

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.025.

刘鸿涛, 郑琪严, 李起龙, 等. PAM对不同雨强下黑土区土质堤防侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 1-10.

Liu Hongtao, Zheng Qiyang, Li Qilong, et al. Effects of PAM on Soil Erosion Under Different Rainfall Intensities in Black Soil Areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 1-10.

PAM 对不同雨强下黑土区土质堤防侵蚀的影响

刘鸿涛^{1,2}, 郑琪严^{1,2}, 李起龙³, 赵瑞娟⁴, 李晓军⁵

(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. 广东珠荣工程设计有限公司, 广州 510000; 4. 松辽水利委员会, 长春 130012; 5. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 长春 130000)

摘要: [目的] 探究不同浓度 PAM 的防侵蚀效果, 进而为东北黑土区土质堤防治理提供理论依据。[方法] 采用人工模拟降雨试验, 共设置 2 个降雨强度 (60, 90 mm/h), 5 个 PAM 浓度 (0, 2, 3, 4, 5 g/m²), 观察不同雨强下 PAM 对坡面产流产沙、坡面侵蚀特征的影响, 分析了各侵蚀形态下的水力学参数。[结果] (1) 在同一 PAM 浓度下, 坡面平均产流率、平均产沙率随雨强的增大而增大。(2) 在两个雨强下, 平均产流率存在拐点, 3 g/m² 的平均产流率最小; 平均产沙率随着 PAM 浓度的增长而降低, 5 g/m² 平均产沙率最小。(3) 降雨强度 60 mm/h, 坡面的侵蚀形态主要表现为溅蚀和面蚀; 降雨强度 90 mm/h, 坡面侵蚀特征表现为面蚀, 部分伴有细沟侵蚀。(4) 雷诺数 (Re) 小于 500, 均为层流, 弗罗德数 (Fr) 小于 1, 属于缓流。降雨强度对水流剪切力、水流功率和单位水流功率的影响均大于 PAM 浓度。[结论] 东北黑土区坡面施加 PAM, 可有效改良土壤结构, 土壤水分入渗能力增强, 减少了坡面侵蚀产沙, 对于土质堤防侵蚀防治起到了一定的效果。

关键词: 坡面侵蚀; 降雨强度; PAM (聚丙烯酰胺); 产流产沙; 侵蚀形态

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0001-10

Effects of PAM on Soil Erosion Under Different Rainfall Intensities in Black Soil Areas

Liu Hongtao^{1,2}, Zheng Qiyang^{1,2}, Li Qilong³, Zhao Ruijuan⁴, Li Xiaojun⁵

(1. School of Water Conservancy and Environmental Engineering, Changchun

University of Engineering, Changchun 130012, China; 2. Jilin Provincial Water Engineering Safety and Disaster Prevention Engineering Laboratory, Changchun 130012, China; 3. Guangdong Zhurong Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 4. Songliao Water Conservancy Commission, Changchun 130012, China; 5. Zhongshui Northeast Survey, Design and Research Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the erosion prevention effect of different concentrations of PAM, and to provide a theoretical basis for dike treatment in black soil area of northeast China. [Methods] A total of 2 rainfall intensities (60, 90 mm/h) and 5 PAM concentrations (0, 2, 3, 4, 5 g/m²) were set by artificial rainfall simulation, and the effects of PAM on the erosion characteristics of runoff and sediment generation and erosion on slope under different rainfall intensities were observed, and the hydraulic parameters under each erosion pattern were analyzed. [Results] (1) Under the same PAM concentration, the average runoff yield rate and average sediment yield of the slope increased with the increase of rain intensity. (2) Under the two rainfall intensities, there was an inflection point in the average runoff yield rate, and the average runoff yield rate of treatment of 3 g/m² was the smallest. The average sediment yield decreased with

收稿日期: 2022-10-28

修回日期: 2022-11-10

资助项目: 吉林省预算内基本建设资金 (创新能力建设) (2023C030-2); 吉林省科技厅重点科技研发项目 (专项支持) (20180201036SF)

第一作者: 刘鸿涛 (1979—), 男, 河北安新县人, 博士, 教授, 主要从事智慧灌溉技术、水工仿生优化技术、堤防侵蚀防护研究。E-mail: 576609094@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

the increase of PAM concentration, and the average sediment yield of treatment of 5 g/m² was the smallest. (3) The rainfall intensity was 60 mm/h, and the erosion patterns of the slope were mainly manifested as sputtering and surface erosion. The rainfall intensity was 90 mm/h, and the slope erosion characteristics were surface erosion, some accompanied by fine trench erosion. (4) The Reynolds number (Re) was less than 500, which was laminar flow, and the Frod number (Fr) was less than 1, which belonged to slow flow. The effects of rainfall intensity on water flow shear force, water flow power and unit water flow power were greater than PAM concentration. [Conclusion] It can be seen that PAM application on the slope of the black soil area of northeast China can effectively improve the soil structure, enhance the soil water infiltration capacity, reduce the slope erosion and sediment production, and play a certain effect on the erosion prevention and control of soil embankments.

Keywords: slope erosion; rainfall intensity; PAM (polyacrylamide); production of miscarriage sand; erosion morphology

东北黑土区侵蚀特征为水力侵蚀为主的多营力复合侵蚀,东北地区雨季短、降雨集中、多暴雨易造成超渗产流而带来土壤侵蚀^[1-2]。部分东北堤防由于建筑的年代较早,土质坡面缺乏养护,又受到长周期波浪冲击和内部渗流对堤防坡面稳定性造成破坏,以及高雨强、短历时降雨所造成的边坡侵蚀^[3]。加之气候的影响,东北黑土区堤防受到冻融作用影响堤防土壤性质和阻渗性能,在极端降雨条件下,容易产生薄弱断面,造成滑坡。因此,开展基于堤防土壤治理措施下黑土区堤防坡面产流产沙规律研究,有助于东北堤防护坡侵蚀破坏防控技术的发展。

水力侵蚀是我国东北黑土区的主要侵蚀类型,黑土区受水力侵蚀面积达到 18.27 万 km²^[4]。降雨是水力侵蚀的动力因素,降雨可通过降雨强度、降雨历时、降雨量等因素来影响水力侵蚀的发生发展^[5-6]。有学者通过研究观察指出降雨特性因子中降雨强度是影响土壤侵蚀的关键^[7]。黑土区降雨多为短历时、高雨强,这为黑土区坡面侵蚀的发生提供了足够的原动力^[8-9]。针对东北地区高雨强的特点,国内学者进行了大量有针对性的试验研究工作,发现不同的降雨强度对坡面的产流量、产沙率、坡面的侵蚀量以及侵蚀形态影响并不相同,但具体产生的影响需要进一步探索^[10-13]。由于高雨强的作用,黑土区坡面侵蚀严重,将化学调控措施引入到坡面侵蚀防治,来增强坡面的抗侵蚀性能成为近年来讨论比较多的话题,为解决坡面侵蚀问题提供了新思路。PAM 作为一种线型水溶性高分子化合物,PAM 溶解于土壤中的水后,其分子与土壤颗粒互相作用,促进了土壤团聚体的形成,土壤的结构系数、各级水稳定性团聚体、沉降系数都得到明显的提高^[14-17]。万佳蕾^[18]研究 PAM 对江西黄泥红土、麻砂泥红土等 4 种江西典型土壤坡

面产流产生影响发现,各坡面的径流量明显提升,减沙效果明显。冯浩等^[19]向陕北黄绵土坡面施加 PAM 发现,施加 PAM 后起到了减流的效果,也起到了减沙效果。由此可见,PAM 对土壤的改造效果与土壤的类型和 PAM 的施用量多少有关。不同的 PAM 施用方法对坡面的产流产沙的影响也会产生差异。学者发现以溶液形式施用的效果优于直接干施的效果,不同浓度和分子量的 PAM 对坡面侵蚀形态的影响也成为近年来研究的热门问题^[20-22]。由于各地区坡面的土壤条件不同,关于 PAM 对产流产沙的影响仍需进一步的研究。

本文通过对比不同雨强下施加不同浓度 PAM 堤防坡面的产流产沙特征,来探究 PAM 对堤防坡面减流减沙效益、相关水力学参数以及对土壤侵蚀形态的影响,为东北黑土区堤防施用 PAM 防治土壤侵蚀提供依据。

1 试验设计与方法

1.1 试验地点与供试土壤

人工模拟降雨试验于 2021 年 6—8 月在长春工程学院水利馆完成。试验土样取自李家屯伊丹河堤防背水坡地,取土深度 20 cm,土壤容重为 1.3 g/cm³。土壤机械组成采用激光粒度分析法,供试土壤类型为壤质土,其中粒径 2.0~0.02 mm,土壤含量为 57.14%,粒径 0.02~0.002 mm 土壤含量为 22.15%,<0.002 mm 土壤含量为 20.71%。

1.2 试验装置

本次试验所用的主要设备包括:人工降雨模拟器、径流试验槽、三维激光扫描仪和烘干箱等。下喷式模拟降雨器,使用摆喷式喷头,降雨强度 60~300 mm/h,由压力和喷嘴尺寸决定,降雨均匀度大于 80%,有效降雨

范围 2 m×5 m,降雨高度 6 m。可移动变坡径流槽,规格为长×宽×高(1 500 mm×400 mm×400 mm),坡度变化范围 0°~30°,径流槽底部均匀打孔,径流槽前端设有“V”字形集流槽,底端设置集流孔。X-Scan 三维激光扫描仪,采用手持快速扫描,通过散斑条纹投影的原理对坡面地形进行扫描,扫描速度为每秒 550 000 次测量,精度 0.1 mm。最后通过特征拼接,标记定点位的方法,将扫描后的地形拼接在一起。烘干箱,采用热风循环系统由能在高温下连续运转的风机和风道组成,提高工作室温度均匀度。

1.3 试验设计

研究不同降雨强度条件下,PAM 浓度对黑土区坡面产流产沙特征的影响,本次试验设计两个降雨强度 60,90 mm/h,坡度为 15°,PAM 浓度为 0,2,3,4,5 g/m²。雨强的选定主要依据詹敏^[23]和张宪奎^[24]等研究成果,引起东北土壤侵蚀的降雨一般具有短历时高雨强的特点,降雨历时在 30~60 min,实测短历时瞬时降雨强度在 23.4~103.2 mm/h。坡度的选用与伊丹河流域堤防一致。

1.4 试验步骤

试验开始前将所取供试土壤除去碎石和植物根茬等杂质后,过 5.0 mm 筛网,然后进行风干、均匀拌和等处理。采用拌土撒施法向坡面施加 PAM。为尽可能真实地还原堤防背水坡面填筑的情况,采取分层铺土方式,径流槽底部均匀打孔,并在底层依次铺设纱布、10 cm 厚沙子,保证土壤中的水可以自由下渗;然后每 5 cm 为一层装填土壤,在铺设上层土壤之前将下层土壤打毛,以防两次填土出现分层现象。为消除边界效应的影响,将径流槽周边壁土壤尽量压实。为了保证试验条件一致,对试验坡面进行预降雨至坡面土壤饱和为止,预降雨完成 24 h 后开始试验。降雨试验开始前,在降雨区域内均匀放置 4 个蒸发皿测定降雨强度和均匀度,采用均匀性计算公式计算均匀度,当均匀度达到 80% 以上时开始降雨试验。降雨历时为 1 h,产流开始后记录产流时间,每隔 3 min 采集一次径流泥沙样,每次采集时长 10 s,使用秒表记录取样时间。

用染色剂法测得坡面表层水流流速。降雨结束后,使用温度计测量径流样品温度,计算水流黏滞系数。将试验收集的泥沙样品静置沉淀,待泥沙沉淀后使用量筒测量径流。将测量完成的泥沙样品放置到 105℃ 的匀烘箱内烘干,称量其重量。

1.5 数据处理

采用 Excel 将测得的产流量和产沙量进行处理,采用 Origin 绘制产流率和产沙率的变化曲线。采用

ArcGIS 对坡面侵蚀图像进行处理,进行灰度映射,侵蚀严重区域用黑色表示,提取侵蚀严重的区域(以侵蚀深度≥20 mm 作为提取标准)。

2 结果与分析

2.1 不同降雨强度下 PAM 浓度对堤防坡面产流的影响

图 1—2 为不同降雨强度下各坡面的产流情况。在相同的 PAM 浓度下,各个坡面的产流率均随着降雨强度的增大而增大,坡面产流率波动也随之增大。施加 PAM 条件下的坡面产流率达到相对稳定的状态比裸地坡面相对延后一些,这是因为固体 PAM 颗粒与土搅拌后,需要吸收水分溶解后才可发挥作用。在两种降雨条件下,随着 PAM 浓度的增加,坡面的平均产流量呈现先减后增的趋势,在 PAM 浓度为 3 g/m² 平均产流率开始转折。施加 PAM 的坡面平均产流率均小于未施加 PAM 的坡面。在降雨强度为 90 mm/h 条件下,平均产流率的排序为 0 g/m²>5 g/m²>2 g/m²>4 g/m²>3 g/m²。3 g/m² 平均产流率相比 0 g/m² 减小了约 15.7%,平均产流率降低了 2.5%~15.7%;在降雨强度为 60 mm/h 条件下,平均产流率的排序为 0 g/m²>5 g/m²>2 g/m²>4 g/m²>3 g/m²。3 g/m² 平均产流率相比 0 g/m² 减小了约 13.3%,平均产流率降低了 6.7%~13.3%。根据分析可得出结论,PAM 有着提高土壤入渗减少径流的作用,但当 PAM 浓度超出一定范围,将会阻碍坡面径流下渗,产流率也将随之增大。

本次试验中平均产流率随着降雨强度的增大而增大;随 PAM 浓度的增大先减小后增大,但均小于未施加 PAM 坡面的平均产流率。将降雨强度和 PAM 浓度与施加 PAM 后坡面平均产流率进行拟合,发现三者的关系可以用二元幂函数进行描述,拟合方程为:

$$MP = 1.7172I^{0.8208}P^{0.0758} \quad (R^2 = 0.9348, p = 0.05) \quad (1)$$

式中:MP 为平均产流率(mm/h);I 为降雨强度(mm/h);P 为 PAM 浓度(g/m²)。

可见,平均产流率(MP)与降雨强度(I)和 PAM 浓度(P)呈正相关,且降雨强度的幂指数(0.820 8)显著大于 PAM 浓度的幂指数(0.075 8),即降雨强度对平均产流率的影响大于 PAM 浓度的影响。

2.2 不同降雨强度下 PAM 浓度对堤防坡面产沙的影响

图 3—4 为不同降雨条件下各坡面产沙率随降雨历时的变化情况。在降雨初期产沙率随降雨历时的

增加而增加,在 20 min 左右出现不同程度的减小趋势。降雨强度 90 mm/h 的产沙率随降雨历时的波动要大于 60 mm/h 的坡面。其原因在于雨滴对坡面打击能量增大,水流紊动强度增大,水流的挟沙能力增强。降雨强度 90 mm/h 条件下不同 PAM 浓度的坡面产沙率是 60 mm/h 条件下坡面产沙率的 1.35~1.43 倍。其中未施加 PAM 坡面与施加 PAM 的坡面相比,前期产沙率增长规律相似;在后期产沙率减小程度大于施加 PAM 的坡面,可以看出在降雨的中后期

施加 PAM 的坡面产沙率会更稳定。两种雨强工况下,施加 PAM 可以有效地减小坡面产沙率,降低了土壤侵蚀量。降雨强度 90 mm/h 时,施加 PAM 的减沙效率为 17.47%~56.81%;降雨强度 60 mm/h 时,施加 PAM 的减沙效率为 9.42%~45.41%。随着坡面 PAM 施加量的加大,平均产沙率在逐渐减小,呈现出良好的线性关系。根据分析对比我们发现,浓度 5 g/m² 坡面产沙率大于其他施加 PAM 的坡面,而相比于 0 g/m² 的坡面产沙率仍在减小。

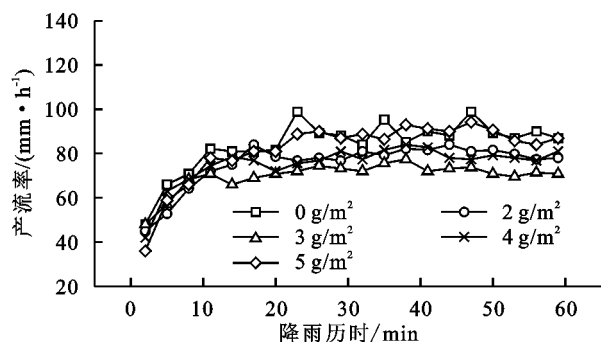


图1 降雨强度 90 mm/h 下不同 PAM 浓度对产流率的影响

Fig. 1 Effect of different PAM concentrations on abortion rates at rainfall intensity of 90 mm/h

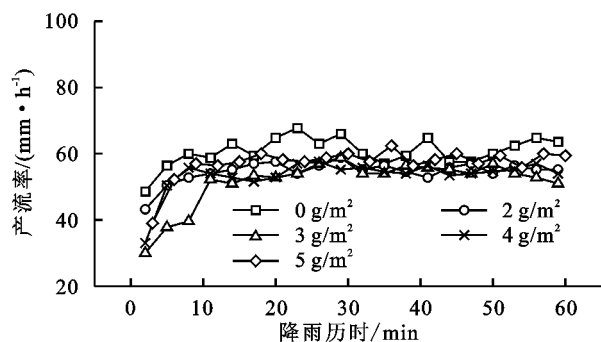


图2 降雨强度 60 mm/h 下不同 PAM 浓度对产流率的影响

Fig. 2 Effects of different PAM concentrations on abortion rates at rainfall intensity of 60 mm/h

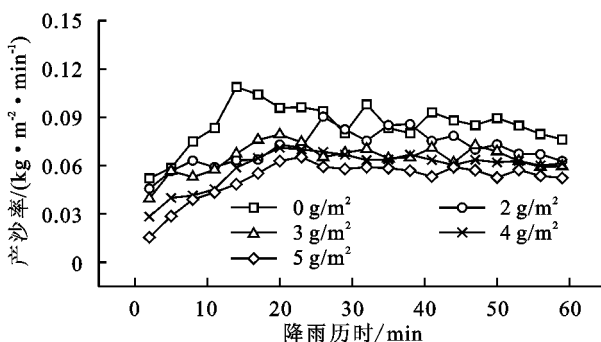
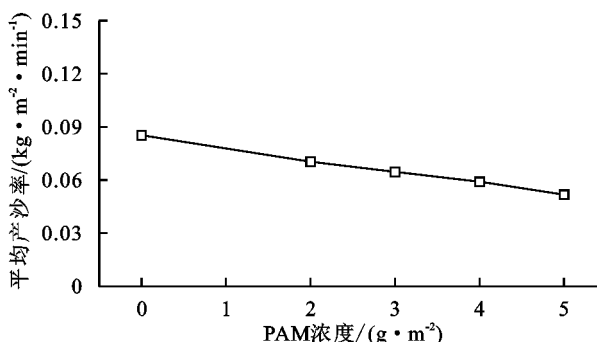
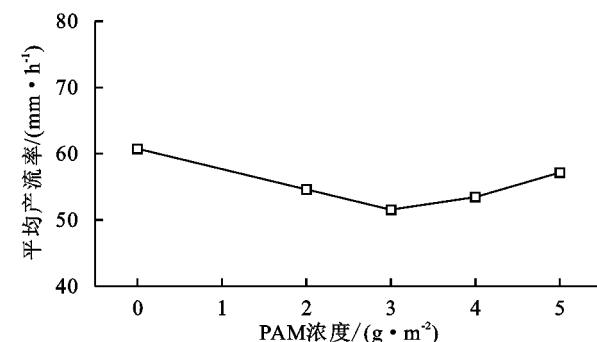
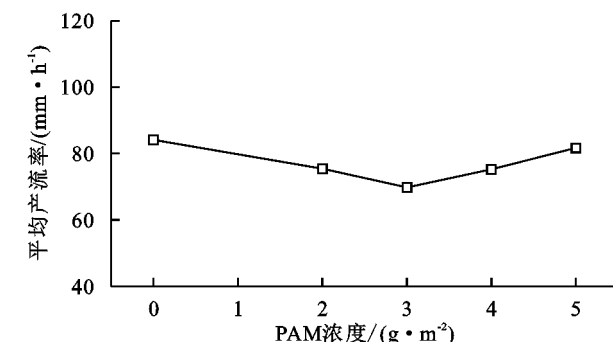


图3 降雨强度 90 mm/h 不同 PAM 浓度对产沙率的影响

Fig. 3 Effects of different PAM concentrations of rainfall intensity of 90 mm/h on sand production rate

本次试验中平均产沙率随着降雨强度的增大而增大,随着 PAM 浓度的增大而减小。将降雨强度和 PAM 浓度与施加 PAM 后的坡面平均产沙率进行拟合,发现三者的关系可以用二元幂函数进行描述,相关关系用拟合方程来表示,平均产沙率(ME)与



降雨强度(I)为正相关,与 PAM 浓度(P)为负相关。且降雨强度的幂指数(1.299)显著大于 PAM 浓度的幂指数(-0.314),即降雨强度对平均产沙率的影响大于 PAM 浓度对平均产沙率的影响。拟合方程为:

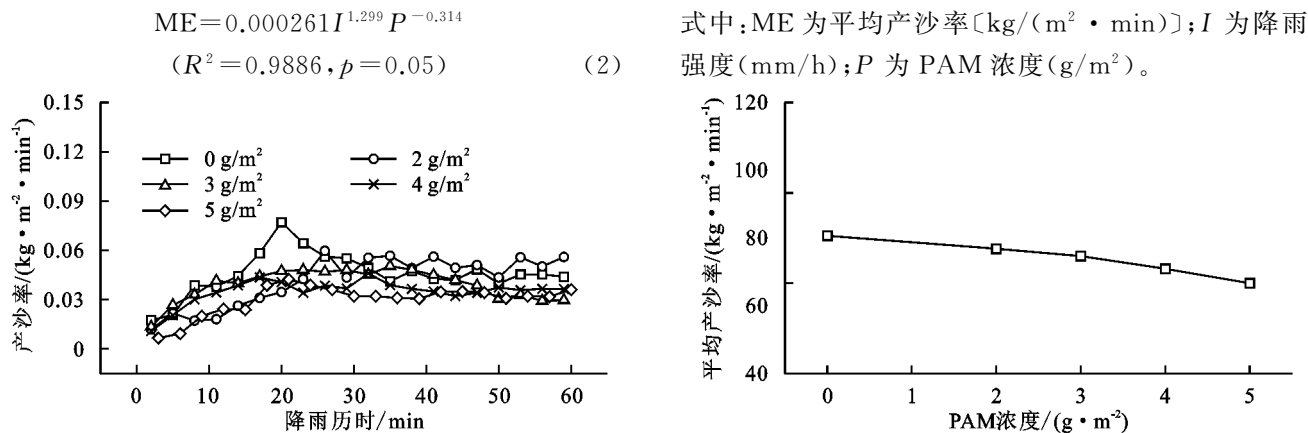


图 4 降雨强度 60 mm/h 不同 PAM 浓度对产沙率的影响

Fig. 4 Effects of rainfall intensity of 60 mm/h on sand production rate by different PAM concentrations

2.3 不同降雨条件下 PAM 浓度与坡面水沙关系

由表 1 可知,在降雨强度 90 mm/h 和 60 mm/h 两种降雨条件下,与 PAM 浓度 0 g/m²坡面径流量和产沙量相比较,3 g/m²坡面径流量分别减少了 24.36%, 15.53%,产沙量分别减少了 34.78%,38.74%;4 g/m²的坡面径流量分别减少了 16.26%,12.48%,产沙量分别减少了 44.24%,51.33%;PAM 浓度 5 g/m²时,坡面产沙量最小,分别减少了 52.12%,55.36%,但是 5 g/m²的坡面径流量减少了 9.43%,1.92%。分析得出施加 PAM 可以有效地降低坡面的径流量,但 PAM 浓度大于 3 g/m²时,PAM 对坡面径流的调控效果随浓度增大逐渐减弱。坡面的产沙量随着 PAM 浓度的增大均呈现显著减小的趋势。随着 PAM 浓度的增加,坡面的产沙率将减小。出于对产流、产沙效果考虑,认为 PAM 浓度 4 g/m²对坡面侵蚀综合预防效果最好。

2.4 不同降雨强度下 PAM 浓度对坡面流速的影响

图 5—6 为不同降雨强度条件下各坡面的流速情况。两种雨强下,施加不同浓度 PAM 的坡面在整个降雨历时中流速呈现出降雨初期增加,当流速达到一定之后,开始出现不同程度的波动。与对照组相比,施加 PAM 坡面流速在降雨历时中期之前略小。其

原因在于降雨初期 PAM 与降水结合发挥了自身的粘结作用,增大了坡面阻力,使坡面的流速减小。另外,施加 PAM 的坡面对降雨的击溅作用会形成水跌,进一步地减慢流速。到了降雨的后期,随着降雨汇流对坡面的冲刷,坡面 PAM 浓度下降,流速的差异将不再明显。不同降雨强度下的波动程度有所差异,降雨强度为 90 mm/h 坡面流速波动要大于 60 mm/h,这说明降雨强度的增加雨强对流速的扰动也随之加大。从平均流速变化曲线中看出,同一雨强下,PAM 对流速的降低效果存在拐点,降雨强度 60 mm/h,90 mm/h 最小流速分别发生在 4 g/m²,3 g/m²坡面。且施加 PAM 的坡面平均流速均小于未施加 PAM 的坡面。流速的减慢会导致水流径流剪切力的减低,有利于土壤抗侵蚀性能的增强。

表 1 坡面径流产沙量

Table 1 Slope runoff sand production scale

PAM 浓度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	降雨强度 90 mm/h		降雨强度 60 mm/h	
	径流量/L	产流量/g	径流量/L	产流量/g
0	47.53	2590.00	34.45	1810.80
2	40.15	2024.10	32.05	1421.40
3	35.95	1689.20	29.10	1109.30
4	39.80	1444.27	30.15	881.40
5	43.05	1240.31	33.79	808.40

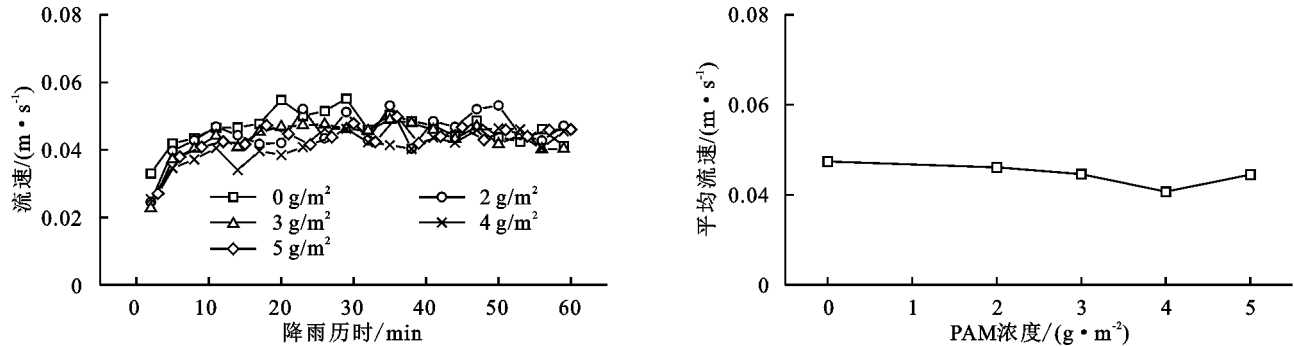


图 5 降雨强度 60 mm/h 下不同 PAM 浓度对流速的影响

Fig. 5 The influence of different PAM concentrations on the flow velocity under the rainfall intensity of 60 mm/h

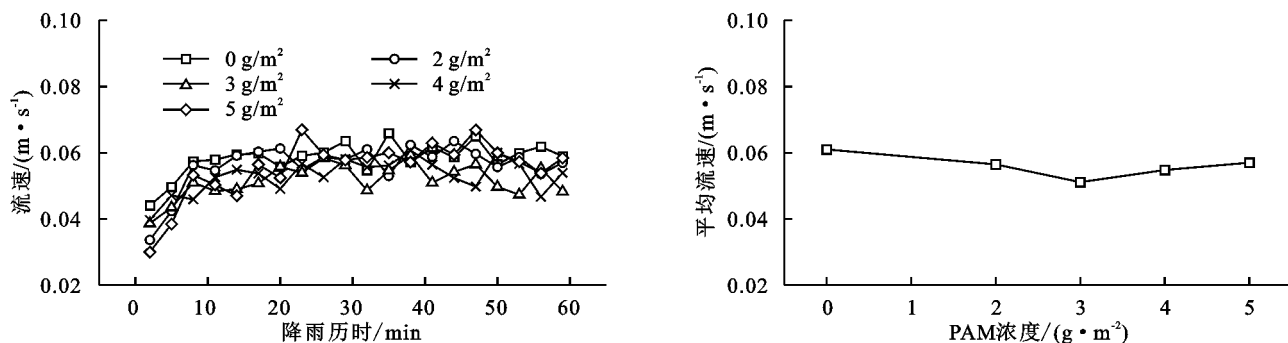


图6 降雨强度90 mm/h下不同PAM浓度对流速的影响

Fig. 6 The influence of different PAM concentrations on the flow velocity under the rainfall intensity of 90 mm/h

本次试验中平均流速随着降雨强度的增大而增大,随着PAM浓度的增大先减小后增大。将不同降雨强度和PAM浓度与平均流速进行拟合,发现三者的关系可以用二元幂函数进行描述,决定系数0.9429,显著性水平0.05。平均流速(MV)与降雨强度(I)的幂指数(0.5584)呈正相关,与PAM浓度(P)的幂指数(-0.0580)呈负相关。且降雨强度的幂指数大于PAM浓度的幂指数,即降雨强度对平均流速的影响大于PAM浓度的对平均流速的影响。拟合方程为:

$$MV = 0.0047I^{0.5584}P^{-0.0580} \quad (R^2 = 0.9429, p = 0.05) \quad (3)$$

式中: MV为平均流速(m/s); I 为降雨强度(mm/h); P 为PAM浓度(g/m^2)。

2.5 坡面侵蚀动力学分析

雷诺数(Re)作为判别水流型态的无量纲参数,根据明渠均匀流判别准则, $Re < 500$ 时,为层流; $500 \leq Re \leq 2000$ 时,为过渡流;当 $Re > 2000$,为紊流。根据表2中数据可知,两种雨强下,雷诺数随着PAM浓度的增大呈现出先减小后增大的趋势。雨强的增加,雷诺数也开始增加。其原因在于雨强的增加导致坡面的径流量开始增加,径流量的大小影响了雷诺数的变化。也有学者研究发现降雨过程中雷诺数的变化也与坡面的侵蚀状态的变化有关^[25]。

弗洛德数(Fr)表征惯性力和重力比值的无量纲数,综合体现了水流流速和水深大小的关系。当 $Fr < 1$ 时,水流为缓流; $Fr = 1$ 时,水流为临界流;当 $Fr > 1$ 时,水流为急流。本次试验各坡面的弗洛德数均小于1,水流流态为缓流。根据之前学者的研究发现弗洛德数小于0.8时,坡面侵蚀状态以面蚀为主^[26]。侵蚀沟深度也相对较浅。弗洛德数随PAM的变化规律性不强,这可能与PAM在坡面的施用不均所导致。

径流剪切力(τ)是描述径流流动对坡面的侵蚀能力的参数。径流剪切力越大,被剥离的土壤颗粒越多。将本次试验降雨强度(I)和PAM浓度(P)与径流剪切力(τ)进行多元回归分析,幂函数拟合方程为:

$$\tau = 0.7420I^{0.2398}P^{0.1006} \quad (R^2 = 0.8886, p < 0.05) \quad (4)$$

由回归方程分析可知,径流剪切力与降雨强度和PAM浓度呈现正相关的关系,且降雨强度对径流剪切力的影响要大于PAM浓度。

水流功率(ω)是剥蚀定量的土壤所需的功率。两种雨强下,未施加PAM的坡面水流功率最大。随着降雨强度的增加,水流功率也显著增加。将降雨强度(I)和PAM浓度(P)与水流功率(ω)进行多元回归分析,三者关系式如下:

$$\omega = 0.003I^{0.8199}P^{0.0755} \quad (R^2 = 0.9349, p < 0.05) \quad (5)$$

单位水流功率(U)被表述为单位重量水体对坡面做功而消耗的功率。将降雨强度(I)和PAM浓度(P)与水流功率(U)进行多元回归分析,三者关系式如下:

$$U = 0.0012I^{0.5521}P^{-0.0350} \quad (R^2 = 0.9274, p < 0.05) \quad (6)$$

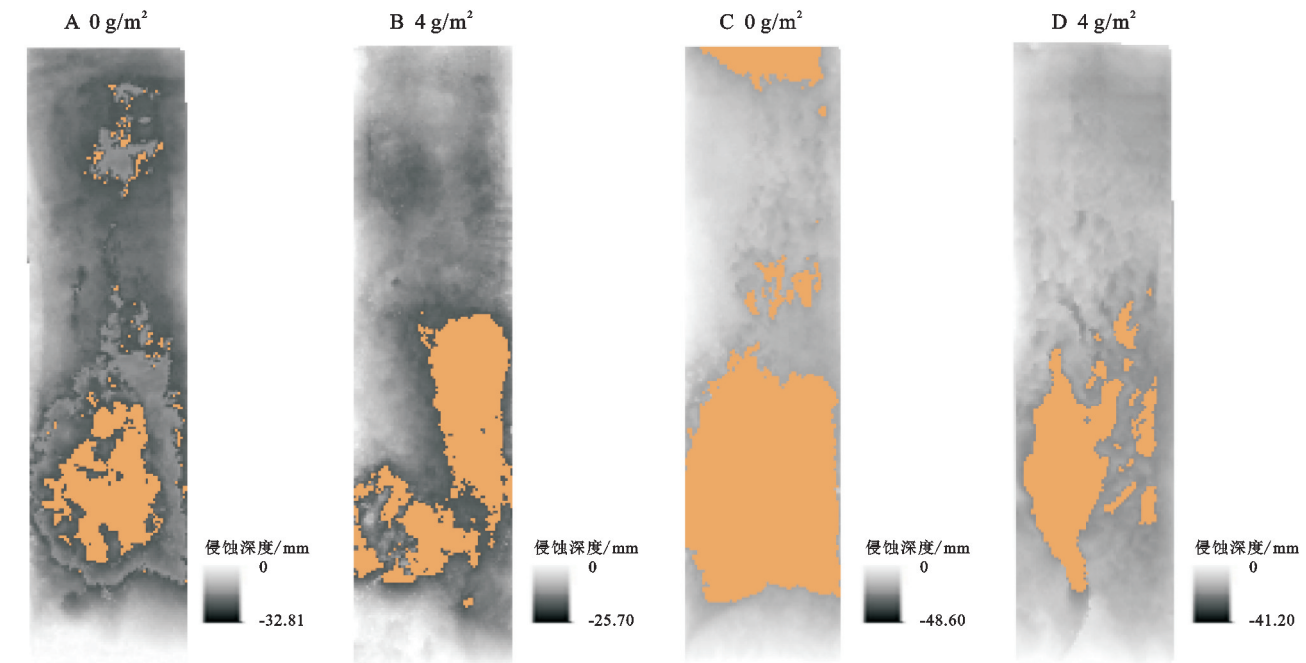
2.6 坡面侵蚀的形态特征

坡面的侵蚀不但造成严重的土壤流失,且其塑造的侵蚀形态对坡面径流侵蚀动力机制有重要影响,研究坡面侵蚀的形态特征对揭示坡面土壤侵蚀本质有重要意义。不同雨强下,未施加PAM和PAM浓度4 g/m^2 为例进行分析。从图7A—B中可知,在降雨强度60 mm/h时,坡面侵蚀主要以面蚀为主。0 g/m^2 坡面中、下部侵蚀较为严重。施加PAM的坡面受到降雨溅蚀作用,坡面的坑洼感较强,随着施加量的增大,坡面侵蚀量逐渐减小,坡面也愈加平整。PAM浓度4 g/m^2 坡面的防侵蚀效果最好,通过提取出侵蚀严重区域,侵蚀严重区域提取的侵蚀深度 ≥ 2 cm,其施加PAM最大侵蚀深度2.57 cm,坡面平均侵蚀深度为1.04 cm,侵蚀严重区域面积为0.051 m^2 ,占坡比面积比例的8.5%。从图7C—D中可知,坡面仍以面蚀为主,但由于雨强的增加,坡面出现了细沟。相比60 mm/h坡面,由于雨强的增加,坡面侵蚀严重区域面积、最大深度、侵蚀平均深度均有所上升。施加PAM

坡面均起到了防侵蚀的效果,此雨强下,4 g/m² 的防 0.055 m²,平均侵蚀深度减少了 0.246 cm,防侵蚀能
侵蚀效果最好,相比 3 g/m² 坡面侵蚀区域减小了 力提升最为明显(表 3)。

表 2 不同降雨强度—PAM 浓度条件下坡面水动力学参数

Table 2 Slope hydrodynamic parameters under different rainfall intensity—PAM concentration conditions						
降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	PAM 浓度/ (g·m ⁻²)	雷诺数	弗劳德数	径流 剪切力/Pa	水流功率/ (W·m ⁻²)	单位水流功率/ (m·s ⁻¹)
60	0	47.07	0.4935	2.3191	0.1070	0.0120
	2	42.31	0.4973	2.1764	0.0962	0.0116
	3	39.94	0.4798	2.1090	0.0908	0.0112
	4	41.43	0.4337	2.3204	0.0942	0.0106
	5	44.29	0.4559	2.3370	0.1007	0.0112
	0	97.29	0.5901	2.5300	0.1782	0.0151
90	2	87.26	0.5874	2.3680	0.1329	0.0145
	3	80.74	0.5371	2.3894	0.1230	0.0133
	4	87.02	0.5395	2.5008	0.1325	0.0137
	5	94.51	0.5529	2.5972	0.1439	0.0143



注:图中黄色为受侵蚀区域。

图 7 60 mm/h,90 mm/h 雨强下不同 PAM 浓度坡面侵蚀形态

Fig. 7 60 mm/h, 90 mm/h rain intensity under different PAM concentration slope erosion patterns

表 3 降雨强度和 PAM 浓度与坡面侵蚀形态参数

Table 3 Rainfall intensity and PAM concentration and slope erosion morphological parameters table			
降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	PAM 浓度/ (g·m ⁻²)	侵蚀严重 区域面积/m ²	平均侵蚀 深度/cm
60	0	0.123	1.700
	2	0.093	1.484
	3	0.081	1.283
	4	0.082	1.050
	5	0.051	0.963
	0	0.217	2.815
90	2	0.176	2.691
	3	0.173	2.538
	4	0.118	2.292
	5	0.092	2.050

3 讨论与结论

3.1 讨论

目前学者对东北土壤水力侵蚀的研究大多集中于坡耕地以及丘陵地区土壤侵蚀,对堤防坡面土壤侵蚀的研究相对较少。东北黑土区堤防坡面土壤侵蚀状况相比坡耕地和自然丘陵状况有所不同。首先,堤防坡面的土壤含水量相对较大,在降雨条件下更容易发生产流,引起土壤侵蚀现象。土壤含水量较大也将导致坡面受冻融作用更为严重,导致堤防坡面土壤性质和渗透特性的变化。齐吉琳等^[27]研究发现堤防经过冻胀作用后体积将增大 9%,最终造成土壤孔隙

率增加。冻融作用重叠在水蚀工程中,将间接地加大水土流失程度。王恩姮等^[28]研究不同含水率东北典型土壤受冻融作用后土壤团聚体组成,发现有水分补充时,加剧了团聚体的拆分,<2 mm 干筛团聚体和 0.25~1 mm 水稳团聚体含量显著上升。其次东北耕地及漫岗的坡度一般为 1°~8°,而堤防坡面的坡度一般为 1:3。坡度的大小决定了径流的冲刷和搬运能力,这也决定了东北堤防坡面侵蚀与其他侵蚀的不同之处。李洪丽等^[29]研究发现同一降雨条件下,黑土区坡面在 12°~15°存在一个临界坡度,当坡度<12°时,随着坡度的增加,坡面的侵蚀程度将加重;当坡度超过临界坡度后,坡面的侵蚀程度将大幅下降。刘青泉等^[30]发现降雨量和径流水深随着坡度的增大而减小;而坡面流速、坡面的径流剪切力都存在临界坡度。东北黑土区堤防土壤侵蚀在土壤特性、侵蚀环境等方面相比其他侵蚀差异显著,所以对东北堤防侵蚀机理进行深入研究,将有助于东北堤防的防治。

土壤本身的特性对 PAM 的施用效果起着关键性作用,正如于健^[31]、唐泽军^[32]、刘纪根^[33]等研究,对于土壤本身结构较好的土壤,PAM 的加入能够维护土壤团聚体结构,打通土壤的下渗路径,提高土壤的入渗。对于结构较差的土壤,施加 PAM 反而会降低其入渗。PAM 的施用效果也会受到雨强、降雨历时等多方因素共同影响,正如王辉等^[34]PAM 对砂黄土入渗特性研究结果表明,大雨强短历时的降雨条件下施加 PAM 的坡面土壤入渗效果会提高,但在长时间的降雨溶解和淋溶下,PAM 的减流作用将受到削减,将会影响入渗的效果。有学者研究发现,PAM 的施用量和土壤的抗侵蚀能力并非简单的线性关系,超出或少于适宜的浓度都会对防侵蚀效果产生影响。正如夏海江^[35]、员学锋^[36]等研究表明,当浓度过小时,改良土壤的效果不明显,无法打开土壤的下渗通道;当浓度过大时过量的 PAM 并不能充分发挥作用,还可能阻塞原有的下渗路径,导致土壤入渗率的降低。所以说 PAM 的施用应先考虑到土壤结构、气候因素、施用方法等因素的影响,才可达到预期的效果,并非浓度越大,效果越好。

3.2 结论

(1) 在同一降雨条件下,向黑土区壤质土堤防坡面施加 PAM 减流减沙效果明显,最大可减流 82.9%,最大可减沙 43.19%。随着向堤防坡面施加的 PAM 浓度增加,坡面的产流产沙趋势并不相同。随着施加 PAM 浓度的增加,坡面的产沙量而减少;坡面的产流量呈现先

减小后增加的趋势。从坡面侵蚀和经济角度考虑,适用于该地堤防的 PAM 浓度为 3 g/m²。

(2) 计算黑土区堤防坡面水流的雷诺数(Re)和弗罗德数(Fr),辨别出水流形态为层流,流态为缓流。径流剪切力、水流功率、单位水流功率与降雨强度和 PAM 浓度展现出良好的幂函数关系,降雨强度对参数的影响较大。

(3) 堤防坡面的侵蚀形态主要以面蚀为主,施加 PAM 使得侵蚀严重区域的面积相较未施加 PAM 坡面减少了 70.38%,起到了一定的侵蚀控制效果。随着降雨强度的增加,堤防坡面的侵蚀方式从面蚀开始向细沟侵蚀发展。

参考文献:

- [1] 崔明,蔡强国,范昊明.东北黑土区土壤侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2007,14(5):28-34.
Cui M, Cai Q G, Fan H M. Research progress on soil erosion in the black soil region of Northeast China[J]. Soil and Water Conservation Research, 2007,14(5):28-34.
- [2] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2022,36(2):1-12.
Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, et al. Progress and prospects of soil erosion research in northeast black soil region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):1-12.
- [3] 沈春来,贾兴延.堤防滑坡的原因及应对措施[J].水利天地,2010(3):42.
Shen C L, Jia X Y. Causes and countermeasures of embankment landslides[J]. Water Conservancy Tiandi, 2010, (3):42.
- [4] 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.
Wang J L, Li Z Z. Research progress on hydraulic erosion in the black soil area of Northeast China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(5):389-397.
- [5] 王万忠,焦菊英.黄土高原侵蚀产沙强度的时空变化特征[J].地理学报,2002,57(2):210-217.
Wang W Z, Jiao J Y. Temporal and spatial variation characteristics of erosion and sediment yield intensity on the Loess Plateau[J]. Journal of Geography, 2002,57 (2):210-217.
- [6] Ran Q, Su D, Li P, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion[J]. Journal of Hydrology, 2012, 424/425:99-111.
- [7] 王占礼.中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J].农业

- 工程学报,2000,16(4):32-36.
- Wang Z L. Impact factors and hazard analysis of soil erosion in China[J]. Journal of Agricultural engineering, 2000,16(4):32-36.
- [8] 王玉玺,解运杰,王萍.东北黑土区水土流失成因分析[J].水土保持应用技术,2002(3):27-29.
- Wang Y X, Xie Y J, Wang P. Analysis of the causes of soil and water loss in the black soil region of Northeast China [J]. Applied Technology of Soil and Water Conservation, 2002(3):27-29.
- [9] 范昊明,顾广贺,王岩松等.东北黑土区侵蚀沟发育与环境特征[J].中国水土保持,2013(10):75-79.
- Fan H M, Gu G H, Wang Y S, et al. Development and environmental characteristics of erosion ditches in black soil area of Northeast China[J]. China Soil and Water Conservation, 2013(10):75-79.
- [10] 张兴义,乔宝玲,李健宇,等.降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响[J].农业工程学报,2020,36(16):110-117.
- Zhang X Y, Qiao B L, Li J Y, et al. Influence of rainfall intensity and slope on splash erosion characteristics of ridge along slope in northeast black soil area[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020,36(16):110-117.
- [11] 郑粉莉,张加琼,刘刚,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J].水土保持通报,2019,39(4):314-319.
- Zheng F L, Zhang J Q, Liu G, et al. Research focus on soil erosion characteristics and multi nutrient compound erosion of slope farmland in northeast black soil region[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2019, 39(4):314-319.
- [12] 李桂芳.典型黑土区坡面土壤侵蚀影响因素与动力学机理研究[D].北京:中国科学院研究生院,2016.
- Li G F. Study on Influencing Factors and Dynamic Mechanism of Slope Soil Erosion in Typical Black Soil Area[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [13] 李洪丽,韩兴,张志丹等.东北黑土区野外模拟降雨条件下产流产沙研究[J].水土保持学报,2013,27(4):49-52,57.
- Li H L, Han X, Zhang Z D, et al. Study on runoff and sediment production under simulated rainfall conditions in the black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(4):49-52,57.
- [14] 王梦琦.聚丙烯酰胺在大庆地区土壤中迁移转化规律研究[D].黑龙江大庆:东北石油大学,2019.
- Wang M Q. Study on Migration and Transformation of Polyacrylamide in Soil in Daqing [D]. Daqing, Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2019.
- [15] Majed Abu-Zreig. Runoff and erosion control of silt clay soil with land application of polyacrylamide[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2006,52(3):289-298.
- [16] 员学锋,吴普特,冯浩.聚丙烯酰胺(PAM)的改土及增产效应[J].水土保持研究,2002,9(2):55-58.
- Yuan X F, Wu P T, Feng H. Soil modification and yield increase effects of polyacrylamide (PAM) [J]. Soil and Water Conservation Research, 2002,9(2):55-58.
- [17] 张海欧,孙小梅.聚丙烯酰胺(PAM)土壤改良剂与应用效应[J].农技服务,2021,36(6):99-101.
- Zhang H O, Sun X M. Polyacrylamide (PAM) soil amendment and its application effects[J]. Agricultural Technology Services, 2021,36(6):99-101.
- [18] 万佳蕾.施用聚丙烯酰胺对不同土壤特性及其产流产沙效果研究[D].南昌:江西农业大学,2017.
- Wan J L. Study on the Effect of Polyacrylamide Application on Different Soil Characteristics and Runoff and Sediment Yield [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017.
- [19] 冯浩,吴普特,黄占斌.聚丙烯酰胺(PAM)对黄土地坡地降雨产流产沙过程的影响[J].农业工程学报,2001,17(5):48-51.
- Feng H, Wu P T, Huang Z B. The effect of polyacrylamide (PAM) on runoff and sediment yield process of rainfall on loess slope[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2001,17(5):48-51.
- [20] 宋月君,黄炎和,杨洁,等.南方典型土壤坡面产流产沙过程对 PAM 的响应[J].农业机械学报,2017,48(8):279-287.
- Song Y J, Huang Y H, Yang J, et al. Response of runoff and sediment production processes on typical soil slopes in southern China to PAM[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2017,48(8):279-287.
- [21] 兰本.PAM 与玉米秸秆组合施用对坡耕地产流产沙的影响研究[D].太原:山西农业大学,2019.
- Lan B. Study on the Effect of PAM and Corn Straw Combination Application on Runoff and Sediment of Slope Farmland [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [22] 谢小芳.坡地红壤茶园施用聚丙烯酰胺(PAM)的适用性研究[D].福州:福建农林大学,2013.
- Xie X F. Study on the Applicability of Polyacrylamide (PAM) Application in Tea Gardens on Sloping Red Soil [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.

- [23] 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]. 黑龙江水专学报, 1998(1): 40-43.
Zhan M, Li Z C, Xin Y L. The relationship between rainfall parameters and soil loss in black soil erosion areas [J]. Journal of Heilongjiang Water Conservancy, 1998(1): 40-43.
- [24] 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.
Zhang X K, Keng J H. Study on soil loss equation in Heilongjiang Province [J]. Water and Soil Conservation Bulletin, 1992, 12(4): 1-9, 18.
- [25] 刘俊娥, 王占礼, 高素娟, 等. 黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 144-149.
Liu J E, Wang Z L, Gao S J, et al. Experimental study on dynamic mechanism of sheet erosion process on loess slope [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2012, 28(7): 144-149.
- [26] 李芦岷, 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.
Li L D, Wu B, Li X L, et al. Review of research on sheet erosion in soil erosion [J]. Progress in Earth Science, 2021, 36(7): 712-726.
- [27] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2690-2694.
Qi J L, Zhang J M, Zhu Y L. Soil mechanics significance of freeze-thaw effect on soil structure [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2690-2694.
- [28] 王恩姮, 赵雨森, 陈祥伟. 季节性冻融对典型黑土区土壤团聚体特征的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 889-894.
Wang E Y, Zhao Y S, Chen X W. Effects of seasonal freeze-thaw on soil aggregate characteristics in typical black soil areas [J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 889-894.
- [29] 李洪丽, 纪莉. 模拟降雨条件下坡度对东北黑土区坡面侵蚀过程的影响[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(6): 51-54, 58.
Li H L, Ji L. Impact of slope on slope erosion process in northeast black soil area under simulated rainfall conditions [J]. Agricultural Science, 2015, 40(6): 51-54, 58.
- [30] 刘青泉, 陈力, 李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(5): 449-457.
Liu Q Q, Chen L, Li J C. Analysis of slope impact on slope soil erosion [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2001, 22(5): 449-457.
- [31] 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 J, Lei T W, Isaac Shainberg, et al. Effects of PAM characteristics on infiltration and soil erosion of sandy loam soil [J]. Journal of Soil Science, 2011, 48(1): 21-27.
- [32] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究: I. 入渗[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 178-185.
Tang Z J, Lei T W, Zhang Q W, et al. Simulation test study on polyacrylamide increasing soil rainfall infiltration and reducing erosion: I. Infiltration [J]. Journal of Soil Science, 2003, 40(2): 178-185.
- [33] 刘纪根, 张平仓, 陈展鹏. 聚丙烯酰胺(PAM)对扰动红壤侵蚀产沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 9-13.
Liu J G, Zhang P C, Chen Z P. The impact of polyacrylamide (PAM) on the sediment yield process of disturbed red soil erosion [J]. Journal of Water and Soil Conservation, 2009, 23(6): 9-13.
- [34] 王辉, 王全九, 姚帮松. PAM 用量及施加方式对积水垂直入渗特征影响[C]// 纪念中国农业工程学会成立 30 周年暨中国农业工程学会学术年会, 2009.
Wang H, Wang Q J, Yao B S. Impact of PAM Dosage and Application Mode on Vertical Infiltration Characteristics of Ponding [C] // Commemorating the 30th Anniversary of the Founding of the Chinese Society of Agricultural Engineering and the Academic Annual Meeting of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009.
- [35] 夏海江, 肇普兴. 聚丙烯酰胺对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持研究, 1997, 4(4): 81-88.
Xia H J, Zhao P X. The effect of polyacrylamide on soil physical properties [J]. Soil and Water Conservation Research, 1997, 4(4): 81-88.
- [36] 员学锋, 吴普特, 冯浩. 聚丙烯酰胺(PAM)在土壤改良中的应用进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(2): 141-145.
Yuan X F, Wu P T, Feng H. Progress in the application of polyacrylamide (PAM) in soil improvement [J]. Soil and Water Conservation Research, 2002, 9(2): 141-145.