

施加 PAM 的坡地降雨入渗过程及其模型研究^x

刘纪根¹, 雷廷武^{1,2}, 夏卫生¹, 潘英华¹, 张晴雯¹

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 作为一种新型高效的土壤结构改良剂 PAM, 在一定条件下能显著地提高土壤入渗能力, 减小坡面径流。采用室内人工模拟降雨试验, 研究了不同 PAM 覆盖度下降雨产流随时间的动态变化及其与雨强、坡度的关系, 以及入渗率随时间的变化规律, 分析了 PAM、坡度、雨强对入渗率的影响。结果表明, 地表施加 PAM 后土壤的入渗率及稳定入渗率都比未施 PAM 显著提高。通过对比施加 PAM 后 Kostiakov 入渗模型与 Horton 入渗模型的显著性, 表明 Horton 入渗公式的适用性更好。

关键词: PAM; 产流历时; 入渗率

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2001)03-0051-04

Processes and Model of Rainfall-Infiltration on Slope Land Treated with PAM

LIU Ji-gen¹, LEI Ting-wu^{1,2}, XIA Wei-sheng¹, PAN Ying-hua¹, ZHANG Qing-wen¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Faculty of Irrigation and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract: PAM, as a new efficient soil amendment, can significantly increase soil infiltration rate and reduce runoff. Rainfall simulator was used in this study to investigate the relationships between the time of runoff yield and rainfall intensity and slopes, as well as the dynamic process of infiltration rate change with time, for slope land at different coverage of PAM. It was found that infiltration rate and stable infiltration rate are increased when covered with PAM. Kostiakov and Horton infiltration models were used to analyze their infiltration processes.

Key words: PAM; time of runoff yield; infiltration rate

1 引言

入渗是影响降雨产流规律的最重要过程之一, 是模拟土壤侵蚀过程的基本输入变量, 也是我们实施水土保持规划需要认真考虑的重要因素。在黄土高原, 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。PAM(聚丙烯酰胺)作为土壤结构改良剂或稳定剂, 可以增加表层土壤颗粒之间的凝聚力, 维护良好的表土结构, 防止土壤结皮, 增加土壤的入渗率, 减少地表径流, 从而可以防止或减少土壤侵蚀。早在50年代就有过这方面的探索, 早期大多数研究, PAM用量较大, 经济上不可行, 但表明了其潜在的科学价值。PAM的早期研究主要是着重于土壤侵蚀方面。自1991年起, 开始注意到了它的入渗效果。如使用一定量的 PAM, 可增加15%~50%的入渗率, 减少80%~99%因径流引起的土壤流失量。Lentz 和 Shainberg(1992) 试验研究表明: 土壤经 PAM 处理后, 降雨的入渗率可提高一个数量级, 我国学者蒋定生(1995) 等人的研究发现, 结构好与不好的黄土其入渗率可相差1~2个数量级。

使用 PAM 作为土壤结构改良剂增加降雨入渗率, 提高水资源的利用率不仅是发展旱作农业, 提高土地生产力和农业抵御旱灾能力的重要途径, 还可以大大降低土壤侵蚀及由此产生的生态环境问题。

2 试验方法

试验采用中国科学院水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的双向对喷式人工模拟降雨装置, 降雨过程由计算机系统自动控制, 雨强控制在1.50~1.70 mm/min 之间。试验土槽长8 m, 宽3 m, 深0.3 m, 坡度可在0~30°之间调整。试验采用10°, 20°, 25°共3个坡度。试验时将3 m宽的土槽分为15个小土槽, 每个小土

x 收稿日期: 2001-06-19 * 引进国外杰出人才资金、(内蒙) 山丘区雨水储蓄农业高效利用产业化示范工程项目资助(982602)

作者简介: 刘纪根, 男, 生于1975年, 在读硕士。主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究工作。

槽 PAM 的覆盖度分别为 0, 40%, 60%, 80%, 并设有 1 个麦草覆盖处理。试验设 3 个重复。供试土壤为安塞黄绵土, 采用耕层(0~20 cm)土壤。颗粒组成为: 砂粒(> 0.05 mm)占 12.6%, 粉粒(0.05~0.005 mm)占 72.3%, 粘粒(< 0.005 mm)占 15.1%, 属轻质壤土。土壤有机质含量介于 0.3%~0.45% 之间。

试验前先将土壤风干, 使土壤含水量均一。装土时先在土槽中装 15 cm 左右的沙子, 上面盖一层沙布, 再装 15 cm 左右的土, 装土容重控制在 1.09 g/cm^3 左右, 用以模拟耕层土壤。然后把与干土混合好的 PAM 均匀撒在土表上。

试验前在各个小土槽的上、中、下部分别放雨量筒一个, 标定每个土槽的实际雨强。试验中记录产流随时间的变化, 即每隔 3~5 min 采 1 次样, 记下采样时间及采样体积, 以此估算径流变化过程。

3 试验理论依据

下垫面水量平衡方程为:

$$R(t) = \int I dt - \int I_n dt - \int e dt - \int S_d dt - \int f dt \quad (1)$$

式中: $R(t)$ 为地表径流; I 为降雨强度; f 为入渗强度; I_n 为植物截留率; e 为蒸散发率; S_d 为填注率。

在一次降雨过程中, I_n , e 及 S_d 量级甚小, 变化较小, 且不直接参与径流形成, 可以忽略。因此, 参与径流形成的主要因素为首末两项 I 和 f , 其量级大, 变化较大。于是可简化式(1)为

$$R(t) = \int I dt - \int f dt$$

微分上式可得

$$\frac{dR(t)}{dt} = r = I - f$$

据此, 由坡面降雨-径流随时间变化的数据, 可分析坡面降雨入渗特性。

4 结果与分析

4.1 开始产流时间与坡度、雨强的关系

贾志军等人利用野外人工降雨试验研究了黄土母质和含水率对入渗产流的影响, 认为土壤初始含水率对起流历时和达到稳定入渗率的时间有很大的影响。含水率越高, 起流历时以及达到稳定入渗的时间越短。蒋定生等^[7]研究了地面坡度对降雨入渗影响的试验, 认为地面开始产流时间与坡度呈指数关系。随着地面坡度的增大, 将提早产生径流。黄明斌^[4]综合于静洁、蒋定生等人的研究成果, 发现开始产流时间 t_p 与平均雨强和坡度有如下关系:

$$t_p = c_1 i^{c_2} e^{c_3(1 - \sin A)}$$

式中: c_1 , c_2 , c_3 是主要随土壤类型、植被条件和坡度等变化的参数; i 是平均雨强; A 是坡度。

采用上式, 对本试验的降雨径流资料进行了分析, 所得回归方程为:

裸地:	$t_p = 17.462i^{-0.378} e^{0.885(1 - \sin A)}$	($n = 9, R^2 = 0.97$)
麦草覆盖:	$t_p = 29.371i^{-0.497} e^{0.320(1 - \sin A)}$	($n = 9, R^2 = 0.93$)
PAM 覆盖度 40%:	$t_p = 4.276i^{-2.806} e^{1.017(1 - \sin A)}$	($n = 9, R^2 = 0.95$)
PAM 覆盖度 60%:	$t_p = 7.815i^{-2.209} e^{0.503(1 - \sin A)}$	($n = 9, R^2 = 0.99$)
PAM 覆盖度 80%:	$t_p = 3.611i^{-1.798} e^{1.880(1 - \sin A)}$	($n = 9, R^2 = 0.99$)

从上可知, 当雨强一定时, 开始产流时间与坡度正弦呈负指数关系, 即随着坡度的增加, 产流开始时间提前。当坡度一定时, 开始产流时间与雨强呈幂函数关系, 指数为负, 即随着雨强的增大, 开始产流时间减小, 产流提前。

4.2 入渗速率与时间关系模型

将 10, 20, 25° 坡度下 3 种不同 PAM 覆盖度入渗值点绘在坐标纸上, 其入渗曲线如图 1、2、3。用 Kostikov 模型: $f = Bt^{-n}$ 和 Horton 模型: $f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$ 分别进行拟合, 所得入渗参数列表 1。从表 1 可以看出, Kostikov 入渗方程的参数 B 取值为 0.80~1.55 之间, 其与初始含水率和土壤容重有关, n 值变化于 0.05~0.25 之间, 反映入渗速率的递减程度, 其值越大, 入渗速率随时间递减越快。Horton 入渗方程中的 k 值变化于 0.08~0.57 之间, 稳渗率 f_c 变化于 0.34~1.13 mm/min 之间, 初渗率 f_0 变化于 1.09~1.91 mm/min 之间。总的说来, Horton 入渗公式拟合度高于 Kostikov 入渗公式, 说明 Horton 入渗公式的适用性较好。

表1 入渗拟合参数及特性

坡度	PAM 覆盖度	雨强 (mm/min)	稳渗率 (mm/min)	$f = Bt^{-n}$			$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$			
				B	n	R ²	f _c	f ₀	k	R ²
10°	0	1.63	0.69	1.31	0.16	0.81	0.69	1.69	0.10	0.88
	麦草	1.57	0.78	1.55	0.17	0.98	0.78	1.57	0.08	0.94
	40%	1.50	0.91	1.39	0.10	0.93	0.91	1.72	0.12	0.99
	60%	1.61	0.96	1.29	0.07	0.78	0.96	1.69	0.13	0.90
	80%	1.53	1.13	1.51	0.08	0.92	1.13	1.89	0.13	0.95
20°	0	1.53	0.52	0.99	0.16	0.85	0.52	1.12	0.14	0.80
	麦草	1.60	0.62	1.09	0.14	0.80	0.62	1.89	0.54	0.81
	40%	1.53	0.91	1.27	0.08	0.92	0.91	1.56	0.14	0.93
	60%	1.60	0.98	1.24	0.06	0.57	0.98	1.89	0.55	0.70
	80%	1.57	1.09	1.34	0.05	0.63	1.09	1.90	0.57	0.83
25°	0	1.70	0.34	0.80	0.21	0.88	0.34	1.09	0.12	0.91
	麦草	1.63	0.37	1.03	0.25	0.72	0.37	1.85	0.18	0.91
	40%	1.57	0.73	1.14	0.11	0.87	0.73	1.48	0.13	0.99
	60%	1.60	0.79	1.30	0.12	0.86	0.79	1.50	0.11	0.97
	80%	1.53	0.89	1.39	0.11	0.69	0.89	1.91	0.14	0.88

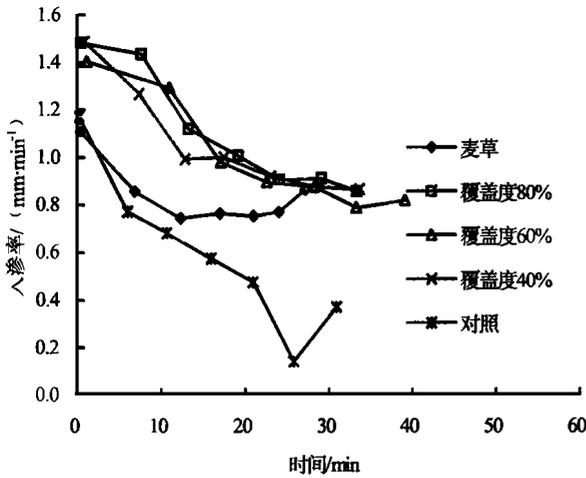


图1 10°时入渗率与时间关系曲线

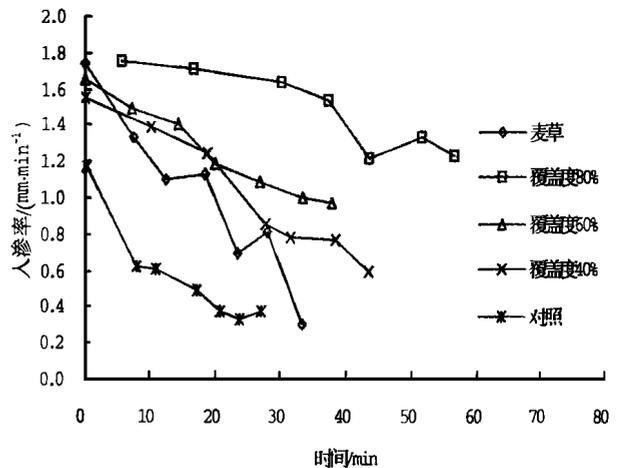


图2 20°时入渗率与时间关系曲线

4.3 PAM 覆盖度对入渗的影响

入渗率随着降雨历时的延长逐渐减小,并最终趋向一稳定值。PAM 可以增加土壤表层颗粒之间的凝聚力,维护或改善表土结构,防止土壤结皮,增加土壤的入渗力。从图1、2、3及表1看出,覆盖麦草与 PAM 后,其入渗率及稳定入渗率都显著的提高,覆盖 PAM 的效果比覆盖麦草的好,且随着 PAM 覆盖度的增加,其入渗率与稳定入渗率也增加。雨滴打击裸地,使地表结实,阻塞土壤空隙,造成土壤入渗率减小。地面覆盖麦草,使雨滴打击地面的动能变弱,因而水分有充分的时间向土壤深处渗透,从而可以增加入渗。覆盖 PAM 后,其阴离子增加了土壤的阳离子代换量,增强了水稳性团聚体的凝聚力和悬浮能力;其强大的胶结能力使降雨或径流对土粒的分离能力得到减小,保持了土壤的团聚体,减少结皮的形成,维持良好的空隙状况,增加入渗。

4.4 坡度对入渗的影响

地面坡度对降雨入渗的影响表现在2个方面:其一,降水在坡面上发生再分配;其二,随着地面坡度的变陡,

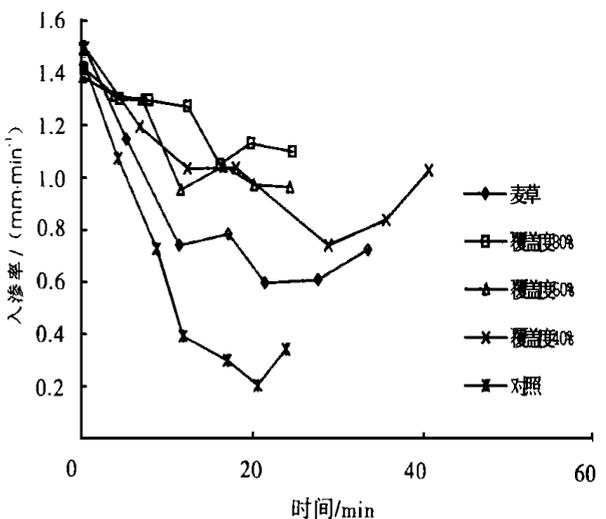


图3 25°时入渗率与时间关系曲线

降水入渗速率将明显降低。当地面有一定的坡度时,水向土中的入渗在纵剖面上为两维运动:¹水沿垂直地面方向的空隙下渗。²水沿平行地面方向的空隙运动。后者有时会出露地表,汇入地面径流。随着地面坡度的增大,土壤稳定入渗率减小,而冲刷量却增加。坡度增加,使水体沿坡的分力增大,水体沿坡下流的速度加大,水进入土壤的机会减少;另外,沿坡下流的水体一部分使土壤表层饱和,阻滞雨水入渗。所以,随着坡度的增加,土壤稳定入渗率减小。从表1可以看出,随着地面坡度的增加,3种PAM覆盖度下的稳定入渗率都逐渐减小。

4.5 雨强对入渗的影响

无论入渗以何种方式,雨强影响均可分为两个阶段,地表积水前雨强对入渗率及入渗量均有明显影响;积水后其影响甚小。这是因为地表积水前受控于雨强,地表积水后入渗主要取决于土壤导水特性。雨强增大,虽然会使坡面水深加大,但水深加大的速率远低于雨强增大的速率。这是因为坡面流速随水深加大而增加,流速的增加又制约了水深的增加。各次试验表明,坡面最大水深均不足1 mm,因此水深对入渗的影响甚小。

在连续降雨条件下,土壤最初阶段具有较大的入渗率,随着入渗水量的增加及入渗锋面的延伸,入渗率变小并趋于稳定,其值接近土壤的水力传导率,这个值称为稳定入渗率(f_c)。随着雨强增大,3种PAM覆盖度下稳渗率都有增大的趋势。究其原因,是由于锋内土壤饱和度随着雨强增大,饱和度的增加使相应的导水率也增加。在毛管吸力梯度逐渐减小的情况下,导水率的增加又使稳渗率增大。

5 结论

(1)当雨强一定时,开始产流时间与坡度正弦呈负指数关系,即随着坡度的增加,开始产流时间提前。当坡度一定时,开始产流时间与雨强呈幂函数关系,随着雨强的增大,开始产流时间减小,即产流提前,有无PAM覆盖都具有相同的规律。

(2)Horton入渗公式拟合度高于Kostiakov入渗公式,说明Horton入渗公式的适用性较好。Horton入渗方程中的 k 值变化于0.08~0.57之间,稳渗率 f_c 变化于0.34~1.13 mm/min之间,初渗率 f_0 变化于1.09~1.91 mm/min之间。

(3)覆盖麦草与PAM后,其入渗率及稳定入渗率都显著的提高,覆盖PAM的效果比覆盖麦草的好,且随着PAM覆盖度的增加,其入渗率与稳定入渗率也增加。

(4)随着地面坡度的增加,3种PAM覆盖度下的稳定入渗率都逐渐减小。随着雨强增大,3种PAM覆盖度下稳渗率有增大的趋势。

参考文献:

- [1] 袁建平,蒋定生,甘淑.影响坡地降雨产流历时的因子分析[J].山地学报,1999,17(3):259-264.
- [2] 袁建平.纸坊沟流域土壤入渗速率随空间和治理度之变异规律[J].水土保持学报,2000,14(4):121-124.
- [3] 刘贤赵,黄明斌.大尺度流域不同地貌类型区水土保持减水效益分析[J].水土保持学报,2001,15(1):90-94.
- [4] 黄明斌,李玉山,康绍忠.坡地单元降雨产流分析及平均入渗速率计算[J].水土保持学报,1999,13(1):63-68.
- [5] 王百田,王斌瑞.黄土坡面地表处理与产流过程研究[J].水土保持学报,1994,8(2):18-24.
- [6] 王玉宽,王占礼,周佩华.黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析[J].水土保持学报,1991,5(2):25-31.
- [7] 蒋定生,范兴科,李新华,等.黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J].水土保持学报,1995,9(2):1-8,10-13.
- [8] 周国逸,潘淮涛.林地土壤的降雨入渗规律[J].水土保持学报,1990,4(2):79-84.
- [9] 夏海江,杜尧东,孟维忠.聚丙烯酰胺防治坡地土壤侵蚀的室内模拟试验[J].水土保持学报,2000,14(3):14-17.
- [10] 杜尧东,夏海江,刘作新,孟维忠.聚丙烯酰胺防治坡地水土流失田间试验研究[J].水土保持学报,2000,14(3):10-13.
- [11] Mitchell A R. Polyacrylamide application in irrigation water to increase infiltration[J]. Soil Science, 1986, 141(5): 353-358.
- [12] Lentz R D, Sojka R E. Field results using Polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration[J]. Soil Science, 1994, 158(4): 274-282.
- [13] 赵晓光.黄土塬区坡面水蚀作用过程[J].水土保持学报,2000,14(3):122-124.
- [14] 李勇,等.陕北黄土高原陡坡耕地土壤侵蚀变异的格局[J].水土保持学报,2000,14(4):17-21.
- [15] 张光辉.国外坡面径流分离土壤过程水动力学研究进展[J].水土保持学报,2000,14(3):112-115.