

华南红壤坡面产流产沙过程模拟降雨试验研究

胡建¹, 郭太龙², 卓慕宁², 蔡庆³, 谢真越², 廖义善², 李定强^{2,4*}

1. 广东省水土保持监测站, 广东 广州 510635; 2. 广东省生态环境与土壤研究所, 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东 广州 510650;
3. 广东省水利厅, 广东 广州 510635; 4. 中国科学院广州分院、广东省科学院, 广东 广州 510650

摘要: 暴雨扰动和径流冲刷是华南红壤坡地土壤侵蚀的主要动因, 分析模拟降雨条件下华南红壤坡面的水流动力学特征对于揭示其内在机制以及构建物理模型具有重要的意义。通过室内 35 场不同雨强 (30、60、90、120、180、210、270 mm·h⁻¹)、不同坡度 (5°、10°、15°、20°、25°) 的人工模拟降雨试验, 研究了华南红壤侵蚀的产流产沙过程、红壤侵蚀的水动力机制。试验结果表明: 红壤坡面模拟降雨条件下, 次降雨过程中, 坡面产流过程同时受降雨及下垫面状况变化的共同影响作用, 产流产沙均表现为波动变化过程。径流过程表现为初期 0~10 min 为波动增加过程, 10 min 以后径流量的波动逐渐趋于平稳; 径流量与降雨强度间呈线性正相关关系, 雨强越大侵蚀产流的径流量也越大; 产沙过程表现为侵蚀发生的前期波动过程比较剧烈, 随着侵蚀过程逐渐趋于稳定, 侵蚀产沙量值逐渐趋于一个稳定值, 总的来说大雨强下侵蚀产沙量趋于的稳定值也较大; 对于不同坡度 (5°、10°、15°、20°、25°)、30 mm·h⁻¹ 的模拟降雨条件下, 红壤坡面仅产生径流, 而无侵蚀产沙。

关键词: 模拟降雨; 红壤; 侵蚀; 产流; 产沙; 坡面

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2013) 05-0787-05

引用格式: 胡建, 郭太龙, 卓慕宁, 蔡庆, 谢真越, 廖义善, 李定强. 华南红壤坡面产流产沙过程模拟降雨试验研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 787-791.

HU Jian, GUO Tailong, ZHUO Muning, CAI Qing, XIE Zhenyue, LIAO Yishan, LI Dingqiang. Erosion processes on red soil slope in south China under simulated rainfall system [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 787-791.

降雨是侵蚀问题研究中最重要因素之一, 在坡面流侵蚀中由于水流的水深很小(约几毫米或甚至更小), 因此受降雨的影响作用显著。在我国南方, 由于降雨雨量充裕而产生较大的径流, 尽管地表植被覆盖较好, 也可能产生水土流失; 我国北方, 虽然年内总的降雨雨量较少, 但多数集中在 7—9 月, 次降雨雨强也较大, 也极易产生径流而造成水土流失。土壤侵蚀是全国都普遍存在和关注的问题, 多年来人们从侵蚀过程发生及演变、动力学角度等方面进行了较多有益的前期研究。Horton^[1]最早进行了坡面浅层水流的水力特性研究。坡面流动力机制研究是以河流水力学和泥沙动力学为理论基础的, 20 世纪 70 年代后期以来, 研究者在分析水蚀发生的临界条件、侵蚀动力、及土壤可蚀性等方面做了大量的工作^[2-16]。一些学者揭示了坡面薄层水流的滚波流动力特征^[17-19]。也有学者提出了应用能耗、径流侵蚀功率理论进行坡面侵蚀动力机制研究^[11]。坡面流动力机制的探讨中会不可避免的涉

及到阻力问题。Abraham 等^[20]、Sadeghian 等^[21]、Shen 等^[22]广泛使用 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 来描述降雨引起的坡面水流的阻力变化。Emmett^[23]、陈国祥等^[24]、姚文艺^[25]、沈冰等^[26]的研究表明: 降雨有增大坡面薄层水流阻力的作用。吴普特等^[27]的研究认为雨滴打击作用使动床坡面薄层水流的阻力减小。张光辉^[28]对坡面薄层水流的研究认为: 薄层水流的平均流速、水深和阻力系数主要受流量的控制, 坡度的影响不显著。总体来看, 对于坡面侵蚀动力机制的探讨是近些年侵蚀研究的热点, 尚不完善, 有待进一步深入。

华南红壤区是我国发生潜在水土流失危害的重点区域之一, 红壤坡地的水土流失现象较为严重^[29-31]。华南红壤地区气候温暖, 雨量丰沛, 降雨特点通常表现为强度大、历时长, 暴雨或大暴雨事件频发, 因此暴雨驱动因子影响作用更为显著; 华南红壤坡地的降雨-入渗-产流过程常表现为蓄满产流过程; 通常华南红壤坡地的植被覆盖条件较好等

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171221; 41101257); 广东省水利厅委托项目(GPCGD112197FT141F1; GPCGD122197FD096F); 广东省自然科学基金项目 (S2011020005896)

作者简介: 胡建 (1976 年生), 女, 高级工程师, 主要从事水土保持。E-mail: hukw@tom.com

***通信作者:** 李定强(1963 年生), 男, 研究员, 博士生导师, 中国科学院广州分院副院长, 主要研究方向为水土保持与非点源污染。

E-mail: dqli@soil.gd.cn

收稿日期: 2013-05-05

等。以上诸点使得华南红壤坡面侵蚀过程及特征有别于我国北方黄土高原地区,目前对于红壤坡地水蚀认识还不够深入,尤其是暴雨驱动下的红壤坡面侵蚀机制方面研究较为匮乏。本文从分析了人工模拟降雨条件下的华南红壤坡面的侵蚀过程入手,初步探讨了华南红壤坡面的侵蚀模拟过程及产流产沙特征,为进一步研究该坡面侵蚀的动力学机制奠定一定的基础。

1 材料与方法

本试验研究是在广东省生态环境与土壤研究所人工模拟降雨大厅进行。试验土槽的面积为 1.0 m^2 (长 $\times$ 宽 $=2.0\text{ m}\times0.5\text{ m}$),土槽装土深度为 0.5 m 。供试土样为华南红壤,试验前过 2 mm 孔筛。具体试验过程为1)土壤初始含水量:土壤初始容积含水量为 8% ,其目的是为保证试验土壤水分含量均匀一致。用于试验的土壤前期经风干和晾晒后质量含水量约为 5.2% 左右,试验前 1 d 喷撒一定量蒸馏水(水量根据控制的含水量 8% 和现场实测含水量的差值进行计算)于土壤表面,然后在土壤表面覆盖一层塑料薄膜以防止水分蒸发,经过约 24 h 后,均匀搅拌土壤,然后用于试验装土。2)试验土槽装土:首先槽底部铺设一层 5 cm 厚的细砂子,其上以 10 cm 为间隔分层装土(土与砂子用一层粗棉纱布隔开),为了便于分层(5层)装土,试验土槽侧壁先画出以 10 cm 为间隔的刻度线,装土容重控制在 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,再根据每层土槽的体积和控制的装土容重计算出每层所需装的土壤质量,将称好的土壤松散均匀的铺撒在试验土槽之内,用特制的底板留有微型透气孔的击实器轻轻的进行夯实,直到土壤击实面达到控制的间隔刻度线为止,然后用钢毛刷轻轻爪毛该层的击实面,以保证土层与土层之间良好接触而不产生分层效应,其后每层装土重复前述操作进行,值得注意的是最上面一层装好后不需要进行钢毛刷爪毛的步骤。3)调整坡度:装土完毕后,将土槽调整到试验所需的坡度,放置约 14 h 后(制备好的土槽坡面用薄膜覆盖,防止水分蒸发或外来干扰)用于第2天的试验。4)模拟降雨试验:模拟降雨X型下喷式模拟降雨系统,有效降雨高度约为 13.4 m ,降雨方向为重力方向,降雨雨强分布均匀,针对华南地区暴雨事件频发的特点,最大模拟降雨强度为 $270\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,雨强利用雨量桶采用梅花布点法结合

秒表进行量测,雨强设置7个水平:30、60、90、120、180、210、 $270\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$;坡度5个水平:5°、10°、15°、20°、25°;每个处理设1次重复,共计降雨场次35次。试验数据采用Excel和SPSS 10.0进行统计分析,显著性水平为0.01。

本试验所需可动式移动钢槽1台(自行研制,尺寸:长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=2\text{ m}\times0.5\text{ m}\times0.5\text{ m}$),集流桶若干(容积 20 L ,数量200个左右),电子计重天平(精度 1 g)台等等。主要测定指标:径流量、泥沙量、坡面流流速。径流量采用体积法量测,泥沙量采用烘干称质量法测定。试验所用红壤采自广州郊区弃耕地,土壤质地为壤土,具体土壤理化性质指标如表1所示。

2 结果与分析

2.1 红壤坡面降雨产流过程

模拟降雨条件下,红壤坡面次降雨过程中,坡面产流过程同时受降雨及下垫面状况变化的共同影响作用,径流量的时段值表现为波动变化过程,该过程总体表现为初期 $0\sim10\text{ min}$ 为波动增加过程, 10 min 以后径流量的波动逐渐趋于平稳(图1)。从图1可以看出,在相同的模拟降雨雨强条件下,随着坡面坡度的增加,坡面径流量并不是呈现相性增加或减少,坡度对降雨径流的影响规律不明显;然而对于在相同的坡面坡度试验条件下,随着模拟雨强的逐渐增加,降雨径流量也逐渐增加,当模拟雨强从 $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 逐渐增加到 $270\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,降雨径流量的取值上限从 $0.000\ 025\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $0.000\ 080\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,模拟雨强对降雨径流的影响显著。

3.2 红壤坡面侵蚀产沙过程

坡面侵蚀过程中,侵蚀产沙的强度也是波动变化的,侵蚀发生的前期波动过程比较剧烈,随着侵蚀过程逐渐趋于稳定,侵蚀产沙量值逐渐趋于一个稳定值(图2)。总的来说大雨强下侵蚀产沙量趋于的稳定值较大,但是在雨强大于 $180\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 后,该变化规律不存在,可能是因为暴雨雨强下侵蚀产沙过程与中小雨强下的侵蚀产沙过程从本质上发生改变所至,暴雨雨强下的侵蚀水流状态变化情况剧烈。试验进行了不同坡度(5°~25°)、不同模拟雨强(30~ $270\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)下共计35场次模拟降雨试验,但是在 $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时坡面仅仅产流而不产沙,其他雨强下均产流产沙, $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨可视为该试验条件下红壤坡面侵蚀产沙的下限雨强(图2)。

表1 土壤的物理化学性质指标
Table 1 Physical and chemical properties of soil

土壤	各级粒径含量百分数/%			w/(g·kg ⁻¹)			
	<0.002	0.002~0.05	>0.05	有机质	全氮	全磷	全钾
红壤	8.9	35.4	55.7	1.89	0.079	0.249	24.6

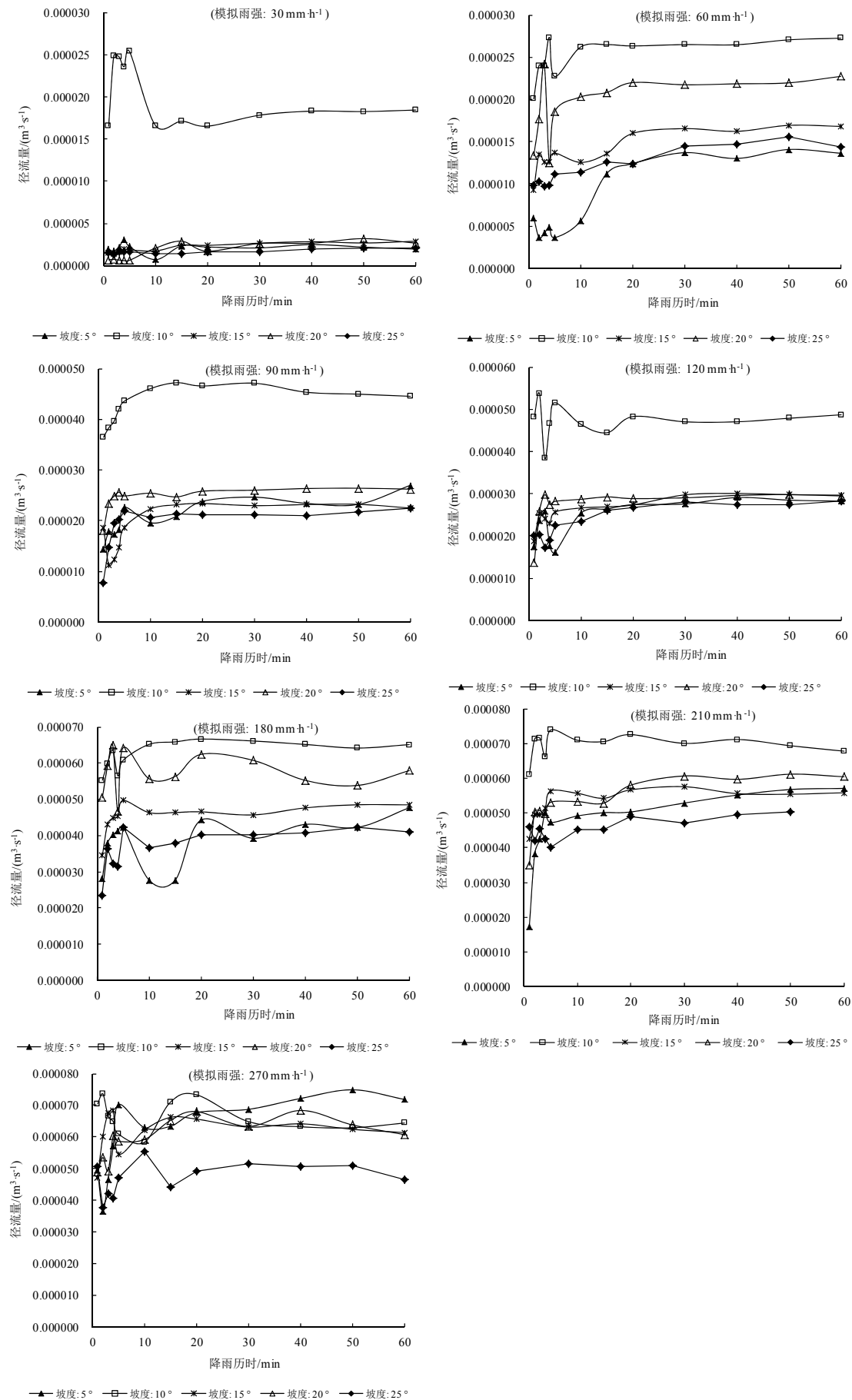


图1 不同模拟雨强及坡度条件下红壤坡面侵蚀产流径流量的变化过程

Fig. 1 Runoff rate change with time under different simulated rainfall and slope gradient on red soil slope

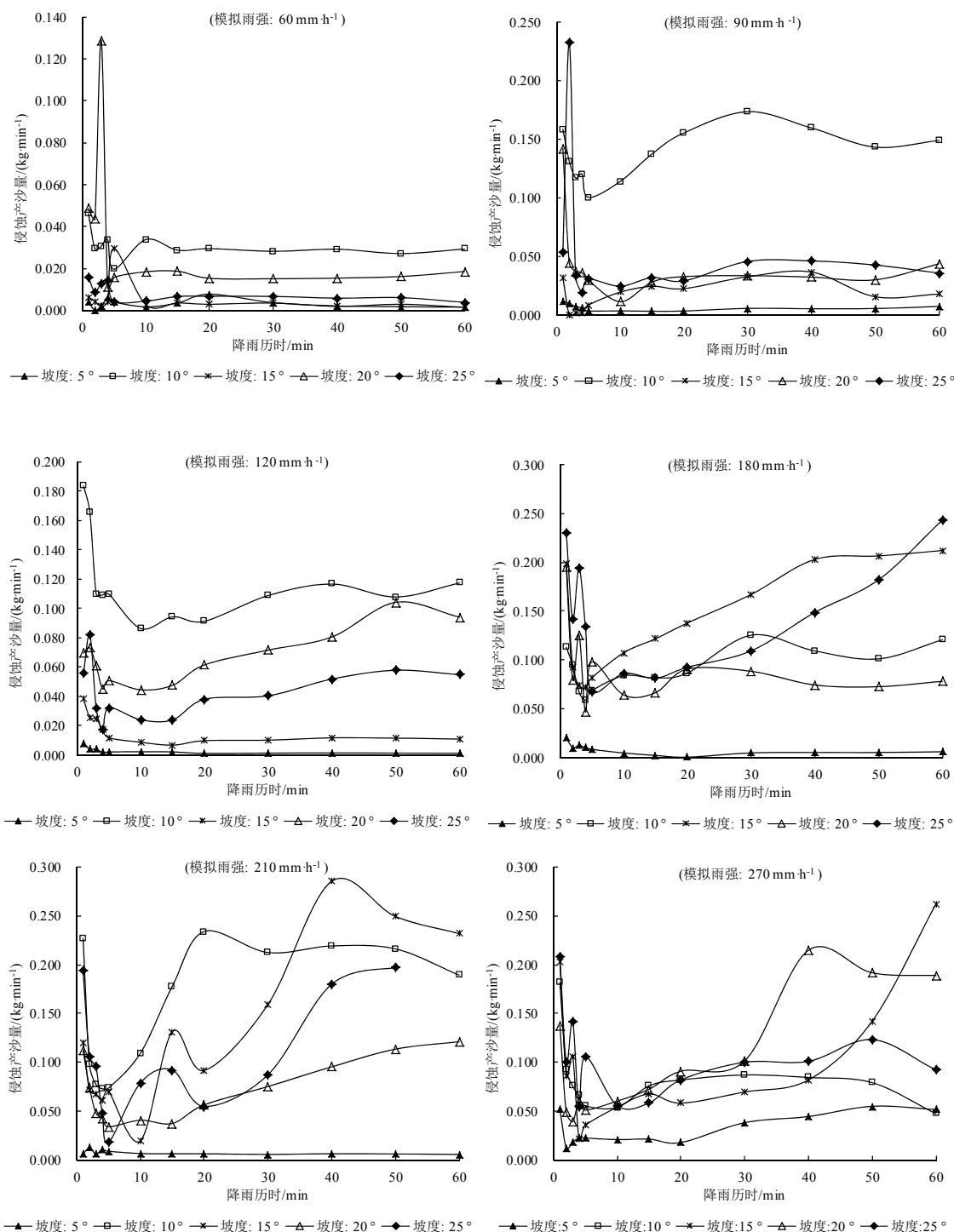


图2 不同模拟雨强及坡度条件下红壤坡面侵蚀产沙量的变化过程

Fig. 2 Sediment yield change with time under different simulated rainfall and slope gradient on red soil slope

3 结论

本文通过室内 35 场不同雨强 (30、60、90、120、180、210、270 mm·h⁻¹)、不同坡度 (5°、10°、15°、20°、25°) 的人工模拟降雨试验, 研究了华南红壤侵蚀的产流产沙过程、红壤侵蚀的水动力特征, 主要取得以下研究结果。

1) 红壤坡面模拟降雨条件下, 次降雨过程中,

坡面产流过程同时受降雨及下垫面状况变化的共同影响作用, 产流产沙均表现为波动变化过程。径流过程表现为初期 0~10 min 为波动增加过程, 10 min 以后径流量的波动逐渐趋于平稳; 径流量与降雨强度间呈线性正相关关系, 雨强越大侵蚀产流的径流量也越大; 产沙过程表现为: 侵蚀发生的前期波动过程比较剧烈, 随着侵蚀过程逐渐趋于稳定,

侵蚀产沙量值逐渐趋于一个稳定值, 总的来说大雨强下侵蚀产沙量趋于的稳定值也较大;

2) 对于不同坡度 (5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25°)、 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的模拟降雨条件下, 红壤坡面仅仅产生径流, 而无侵蚀产沙。

参考文献:

- [1] HORTON R E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrological approach to quantitative morphology [J]. Geological Society of America Bulletin, 1945, 56: 275-370.
- [2] 周佩华, 窦葆璋, 孙清芳. 降雨能量试验研究初报[J]. 水土保持通报, 1981, 1: 51-60.
- [3] 江中善, 宋文经, 李秀英. 黄土区天然降雨雨滴特性研究[J]. 中国水土保持, 1983(5): 32-36.
- [4] 蔡强国. 降雨特性对溅蚀影响的初步试验研究[J]. 中国水土保持, 1986, 6: 41-42.
- [5] 王万忠. 黄土地区降雨侵蚀力R指标的研究[J]. 中国水土保持, 1987, 12: 34-38.
- [6] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其降雨特征关系的研究[J]. 泥沙研究, 1991, 4: 39-46.
- [7] 贾志军. 晋西黄土丘陵区降雨侵蚀力R指标的确定. 中国水土保持[J]. 1991, 1: 43-36.
- [8] 郑粉莉, 白红英. 子午岭林区不同地形部位开垦裸露地降雨侵蚀力的研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(1): 26-32.
- [9] 朱显谟. 黄土高原国土整治“28字方略”的理论与实践. 中国科学院院刊[J]. 1998, 3: 232-236.
- [10] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素. 水土保持通报[J]. 1981, 3: 1-9.
- [11] 李占斌, 鲁克新, 丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 中国水土保持, 2002, 16(2): 5-7, 49.
- [12] 刘国斌. 黄土高原草地植被恢复与土壤抗冲性形成过程——II植被恢复不同阶段土壤的抗冲性特征[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 112-121.
- [13] LEI T W, NEARING M A, KAMYAR H, et al. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model[J]. Water Resources Research, 1998, 34(11): 3157-3168.
- [14] 张科利, 秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4 (1): 41-46.
- [15] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 黄土丘陵区坡面薄层水流侵蚀动力机制实验研究[J]. 水利学报, 2003, 9: 66-70.
- [16] 郑粉莉, 江中善, 高学田. 水蚀过程与预报模型[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 166-170.
- [17] 鲁克新, 李占斌. 黄土坡面细沟侵蚀发生初期跌坎形成机理的理论探讨[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 35-38.
- [18] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土陡坡径流侵蚀产沙特性室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 42-45.
- [19] 李鹏, 李占斌, 郑良勇, 等. 坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 66-69.
- [20] ABRAHAM A D, LUK S H. Resistance to Overland Flow on Desert Hillslope[J]. Hydrology, 1986, 88: 334-363.
- [21] SADEGHIAN M R, MITCHELL J K. Hydraulics of Micro-Braided Channels: Resistance to Flow on Tilled Soils[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(2): 458-468.
- [22] SHEN H W, LI R M. Rainfall effect on sheet flow over smooth surface [J]. Transactions of the ASAE, 1973, 99(5): 771-792.
- [23] EMMETT W W. Overland flow[M]. In Hillslope Hydrology, ed. By M J. Kirkby, 145-175, John Wiley & Sons. New York.
- [24] 陈国祥, 姚文艺. 坡面流水力学[J]. 河海科技进展, 1992, 12(2): 7-13.
- [25] 姚文艺. 坡面流速计算的研究[J]. 中国水土保持, 1993, 3: 21-25.
- [26] 沈冰, 李怀恩, 沈晋. 坡面降雨强度漫流过程中有效糙率的实验研究[J]. 水利学报, 1994, 10: 61-68.
- [27] 吴普特, 周佩华. 雨滴击溅对薄层水流水力摩阻系数的影响[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 39-4.
- [28] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 159-165.
- [29] 黄秉维. 华南坡地利用和改良: 重要性和可行性[J]. 地理研究, 1987, 6(4): 1-11.
- [30] 黄秉维. 再论华南坡地利用和改良[J]. 地理研究, 1989, 8(4): 1-8.
- [31] 李定强, 王继增, 万洪富, 等. 广东省东江典型小流域非点源污染物流失规律研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 12-18.

Erosion processes on red soil slope in south China under simulated rainfall system

HU Jian¹, GUO Tailong², ZHUO Muning², CAI Qing¹, XIE Zhenyue², LIAO Yishan², LI Dingqiang^{2,3*}

1. Soil and Water Conservation Monitoring Station of Guangdong Province, Guangzhou 510635, China;
2. Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Science, Guangdong Key Laboratory of Comprehensive Control of Agro-environment, Guangzhou 510650, China;
3. Guangdong Provincial Department of water resources and water conservation, Guangzhou 510635, China;
4. Guangzhou branch of Chinese Academy of Sciences, and Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract: Storm rainfall and water flushing are two major factors on red soil erosion processes in South China. It is very important for us to build a physical erosion model that analyzing erosion flow hydraulics on red soil slope in South China under simulated rainfall condition. Flume experiments with seven rainfall intensities ($30, 60, 90, 120, 180, 210, 270 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), five slope gradients ($5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$), and total 35 times experiments were conducted to evaluate their interaction effect on runoff and sediment on such soil slope in the laboratory. Results indicated that rainfall intensity and slope angle play important roles on runoff and sediment transport. Both runoff generation and sediment yield are fluctuated processes changes with time. Runoff rate fluctuated heavy at the stage of duration changes from 0 to 15 min, and keep a relatively stable stage after 15minutes later for all experiments. There is a good relationship between runoff amount and rainfall intensity. Runoff amount increases as rainfall intensity increases. The rainfall intensity is higher and the sediment load under steady condition is larger. When the rainfall intensity is $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, although we change slope gradients from 5° to 25° , there is only runoff generation and no sediment yield for all experiments.

Key words: Simulated Rainfall; Red soil; Erosion; Runoff generation; Sediment yield; Slope