

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.020; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.020.

邹浩, 李怡阳, 魏希莹, 等. 不同雨强下 PAM 分子量对土质堤防产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 131-140.

Zou Hao, Li Yiyang, Wei Xiying, et al. Effects of PAM molecular weight on sediment production in soil embankment under different rainfall intensities[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 131-140.

不同雨强下 PAM 分子量对土质堤防产流产沙的影响

邹浩¹, 李怡阳^{2,3}, 魏希莹⁴, 郑琪严⁵, 刘鸿涛²

(1. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 长春 130012;

2. 长春工程学院 水利与环境工程学院, 长春 130012; 3. 长春市弘润灌溉科技有限公司, 长春 130012;

4. 永吉县星星哨水库灌区管理中心, 吉林 吉林 132214; 5. 吉林省水利科学研究院, 长春 130012)

摘要: [目的] 探究不同 PAM 分子量对东北某地堤防护坡防侵蚀效果, 及喷施方式下 PAM 溶液对堤防坡面的减流减沙作用, 为东北土质堤防治理提供理论依据。[方法] 以东北某河流上游堤防背水坡为研究对象, 设计了室内人工模拟降雨试验, 共设置 3 种不同降雨强度 (180, 200, 220 mm/h), 裸地 (分子量为 0) 及 4 种不同 PAM 分子量 (1 200, 1 400, 1 600, 1 800 万), PAM 浓度采用 4 g/m², 对试验坡面进行喷洒 PAM 溶液, 溶液采用 4 g/m² PAM 配比 3.5 L 水。研究 3 种降雨强度下, 施加不同 PAM 分子量坡面的产流产沙特性, 分析其水力学参数。[结果] (1) 在同种降雨强度下, 施加 PAM 的坡面产流产沙量都小于裸地坡面。(2) 在相同 PAM 分子量情况下, 坡面产流产沙都随着降雨强度的增加而增加。3 种降雨强度下, 1 800 万分子量的减流减沙效果最好, 最大可减沙 57.74%。(3) 通过计算坡面水流的雷诺数 (Re) 发现水流形态为层流, 当降雨强度为 220 mm/h 时, 裸地坡面流态为急流, 其余均为缓流。降雨强度、PAM 分子量对水流功率和单位水流功率均可以用幂函数进行描述。[结论] 在东北某地堤防坡面施加不同分子量的 PAM 溶液可有效减少产流产沙量, 其中减沙效果尤为明显, 在试验所选定的 PAM 分子量区间中, 施加分子量为 1 800 万的 PAM 对于试验坡面的减流减沙效果最为显著, PAM 可以提高土壤水分的人渗能力, 为治理土质堤防水土流失提供参考。

关键词: 降雨强度; PAM (聚丙烯酰胺) 分子量; 减流减沙; 土质堤防

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0131-10

Effects of PAM molecular weight on sediment production in soil embankment under different rainfall intensities

Zou Hao¹, Li Yiyang^{2,3}, Wei Xiying⁴, Zheng Qiyan⁵, Liu Hongtao²

(1. China Water Northeast Survey, Design and Research Co., Ltd., Changchun 130012, China;

2. Faculty of Hydraulic and Environmental Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130012, China; 3. Changchun Hongrun Irrigation Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin 130012, China; 4. Yongji County Xingxing Whistle Reservoir Irrigation District Management Center, Jilin, Jilin 132214, China; 5. Jilin Provincial Institute of Water Resources, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: [Objective] The objectives of this study are to explore the effect of different molecular weights of PAM on the erosion prevention of the protective slope of an embankment in Northeast China, and to explore the effect of PAM solution on the slope surface of the embankment under spraying mode, so as to provide a theoretical basis for the treatment of soil embankment in northeast China. [Methods] An indoor artificial simulated rainfall experiment was designed to study the backwater slope of the embankment in the upper

收稿日期: 2024-04-22

修回日期: 2024-05-05

资助项目: 吉林省科技厅重点科技研发项目“防洪堤护坡侵蚀破坏防控技术研究与示范”(20180201036SF)

第一作者: 邹浩 (1979—), 男, 湖北汉川市人, 高级工程师, 学士, 主要从事水文水资源、洪水风险研究。E-mail: 8288973@qq.com

通信作者: 刘鸿涛 (1979—), 男, 河北安新县人, 教授, 博士, 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>

reaches of a black soil area in northeast China, and three different rainfall intensities (180, 200, 220 mm/h), bare ground (molecular weight 0) and four different PAM molecular weights (1 200, 1 400, 1 600, 1 800) were set up, and the PAM concentration was 4 g/m², and the PAM solution was sprayed on the experimental slope with 4 g/m² PAM ratio of 3.5 L water. The characteristics of runoff and sediment generation on the slopes with different molecular weights of PAM under three rainfall intensities were studied, and their hydraulic parameters were analyzed. [Results] (1) Under the same rainfall intensity, the amount of runoff and sediment yield on the slope with PAM is smaller than that on the bare slope. (2) Under the same molecular weight of PAM, runoff and sediment generation on the slope increases with increasing of rainfall intensity. Under the three types of rainfall intensities, the sediment reduction effect of 18 million molecular weight was the best, and the maximum sediment reduction was 57.74%. (3) By calculating the Frode number (Fr) and Reynolds number (Re) of slope flow, it is found that $Re < 500$ shows that the flow form is laminar flow, and when the rainfall intensity is 220 mm/h, the flow pattern of bare slope is rapid, and the rest are slow flow. Rainfall intensity, PAM molecular weight to water flow power, and unit water flow power can be described by power functions. [Conclusion] It can be seen that the application of PAM solutions with different molecular weights on the slope of an embankment in northeast China can effectively reduce the amount of sediment produced by runoff, and the effect of sediment reduction is particularly obvious, and in the molecular weight interval of PAM selected in the experiment, the application of PAM with a molecular weight of 18 million has the most significant effect on the sediment reduction of the experimental slope, and the PAM can improve the infiltration capacity of soil water and provide a reference for the control of soil erosion in soil embankments.

Keywords: rainfall intensity; PAM (polyacrylamide) molecular weight; flow reduction and sediment reduction; earthen embankments

中国是一个农业大国,而堤防工程是保证农业发展的一项比较重要和实用的设施。同时,堤防也是江河流域最古老、最基本的防洪设施,是我国防洪体系的重要组成部分,它能有效地保护居民的生命财产安全,有效防止各种灾害的发生^[1-2]。近几年来,极端天气出现频率增多。根据 2021 年中国水资源公报,2021 年全国降水量明显高于多年平均水平,全国平均年降水量为 691.6 mm,比多年平均水平高出 7.4%,比多年平均水平,2020 年减少 2.1%^[3]。短历强降雨对土壤的侵蚀破坏尤为明显,更容易出现管涌甚至决口等危险情况。2022 年,吉林省降水异常突出,夏季和秋季的降水量分别比常年偏多百分之四十和百分之五十,极端天气气候突发、多发、频发。重庆、山东、四川也遭遇强降雨。中国东北黑土区带是世界四大黑土区带之一,广泛分布着肥沃、珍贵的黑土资源,也是中国重要的商品粮基地和生态屏障。但东北黑土区属于寒温带气候,气候干燥寒冷。降雨多发生在每年 7 月至 9 月,约占全年总降雨量的 70%。它具有降雨时间短、降雨量大的特点,容易发生土壤侵蚀等问题^[4-5]。因此,东北地区土壤防护也引起了人们的广泛关注。

水力侵蚀是中国东北地区的主要土壤侵蚀类型。

据第三次遥感调查统计,东北黑土区水力侵蚀面积 18.27 万 km²,占总面积的 17.7%;黑龙江省水力侵蚀面积和强度最大,土壤严重流失不仅会造成土壤流失,还会严重威胁生态、粮食等安全^[6-8]。水力侵蚀是因为在短时强降雨时,对坡面土壤造成破坏引起表层土壤养分流失^[9]。郑粉莉用人工模拟降雨试验发现降雨动能对坡面侵蚀过程的影响,发现坡面侵蚀过程主要分为 4 个阶段,即溅蚀、细沟间侵蚀、细沟间侵蚀和雨后径流侵蚀^[10]。通过对东北黑土坡面的室内试验,李桂芳等发现,降雨强度从 50 mm/h 增加到 100 mm/h 后,侵蚀最多增加 3 倍^[11]。近年来,土壤改良剂在土壤侵蚀研究过程中的应用已成为一种有效的新方法^[12]。通过对国内外聚合物材料土壤物理性质改善的研究,聂天宏等发现聚合物可以改善土壤结构,提高土壤稳定性^[13]。聚丙烯酰胺(PAM)它因其丰富的活性基团和良好的粘结性而受到广泛关注。刘鸿涛、李起龙等研究了第二松花江流域粉壤土堤防坡面施加 PAM 后的坡面侵蚀特征,发现在 PAM 作用下,坡面侵蚀严重区域面积减少了 54.57%,起到了很好的防控侵蚀的效果,增加土壤水分的入渗能力,减少产流产沙^[14]。陈渠昌等研究野外砂壤土施用 PAM 对降雨净

流量、径流含沙量等的影响,发现增加聚丙烯酰胺(PAM)的使用量有助于减少坡地径流中的泥沙含量,大幅度减少了降雨径流中携带的泥沙数量^[15]。冯浩团队发现当 PAM 在壤土表面施放量为 0.8 g/m^2 时,降低产流速率 16%,径流总量减少 16.6%;当施放量为 0.08 g/m^2 时,PAM 就失去了减水和减沙的效果^[16]。白岗栓及其团队进行了关于 PAM 不同喷施量对风干土层结皮状况、土壤含水率和土壤风蚀量的研究。根据研究数据显示,在 PAM 喷洒量增加时,结皮覆盖率、结皮厚度和结皮抗剪强度均呈现上升的趋势,并且明显高于风干土和饱和湿土。为了减少风蚀量,建议在风沙区在降雨之前将 2 g/m^2 PAM 进行干撒,或者在干撒之后对土壤进行喷水,这样能够有效降低风蚀的发生^[17]。夏海江等通过试验发现,在坡地上施用阴离子分子量 300~400 万的 PAM 效果最好,平均比对照组侵蚀量减少 78.1%。而且随着 PAM 用量的增加,溅蚀量逐渐减少^[18]。万佳蕾以江西典型土壤为研究对象,采用盆栽作物和人工模拟降雨试验进行研究,利用 4 种不同分子量的 PAM (600 万、800 万、1 200 万、1 600 万)处理土壤,设置 2 个、10 g/m^2 梯度,发现 1 200 万分子量的 PAM 以 2 g/m^2 用量最好,土壤容重降低 6.63%,PAM 处理后的土壤对促进植物生长有显著作用^[19]。

由此可见,PAM 对于坡面侵蚀防治有着明显的效果,有效降低坡面的产流产沙量和径流含沙量,减小因降雨产生的坡面严重侵蚀。同时 PAM 还可以与粉煤灰、SAP(吸水性高分子)、玉米秸秆等混合使

用,推迟坡面的初始产流时间,减少水土流失量和坡面径流量^[20-23]。但是对于何种 PAM 的施用方法、分子量等对土壤侵蚀情况都有着不同的差异,很多学者也发现以溶液的形式施用的效果要好于直接施用^[24-25]。因此,针对不同的土壤条件,尤其是东北堤防地区,PAM 对于坡面的影响还需要进一步研究。

本文通过室内降雨试验,对比不同降雨强度下以喷施的方式施加 4 种不同分子量 PAM 溶液的坡面产流产沙特性,计算东北某地堤防坡面水流的雷诺数(Re),辨别水流形态,分析坡面产流率、产沙率、平均流速的相关关系,探究在喷施方法下不同 PAM 分子量对东北某地堤防裸地坡面的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验地点与土壤

模拟降雨试验于 2023 年 5 月—9 月在长春工程学院水利馆的径流试验场地完成。试验土样取自东北某地区土质堤防坡面,取土深度为 20 cm。

1.2 试验装置

本次试验采用下喷式降雨器进行降雨,研究土壤在降雨条件下的侵蚀情况。下喷式降雨器的雨强范围为 $60 \sim 300 \text{ mm/h}$,降雨高度为 6 m,试验径流槽尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,通过径流槽右下侧的千斤顶来调节坡度,坡度调节范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 。试验之后采集的泥沙样品用上海一恒电热鼓风烘干箱 DHG-9030A 进行烘干,控制温度范围在 $10 \sim 250^\circ \text{C}$ (图 1)。



图 1 试验装置

Fig. 1 The setup of test

1.3 试验方法

将采集的试验用土去除大颗粒的石子和草根后铺开晒干,筛去小颗粒石子后均匀拌开,采用分层铺土。径流槽在底部均匀开孔,底部铺设纱布和沙子,让水自由下渗。铺土时以每 5 cm 为一层填土,将每层表面土壤尽量压实以消除边界效应。在试验前进行预降雨,完成后放置 24 h 后开始正式试验。正式

试验历时 1 h,有径流时开始记录产流时间,每隔 3 min 采集一次泥沙试样,采集时长 5 秒。同时采用染色剂法测得坡面水流流速,试验后测量试样温度,计算水流粘滞系数。试验后测量试样径流量后进行烘干,称量。

1.4 试验设计

通过进行室内模拟降雨试验,研究 3 种降雨强度

下不同 PAM 分子量对东北某地堤防裸地坡面产流产沙特征的影响。本次试验设计 3 种降雨强度 180, 200, 220 mm/h, 坡度为 15°, 坡度的选用与流域堤防现场一致。PAM 分子量设定为 1 200 万、1 400 万、1 600 万、1 800 万以及裸地坡面(分子量为 0), 施用方法为喷施, PAM 用量为 4 g/m², 共 15 组。

2 结果与分析

2.1 降雨强度-PAM 分子量与坡面产流的关系

图 2—4 为 180 mm/h, 200 mm/h, 220 mm/h 降雨强度下 PAM 分子量与坡面产流的关系。3 种不同雨强的情况下, 坡面产流率都随降雨强度的增加而增加。在降雨强度为 180 mm/h 时, 不同分子量的 PAM 对坡面产流率的影响各不相同。在降雨初期, 产流率都呈现急剧加大的趋势, 其中裸地坡面产流率最大, 其次为分子量 1 200 万的 PAM 坡面, 分子量为 1 800 万的 PAM 坡面产流率最小。随着 PAM 分子量的增加, 坡面平均产流率总体呈现降低的趋势, 在分子量为 1 600 万时, 产流率出现小幅增加, 但施加 PAM 的坡面平均产流率均小于未施加 PAM 的坡面, 平均产流率排序为裸地 > 1 200 万分子量 > 1 600 万分子量 > 1 400 万分子量 > 1 800 万分子量, PAM 分子量为 1 800 万时平均产流率相对于裸地坡面平均产流率降低了约 7.81%, 施加不同四分子量 PAM 的坡面平均产流率较裸地坡面减少 3.01%~7.81%。

在降雨强度为 200 mm/h 时, 裸地坡面产流率最大, 分子量为 1 400 万的 PAM 产流率最小。随着降雨历时的增加, 分子量为 1 800 万的 PAM 产流率刚开始增大后趋于平稳, 在降雨历时 20 min 左右时出现减小的趋势。施用 PAM 后的坡面平均产流率都要小于未施加 PAM 坡面, 平均产流率的排序为裸地 > 1 800 万分子量 > 1 600 万分子量 > 1 200 万分子量 > 1 400 万分子量, PAM 分子量为 1 400 万时平均产流率相对于裸地坡面平均产流率降低了约 6.66%, 施加不同四分子量 PAM 的坡面平均产流率较裸地坡面减少 2.92%~6.66%。220 mm/h 降雨强度时, 各分子量 PAM 产流率变化波动较大, 但总体呈现增长的趋势。总体来看, 裸地坡面产流率最大; 分子量 1 400 万的 PAM 坡面产流率较其他 3 种分子量的 PAM 低。4 种不同分子量 PAM 在产流率中后期都出现较大的波动, 施加 PAM 溶液后的坡面平均产流率要小于裸地坡面, 1 600 万分子量 PAM 最小。PAM 分子量为 1 600 万时平均产流率相对于裸地坡面平均产流率降低了约 7.73%, 施加不同四分子量 PAM 的坡面平均产流率较裸地坡面减少 4.82%~7.72%。由此可见, 在大雨强下随着降雨历时的增加, 坡面表面的 PAM 分子被雨滴击打、径流冲刷, 使得 PAM 对产流率的作用降低, 产流率在降雨后期才出现较大波动的情况。根据分析可得, PAM 可以增加土壤的入渗能力, 减少坡面径流的影响。

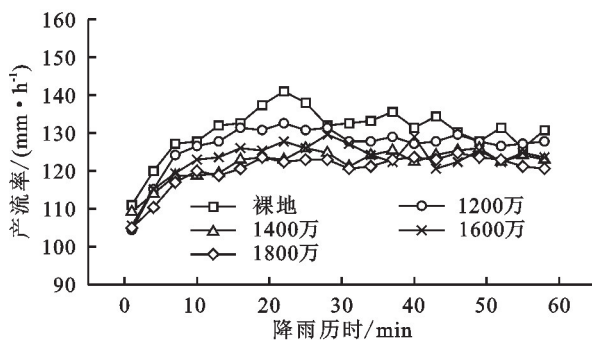


图 2 180 mm/h 下 PAM 浓度对产流率的影响

Fig. 2 Effect of PAM concentration on flow rate at 180 mm/h

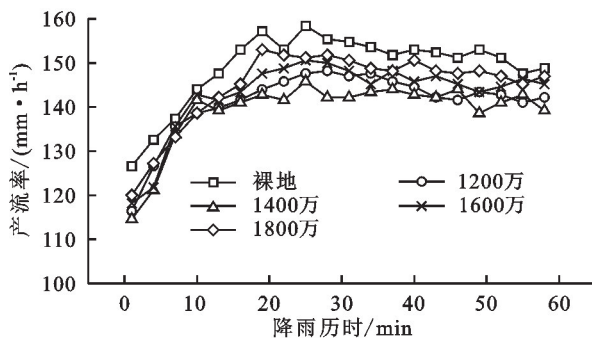
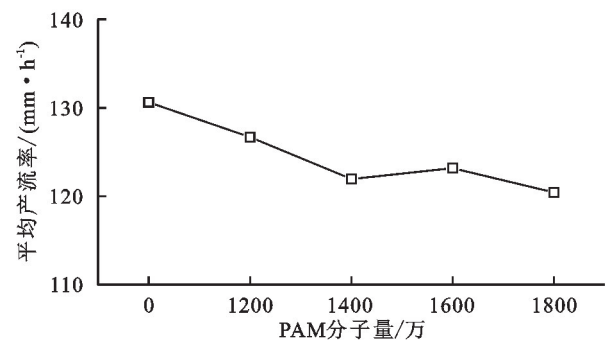
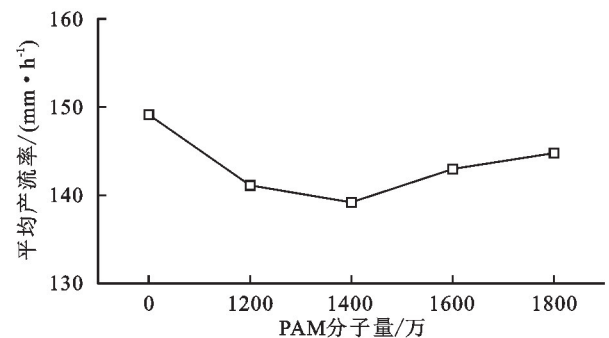


图 3 200 mm/h 下 PAM 浓度对产流率的影响

Fig. 3 Effect of PAM concentration on flow rate at 200 mm/h



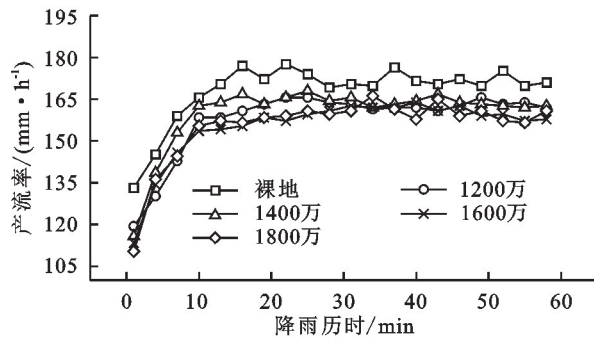


图 4 220 mm/h 下 PAM 浓度对产流率的影响

Fig. 4 Effect of PAM concentration on flow rate at 220 mm/h

根据试验数据可知,在 3 种不同降雨强度下,施加不同分子量 PAM 的坡面平均产流率都要远小于未施加 PAM 的坡面。用幂函数对平均产流率、PAM 分子量、降雨强度三者进行拟合,拟合方程如下:

$$MP = 0.29169Pc^{-0.0264}I^{1.20237}$$

$$(R^2 = 0.973\ 02, p = 0.05)$$

式中:MP 为平均产流率(mm/h);I 为降雨强度(mm/h);Pc 为 PAM 分子量(万)。

根据拟合公式可知,MP 与 I 和 Pc 呈正相关关系。且 I 的幂指数(1.202 37)显著大于 Pc 的幂指数(-0.026 4),说明在式中对平均产流率的影响最大的因素为降雨强度(图 5)。

2.2 降雨强度—PAM 分子量与坡面产沙的关系

在 180 mm/h 降雨强度时,裸地坡面和施加不同分子量 PAM 的坡面其产沙率也各不相同,呈现出不同的波动。裸地坡面在降雨初期产沙率增长较大,在 13 min 左右到达最大值;4 种不同分子量 PAM 中,1 400 万的 PAM 产沙率最大,分子量为 1 600 万的 PAM 产沙率最小。施加 PAM 后坡面的平均产沙率较裸地坡面减少 29.36%~36.67%。当降雨强度为 200 mm/h 时,裸地坡面和施加不同分子量 PAM 的坡面产沙率呈现不同程度的波动,尤其在降雨后期都出现较大波动。分子量为 1 800 万的 PAM 产沙率最小,裸地坡面产沙率最大。各分子量的 PAM 随降雨

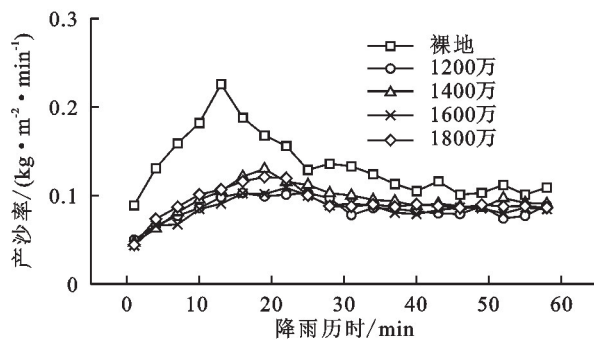
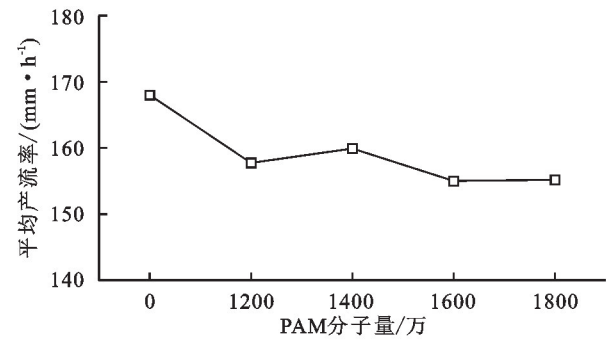


图 6 180 mm/h 下 PAM 浓度对产沙率的影响

Fig. 6 Effect of PAM concentration on sediment yield at 180 mm/h



历时的增加,产沙率都出现先增长后下降的趋势。施加分子量为 1 800 万的坡面平均产沙率相比于裸地坡面减少 45.29%,施加 PAM 后坡面平均产沙率降 32.49%~45.29%。降雨强度为 220 mm/h 时,裸地坡面产沙率要明显大于施加 PAM 的坡面;分子量 1 200 万 PAM 坡面产沙率明显要大于其他 3 种分子量 PAM;分子量 1 800 万 PAM 产沙量小于其他 3 种分子量。施加 PAM 后坡面平均产沙率减少 33.32%~43.27%(图 6—8)。

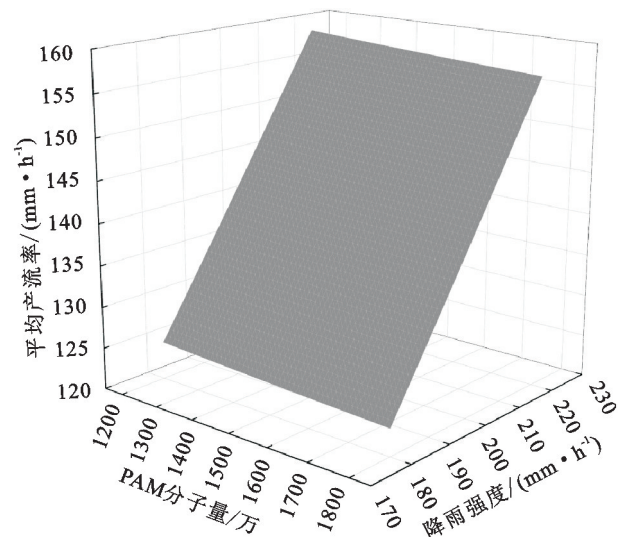
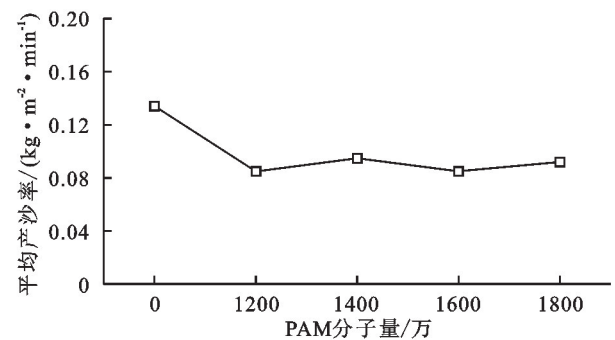


图 5 平均产流率—降雨强度—PAM 分子量拟合曲面

Fig. 5 Mean Runoff Rate-Precipitation Intensity-Molecular Weight PAM Surface Approximation Graph



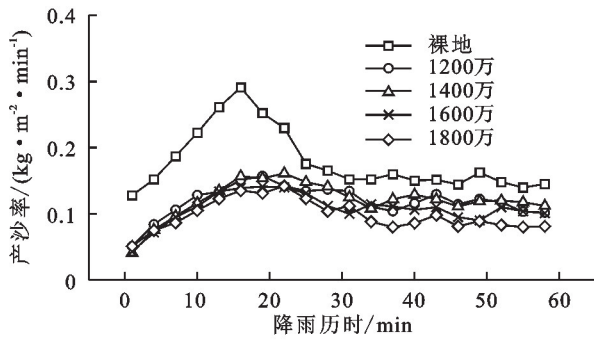


图 7 200 mm/h 下 PAM 浓度对产沙率的影响

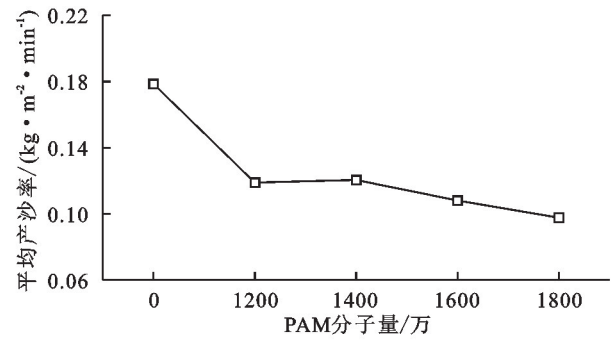


Fig. 7 Effect of PAM concentration on sediment yield at 200 mm/h

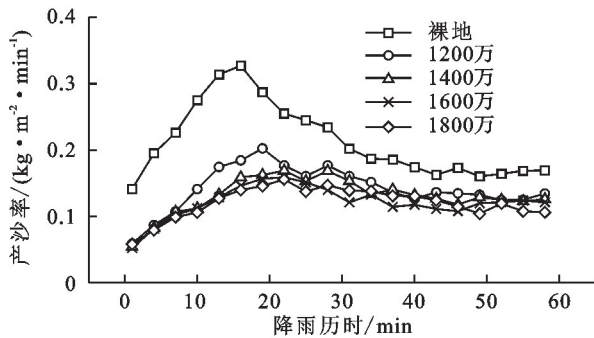


图 8 220 mm/h 下 PAM 浓度对产沙率的影响

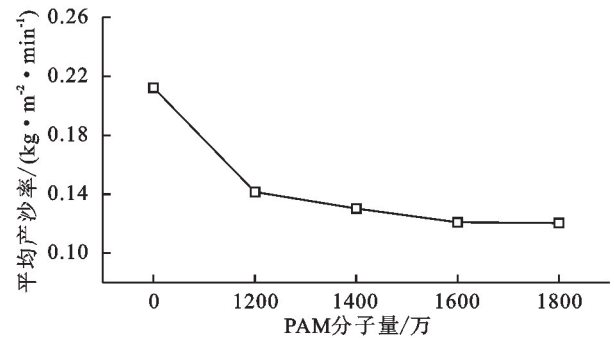


Fig. 8 Effect of PAM concentration on sediment yield at 220 mm/h

由平均产沙率变化曲线可知,平均产沙率随着 PAM 分子量的增加而减小,这种趋势在 200 mm/h、220 mm/h 雨强时尤为明显。而后再用幂函数对 PAM 分子量、平均产流率和降雨强度三要素进行拟合发现 $R^2 = 0.904\ 06$,拟合程度良好,以下为其拟合公式:

$$ME = 8.75651E - 5Pc^{-0.33156} I^{1.80186}$$

$$(R^2 = 0.904\ 06, p = 0.05)$$

式中:ME 为平均产沙率[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$]; I 为降雨强度(mm/h); Pc 为 PAM 分子量(万)。

由公式可得,ME 与 I 为正相关,与 Pc 为负相关。且降雨强度的幂指数大于 PAM 分子量的幂指数,说明 PAM 分子量对于平均产沙率的影响要小于降雨强度(图 9)。

2.3 不同降雨强度下 PAM 分子量与坡面水沙的关系

由表 1 可知,施加 4 种不同 PAM 分子量的坡面在 3 种降雨条件下,与未施加 PAM 的裸地坡面相比较,1 200 万分子量的坡面径流总量分别减少了 4.32%, 10.27%, 10.71%;产沙总量分别减少了 54.39%, 54.75%, 52.48%。当分子量为 1 400 万时,径流总量减少 3.09%, 8.47%, 8.4%;产沙总量减少 53.39%, 55.42%, 53.39%。1 600 万分子量时径流总量减少 5.89%, 7.39%, 9.72%;产沙总量分别减少 52.3%, 56.31%, 56.43%。当施加 1 800 万分子量时坡面径流总量减少 8.13%, 8.70%, 11.13%;产沙总量分别减少 54.04%, 56.08%, 57.74%;分析可知,随着 PAM 分子量的增加,坡面总产沙量逐渐减

少。根据试验结果对比分析,在试验选定的 PAM 分子量范围中,施加 PAM 分子量为 1 800 万的坡面总产流量和总产沙量要小于施加其他分子量 PAM 的坡面。出于径流产沙效果综合考虑,认为对于本次试验的坡面,施加分子量为 1 800 万的 PAM 坡面侵蚀预防效果最好。

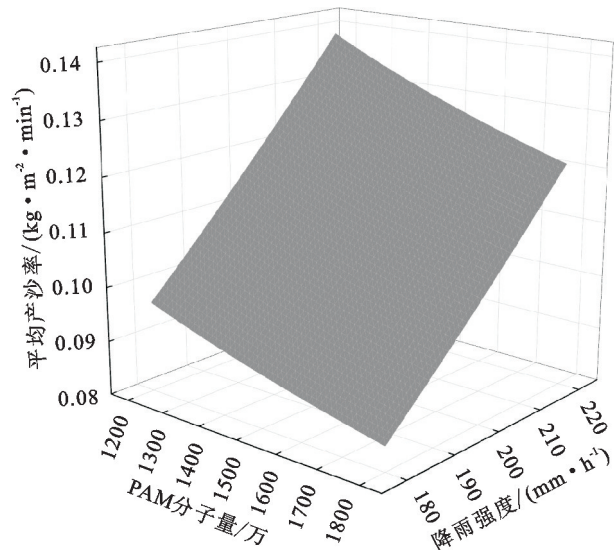


图 9 平均产沙率—降雨强度-PAM 分子量拟合曲面

Fig. 9 Average Sediment Volume-Precipitation Intensity-Molecular Weight PAM Adjustment Surface Diagram

2.4 降雨强度-PAM 分子量与坡面流速的关系

图 10—12 为不同工况下各坡面的流速关系,3 种降雨强度下,施加不同分子量 PAM 的坡面及裸地坡面,流速在降雨过程中都呈现先逐渐增大,再不同程度波动的

趋势。在降雨强度为 180 mm/h 和 200 mm/h 时,裸地坡面流速要比施加 PAM 的坡面大,施加 PAM 可以减小坡面流速,但是这种效果随着降雨历时的增大在逐渐减小。在 220 mm/h 雨强下,4 种不同分子量 PAM 坡面流速都随降雨历时的增加而增加,当流速到达一定峰值之后便出现下降,其中裸地坡面流速要明显大于使用

PAM 的坡面,其中 1 600 万分子量 PAM 流速相对其他 3 种工况较高,1 400 万分子量最低。从平均流速的变化曲线来看,施加 PAM 的坡面平均流速都要小于裸地坡面,降雨强度在 180 mm/h,200 mm/h 和 220 mm/h 时,最小流速分别发生在 1 200 万分子量,1 200 万分子量和 1 400 万分子量。

表 1 各坡面径流产沙总量

PAM 分子量/万	180 mm/h		200 mm/h		220 mm/h	
	径流量/L	产沙量/g	径流量/L	产沙量/g	径流量/L	产沙量/g
0	97.3	10736.25	109.9	11864.38	121.3	12981.18
1200	93.1	4897.29	98.6	5368.96	108.4	6168.42
1400	94.3	5004.47	100.6	5289.56	111.2	5980.62
1600	90.1	4690.68	99.2	5169.10	114.2	6192.37
1800	89.4	4715.82	97.7	5013.76	110.8	5965.79

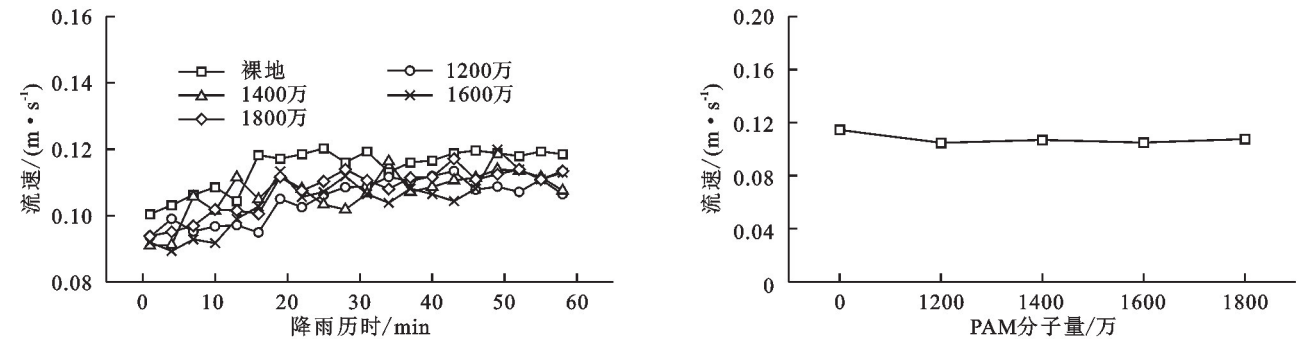


图 10 180 mm/h 下 PAM 浓度对流速的影响

Fig. 10 Effect of PAM Concentration on Flow at 180 mm/h

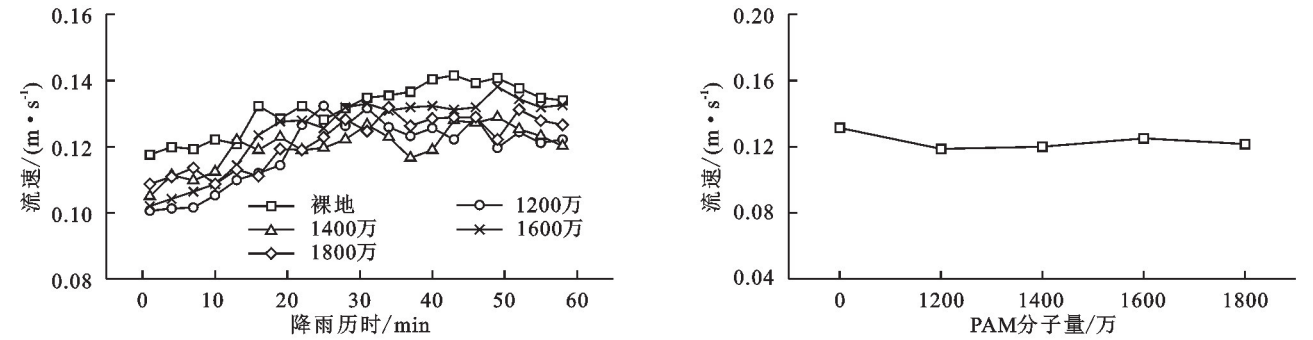


图 11 200 mm/h 下 PAM 浓度对流速的影响

Fig. 11 Effect of PAM Concentration on Flow at 200 mm/h

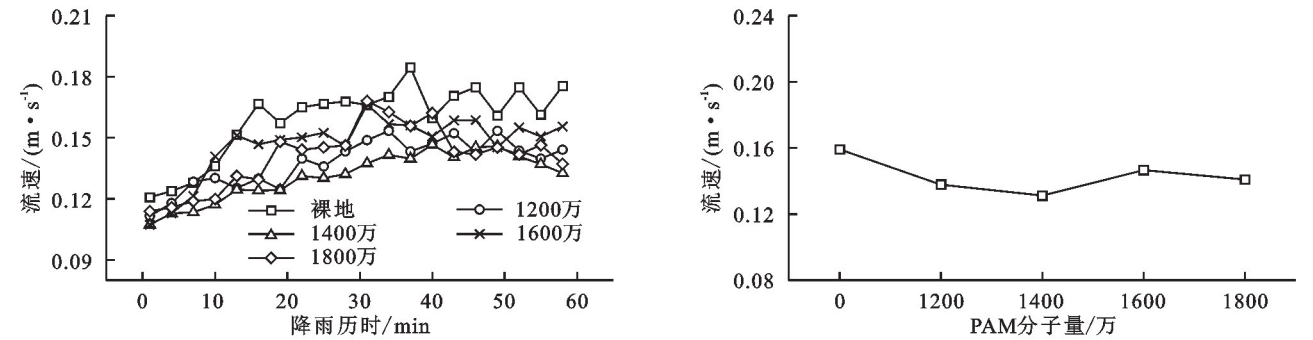


图 12 220 mm/h 下 PAM 浓度对流速的影响

Fig. 12 Effect of PAM Concentration on Flow at 220 mm/h

根据平均流速可知,在 180 mm/h 和 200 mm/h 时,施加不同分子量 PAM 的坡面平均流速与裸地坡面流速变化不大,这种趋势在 220 mm/h 雨强时开始改变,平均流速出现较大波动,但是总体平均流速都要小于未施加 PAM 的坡面。用幂函数对 PAM 分子量、平均流速和降雨强度进行拟合,发现 $R^2=0.950\ 02$,拟合度较好,以下为拟合公式:

$$MV=4.56521E-5Pc^{0.09482}I^{1.35855}$$

$$(R^2=0.950\ 02, p=0.05)$$

式中: MV 为平均流速(m/s); I 为降雨强度(mm/h); Pc 为 PAM 分子量(万)。

由公式可知, MV 与 I 的幂指数(1.358 55)和 Pc 的幂指数(0.094 82)都呈正相关关系,但是 PAM 分子量的幂指数要远小于降雨强度的幂指数。因此,相较于 PAM 分子量,降雨强度对于坡面平均流速的影响较大(图 13)。

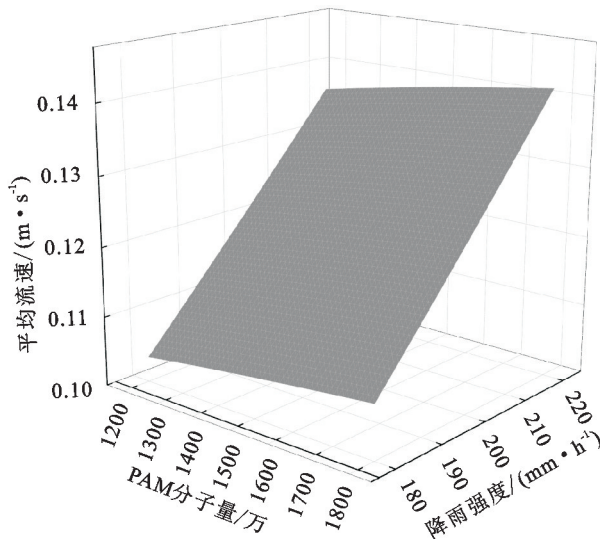


图 13 平均流速-降雨强度-PAM 分子量拟合曲面

Fig. 13 Average flow velocity-rainfall intensity-PAM molecular weight fitting surface plot

2.5 坡面侵蚀动力学分析

雷诺数 Re 是判断水流型态的无量纲参数,根据明渠流流态的判别条件来判别层流和紊流($Re < 500$ 为层流; $Re > 2\ 000$ 为紊流)。根据表 2 可知,180, 220 mm/h 种降雨强度条件下,4 种不同 PAM 分子量的坡面,雷诺数随着 PAM 分子量的增加而下降; 200 mm/h 时,雷诺数先下降再增加,总体来说施加 PAM 后的坡面雷诺数都要小于裸地坡面,雷诺数也随着降雨强度的增加而增加。

水流功率(ω)是剥蚀定量的土壤所需的功率。将降雨强度(I)和 PAM 分子量(Pc)与水流功率(ω)进行拟合,方程如下:

$$\omega=5.11585E-4Pc^{1.19569}I^{-0.02105}$$

$$(R^2=0.972\ 16, p=0.05)$$

单位水流功率(U)为单位重量水体对坡面做功而消耗的功率。把降雨强度(I)和 PAM 分子量(Pc)与单位水流功率(U)进行拟合,拟合方程如下:

$$U=8.09172E-6Pc^{1.35651}I^{0.09334}$$

$$(R^2=0.951\ 99, p=0.05)$$

表 2 不同工况下坡面水动力学参数

Table 2 Hydrodynamic parameters of the descent surface under different working conditions

$I/$ (mm · h ⁻¹)	$Pc/$ 万	Re	Fr	$\omega/$ (W · m ⁻²)	$U/$ (m · s ⁻¹)
180	0	225.16	0.7133	0.2301	0.0199
	1200	218.39	0.6341	0.2231	0.0182
	1400	210.22	0.6655	0.2148	0.0185
	1600	212.34	0.6453	0.2170	0.0182
	1800	207.58	0.6770	0.2121	0.0187
200	0	257.07	0.8207	0.2627	0.0228
	1200	243.00	0.7252	0.2483	0.0206
	1400	239.95	0.7416	0.2452	0.0208
	1600	246.47	0.7781	0.2518	0.0217
	1800	249.57	0.7418	0.2550	0.0211
220	0	289.60	1.0308	0.2959	0.0276
	1200	270.57	0.8590	0.2765	0.0239
	1400	275.63	0.7916	0.2816	0.0228
	1600	267.20	0.9481	0.2730	0.0254
	1800	267.52	0.8941	0.2733	0.0244

3 结论

(1) 在相同的降雨强度下,施加 PAM 的坡面产流产沙效果明显好于未施加 PAM 的坡面,效果明显,在试验设定的分子量范围中,施加分子量为 1 800 万的 PAM 时最大可减沙 57.74%。同时,随着向堤防坡面施加的 PAM 的分子量增加,坡面的产流产沙趋势并不相同,但产流产沙量总体都呈现逐渐下降的趋势。根据坡面侵蚀和经济角度考虑,1 800 万分子量的 PAM 对于试验堤防的效果最好。

(2) 平均产流率、平均产沙率、平均流速均能用幂函数描述与 PAM 分子量和降雨强度之间的关系。平均产流率与降雨强度、PAM 分子量均呈现相关关系;平均产沙率与降雨强度为正相关,与之相反,同 PAM 分子量为负相关关系;平均流速与降雨强度的幂指数和 PAM 分子量的幂指数都呈正相关, R^2 介于 0.904 06~0.973 02。

(3) 通过计算试验雷诺数(Re),发现 $Re < 500$,水流形态为层流,当降雨强度为 180 mm/h 和 200 mm/h 时,裸地坡面流态为缓流,220 mm/h 雨强时坡面流态急流。幂函数可以很好的描述水流功率、单位水流功率与降雨强度和 PAM 分子量的关系, R^2 分别为 0.972 16, 0.951 99。

参考文献(References):

- [1] 杨慧鹰.水利堤防工程施工中的特点及技术要点[J].城市建设理论研究:电子版,2023(11):155-157.
Yang H Y. Characteristics and technical points in the construction of water conservancy dike project[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2023 (11): 155-157.
- [2] 孙东亚,姚秋玲,赵进勇,等.堤防工程建设技术进展[J].中国防汛抗旱,2009,19(6):34-37.
Sun D Y, Yao Q L, Zhao J Y, et al. Technical progress of dike engineering construction[J]. China Flood & Drought Management, 2009,19(6):34-37.
- [2] 孙东亚,姚秋玲,赵进勇,等.堤防工程建设技术进展[J].中国防汛抗旱,2009,19(6):34-37.
Sun D Y, Yao Q L, Zhao J Y, et al.堤防工程建设技术进展[J]. China Flood & Drought Management, 2009, 19(6):34-37.
- [3] 刘卉芳,单志杰,秦伟,等.东北黑土区水土流失治理技术与模式研究评述[J].泥沙研究,2020,45(4):74-80.
Liu H F, Shan Z J, Qin W, et al. Review on soil and water loss control techniques and models in the black soil regions in the Northeast[J]. Journal of Sediment Research, 2020,45(4):74-80.
- [4] Li G Y, Fan H M. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of Northeast China[J]. Pedosphere, 2014,24(2):285-290.
- [5] 张科利,刘宏远.东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J].中国水土保持科学,2018,16(1):17-24.
Zhang K L, Liu H Y. Research progresses and prospects on freeze-thaw erosion in the black soil region of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018,16(1):17-24.
- [6] 水利部,中国科学院,中国工程院.中国水土流失防治与生态安全:东北黑土区卷[M].北京:科学出版社,2010.
Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. Soil erosion prevention and ecological security in China: northeast China black soil area volume[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [7] 方兰,李军.粮食安全视角下黄河流域生态保护与高质量发展[J].中国环境管理,2019,11(5):5-10.
Fang L, Li J. Ecological protection and high quality development of the Yellow River Basin from the perspective of food security[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019,11(5):5-10.
- [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.
Wang J L, Li Z Z. Research progress on water erosion in the black soil region of Northeast China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35 (5):389-397.
- [9] 刘强,穆兴民,高鹏,等.土壤水力侵蚀对土壤质量理化指标影响的研究综述[J].水土保持研究,2020,27(6):386-392.
- Liu Q, Mu X M, Gao P, et al. Review of studies on the effects of soil water erosion on physical and chemical properties of soil quality[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(6):386-392.
- [10] 郑粉莉.黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J].土壤学报,1998,35(1):95-103.
Zheng F L. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of loess area[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998,35(1):95-103.
- [11] 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.
Li G F, Zheng F L, Lu J, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hill-slope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):147-154,182.
- [12] 刘娇娟,崔骏,刘洪宝,等.土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(1):173-184.
Liu J X, Cui J, Liu H B, et al. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022,12(1):173-184.
- [13] 聂天宏,杨兴,李永春,等.高分子材料在土壤物理性质改良方面的研究进展[J].土壤通报,2020,51(6):1504-1512.
Nie T H, Yang X, Li Y C, et al. Research advances on improvement of soil physical properties by application of polymer materials[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020,51(6):1504-1512.
- [14] 刘鸿涛,李起龙,韩宇,等. PAM 对寒区粉壤土堤防护坡产流产沙特征的影响[J].水土保持研究,2020,27(6):14-20.
Liu H T, Li Q L, Han Y, et al. Effect of PAM on the characteristics of runoff and sediment yield in protection slope of embankment of silty loam in cold area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(6):14-20.
- [15] 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.
Chen Q C, Lei T W, Li R P. The impacts of PAM on runoff/infiltration and water erosion from slope lands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(11): 1290-1296.
- [16] 冯浩,吴普特,黄占斌.聚丙烯酰胺(PAM)对黄土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. Effect of polyacrylamide (PAM) on process of runoff and sediment yield of loess soil on slope land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001,17(5):48-51.

- [17] 白岗栓, 罗东, 苗庆丰, 等. PAM 喷施量与施用方式对风沙土风蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 90-98.
Bai G S, Luo D, Miao Q F, et al. Effects of spraying amounts and application methods of polyacrylamide (PAM) on aeolian sandy soil wind erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(10): 90-98.
- [18] 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, 83.
Xia H J, Du Y D, Meng W Z. Simulated experiment of preventing soil erosion with polyacrylamide on sloping field[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(3): 14-17, 83.
- [19] 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 Effects of Polyacrylamide on the Characteristics, Yield and Sediment of on Different Types of Red Soil[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017.
- [20] 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]. 太谷: 山西农业大学, 2017.
Lan B. Effects of corn straw mulching and polyacrylamide applying in surface soil on water and soil loss in sloping fields[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2017.
- [21] 付晨星. PAM 和 SAP 交并施用对旱区坡耕地土壤水力特性和水肥流失的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
Fu C X. Research on combined application of pam and sap on hydraulic characteristics and water and fertilizer loss for sloping farmland in arid area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [22] 张贺. PAM 和粉煤灰组合施用对坡面水土流失的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2019.
Zhang H. Effect of PAM and fly Ash on runoff and sediment yield on Slope Land under artificial rainfall[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [23] 李起龙. 不同下垫面条件堤防坡面侵蚀特征试验研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2021.
Li Q L. Experimental study on erosion characteristics of embankment slope under different underlying surface conditions[D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2021.
- [24] 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 to PAM in typical soil slopes of South China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 279-287.
- [25] 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. Applicability study on polyacrylamide(PAM) Application in slope red soil of tea garden[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.

~~~~~  
(上接第 130 页)

- [26] Yu L, Zhao J N, Wang H, et al. Effects of nutrient addition on plant diversity and productivity in a *Stipa baicalensis* grassland in Inner Mongolia, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): 8165-8173.
- [27] 江小蕾, 张卫国, 杨振宇, 等. 不同干扰类型对高寒草甸群落结构和植物多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(9): 1479-1485.  
Jiang X L, Zhang W G, Yang Z Y, et al. The influence of disturbance on community structure and plant diversity of alpine meadow[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2003, 23(9): 1479-1485.
- [28] 张义, 程杰, 苏纪帅, 等. 长期封育演替下典型草原植物群落生产力与多样性关系[J]. 植物生态学报, 2022, 46(2): 176-187.  
Zhang Y, Cheng J, Su J S, et al. Diversity-productivity relationship of plant communities in typical grassland during the long-term grazing exclusion succession[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(2): 176-187.
- [29] 马文红, 方精云. 中国北方典型草地物种丰富度与生产力的关系[J]. 生物多样性, 2006, 14(1): 21-28.  
Ma W H, Fang J Y. The relationship between species richness and productivity in four typical grasslands of Northern China[J]. Biodiversity Science, 2006, 14(1): 21-28.
- [30] Bai Y F, Wu J G, Pan Q M, et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: Evidence from the Eurasian Steppe[J]. Journal of Applied Ecology, 2007, 44(5): 1023-1034.
- [31] 胡凤烨, 赵锐锋, 张丽华, 等. 黄河首曲湿地植物群落生产力、物种多样性及其与生境的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10238-10249.  
Hu F Y, Zhao R F, Zhang L H, et al. Productivity and species diversity of plant communities and their relationship with habitats in the wetland of first meander of Yellow River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10238-10249.