

文章编号: 1008- 2786(2003) 05- 0610- 05

坡面侵蚀水沙流时间变化特征的模拟实验

王文龙^{1, 2}, 莫翼翔³, 雷阿林⁴, 李占斌^{1, 4}, 唐克丽^{1, 2}

(1. 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;
2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 3. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100;
4. 水利部国家环保局长江流域水资源保护局, 湖北 武汉 430051)

摘 要:多坡段实验模型以黄土丘陵沟壑区垂向上梁峁坡面与沟谷坡面构成的坡沟系统为原型, 采用人工降雨模拟实验方法, 对坡沟系统土壤侵蚀链内降雨径流产沙随时间变化的规律进行了系统的研究。结果表明: 雨强 29. 7 mm/h 时 36' 40" 开始产流, 60. 5 mm/h 时 3' 43" 产流, 90. 2 mm/h 时 2' 30" 产流。雨强 29. 7 mm/h 时侵蚀过程以面蚀为主, 产沙起伏 20 min 出现一次。60. 5 mm/h 时以面蚀与细沟蚀为主, 35°陡坡伴有崩塌、滑塌等重力侵蚀, 产沙波动平均 12 min 出现一次。雨强 90. 2 mm/h 时坡面上细沟发育充分, 有细沟合并及出现浅沟侵蚀现象, 35°坡崩塌、滑塌剧烈, 产沙过程波动频繁, 每 10 min 一次。雨强 29. 7 mm/h 时单位流量的产沙量为 0. 10 kg/L; 雨强 60. 5 mm/h 时为 0. 30 kg/L; 雨强 90. 2 mm/h 时为 0. 41 kg/L。流量的大小影响了侵蚀方式和形态分异的程度, 使产沙过程出现强弱相间的波动性特点。

关键词:黄土区; 坡面侵蚀; 水沙流; 时间变化特征

中图分类号:S157. 1 **文献标识码:**A

黄土丘陵沟壑区每一个沟道小流域都是一个完整的、独立的侵蚀系统, 在每条沟道小流域中, 从分水岭到沟底, 由于地貌部位的不同, 其坡面的坡度、坡长、坡形有较大差异, 这是长期自然侵蚀与现代强烈的人为加速侵蚀的结果。反映在入渗径流规律、侵蚀产沙强度、侵蚀方式与水沙运移特性和过程表现出明显的垂直分带性规律^[1, 2]。量化地研究这些垂直分带性规律和坡面的水沙运移过程, 将对建立坡面和小流域侵蚀产沙模型, 为流域水土保持和治理决策提供科学依据^[3]。

1 实验材料与方法

实验采用多坡段组合模型, 以黄土丘陵沟壑区垂向上梁峁坡面与沟谷坡面紧密相连所构成的坡沟系统为原型^[4, 5]。由于空间限制, 建模型时对各坡

段坡长进行了适当缩小。模型宽 2. 5m, 最高处高度 6m, 底座高度 1. 0m, 水平投影长 14. 0m(包括出口汇流段 1. 0m)。其坡段划分、各坡段坡度与坡长, 以及代表地类和主要侵蚀方式如表 1 所示。空间形态如图 1 所示。

表 1 坡沟系统模型的坡段划分与代表意义
Table 1 Slope segment division and represent meaning of model on slope and gully system

空间部位	坡段序号	代表地类	坡度(°)	坡长(m)	主要侵蚀方式
沟(谷)缘线以上	1	梁 上	5	2. 00	溅蚀、片蚀
	2	峁 中	15	4. 00	细沟
	3	坡 下	25	4. 00	细沟与浅沟
沟(谷)缘线以下	4	谷坡	35	4. 00	切沟、重力侵蚀

收稿日期(Received date): 2002- 10- 18; 改回日期(Accepted): 2003- 01- 25。
基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(49671052)、中国科学院知识工程项目(KZCX1- 10- 04) 和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室重点基金(10501- 78) 联合资助。[the Projects Supported by National Nature Science Foundation (No.: 49671052), Innovation Engineering of Chinese Academy of Sciences(No.: KZCX1- 10- 04), State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau(No.: 10501- 78)]
作者简介(Biography): 王文龙(1965-), 男, 陕西大荔人, 博士生, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。[WANG Wenlong(1965-), male, Dali county of Shaanxi Province, doctorate student, assistant professor, I am mainly engaged in the research of soil erosion and soil and water conservation.]

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

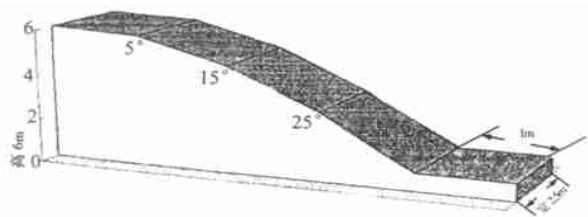


图 1 模型示意图

Fig. 1 The schematic diagram of model

模型土取自杨陵附近的黄土母质, 其机械组成为 1~0.25 mm 占 0.12%, 0.25~0.05 mm 占 2.70%, 0.05~0.01 mm 占 41.13%, 0.01~0.005 mm 占 6.88%, 0.005~0.001 mm 占 12.89%, <0.001 mm 占 36.28%, <0.01 mm 占 56.05%。过 10 mm 筛分层装入模型槽内, 底垫土带(距表层 1.0 m 以下)容重控制在 1.40~1.50 g/cm³ 间, 近表层带(表层以下 0.2~1.0 m)容重在 1.25~1.30 g/cm³ 间, 表层耕作带(0~0.20 m 间)每次实验前翻松并整平, 容重控制在 1.20 g/cm³ 左右, 土壤含水量控制在 15% 左右。实验分有上坡来水和无上坡来水两组。选定雨强为 29.7 mm/h、60.5 mm/h、90.2 mm/h, 一次降雨量固定为 60 mm, 采用组合试验的方法, 实验场次为: 有上坡来水 3×4=12 场, 无上坡来水 3×3=9 场。施测项目包括径流流速、流量、泥沙、水深、细沟宽深长、细沟溯源侵蚀速率、浅沟、切沟的宽深长, 水动力参数值等^[6, 7, 8]。降雨开始即

计时, 产流开始进行观测, 各施测项目每隔 5 min 观测一次, 降雨结束后测取雨后产流时间和产流量^[9]。

2 结果与分析

2.1 坡面水沙流的径流率及产沙率时间变化特征

点绘了等雨量不同雨强条件下坡面产流与产沙的过程线, 如图 2 所示。由图 2 可见, 总的径流过程随着时间的递增而递增, 但比较不同雨强的情况, 其产流时间的先后、流量递增的快慢及流量的大小则有差异。雨强 29.7 mm/h 时降雨后 36'40" 开始产流, 在此之前的降水基本都被入渗了, 所以土壤湿度增加很快, 产流后很短时间即进入稳渗状态, 流量很快达到峰值并逐渐趋于稳定。雨强 60.5 mm/h 时降雨后 3'43" 开始产流, 其产流时间比前一种雨强缩短了半个多小时, 所以产流后流量递增的周期较长, 约在 35' 时达到产流高峰, 此后流量才渐渐稳定下来。雨强 90.2 mm/h 时 2'30" 开始产流, 整个产流过程土壤一直未达到稳渗状态, 流量处于不断递增的状况。不同雨强的产流过程说明, 雨强超过入渗强度即开始产流的超渗产流方式是黄土高原产流的基本特点, 尤其雨强愈大, 前期土壤愈干燥, 这种特点表现的愈加明显。产流的流量与降雨雨强关系密切, 呈现为雨强愈大流量愈大的特点。

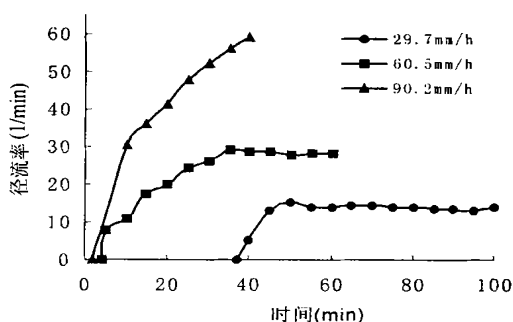
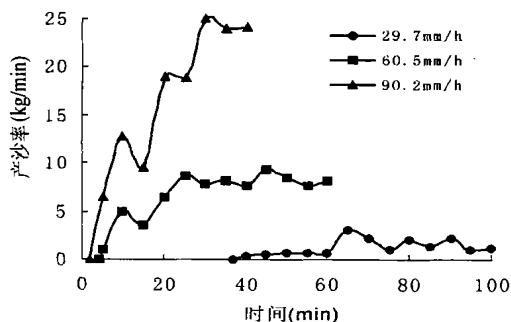


图 2 全坡面产流、产沙过程

Fig. 2 Process of runoff and sediment yield on slope

产沙过程显得较为复杂, 并不与产流过程完全对应, 呈现了多峰多谷的特点。但流量的大小和流量的变化过程仍是最为重要的制约因素。这时, 反映侵蚀能量强度的流量大小主要有两种作用, 一种是直接对产沙过程的影响; 另一种则是通过坡面侵

蚀方式和侵蚀形态的分异间接对产沙过程产生影响。从总的过程来说, 产流初期, 因坡面土粒松散, 易被雨滴溅蚀分离和被径流挟带运移, 产沙过程很快出现高峰。但因雨强不同, 峰值的大小和是否出现有明显差异。29.7 mm/h 雨强, 产沙有突增趋

势,但峰值不明显。90.2 mm/h 雨强,因产流快流量大,有较明显的产沙高峰出现,产流中后期,坡面侵蚀方式和侵蚀形态出现分异但因雨强影响下的流量大小和过程有明显差异,其分异的程度也就有不同,所以产沙波动性亦有显著区别。29.7 mm/h 雨强时,坡面侵蚀过程主要以面蚀为主,产沙幅度小,每分钟产沙量最大与最小值之差仅 2.33 kg。波动次数也少,从图 2 上看到的产沙起伏有 3 次,平均 20 min 出现一次。最大的一次波动出现在降雨 63 min 左右,它是因 35° 陡坡坡顶一次大的滑塌造成的,其时,产沙量由 0.73 kg/min 突增到 2.97 kg/min,增长幅度达 3 倍以上。60.5 mm/h 雨强时,坡面侵蚀过程以面蚀与细沟蚀为主,35° 陡坡也伴有崩塌、滑塌等重力侵蚀过程,产沙波动性比小雨强时频繁,平均 12 min 出现一次波动,波动幅度也大,每分钟产沙量最大与最小值之差达 6.88 kg。90.2 mm/h 雨强时,侵蚀强度明显大于前两种雨强,坡面上细沟发育充分,25° 坡下段有细沟合并,切穿 20 cm 耕层,出现浅沟侵蚀的现象,35° 坡崩塌、滑塌剧烈,出现 30 cm 以上陡坎,有明显的切沟雏形出

现。整个产沙过程波动频繁,平均 10 min 波动一次,波动幅度较大,每分钟产沙量最大与最小值之差达 20.45 kg。

2.2 坡面累积径流、泥沙的时间变化特征

为了深刻认识侵蚀能量,侵蚀物质,侵蚀形态三种联系方式在侵蚀链演化中的关系特点,及不同雨强下的表现差异,我们又绘制了同雨量、不同雨强条件下的径流泥沙累积曲线图,如图 3 所示。累积径流量随降雨时间的增加而增加,雨强愈大,累积径流量增加愈快,径流系数愈大。雨强 29.7 mm/h 累积径流量随降雨时间平均增长率为 13.39 L/min,径流系数为 0.53;雨强 60.5 mm/h 时累积径流平均增长率为 24.82 L/min,径流系数为 0.66;雨强 90.2 mm/h 时累积径流平均增长率为 44.58 L/min,径流系数为 0.79,雨强 90.2 mm/h 的总径流量是雨强 60.5 mm/h 的 1.2 倍,为雨强 29.7 mm/h 的 1.5 倍左右。这一现象再次说明黄土高原属于超渗产流,在同雨量下,雨强愈大产流愈大,入渗则愈小;雨强愈小产流愈小,入渗则愈大。

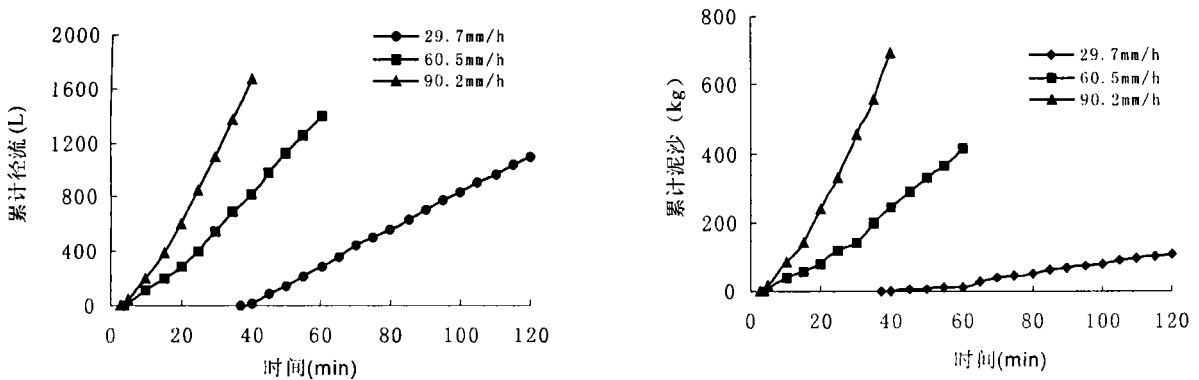


图 3 全坡长径流、泥沙累计曲线

Fig. 3 Mass diagram of runoff and sediment on slope

与累积径流过程相对应,累积泥沙量在不同雨强下也呈现了随降雨历时增大的趋势,而且雨强愈大,增长亦愈快。累积泥沙量随降雨时间的平均增长率,在 29.7 mm/h 雨强时为 1.34 kg/min,在 60.5 mm/h 雨强时为 7.33 kg/min,在 90.2 mm/h 雨强时为 18.32 kg/min。90.2 mm/h 雨强的产沙总量是 60.5 mm/h 的 1.67 倍,为 29.7 mm/h 的 6.2 倍左右。雨强愈大,单位流量的侵蚀强度也愈大,单位流量的产沙量在雨强 29.7 mm/h 时为 0.10 kg/L,雨强 60.5 mm/h 时为 0.30 kg/L,雨强

90.2 mm/h 时为 0.41 kg/L。大雨强的侵蚀强度是中雨强的 1.37 倍,小雨强的 4.1 倍。

可见,反映水流能量的流量的大小是制约侵蚀过程的最重要因素。一方面,总的过程呈现水大沙大的特点;另一方面,流量的大小影响了侵蚀方式和形态分异的程度,使产沙过程出现强弱相间的波动性特点。小雨强下,产流量小,水流能量始终达不到细沟、浅沟及切沟发生的动力临界,坡面上看不到这些侵蚀形态的发育,所以产沙波动较小,产沙量也小。大雨强下产流量大,坡面上水流能量累积增大

很快, 细沟、浅沟及切沟很快具备发育的条件, 一次次能量的积累与释放, 造成了高沙、低沙过程的相间出现, 形成了产沙的多波动及高强度特点。中雨强下, 产流量介于高雨强与小雨强之间, 水流能量累积过程相对大雨强时相对较长, 强度也低, 坡面上虽有细沟、切沟的发育, 但不如大雨强时发育充分, 产沙波动次数少, 间隔期长, 强度也低。

3 结语

1. 雨强 29.7 mm/h 时 36'40" 开始产流, 雨强 60.5 mm/h 时 3'43" 产流, 雨强 90.2 mm/h 时 2'30" 产流, 产沙过程呈现了多峰特点。雨强 29.7 mm/h 时主要以面蚀为主, 产沙起伏有 3 次, 平均 20 min 出现一次。60.5 mm/h 时, 侵蚀过程以面蚀与细沟蚀为主, 35°陡坡也伴有崩塌、滑塌等重力侵蚀过程, 产沙波动性频繁, 平均 12 min 出现一次波动。雨强 90.2 mm/h 时坡面上细沟发育充分, 25°坡下段有细沟合并, 出现浅沟侵蚀现象, 35°坡崩塌、滑塌剧烈, 整个产沙过程波动频繁, 平均 10 min 波动一次。

2. 黄土高原属超渗产流, 在同雨量下, 雨强愈大, 入渗则愈小, 产流愈大; 雨强愈小, 入渗则愈大, 产流愈小。累积泥沙量在不同雨强下也呈现了随降雨历时而增大的趋势, 而且雨强愈大, 增长亦愈快。雨强愈大, 单位流量的侵蚀强度也愈大, 单位流量的产沙量在 29.7 mm/h 雨强时为 0.10 kg/L, 在 60.5 mm/h 雨强时为 0.30 kg/L, 在 90.2 mm/h 雨强时为 0.41 kg/L。大雨强的侵蚀强度是中雨强的 1.37 倍, 小雨强的 4.1 倍。水流流量的大小是制约侵蚀过程的最重要因素, 总的过程呈现水大沙大的特点, 另一方面, 流量的大小影响了侵蚀方式和侵蚀形态分异的程度, 使产沙过程出现强弱相间的波动性特点。

参考文献 (References):

- [1] Cheng Jicheng. Vertical Belts of Runoff Action In Slope[A]. In: Thesis Anthology of Chinese Geography Society in 1963 (topography) [C]. Beijing: Science Press, 1965: 99~104 (In Chinese) [承继成. 坡地流水作用的分带性[A]. 中国地理学会 1963 年年会论文集(地貌)[C], 北京: 科学出版社, 1965: 99~104.]
- [2] Chen Yongzong. Erosion Development of Slope on Loess Hilly Region in the Middle Reaches of Yellow River[J]. Compiled by Geography Institute of CSC, *Geography memoir*, the 10th: 35~50 (In Chinese) [陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区坡地的侵蚀发育[J]. 中国科学院地理研究所编, 地理集刊, 第 10 号: 35~50]
- [3] Lei Tingwu. Soil Erosion Predict Models and the Strategic Considerations for Their Development in China[J]. *Reserch of soil and water conservation*. 1999, 6(2): 162~166 (In Chinese) [雷廷武. 土壤侵蚀预报模型及其在中国发展的考虑[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 162~166]
- [4] R. Lal, Editor. Translated by Center of Propaganda and Publish Water Conservancy Committee of Yellow River. Soil Erosion Research Methods[M]. Beijing: Science press, 1991 (In Chinese) [拉尔 R[美], 黄河水利委员会宣传出版中心译. 土壤侵蚀研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991]
- [5] Jiang Dingsheng, Zhou Qing *et al.* Simulated Experiment on Normal Integral Model of Water Regulating and Sediment Controlling for Small Watershed[J]. *Joural of soil and water conservation*, 1994, 8(2): 25~30 (In Chinese) [蒋定生, 周清, 范兴科等. 小流域水沙调控正态整体模型模拟实验[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 25~30]
- [6] Lei Alin, Tang Keli. Kinetic Conditions of Rill Erosion on Loess Sloping Face[J]. *Joural of soil erosion and soil and water conservation*. 1998, 4(3): 39~43 turn 72 (In Chinese) [雷阿林, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀的动力条件[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 39~43 转 72]
- [7] Emmett, W. W. The Hydraulics of Overland Flow on Hill Slope [J], U.S. Geology. Surv. Prof. Paper 662A, 1970
- [8] Yoon, N. Y. and G. H. Wenzel, Mechanics of Sheet Flow Under Simulated Rainfall[J]. *J. Hyd. ASCE*, 1971, 14(9)
- [9] Shen, H. W. and R. M. Li, Rainfall Effect on Sheet Flow Over Smooth Surface[J]. *Hyd. ASCE*, 1973, 16(5)

Simulating Experiments of Temporal Change Characteristics of Runoff and Sediment on Slope

WANG Wen-long^{1,2}, MO Yi-xiang³, LEI A-lin³, LI Zhan-bin^{1,4}, TANG Ke-li^{1,2}

(1. State key Laboratory of Soil Erosion and Drgland Far ming on the Loess Plateau. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi, 712100, P. R. China;

2. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi, 712100, China;

3. Yangling Vocational and Technical College, Yangling, 712100; 4. Yangtze Valley Water Resources Protection Bureau, Ministry of Water Resources and State Bureau of Environment Protection, Wuhan, Hubei, 430051, China)

Abstract: Based on the prototype of the vertical belts difference from hillslope to gully slope in the slope-gully system in loess region, the temporal change of runoff and sediment in the soil erosion chain of the slope-gully system was studied by simulating rainfall on block diagram combined to multi-slope sections. The results showed that the runoff time varied with rainfall intensity. Corresponding with rainfall intensity of $29.7\text{mm}(\text{hr})^{-1}$, $60.5\text{mm}(\text{hr})^{-1}$, $90.2\text{mm}(\text{hr})^{-1}$, the runoff time is $36'40''$, $3'43''$, $2'30''$ respectively. When the rainfall intensity was $29.7\text{mm}(\text{hr})^{-1}$, erosion process was mainly of sheet erosion, and the runoff and sediment occurred again in 20min intervals. When the rainfall intensity was $60.5\text{mm}(\text{hr})^{-1}$, sheet and rill erosion were main, and the gravity erosion such as falling landslip and creep occurred on the steep slope of 35° , the process of runoff and sediment occurred again at the average of 12min intervals. rill developed well on hillslope and shallow gully occurred with the rainfall intensity of $90.2\text{mm}(\text{hr})^{-1}$, on the slope of 35° , falling landslip and creep were intensive, and the time interval of process of runoff and sediment is 10min. When the rainfall intensity was $29.7\text{mm}(\text{hr})^{-1}$, $60.5\text{mm}(\text{hr})^{-1}$, $90.2\text{mm}(\text{hr})^{-1}$, the sediment yields per runoff was 0.10kg/l, 0.30kg/l and 0.41 kg/l respectively. The runoff not only influenced erosion patters and their difference degree, but also led to fluctuant characteristics alternating with strong and weak of the process of runoff and sediment.

Keywords: loess region; slope erosion; runoff and sediment; temporal characteristics