

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.06.023

# Jag S 对黄土坡面降雨入渗的调控效应

李元元<sup>1,2</sup>, 王占礼<sup>2,3</sup>, 申楠<sup>1,2</sup>, 焦念<sup>4</sup>, 刘俊娥<sup>5</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 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; 4. 黄河水利委员会 西峰水土保持科学试验站, 甘肃 西峰 745000; 5. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710019)

**摘要:** [目的] Jag S 是一种新型可用于调控水土流失的高分子化学材料, 揭示 Jag S 对降雨入渗的化学调控效应, 为黄土坡面水土流失治理提供科学依据。[方法] 采用人工模拟降雨试验研究 Jag S 对黄土坡面入渗调控效应。[结果] (1) 撒施 Jag S 坡面入渗率随降雨过程的变化趋势与裸坡相似, 起初皆随降雨历时的延长先快速减小, 随后趋于稳定状态; (2) 撒施 Jag S 的坡面和裸坡相比, 初始产流的时间提前, 入渗率减小速率较大, 达到稳渗阶段所用的时间少, 且前期入渗率小于裸坡坡面前期入渗率, 但稳渗率大于裸坡; (3) 撒施 Jag S 坡面的入渗量明显高于裸坡的入渗量, 在各个剂量下, 入渗量均随坡度的增加而减小, 随雨强的增加而呈现递增变化趋势。[结论] 因此撒施 Jag S 可有效增加土壤入渗和强化入渗效应。强化入渗效应的 Jag S 剂量顺序依次为:  $1 \text{ g/m}^2 > 3 \text{ g/m}^2 > 5 \text{ g/m}^2$ 。

**关键词:** Jag S; 黄土坡面; 降雨入渗; 调控效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)06-0135-05

中图分类号: S157.1

## Regulating Effect of Jag S Application on Rainfall Infiltration of Loess Slope

LI Yuanyuan<sup>1,2</sup>, WANG Zhanli<sup>2,3</sup>, SHEN Nan<sup>1,2</sup>, JIAO Nian<sup>4</sup>, LIU June<sup>5</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess

Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. State Key Laboratory of

Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese

Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Xifeng of Soil and

Water Conservation Scientific Experiment Station of Yellow River Water Conservancy Commission, Xifeng, Gansu

745000, China; 5. College of Tourism Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710019, China)

**Abstract:** [Objective] Jag S is a kind of new macromolecule polymers which can regulate water and soil loss. Studying Jag's chemical regulation effect on the rainfall infiltration can provide the scientific basis for the control of soil and water loss on loess slope. [Methods] A simulated rainfall experiment was conducted to study the regulating effect of Jag S on infiltration of loess slope. [Results] (1) Variation trend of the infiltration rate of the slope with the spreading of Jag S was similar to bare soil. It rapidly decreased at first and then stabilized with the increase of the rainfall duration. (2) Compared to the bare soil, the soil with spreading Jag S had greater reduction of infiltration rate, less initial runoff time and less time for the infiltration rate to be stable, and the infiltration rate in the soil with dry spreading Jag S was lower than bare soil, but its stable infiltration rate was higher than bare soil. (3) Infiltration amount of the soil with spreading Jag S was significantly higher than bare soil. With different doses, the infiltration capacity decreased with slope increase, and increased with the increasing rainfall intensity. [Conclusion] The dry spreading Jag S increased the infiltration capacity, the regulating effect of different doses was  $1 \text{ g/m}^2 > 3 \text{ g/m}^2 > 5 \text{ g/m}^2$ .

**Keywords:** Jag S; loess slope; rainfall infiltration; regulating effect

收稿日期: 2014-09-10

修回日期: 2014-09-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“应用三区土盘试验解析黄土坡面片蚀动力学过程”(41471230), “黄土坡面细沟侵蚀关键参数及其耦合关系试验研究”(41171227); 中国科学院重点项目(KZZDEW0403)

第一作者: 李元元(1988—), 女(汉族), 安徽省蚌埠市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: 836434985@qq.com。

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

中国是全球水土流失最严重的国家之一,而地处中国黄河上中游地区的黄土高原由于土壤质地疏松,暴雨强度大,更成为我国乃至全球土壤流失最严重的地区,该区严重的水土流失造成了土壤退化,土地资源破坏,水体污染,水利设施功能减低乃至丧失、损毁,黄河下游两岸安全受到严重威胁等诸多生态、及洪涝与泥沙灾害问题<sup>[1]</sup>。降雨入渗是制约黄土高原水土流失强弱的主要因子之一,降雨入渗量越小,则产生的地表径流量越大,径流的分离与搬运能力越强,水土流失就越严重,反之亦然。因此,在黄土高原水土流失防治中,如何增加和强化降雨入渗就成为有效治理该区水土流失亟待解决的关键科学问题。

化学调控措施是一种不同于工程措施和生物措施的非传统新兴水土保持技术措施。该措施通过在土壤表面施放高分子化合物,可以改善土壤性质,增加土壤结构稳定性,防治土壤结皮产生,达到增加降雨入渗,减少地表径流,实现控制水土流失的目的。国内外目前化学调控水土流失措施中广泛采用的化学材料主要是聚丙烯酰胺(PAM),它是一种能够维持良好的土壤结构从而增加降雨入渗的高分子化合物。近年来,国内外学者在 PAM 可以增加降雨入渗方面已经取得了大量的研究成果<sup>[2-10]</sup>。坡面降雨入

渗具有丰富的内涵,尽管 PAM 在很大程度上可以增加降雨入渗,减少坡面径流,从而保持水土,但单一的高分子化合物使得我们在使用时具有很大的局限性,因此研发新化学材料,以满足不同的水、土调控需求,更好地发挥化学材料强化入渗、保持水土的多功能效应,已成为一些水土保持工作者及化工企业新的研究课题,Jag S 就是基于这样的考量而由罗地亚公司新研发出的一种化学材料。

本研究通过人工模拟降雨试验,首次对罗地亚公司新开发的化学材料 Jag S 对黄土坡面降雨入渗的调控效应进行研究,分析施放不同剂量 Jag S 的土壤相对于裸土的入渗动态变化过程,探讨 Jag S 的强化入渗效应,为黄土坡面水土流失治理及其措施选择提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与试验土壤

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,试验土壤机械组成详见表 1。试验土壤前期含水量为 14%,填土容重为 1.2 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 供试土壤机械组成

粒级	细黏粒	粗黏粒	细粉粒	中粉粒	粗粉粒	细砂粒
粒径/mm	<0.001	0.001~0.002	0.002~0.005	0.005~0.010	0.01~0.05	0.05~0.25
比例/%	6.85	1.85	2.88	3.84	48.00	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并过 5 mm 筛,除去杂草和石块。裸土小区装土之前,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,用刮板将表面刮平整。试验所用化学材料 Jag S 为一种多肽衍生物,该产品呈黄白色粉末状,遇水形成胶体。

### 1.2 试验设计与观测

Jag S 的施放方式为干撒施,试验小区装土后取相当于 2 mm 厚的过筛干土壤,将其与 Jag S 混合,搅拌均匀,然后分为 10 份均匀地撒在裸土小区相应的 10 段表面上,用刮板将其刮平整,静置一段时间后,

在其表面均匀地喷撒 2 L 水,将其放置 15 h 即可试验。试验设计场次为:雨强 1.5 mm/min,试验坡度 10°,15°,20°,土壤表面处理为裸土和撒施 Jag S 剂量为 1,3,5 g/m<sup>2</sup> 的组合试验 12 场,各场试验重复 1 次共 24 场;坡度 15°,雨强 1.0,1.5,2.0 mm/min,土壤表面处理为裸土和撒施 Jag S 剂量为 1,3,5 g/m<sup>2</sup> 的组合试验 12 场,除去已经进行过的雨强 1.5 mm/min,坡度 15°的土壤表面处理为裸土和撒施 Jag S 剂量为 1,3,5 g/m<sup>2</sup> 的组合试验 4 场,实际场次为 8 场,各场试验重复 1 次共 16 场,总共 40 场试验。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计算出降雨入渗量和入渗率。

## 2 结果与分析

### 2.1 撒施 Jag S 对黄土坡面入渗过程的影响

降雨入渗是指在降雨条件下,水分由地表渗入土壤内的运动过程。入渗不仅影响地面径流量的大小,而且也影响坡面水土流失过程。

2.1.1 不同降雨强度下撒施 Jag S 对降雨入渗过程的影响 将坡度为  $15^\circ$  时,不同降雨强度下裸坡和撒施 3 种不同剂量 Jag S 坡面的入渗率随降雨过程的变化点绘在图上,如图 1 所示。从图 1 可以看出,在坡度为  $15^\circ$ ,雨强分别为 1.0、1.5 及 2.0 mm/min 下,撒施 1、3 及 5 g/m<sup>2</sup> 剂量 Jag S 坡面的入渗率皆随降雨历时的延长先减小,随后趋于稳定变化状态或低速率下降,与裸坡坡面入渗率随降雨过程的变化大体相似,但也略有差异,撒施不同剂量 Jag S 坡面前期入渗率减小速率较裸坡大,入渗率趋于稳定的时间早于裸坡坡面(大降雨强度下更为显著);在降雨过程的前期阶段,撒施不同剂量 Jag S 的前期入渗率小于裸坡

坡面前期入渗率,但其稳渗率大于裸坡坡面。两个大降雨强度下,撒施不同剂量 Jag S 坡面基本同时开始产流,而在小雨强下,撒施两个大剂量 Jag S 坡面的产流时间较撒施小剂量 Jag S 坡面的产流时间相对提前,但总体皆早于裸坡。撒施 Jag S 后增加了坡面的稳渗率,但在同一降雨强度下,撒施 Jag S 剂量越大,稳渗率越小。小、大降雨强度下,3 个剂量入渗率在随降雨过程的整个变化过程中差值相当,但在中降雨强度 1.5 mm/min 下,3 g/m<sup>2</sup> 剂量的入渗率与 1 g/m<sup>2</sup> 剂量的入渗率在随降雨过程的整个变化过程中差值较小,而与剂量为 5 g/m<sup>2</sup> 的入渗率随降雨过程的整个变化过程中差值则较大。对比图 1 不同降雨强度下的入渗率变化曲线得出,随着雨强的增大,初始产流时间提前,并且裸土坡面和撒施 Jag S 坡面入渗率均增加。随着雨强增大入渗率增大的原因可能是由于随着雨强的增大,水体自身重力和雨滴打击所产生的冲力的增加,不仅可以加速入渗水流的速率,也可以使部分静止的毛管水加入到入渗水流中<sup>[11]</sup>。

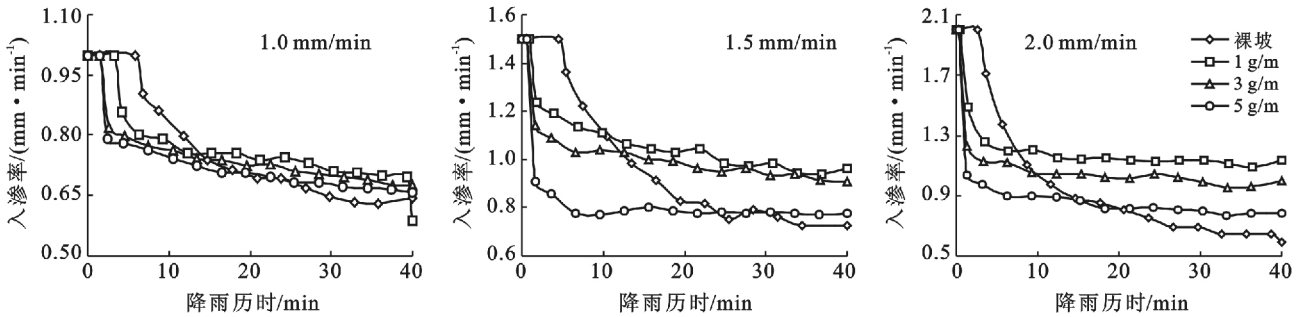


图 1 不同降雨强度下撒施 Jag S 对坡面入渗过程的影响

2.1.2 不同坡度下撒施 Jag S 对降雨入渗过程的影响 降雨强度为 1.5 mm/min 时,不同坡度下裸坡和撒施 3 种不同剂量 Jag S 坡面的土壤入渗过程如图 2 所示。从图 2 可以看出,1.5 mm/min,坡度分别为  $10^\circ$ 、 $15^\circ$  及  $20^\circ$  下,撒施 1、3 及 5 g/m<sup>2</sup> 剂量 Jag S 坡面入渗率随降雨过程的变化规律与裸坡坡面大体相似,但也略有差异,撒施不同剂量 Jag S 坡面入渗率趋于稳定的时间早于裸坡坡面,且前期入渗率减小速率较裸坡前期入渗率减小速率大,产流开始到产流后的 3~9 min 之间,入渗率减小,产流后的 3~9 min 至降雨结束入渗率基本维持稳定或低速下降的变化过程。1.5 mm/min,坡度分别为  $10^\circ$ 、 $15^\circ$  及  $20^\circ$  下,撒施 1、3、及 5 g/m<sup>2</sup> 不同剂量 Jag S 的坡面,其产流开始时间差异很小,但皆早于裸坡坡面。在降雨前期,撒施 1、3 及 5 g/m<sup>2</sup> 不同剂量 Jag S 的前期入渗率小于裸坡坡面前期入渗率,当入渗率达到稳定变化之后,撒施 1、3 及 5 g/m<sup>2</sup> 不同剂量 Jag S 的入渗率大于裸坡坡面

入渗率,但 5 g/m<sup>2</sup> 剂量下稳渗率与裸坡稳渗率很接近。撒施 Jag S 能够增加坡面的渗率,但在同一坡度下,撒施 Jag S 剂量越大,稳渗率越小。3 个坡度下,3 g/m<sup>2</sup> 剂量的入渗率与 1 g/m<sup>2</sup> 剂量的入渗率随降雨过程的整个变化过程中差值均较小,而与剂量为 5 g/m<sup>2</sup> 的入渗率随降雨过程的整个变化过程差值则均较大。对比图 1—2 可以得出,撒施 Jag S 可以增加降雨稳渗率,其原因可能是在降雨过程中,Jag S 与土壤发生作用,增强了水稳性团聚体含量,保持了土壤的团聚体,减少了结皮的形成,维持良好的空隙状况,形成较好的结构,增强土壤的导水能力,从而增加入渗。但撒施的剂量超过一定的范围,反而会减少渗率,同一坡度不同雨强下入渗效果表现为:1 g/m<sup>2</sup> > 3 g/m<sup>2</sup> > 裸坡 > 5 g/m<sup>2</sup>。其原因可能是当施加量过大时,Jag S 在土壤表层过度黏结土粒,降低了土壤的孔隙度,反而抑制了水的渗透。因此,在撒施使用 Jag S 时应根据实际情况对其使用量进行控制。

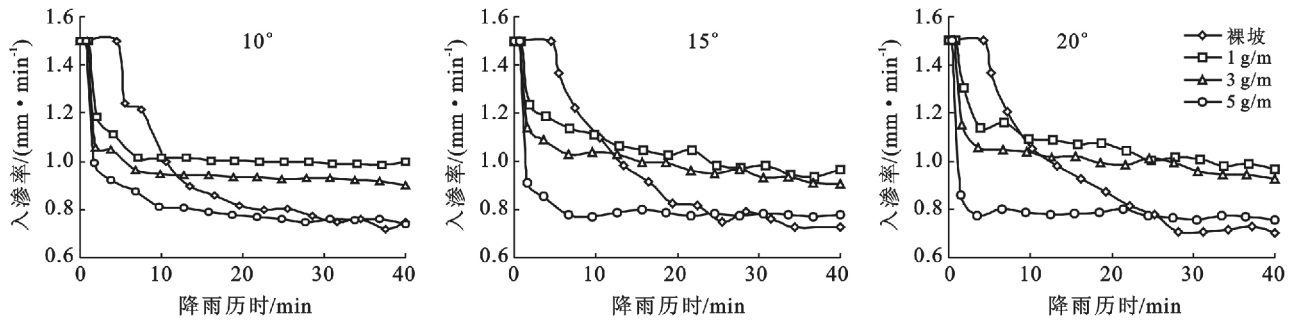


图 2 不同坡度下撒施 Jag S 对坡面入渗过程的影响

2.2 撒施 Jag S 对降雨入渗的强化效应

2.2.1 不同降雨强度下撒施 Jag S 对降雨入渗的强化效应 将坡度为 15°时,不同降雨强度下撒施不同剂量 Jag S 时的坡面入渗量及其与裸坡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 可以看出,同一降雨强度下,撒施 Jag S 剂量越大,入渗量越小,强化入渗效应越差,5 g/m<sup>2</sup> 剂量时减少入渗,但 1.0 mm/min 降雨强度下,入渗量先增大后减小,且 3 个剂量很接近。对于同一剂量,降雨强度越大,入渗量越大,强化入渗效应越好。将同一剂量 3 个降雨强度下的强化入渗效应进行平均,得到撒施 Jag S 剂量为 1 g/m<sup>2</sup> 时,入渗量相比裸坡增加 13.38%,剂量为 3 g/m<sup>2</sup> 时,入渗量相比裸坡增加 6.92%,剂量为 5 g/m<sup>2</sup> 时,入渗量相比裸坡减少 7.7%,剂量为 1,3 g/m<sup>2</sup> 时有强化入渗效应,剂量为 5 g/m<sup>2</sup> 时则减少入渗效应,可能是因为 Jag S 加入过量,降低了土壤孔隙度,从而降低土壤入渗。<sup>[12]</sup> 裸土

和撒施不同剂量 Jag S 的坡面入渗量的大小顺序依次为:1 g/m<sup>2</sup>>3 g/m<sup>2</sup>>裸坡>5 g/m<sup>2</sup>。

2.2.2 不同坡度下撒施 Jag S 对降雨入渗的强化效应 将降雨强度为 1.5 mm/min 时,不同坡度下撒施不同剂量 Jag S 时的坡面入渗量及与裸坡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,同一坡度下,撒施 Jag S 剂量越大,入渗量越小,强化入渗效应越差。在同一剂量各个坡度下都强化了入渗效应,但 5 g/m<sup>2</sup> 剂量下减少入渗效应。将同一剂量 3 个坡度下的强化入渗效应进行平均,得到撒施 Jag S 剂量为 1 g/m<sup>2</sup> 时,入渗量相比裸坡增加 11.14%;剂量为 3 g/m<sup>2</sup> 时,入渗量相比裸坡增加 6.09%;剂量为 5 g/m<sup>2</sup> 时,入渗量相比裸坡减少 13.94%。剂量为 1,3 g/m<sup>2</sup> 时强化入渗效应,剂量为 5 g/m<sup>2</sup> 时减少入渗效应。裸土和撒施不同剂量 Jag S 的坡面入渗量的大小为:1 g/m<sup>2</sup>>3 g/m<sup>2</sup>>裸坡>5 g/m<sup>2</sup>,这与不同雨强下得出的结论相似。

表 2 不同降雨强度下撒施 Jag S 的强化入渗效应

雨强/ (mm·min <sup>-1</sup> )	不同 Jag S 撒施量入渗量/mm				不同 Jag S 撒施量强化入渗效应/%		
	裸坡	1 g/m <sup>2</sup>	3 g/m <sup>2</sup>	5 g/m <sup>2</sup>	1 g/m <sup>2</sup>	3 g/m <sup>2</sup>	5 g/m <sup>2</sup>
1.5	28.811 7	29.353 9	29.425 8	28.613 6	1.88	2.13	-0.69
1.5	37.526 8	41.658 1	39.528 6	31.929 2	11.01	5.33	-4.92
2.0	36.652 0	46.643 9	41.533 9	33.909 5	27.26	13.32	-7.48
平均	34.330 2	39.218 6	36.829 4	31.484 1	13.38	6.92	-7.70

对比表 2—3 可以看出,坡度越大,入渗量越小;雨强越大,入渗量越大。原因主要与坡面上水层的受压情况有关。坡面上的水分入渗主要受大气压力和水层压力的共同作用,随着坡度的增大,水层沿坡面

向下的压力增大,而垂直坡面的压力减小。同时由于水体沿坡面移动,水分进入土壤的机会减少,从而导致入渗率减小;雨强越大,水层压力越大,从而可以增加入渗水流的流速,增加入渗<sup>[12]</sup>。

表 3 不同坡度下撒施 Jag S 的强化入渗效应

坡度	不同 Jag S 撒施量入渗量/mm				不同 Jag S 撒施量强化入渗效应/%		
	裸坡	1 g/m <sup>2</sup>	3 g/m <sup>2</sup>	5 g/m <sup>2</sup>	1 g/m <sup>2</sup>	3 g/m <sup>2</sup>	5 g/m <sup>2</sup>
10°	36.648 0	39.406 5	38.201 5	32.193 3	7.53	4.24	-12.16
15°	37.526 8	41.658 1	39.528 6	31.929 2	11.01	5.33	-14.92
20°	36.990 5	42.495 6	40.203 6	31.529 8	14.88	8.69	-14.76
平均	37.055 1	41.186 7	39.311 2	31.884 1	11.14	6.09	-13.94

### 3 结论

(1) 不同坡度不同降雨强度下,撒施不同剂量 Jag S 坡面的入渗率皆随降雨历时的延长先减小,随后趋于稳定变化状态或低速率下降,与裸坡坡面入渗率随降雨过程的变化大体相似。

(2) 在降雨过程中撒施不同剂量 Jag S 坡面入渗率趋于稳定的时间早于裸坡坡面(大降雨强度下比较显著),入渗率减小速率较裸坡大,且前期入渗率小于裸坡坡面前期入渗率,但稳渗率大于裸坡。

(3) 撒施 Jag S 坡面的入渗量明显高于裸坡的入渗量,在各个剂量下,入渗量均随坡度的增加而减小,随雨强的增加而呈现递增变化趋势。

(4) 不同降雨强度及不同坡度下,撒施 Jag S 提高了坡面入渗量,强化了入渗效应,各剂量强化入渗效应的大小顺序为:1 g/m<sup>2</sup>>3 g/m<sup>2</sup>>5 g/m<sup>2</sup>。

(5) 撒施 Jag S 能有效地增加土壤入渗,这与 PAM 对降雨入渗的影响结果类似,但是,仍然存在使用多大剂量 Jag S 在增加入渗方面最优,以及 Jag S 和 PAM 对黄土坡面降雨入渗的调控机理是否类似等问题有待于进一步研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 史德明. 土壤侵蚀对生态环境的影响及防治对策[J]. 水土保持学报, 1991, 5(3): 1-8.
- [2] Lentz R D, Sojka R E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration [J]. Soil Science, 1994, 158(4): 274-282.
- [3] Green V S, Soil D E, Norton L D, et al. Polyacrylamide molecular weight and effects on infiltration under simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1786-1791.
- [4] Steven G V, Stott D E, Norton L D, et al. Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1786-1791.
- [5] Sojka R E, Lentz R D. Reducing furrow irrigation erosion with polyacrylamide(PAM)[J]. Journal of Production Agriculture, 1997, 38(3): 47-52.
- [6] 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(II): 侵蚀[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 401-406.
- [7] 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.
- [8] 于海龙,于健,李平,等. PAM 与不同土壤调理剂混合施用对降雨入渗和土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 152-155.
- [9] 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[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 21-27.
- [10] 赵伟,吴军虎,王全九,等. 聚丙烯酰胺对黄土坡面水分入渗及溶质迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 36-40.
- [11] 吴发启,赵西宁,余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 16-18.
- [12] 焦念. 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.
- [11] 邹桂红,崔建勇. 基于 AnnAGNPS 模型的农业非点源污染模拟[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 11-17.
- [12] Chahor Y, Casali J, Giménez R, et al. Evaluation of the AnnAGNPS model for predicting runoff and sediment yield in a small Mediterranean agricultural watershed in Navarre(Spain)[J]. Agricultural Water Management, 2014, 134(4): 24-37.
- [13] Das S, Rudra R P, Gharabaghi B, et al. Applicability of AnnAGNPS for Ontario conditions[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2008, 50(1): 1-11.
- [14] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2002, 27(9): 645-654.
- [15] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the Asabe, 2007, 50(3): 885-900.
- [16] 田耀武,黄志霖,曾立雄. DEM 格网尺度对 AnnAGNPS 预测山地小流域径流和物质输出的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 846-853.
- [17] 李家科,李怀恩,李亚娇,等. 基于 AnnAGNPS 模型的陕西黑河流域非点源污染模拟[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 81-88.
- [18] 王晓燕,林青慧. DEM 分辨率及子流域划分对 AnnAGNPS 模型模拟的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(S1): 46-52.
- [19] Pradhanang S M, Briggs R D. Effects of critical source area on sediment yield and stream flow [J]. Water and Environment Journal, 2014, 28(2): 222-232.
- [20] 黄志霖,田耀武,肖文发,等. 三峡库区黑沟流域 AnnAGNPS 参数空间聚合效应[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6681-6690.

(上接第 134 页)