

喷施中性多聚糖对黄土坡面降雨入渗的影响*

李元元¹ 王占礼^{1, 2†} 刘俊娥³ 焦念⁴ 张加琼¹

(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 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710019)

(4 黄河西峰水土保持治理监督局, 甘肃西峰 745000)

摘要 中性多聚糖(Jag S)是一种新型高聚物, 研究该高聚物对黄土坡面降雨入渗的影响可对采用土壤侵蚀化学调控技术措施防治黄土坡面土壤侵蚀提供新的理论基础。通过人工模拟降雨试验, 研究不同雨强(1.0、1.5、2.0 mm min⁻¹), 不同坡度(10°、15°、20°)条件下, 坡面降雨入渗及产流时间与喷施不同剂量(1、3、5 g m⁻²) Jag S之间的关系。结果表明: 在不同坡度不同雨强下, 与裸露坡面相比, 喷施3种剂量的高分子化学材料Jag S均减少了前期降雨入渗率, 但1及3 g m⁻²剂量Jag S处理能够明显提高黄土坡面入渗性能, 减缓入渗在整个降雨过程的下降趋势, 提高稳渗率, 强化入渗效应均值分别为21.53%及9.17%, 大剂量(5 g m⁻²) Jag S反而降低了土壤入渗性能(小雨强下除外)。喷施不同剂量Jag S的坡面其产流开始时间差异很小, 但均早于裸露坡面, 且表现为Jag S喷施剂量越大, 坡面越早产流, 大坡度大剂量对降雨产流时间影响较大。三个剂量对应产流时间提前百分比均值分别为47.26%、50.47%及66.28%。总之, Jag S在一定程度上能改善黄土坡面土壤结构, 提高黄土坡面降雨入渗性能, 从而降低土壤侵蚀, 为采用高聚物进行水土保持提供了科学依据。

关键词 多聚糖(Jag S); 黄土坡面; 降雨入渗; 水土保持

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

雨滴对地表的打击会破坏土壤结构, 使团聚体破裂, 引起地表封闭, 形成结皮^[1], 降低入渗, 增加地表径流和土壤侵蚀量。降雨入渗是影响黄土高原水土流失的主要因素之一, 是模拟土壤侵蚀过程的基本输入变量, 也是本研究实施水土保持规划需要认真考虑的重要因素^[2]。在黄土高原地区, 许多学者将增加入渗, 就地拦蓄降雨径流作为防止水土流失的基本战略措施。增加降雨入渗, 控制降雨引起的土壤流失的传统好方法是建立植被, 但由于植被生长期的缘故, 对降雨入渗和土壤侵蚀的控制上是不完整的。此外, 防止土壤封闭及其

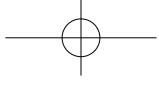
所带来的不利影响的另一传统措施是在土壤表面进行覆盖来降低雨滴对土壤的打击作用, 阻止地表封闭。常见覆盖物有秸秆、稻草和草皮等, 但由于其易燃, 体积大, 阻碍光线, 成本高等原因在某些情况下不宜使用^[3]。从而不能大面积推广。高分子聚合物作为土壤结构改良剂, 其成本低, 能改善土壤结构, 加强土壤团聚体的稳定性, 提高团聚体的数量, 防止土壤结皮的产生, 增加降雨入渗。因此, 就如何通过添加改良剂改善土壤结构、增加降雨入渗、减少地表径流、防止土壤侵蚀, 是我国生态环境建设和农业可持续发展的关键^[4-5]。

* 国家自然科学基金项目(41471230, 41601282)、陕西省自然科学基金项目(2015JQ4115)、国家重点研发计划课题(2016YFC0402401)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41471230, 41601282), Shaanxi Province Natural Science Foundation of China (No. 2015JQ4115), the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0402401)

† 通信作者 Corresponding author, E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 李元元(1988—), 女, 安徽省蚌埠市人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 836434985@qq.com

收稿日期: 2016-09-17; 收到修改稿日期: 2017-02-24; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-03-24



土壤改良剂的研究始于19世纪末,其中沸石、粉煤灰、污泥、绿肥、聚丙烯酰胺等单一改良剂研究较为广泛^[6-7]。近年来,高聚物土壤改良剂因其较好的效果及低廉的价格引起了人们的关注,许多学者研究发现其可以加强地表土壤颗粒之间的凝聚力,维护良好的土壤结构,防止地表结皮产生,减少地表径流,增加土壤入渗率,从而可以防止或减少土壤侵蚀^[8]。多糖类物质属于天然高聚物,其中甲壳素类化合物是目前广泛应用于土壤改良的多糖类高聚物。大量研究表明其能有效地改善土壤的团粒结构,在土壤表面形成保护膜,具有保墒作用^[9-10]。Sarithchandra等^[11]研究表明,甲壳素不仅能增加土壤中矿化氮含量,而且能增加土壤细菌和真菌数量。Hallmann等^[12]研究发现甲壳素可诱导土壤、根际和根内微生物产生有利的变化,对棉花、白苜蓿和黑麦草的寄生线虫有抑制作用从而提高作物产量。此外,多糖类物质用于改良干旱和半干旱土壤时,土壤的渗透率 and 水土流失量之间存在指数函数关系^[13];壳聚糖与土壤混合后制成的液体土壤改良剂能有效地改善土壤的团粒结构^[9];黄泽波和刘永定^[14]对蓝细菌体内贮藏的多糖物进

行了研究,结果表明该物质除了能保持土壤湿润外,其良好的黏性可以将土壤颗粒聚积在一起,增强土壤结构的稳定性,从而可以防止土壤侵蚀的发生;Liu等^[15]通过人工降雨模拟实验研究天然高聚物(NDP)对黄土坡面片蚀的影响,结果表明,NDP能显著改善土壤团聚体结构,提高坡面剪切力,降低坡面侵蚀量。

本文通过人工模拟降雨试验,对罗地亚公司新开发的高分子多聚糖Jag S对黄土坡面降雨入渗的影响进行研究,目的是了解新型高聚物Jag S对黄土坡面降雨入渗的调控效应,从而为采用高聚物改良黄土坡面土壤、增加黄土坡面降雨入渗和防治黄土坡面水土流失提供一个科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与试验装置

试验在中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行。试验土壤为取自黄土高原腹地的陕西省安塞县的黄绵土,试验土壤颗粒组成见表1。试验土壤前期含水量为14%,填土容重为 1.2 g cm^{-3} 。

表1 试验土壤颗粒组成

Table 1 Mechanical composition of the experimental soil

土壤类型 Soil type	黏粒 Clay < 0.002 mm	粉粒 Silt 0.002 ~ 0.050 mm	砂粒 Sand 0.050 ~ 2 mm
	(%)		
黄绵土 Loessal soil	8.7	54.72	36.58

试验设备为变坡钢质小区,长120 cm、宽40 cm、深25 cm。所有试验土壤自然风干除去杂草和石块,并过5 mm筛。裸露小区装土之前,在底部铺5 cm的天然细沙,并用透水纱布覆盖,保持土层的透水状况接近天然坡面。试验小区采用分层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,保证试验土壤容重达到设计要求。填土后,用刮板将表面刮平。试验所用化学材料中性多聚糖(Jag S)是一种从大豆胚胎中提取出来,不带电,呈白色粉末状,分子量为30万~100万的天然高分子多肽衍生物,罗地亚公司新开发,现

有实验表明其对试验水生物种没有不利影响和刺激,在土壤中能够促进部分有益菌落的形成,是绿色化学品,不溶于酒精和油,极易分散在水中形成具有一定黏性的胶体,经过充分溶解后黏度达到最大,遇水后再失水后形成半透明的固体。英文名为neutral polysaccharide,分子式为 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$,由多个单糖分子缩合、失水而成,是一类分子结构庞大的糖类物质。材料成本为人民币10 yuan kg^{-1} ,若使用剂量为 1 g m^{-2} ,则每公顷成本约为100 yuan。

1.2 试验设计与观测

Jag S的施放方式为喷施,将设计剂量重的混合物溶于2 L的水中,用塑料管充分搅拌,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, 作为对照的裸土试验, 小区装填土壤完成后也在小区土表由上至下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。

试验设计场次为: 雨强 1.5 mm min^{-1} , 试验坡度 10° 、 15° 、 20° , 土壤表面处理为裸土和喷施Jag S剂量为 1 、 3 、 5 g m^{-2} 的组合试验; 坡度 15° , 雨强 1.0 、 1.5 、 2.0 mm min^{-1} , 土壤表面处理为裸土和喷施Jag S剂量为 1 、 3 、 5 g m^{-2} 的组合试验。每场试验开始后均认真观测小区产流情况, 出现产流后记录产流时间的同时在小区的出口接样, 产流后的前3 min每隔1~2 min观测1次, 以后每隔3 min观测1次, 直到降雨结束, 降雨历时为40 min。降雨结束后, 量取接样浑水体积, 并通过烘干称重法

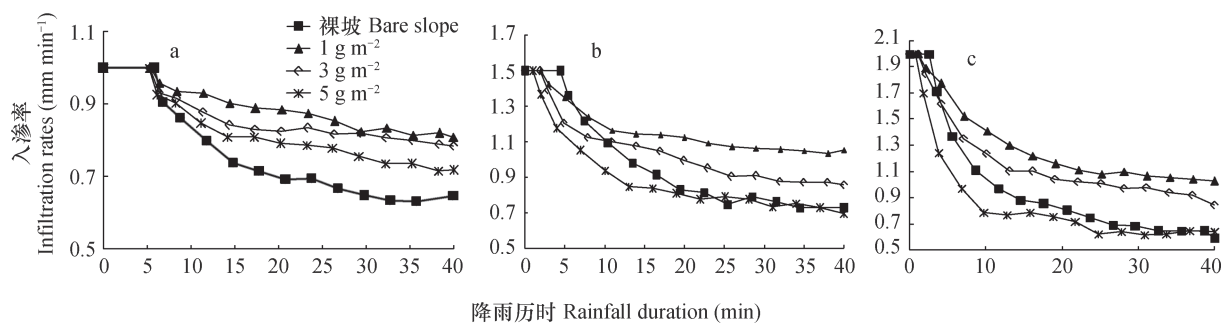
测量、计算得到接样中的泥沙体积, 进而计算清水径流量, 最后按照水量平衡原理: 降雨入渗率(mm min^{-1}) = (降雨量 mm —径流量 mm)/降雨时间(min), 计算出坡面降雨入渗率, 然后根据强化入渗效应($\%$) = (喷施化学材料入渗量—裸露坡面入渗量)/裸露坡面入渗量 $\times 100$, 计算强化入渗效应, 每组试验重复2次。

2 结果与讨论

2.1 喷施Jag S下的黄土坡面降雨入渗过程

2.1.1 不同降雨强度 将坡度为 15° 时, 不同降雨强度下裸露坡面和喷施3种不同剂量Jag S时土壤入渗率随降雨过程变化的点绘在图上, 如图1。

由图1可知, 3个不同降雨强度下, 喷施不同



注: 图中a、b、c分别代表雨强为 1.0 、 1.5 、 2.0 mm min^{-1} Note: The lowercase letters, a, b and c, in the figure represents 1.0 , 1.5 and 2.0 mm min^{-1} , respectively, in rainfall intensity

图1 不同Jag S剂量和不同雨强对降雨过程中坡面入渗速率的影响

Fig. 1 Effect of spraying of Jag S on infiltration rate during the process of each rainfall event relative to dosage of the spraying and rainfall intensity

剂量Jag S坡面和裸露坡面的入渗率随降雨历时均呈现两个阶段, 第一阶段降雨入渗率呈迅速下降的趋势, 第二阶段趋于稳定变化状态, 且入渗率与降雨强度总体呈正相关关系。但不同雨强不同剂量下的稳渗率不同, 未喷施Jag S时, 1.0 mm min^{-1} 降雨强度下稳渗率最小(约 0.62 mm min^{-1}); 其次为 1.5 mm min^{-1} 降雨强度(约 0.71 mm min^{-1}); 2.0 mm min^{-1} 降雨强度下稳渗率最大(约 0.76 mm min^{-1}); 喷施Jag S时, 小降雨强度下, 喷施各个剂量的黄土坡面稳渗率均高于裸坡, 大、中降雨强度下, 除了喷施大剂量坡面稳渗率小于裸坡, 其他两个剂量均能提高稳渗率。

不同Jag S喷施量对3个降雨强度的入渗过程有

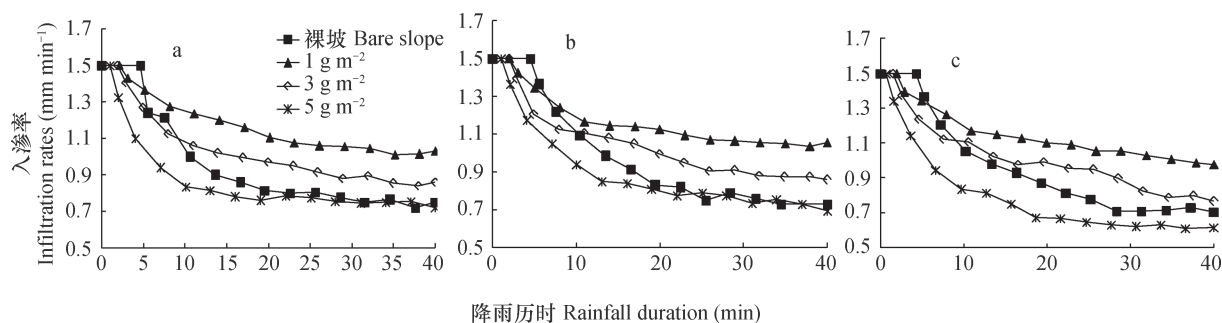
明显影响, 但影响趋势因剂量和降雨强度不同而异。 1.0 mm min^{-1} 降雨强度下, 喷施不同剂量Jag S坡面入渗率在整个降雨过程中均大于裸露坡面入渗率; 1.5 mm min^{-1} 和 2.0 mm min^{-1} 降雨强度下, 喷施小、中剂量Jag S坡面入渗率在产流开始初期较裸露坡面入渗率小, 之后大于裸露坡面入渗率, 而大剂量时坡面入渗率在整个降雨过程中均小于裸露坡面入渗率, 降雨后期与裸露坡面入渗率比较接近。除此以外, 与裸露坡面相比, 喷施不同剂量Jag S的坡面在各个雨强下降雨过程入渗率下降趋势也不相同。小雨强条件下, 喷施3个剂量Jag S坡面的入渗率变化较缓慢, 中、大雨强下, 除大剂量时坡面入渗率下降趋势在整个降雨过程中较陡, 中、小剂

量与小雨强的趋势类似。可见，3个不同降雨强度下，喷施Jag S剂量越大，入渗率越小，入渗率下降速率越大，达到一定剂量时，入渗率小于裸露坡面入渗率。具体表现为：中、小剂量Jag S均可以增强黄土坡面降雨入渗，减缓降雨入渗在整个降雨过程的下降趋势，具有较大的稳渗率，大剂量Jag S只

有在小雨强下才能达到相同的效果。

2.1.2 不同坡度 降雨强度为 1.5 mm min^{-1} 时，不同坡度下裸露坡面和喷施3种不同剂量Jag S坡面的土壤入渗率随降雨过程变化的点绘在图上，如图2。

从图2中可以看出，不同坡度下，喷施3种剂量



注：图中a、b、c分别代表坡度为 10° 、 15° 、 20° Note: The lowercase letters, a, b and c, in the figure represents 10° , 15° , 20° , respectively, in slope gradient

图2 不同Jag S剂量和不同坡度对降雨过程中坡面入渗速率的影响

Fig. 2 Effect of spraying of Jag S on infiltration rate during the process of each rainfall event relative to dosage of the spraying and slope gradient

的Jag S对黄土坡面的入渗过程均有明显影响，但规律不同。与裸露坡面相比，3个坡度下，40 min入渗时间内，喷施大剂量Jag S坡面入渗率和稳渗率在整个降雨过程中均小于裸露坡面，喷施中、小剂量Jag S坡面入渗率在最初的0~7 min时间内较裸露坡面入渗率小，但7~40 min内降雨入渗率与裸露坡面差异较大，且随着喷施剂量增大，这种差异不明显。

在相同入渗时间内，与裸露坡面相比，随着降雨时间的变化，1和 3 g m^{-2} 处理的坡面入渗率下降趋势较缓慢，稳渗率大， 5 g m^{-2} 处理的黄土坡面入渗率下降速率较显著地大于裸露坡面，最终的稳渗率也小。由上述结果可知，不同坡度下，喷施 1 g m^{-2} 及 3 g m^{-2} 剂量的Jag S可以增加黄土坡面的降雨入渗率和稳渗率，而且入渗率随时间的减少速率较裸露坡面平缓。进一步增加Jag S剂量（ 5 g m^{-2} ），土壤降雨入渗率开始逐渐减小至低于裸露坡面。喷施3种剂量Jag S的黄土坡面入渗的差异可能与Jag S对土壤的改良作用有关。这与于健等^[16]对PAM添加到土壤后入渗变化趋势的研究结果相似。

2.2 喷施Jag S下的降雨入渗的强化入渗效应

2.2.1 不同降雨强度 将坡度为 15° 时，不同降

雨强度下喷施不同剂量Jag S时的坡面入渗量及其与裸露坡面入渗量比较所得的强化入渗效应试验观测数据列于表2。

从表2中可以看出，同一降雨强度下，喷施Jag S剂量越大，入渗量越小，强化入渗效应越差。 1.5 和 2.0 mm min^{-1} 降雨大雨强下， 5 g m^{-2} 剂量下入渗减少；但 1.0 mm min^{-1} 降雨强度下，3个剂量下入渗量非常接近，强化入渗效应大小为 $3 \text{ g m}^{-2} > 1 \text{ g m}^{-2} > 5 \text{ g m}^{-2}$ 。对于同一剂量，降雨强度越大，入渗量越大。总体而言强化入渗效应在 1 g m^{-2} 剂量下最好， 3 g m^{-2} 剂量下为 $2.0 \text{ mm min}^{-1} > 1.0 \text{ mm min}^{-1} > 1.5 \text{ mm min}^{-1}$ ， 5 g m^{-2} 剂量下 1.5 和 2.0 mm min^{-1} 降雨强度下表现为减少入渗效应。将同一剂量3个降雨强度下的强化入渗效应进行平均，得到喷施Jag S剂量 1 g m^{-2} 时，入渗量较裸露坡面增加22.81%，剂量为 3 g m^{-2} 时，入渗量较裸露坡面增加13.69%，剂量为 5 g m^{-2} 时，入渗量较裸露坡面减少6.3%， 1 g m^{-2} 和 3 g m^{-2} 剂量表现为强化入渗效应， 5 g m^{-2} 剂量表现为减少入渗效应（除小降雨强度）。裸露坡面和喷施不同剂量Jag S的坡面入渗量的大小为： $1 \text{ g m}^{-2} > 3 \text{ g m}^{-2} > \text{裸露坡面} > 5 \text{ g m}^{-2}$ 。

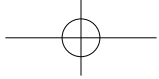


表2 不同降雨强度下喷施Jag S的强化入渗效应

Table 2 Effect of spraying Jag S enhancing infiltration relative to rainfall intensity

降雨强度 Rainfall intensity (mm min ⁻¹)	入渗量 Infiltration (mm)				强化入渗效应 Increment (%)		
	裸露坡面 Bare slope	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	28.81Bb	32.93Ac	32.94Ac	30.38Aa	14.30Ac	14.33Ab	5.44Ba
1.5	37.53Ba	44.24Ab	39.32Bb	33.26Ca	17.89Ac	4.78Bc	-11.37Cc
2.0	36.65Ba	49.93Aa	44.70Aa	31.90Ca	36.23Aa	21.95Ba	-12.97Cc
平均Average	34.33Ba	42.37Ab	38.99Bb	31.85Ca	22.81Ab	13.69Bb	-6.30Cb

注：不同大写字母表示相同雨强下不同剂量之间入渗量和强化入渗效应差异显著 ($p < 0.05$)。不同小写字母表示相同剂量不同雨强间入渗量和强化入渗效应差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different capital letters mean significant difference at 0.05 level in infiltration rate and infiltration increment between treatments the same in rainfall intensity and different in dosage. Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level between treatments the same in dosages and different in rainfall intensity

表3 不同坡度下喷施Jag S的强化入渗效应

Table 3 Effect of Spraying Jag S enhancing infiltration relative to slope

坡度Slope (°)	入渗量 Infiltration (mm)				强化入渗效应 Increment (%)		
	裸露坡面 Bare slope	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	36.65Bb	44.40Aa	38.87Ba	31.86Cb	21.15Aa	6.06Ba	-13.08Ca
15	37.53Ba	44.24Aa	39.32Ba	33.26Ca	17.89Ab	4.78Bb	-11.37Ca
20	36.99Bb	45.02Aa	38.13Ba	29.20Cb	21.71Aa	3.09Bc	-21.07Cc
平均Average	37.06Bb	44.55Aa	38.77Ba	31.44Cb	20.25Aa	4.64Bb	-15.17Cb

注：不同大写字母表示相同坡度不同剂量之间入渗量和强化入渗效应差异显著 ($p < 0.05$)。不同小写字母表示相同剂量不同坡度间入渗量和强化入渗效应差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different capital letters mean significant difference at 0.05 level in infiltration rate and infiltration increment between treatments the same in slope gradient and different in dosage. Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level between treatments the same in dosage and different in slope gradient

2.2.2 不同坡度 将降雨强度为1.5 mm min⁻¹时，不同坡度下喷施不同剂量Jag S时的坡面入渗量及其与裸露坡面入渗量比较所得的强化入渗效应试验观测数据列于表3。

从表3中可以看出，不同坡度相同降雨条件下喷施Jag S对降雨入渗有一定的影响但受剂量影响较大。同一坡度下，喷施Jag S剂量越大，入渗量越小，强化入渗效应越差。5 g m⁻²剂量下减少入渗效应。对于同一剂量，不同坡度下的入渗量接近，强化入渗效应在1 g m⁻²剂量下为坡度20° > 10° > 15°，在3 g m⁻²剂量下变差，5 g m⁻²剂量下表现为减少入渗效应。将同一剂量3个坡度下的强化入渗效应进行平均，得到喷施Jag S剂量为1 g m⁻²时，入渗量较裸露坡面增加20.25%，剂量为3 g m⁻²时，入渗量较裸露坡面增加4.64%，剂量为5 g m⁻²时，入渗量较裸露坡面减少15.17%，1 g m⁻²和3 g m⁻²剂量表现为强化入渗效应，5 g m⁻²剂量表现为少入渗效

应。裸露坡面和喷施不同剂量Jag S的坡面入渗量的大小为：1 g m⁻² > 3 g m⁻² > 裸露坡面 > 5 g m⁻²。

综合以上分析可知，不同坡度不同雨强下，小剂量的Jag S对降雨入渗具有积极的效果但随着剂量的增加，土壤的入渗率减小，达到一定剂量时，表现为减少入渗效应。同时也可以看出，在相同条件下，与未喷施处理相比，中、低剂量Jag S处理显著增加了黄土坡面降雨稳渗率，而高剂量处理显著降低了稳渗率。

2.3 喷施Jag S下的坡面初始产流时间

2.3.1 不同降雨强度 将坡度为15°时，不同降雨强度下喷施不同剂量Jag S时的坡面产流时间及其与裸露坡面产流时间比较所得的产流时间提高百分比试验观测数据列于表4。

由表4可以看出，裸露坡面和喷施不同剂量的Jag S的坡面的产流时间均随雨强的增大而减小。总体而言，喷施不同剂量Jag S的坡面，其产流开



表4 不同降雨强度下喷施Jag S的产流时间及其提前百分比

Table 4 Time of initiation of runoff and advancement of the initiation time in as affected by spraying of Jag S relative to rainfall intensity

雨强 Rainfall intensities (mm min ⁻¹)	产流时间 Time of initiation of runoff (min)				产流时间提前百分比 Advancement of the initiation time in percentage (%)		
	裸露坡面Bare slope	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	5.81Aa	5.40Aa	5.34Aa	5.20Aa	7.14Cc	8.09Bc	10.50Ad
1.5	4.46Ab	1.99Bc	1.91Bc	1.03Cc	55.44Ca	57.24Ba	77.00Aa
2.0	2.64Ac	1.18Bc	1.12Bc	0.80Cc	55.30Ba	57.76Ba	69.70Ab
平均Average	4.30Ab	2.85Bb	2.79Bb	2.34Bb	39.29Bb	41.03Bb	52.40Ab

注：不同大写字母表示相同雨强不同剂量之间产流时间和产流时间提前百分比差异显著（ $p < 0.05$ ）。不同小写字母表示相同剂量不同雨强间产流时间和产流时间提前百分比差异显著（ $p < 0.05$ ）
Note: Different capital letters mean significant difference at 0.05 level in time of initiation of runoff and advancement of the initiation time in percentage between treatment different in dosage and the same in rainfall intensity. Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level between treatments the same in dosage and different in rainfall intensity

表5 不同坡度下喷施Jag S的产流时间及其提前百分比

Table 5 Time of initiation of runoff and advancement of the initiation time in percentage as affected by spraying Jag S relative to slope gradient

坡度 Slope (°)	产流时间 Time of initiation of runoff (min)				产流时间提前百分比 Advancement of the initiation time in percentage (%)		
	裸露坡面Bare slope	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	4.54Aa	2.08Ba	1.9Ba	1.00Ca	54.19Ba	58.15Bb	77.97Ac
15	4.46Aa	1.99Ba	1.91Ba	1.03Ca	55.38Ba	57.17Bb	76.91Ac
20	4.24Aa	1.86Ba	1.51Ba	0.61Cc	56.13Ca	64.39Ba	85.61Aa
平均Average	4.41Aa	1.86Ba	1.77Ba	0.88Cb	55.23Ba	59.9Bb	80.16Ab

注：不同大写字母表示相同坡度不同剂量之间产流时间和产流时间提前百分比差异显著（ $p < 0.05$ ）。不同小写字母表示相同剂量不同坡度间产流时间和产流时间提前百分比差异显著（ $p < 0.05$ ）
Note: Different capital letters mean significant difference at 0.05 level in time of initiation of runoff and advancement of the initiation time in percentage between treatments the same in slope gradient and different in dosage. Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level between treatments the same in dosage and different in slope gradient

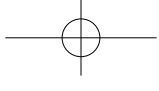
始时间均早于裸露坡面，且表现为Jag S喷施剂量越大，坡面产流时间越短，产流时间提前百分率越大。

2.3.2 不同坡度 将降雨强度为1.5 mm min⁻¹时，不同坡度下喷施不同剂量Jag S时的坡面产流时间及其与裸露坡面产流时间比较所得的产流时间提高百分比试验观测数据列于表5。

3个不同坡度下，喷施不同剂量Jag S的坡面，其产流开始时间差异很小，但皆早于裸露坡面，且Jag S使用剂量越大产流提前的时间越长，在坡度

为20°，剂量为5 g m⁻²组合条件下，产流提前时间最显著，达到了3.63 min，大坡度大剂量对降雨产流时间影响较大。

从上述讨论和分析中可以得出，喷施Jag S确实具有影响土壤入渗的作用，但其用量的大小可以改变Jag S对降雨入渗的影响结果，小剂量时能够增加降雨的入渗率，表现为强化入渗效应；大剂量时反而减小了降雨的入渗率，减弱入渗效应，这与陈渠昌等^[17]研究得出的小剂量的PAM可以增加降入入渗，大剂量的PAM反而降低降雨入渗的结论一致。



3 讨 论

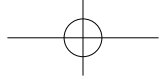
3.1 喷施Jag S对黄土坡面降雨入渗的影响

黄土坡面土壤黏粒含量高、孔隙率低、导水率小,降雨时易在表面产生结皮^[1],从而降低降雨入渗。相比于裸露黄土坡面,在不同坡度不同雨强下,喷施中、小剂量的Jag S对坡面降雨入渗具有积极的效果,能在一定程度上强化入渗效应,这与前人研究得出的另一种高聚物聚丙烯酰胺(PAM)能有效地抑制降雨过程中土壤结皮的形成,提高降雨入渗率的结论一致^[18-20]。在降雨的过程中,由于雨滴的打击,裸露坡面的土壤会分散,崩解成细小的颗粒,细小的土壤颗粒会随水流进入土壤孔隙中,使土壤孔隙度逐渐变小,劣化土壤结构,从而降低入渗,适量的高聚物Jag S在雨水里充分溶解后随水流进入土壤的内部,其胶结凝固的作用把土壤牢固地粘结在一起,不易被雨滴打碎,从而使土壤原先的孔隙得以维持。此外,Jag S和PAM类似,可以增加土壤表层颗粒之间的凝聚力,不仅能维持土壤中原有的团聚体,而且能形成新的团聚体,增加土壤团聚体的数量,从而维护良好的表土结构,防治土壤结皮产生,增加土壤的入渗能力。因此,喷施中、小剂量Jag S黄土坡面较裸露黄土坡面可明显提高降雨入渗,强化入渗效应。不同Jag S喷施量对不同坡度不同雨强降雨入渗过程有明显影响,但影响趋势因喷施剂量大小而有差异。喷施中、小剂量Jag S均可以增强黄土坡面降雨入渗,减缓降雨入渗在整个降雨过程中的下降趋势,具有较大的稳渗率,大剂量Jag S的作用效果却相反,只有在小雨强下才能达到相同的效果。喷施Jag S剂量较大时,溶解在水中高浓度的Jag S溶液可能会在很短的时间堵塞坡面土壤孔隙以及吸附土壤颗粒从而降低土壤的孔隙度,使喷施大剂量Jag S坡面的入渗率在短时间内快速下降,其下降趋势较裸露坡面大,达到稳定时的稳渗率也较裸露坡面小,而较小的雨强能使高浓度的Jag S有充分的时间在土壤中进行溶解,从而达到和中、小剂量相同的效果。因此,在实际应用中,要发挥高聚物Jag S的持水效果,应根据当地实际情况选择合适的喷施剂量。

3.2 喷施Jag S对黄土坡面初始产流时间的影响

陈渠昌等^[17]研究表明,高聚物PAM只能改变

土壤的入渗速率,对坡地降雨的初始产流时间影响不显著,而唐泽军等^[18]研究的结果表明PAM对坡地降雨的初始产流时间有一定的影响,其覆盖率与降雨产流滞后呈正相关关系,尤其在小雨强、小坡度的条件下,这种滞后现象更加显著。由此可见,高聚物对黄土坡面降雨初始产流时间的影响存在着争议。本研究结果显示,在不同坡面不同降雨条件下,喷施不同剂量Jag S的坡面产流均早于裸露坡面,且表现为Jag S喷施剂量越大,坡面越早产流,初始产流时间相对于裸露坡面提前程度越大,这一现象与唐泽军等^[18]研究PAM可以滞后初始产流时间的结论以及陈渠昌等^[17]的研究结果不同,其原因可能为:(1)陈渠昌等^[17]和唐泽军等^[18]研究中PAM是由丙烯酰胺聚合而成的高分子量、阴离子型、白色粉末非结晶固体,而化学材料Jag S为天然高分子多肽衍生物,是从大豆胚胎中提取出来的一种中性多糖,不带电,白色粉末状,分子量仅为30万~100万,两种材料本身的不同而引起的物理化学性质的差异导致它们对不同坡度下坡面产流时间的影响也有差异;(2)两个试验材料施用方式有差异导致的。陈渠昌等^[17]和唐泽军等^[18]将PAM按一定的比例与黄绵土混合制作成均匀的PAM混合土,使得在降雨初期,PAM在土壤中就能够充分溶解,发挥良好的改良土壤结构的作用(改善土壤孔隙,使坡面产流滞后)。本试验采用的方式是喷施,溶解在水中高浓度的Jag S溶液喷施在坡面可能堵塞坡面土壤孔隙以及吸附土壤颗粒从而降低土壤的孔隙度,使坡面在降雨初期的很短时间内产流,且剂量越大,现象越显著。由表4~表5分析可得,不同雨强及坡度下,与裸露坡面相比,喷施不同剂量的Jag S的坡面产流时间均有提前,表现为剂量越大,提前的百分率越高,分析认为,可能是在降雨试验最初时间及产流的最初时间里,一方面Jag S没有充分溶解,而未溶解的Jag S可能堵塞土壤孔隙从而降低土壤的孔隙度,另一方面溶解的Jag S可能会吸附由于雨滴的打击形成的一些细小的土壤颗粒,这些相互吸附的细小颗粒会填充或沉积在土壤表层的孔隙中,改变土壤的表面结构,使土壤颗粒更紧密地堆积,从而更易产生具有封闭性的结皮,使得入渗率快速下降,因此,经Jag S处理后的坡面较裸露坡面在很短的时间内产流,且剂量越大,这种现象越明显。但随着降雨的继续,Jag S已充分发挥作用,细小的土壤颗粒



就会形成大的土壤团聚体, 改善土壤表面的结构, 因而会减弱由于充填或沉积而产生的封闭作用。

4 结 论

采用人工模拟降雨试验方法, 在分析裸露坡面入渗过程的基础上, 对比分析了喷施Jag S坡面与裸露坡面入渗过程特征, 揭示了Jag S对坡面入渗的影响。在不同坡度不同雨强下, 与裸露坡面相比, 中小剂量Jag S能够明显提高土壤入渗性能, 减缓降雨入渗在整个降雨过程的下降趋势, 提高稳渗率, 大剂量Jag S处理反而明显降低土壤入渗性能。虽然喷施不同剂量Jag S的坡面与裸露坡面相比可以增加坡面降雨的稳渗率, 但在一定程度上减少了降雨前期入渗率, 在产流时间上也早于裸坡, 且表现为Jag S喷施剂量越大, 坡面越早产流, 产流时间相对于裸露坡面提前程度越大。高分子化学材料Jag S在一定程度上可以降低降雨入渗减少速率、增加降雨的入渗和降雨的稳渗率, 为水土保持措施的选择提供依据, 但由于Jag S是一种新型高分子化学材料, 对于它的研究在一定程度上存在很多的不足, 例如对于Jag S与土壤的作用机理, 最佳使用量, 时效性以及在不同土壤类型的作用是否相同等问题仍不是很清楚, 有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 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. 土壤学报, 2009, 46 (1) : 16—23
Bu C F, Cai Q G, Zhang X C, et al. Mechanism and erosion effect of development of soil crust of loess (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (1) : 16—23
- [2] 刘纪根, 雷廷武. 施加PAM的坡地降雨入渗过程及其模型研究. 水土保持学报, 2001, 15 (3) : 51—54
Liu J G, Lei T W. Processes and model of rainfall-infiltration on slope land treated with PAM (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15 (3) : 51—54
- [3] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000
Yang W Z, Shao M A. The research of soil water on the Loess Plateau (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [4] 陈洪松, 邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展. 水科学进展, 2003, 14 (4) : 513—520
Chen H S, Shao M A. Review on hillslope water movement and transformation mechanism on the Loess Plateau (In Chinese). Advances in Water Science, 2003, 14 (4) : 513—520
- [5] Shainberg I, Levy G J. Organic polymers and soil sealing in cultivated soil. Soil Science, 1994, 158: 267—273
- [6] Morin J, Benyamini Y. Rainfall infiltration into bare soil. Water Resources Research, 1977, 13: 813—817
- [7] Lentz R D, Sojka R E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration. Soil Science, 1994, 158 (4) : 274—282
- [8] Levy G J, Levin J, Gal M. Polymers effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkler irrigations. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 902—907
- [9] 段新芳. 甲壳素和壳聚糖的研究及其在农林业中的应用. 世界林业研究, 1998, 3 (2) : 9—14
Duan X F. Introduction of research situation about chitin and chitosan and their application in agriculture and forestry (In Chinese). World Forestry Research, 1998, 3 (2) : 9—14
- [10] 蒋挺大. 甲壳素. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 50—56
Jiang T D. Chitin (In Chinese). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1996: 50—56
- [11] Sarathchandra S U, Watson R N, Cox N R, et al. Effects of chitin amendment of soil on microorganisms, nematodes, and growth of white clover (*Trifolium repens* L.) and perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). Biology and Fertility of Soils, 1996, 22: 221—226
- [12] Hallmann J, Rodríguez-kaábana R, Kloepper J W. Chitin-mediated changes in bacterial communities of the soil, rhizosphere and within roots of cotton in relation to nematode control. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31: 551—560
- [13] Wallace A, Wallace G A. Enhancement of the effect of coal fly ash by a polyacrylamide soil conditioner on growth of wheat. Soil Science, 1986, 141 (5) : 321—323
- [14] 黄泽波, 刘永定. 蓝细菌多糖及其应用研究概况. 生物技术通报, 1997 (4) : 26—32
Huang Z B, Liu Y D. Polysaccharides from cyanobacteria and their potential applications (In Chinese). Biotechnology Bulletin, 1997 (4) : 26—32
- [15] Liu J E, Wang Z L, Yang X M, et al. The impact of natural polymer derivatives on sheet erosion on experimental loess hillslope. Soil & Tillage Research,

- 2014, 139: 23—27
- [16] 于健, 雷廷武, Shainberg I, 等. PAM特性对砂壤土入渗及土壤侵蚀的影响. 土壤学报, 2011, 48 (1) : 21—27
- Yu J, Lei T W, Shainberg I, et al. Effects of molecular weight and degree of hydrolysis of PAM infiltration and erosion of sandy soil (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (1) : 21—27
- [17] 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. 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 (In Chinese) . Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (11) : 1290—1296
- [18] 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. 土壤学报, 2003, 40 (2) : 178—185
- Tang Z J, Lei T W, Zhang Q W, et al. Effects of polyacrylamide application on infiltration and soil erosion under simulated rainfalls. I. Infiltration (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (2) : 178—185
- [19] Sepaskhah A R, Shahabizad V. Effects of water quality and PAM application rate on the control of soil erosion, water infiltration and runoff for different soil textures measured in a rainfall simulator. Biosystems Engineering, 2010, 106: 513—520
- [20] Sepaskhah A R, Bazrafshan-Jahromi A R. Controlling runoff and erosion in sloping land with polyacrylamide under a rainfall simulator. Biosystems Engineering, 2006, 93 (4) : 469—474

Effect of Spraying Jag S on Rain Water Infiltration on Loess Slope

LI Yuanyuan¹ WANG Zhanli^{1, 2†} LIU Jun'e³ JIAO Nian⁴ ZHANG Jiaqiong¹

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

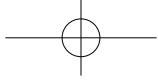
(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710019, China)

(4 Xifeng of Soil and Water Conservation Scientific Experiment Station of Yellow River Water Conservancy Commission, Xifeng, Gansu 745000, China)

Abstract 【Objective】The technology of using chemicals to control soil erosion is mainly implemented through spraying high molecular compounds over on the surface soil layer to improve its soil structure, to enhance stability of its soil aggregates, to prevent dispersion of its clays and hence to increase rain water infiltration rate and eventually to control surface runoff and soil erosion. Jag S is a kind of neutral polysaccharide and a new type of high polymer. This study on effect of the use of this high polymer on rainwater infiltration rate in loess slopes is intended to lay down a new theoretic basis for applying the technology of using chemicals to control soil erosion to the Loess Plateau in arid and semi-arid regions for erosion control and water conservation. Control of soil erosion with chemicals is a new method, which is developed on the basis of the modern chemical industry and different from the traditional soil and water conservation methods.

【Method】An indoor experiment was conducted in the Rainfall Simulation Hall at the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau at the Institute of Soil and Water Conservation. A rainfall simulator system with side-sprinklers was used to simulate rainfall events different in intensity ranging from 0.5 to 3.5 mm min⁻¹. The sprinklers were 16 m high above the experimental field, providing simulated rainfall events over 80% in uniformity and raindrops 0.25 to 0.375 mm in diameter, when a rainfall event was set at 1 ~ 2 mm min⁻¹ in rainfall intensity. Kinetic energy of the raindrops striking at surface soil of the field ranged from 365 to 847 J h⁻¹ m⁻². The indoor simulated rainfall experiment was designed to explore



relationships of rain water infiltration rate and initiation time of runoff with dosage (1, 3 and 5 g m⁻²) of Jag S used relative to slope gradient (10°, 15° and 20°) and rainfall intensity (1.0, 1.5 and 2.0 mm min⁻¹).

【Result】Results show that compared with the CK slope, all the slopes sprayed with Jag S regardless of rate were lowered in infiltration rate during the initial period of all rainfall events. However, the spraying of 1 and 3 g m⁻² Jag S significantly raised rain water infiltration rate on all loess soil slopes in the late stages of the rainfall events, and reduced the buffering effect during the initial periods of the rainfalls. Consequently, the rain water infiltration rate increased by 21.53% and the infiltration enhancement rate by 9.17%. On the contrary, the spraying of 5 g m⁻² Jag S weakened the rainfall water infiltration rate in all rainfall events except for the one lowest in intensity (1.0 mm min⁻¹) and in all the loess slopes. The soil slopes sprayed with Jag S, regardless of rate, differed very slightly in runoff initiation time, however, they had runoff initiated earlier than the CK slope. The higher the Jag S spraying rate, the earlier the runoff initiated. Obviously the effects of a high Jag S spraying rate and a high slope gradient on runoff initiation were significant. The runoff initiation advancement rate on slopes sprayed with 1, 3 and 5 g m⁻² was 47.26%, 50.47% and 66.28%, respectively, under rainfalls the same in intensity. 【Conclusion】All the finding indicate that Jag S is to a certain extent, effective to improve soil structure of the loess slopes and increase rainwater infiltration rate and hence reduce soil erosion. Consequently, spraying of the neutral polymer Jag S on surface soil of a loess slope is a potential alternative to control soil erosion on the Loess Plateau. The findings of this study may serve as a scientific basis for soil and water conservation using polymers.

Key words Polysaccharide (Jag S) ; Loess slope; Rainfall infiltration; Soil and water conservation

(责任编辑：檀满枝)