

文章编号: 1006 4710(2007) 02- 0144 05

土壤初始含水量对黄土坡地水分运动与转化特征的影响

张亚丽^{1,2}, 李怀恩¹, 张兴昌^{2,3}, 史淑娟¹, 王明¹

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 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; 3 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过室内模拟降雨试验, 研究了水蚀条件下初始含水量分别为 1. 3%、5. 7%、9. 7%、14. 2% 和 18. 9% 时黄土坡地水分的迁移特征。结果表明随着土壤初始含水量的增加, 坡面产流开始时间提前, 坡地平均径流系数和径流量呈线性增加趋势; 坡面径流含沙量与土壤初始含水量呈抛物线关系, 在 9. 7% 含水量左右存在最小值; 土壤初始含水量越高, 坡地累计入渗量越小, 雨水转化为土壤水分的比率越小。在土壤初始含水量较高的雨季, 建议采取保护性耕作措施, 增加雨水入渗率, 减少水土流失量。

关键词: 模拟降雨; 黄土坡地; 土壤初始含水量; 水分迁移; 影响

中图分类号: S157. 1; S158. 3 **文献标识码:** A

Effect of Soil Antecedent Water Content on Soil Water Movement and Transport on Loess Slope Land

ZHANG Ya-li^{1,2}, LI Hua'en¹, ZHANG Xing-chang^{2,3}, SHI Shu-juan¹, WANG Ming¹

(1. Northwest Water Resources and Environment Ecology Key Laboratory of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS, State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling 712100, China; 3. Northwestern Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: According to the results of simulation rainfall experiments, the transport traits of soil water on loess slope lands with different soil antecedent water content, 1. 3%, 5. 7%, 9. 7%, 14. 2% and 18. 9%, respectively, are investigated. It shows that the initiation runoff time climbs with an increase in soil antecedent water content. The mean coefficient of surface runoff presents a linearity relation with soil antecedent water content, while the mean sediment content of surface runoff shows a parabola relation with it, with the lest amount of 9. 7% land. The more the soil antecedent water content is, the more the accumulative infiltration amount, and the less percent of runoff translating into soil are. To promote the rare rainfall infiltration and lessen the water and soil loss, protective farming measures are suggested in rainy season.

Key words: simulation rainfall; loess slope land; soil antecedent water content; water transport; effect

土壤初始含水量是降水、冠层截留、植物蒸腾、土壤水分蒸发、地表径流、地下渗漏等多种因素综合

作用的结果, 对坡地产流、入渗、土壤侵蚀和水-肥热的迁移具有重要影响。黄土高原是中国生态环境

收稿日期: 2007 01- 31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90610030); 陕西省教育厅省级重点实验室重点科研计划基金资助项目(05JS35); 西安理工大学优秀博士学位论文基金资助项目(106 210623)。

作者简介: 张亚丽(1976), 女, 河南南阳人, 博士, 研究方向为农业非点源污染机理和土壤水分溶质迁移。

E-mail: skyali@163.com. 李怀恩(1960), 男, 陕西商南人, 博士, 教授, 研究方向为水文与水环境保护。

E-mail: lhuaien@mail.xaut.edu.cn。

脆弱带之一, 水土流失与干旱缺雨并重, 合理利用降雨资源, 防止土壤质量退化, 是改善区域生态环境的关键^[1,2]。围绕降雨条件下坡地土壤水分的运动与转化特征, 国内外学者做了大量的研究^[1-5]。为了研究方便和建模的需要, 以往的研究往往侧重于侵蚀产沙规律或者土壤水分的运动转化特征, 而将二者结合起来进行研究的较少^[1,4]。

对于饱和土壤, 一般认为地表产流与降雨是同步的, 即降雨前土壤水分的分布基本等同于产流时刻的情况。对于非饱和土壤, 受产流前土壤水分入渗作用和坡面初始产流时间的影响, 地表积水产流时土壤水分在土壤剖面的分布与降雨前不同。黄土坡地以超渗产流为主, 地表产流时的土壤水分分布状况对研究超渗产流机制具有重要影响^[6]。本文在分析用一维土槽模拟二维坡地水分入渗合理性的基础上, 用试验方法确定非饱和土壤地表产流时水分分布状况, 分析土壤初始含水量对坡地入渗、产流和土壤侵蚀规律的影响, 以期丰富坡地水分动力学的理论体系和坡耕地水土资源保护提供理论基础。

1 试验设计

1.1 供试材料

模拟降雨试验于 2006 年 5~6 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行, 采用侧喷式自动模拟降雨系统, 喷头高度 16 m, 雨滴降落终速可达到自然雨滴降落速度的 98% 以上^[7]。土槽为 6 个长×宽×高=1.0 m×0.3 m×0.55 m 的坡度可调式径流槽, 在土槽的径流出口处安装了 V 形钢槽收集径流。土槽内土壤装至 35 cm 高, 与出水口齐平, 其上 20 cm 高的钢板可以防止因雨滴打击作用使槽内物质溅出槽外。槽底均匀打孔, 用于模拟天然透水坡面。为了定量研究地表产流时的土壤水分分布, 自行研制了 6 个长×宽×高=0.2 m×0.2 m×0.2 m 的坡度可调式模拟土槽, 装土深度为 15 cm, 透水状况同大槽。供试土壤为黄绵土, 采自陕西省安塞县, 质地为粉砂壤土。土壤颗粒组成为砂粒(>0.05 mm)占 34.59%, 粉砂粒(0.005~0.05 mm)占 58.87%, 粘粒(<0.005 mm)占 6.54%。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤制备和填装

先将供试土壤过 5.0 mm 孔筛网, 风干并混合备用。土壤初始重量含水量包括风干土、5%、10%、15% 和 20% 共 5 个水平。根据试验设计, 将一定量水喷洒在一定量摊开的风干土上, 充分混匀后用塑

料布覆盖。静置 24 h 后, 实测 5 种土壤的含水量依次为 1.3%、5.7%、9.7%、14.2% 和 18.9%。对于每一个含水量设置, 分别装 1 个径流槽和 1 个模拟槽。装土时土壤容重维持在 $1.30 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$, 每 5 cm 填装 1 层。在填装上层土壤之前, 抓毛下层土壤表面, 减少土壤分层现象。装土完毕后, 各坡地都用塑料薄膜密封覆盖并统一静置 24 h。

1.2.2 模拟降雨过程

降雨强度(雨强)定为 1.5 mm/min, 降雨前多次率定雨强, 当降雨大小和均匀度均达到要求时开始降雨试验。降雨历时 60 min, 坡度统一设为 15°。当径流槽地表产流后, 记录初始产流时间, 将对应模拟槽取至无雨区, 从坡面中间位置垂直向下挖剖面, 表层按 0~0.5 cm、0.5~1 cm 取两个土样, 1 cm 以下土层每 1 cm 取 1 个土样, 直至湿润锋处, 以测定产流时土壤水分养分含量。产流 10 min 内每间隔 1 min 用塑料小桶承接 1 min 径流样, 其后产流 10~30 min 内每间隔 5 min 取一次径流样(1 min), 产流 30 min 后间隔 10 min 取一次径流样(1 min), 其余径流全部收集在塑料大桶中。测量塑料小桶中径流样, 确定不同时刻的径流量; 将剩余泥水样澄清并倾水后, 将泥沙风干称重备用。降雨结束后, 对每个大槽以同样方式挖剖面取土。土壤水分含量用烘干法测定, 土壤质地和机械组成用比重计法测定。

2 试验结果与分析

2.1 土壤初始含水量对坡地产流过程的影响

降雨开始后, 降落在地表的雨水渗入土壤成为土壤水或者沿坡面流动成为地表径流。在降雨入渗过程中, 假定土壤空隙特征和土壤基本性能不发生改变, 则水分主要在重力势、基质势和压力势梯度作用下向土壤深层运动。初始含水量不影响重力势和压力势, 主要是通过基质势梯度影响土壤入渗能力。研究表明, 基质势的绝对值一般随着土壤前期含水量的增加而减少, 土壤入渗能力也随着前期土壤含水量的增加而减小^[8]。对于超渗产流, 坡面积水产流的前提之一是土壤入渗能力小于雨强, 因此前期土壤含水量高的坡面最早开始产流。如图 1 所示, 坡面初始产流时间与前期土壤含水量呈线性负相关关系, 这与袁建平等^[9]的研究结论一致。

降雨过程中, 含水量 18.9% 和 14.2% 坡地变化规律比较相似。在地表产流初期即达到较高径流系数, 在产流开始 0~5 min 内径流系数迅速递增, 之后逐渐趋于稳定(图 2)。这说明在坡地无细沟侵蚀条件下, 土壤初始含水量越大, 坡面越早进入稳定产

流阶段。

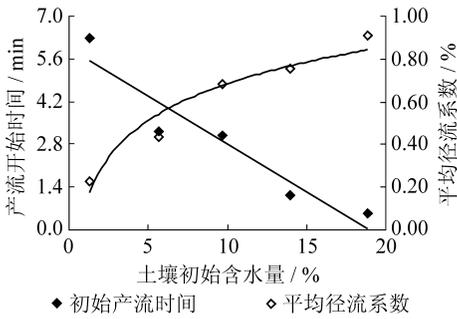


图1 土壤初始含水量对坡地产流过程的影响

Fig. 1 The time of initial runoff and mean runoff coefficient for different soil initial water content plots

其余三种含水量(1.3%、5.7%和9.7%)径流系数在产流开始0~20 min内递增速度较快,之后呈波状增加。土壤初始含水量增加,坡地平均径流系数呈对数增加趋势(图1)。

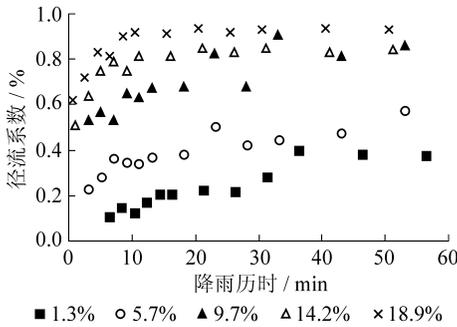


图2 降雨过程坡地径流系数变化

Fig. 2 Variation with time of overland flow coefficient during the process of rainfall

2.2 土壤初始含水量对坡地水土流失的影响

由图3可知,土壤初始含水量越高,径流量越大。18.9%含水量坡地的径流量分别为1.3%、5.7%、9.7%和14.2%坡地径流量的4.03、2.31、1.33和1.20倍。

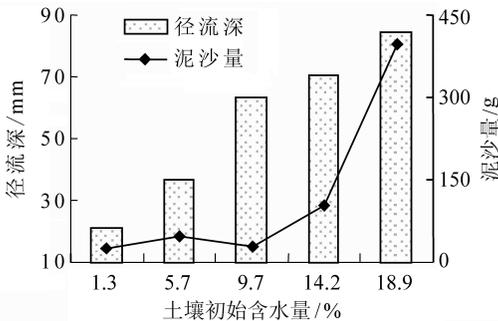


图3 土壤初始含水量对坡地水土流失量的影响

Fig. 3 The soil and water loss amount for different soil initial water content plots

始含水量增加而增加。这是由于坡面径流是泥沙剥离和输移的主要动力,侵蚀量和径流量之间具有一定的正相关性。

通过比较各坡地径流中的平均含沙量(单位体积径流中的泥沙含量),笔者发现坡地平均径流含沙量与土壤初始含水量近似为抛物线关系。较低含水量(1.3%和5.7%)坡地的径流含沙量高于中等含水量(9.7%)坡地,最大的是18.9%坡地(图4)。

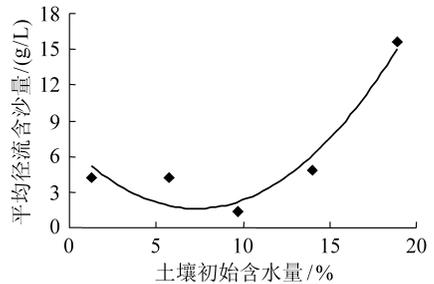


图4 土壤初始含水量对平均径流含沙量的影响

Fig. 4 The mean sediment amount per overland flow for different soil initial water content plots

由于坡面尺寸较小,各坡地土壤侵蚀基本以雨滴溅蚀为主,18.9%含水量坡地在降雨中后期还出现轻微片状侵蚀。一般认为,土壤团聚体的稳定性随着前期含水量的增大而增高,风干土和较低含水量坡地土壤抗雨滴击溅和径流冲刷的能力相对较差^[5,10]。对于最接近饱和含水量的18.9%坡地,地表径流侵蚀力较强,导致径流泥沙含量剧增。因此,在土壤初始含水量较高的雨季,采取适当的截流措施,诸如保护性耕作和地表覆盖处理等,对提高雨水利用率和减少水土流失将具有重要的意义。

2.3 土壤水分的入渗

2.3.1 降雨过程土壤入渗率和累计入渗量的变化

土壤入渗率是描述降雨条件下坡地水文过程的一个重要指标。由图5可知,1.3%、5.7%、9.7%、14.2%和18.9%含水量坡地雨水转化为土壤水分的比率分别为77.4%、56.8%、31.7%、24.4%和9.1%,即土壤初始含水量越高,平均入渗率越低。

对于9.7%、14.2%和18.9%含水量坡地,随着土壤初始含水率的增高,同一时间内非稳渗阶段的入渗率迅速降低,趋于稳定入渗率的时间缩短。18.9%含水量坡地达到稳定入渗阶段的时间分别比9.7%和14.2%含水量坡地提前了5.6 min和12.6 min,1.3%和5.7%含水量坡地在60 min降雨期内入渗率持续递减。这是由于土壤初始含水量不同,雨滴对土壤颗粒的击溅和表土的夯实作用也不同。

对于风干土和前期含水量较低的坡地而言,土壤颗

除了5.7%坡地外,侵蚀泥沙量基本随土壤初

粒间的结合力很小, 极易被雨滴冲散。这种分散作用反而会使土壤表层形成较为密实的一层, 逐渐减少土壤的入渗特性, 加之土壤含水量较大, 因此使坡地达到稳定入渗阶段的时间推迟。土壤累计入渗量与降雨历时呈显著的线性增长关系, 随着土壤初始含水量的增加, 线性增长关系式的斜率减小。

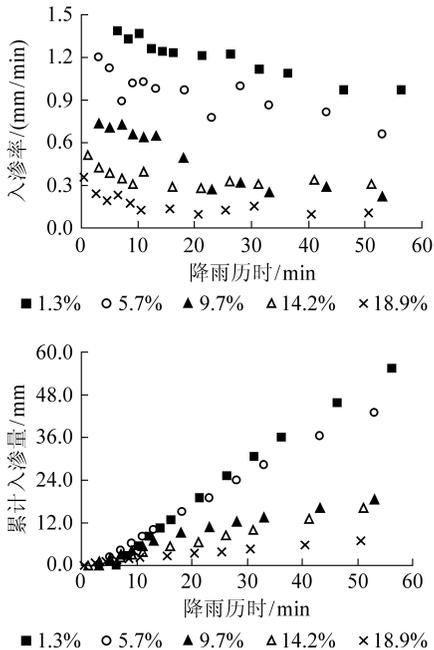


图5 坡地入渗率和累计下渗量

Fig. 5 Variation with time of infiltration rate, cumulative infiltration water amount during rainfall

研究表明, 对同一种土壤, 其初始含水量是影响下渗的主因; 但对于稳定下渗率而言, 土壤湿度的影响极小^[11]。Philip(1958)^[3]和Bodman^[4]也指出, 随着时间的延续, 土壤初始含水量对入渗的影响变小, 最终可忽略。由图5知, 9.7%和14.2%含水量坡地在降雨开始20 min后的入渗率十分接近, 但是明显大于18.9%含水量坡地。这可能是由于降水历时较短, 各坡地均未达到完全稳渗阶段。

2.3.2 土壤剖面水分分布

沈冰和王文焰^[12]室内模拟降雨试验表明, 黄土坡地产生流模式以超渗产流为主, 由于层间土壤容重差异不大, 降雨期间壤中流可以忽略不计(坡度为10%~20%时, 壤中流沿坡向水流速度为2~5 mm/d)。对于土层深厚和包气带含水量大的黄土坡地, 壤中流和地下水对坡面水文过程的影响可以忽略不计。陈洪松等^[13]也得到了类似的结论, 认为当坡度较小时(20°以下), 不考虑滞后作用、各向同性的均质二维坡地的水分和垂向运动可以简化为一维。试验所用两种土槽的坡长都不大于1 m, 坡地

产流时间十分接近, 因此可以用一维模拟土槽研究二维坡地产生流时的土壤水分分布状况。

地表产流时, 各坡地0~0.5 cm土壤含水量最大, 且随土壤初始含水量降低而增加; 之后各坡地含水量均随土层深度增加而逐渐递减, 18.9%含水量坡地递减幅度最小(见图6)。地表产流时和降雨结束后, 土壤剖面雨水的累计入渗量基本随着土壤初始含水量的增加而减小。这说明土壤初始含水量越低, 土壤含水量越大, 地表初始产流时间越滞后, 产流前降雨的初损值越大, 产流后雨水转化为土壤水的比率越大, 与坡面产流情况比较吻合。

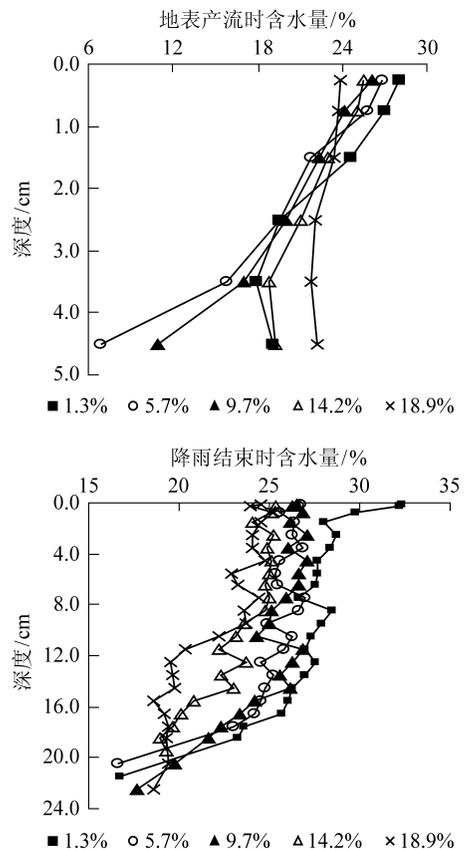


图6 土壤剖面含水量

Fig. 6 Water content of soil profile when overland flow occurs and rainfall ceases

根据李长兴等^[14]和高军侠^[6]研究结果, 黄土区坡耕地土壤产流时, 坡面表层总有一被水饱和的薄层土壤存在, 厚度在2~5 mm之间变动。由于产流时实测表层土壤含水量小于饱和含水量(38.8%), 因此可以证实本试验条件下该饱和土层如果存在的话, 厚度应该小于5 mm。湿润锋的移动也是反映土壤水流垂向运动的特征之一。坡面产流时, 各坡地土壤湿润锋基本都在4~5 cm处, 降雨结束后各坡地土壤湿润锋基本都位于20~23 cm处。

3 结 论

本文通过模拟降雨试验,以土壤初始含水量为主要影响因素,根据均质二维坡地水分入渗可以等同于一维的分析,用一维土槽研究二维坡地地表产流时水分分布,研究了1.3%、5.7%、9.7%、14.2%和18.9%含水量坡地产流入渗土壤侵蚀特征。

结果表明坡地平均径流系数和径流量与土壤初始含水量呈线性增加趋势。坡面平均径流含沙量与含水量呈抛物线关系,较低含水量(1.3%和5.7%)坡地的径流含沙量高于中等含水量(9.7%)坡地。

超渗产流条件下,地表产流时如果存在一饱和土层,本试验条件下该厚度应该小于5mm。土壤初始含水量越高,坡地平均入渗率越低,地表初始产流时间越提前,雨水转化为土壤水的比率越小。因此在土壤初始含水量较高的雨季,建议采取保护性耕作和地表覆盖等措施,以提高雨水利用率,减少水土流失量。

参考文献:

- [1] 陈洪松,邵明安,王克林(Chen Hong song, Shao Ming an, Wang Ke lin). 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响(Effects of initial water content on hillslope rainfall infiltration and soil water redistribution) [J]. 农业工程学报(Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering), 2006, 22(1): 44-47.
- [2] 李裕元,邵明安,张兴昌(Li Yu yuan, Shao Ming an, Zhang Xing chang). 侵蚀条件下坡地土壤水分与有效磷的空间分布特征(Spatial distribution of soil moisture and available phosphorus content on eroded sloping Land) [J]. 水土保持学报(Journal of Soil Water Conservation), 2001, 15(2): 41-44.
- [3] Philip J R. The theory of infiltration: 5. the influence of the initial moisture content [J]. Soil Sci, 1957, 84: 329-339.
- [4] Bodman G B, Colman E A. Moisture and energy condition during downward entry of water into soil [J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1944(8): 166-182.
- [5] Truman C C, Bradford J M. Effect of antecedent soil moisture on splash detachment under simulated rainfall [J]. Soil Sci, 1990, 150: 787-798.
- [6] 高军侠(Gao Jun xia). 黄土高原坡耕地超渗产流及作用研究(Research on Runoff Generation over the Infiltration and Its Role on the Loess Slope Land) [D]. 杨凌:

西北农林科技大学(Yangling: Northwest A & F University), 2002.

- [7] 周佩华,张学栋,唐克丽(Zhou Pei hua, Zhang Xue-dong, Tang Ke li). 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(Rainfall installation of simulated soil erosion experiment hall of the state key laboratory of soil erosion and dryland farming on loess plateau) [J]. 水土保持通报(Bulletin of Soil and Water Conservation), 2000, 20(4): 27-30.
- [8] 王全九,叶海燕,史晓南(Wang Quanjiu, Ye Haiyan, SHI Xiaonan). 土壤前期含水量对微咸水入渗特征影响(Influence of initial water content on slight saline water infiltration) [J]. 水土保持学报(Journal of Soil Water Conservation), 2004, 18(1): 51-53.
- [9] 袁建平,蒋定生,甘淑(Yuan Jianping, Jiang Dingsheng, GAN Shu). 影响坡地降雨产流历时的因子分析(Factors affecting rainfall-runoff duration on sloping land) [J]. 山地学报(Journal of Mountain Research), 1999, 9(3): 78-83.
- [10] Andrea R, Katharina H, Heiko D. Effect of antecedent soil water content and rainfall regime on microrelief changes [J]. Soil technology, 1997, (10): 69-81.
- [11] 天津师范大学,华中师范大学,北京师范大学地理系(Tianjin Normal University, Huazhong Normal University, Institute of Geography of Beijing Normal University). 水文学与水资源概论(Hydrology and Water Resources) [M]. 武汉: 华中师范大学出版社(Wuhan: Central China Normal University Press), 1986, 38.
- [12] 沈冰,王文焰(Shen Bing, Wang Wenyan). 降雨条件下黄土坡地表层土壤水分运动实验与数值模拟的研究(Experiment and simulation on soil water movement on the upper layer of loess slope under the raining condition) [J]. 水利学报(Journal of Hydrology), 1992, (6): 29-35.
- [13] 陈洪松,邵明安(Chen Hong song, Shao Ming an). 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展(Review on hillslope soil water movement and transformation mechanism on the loess plateau) [J]. 水科学进展(Advances in Water Science), 2003, 14(4): 513-520.
- [14] 李长兴,范荣生,李占斌(Li Changxing, Fan Rongsheng, Li Zhanbin). 流域产流理论研究进展(The progresses in theoretical study of catchment runoff generation) [J]. 西北水工程与水工程(Water Resources & Water Engineering), 1994, 5(4): 1-6.

(责任编辑 王卫勋)