使土壤水分入渗能力增强,减少侵蚀产沙,在实际工程中具有运用的价值。

**关键词:**坡面侵蚀;聚丙烯酰胺;坡度;产流产沙

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0014-07

## Effect of PAM on the Characteristics of Runoff and Sediment Yield in Protection Slope of Embankment of Silty Loam in Cold Area

LIU Hongtao<sup>1,2,3</sup>, LI Qilong<sup>1,2</sup>, HAN Yu<sup>4</sup>, CAI Die<sup>1,2</sup>, LI Qiqi<sup>4</sup>, LONG Yufan<sup>1,2</sup>

(1.School of Water Conservancy & Environment Engineering, Changchun

Institute of Technology, Changchun 130012, China; 2.Laboratory of Applied Disaster Prevention in

Water Conservation Engineering of Jilin Province, Changchun 130012, China; 3.Water Conservancy

and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

4.College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of soil and water loss on the backwater slope of the silty loam dyke in the cold region, based on the outdoor simulated rainfall experiment, the influence of PAM on the slope erosion characteristics of the second silty loam dyke in the Songhuajiang River basin under different slope gradients and underlying surface conditions were studied. The treatments included 4 slope gradients ( $10^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$ ) and 5 PAM concentrations (0, 2, 3, 4, 5 g/m<sup>2</sup>). The results showed that the slope gradients increased from  $10^{\circ}$  to  $25^{\circ}$ , the average runoff of the slope first increased and then decreased, and the sediment yield increased with the increase of the slope under the same rainfall intensity and underlying surface conditions; the concentration of polyacrylamide increased from 2 g/m<sup>2</sup> to 5 g/m<sup>2</sup>, and the average flow yield decreased by 10.6%~20% compared with bare land under the condition of the same rainfall intensity and slope; the average sediment yield decreased with the increase of concentration; there were the positive correlation between sediment yield and slope and the negative correlation between sediment yield and concentration based on fitting average sediment yield of slope and concentration; the erosion pattern of open slope was

收稿日期:2020-02-22

修回日期:2020-03-22

资助项目:吉林省高校科技与社科“十三五”科研规划项目(JJKH20200629KJ);吉林省科技厅重点科技研发项目(专项支持)(20180201036SF);内蒙古自治区水利建设基金项目(213-03-10-303002-nsk2018-M5)

第一作者:刘鸿涛(1979—),男,河北安新人,教授,硕士生导师,主要从事灌区现代化技术、水工水力学、堤防侵蚀防控技术研究。E-mail: 576609094@qq.com

通信作者:李起龙(1992—),男,河南许昌人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:1096100511@qq.com

mainly characterized by splash erosion and surface erosion; the application of PAM reduced the area of serious slope erosion by 54.57% compared with that of open slope, which had a certain effect of erosion control. It is concluded from this experiment that the application of polyacrylamide on the slope can enhance the soil water infiltration capacity and reduce the erosion and sediment production.

**Keywords:**slope erosion; polyacrylamide; slope; runoff and sediment yield

堤防是防御洪水泛滥,确保城镇居民安全和工农业生产的重要措施,其背水坡面在受到降雨径流侵蚀之后容易产生薄弱断面,影响其运行期的安全。第二松花江干流流域为温带季风性气候,流域内堤防多为填方土堤。开展第二松花江流域粉壤土堤防坡面产流产沙规律研究,对该地区堤防护坡侵蚀治理具有重要意义。

水力侵蚀是目前世界上分布最广,危害极大的一种土壤侵蚀类型;面蚀是水力侵蚀的一种形式,是坡面径流侵蚀的最初阶段;在面蚀的诸多影响因素中,坡度是重要因素之一<sup>[1-3]</sup>,其影响程度仅次于植被覆盖度。坡度对坡面侵蚀的演变发展过程和侵蚀强度起着重要作用,其大小在一定程度上决定了径流的冲刷与搬运能力<sup>[4]</sup>。黑土区坡面侵蚀过程研究表明,坡面侵蚀量随着坡度增加而增大,而坡面径流量随坡度的变化尚有争议<sup>[5-7]</sup>。近些年来,化学调控措施被引入到防治水土流失的研究中。PAM 是一种是线型高分子化合物,可溶于水且具有很强的黏聚作用,在水土流失严重的黄土高原地区,PAM 的施用更加重要。施加 PAM 可以使土壤凝聚力和抗侵蚀力增强、减少水土流失<sup>[8-9]</sup>。根据相关学者的研究成果,相同 PAM 浓度施用对象不同时,对土壤径流量影响也不同<sup>[10-11]</sup>。由此可见,对于不同地区的土壤类型以及 PAM 施用量的多少对产流产沙的影响不尽相同。尽管有很多关于 PAM 对土壤侵蚀的研究,但由于试验条件的不同,所以 PAM 用量对产流产沙的影响尚无统一结论。

通过室外模拟降雨试验,研究黑土区粉壤土堤防护坡在不同 PAM 浓度和坡度影响下的坡面产流产沙规律,旨在深入了解黑土区坡面产流产沙规律,得到有效的防治土壤侵蚀的措施,同时综合前人研究成果,以期能为该区域堤防坡面侵蚀防治工作提供理论指导。

## 1 试验设计与方法

### 1.1 试验设计

试验土壤取自前郭县第二松花江干流堤防外坡地,取土深度为表层 20 cm。堤防坡比为 1:3,坡长 8~10 m。土壤机械组成采用激光粒度分析法,黏粒含量为 6.82%,粉粒含量为 58.70%,砂粒含量为

34.48%,土壤类型为粉壤土,土壤容重 1.3 g/m<sup>3</sup>。詹敏<sup>[12]</sup>和张宪奎<sup>[13]</sup>等指出黑土区土壤侵蚀是由高强度短历时降雨引起,且降雨历时在 30~60 min;产生侵蚀的短历时瞬时降雨强度范围 23.4~103.2 mm/h。基于上述标准和试验实际情况,本试验降雨强度选取 80 mm/h;第一组试验下垫面条件为 PAM 浓度 3 g/m<sup>2</sup>,选取 4 个不同坡度;第二组试验选取坡度 15°,下垫面条件为 5 个均匀施加不同 PAM 浓度的坡面。4 个不同坡度和 5 个不同 PAM 浓度的进行试验,共 9 个场次。坡度及 PAM 浓度等参数见表 1。

表 1 试验设计

编号	降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	坡度/ (°)	土壤类型	PAM 浓度/ (g·m <sup>-2</sup> )
1	80	10	粉壤土	3
2	80	15	粉壤土	3
3	80	20	粉壤土	3
4	80	25	粉壤土	3
5	80	15	粉壤土	0
6	80	15	粉壤土	2
7	80	15	粉壤土	3
8	80	15	粉壤土	4
9	80	15	粉壤土	5

试验采用 Norton 降雨模拟系统,该系统使用振荡式原理模拟自然条件下的降雨。降雨强度 9.5~100 mm/h,降雨均匀度大于 80%,降雨面积 2 m×5 m,降雨高度 6 m。X-Scan 手持快速激光扫描仪测量范围 0.15~4 m,激光头分辨率为 0.1 mm,测量速度 550 000 次/s。通过特征拼接和标记点定位的方式测量地貌,以三维图形方式显示测量数据。降雨使用可移动式变坡径流槽,规格为长 1.5 m,宽 0.4 m,深 0.4 m,坡度变化范围 0°~30°。径流槽底部均匀打孔,径流槽前段设置“V”字形集流槽。

### 1.2 试验方法

试验土壤除去杂质,过 5.0 mm 筛网后进行风干和混合处理。为精确模拟河道边坡填筑的真实情况,采用分层填土方式。在装填上层土壤之前先对下层土壤进行打毛、洒水湿润,保证两层土壤紧密融合,以防土层分离。

每次试验开始前先清除径流槽内土壤,重新装土。然后取出部分土壤与 PAM 颗粒均匀拌和,对径流槽内土壤打毛和洒水,将拌和均匀土壤铺设在径流槽内,对坡面进行预降雨至坡面土壤饱和为止,为了防止土壤水分蒸发、结皮,使用塑料薄膜覆盖径流槽,静置 24 h。在降雨场地内均匀布置 4 个蒸发皿率定雨强,当降雨均匀度大于 80% 时开始试验。降雨历时 1 h,记录开始产流时间,产流开始后每隔 3 min 收集 1 次径流泥沙样,每次收集时间 10 s,用秒表记录取样时间。采用高锰酸钾染色法测坡面流速,产流开始后每隔 3 min 测 1 次流速。降雨结束后,使用激光扫描仪扫描坡面获取地表三维数据。将径流泥沙和总径流泥沙样品静置沉淀,使用量筒测量产流量,径流泥沙用烘箱烘干至恒重,电子秤记录产沙重。

将每次测得产流量和产沙量使用 Excel 进行处理,得到取样时间段内产流率和产沙率。采用 Origin 绘制产流率和产沙率的变化曲线;采用 Geomagic Studio 对坡面三维点云数据进行处理,从而获得坡面

数据;然后将坡面数据导入 ArcGIS 中,进行灰度映射,侵蚀较为严重区域用黑色表示,提取侵蚀严重的区域(以侵蚀深度 $\geq 20$  mm 作为提取标准)。

2 结果与分析

2.1 PAM 浓度和坡度对堤防坡面产流产沙的影响

2.1.1 PAM 浓度和坡度对堤防坡面产流的影响

图 1A 为在雨强和坡度相同时,不同下垫面条件下产流率随降雨历时出现不同程度的波动。如图 1B 所示,平均产流率以  $3\text{ g/m}^2$  为分界点,大于  $3\text{ g/m}^2$  产流率随浓度增大而减小,浓度小于  $3\text{ g/m}^2$  产流率随浓度增大而增大。 $3\text{ g/m}^2$  平均产流率相比  $0\text{ g/m}^2$  减小了约 20%;不同 PAM 浓度均表现出土壤入渗增大,平均产流率降低了 10.6%~20%,并且平均产流率先减小后增大,即  $0\text{ g/m}^2 > 5\text{ g/m}^2 > 4\text{ g/m}^2 > 2\text{ g/m}^2 > 3\text{ g/m}^2$ 。分析得出 PAM 浓度在一定范围内,可以打开土壤下渗通道,提高土壤入渗率,减小径流,超出这个范围时土壤入渗率减小,径流增大。

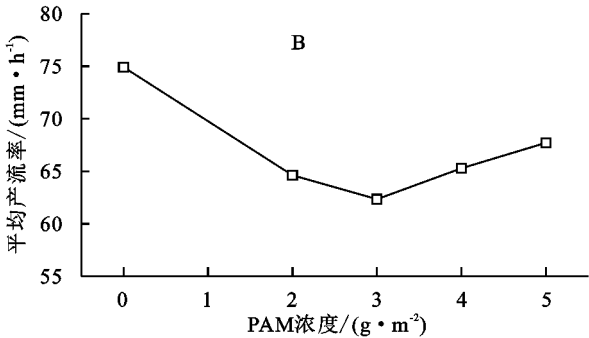
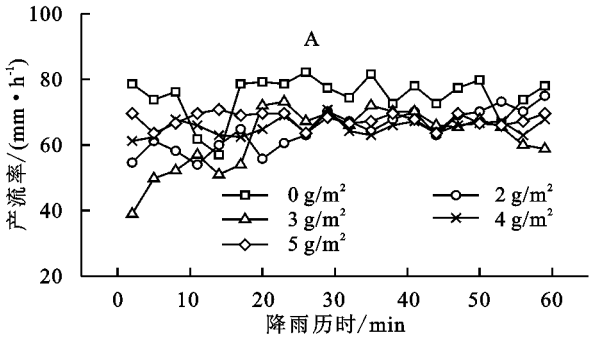


图 1 坡面产流率、平均产流率变化曲线

图 2 显示雨强和下垫面条件相同时,不同坡度每分钟产流率趋势差异较大,随降雨历时先急剧增长,后出现不同幅度的波动,但总体趋势为增大。在显著性水平为 0.05 时,使用单因素方差对每分钟产流率进行分析,发现坡度对坡面产流率有显著性影响,平均水平差异较大。图 2B 显示在下垫面条件相同时,15°和 20°坡面平均

产流率相近,25°坡面平均产流率急剧减小,但都大于 10°坡面平均产流率。即平均产流率  $15^\circ > 20^\circ > 25^\circ > 10^\circ$ 。在坡度较大时,受雨面积减小,在同一入渗的条件下,坡面径流量理论上应该逐渐递减,但本次试验以 15°坡面为分界点, $>15^\circ$  时产流率随坡度增大而减小, $<15^\circ$  时产流率随坡度增大而增大。

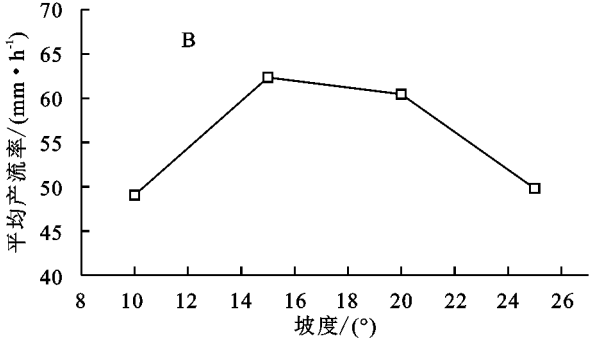
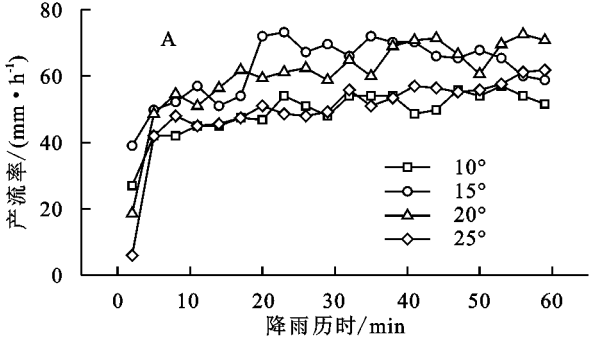


图 2 坡面产流率、平均产流率变化曲线

2.1.2 PAM 浓度和坡度对堤防坡面产沙的影响

图 3A 显示在雨强、坡度相同时,不同 PAM 浓度产沙

率趋势变化显著。PAM 浓度为 0, 2, 3, 5  $\text{g/m}^2$  坡面每分钟产沙率随降雨历时先增大,后出现不同程度的

波动,未趋于稳定。PAM 浓度为 4 g/m<sup>2</sup>坡面每分钟产沙率随降雨历时先缓慢增大,后趋于稳定。不同坡面每分钟产沙率随着 PAM 浓度的增大,产沙率逐渐减小。对不同浓度下每分钟产沙率,在显著性水平为 0.05 时,使用单因素方差对每分钟产流率进行分析,

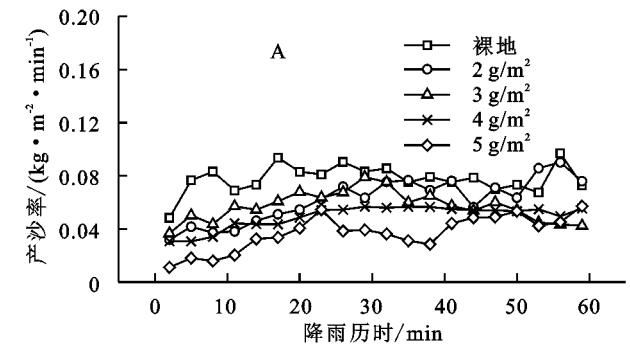


图 3 不同 PAM 浓度坡面产沙率变化曲线

图 3B 显示在 80 mm/h 降雨强度下,不同坡度产沙率趋势变化较大。坡度为 10°,15°,20°坡面产沙率呈现先急剧增大后缓慢减小的趋势;25°坡面产沙率呈现先急剧增大,后出现较大的波动。随着坡度的增大,坡面产沙率为增大趋势。在显著性水平为 0.05 时,使用单因素方差对每分钟产流率进行分析,发现坡度对产沙率影响显著。且平均产沙率 25°[0.083 93 kg/(m<sup>2</sup> · min)]>20°[0.065 10 kg/(m<sup>2</sup> · min)]>15°[0.056 81 kg/(m<sup>2</sup> · min)]>10°[0.051 28 kg/(m<sup>2</sup> · min)]。

为了更好地分析平均产沙率与坡度和 PAM 浓度的关系,将三者进行拟合,结果表明:平均产沙率与坡度和 PAM 浓度的关系可以用幂函数  $Se=a \cdot S^b \cdot C^d$  表示。式中:Se 为平均产沙率[kg/(m<sup>2</sup> · min)];S 为坡度(°);C 为 PAM 浓度(g/m<sup>2</sup>);a,b,d 均为拟合参数。

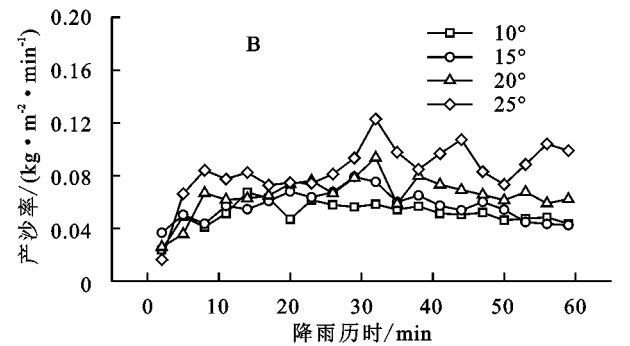
表 2 为不同坡度和 PAM 浓度与产沙率的经验方程。产沙率随降雨历时的变化规律可以用幂函数进行描述,产沙率(Se)与坡度(S)是正相关,坡度越大,产沙率越大;与浓度(C)为负相关,浓度越大产沙率越小,决定系数为 0.86,显著性水平为 0.05。图 4 为平均产沙率与 PAM 浓度和坡度拟合图形。

表 2 不同坡度与 PAM 浓度条件下产沙率的经验方程				
拟合类型	经验方程	决定系数	显著性水平	
坡度、PAM 浓度与产沙率拟合	$Se=0.0124S^{0.6898}C^{-0.3358}$	0.86	0.05	

2.2 PAM 浓度和坡度对地方坡面流速的影响

坡面径流是水力侵蚀发生、发展的主要动力,流速是坡面径流最重要的水力学要素<sup>[14-16]</sup>。在试验中通过染色法测定流速 v,同时根据监测到的水温,获得雷诺系数,从而获得修正系数 α。已有研究表明,在 PAM 单独使用情况下,由于其水溶液黏性较强,

发现浓度对产沙率影响显著。且平均产沙率 0 g/m<sup>2</sup> [0.077 76 kg/(m<sup>2</sup> · min)]>2 g/m<sup>2</sup> [0.061 88 kg/(m<sup>2</sup> · min)]>3 g/m<sup>2</sup> [0.056 81 kg/(m<sup>2</sup> · min)]>4 g/m<sup>2</sup> [0.049 27 kg/(m<sup>2</sup> · min)]>5 g/m<sup>2</sup> [0.036 94 kg/(m<sup>2</sup> · min)]。



会影响土壤水分的运动<sup>[17]</sup>。PAM 的用量越大,这种黏滞作用也越大<sup>[18]</sup>,从而引起水分入渗阻力的增大,土壤饱和和导水率降低也越多<sup>[19]</sup>。

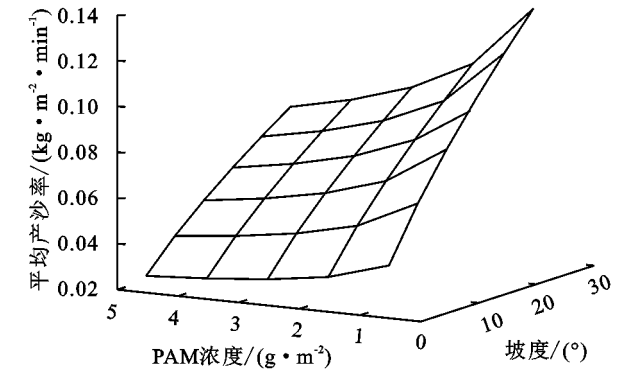


图 4 平均产沙率对 PAM 浓度和坡度的响应

图 5 为坡面施加 PAM 后流速随着其浓度和坡度变化的情况。在 PAM 浓度一定时,流速随坡度增大,先增大后趋于稳定,这表明施加 PAM 后坡面流速随坡度增大是在一定范围内的。在坡度不变时,流速在 PAM 浓度为 0~2 g/m<sup>2</sup> 内趋于稳定,在 2~5 g/m<sup>2</sup> 内先减小后增大,总体趋势为减小。

对修正流速与坡度和 PAM 浓度进行拟合,结果表明:修正流速与坡度和 PAM 浓度的关系可以用幂函数  $V=e \cdot S^f \cdot C^h$  表示。式中:V 为修正流速(m/s);S 为坡度(°);C 为 PAM 浓度(g/m<sup>2</sup>);e,f,h 均为拟合参数。

表 3 为 PAM 浓度和坡度与修正流速的经验方程。流速随降雨历时的变化规律可以用幂函数进行描述,流速与坡度是正相关,坡度越大,流速越大;与浓度为负相关,浓度越大流速越小,决定系数为 0.68,显著性水平为 0.05。图 6 为修正流速与坡度和 PAM 浓度拟合图形。



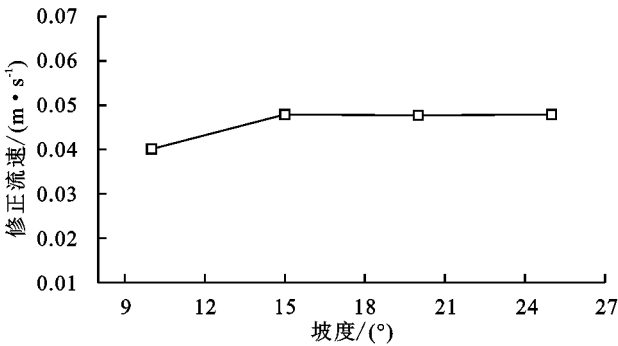
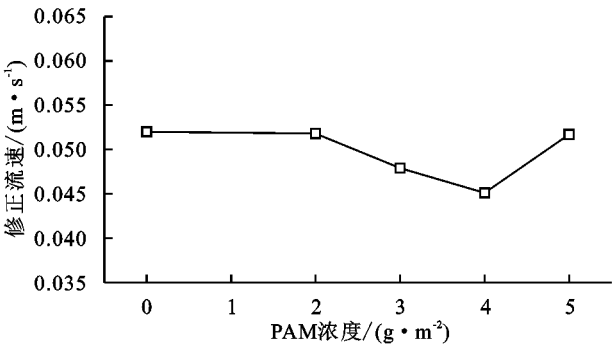


图 5 修正流速变化曲线

表 3 不同坡度与 PAM 浓度条件下流速的经验方程

拟合类型	经验方程	决定系数	显著性水平
坡度、PAM 浓度与修正流速拟合	$V=0.02458S^{0.2668}C^{-0.0748}$	0.68	0.05

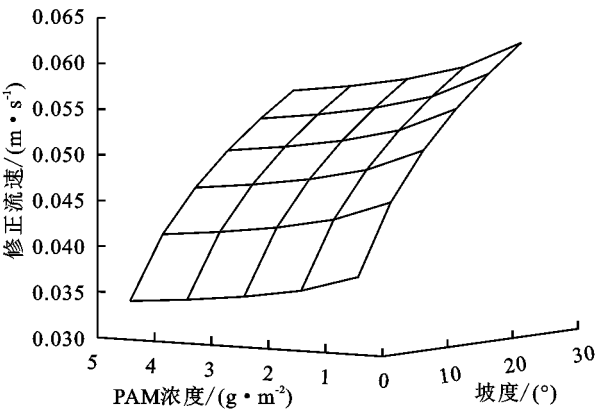


图 6 修正流速对 PAM 浓度和坡度的响应

2.3 坡面侵蚀的形态特征

水力侵蚀在不同阶段表现出不同的形式,同时会影响产流产沙,因而分析其形态对研究坡面产流产沙规律有重要的意义。相同坡度下,未施加 PAM 和 PAM 浓度 3 g/m<sup>2</sup> 为例进行分析。从图 7 中可以发现,0 g/m<sup>2</sup> 坡面侵蚀主要发生在坡面中上部,施加 PAM 坡面侵蚀区域呈现较均匀分布,两个坡面都是以面蚀为主,伴有溅蚀。0 g/m<sup>2</sup> 侵蚀严重区域主要表现为片状,侵蚀区域集中,面积较大,部分呈现出跌坎特征,侵蚀深度为 24~48 mm;PAM 坡面侵蚀严重区域主要表现为鳞片状,侵蚀严重区域为较集中,面积较大,部分出现层状特征,侵蚀深度为 21~36 mm。通过提取坡面侵蚀区域,发现 0 g/m<sup>2</sup> 侵蚀严重区域面积为 0.293 2 m<sup>2</sup>,占坡面面积的 48.86%;PAM 坡面侵蚀严重区域面积为 0.133 2 m<sup>2</sup>,占坡面面积的 22.2%,施加 PAM 后使得坡面侵蚀严重区域相比于 0 g/m<sup>2</sup> 减小了约 54.57%。施加 PAM 后坡面侵蚀程度减缓,说明施加 PAM 起到了防止侵蚀的效果。0 g/m<sup>2</sup> 受到薄层水流冲刷明显,侵蚀特征主要为片蚀,侵蚀区域为片状。PAM 坡面受到雨滴溅蚀

的影响,坑洼感较强,侵蚀区域连续,加上薄层水流冲刷,局部出现高地,这可能是因为 PAM 与土壤拌和不均匀导致的。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文在坡度为 15° 时,研究不同 PAM 浓度对坡面产流产沙和流速规律的影响。结果发现:随着 PAM 浓度的增大,坡面平均产流率先减小后增大,但相较于裸地施加 PAM 的坡面土壤入渗能力增大,坡面的平均产沙率减小。正如张淑芬<sup>[20]</sup>、裴峥等<sup>[21]</sup>和李清溪等<sup>[22]</sup>研究,PAM 能够维护土壤团聚体的结构并形成新的团聚体,与水相互作用产生的黏聚作用能有效缓解雨滴对土壤的表面打击并抑制结皮的形成,增加坡面地表糙度,从而可以增加土壤的入渗能力,减少地表径流,防止水土流失。此次试验中,流速随 PAM 浓度变化较大,其中 4 g/m<sup>2</sup> 坡面流速最小,径流量 3 g/m<sup>2</sup> 的坡面最小。Govers<sup>[23]</sup>、Nearing 等<sup>[24]</sup>、王林华<sup>[25]</sup>研究表明,坡面流速受到坡面地表糙度和径流量的影响,流速与径流量呈正相关,与地表糙度呈负相关。本试验施加 PAM 对坡面产流和产沙的研究结果与以上学者一致,而流速在 PAM 作用下与径流量和地表糙度的关系需要进一步论证。

在下垫面条件为 3 g/m<sup>2</sup> 时,研究不同坡度对坡面产流产沙和流速规律的影响。结果发现:坡面平均产流率随坡度增大呈先增大后减小趋势,平均产沙率随坡度增大而增大,且随着产沙率的增大,坡面侵蚀程度增大,地表糙度也相应增大。产流率受坡度影响大,以 15° 为转折点,先增大后减小,在 10°~15°,20°~25° 两个区间内变化明显。王丽<sup>[9]</sup> 和王全九<sup>[26]</sup> 等研究得出,当 15° 和 20° 时,其径流量相近,当坡度 25° 时,径流量急剧减小。然而,坡面流速随着坡度的变化未出现较大波动,流速在 15° 时达到最大,后趋于稳定。Govers<sup>[23]</sup>、Nearing 等<sup>[24]</sup>、王林华<sup>[25]</sup>、和继军

等<sup>[27]</sup>研究表明,坡度对流速影响不大,坡度增大侵蚀增加,地表糙度相应增大,从而流速不增大。刘俊体等<sup>[28]</sup>认为,随着坡度增大,细沟流速呈减小趋势,且

在 10°~15°存在一个流速转折坡度。本试验坡度对产流产沙及流速的研究与上述学者相近,但关于流速转折坡度需要进一步论证。

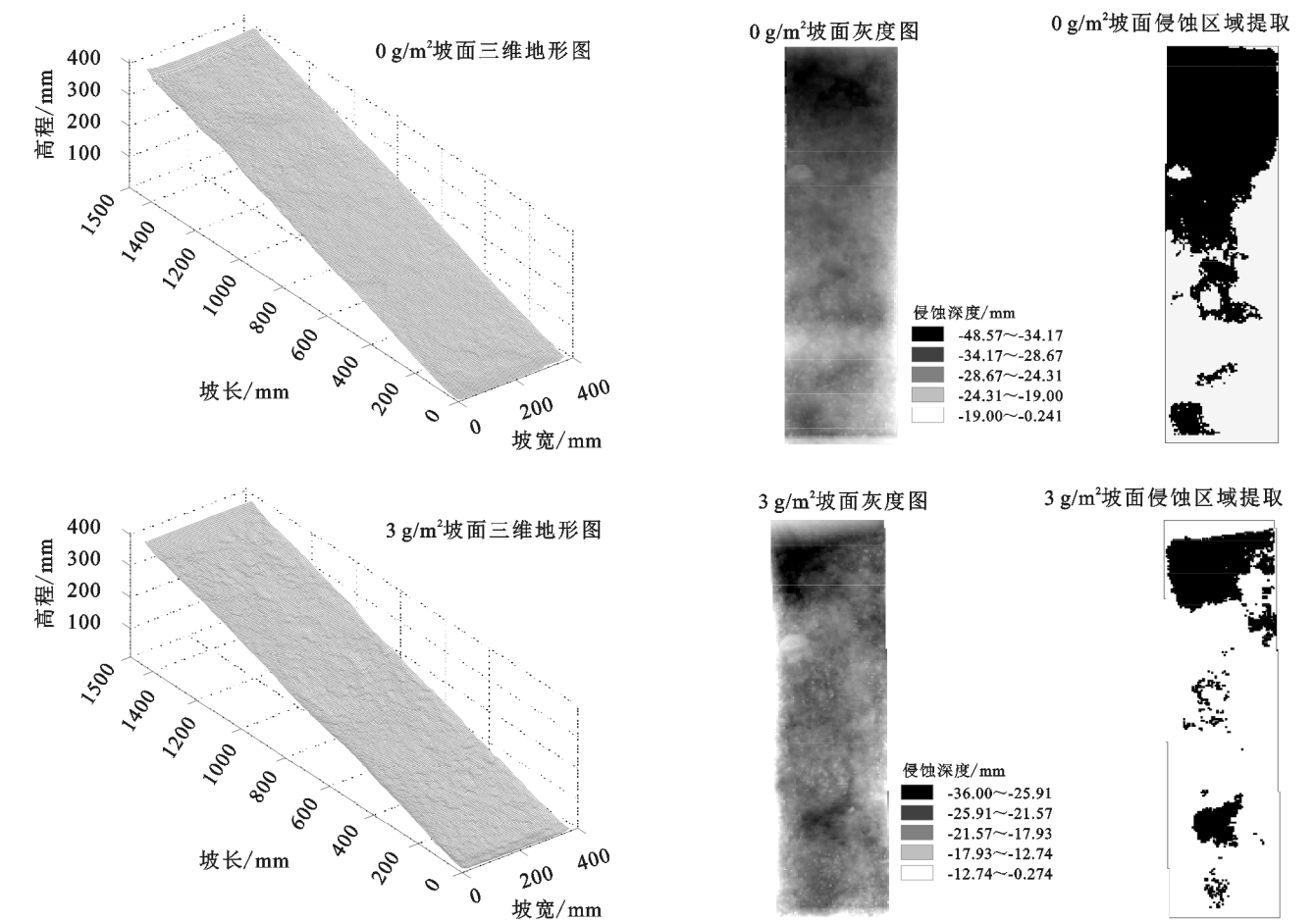


图 7 不同 PAM 浓度坡面侵蚀

通过野外调查和试验研究发现,细沟侵蚀占坡面总侵蚀量的 70% 以上,细沟形态对坡面侵蚀有重要影响,并以细沟割裂度作为评判细沟侵蚀和形态的标准<sup>[29-30]</sup>。李桂芳等<sup>[7]</sup>、耿晓东<sup>[31]</sup>、郝好鑫等<sup>[32]</sup>以粉壤土为坡面侵蚀研究对象,发现黑土不易发生细沟侵蚀。本次试验中,坡度为 15°,降雨强度为 80 mm/h 时未出现明显的细沟侵蚀,主要以面蚀为主。由于坡面汇流面积较小,坡长较短,这种情况下很难产生较大流量的径流,侵蚀受到一定的限制,侵蚀形态无法进一步演变发育<sup>[33]</sup>,因此本次试验并未出现明显的细沟侵蚀特征。

### 3.2 结论

(1) 相同坡度下,PAM 浓度 3 g/m² 的坡面较 0 g/m² 的坡面的平均产沙率降低 23.64%,平均产流率减小 16.78%,0 g/m² 上施加适量浓度的 PAM 使得土壤入渗能力增强,径流量减小,对坡面冲刷减弱,坡面侵蚀量减小。随着施加 PAM 浓度的增大,坡面平均产沙率降低 20.42%~52.49%。坡面平均产流

率呈现先减小后增大的趋势。本次试验 PAM 浓度在 3 g/m² 时坡面产流率最小,土壤入渗效果最好,超过时产流率增大。

(2) 下垫面条件相同时,坡面平均产沙率随坡度的增大而增大。坡面平均产流率在 15° 和 20° 时差异不大,坡度为 25° 时平均产流率急剧减小,且 3 个坡面平均产流率均大于 10° 坡面。

(3) 坡面侵蚀形态主要表现为溅蚀和面蚀,施加 PAM 使得侵蚀严重区域的面积相较 0 g/m² 减小了 54.57%,能够有效起到控制侵蚀的效果。在实际的堤防工程中具有应用价值。

### 参考文献:

- [1] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155:429-436.
- [2] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J].农业机械学报,2015,46(7):162-170.

- [3] Fu S H, Liu B Y, Liu H P, et al. The effect of slope on interrill erosion at short slopes [J]. *Catena*, 2011, 84 (1/2): 29-34.
- [4] 刘志, 江忠善. 降雨因素和坡度对片蚀影响的研究[J]. *水土保持通报*, 1994, 14(6): 19-22, 61.
- [5] 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生流沙特征[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 143-150.
- [6] 李洪丽, 韩兴, 张志丹, 等. 东北黑土区野外模拟降雨条件下产生流沙研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 49-52, 57.
- [7] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 147-154, 182.
- [8] 王计磊, 李子忠. 东北黑土区水力侵蚀研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(5): 389-397.
- [9] 王丽, 王力, 王全九. PAM 对不同坡度坡地产生流沙及氮磷流失的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(12): 3956-3964.
- [10] 宋月君, 黄炎和, 杨洁, 等. 南方典型土壤坡面产生流沙过程对 PAM 的响应[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 279-287.
- [11] 敖畅. 黄土坡地径流养分流失特征及其化学调控机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [12] 詹敏, 厉占才, 信玉林. 黑土侵蚀区降雨参数与土壤流失关系[J]. *黑龙江大学工程学报*, 1998(1): 40-43.
- [13] 张宪奎, 许靖华. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. *水土保持通报*, 1992, 12(4): 1-9, 18.
- [14] 陈丽燕, 雷廷武, 啜瑞媛. 坡面薄层水流优势流速研究[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(5): 130-137.
- [15] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 104-112, 89.
- [16] 林庆明, 丁文峰, 张长伟, 等. 模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 16-21.
- [17] 雷廷武, 唐泽军, 于剑, 等. 坡面土壤侵蚀动力过程与化学调控技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] 刘东, 任树梅, 杨培岭. 聚丙烯酰胺(PAM)对土壤水分蓄渗能力的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(4): 56-58, 63.
- [19] 潘英华, 雷廷武, 张晴雯, 等. 土壤结构改良剂对土壤水动力学参数的影响[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 37-39.
- [20] 张淑芬. 坡耕地施用聚丙烯酰胺防治水土流失试验研究[J]. *水土保持应用技术*, 2001(2): 18-19.
- [21] 裴峥, 段喜明, 侯礼婷. 施加 PAM 和 PG 对坡地产生流沙的影响研究[J]. *中国水土保持*, 2017(4): 59-62.
- [22] 李清溪, 丁文峰, 朱秀迪, 等. 雨强和地表糙度对坡面微地形及侵蚀的影响[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(1): 41-47.
- [23] Govers G. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17(5): 515-528.
- [24] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hill-slope[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24: 677-686.
- [25] 王林华. 黄土坡耕地地表粗糙度对入渗、产流及养分流失的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [26] 王全九, 穆天亮, 王辉. 坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(4): 176-179.
- [27] 和继军, 孙莉英, 蔡强国, 等. 坡面细沟发育特征及其对流速分布的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 862-870.
- [28] 刘俊体, 蔡强国, 孙莉英, 等. 黄土坡面细沟流速随细沟发育的特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 44-48.
- [29] 和继军, 吕焯, 宫辉力, 等. 细沟侵蚀特征及其产生流沙过程试验研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(4): 398-405.
- [30] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊. 细沟发育与形态特征研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6818-6825.
- [31] 耿晓东. 主要水蚀区坡面土壤侵蚀过程与机理对比研究[D]. 陕西杨凌: 教育部水土保持与生态环境研究中心, 2010.
- [32] 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.
- [33] 赵新凯, 龚家国, 任政, 等. 黑垆土坡面细沟形态演变规律试验研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(2): 205-212.