

施加 NPD 对黄土坡面径流流速和侵蚀产沙的影响

田娜玲¹, 王占礼^{1,2}, 张庆玮¹, 王栋栋¹, 刘俊娥³, 焦念⁴

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710019; 4. 黄河西峰水土保持治理监督局, 甘肃 西峰 745000)

摘要:天然聚合衍生物(NPD)是一种新型的高分子聚合物,是坡面土壤侵蚀化学调控措施所采用的一种新型材料,通过室内人工模拟降雨试验,以裸坡为对照,研究了不同 NPD 施加措施(撒施和喷施)及不同施放量(1.0, 3.0, 5.0 g/m²)条件下径流流速特征以及对侵蚀产沙的影响。结果表明:(1)施加 NPD 的坡面径流流速随降雨历时的变化与裸坡一致,均呈先增大后逐渐趋于稳定的趋势,且流速随降雨历时的变化过程可用对数方程描述。撒施在 1.0 mm/min 雨强下,延迟降雨初始产流时间 8~19 min,而喷施在 3 个雨强下,初始产流的时间整体上较裸坡提前 1~2 min;(2)与裸坡相比,施加 NPD 具有显著减小流速的效应,且雨强越大,减小流速的效应越差;施加不同剂量 NPD 减缓坡面径流流速的效益范围 13.2%~54.3%。其中撒施 3 g/m² 剂量和喷施 5 g/m² 剂量对坡面径流流速的减小效应相对较好;(3)与裸坡相比,施加 NPD 具有显著的减沙效应,且减沙效应范围为 30.6%~71.2%。无论是撒施还是喷施,整体表现为 5 g/m² 计量的减沙效应最好。(4)裸土坡面的侵蚀模数对平均流速的响应关系与撒施和喷施 NPD 坡面的侵蚀模数对平均流速的响应关系皆可用对数方程表示,且撒施和喷施对流速的减小作用均大于减沙作用。

关键词:NPD; 径流流速; 撒施; 喷施; 减沙效应

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0022-07

Effects of Nature Polymer Derivatives on the Flow Velocity and Sediment Yield of Loess Hillslope

TIAN Naling¹, WANG Zhanli^{1,2}, ZHANG Qingwei¹, WANG Dongdong¹, LIU June³, JIAO Nian⁴

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710019, China; 4. Xifeng Scientific Experiment Station of Soil and Water Conservation, Yellow River Water Conservancy Commission, Xifeng, Gansu 745000, China)

Abstract: The natural polymer derivative (NPD) is a novel type of macromolecular polymer which is also a new material for the prevention of water and soil loss. This study adopted chemical regulation technique, which was a non-traditional method, to conserve water and soil. In order to explore the effects of NPD on the flow velocity and sediment yield in the soil erosion process on loess hillslopes, two applicable methods (dry spreading and spraying) and three applicable dosages (1, 3 and 5 g/m²) of NPD were conducted at the rainfall intensities of 1.0 mm/min, 1.5 mm/min, and 2.0 mm/min on the slopes with gradient of 15°, bare slope was set as control. The results showed that: (1) when NPD was applied in the soil surface, the flow velocity increased moderately in the first few minutes, and then gradually approached a steady state in the late stage of the rainfall events, of which trend was somewhat similar to that in the bare slope surface; the relationship between instantaneous flow velocities and time during a rainfall event could be described by logarithmic equation; compared with the bare slope, dry spreading and spraying significantly reduced the flow velocity; under

收稿日期: 2018-01-17

修回日期: 2018-03-02

资助项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0402401, 2017YFD0800502); 国家自然科学基金(41471230, 41171227); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费项目(A314021403-C2)

第一作者: 田娜玲(1992—), 女, 宁夏吴忠市人, 硕士生, 主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: TNNtian@163.com

通信作者: 王占礼(1960—), 男, 陕西榆林市人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn

small rainfall intensity, dry spreading delayed initial runoff time from 8 to 19 min, but initial runoff times of spraying were 1~2 min earlier than that on bare slope under three rainfall intensities; (2) compared with the bare slope, the application of NPD had the significant effect of reducing the flow velocity, and the greater the rainfall intensity was, the poorer the effect of reduction was; application different doses of NPD to reduce flow velocity ranged from 13.2% to 54.3% compared with the bare slope; among them, dry spreading dose of 3 g/m² and spraying dose of 5 g/m² were relatively good for reduction of the flow velocity; (3) the application of NPD had significant effect on sediment reduction, and the ranges of sediment reduction rates varied from 30.6% to 71.2% compared with the bare slope; Application of dose of 5 g/m² had best effect on sediment reduction under dry spraying or spraying; (4) the response relationship of erosion modulus of bare slope to average flow velocity or the response relationship of erosion modulus of dry spreading and spraying NPD to average flow velocity all can be expressed by logarithmic equations; the effect of spreading and spraying on reducing the velocity of flow was more significant than that of sediment reduction.

Keywords: natural polymer derivative; flow velocity; dry spreading; spraying; sediment reduction

坡面径流流速是土壤侵蚀过程中一项重要的水动力学参数,是定量分析土壤侵蚀和径流输沙能力的基础,它在一定程度上决定了土壤侵蚀的强度^[1]。流速主要受坡度、土壤特性、地表特性和流量等因素的影响,而施加化学材料主要对土壤性质有所改良,如土壤团聚体、结皮发育和土壤入渗等,进而影响流速。化学调控技术主要是通过高分子聚合物增加土壤团聚体含量,降低土壤容重,增大土壤孔隙度,提高土壤稳定性,增加土壤入渗,阻碍土壤结皮的形成,从而减慢流速,降低径流携带土壤颗粒的能力,进而降低土壤侵蚀^[2-6]。

国内外许多学者研究发现高分子聚合物 PAM 具有保水保土效应,并将其用作为一种土壤结构改良剂来防治水土流失。Parfitt^[7]、Kemper^[8] 和唐泽军^[9]等研究表明 PAM 能够有效维持土壤结构、促进团聚体结构和抑制土壤结皮的形成。Liu 等^[10]通过人工模拟降雨试验研究天然高聚物(NPD)对黄土坡面片蚀的影响,结果表明 NPD 能显著改善土壤团聚体结构,提高坡面剪切强度,降低坡面侵蚀量。同时,不少学者在 高分子聚合物对土壤入渗方面的影响进行了研究。Santos^[11] 和 Bjorneberg^[12] 等通过试验表明 PAM 能够促进土壤入渗和提高入渗速率。李元元等^[13]研究撒施 Jag S(天然高分子多肽衍生物)能够强化入渗效应。Lentz 等^[14]试验表明当 PAM 施用剂量大于 0.7 kg/hm² 时,可增加入渗 15%。冯浩等^[15]通过模拟降雨和冲刷试验表明 PAM 具有显著的减沙效果。综上,相关研究多集中在高分子聚合物对土壤团聚体、结皮和土壤入渗的影响以及减流减沙效益等方面,而其对坡面径流水动力调控方面的研究较为少见,高分子聚合物的土壤侵蚀调控机制未能被深刻揭示。目前关于流速的研究主要集中在黄土高原模拟降雨和放水冲刷试验条件下,细沟与细沟间水

流流速变化的对比分析,坡长、坡度、降雨流量等与流速的关系,以及坡面径流流速测量方法等方面^[16-23]。而关于化学调控措施对坡面径流流速的影响鲜有报道。因此,开展坡面径流流速的相关研究对于深入了解坡面水流的动力学机制,以及分析坡面土壤侵蚀机理和侵蚀产沙量至关重要。

本文通过室内人工模拟降雨试验,研究不同施放方式下不同剂量的天然聚合衍生物 NPD 在不同的降雨强度下的黄土坡面径流流速特征以及减沙效应,以期阐述天然聚合衍生物(NPD)对黄土坡面径流流速和减沙作用的调控效应,从而为进一步研究、利用新兴化学材料防治黄土坡地水土流失提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和试验装置

试验在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。试验土壤取自位于黄土高原腹地的安塞县(属于典型黄土丘陵沟壑区)黄绵土,采用 0—25 cm 深度的耕作层土壤,分类为粉壤土(USDA),有机质含量为 0.5%,土壤颗粒组成见表 1。将采自野外的土壤经风干后过 5 mm 筛,除去杂草和石块。试验土壤前期含水量为 14%,填土容重为 1.2 g/cm³。

表 1 试验土壤颗粒组成

土壤类型	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
	<0.002 mm	0.002~0.050 mm	0.050~2 mm
黄绵土	8.7	54.7	36.6

试验所用化学材料为天然聚合衍生物(NPD),是从豆胚中提取的聚合物,分子量 30 万~100 万,极易分散在水中形成胶体状。现有试验表明其对水生物种无不利影响和刺激性,且在土壤中能够促进部分

有益菌落的形成,是绿色化学品。

试验设备为变坡钢质小区,长 120 cm、宽 40 cm、深 25 cm。钢槽底部按 10 cm 的间距开孔。试验小区填土之前在底部铺设厚 5 cm 的天然细沙,用透水纱布覆盖,以模拟天然坡面的透水状况。装填土壤厚度为 20 cm,按设计容重采用分层(每层 5 cm)装土以保证装土的均匀性。填土时,采用边填充边压实,以减少边壁对入渗和产流产沙过程及坡面侵蚀微形态发育等的影响,并使下垫面土壤条件的变异性达到最小。填土后,用刮板将表面刮平。

1.2 试验设计与观测

天然聚合衍生物(NPD)的施放方式为撒施、喷施 2 种。若为撒施,将设计剂量的聚合物和干土充分混合均匀后进行撒施以保证聚合物在土表均匀,混合干土的重量(1 035 g)按照与下层装填土壤相同容重铺设 2 mm 厚。为保证聚合物材料和土壤充分作用,在小区土表用塑料喷壶均匀喷洒 2 L 水,放置 15 h 左右,然后进行降雨试验。若为喷施,则将设计剂量的聚合物溶于 2 L 的水中,充分搅拌 30 min 左右,使其形成稳定胶体,然后用塑料喷壶均匀喷洒于土壤表面,放置约 15 h,使聚合物材料和土壤充分作用,然后进行降雨试验。对于裸土小区,装填土壤完成后也在小区土表用塑料喷壶均匀喷洒 2 L 水,放置 15 h 左右,然后进行降雨试验。

试验设计的坡度雨强组合条件为坡度 15° ,雨强为 1.0 mm/min,1.5 mm/min,2.0 mm/min,土壤表面处理为裸土(CK)和施放 NPD 剂量 1 g/m^2 , 3 g/m^2 , 5 g/m^2 的组合试验。设计降雨试验 21 场,重复 1 次,总共 42 场次。试验中,详细观测小区径流变化全过程,开始产流后 6 min 内分别间隔 1 min,2 min,3 min 对流速观测 1 次,以后每隔 3 min 观测 1 次,并且每次测量均在小区左右同时测量一次,每次降雨历时 40 min。各坡度雨强剂量组合条件下的坡面径流流速采用高锰酸钾染色法测量,测流区长度为全坡长(120 cm),使用测流区的长度除以染色水流流过的测流区所用时间得到坡面流的表面最大流速。本试验坡面流流态为层流,所以将实测表面流速乘以修正系数 0.67 作为水流断面平均流速^[24-25]。

2 结果与分析

2.1 施加 NPD 对坡面径流流速变化过程的影响

图 1 为不同雨强下,裸坡和施加不同剂量 NPD 时坡面径流流速随降雨历时的变化过程。各雨强下,施加不同剂量 NPD 的坡面径流流速随降雨历时的变化过程与裸坡基本相似,均先随降雨历时的延长逐步增加,后趋于稳定;裸坡和施加各剂量 NPD 坡面径流流速随降雨历时的变化可用对数方程描述,相关关系的显著性水平较高。

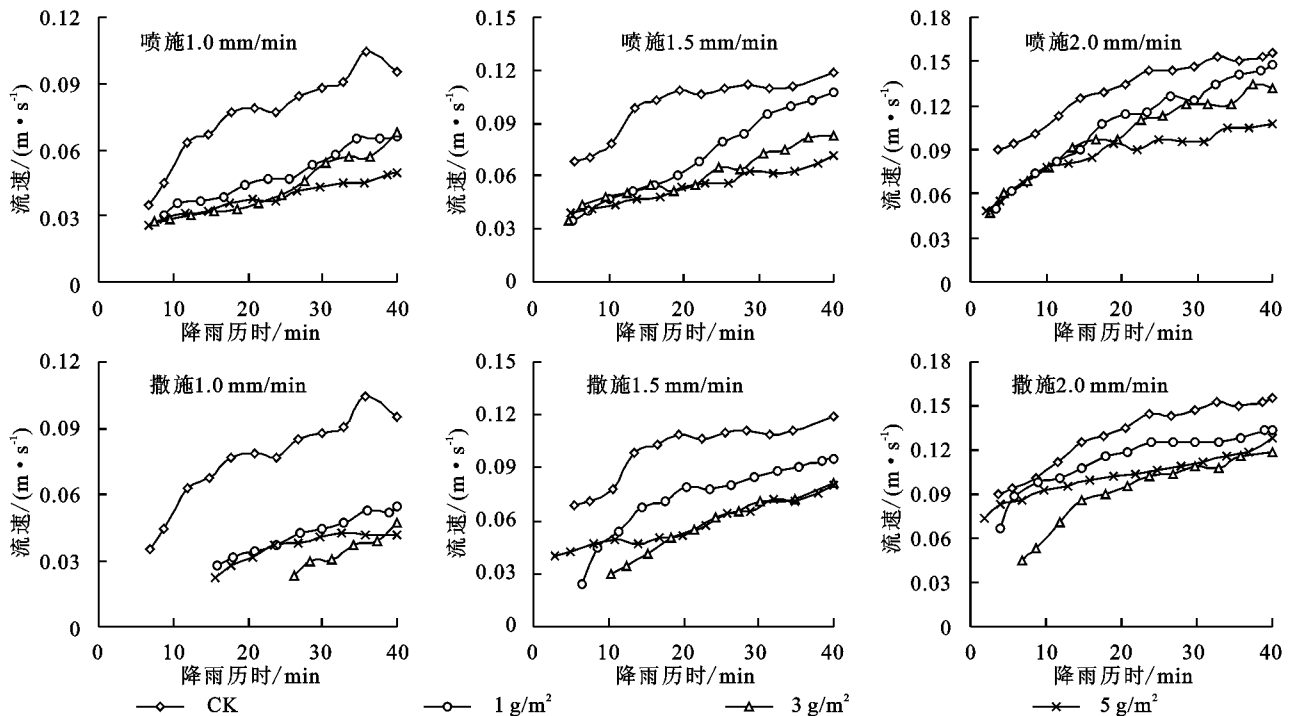


图 1 施加 NPD 坡面径流流速随降雨历时的变化过程

对于撒施,同一雨强下,裸坡和撒施不同剂量 NPD 的平均流速大小总体表现为:裸坡 $> 1 \text{ g/m}^2 > 5$

$\text{g/m}^2 > 3 \text{ g/m}^2$ 。1.0 mm/min 雨强下,撒施 1, 3, 5 g/m^2 剂量时,开始产流的时间比裸坡分别延迟了 8~

19 min。各个雨强下,撒施 1,3 g/m² 剂量时,流速随降雨历时的增加趋势相对一致,且产流初期的增加速率比后期大;而撒施 5 g/m² 剂量时,流速随降雨历时的增加速率比较平缓,在产流初期流速大于 1,3 g/m² 剂量,产流后期流速变化与 3 g/m² 剂量趋于一致。撒施各剂量 NPD 流速变化整体在产流末期十分接近,说明撒施 NPD 对流速的减小效益主要来自产流后期。对于喷施,同一雨强下,裸坡和喷施不同剂量 NPD 的平均流速大小总体表现为:裸坡>1 g/m²>3 g/m²>5 g/m²。3 个雨强下,喷施各剂量 NPD 开始产流的时间整体上较裸坡提前 1~2 min。各个雨强下,喷施不同剂量 NPD 的径流流速随降雨历时的变化分别在产流后的 26,16,13 min 内十分接近,之后流速大小整体表现为:1 g/m²>3 g/m²>5 g/m²,说明喷施 NPD 对流速的减小效益主要来自产流前期。综上分析,施加 NPD 剂量为 1 g/m²,3 g/m²,5 g/m² 时,撒施平均流速相比裸坡分别减少 27.8%,42.7%,38.7%;喷施相比裸坡分别减少 27.1%,36.0%,43.3%。因此,撒施和喷施与裸土相

比都显著减小了流速。

2.2 施加 NPD 对次降雨平均径流流速减小效应分析

表 2 为不同雨强下,施加 NPD 时坡面径流平均流速及其对流速的减小效应。不同雨强下,裸坡径流流速变化范围 0.075~0.131 m/s,撒施和喷施 NPD 坡面径流平均流速分别介于 0.034~0.114 m/s 和 0.039~0.108 m/s,说明施加 NPD 坡面的平均流速均显著小于裸坡。同一剂量条件下,施加 NPD 坡面平均流速随雨强增大而增大,而对流速的减小效应随雨强的增大而减小。与裸坡相比,撒施和喷施不同剂量 NPD 减缓坡面径流流速的效益范围分别为 13.2%~54.3%和 17.6%~48.9%。同一雨强条件下,撒施和喷施不同剂量 NPD 对流速减小效应分别表现为:3 g/m²>5 g/m²>1 g/m²,5 g/m²>3 g/m²>1 g/m²。综上分析,施加 NPD 对坡面径流流速具有显著的减小效应,且对流速的减小效应在小雨强下较好,其中撒施 3 g/m² 剂量和喷施 5 g/m² 剂量 NPD 分别对坡面径流流速的减小效应相对较好。

表 2 不同降雨强度下施加 NPD 对流速的减小效应

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	CK 平均流速/ (m·s ⁻¹)	撒施					
		平均流速/(m·s ⁻¹)			减小效应/%		
		1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²
1.0	0.075a	0.042b	0.034b	0.036b	43.9	54.3	52.3
1.5	0.100a	0.073b	0.056b	0.058b	26.4	43.5	41.5
2.0	0.131a	0.114a	0.092b	0.102b	13.1	30.2	22.3
均值	0.102	0.076	0.061	0.065	27.8	42.7	38.7

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	CK 平均流速/ (m·s ⁻¹)	喷施					
		平均流速/(m·s ⁻¹)			减小效应/%		
		1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²
1.0	0.075a	0.049b	0.042b	0.039b	35.2	44.1	48.9
1.5	0.100a	0.071b	0.060b	0.053b	28.4	39.8	46.7
2.0	0.131a	0.108a	0.099b	0.086b	17.6	24.1	34.4
均值	0.102	0.076	0.067	0.059	27.1	36.0	43.3

注:不同字母表示同雨强下不同剂量平均流速和裸土在 0.05 置信水平上的显著性差异。

2.3 施加 NPD 在不同降雨强度下的减沙效应分析

表 3 为不同雨强下,施加不同剂量 NPD 时坡面次降雨平均侵蚀模数及其减沙效应。对于撒施,同一雨强下,1.0 mm/min 雨强,撒施剂量越大,侵蚀模数越小,减沙效应越好;1.5 及 2.0 mm/min 雨强,撒施剂量从 1 g/m² 到 5 g/m²,侵蚀模数的变化由小到大再变小,减沙效应则由大到小再变大。对于同一剂量,降雨强度越大,侵蚀模数越大,减沙效应在 3 g/m² 剂量下最差,在 1,5 g/m² 剂量下皆表现为由大到小再到大的变化。将同一剂量 3 个雨强下的减沙效应进行平均,得到撒施剂量为 1,3,5 g/m² 时,侵蚀模数相比裸坡分别减少了 58.6%,54.2%和 62.2%。因此,整

体表现为撒施 5 g/m² 计量的减沙效应最好,且裸坡和撒施不同剂量 NPD 的侵蚀模数大小表现为:裸坡>3 g/m²>1 g/m²>5 g/m²。对于喷施,同一雨强下,喷施剂量越大,侵蚀模数越小,减沙效应越好;同一剂量下,降雨强度越大,侵蚀模数越大,减沙效应越差。不同雨强下的减沙效应差异不是很明显,具体表现为 1 g/m² 剂量下,雨强越大,减沙效应越大,而 3,5 g/m² 剂量下,随雨强增大,减沙效应的变化由大到小再变大。将同一剂量 3 个雨强下的减沙效应进行平均,得到喷施剂量为 1,3,5 g/m² 时,侵蚀模数相比裸坡分别减少了 34.4%,43.0%和 58.8%。因此,整体表现为喷施 5 g/m² 剂量的减沙效应较好,且裸

坡和喷施不同剂量 NPD 的侵蚀模数大小表现为:裸坡 $>1\text{ g/m}^2>3\text{ g/m}^2>5\text{ g/m}^2$ 。综合分析可知,撒施和喷施与裸土坡面相比具有显著的减沙效应,且均表现为 5 g/m^2 剂量的减沙效应最好。

表 3 不同降雨强度下施加 NPD 的减沙效应

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	CK		撒施					
	平均流速/ (m·s ⁻¹)		平均流速/(m·s ⁻¹)			减小效应/%		
			1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²
1.0	0.141a		0.059b	0.051b	0.041b	58.4	63.5	71.2
1.5	0.328a		0.143b	0.156b	0.143b	56.3	52.4	56.3
2.0	0.502a		0.195b	0.268b	0.206b	61.2	46.6	59
均值	0.324		0.132	0.158	0.13	58.6	54.2	62.2

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	CK		喷施					
	平均流速/ (m·s ⁻¹)		平均流速/(m·s ⁻¹)			减小效应/%		
			1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²
1.0	0.141a		0.098a	0.075b	0.055b	30.6	46.7	61.1
1.5	0.328a		0.211a	0.201a	0.146b	35.7	38.6	55.6
2.0	0.502a		0.317b	0.283b	0.202b	36.8	43.6	59.8
均值	0.324		0.209	0.186	0.134	34.4	43.0	58.8

注:不同字母表示同雨强下不同剂量侵蚀模数和裸土在 0.05 置信水平上的显著性差异。

2.4 施加 NPD 坡面次降雨平均侵蚀模数对平均流速的响应关系

由图 2 可知,施加不同剂量 NPD 坡面和裸土坡面的侵蚀模数皆随流速的增大而增大,但其增加速率均小于裸坡。与裸坡相比,撒施和喷施的平均侵蚀模

数和平均流速都明显减小,且撒施和喷施减小流速的作用均大于减沙作用。裸土坡面的侵蚀模数对平均流速的响应关系与撒施和喷施 NPD 坡面的侵蚀模数对平均流速的响应关系皆可用对数方程表示,相关关系的显著性水平较高。

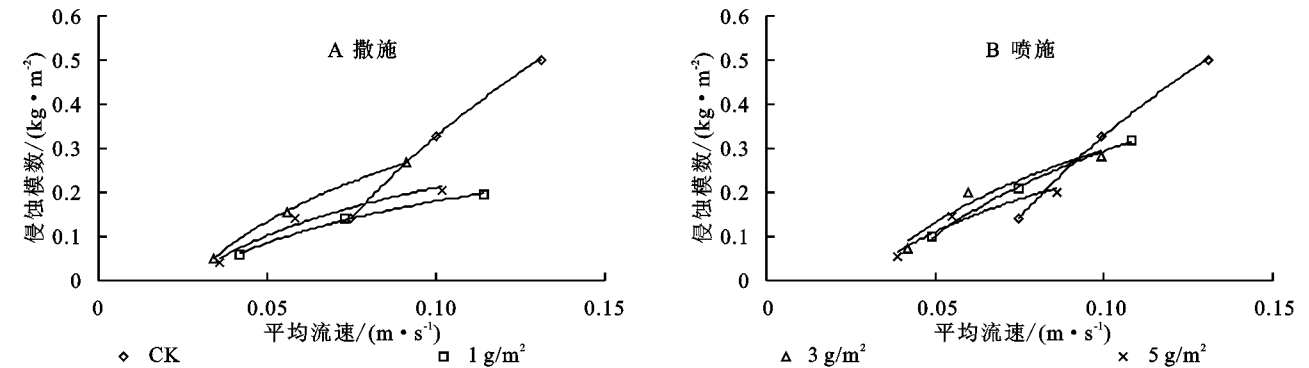


图 2 施加 NPD 坡面侵蚀模数随平均流速的变化

3 讨论

坡面径流的侵蚀力与流速密切相关,而流速主要受坡度、土壤特性、地表特性和流量等因素的影响。本试验中,雨强越小,施加不同剂量 NPD 减小流速的效应越好。主要因为雨强越大,径流流量越大,径流的动能就越大,从而越快也越易冲刷土壤表面施放的高分子聚合物,使其随径流流失,而小雨强使 NPD 有充分的时间与土壤融合,所以 1.0 mm/min 雨强下施加 NPD 减小流速的效应最好。对于裸坡来说,黄土土壤结构差,孔隙率低,导水率小,极易形成结皮^[26]。结皮的形成降低土壤入渗,致使坡面径流量增大,从而导致坡面流速在产流初期迅速增大。而

后,结皮在雨滴的持续打击作用下,经历“生成—破坏—再生成”的循环过程,使得坡面径流量的增大速率变慢,从而坡面流速也随之趋于稳定。对于施加 NPD 能够显著减小流速和侵蚀产沙的原因主要有:(1) NPD 是一种天然聚合衍生物,是从大豆胚胎中提取出来的一种中性多聚糖,具有胶结凝固土壤颗粒的作用。在土壤表面施加 NPD 能够增加土壤表层颗粒之间的凝聚力,使土壤颗粒不易被雨滴溅散而堵塞孔隙,从而抑制土壤结皮的形成,增加土壤入渗能力,进而减小流速和侵蚀产沙。如 Gardiner^[27]和 Mitchell^[28]等研究表明在土壤表面施放聚丙烯酰胺能够增加土壤入渗。而土壤结皮具有减缓降雨入渗、增大地表径流和抑制产沙的作用,因此施加 NPD 能

够抑制土壤结皮的形成,增加土壤入渗能力,进而减小流速和侵蚀产沙。(2) 施加 NPD 增加土壤入渗,从而可以减小坡面径流量,使径流动能减小,同时减小流速和侵蚀产沙。这与陈渠昌^[29]和于健^[30]等研究在土壤表面施加适量的高分子聚合物可以增加土壤入渗率,减小径流量和侵蚀量这一结果相一致。(3) 喷施和撒施 2 种方式在产流初期都增大了土壤表面糙率。这是由于 NPD 具有胶结凝固土壤颗粒的作用,施加 NPD 后使得土壤团聚性变好,团粒结构的增加在一定程度上增大了土壤表面糙率,从而减小流速。另外,NPD 溶于水后能形成稳定胶体,在产流初期胶结凝固土壤颗粒,所以在降雨后的短时间内能够增大土壤表面糙率,从而减小流速。而施明新等^[31]研究随着地表糙率的增加,水流克服阻力做功增加,能量降低,流速呈指数函数减小这一结果可充分表明施加 NPD 可以增大土壤表面糙率,从而减小流速。综上所述讨论分析,施加化学材料减小流速的本质是改良了土壤性质,如土壤团聚体,土壤入渗以及土壤结皮,而施加化学材料无论是增加了土壤团聚体还是抑制土壤结皮,最终都是增加的土壤入渗,因此土壤入渗是减小流速最本质的原因。

与裸坡相比撒施和喷施都具有显著减小地表径流流速的效应,二者的差异不显著。而于健等^[30]研究另一种高聚物聚丙烯酰胺(PAM)的不同施用方法对土壤入渗的影响,得出直接使用撒施干粉 PAM 对增加入渗的作用更好。这主要由于两种化学材料本身的不同引起的物理化学性质差异以及对化学材料施放方式的差异所导致的。对于撒施不同浓度 NPD 对流速的减小效应整体表现 3 g/m^2 剂量减小流速的效应最好,主要由于浓度过低时,土壤的渗透性没有得到明显改善,进而没有减小径流流速;而浓度过高时,高分子聚合物与土壤颗粒反应不完全,多余聚合物遇水后堵塞土壤孔隙,进而使入渗减小,径流量增大,流速增大。此外,有研究表明 PAM 对降雨初始产流时间的影响不显著^[29],而也有研究表明其对坡地降雨的初始产流时间存在一定的影响,尤其在小雨强下,这种延迟产流时间的现象更加明显^[3]。因此对于化学材料对黄土高原降雨产流时间的影响存在争议。本研究结果显示,对于撒施, 1.0 mm/min 雨强下,撒施 NPD 和裸坡相比具有显著延迟降雨初始产流时间的作用,这与吴淑芳等^[32]研究高分子聚合物能推迟坡面产流时间这一结果相一致。主要是因为撒施是将 NPD 与干土充分混合均匀后撒在土壤坡面,使其在降雨初期能够充分溶解,与土壤融合,从而改善土壤孔隙,延迟坡面产流。而对于喷施,3 个雨

强下,各剂量 NPD 开始产流的时间整体上较裸坡提前 $1\sim 2 \text{ min}$,分析原因认为可能是试验过程中,溶解在水中的 NPD 没有充分溶解,喷施在坡面后,堵塞土壤孔隙从而降低了土壤的孔隙度,另一方面,降雨初期,NPD 会胶结吸附一些由于雨滴击溅形成的细小土壤颗粒,这些土壤颗粒填充堵塞了土壤孔隙,并改变土壤表面结构,产生结皮,减小坡面入渗,提前降雨初始产流时间。

关于天然聚合衍生物(NPD)或是其他化学材料对坡面径流流速的研究比较缺乏,所以在这一方面需要我們做进一步研究。流速是表征坡面流水动力学的一个重要参数,对水流剥蚀土壤和水流输沙能力有重要影响。本文着重研究了 NPD 对黄土坡面薄层径流流速的影响,但就最佳施放剂量、产生的时效性、对土壤作用机理的影响及对不同类型土壤的作用是否一致等方面还需要深度研究,以便深刻认识和评价 NPD 对黄土坡面水土保持的影响和贡献,以及对黄土坡面水流动力学的调控机理。

4 结论

(1) 施加 NPD 坡面径流流速随降雨历时的变化与裸坡基本相似,在产流初期逐渐增加后趋于稳定;裸坡和施加各剂量 NPD 坡面径流流速随降雨历时的变化可用对数方程描述,相关关系的显著性水平较高。与裸坡相比,撒施和喷施都显著减小了流速。对于撒施, 1.0 mm/min 雨强下, $1, 3, 5 \text{ g/m}^2$ 剂量开始产流时间比裸坡延迟 $8\sim 19 \text{ min}$,且撒施 NPD 对流速的减小效益主要来自产流后期。对于喷施,3 个雨强下,各剂量 NPD 开始产流的时间整体上较裸坡提前 $1\sim 2 \text{ min}$,且对流速的减小效益主要来自产流前期。

(2) 与裸坡相比,施加 NPD 具有显著减小流速的效应,且雨强越大,减小流速的效应越差。与裸坡相比,撒施和喷施不同剂量 NPD 减缓坡面径流流速的效益范围分别为 $13.2\%\sim 54.3\%$ 和 $17.6\%\sim 48.9\%$ 。其中撒施 3 g/m^2 剂量和喷施 5 g/m^2 剂量 NPD 分别对坡面径流流速的减小效应相对较好。

(3) 与裸坡相比,施加 NPD 具有显著的减沙效应。裸坡和撒施与喷施不同剂量 NPD 的侵蚀模数大小分别表现为:裸坡 $> 3 \text{ g/m}^2 > 1 \text{ g/m}^2 > 5 \text{ g/m}^2$ 和裸坡 $> 1 \text{ g/m}^2 > 3 \text{ g/m}^2 > 5 \text{ g/m}^2$ 。将同一剂量 3 个雨强下的减沙效应进行平均,得到撒施和喷施剂量为 $1, 3, 5 \text{ g/m}^2$ 时,侵蚀模数相比裸坡分别减少了 $58.6\%, 54.2\%, 62.2\%$ 和 $34.4\%, 43.0\%, 58.8\%$ 。因此,整体表现为施加 5 g/m^2 计量的减沙效应最好。

(4) 施加不同剂量 NPD 坡面和裸土坡面的侵蚀模

数皆随流速的增大而增大,但其增加速率均小于裸坡。裸土坡面的侵蚀模数对平均流速的响应关系与撒施和喷施 NPD 坡面的侵蚀模数对平均流速的响应关系皆可用对数方程表示,相关关系的显著性水平较高。且撒施和喷施减小流速的作用均大于减沙作用。

参考文献:

- [1] 刘鹏,李小昱,王为,等. 基于相关法的坡面径流流速测量系统[J]. 农业工程学报,2008,24(3):48-52.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 雷廷武,唐泽军,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. 侵蚀[J]. 土壤学报,2003,40(3):401-406.
- [5] Yu J, Lei T W, Zhang J S, et al. Effects of different application methods of polyacrylamide(PAM) on soil infiltration and erosion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(7):38-44.
- [6] Smith H J C, Levy G J, Shainberg I. Water-droplet energy and soil amendments: Effect on infiltration and erosion [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990,54(4):1084-1087.
- [7] Parfitt R L, Greenland D J. Adsorption of polysaccharides by montmorillonite [J]. Soil Science Society of America Journal, 1970,34(6):862-866.
- [8] Kemper W D, Rosenau R C. Soil cohesion as affected by time and water content [J]. Soil Science Society of America Journal, 1984,48(5):1001-1006.
- [9] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等. 降雨及聚丙烯酰胺(PAM)作用下土壤的封闭过程和结皮的形成[J]. 生态学报,2002,22(5):634-641.
- [10] Liu J E, Wang Z L, Yang X M, et al. The impact of natural polymer derivatives on sheet erosion on experimental loess hillslope [J]. Soil and Tillage Research, 2014,13(9):23-27.
- [11] Santos F L., Reis J L, Martins O C, et al. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils [J]. Biosystems Engineering, 2003,86(3):355-364.
- [12] Bjorneberg D L, Santos F L, Castanheira N S, et al. Using polyacrylamide with sprinkler irrigation to improve infiltration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,58(5):283-289.
- [13] 李元元,王占礼,刘俊娥,等. 喷施中性多聚糖对黄土坡面降雨入渗的影响[J]. 土壤学报,2017,54(4):844-853.
- [14] Lentz R D, Sojka R E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration [J]. Soil Science, 1994,158(4):274-282.
- [15] 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.
- [16] 米宏星,陈晓燕,赵宇,等. 黄土坡面细沟径流流速的试验研究[J]. 水土保持学报,2015,29(1):66-69,110.
- [17] 刘和平,王秀颖,刘宝元. 人工模拟降雨下细沟与细沟间流速的沿程分布[J]. 地理研究,2011,30(9):1660-1668.
- [18] 罗榕婷,张光辉,曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展,2009,28(4):567-574.
- [19] 雷廷武, Nearing M. A. 侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究[J]. 水利学报,2000,31(11):49-54.
- [20] 李勉,姚文艺,陈江南,等. 草被覆盖对坡面流流速影响的人工模拟试验研究[J]. 农业工程学报,2005,21(12):43-47.
- [21] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的试验研究[J]. 水科学进展,2002,13(2):159-165.
- [22] Abrahams Athol D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986,11(6):653-657.
- [23] 刘鹏,李小昱,王为,等. 基于相关法的坡面径流流速测量系统[J]. 农业工程学报,2008,24(3):48-52.
- [24] Horton E R, Leach R H, Van V R. Laminar sheet flow [J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1934,15(2):393-404.
- [25] 罗榕婷,张光辉,沈瑞昌,等. 染色法测量坡面流流速的最佳测流区长度研究[J]. 水文,2010,30(3):5-9.
- [26] 卜崇峰,蔡强国,张兴昌,等. 黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究[J]. 土壤学报,2009,46(1):16-23.
- [27] Gardiner D T, Sun Q G. Infiltration of wastewater and simulated rainwater as affected by polyacrylamide [J]. Jawa Journal of the American Water Resources Association, 2002,38(4):1061-1067.
- [28] Mitchell A. R. Polyacrylamide application in irrigation water to increase infiltration [J]. Soil Science, 1986, 141(5):353-358.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 施明新,吴发启,田国成. 地表糙率对坡面流流速影响的试验研究[J]. 水力发电学报,2015,34(6):117-124.
- [32] 吴淑芳,吴普特,冯浩,等. 高分子聚合物防治坡地土壤侵蚀模拟试验研究[J]. 农业工程学报,2004,20(2):19-22.