

多糖(Jag C162)对黄土坡面径流过程的影响

杨莉婷¹, 刘俊娥¹, 王占礼^{2,3}, 齐小倩¹, 程西科¹

(1.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119;

2.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; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:天然高分子多肽衍生物 Jag C162 是一种新型高聚物,研究其对黄土坡面径流过程的影响可为土壤侵蚀的化学调控技术提供新的理论依据。通过室内人工模拟降雨试验,在不同坡度(10° , 15° , 20°)、降雨强度(1, 1.5, 2 mm/min)、Jag C162 不同撒施剂量(0, 1, 3, 5 g/m²)的组合条件下,研究了 Jag C162 对坡面径流过程的调控效应。结果表明:(1)撒施中(3 g/m²)、小剂量(1 g/m²)Jag C162 的初始产流时间相对裸坡显著滞后($p < 0.05$),大剂量(5 g/m²)的初始产流时间则显著提前($p < 0.05$)。(2)不同剂量 Jag C162 的坡面径流率随径流过程的变化大致趋势为由快速增长逐渐趋于缓慢递增状态。不同剂量 Jag C162 径流率的大小顺序为:裸土 > 1 g/m² > 5 g/m² > 3 g/m²。(3)Jag C162 会显著改善 > 0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量,显著提高各粒级土壤水稳性团聚体的含量($p < 0.05$),尤以 1~2, 2~5, > 5 mm 粒径的团聚体含量的提高幅度大。因此,Jag C162 可显著改善土壤团聚体结构,提高土壤入渗性能,减少地表径流量,从而减弱侵蚀发生的径流动力,达到调控土壤侵蚀的目的。

关键词:多糖 Jag C162; 初始产流时间; 径流过程; 水稳性团聚体

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0100-08

Effects of Polysaccharide (Jag C162) on Runoff Process for a Loessial Slope

YANG Liting¹, LIU Jun'e¹, WANG Zhanli^{2,3}, QI Xiaoqian¹, CHENG Xike¹

(1.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2.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; 3.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The natural polymer derivative Jag C162 is a new type of polymer. Studying the impact of the polymer on the runoff process of loess slopes can provide a new theoretical basis for the chemical regulation of soil erosion on loess slopes. The purpose of this study is to explore the regulatory effect of Jag C162 on soil properties and runoff processes. The effect of Jag C162 on the runoff processes was studied under three rainfall intensities (1, 1.5, 2 mm/min), three slope gradients (10° , 15° , 20°), and four rates (0, 1, 3, 5 g/m²) based on indoor artificial simulated rainfall experiments. The results show that: (1) the runoff onsets of 1 g/m² and 3 g/m² Jag C162 were significantly lagging behind that of bare slope ($p < 0.05$), while the runoff onset was significantly earlier for 5 g/m² Jag C162 ($p < 0.05$); (2) runoff rates increased rapidly and then tended to a slow increase under different rates of Jag C162; the runoff rates of different rates of Jag C162 decreased in the order: 0 g/m² > 1 g/m² > 5 g/m² > 3 g/m²; (3) for all three rates, Jag C162 could improve the contents of > 0.25 mm soil water-stable aggregates significantly, also for different sizes of aggregates; in particular, the contents of aggregates of 1~2 mm, 2~5 mm, and > 5 mm increased greatly with increased rates. Therefore, Jag C162 could significantly improve soil aggregate structure, improve soil infiltration performance, reduce surface runoff, and weaken the runoff dynamics of erosion, so as to achieve the purpose of soil erosion control.

Keywords: polysaccharide Jag C162; runoff onset; runoff process; water-stable aggregate

收稿日期:2021-05-20

修回日期:2021-06-10

资助项目:国家自然科学基金面上项目(42077058, 41601282);中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK202001003, GK202103150);陕西省高校科协青年人才托举计划资助(20210705)

第一作者:杨莉婷(1995—),女,山西霍州人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail:yangliting29@163.com

通信作者:刘俊娥(1987—),女,山西河曲人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:liujune5@snnu.edu.cn

土壤侵蚀被视为导致土壤退化的主要原因^[1],已成为全球最严重的生态环境问题之一^[2]。黄土高原位于我国北方干旱和半干旱地区,土层厚且质地疏松,脆弱的生态环境使土壤侵蚀更为加剧^[3]。根据中科院、水利部和中国工程院的联合考察成果,黄土高原覆盖面积近 64 万 km²,土壤侵蚀面积达 39 万 km²,占总面积的 61%,剧烈水蚀面积为 3.67 万 km²,即土壤侵蚀模数大于或等于 15 000 t/(km²·a)^[4],总的土壤侵蚀量为黄河贡献了约 90% 的泥沙源^[5]。每年由于土壤侵蚀损失约 1 000 万 hm² 的耕地,这不仅会降低土壤质量,导致自然、农业和森林生态系统的生产力下降^[6],而且会影响生物多样性,威胁到能源、食品和水供应的安全^[7]。

土壤侵蚀的防控是黄土高原干旱区农业生产发展的关键。目前,一系列工程、生物、耕作等传统的水土保持措施存在成本高、周期长或见效慢等缺点,而化学调控技术具有成本低、见效快等优点受到决策者的青睐,尤其在无植被或植被稀疏的水蚀地区防控效果更为显著^[8]。土壤改良剂的类型、性质、状态、剂量、施用方式以及土壤质地等均会影响土壤改良剂对坡面径流量的调控作用。目前,聚丙烯酰胺(PAM)是土壤侵蚀防治中常用的一种水溶性线型阴离子型改良剂。Kebede 等^[9]测试了连续暴雨条件下不同 PAM 用量对细质氧化土减少径流和水土流失的效果,认为 4 g/m² 的施用量为该条件下的最佳适用量。而 Abrol 等^[10]认为颗粒状 PAM 的最佳用量取决于应用的目的和特殊的土壤特性。一些研究表明,石膏或生物炭与聚合物共施可以增强团聚体的粒级分布,从而提高土壤入渗率,减少径流侵蚀^[11]。但 PAM 对径流的影响受限于土壤黏粒含量的大小,对一些较粗质地的土壤可能存在负面影响,对一些低肥力或盐渍化土壤的影响也比较差^[12]。Yang 等^[13]发现粉煤灰和 PAM 对沙土的入渗—径流过程有显著影响,随两者用量的增加,累积产流量呈增加趋势,平均入渗速率呈下降趋势。进一步研究表明聚丙烯酰胺含有丙烯酰胺的残留单体,这种致癌化合物具有淋洗和污染地下水的风险^[14]。因此,研究其他可替代性的聚合物是促进农业发展的迫切需求。

许多学者在新型聚合物的研发与应用中不断探索。Yakupoglu 等^[15]研究结果表明 PAM 和聚乙烯醇未能延缓径流起流,但两者都减少了总径流、产沙量。Wu 等^[16]对黄土施用了不同浓度的 3 种改良剂:聚丙烯酸、聚乙烯醇和脲醛缩合物,通过人工降雨模拟试验表明聚合物可以增加水稳性团聚体的含量,增加土壤孔隙度和土壤渗透性,延缓产流,降低径流速

度和土壤侵蚀量。阴离子表面活性剂 Agri-SC 可显著降低土壤容重值,增加土壤孔隙度和团聚体稳定性,进而降低径流、土壤流失量^[17]。此外,天然高聚物多糖类物质也被广泛应用于土壤改良。天然多糖是亲水的、可生物降解的聚合物,具有广阔的应用前景。研究发现高吸水性聚合物(SAP)可用于改良盐碱化弱碱土壤,提高其节水、保肥、增产效果^[18]。多糖类物质用于改良干旱和半干旱土壤时,土壤的入渗量和侵蚀量之间存在指数函数关系^[19]。多糖 Jag C162 是一种双衍生瓜尔胶,独特的透明调理聚合物可用于制作香波、洗发水、浴液和其他化妆品,也可作为乳化稳定剂和增稠剂适量添加于各类食品中。Liu 等^[12]发现多糖类 NPD 可以显著提高土壤表面的抗剪强度和大团聚体,进而减少坡面的径流量和产沙量。焦念等^[20]模拟降雨试验表明 Jag C162 可提高土壤入渗率,减少地表径流。李元元等^[21]研究表明中性多糖 Jag S 可以改善土壤结构,提高坡面入渗性能,达到降低土壤侵蚀的目的。

本研究将在模拟降雨试验条件下,探索罗地亚公司新开发的高分子多聚糖 Jag C162 对黄土坡面径流过程的影响效应,研究不同撒施剂量的 Jag C162 对坡面初始产流时间、径流过程的影响,通过分析其对土壤性质的改变,阐明撒施 Jag C162 对径流过程的调控过程,结果将促进坡面侵蚀理论的深入发展,为黄土高原环境友好型发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及试验装置

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开展。试验采用侧喷式人工降雨装置,喷头安装高度 14.5 m,雨滴上喷高度 1.5 m,实际降雨高度可达 16 m,能确保所有雨滴达到终点速度,且降雨均匀度大于 80%。

试验土壤来自黄土高原典型丘陵沟壑区的陕西省延安市安塞区,土壤类型为黄绵土,其黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 8.7%,54.7%,36.6%。

试验设备为 120 cm(长)×40cm(宽)×25 cm(深)的可变坡钢质小区,其底部的开孔间距设置为 10 cm。试验前土壤经自然风干后,过 5 mm 筛网去除植物根系及石子等杂质。在小区装土之前,先在水槽底部铺一层天然细沙(5 cm 厚),并将透水纱布覆盖其上,使土层的透水状况与天然坡面相似。

设计填土容重为 1.2 g/m³,土壤含水量为 14%。试验小区装填土壤时,采取分层装土的方式以保证装

土的均匀性,每层 5 cm 厚,分 4 层装填,注意填充的同时要进行压实处理,确保土壤容重符合设计要求。装填完毕,用刮板将土壤表面刮平整。

1.2 试验设计及观测

Jag C162 是羟丙基瓜尔胶的阳离子衍生物,其分子式: $C_{17}H_{17}ClO_6$,属于天然高分子多肽衍生物。它是从瓜尔豆种子中提取的天然多糖,是一种可再生资源。它是一种白色、无杂质粉末,遇水形成胶体。试验表明它没有生态毒性并能促进土壤中有益菌落的形成,是一种纯天然无污染的绿色化学品。

Jag C162 施放方式采取拌土干施法。将所需剂量的 Jag C162 和过筛风干土混合,并搅拌均匀,混合物的用量以符合设计容重在试验小区平铺 2 mm 厚为准。然后,将混合物定量等分为 10 份,沿着坡面均匀地撒施在分段试验小区的对应区域,并刮平、压实。静置一段时间后,用喷水壶沿着坡面从上到下均匀地喷撒 2 L 水,为使 Jag C162 与土壤充分作用,将其放置 15 h 后,即可开始模拟降雨试验。

试验设计的坡度、降雨强度组合为:同一坡度 15°下,降雨强度分别为 1.0,1.5,2.0 mm/min;同一降雨强度 1.5 mm/min 下,坡度分别为 10°,15°,20°。土壤表面处理包括作为对照的裸土和 3 种撒施剂量的 Jag C162(1,3,5 g/m²)。每场试验重复 1 次,共计 40 场试验。每场试验的模拟降雨持续时长为 40 min。

在试验过程中观测各个时段的产流量及产沙量并做好记录。在每场模拟降雨试验中,用秒表测得初始产流时间。在开始产流后,用塑料桶接取各时段的过程水沙样。产流后的前 3 min 内接样的时长分别为 1,2 min,之后每 3 min 接取 1 次,直到试验结束。用量筒读取浑水体积获得总径流量,静置后去除上层清水,将剩余的泥沙置于铁盒中,在 105℃ 下烘干并称重。

径流率是指单位时间单位面积小区上产生的径

流量,计算公式为:

$$R=10\frac{M_1-M_2}{\rho ts}$$

式中: R 为径流率(mm/min); M_1 为取样时段内的径流和泥沙总质量(g); M_2 为泥沙干重(g); ρ 为水的密度 1(g/cm³); t 为径流取样时间(min); s 为径流小区的投影面积(cm²)。

每场降雨试验结束后,等待 3~4 h 即可在经模拟降雨冲刷的坡面用铲子均匀取 3 个表层土样,采取湿筛法测定降雨后土壤水稳性团聚体含量。

1.3 数据处理

借助 Excel 2016 进行数理统计与分析及可视化操作,运用 SPSS 26 实现单因素方差分析、最小显著性差异检验(LSD)。

2 结果与分析

2.1 撒施 Jag C162 对黄土坡面初始产流时间的影响

2.1.1 不同降雨强度下的初始产流时间 由表 1 可知,裸坡与撒施不同剂量 Jag C162 坡面的初始产流时间均随降雨强度的增大而呈逐渐缩短的趋势。撒施 Jag C162 后可以明显延迟坡面的初始产流时间,随着降雨强度的增大,滞后效应减弱。在降雨强度为 1.0,1.5,2.0 mm/min 时,撒施不同剂量的 Jag C162 对初始产流时间的平均滞后百分比分别为 215%,24.58%,19.26%。Jag C162 的撒施剂量与坡面初始产流时间的滞后效应呈非线性相关。撒施剂量为 1,3,5 g/m² 时,Jag C162 的初始产流时间在不同降雨强度下相比对照的平均滞后百分比分别为 62.05%,187.79%,9.01%。撒施 3 g/m² 剂量的 Jag C162 对坡面产流的延缓效果最为显著,在降雨强度为 1.0 mm/min,剂量为 3 g/m² 组合条件下,初始产流时间最大延迟到 25.29 min。5 g/m² 剂量下,除 1.0 mm/min 雨强下,坡面初始产流时间相比对照皆显著提前。

表 1 不同降雨强度下撒施 Jag C162 的初始产流时间及其与对照相比的滞后百分比

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	初始产流时间/min				滞后百分比/%		
	裸坡	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	5.81Ca	14.92Ba	25.29Aa	14.70Ba	156.80	335.28	152.93
1.5	4.46Bb	5.45ABb	9.30Ab	1.90Bb	22.33	108.75	-57.35
2.0	2.64Bc	2.83Bc	5.79Ab	0.83Cb	7.01	119.32	-68.56

注:不同大写字母表示相同降雨强度下,撒施 Jag C162 不同剂量之间初始产流时间差异显著($p<0.05$)。不同小写字母表示撒施相同剂量的 Jag C162 下,不同降雨强度间初始产流时间差异显著($p<0.05$)。

2.1.2 不同坡度下的初始产流时间 由表 2 可知,裸坡与撒施不同剂量 Jag C162 的坡面的初始产流时间均随坡度的增大而呈逐渐缩短的趋势。坡度为 10°,15°和 20°时,撒施 Jag C162 坡面的初始产流

时间相比对照平均滞后的百分比分别为 25.66%,24.58%,21.96%,不同坡度之间的初始产流时间差异较小。撒施 1,3 g/m² 剂量的 Jag C162 的初始产流时间相比对照平均滞后百分比分别为 18.64%,112.07%。

3 g/m² 剂量下产流的滞后效果最为显著,在坡度为 10°,剂量为 3 g/m² 条件下,坡面初始产流时间达到最大值 9.49 min。撒施 5 g/m² 剂量 Jag C162 的初始

产流时间相比对照平均提前百分比为 58.51%,在坡度为 20°,剂量为 5 g/m² 条件下,坡面初始产流提前时间达到最大值 1.59 min(提前 62.46%)。

表 2 不同坡度下撒施 Jag C162 的初始产流时间及其与对照相比的滞后百分比

坡度/(°)	初始产流时间/min				滞后百分比/%		
	裸坡	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²
10	4.54Ba	5.62Ba	9.49Aa	2.01Ca	23.68	109.03	-55.73
15	4.46Ba	5.45ABa	9.30Aa	1.90Ba	22.33	108.75	-57.35
20	4.24Aa	4.66Ba	9.25Ba	1.59Ca	9.92	118.42	-62.46

注:不同大写字母表示相同坡度下,撒施 Jag C162 不同剂量之间初始产流时间差异显著($p<0.05$),不同小写字母表示撒施相同剂量的 Jag C162 下,不同坡度间初始产流时间差异显著($p<0.05$)。

2.2 撒施 Jag C162 对黄土坡面径流过程的影响

2.2.1 不同降雨强度下的坡面径流过程 如图 1 所示,在同一坡度、3 个不同降雨强度条件下,撒施不同剂量 Jag C162 的坡面径流率随径流过程的变化整体上可分为两个阶段。第一阶段径流率呈持续快速增长趋势,第二阶段径流率趋于缓慢递增状态,且径流率与降雨强度总体呈正相关。因撒施剂量和降雨强度的不同,径流率的变化有所差异。在 1.0 mm/min 雨强下,两阶段的转折点大致位于 35 min,并且撒施各剂量的坡面径流率都显著低于裸坡。在 1.5,2.0 mm/min 雨强下,

两阶段的转折点分别在 30,25 min 左右。除撒施 5 g/m² 剂量的坡面径流率在产流初始阶段(0~5 min)高于 1,3 g/m² 剂量及裸坡的径流率,其余撒施 Jag C162 的坡面均可有效地减少径流率。

总体而言,随着降雨强度的递增,径流率由快速增长转变为缓慢递增的状态在提前,且径流率的变化幅度在增大。撒施不同剂量 Jag C162 的径流率的大小顺序为:裸土>1 g/m²>5 g/m²>3 g/m²。相对于 1 g/m² 剂量而言,撒施剂量为 5,3 g/m² 的径流率随降雨历时全过程的变化中差异较小。

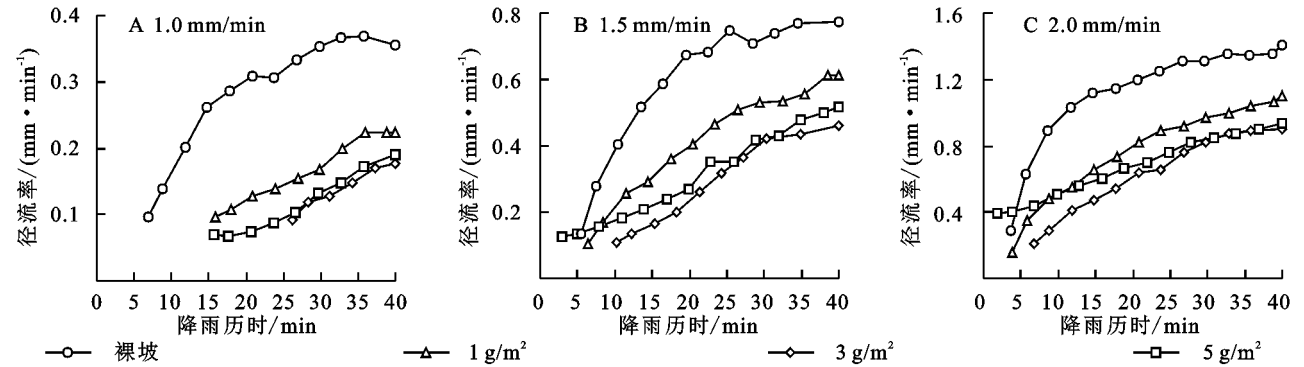


图 1 不同降雨强度和不同撒施剂量的 Jag C162 对径流率随降雨过程变化的影响

2.2.2 不同坡度下的坡面径流过程 如图 2 所示,在同一降雨强度、3 个不同坡度试验条件下,撒施不同剂量 Jag C162 的坡面径流率随径流过程的变化与不同降雨强度条件下的特征相似。第一阶段径流率呈持续快速增长趋势,第二阶段径流率趋于缓慢递增状态。因撒施剂量和坡度的不同,径流率的变化有所差异。在坡度 10°下,两阶段的转折点大致在 35 min,并且撒施各剂量的坡面径流率均低于裸坡。在坡度 15°和 20°下,转折点均分布在 30 min 左右,此时撒施 5 g/m² 剂量的坡面径流率在产流初始阶段(0~5 min)高于 1,3 g/m² 剂量及裸坡的径流率,其余撒施 Jag C162 均可有效地减少径流率。

总体而言,随着坡度的递增,径流率的增长速率递增。撒施不同剂量 Jag C162 的径流率的大小

顺序为:裸土>1 g/m²>5 g/m²>3 g/m²。相对于 1 g/m² 而言,撒施剂量为 5,3 g/m² 的径流率在降雨历时全过程的变化中差异较小。

2.3 撒施 Jag C162 对黄土坡面径流量的影响

由表 3 可知,撒施 Jag C162 对地表径流具有明显的减水效应。同一坡度不同降雨强度下,撒施不同剂量 Jag C162 处理后,坡面径流深随雨强的增大而显著增大,减水效应依次为 61.47%,47.10%,38.92%。同一降雨强度不同坡度下,撒施不同剂量 Jag C162 对应径流深的变化随坡度的增大而递增,但差异不显著,减水效应随坡度的增大分别为 53.17%,47.10%,40.60%。Jag C162 不同撒施剂量的坡面处理措施下,径流深的平均值从大到小排序为:裸土>1 g/m²>5 g/m²>3 g/m²。同一坡度不同降雨强度下,撒施 1,3,5

g/m²剂量的 Jag C162 对黄土坡面的平均减水效应分别为 40.40%,51.33%,55.76%,撒施 5 g/m²的 Jag C162 对坡面的平均减水效应最大。同一降雨强

度不同坡度下,撒施不同剂量 Jag C162 对坡面的平均减水效应分别为 31.98%,58.98%,49.92%,3 g/m²剂量的 Jag C162 的减水效应最大。

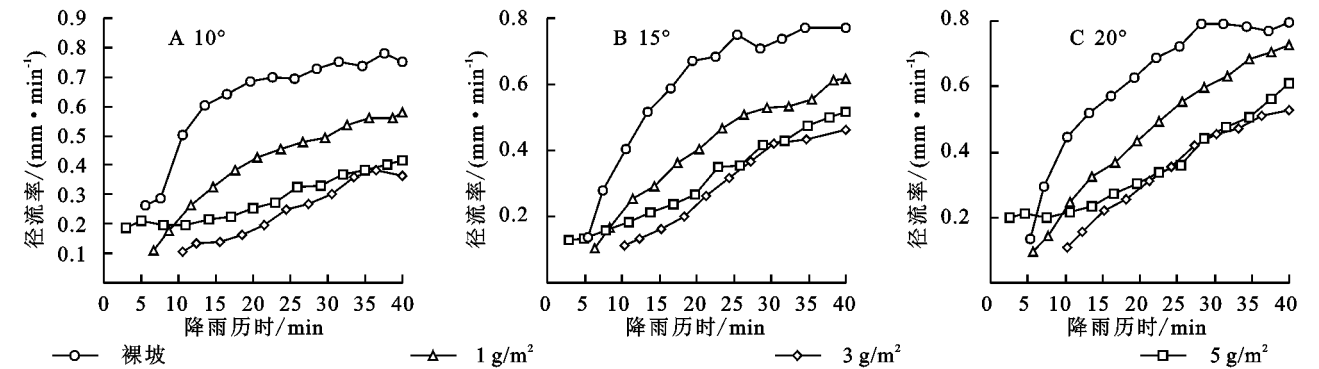


图 2 不同坡度和不同撒施剂量的 Jag C162 对径流率随降雨过程变化的影响

表 3 不同降雨强度和不同坡度下撒施 Jag C162 的减水效应

试验条件			径流深/mm				减水效应/%		
			裸坡	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²
坡度 15°	降雨强度 /(mm·min ⁻¹)	1.0	9.69Ab	4.26ABc	5.13ABb	1.81Bc	56.04	47.06	81.32
		1.5	22.47Ab	14.98Bb	9.09Cb	11.59BCb	33.33	59.55	48.42
		2.0	43.34Aa	29.55Ba	22.80Ba	27.07Ba	31.82	47.39	37.54
降雨强度 1.5 mm/min	坡度/(°)	10	23.34Aa	14.75ABa	7.79Ba	10.25ABa	36.80	66.63	56.09
		15	22.47Aa	14.98Ba	9.09Ca	11.59BCa	33.33	59.55	48.42
		20	23.09Aa	17.13ABa	11.37Ba	12.64Ba	25.79	50.77	45.24

注:不同大写字母表示相同坡度或相同降雨强度条件下,撒施 Jag C162 不同剂量之间径流深差异显著($p<0.05$),不同小写字母表示撒施相同剂量的 Jag C162 条件下,不同降雨强度或不同坡度间径流深差异显著($p<0.05$)。

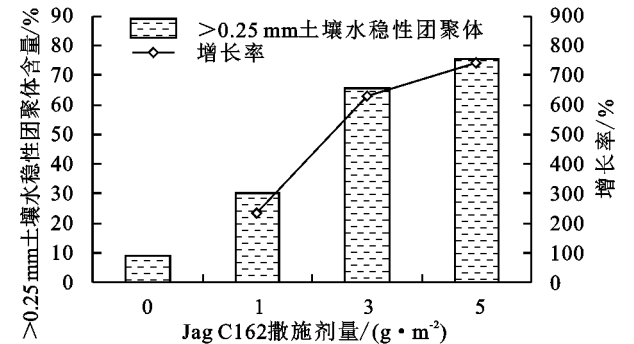
2.4 撒施 Jag C162 对黄土坡面土壤团聚体的影响

土壤团聚体作为土壤结构的最小单元,它的粒径分布、数量和其水稳定性直接决定了土壤孔隙的大小和稳定性^[22]。水稳性团聚体的数量、质量(大小)是决定土壤入渗性能、削弱径流动能及抵抗径流冲刷力的物质基础。特别是>0.25 mm 土壤水稳性团聚体的含量是评价土壤可蚀性的重要指标。

撒施不同剂量的 Jag C162 对各粒径土壤水稳性团聚体百分含量的影响,集中体现在>0.25 mm 土壤水稳性团聚体的持续增长(图 3)。在土壤表面处理为裸土时,>0.25 mm 土壤水稳性团聚体百分含量仅为 8.98%,而土壤表面经过 Jag C162 不同剂量(1,3,5 g/m²)的处理后,对应的团聚体的含量分别增了 21.06%,56.76%,66.54%。随着撒施剂量的增加,其增长率呈现出不断增加的趋势,与裸土相比增长率分别为 234.52%,632.07%,740.98%。其中以撒施 3 g/m²剂量 Jag C162 的处理下,增幅最为突出。

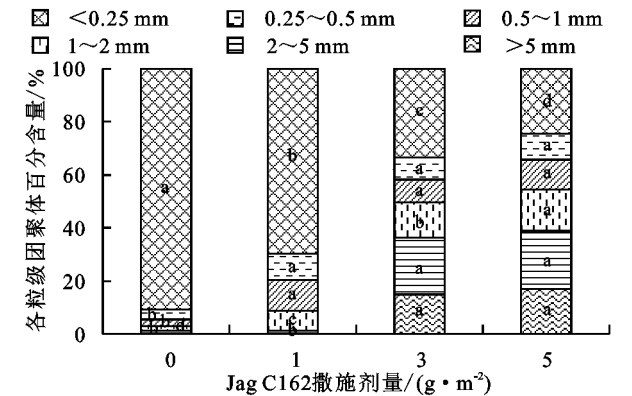
撒施 Jag C162 可以有效提高>2.5 mm 各粒径团聚体含量(图 4,表 4)。不同剂量的 Jag C162 与裸土相比,不同粒径团聚体含量的提高范围在 0~21.14%,提高效果有显著差异。相对而言,对 0.25~0.5 及 0.5~1 mm 粒径的微团聚体含量的提高效果较小,其增长

百分比介于 4.67%~8.93%,在这 2 个粒径范围内,撒施小剂量(1 g/m²)比较大剂量(3,5 g/m²)坡面处理的改善效果更显著。对 1~2,2~5 及>5 mm 粒径的团聚体含量的提高幅度较大,其增长百分比的均值为 11.58%。撒施 3,5 g/m²剂量坡面处理的改善效果远远超过小剂量(1 g/m²)处理,且两个较大剂量下的改善效果较为接近,其中,尤其对 2~5 mm 粒径的提高效果最好,提高百分比的均值为 13.92%,最大值可达 21.14%。由此可见,Jag C162 可以促进土壤团聚体从微团聚体转化为大团聚体,有效地改善水稳性团聚体的团粒分布特征。



注:Jag C162 的撒施剂量为 0 g/m²即为裸坡处理,下同。

图 3 撒施 Jag C162 对>0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量的影响



注:不同小写字母代表各种降雨强度与坡度组合条件下,不同剂量之间对各粒径土壤水稳性团聚体含量的影响效应差异显著($p<0.05$)。

图 4 Jag C162 对各粒径土壤水稳性团聚体含量的影响

表 4 Jag C162 对各粒径土壤水稳性团聚体含量的提高百分比

粒径/mm	Jag C162 撒施剂量		
	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²
>5	0	14.98	16.77
2~5	0.15	20.48	21.14
1~2	5.81	11.27	13.66
0.5~1	8.93	6.35	8.81
0.25~0.5	6.23	4.67	6.40
<0.25	-21.12	-57.75	-66.78

3 讨论

3.1 撒施 Jag C162 对土壤团聚体的影响

在其他外部试验条件一致时,高分子聚合物应用的有效性在很大程度上取决于土壤性质^[23]。在土壤中施加高分子聚合物会影响土壤颗粒的分散和絮凝,有助于稳定现有团聚体,改善相邻土壤颗粒之间的结合和聚集以增加团聚体含量,提高团聚体的水稳性^[24-25]。本试验表明 Jag C162 与土壤颗粒发生充分粘结和吸附,使小的土壤颗粒胶结在一起把微团聚体转化为大团聚体,团聚体的稳定性得到改善,土壤结构得以提升。 >0.25 mm 水稳性团聚体的占比上升会降低土壤容重,提高土壤的总孔隙度及毛管孔隙度,增加土壤入渗率^[20],使有限的天然降水最大限度地储存在土壤中,提高雨水资源的有效利用率^[12]。Jag C162 对坡面径流具有显著减水效应,可有效降低坡面侵蚀。

另一方面,增加团聚体的稳定性可以防止土壤结皮的形成^[26]。经高分子聚合物处理后,可以通过改变土壤团聚体的粒级分布和改善团聚体的稳定性来有效地抑制土壤结皮的形成^[27]。撒施 Jag C162 后,会在很多过程中抑制土壤封闭与结皮的形成,如雨滴

对土壤的冲击与压实过程及水流引起的分散,搬运与沉积过程等,从而提高入渗率。Zhang 等^[28]电镜扫描结果显示,土壤改良剂会分散松散的土壤颗粒,促进其重新形成片状、针状的土体结构,而且其内聚力可以有效地防止团聚体分散。由表 4 可知,随着撒施剂量的增加, >0.25 mm 土壤水稳性团聚体的提高程度依次增大,但不同剂量下,各粒级的提高比例有所差异。撒施 1 g/m^2 的 Jag C162 时,主要是 $1\sim2, 0.5\sim1$ mm 的水稳性团聚体比例提高,撒施 $3, 5\text{ g/m}^2$ 的 Jag C162 时,主要是 $>5, 2\sim5, 1\sim2$ mm 的水稳性团聚体占比上升,并且剂量越大,提高幅度越大。其可能的原因是撒施剂量增多,Jag C162 与土壤颗粒的接触面积增大,Jag C162 与土壤颗粒的吸附与粘结效果更强,促使形成更高粒级的团聚体。

3.2 撒施 Jag C162 对坡面初始产流时间的影响

李元元等^[21]的研究表明施用不同剂量 Jag S 的坡面产流均早于裸坡,且剂量越大,坡面初始产流时间越早。而陈渠昌等^[29]通过试验得出 PAM 的施用对坡面初始产流时间无显著影响。相反,唐泽军等^[30]的研究表明 PAM 覆盖能显著延迟径流的初始产流时间。随着 PAM 覆盖率的递增,对坡面产流的滞后时长越大。本研究结果表明,在不同降雨强度与坡度条件下,撒施小、中剂量的 Jag C162 可以显著地使坡面的初始产流时间滞后,但是撒施大剂量的 Jag C162 反而会使坡面的初始产流时间提前。

与前人的研究成果存在差异的原因可能是:(1) 陈渠昌等^[29]所使用的 PAM 是由丙烯酰胺聚合而成的高分子阴离子型化合物,分子量较大,白色粉末非结晶固体,而 Jag C162 是羟丙基瓜尔胶的阳离子衍生物,从瓜尔豆种子中提取的天然多糖,分子量仅为 30 万~100 万,白色粉末。李元元等^[21]的 Jag S 是从大豆胚胎中提取的一种中性多糖,不带电,白色粉末状,并且 Jag S 的黏度比 Jag C162 低,不同的聚合物其性质的不同对土壤颗粒的物理化学过程有所差异,因此,对坡面的初始产流时间的作用效果不同。(2) 试验选材的施用方式不同。李元元等^[21]的 Jag S 施用方式是喷施法,将所需剂量的 Jag S 溶于定量水中,并充分搅拌,待其形成稳定胶体后均匀喷洒于土壤表面。胶体状的 Jag S 不利于大面积分散,与土壤作用不充分,甚至堵塞土壤孔隙致使初始产流时间提前。本研究中 Jag C162 施放方式采取拌土干施法。将设计剂量的 Jag C162 与风干土充分混合,分段平铺于土壤表面。有可能是粉末状的 Jag C162 与土壤

颗粒的结合作用地更加充分,其对土壤团聚体的促进效果较好,从而能更好地改善土壤的入渗性能,因此对应的初始产流时间滞后。本试验中撒施 5 g/m^2 剂量的 Jag C162 导致初始产流时间提前的原因可能是 Jag C162 粉末会率先进入土壤颗粒的间隙中,在短时间内形成一层胶体薄膜,阻挡了部分水流的入渗,因此初始产流时间会提前。随着时间的推移,径流冲刷破坏了薄膜层,使 Jag C162 与土壤的吸附粘结作用更加充分,土壤结构更趋向于大团聚体,进一步表现为减水效应更好。

3.3 撒施 Jag C162 对坡面径流过程的影响

撒施不同剂量 Jag C162 的坡面径流率随径流过程的变化大致趋势为由快速增长逐渐趋于缓慢递增状态。撒施 Jag C162 后,在降雨初期,表土的初始含水量低,土壤的入渗率相对较高,此时降水用于地表土层的蓄存与填注,地表无径流产生。随着降雨历时的延长,土壤孔隙渐渐被填充,表土含水量持续增大,土层的蓄水能力在下降。当降雨强度大于土壤的入渗率时,地表开始产生径流。产流开始后,土壤入渗率逐渐减小,此时雨滴对土壤的冲击和水流本身所具有的动能及势能的转化对地表的冲刷致使水流的挟沙能力增强,地表径流量增大。当土壤含水量几近饱和,土壤孔隙度被土壤颗粒和水流填充,此时进入土壤稳渗阶段,地表的径流量也相应平稳。

总体而言,试验剂量下的 Jag C162 可以明显地改变地表径流过程,但不同剂量对径流过程的影响有所差异。撒施 3 g/m^2 的 Jag C162 对径流率的减小效果最好,是本试验条件下的最佳施用剂量。随着撒施剂量增多, Jag C162 颗粒与土壤颗粒发生作用的几率增大,撒施 3 g/m^2 剂量会促进土壤与 Jag C162 更好地进行吸附和粘结,进而改善土壤颗粒的粒级分布,提高土壤孔隙度,增强入渗量,减少径流量,因此 3 g/m^2 比 1 g/m^2 的径流明显较少。而撒施 5 g/m^2 的 Jag C162 对径流率的减小效果没有撒施 3 g/m^2 的 Jag C162 对径流率的减小效果好,其可能的原因是过量的 Jag C162 在降雨过程中随径流进入土壤孔隙,堵塞孔隙,过量的 Jag C162 还会与土壤吸附在地表形成局部封闭,阻挡径流的下渗路径,使土壤入渗量降低,径流量增大。但撒施 5 g/m^2 的 Jag C162 相比对照而言,仍然对径流量具有显著的调控效应。

4 结论

通过人工模拟降雨试验,对比分析了撒施 Jag C162

坡面与裸坡径流过程特征,揭示了 Jag C162 对坡面径流过程的影响。撒施 $3,1\text{ g/m}^2$ 剂量 Jag C162 的坡面初始产流时间相比裸坡显著滞后 ($p < 0.05$),撒施大剂量 (5 g/m^2) 的坡面初始产流时间显著提前 ($p < 0.05$)。与裸坡处理相比,撒施 Jag C162 明显改变了降雨径流随降雨历时的变化规律。撒施不同剂量 Jag C162 的坡面径流率随径流过程的变化大致趋势为由快速增长逐渐趋于缓慢递增状态 (5 g/m^2 除外)。撒施 3 g/m^2 的 Jag C162 对径流率随降雨历时的调控效应最佳。Jag C162 可以显著提高 $>0.25\text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体的含量,尤以 $1\sim 2, 2\sim 5, >5\text{ mm}$ 粒径的团聚体含量的提高幅度大。以此改善土壤结构,增强土壤孔隙度,提高入渗率,减少地表径流量,从而达到调控土壤侵蚀的目的,为黄土高原干旱地区的绿色可持续发展提供新方向。

侵蚀强弱取决于降雨动力条件和土壤抗蚀性的综合作用结果,本研究中撒施 Jag C162 可显著提高土壤团聚体含量,提高抗蚀性,且对团聚体的改善效果随剂量增大而增大,但同时,从 1 g/m^2 剂量增加到 3 g/m^2 时, Jag C162 对初始产流时间的滞后效果显著增大,且产流量显著减少,但当剂量继续增加至 5 g/m^2 时,初始产流时间在 $1.5, 2.0\text{ mm/min}$ 时反而显著提前,甚至比裸土也显著提前,并且径流量的减少效果变小。因此,随着 Jag C162 施放剂量的不断增大,土壤抗蚀性呈不断增加的趋势,但其对径流的调控效应并不是不断增强的,而对径流调控的减弱一定程度上相对增强了侵蚀发生的动力条件,所以在大量条件下,当径流增加引起的侵蚀风险超过抗蚀性增强抵抗侵蚀的平衡点时,有可能呈现出侵蚀增加的现象。因此,撒施 Jag C162 的最佳剂量还需做进一步的探讨。

参考文献:

- [1] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. Science, 2015, 348(6235): 1261071.
- [2] Shao Y Q, Jiang Q O, Wang C L, et al. Analysis of critical land degradation and development processes and their driving mechanism in the Heihe river basin[J]. Science of the Total Environment, 2020, 716: 137082.
- [3] De La Maza M, Lima M, Meserve P L, et al. Primary production dynamics and climate variability: ecological consequences in semiarid Chile[J]. Global Change Biology, 2009, 15(5): 1116-1126.
- [4] 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:西北黄土高原区卷[M].北京:科学出版社, 2010.
- [5] Wen X, Deng X. Current soil erosion assessment in the loess plateau of China: A mini-review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276:123091.
- [6] Pimentel D. Soil erosion: a food and environmental threat[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2006, 8(1):119-137.
- [7] Wang N, Jiao J, Bai L, et al. Magnitude of soil erosion in small catchments with different land use patterns under an extreme rainstorm event over the northern loess plateau, China[J]. *Catena*, 2020, 195:104780.
- [8] 夏卫生,雷廷武,刘纪根. PAM 防治水土流失的研究现状及评述[J]. *土壤通报*, 2002, 33(1):78-80.
- [9] Kebede B, Tsunekawa A, Haregeweyn N, et al. Effectiveness of polyacrylamide in reducing runoff and soil loss under consecutive rainfall storms[J]. *Sustainability*, 2020, 12(4). DOI:10.3390/su12041597.
- [10] Abrol V, Shainberg I, Lado M, et al. Efficacy of dry granular anionic polyacrylamide(PAM) on infiltration, runoff and erosion [J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(5):699-705.
- [11] 于健,雷廷武, I. Shainberg, 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.
- [12] 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 & Tillage Research*, 2014, 139:23-27.
- [13] Yang K, Tang Z J, Feng J Z. Effect of co-use of fly ash and granular polyacrylamide on infiltration, runoff, and sediment yield from sandy soil under simulated rainfall[J]. *Agronomy*, 2020, 10(3). DOI:10.3390/agronomy10030344.
- [14] Guezennec A G, Michel C, Bru K, et al. Transfer and degradation of polyacrylamide-based flocculants in hydrosystems: a review[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(9):6390-6406.
- [15] Yakupoglu T, Rodrigo-Comino J, Cerdà A. Potential benefits of polymers in soil erosion control for agronomical plans: A laboratory experiment[J]. *Agronomy*, 2019, 9(6). DOI:10.3390/agronomy9060276.
- [16] Wu S F, Wu P T, Feng H, et al. Influence of amendments on soil structure and soil loss under simulated rainfall China's loess plateau[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2010, 9(37):6116-6121.
- [17] Yonter G, Yagmur B. Effect of Agri-SC as a soil conditioner on runoff, soil loss and crust strengths[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(61):13292-13298.
- [18] Yang F, Cen R, Feng W, et al. Effects of super-absorbent polymer on soil remediation and crop growth in arid and semi-arid areas[J]. *Sustainability*, 2020, 12(18). DOI:10.3390/su12187825.
- [19] Wallace A, Wallace G A. Enhancement of the effect of coal fly ash by a polyacrylamide soil conditioner on growth of wheat[J]. *Soil Science*, 1986, 141(5):387-389.
- [20] 焦念,王占礼,刘俊娥. Jag C162 对黄土坡面降雨入渗的调控效应研究[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(1):25-30.
- [21] 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.
- [22] Liu J E, Wang Z, Li Y. Efficacy of natural polymer derivatives on soil physical properties and erosion on an experimental loess hillslope[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(1). DOI:10.3390/ijerph15010009.
- [23] Lu J H, Wu L, Letey J. Effects of soil and water properties on anionic polyacrylamide sorption[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(2):578-584.
- [24] Li Y Y, Wang Z L, Wu B, et al. Impacts of natural polymer derivative neutral polysaccharide Jag S and cationic hydroxypropyl polysaccharide Jag C162 on rainfall infiltration on an experimental loess hillslope[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, 64(2):244-252.
- [25] Ben-Hur M, Keren R. Polymer effects on water infiltration and soil aggregation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(2):565-570.
- [26] Shainberg I, Levy G J. Organic polymers and soil sealing in cultivated soils[J]. *Soil Science*, 1994, 158:267-273.
- [27] Ben-Hur M, Letey J. Effect of polysaccharides, clay dispersion, and impact energy on water infiltration[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(1):233-238.
- [28] Zhang X, Song J, Wang Y, et al. Effects of land use on slope runoff and soil loss in the loess plateau of China: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755:142418.
- [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] 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.