

上方来水对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响

陈洪松^{1,2}, 邵明安^{2,3}, 王克林¹

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125; 2. 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤水利部

侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 在防止土壤侵蚀和雨后抑制蒸发的条件下, 利用室内模拟降雨试验, 研究了上方来水对坡面降雨入渗、湿润锋运移以及土壤水分再分布的影响。结果表明: 对于初始含水量很低的土壤, 与上方无来水相比, 上方来水时降雨入渗过程中入渗率有一个上升的阶段, 但平均入渗率反而降低; 在降雨入渗初期, 由于上方来水的沿程入渗, 上方来水对坡面湿润锋运移的影响较大, 但随后几乎没有影响, 湿润锋的运移主要与基质势梯度有关; 土壤水分沿坡面呈“波浪形”分布是坡面径流的波动性、上方来水(径流)的沿程入渗以及侧向沿坡向下流等综合作用的结果。

关键词: 上方来水; 坡面; 降雨入渗; 土壤水分; 再分布

中图分类号: S152; S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2005)02-0233-05

在我国干旱、半干旱地区, 尤其是在严重土壤侵蚀和频繁干旱并存的黄土高原地区, 水资源缺乏是生态环境建设和农业可持续发展的关键性限制因素, 如何有效拦蓄径流、增加降雨入渗对植被恢复重建具有重要的现实意义^[1,2]。结合干旱缺水的实际情况, 人们提出了一种通过汇集地表径流(上方来水)来提高造林成活率的集水造林措施, 取得了许多成效^[3,4]。关于上方来水对侵蚀产沙的影响, 人们已经进行了较为深入的研究, 但上方来水对降雨入渗、产流过程以及土壤水分再分布规律的影响却有待于系统而深入的研究^[5~7]。本文主要采用室内模拟降雨试验的方法, 在防止土壤侵蚀和雨后抑制蒸发的条件下, 初步分析上方来水对坡面降雨入渗、湿润锋的运移以及土壤水分再分布的影响, 以期推动黄土高原地区植被恢复重建的进程。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

室内模拟降雨试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室降雨大厅的侧喷区进行, 喷头高度为 16 m, 与天然降雨特性基本相似^[8]。供试土壤采自长武王东沟小流域沟坡 50~100 cm 土层, 去除植物根系、石块等杂物, 过 10 mm 筛后风干备用。按照国际土壤质地分类制, 供试土壤为粘壤土, 砂粒、粉粒、粘粒含量分别为 29.7%、37.2%和 33.1%。

试验所用土槽为自行设计的有机玻璃钢槽, 规格为: 长 × 宽 × 高 = 382 cm × 30 cm × 60 cm, 坡度可在 0~30° 之间调节, 其两面为有机玻璃, 其余均为钢结构。槽底设有直径为 3 mm 的圆孔(垂直、水平均间隔 5 cm)。为了防止雨滴溅入槽内, 槽顶部内侧安装了高 10 cm 的薄铁片。槽下端设有导流装置, 可以观测坡面产流过

收稿日期: 2003-12-05; 修订日期: 2004-04-20

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90102012); 国家杰出青年科学基金资助项目(40025106); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(01200220055413)

作者简介: 陈洪松(1973-), 男, 湖北通山人, 中国科学院亚热带农业生态研究所副研究员, 博士, 主要从事土壤物理与水土保持方面的研究。E-mail: hbchs@isa.ac.cn

程。从槽顶向下,有机玻璃板上每隔50 cm布设一组测点,用于记录不同时刻湿润锋的位置。

1.2 试验方法

槽底部铺设一层5 cm厚的细砂子,其上以5 cm为间隔分层装土(土与砂子用一层粗棉纱布隔开),容重控制在 1.3 g/cm^3 ,土壤初始容积含水量为4%。装土完毕后,将土槽调整到试验所需的坡度,放置约14 h后用于第二天上午的降雨试验。为了防止土壤侵蚀,降雨入渗过程中,土壤表面覆盖一层粗棉纱布(湿润,但不滴水)。降雨结束后,粗棉纱布上再覆盖一层塑料布,抑制雨后蒸发。每次试验结束后,重新装土。与对照试验(上方无来水)相比,上方来水试验是将距坡顶0~182 cm处土壤表面覆盖一层塑料布,但距坡顶182 cm以下棉纱布上覆盖了一层粗砂子(直径约为0.3~0.8 cm,厚约1 cm),防止径流过大而产生土壤侵蚀。在计算降雨入渗、产流时,仅考虑没有覆盖塑料布的坡面(距坡顶182~382 cm)。试验的降雨强度为 0.5 mm/min ,降雨历时为120 min,坡度为 15° 。

产流开始后,记录开始产流时间,并每隔3~5 min观测一次产流量;雨停后,记录径流持续时间及其相应的产流量。降雨入渗过程中,每隔10 min观测一次湿润锋;再分布过程中,当天于雨后0.5、1、2、3、4、5、6、7、8、10 h观测湿润锋,以后每天(以雨后24 h为间隔)观测一次,直至湿润锋不易辨认为止。试验结束后,用土钻取土(两个重复,分别于槽的两侧取土)测定土壤水分沿坡面的分布。

产流后,各时段的降雨入渗率为

$$i = R \cos \theta - 10V / [(t_{i+1} - t_i) S] \quad (t - t_p) \quad (1)$$

式中 i 为降雨入渗率, mm/min ; R 为降雨强度, mm/min ; θ 为土槽坡度, ($^\circ$); t_i 、 t_{i+1} 为各时段始末时间, min ; t_p 为产流时间, min ; V 为各时段对应的产流量, mL ; S 为坡面面积, cm^2 。平均降雨入渗率为

$$\bar{i} = (P \cos \theta - R_s) / t \quad (2)$$

式中 \bar{i} 为平均降雨入渗率, mm/min ; P 为降雨量, mm ; t 为降雨历时, min ; R_s 为地表径流量, mm 。

2 结果与分析

2.1 上方来水对降雨入渗、产流的影响

与上方无来水的对照试验相比,上方来水时,坡面降雨入渗、产流过程具有较大的变化。由于上方来水的

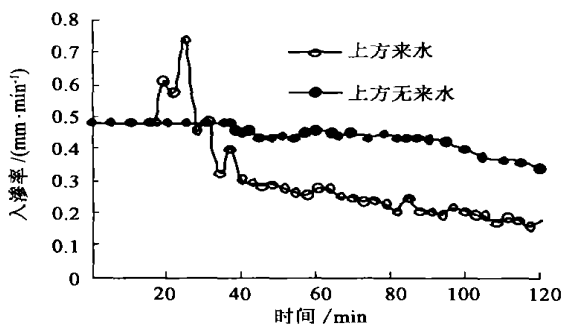


图1 上方来水对降雨入渗、产流的影响

Fig. 1 Effect of runoff from upslope on rainfall infiltration and overland flow

沿程入渗作用,上方来水时,降雨产流时间提前,降雨入渗率有一个增加的过程;随后,由于表层土壤水分较快接近饱和,加上径流速率过大,水分来不及入渗而形成径流流失,其入渗率迅速降低,甚至低于对照试验(图1)。若以120 min的平均降雨入渗率来比较,上方来水的平均入渗率为 0.355 mm/min ,低于对照试验的平均入渗率 0.439 mm/min ,表明上方来水并不一定提高降雨入渗量。同时,上述结果也表明,当土壤初始含水量很低时,降雨入渗主要受控于基质势梯度,而径流深度的影响很小^[9]。所以,如何设法延缓产流时间、降低径流速率,也是拦蓄地表径流、提高降雨入渗的一条有效途径。

2.2 上方来水对湿润锋运移的影响

上方无来水时,无论是在降雨入渗还是在土壤水分再分布过程中,湿润锋面都几乎平行坡面向下运移(图2)。至于湿润锋面的起伏,可能是由于装土的不均匀性引起的,而坡面径流的波动性和沿程入渗也可能是原因之一。上方来水时,由于上方来水的沿程入渗作用,在降雨入渗和再分布过程中,湿润锋运移深度都有沿

坡向下逐渐减小的趋势(图 3)。在降雨入渗初期(0~10 min),由于上方来水的沿程入渗作用,湿润锋运移速率沿坡向下递减,但随后坡面各处湿润锋运移速率逐渐趋于一致;在再分布过程中,湿润锋运移速率沿坡面没有明显的变化规律。上述结果表明,对于起始湿度很低的土壤,上方来水对坡面各处湿润锋运移速率的影响相对较小,湿润锋的运移主要与基质势梯度有关。

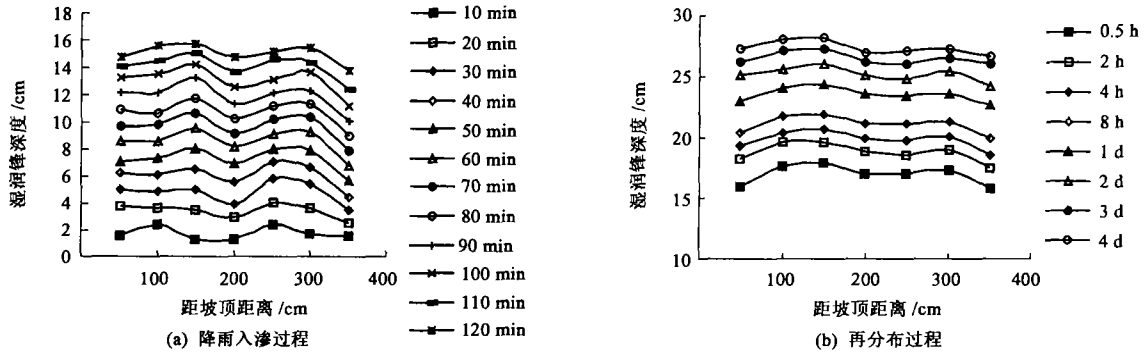


图 2 上方无来水时降雨入渗和土壤水分再分布过程中湿润锋面随时间的运移

Fig. 2 Wetting front movement with time during rainfall infiltration and soil water redistribution without runoff from upslope

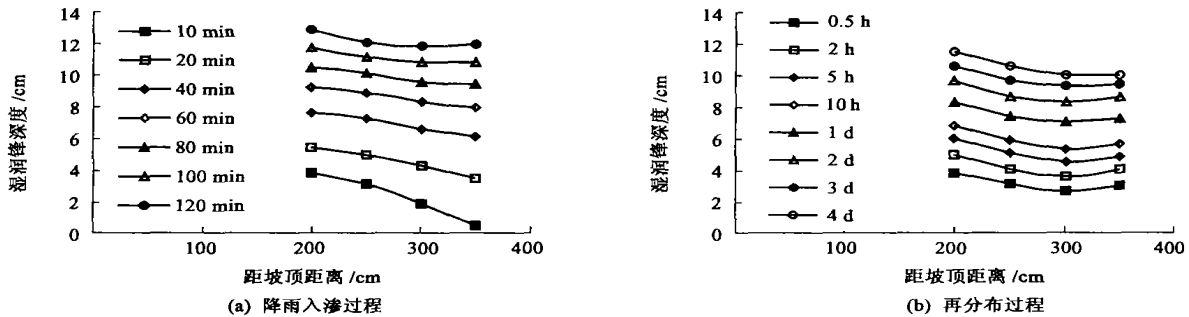


图 3 上方来水时降雨入渗和土壤水分再分布过程中湿润锋面随时间的运移

Fig. 3 Wetting front movement with time during rainfall infiltration and soil water redistribution with runoff from upslope

若以坡面各处不同时刻湿润锋的平均深度进行分析,则上方来水时湿润锋的运移过程与对照试验有较大的区别(图 4)。与对照试验相比,在降雨入渗过程中,上方来水的湿润锋运移速率经历了由快到慢的过程;在土壤水分再分布过程中,上方来水的湿润锋运移速率相对较低。由于上方来水时径流速率较大,坡面表层土壤水

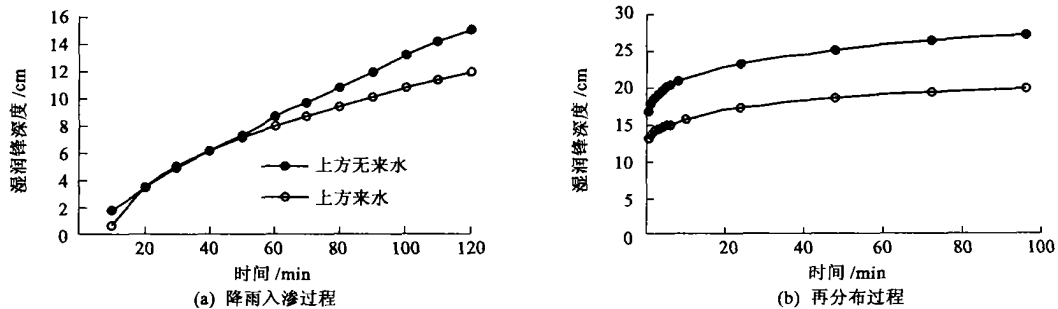


图 4 降雨入渗和土壤水分再分布过程中上方来水对湿润锋运移的影响

Fig. 4 Effect of runoff from upslope on wetting front movement with time during rainfall infiltration and soil water redistribution

比较快接近饱和而导致平均降雨入渗率降低, 降雨 50 min 后湿润锋深度和运移速率都低于对照试验。

2.3 上方来水对土壤水分再分布的影响

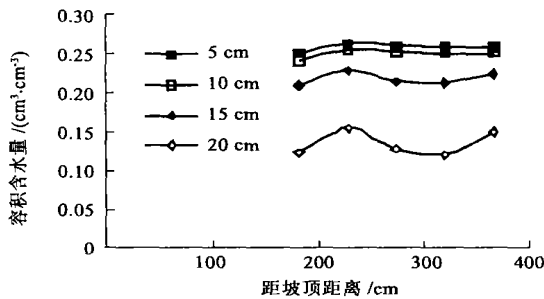


图5 上方来水对土壤水分沿坡面分布的影响(雨后4 d)

Fig.5 Effect of runoff from upslope on soil water distribution along the slope (4 days later after rainfall)

对于起始干燥的土壤, 上方无来水时, 降雨入渗过程中水分分布平衡点基本上以等速从土壤表层向深层移动(没有发生土壤侵蚀), 降雨入渗结束时坡面各层土壤水分趋向一致^[10]。不过, 在土壤水分再分布过程中, 由于重力的作用, 土壤水分有沿坡向下递增的趋势^[11]。在防止土壤侵蚀和雨后抑制蒸发的条件下, 上方来水时, 雨后4 d土壤水分沿坡面呈“波浪形”分布, 较深层表现更明显(图5)。至于距坡顶182 cm处(沿坡向下土壤水分第一测点)土壤水分较低, 主要是由于该处土壤水分在基质势梯度的作用下湿润其附近干燥土壤造成的。关于土壤水分沿坡面呈“波浪形”分布的原因, 李裕元^[12]认为表层土壤水分的波动主要是坡面径流的波动性引起的, 而深层土壤水分沿坡面的波动主要是土壤质地的空间变异导致土壤入渗性能的变化引起的。郑粉莉和高学田^[5]认为, 坡面上方侵蚀带的径流、产沙对下方侵蚀带的降雨入渗产生重要的影响, 坡面土壤水分的波动是坡面径流、侵蚀、产沙共同作用的结果。室内外模拟降雨试验结果表明^[13], 土壤水分沿坡面呈“波浪形”分布是坡面径流的波动性、上方来水(径流)的沿程入渗以及侧向沿坡向下流等综合作用的结果; 表层土壤水分的这种波动性会在再分布过程中向深层传递, 导致深层土壤水分也呈现波动性(图5)。当然, 微地貌、地形(坡度、坡位与坡向)、坡长、植被类型、降雨特征等因素对坡面土壤水分分布的波动性也有一定程度的影响^[1,2,5]。

3 结 论

在防止土壤侵蚀和雨后抑制蒸发的条件下, 通过室内模拟降雨试验(降雨强度为0.5 mm/min, 降雨历时为120 min, 坡度为15°, 研究了上方来水(径流)对坡面降雨入渗、湿润锋运移以及土壤水分再分布的影响, 结果表明: 对于初始含水量很低的土壤, 与上方无来水相比, 上方来水时, 坡面降雨入渗过程中入渗率有一个上升的阶段, 但平均降雨入渗率反而降低; 在降雨入渗初期, 由于上方来水的沿程入渗, 上方来水对湿润锋运移的影响较大, 但随后几乎没有影响, 湿润锋的运移主要与基质势梯度有关; 土壤水分沿坡面呈“波浪形”分布是坡面径流的波动性、上方来水的沿程入渗以及侧向沿坡向下流综合作用的结果, 表层土壤水分的这种波动性会在再分布过程中向深层传递, 导致深层土壤水分也呈现波动性。当然, 上述研究没有分析入渗和再分布过程中土壤水分的时空动态变化规律。在侵蚀和蒸发条件下, 上方来水对降雨入渗、产流及土壤水分再分布过程的影响还有待于进一步试验研究。

参考文献:

- [1] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 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[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 513-520.
- [3] 王进鑫, 黄宝龙. 世界旱区径流林业的研究进展[J]. 南京林业大学学报, 2000, 24(3): 5-10.
- [4] 彭祚登, 宋廷茂, 张鸿雁. 世界干旱半干旱地区集水造林技术研究应用的现状及其发展动向[J]. 世界林业研究, 1996(3): 29-36.
- [5] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000. 95-141, 160-166.
- [6] 孔亚平, 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙沿程变化的模拟试验研究[J]. 泥沙研究, 2003(1): 33-38.
- [7] Zheng Fenli, Huang C, Norton L D. Vertical hydraulic gradient and runoff water and sediments on erosion processes and sediment regimes[J].

- Soil Sci Soc Am J, 2000, 64(1): 4 - 11.
- [8] 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 27 - 30.
- [9] 李长兴. 陕北黄土室内土柱入渗实验研究[A]. 沈晋, 王文焰, 沈冰, 等. 动力水文实验研究[C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991. 145 - 161.
- [10] 张学栋, 姜述孟. 黄土降雨入渗过程中水分分布平衡点运动规律的研究[J]. 水土保持通报, 1986, 6(1): 58 - 63.
- [11] Philip J R. Hillslope infiltration: planar slopes[J]. Water Resour Res, 1991, 27(1): 109 - 117.
- [12] 李裕元. 坡地磷素与水分迁移试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- [13] 陈洪松. 黄土区坡地土壤水分运动与转化试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.

Effects of runoff from upslope on rainfall infiltration and soil water redistribution at a planar slope^{*}

CHEN Hong-song^{1,2}, SHAO Ming-an^{2,3}, WANG Ke-lin¹

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. 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 712100, China; 3. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The effects of runoff from upslope on rainfall infiltration, wetting front movement and soil water redistribution are studied based on the simulated rainfall at a planar slope, while soil erosion is prevented during rainfall infiltration and evaporation is stopped during soil water redistribution. The results show that when initial soil water content is very low, the infiltration rate at hillslope with runoff from upslope has an increasing process but the average one decreases, compared with the rainfall infiltration without runoff from upslope. Runoff from upslope has a marked effect on wetting front movement at the beginning of rainfall infiltration due to upslope runoff infiltration, and then has a little effect, which implies that the wetting front movement mostly depends on the matric suction. The wave distribution of soil water along hillslope results from the fluctuation of overland flow, upslope runoff infiltration, and lateral downslope flow.

Key words: runoff from upslope; planar slope; rainfall infiltration; soil water; redistribution

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 90102012) and the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (No. 40025106).