

Jag C162 对黄土坡面降雨入渗的调控效应研究

焦念^{1,2}, 王占礼^{2,3}, 刘俊娥^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 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 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)

摘要: 在土壤中添加高分子化合物是一种新兴的水土保持措施, 阐明其对水土流失的影响可为黄土坡面水土流失治理及其措施选择提供科学依据。采用人工模拟降雨试验, 研究新化学材料 Jag C162 对黄土坡面降雨入渗的调控效应。主要结果有: (1) 撒施不同剂量 Jag C162 后, 随着降雨时间的增加, 入渗率呈减少的趋势, 撒施 Jag C162 的入渗率减小速率均小于裸土; 降雨过程中裸土达到了稳渗阶段, 而撒施 Jag C162 的入渗率没有达到稳定状态; 初始产流的时间也相应的推迟。(2) 同坡度不同雨强和同雨强不同坡度下, 撒施 Jag C162 后, 入渗率显著提高。随着雨强和坡度的增大, 裸土的稳定入渗率增加, 3 种不同撒施剂量下的平均入渗率减小。(3) 撒施 Jag C162 的入渗量明显高于裸土的入渗量, 在不同剂量下, 入渗量随雨强的增加而呈现递进变化总趋势; 入渗量随坡度的增加而减小。(4) 撒施 Jag C162 可增加入渗率, 减少地表径流和土壤侵蚀。

关键词: Jag C162; 黄土坡面; 降雨入渗; 调控效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0025-06

中图分类号: S157.1

Regulating Effect of Jag C162 Application on Infiltration on Loess Slope

JIAO Nian^{1,2}, WANG Zhan-li^{2,3}, LIU Jun-e^{1,2}

(1. School of Resources and Environment, 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)

Abstract: It is an emerging measure of soil and water conservation to add polymers in soil. Clarifying its effects on soil erosion can provide a scientific basis for controlling soil erosion and selecting measures on loess slope. A simulated rainfall experiment was conducted to study the regulating effect of new chemical materials Jag C162 on infiltration on loess slope. Results showed that: (1) After dry spreading Jag C162, infiltration rate showed a decreasing trend with increasing rainfall time, whose decrease rate was less than bare soil. During rainfall, infiltration into bare soil reached a steady infiltration stage, while infiltration rate did not reach a steady state after dry spreading Jag C162. Initial runoff time was postponed correspondingly. (2) For the slope with different rainfall intensities and the rainfall intensity with different slopes, infiltration rate had significantly increased after dry spreading Jag C162. The stable infiltration rate of bare soil and average infiltration rate after dry spreading showed an increasing trend with increasing rainfall intensity and decreased with increasing slope. (3) Infiltration capacity for dry spreading Jag C162 was significantly higher than bare soil. With different doses, the infiltration capacity presented a general incremental trend with rainfall intensity increased, and infiltration capacity was decreased with slope increasing. (4) After dry spreading Jag C162, infiltration rate was increased and surface runoff and soil erosion were reduced.

Keywords: Jag C162; loess slope; infiltration; regulating effect

收稿日期: 2013-03-16

修回日期: 2013-08-31

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀关键参数及其耦合关系试验研究”(41171227); 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀动力学过程组合小区试验研究”(40971172); 中国科学院重点项目“近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04-03)

作者简介: 焦念(1989—), 女(汉族), 甘肃省镇原县人, 硕士, 主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: jiaonian@nwsuaf.edu.cn.

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.

中国是世界水土流失最为严重的国家之一。据第 3 次全国土壤侵蚀普查资料,中国每年土壤流失量约 $5.0 \times 10^{10} \text{ t}^{[1]}$ 。大量的水土流失已经对生态环境和经济可持续发展造成了严重的威胁,尤其是在黄土高原地区,严重的水土流失使大部分土地退化,植被破坏,泥沙、洪水灾害加剧,水利设施功能减低乃至丧失、损毁等^[2],严重制约了当地经济的发展和人民生活水平的提高。影响黄土高原水土流失的因子主要有降雨、地形、土壤质地、降雨入渗、抗蚀性、抗冲性等,其中,降雨入渗是影响降雨产流规律最重要的过程之一,是模拟土壤侵蚀过程的基本输入变量,也是实施水土保持规划需要认真考虑的重要因素。许多学者将增加入渗、就地拦蓄降雨径流作为防治水土流失的基本战略措施^[3-4]。所以,提高降雨入渗是减少水土流失必不可少的一部分。防治水土流失的传统技术主要有生物措施和工程措施,近年来兴起一类非传统的化学措施,即在土壤中添加高分子化合物,利用其改善土壤结构以达到调控水、土和减少侵蚀的目的。化学措施具有见效快、成本低的特点,特别是对防治无植被或少植被覆盖裸土的水蚀与减小径流具有重要价值。高分子化合物应用于调节土壤结构始于 20 世纪 50 年代,其中聚丙烯酰胺(PAM)应用最为广泛,保持水土的效果也相当明显。大量研究表明,应用 PAM 作为一种土壤结构改良剂或稳定剂,可以增加土壤表层颗粒间凝聚力,维持良好的土壤结构,防止土壤结皮,增加降雨入渗^[5],减少地表径流,防止土壤流失^[6]。因此将 PAM 用于土壤提高入渗率具有十分重要的意义。

有关投放 PAM 可以增加降雨入渗,国内外的学者做了大量的研究。大量的室内试验和大田试验表明在土壤表面施用 PAM 可以保持土壤较高的入渗率^[7-10]。Onofiok 等^[11]的试验表明,PAM 可改善土壤表层结构,抑制土壤封闭和结皮形成,改善土壤渗透性能,增加降雨入渗。Ben—Hur 等^[12]通过室内模拟降雨研究表明在土层上喷施 PAM 可以大大地提高降雨入渗。Lentz^[13]和 Levy 等^[14]的模拟喷灌试验

表明浓度 1.00×10^{-5} 的 PAM 灌入水中,最终入渗量增加 30%~70%。Green 等^[15]根据试验分析,认为不同分子量的 PAM 对不同质地的土壤均有很好的效果,提高渗透率 3~5 倍。唐泽军等^[16]通过人工降雨模拟试验研究 PAM 对入渗能力的响应,结果表明,PAM 能显著地增加降水入渗量,而且随 PAM 施放量的增加,累积降水入渗量也增加。陈渠昌等^[17]的试验研究表明,PAM 用量 0.5 g/m^2 时,可以提高降雨入渗。于健等^[18]研究不同 PAM 施用方法对降雨入渗的影响得出,无论什么施放方法和 PAM 的不同形态均能够显著增加降雨入渗,最大可增加 2.8 倍。赵伟等^[19]通过上方供水方式模拟降雨径流,研究 PAM 对黄土坡面水分入渗的试验表明,在放水冲刷试验前期不同用量 PAM 均能增加水分入渗。于海龙等^[20]的试验表明 PAM 混入土壤中可明显增加降雨入渗,可提高稳定入渗率 1.8~2.7 倍。

由以上的研究可见,PAM 可很大程度地提高降雨入渗,减少地表径流,从而为减少水土流失奠定基础。PAM 作为土壤结构改良剂在增加降雨入渗中,虽然得到了广泛的应用,效果也是可观的,但随着社会的发展,研发新的化学材料,寻找不同化学材料调控水、土的不同作用,以满足不同的水、土调控需求,更好地发挥化学材料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的研究课题。

本文通过人工模拟降雨试验,对罗亚公司新开发的化学材料 Jag C162 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 C162 的土壤相对于裸土的入渗动态变化过程,探讨 Jag C162 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

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。试验土壤取自黄土高原的陕西省安塞县,土壤类型为黄绵土,土壤颗粒组成见表 1。试验前期土壤容重均为 1.2 g/cm^3 ,前期含水量均为 14%。

表 1 试验土壤机械组成

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,铺上透水纱布,保持土层的透水状况接近天然坡面。为保证装土的均匀性,试验小区采用分层装土。填土时,采用边填充边压实,以减小边壁对

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。试验所用化学材料为一种多肽衍生物,此处简称为 Jag C162,该产品呈黄白色粉末状,遇水形成胶体。

Jag C162 的施放方式为干撒施,按试验裸土小区装土的方法将土装好,然后取相当于 2 mm 厚的过筛干土壤,将其与 Jag C162 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,静置一段时间在其表面均匀地喷撒 2 L 水,使其与下层土壤很好的融合,将其放置 15 h 即可试验。

试验设计: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 C162 剂量为 1,3,5 g/m² 的组合试验 12 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 C162 剂量为 1,3,5 g/m² 的组合试验 12 场;各场试验重复 1 次,共进行试验 40 场。试验开始后,出现产流后在

小区的出口接样,产流后前 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 C162 对降雨入渗过程的影响

坡面降雨入渗的过程可分为 3 个阶段:(1)初渗阶段,此时的入渗能力大于降雨强度,全部降雨就地入渗,地表没有产生径流,入渗率则等于降雨强度;(2)入渗衰退阶段,当表土已经饱和,地表开始积水,此时的入渗衰退,并随含水量的增加而减少;(3)稳渗阶段,此时入渗已经达到稳渗,基本保持稳定状态。

2.1.1 不同降雨强度下撒施 Jag C162 对降雨入渗过程的影响 将同坡度(15°坡度)不同降雨强度下,裸土和撒施 3 种不同剂量 Jag C162 时段入渗率随时间的变化点绘如图 1 所示。

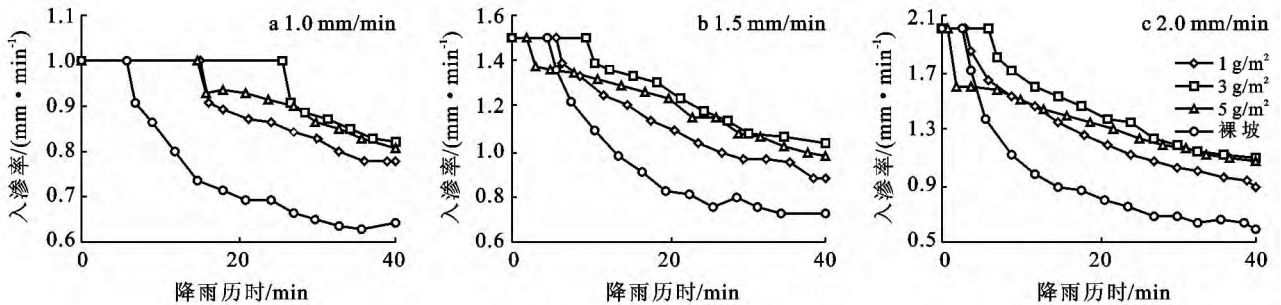


图 1 不同降雨强度下撒施 Jag C162 对入渗率随降雨过程变化的影响

从图 1 可以看出,在各降雨强度条件下,撒施不同剂量 Jag C162 后,入渗率都随降雨时间的增加而逐渐减少。小剂量(1 g/m²)和中剂量(3 g/m²)下,随时间的增加,入渗率减少的趋势比较一致,而大剂量(5 g/m²)下,入渗率在降雨初始阶段减少速率比较大,经过一段时间,减少速率逐渐变小。在同一降雨时间内,裸土和撒施不同剂量 Jag C162 的入渗率的大小为 3 g/m²>5 g/m²>1 g/m²>裸土。图 1 还可以看出,在不同降雨强度条件下,裸土的入渗曲线都显示了一个大致相同的趋势,产流形成后,在最初的短时间内,入渗率急剧减少,然后逐步地趋于稳定,最终入渗率很低。施放 Jag C162 的入渗率随时间下降幅度比较平缓,产流时间相对滞后,其中撒施 3 g/m² 的土壤产流时间最长,其次为撒施 1 g/m² 的土壤,撒施 5 g/m² 的土壤产流所需时间最短。到降雨结束时,施放 Jag C162 的入渗过程基本都没有达到稳定入渗阶

段,入渗率减小的虽然很平缓,但也没有达到稳定入渗率。各降雨强度下,降雨 30 min 时裸土基本都到了稳渗阶段,稳定入渗率为 0.63~0.74 mm/min,而撒施 Jag C162 的入渗率都没有达到稳定入渗率,但还是显著地高于裸土,其平均入渗率分别增加了 22.95%~49.92%,32.64%~75.96%和 30.39%~75.84%。

对比图 1 中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,裸土达到稳定时的入渗率和此时撒施 Jag C162 的平均入渗率相对有所增加。其原因可能是随着雨强的增大,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^[21]。

2.1.2 不同坡度下撒施 Jag C162 对降雨入渗过程的影响 同降雨强度(1.5 mm/min)不同坡度下,裸土和撒施 3 种不同剂量 Jag C162 的入渗曲线如图 2 所示。

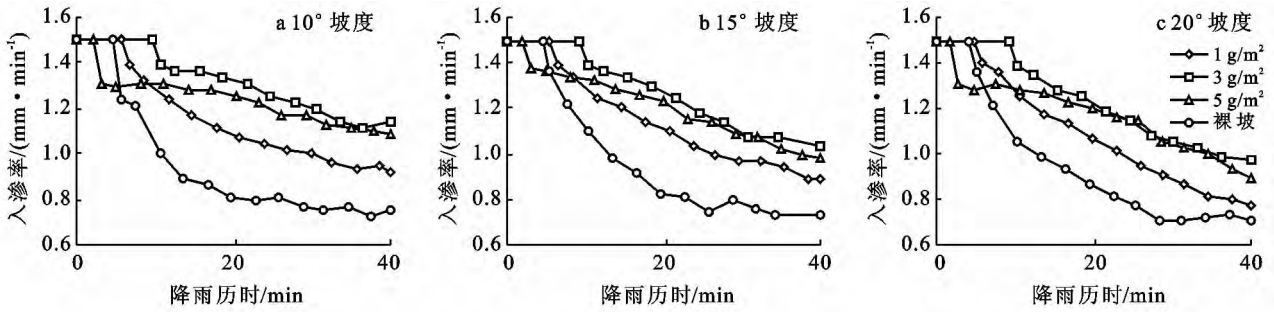


图2 不同坡度下撒施 Jag C162 对入渗率随降雨过程变化的影响

从图2可以看出,在各坡度下,撒施不同剂量 Jag C162 后,入渗率都随降雨时间的增加而逐渐减少。小剂量(1 g/m²)和中剂量(3 g/m²)下,随着时间的增加,入渗率减少的趋势比较一致,而大剂量(5 g/m²)下,入渗率在刚开始降雨时减少速率比较大,经过一段时间,减少速率逐渐变小。在同一降雨时间下,裸土和撒施不同剂量 Jag C162 的入渗率的大小为 3 g/m² > 5 g/m² > 1 g/m² > 裸土。由图2可见,在各坡度条件下,裸土的入渗曲线都显示了一个大致相同的趋势,产流形成后,在最初的短时间内,入渗率急剧减少,然后逐步地趋于稳定,最终入渗率很低,其中撒施 3 g/m² 的土壤的产流时间最长,其次为撒施 1 g/m² 的土壤,撒施 5 g/m² 的土壤的产流所需时间。到降雨结束时,撒施 Jag C162 的入渗过程基本都没有达到稳定入渗阶段,较少情况下入渗率减小速率虽然很小,但也没有达到稳定入渗率。各坡度下,在降雨 30 min 时,裸土基本都到了稳渗阶段,稳定入渗率为 0.71~0.75 mm/min,而撒施 Jag C162 的入渗率都没有达到稳定入渗率,但还是显著地高于裸土,其平均入渗率分别增加了 13.70%~26.63%, 41.21%~54.22% 和 34.53%~48.83%。

对比图2中不同坡度下入渗率变化曲线可以得出,随着坡度的增大,裸土达到稳定时的入渗率和此时撒施 Jag C162 的平均降雨入渗率都减小。造成这一现象的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,水层沿水平方向的压力增大,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。

由图1—2可以看出,撒施 Jag C162 可增加降雨入渗,主要是由于 Jag C162 遇水可形成胶体,不但能有效地维护土壤团聚体的结构,而且能形成新的团聚体,增强了土壤结构的稳定性,有效地缓解了雨滴对土壤表面的打击,增加了土壤总孔隙率和毛管孔隙度,提高了入渗性能,大大降低了地表流速,产流时间

推迟,入渗时间增加,从而增加降雨入渗。其次,在土壤表面撒施一定的 Jag C162 可有效地减少土壤的封闭作用,抑制结皮的形成,从而增加降雨入渗,但撒施的剂量超过一定的范围,反而会减少入渗率,不同雨强和不同坡度下撒施 5 g/m² Jag C162 的条件下入渗效果都较 3 g/m² 的条件下有所降低,究其原因可能是由于 Jag C162 加入过量,使过量的 Jag C162 随水分进入到土壤颗粒的孔隙当中,降低了土壤孔隙度,一定程度上抑制了水分入渗过程。随降雨过程的进行,雨滴不断打击,一方面使黏粒分散,堵塞土壤表层孔隙,另一方面使土壤颗粒紧密堆积,从而造成土壤封闭,形成土壤结皮,因而入渗率随降雨时间逐渐降低。

2.2 撒施 Jag C162 对入渗的强化效应

2.2.1 不同降雨强度下撒施 Jag C162 对入渗的强化效应

降雨强度是影响入渗量的重要因素之一。

从图3中可以看出,撒施 Jag C162 的降雨入渗量明显高于裸土的入渗量,在不同剂量下,降雨入渗量随雨强的增加而呈现递增变化总趋势,各剂量下的增加速率不一致。小剂量下,降雨入渗量随雨强增大的增速相对平缓,中剂量和大剂量降雨入渗量随雨强增大的增速不一致,1.5 mm/min 雨强为转折点,在该点之前撒施 3 g/m² Jag C162 的土壤缓慢增大,降雨入渗量变化较小,撒施 5 g/m² Jag C162 的土壤的增速比较大,超过该点,撒施 3 g/m² Jag C162 的降雨入渗量随雨强的增大而快速增大,撒施 5 g/m² Jag C162 的土壤的增速相比略有减小。从图3中还可以看出,小雨强和大雨强下撒施 3 g/m² Jag C162 的降雨入渗量最大,中雨强下 3 种剂量的降雨入渗量基本一致,相差无几。表2为不同降雨强度下撒施 Jag C162 的强化入渗效应。从表2中可以看出,在各雨强下,相对于裸土,撒施 Jag C162 的土壤都有增加入渗的作用,其中撒施 3 g/m² 的入渗效应比较明显,入渗量最大可增加 56.70%。撒施 1 和 5 g/m² Jag C162 的入渗效应相比,在 1.0 mm/min 雨强下,撒施 1 g/m² Jag C162 的降雨入渗效应大于撒施 5 g/m²

Jag C162 的土壤,在 2.0 mm/min 雨强下,撒施 1 g/m² Jag C162 的降雨入渗效应小于撒施 5 g/m² Jag C162 的土壤。

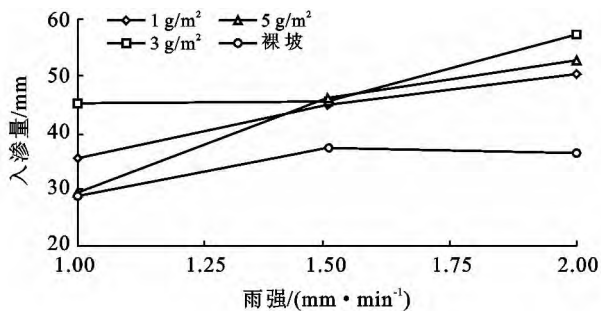


图 3 裸土和撒施不同剂量 Jag C162 下入渗量随降雨强度的变化

表 2 不同降雨强度下撒施 Jag C162 的强化入渗效应

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	入渗量/mm				强化入渗效应/%		
	裸坡	撒施 Jag C162 的剂量/(g·m ⁻²)			撒施 Jag C162 的剂量/(g·m ⁻²)		
		1	3	5	1	3	5
1.0	28.8117	35.7460	45.1480	29.1856	0.2407	0.5670	0.0130
1.5	37.5268	45.0522	45.5143	46.1657	0.2005	0.2128	0.2302
2.0	36.6520	50.4914	57.1950	52.9293	0.3776	0.5605	0.4441

表 3 为不同坡度下撒施 Jag C162 的强化入渗效应。从表 3 中可见,在各坡度下,相对于裸土,撒施 Jag C162 的土壤都有增加入渗的作用,其中撒施 3 g/m² Jag C162 的入渗效应比较明显,入渗量最大可增加 42.46%。比较不同坡度下,由撒施不同剂量 Jag C162 的降雨入渗效应可以看出,大坡度下的入渗量增加的百分比均小于小坡度,表明随着坡度的增大,撒施不同剂量的 Jag C162 的入渗效应呈现减小趋势。

表 3 不同坡度下撒施 Jag C162 的强化入渗效应

坡度/ (°)	入渗量/mm				强化入渗效应/%		
	裸坡	撒施 Jag C162 的剂量/(g·m ⁻²)			撒施 Jag C162 的剂量/(g·m ⁻²)		
		1	3	5	1	3	5
10	36.6480	45.2766	52.2072	47.5293	0.2354	0.4246	0.2969
15	37.5268	45.0522	45.5143	46.1657	0.2005	0.2128	0.2302
20	36.9905	42.7163	48.6244	45.2200	0.1548	0.3145	0.2225

3 结论

(1) 随着降雨时间的增加,裸土和撒施 Jag C162 的降雨入渗率都减小,但裸土的入渗率减小速率大于撒施 Jag C162 的土壤。裸土经过一段时间后入渗达到稳定状态,而撒施 Jag C162 的入渗率基本上都没有达到稳定入渗率。裸土达到稳定时的平均入渗率小于此刻对应的撒施 Jag C162 的平均入渗率,撒施

2.2.2 不同坡度下撒施 Jag C162 对入渗的强化效应 图 4 为裸土和撒施不同剂量 Jag C162 下降雨入渗量随坡度变化关系。从图 4 中可以看出,撒施 Jag C162 的降雨入渗量明显高于裸土的入渗量,裸土的入渗量随坡度的增大略微有所增加,没有太大的变化,在撒施 1 和 5 g/m² 剂量 Jag C162 的土壤下,入渗量随坡度的增加而呈现递减变化趋势,而且减少速率基本一致,比较平缓,撒施 3 g/m² 剂量 Jag C162 的降雨入渗量随坡度先减少后增加。从图 4 中还可以看出,小坡度和大坡度下撒施 3 g/m² Jag C162 的降雨入渗量最大,中坡度下 3 种剂量的降雨入渗量基本一致,相差无几。

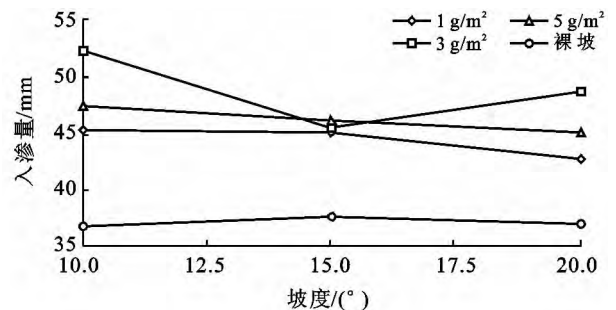


图 4 裸土和撒施不同剂量 Jag C162 下入渗量随坡度的变化

Jag C162 的入渗率最多增加了 75.96%。撒施 Jag C162 后,初始产流的时间也相应地推迟,撒施 3 g/m² Jag C162 的土壤的产流时间最长。

(2) 同坡度不同雨强和同雨强不同坡度下,撒施 Jag C162 后,入渗率都有显著的提高,撒施 3 g/m² Jag C162 的降雨入渗效果比其他两个好。随着降雨强度增大,裸土的稳定入渗率和撒施 3 种不同剂量下的平均入渗率有增大的趋势。随着坡度的增加,裸土

的稳定入渗率和撒施 3 种不同剂量下的平均入渗率逐渐减小。

(3) 撒施 Jag C162 的入渗量明显高于裸土的入渗量,在不同剂量下,入渗量随雨强的增加而呈现递增变化总趋势,各剂量下的增加速率不一致;入渗量随坡度的增加逐渐减小。

(4) 撒施 Jag C162 对坡面降雨入渗有明显的调控效应,可大幅度的增加入渗率,减少地表径流和土壤侵蚀。

由试验结果可以得出,撒施 Jag C162 可以提高降雨入渗率,增加降雨入渗量,具有很好的强化入渗效应。无论是同坡度不同雨强还是同雨强不同坡度条件下,撒施 3 g/m^2 Jag C162 的入渗率和入渗量增加量最多,最大可分别增加 75.96% 和 56%,而且入渗效应也是最显著的。这与许多学者研究高分子化合物(如 PAM)对降雨入渗的影响的结果^[16-19]基本一致。但是仍有一些学者的研究与之不同。陈渠昌等^[17]研究认为当 PAM 用量达到 3 g/m^2 ,反而降低了降雨入渗速率。这可能与高分子化合物 PAM 和 Jag C162 的化学组成、性能有很大的关系,除此之外试验土壤、试验条件的不同也可能是造成试验结果不同的原因。

[参 考 文 献]

- [1] 李智广,曹炜,刘秉正,等.我国水土流失现状与发展趋势研究[J].中国水土保持科学,2008,6(1):57-62.
- [2] 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.
- [3] 黄秉维.谈黄河中游水土保持问题[J].中国水土保持,1983(1):8-13.
- [4] 朱显谟,蒋定生,周佩华,等.试论黄土地区水土保持的战略问题[J].水土保持通报,1984,3(1):15-18.
- [5] Francisco L S, Ricardo P S. Improving infiltration of irrigated mediterranean soils with polyacrylamide[J]. J. Agric. Eng. Res., 2000,76(1):83-90.
- [6] Lentz R D, Sojka E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration[J]. Soil Science, 1994,158(4):274-282.
- [7] Miller W P. Infiltration and soil loss of three gypsum amended ultisols under simulated rainfall[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1987,51(5):1314-1320.
- [8] Gardiner D T, Sun Q. Infiltration of wastewater and simulated as affected by polyacrylamide[J]. J. Am. Water Resour. Assoc., 2002,38(4):1061-1067.
- [9] Yu J, Lei T, Shainberg I, et al. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2003,67(2):630-636.
- [10] Mitchell A R. Polyacrylamide application in irrigation water to increase infiltration[J]. Soil Sci., 1986,141(5):353-358.
- [11] Onofiok O, Singer M J. Scanning electron microscopes studies of soil surface crusts formed by simulated rainfall[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984,48(5):1137-1143.
- [12] Ben-Hur M, Keren R. Polymer effects on water infiltration and soil aggregation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997,61(2):565-570.
- [13] Lentz R D, Shainberg I, Sojka R E, et al. Preventing irrigation furrow erosion with small applications of polymers[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992,56(6):1926-1932.
- [14] Levy G J, Levin J, Gal M, et al. Polymers' effects on infiltration and soil erosions during consecutive simulated sprinkler irrigations[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992,56(3):902-907.
- [15] Green V S, Stott D E, Norton L D, et al. Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000,64(5):1786-1791.
- [16] 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(1):入渗[J].土壤学报,2003,40(2):178-185.
- [17] 陈渠昌,雷廷武,李瑞平,等.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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.