

不同雨强及坡度下坡面流的水动力特性

梁志权^{1,2,3}, 卓慕宁², 郭太龙², 谢真越², 廖义善², 张思毅², 李定强^{4*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 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. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院广州分院/广东省科学院, 广东 广州 510650

摘要: 土壤侵蚀是中国南方多雨区面临的一个重大环境问题, 研究不同降雨条件下红壤坡面的水动力特性, 对于认识红壤侵蚀过程具有重要的意义。采用室内人工模拟降雨试验, 研究了不同雨强 (60、90、120、180、270 mm·h⁻¹) 和不同坡度 (5°、10°、15°、20°、25°) 条件下红壤坡面的侵蚀特征, 分析测定了侵蚀过程中的流速、水深及单宽流量, 探讨它们随雨强及坡度的变化规律。结果表明, 相同雨强下沿程流速随着坡度增大而呈增大的趋势, 坡度为 20° 的流速大于另外 3 种坡度 (10°、15° 和 25°) 的流速; 随着雨强的增加, 坡面流平均水深不断增大。不同雨强条件下, 坡度为 10° 的坡面径流平均水深相对较大, 而在中大雨强下, 当坡度为 20° 和 25° 时平均水深均处于较低水平; 在同一坡度下, 坡面单宽流量随着雨强增大而增大, 两者呈现较好的线性关系, 决定系数均大于 0.91; 随着坡度的增加, 单宽流量在 10° 和 20° 附近分别出现先增加后减少的变化趋势, 坡度对单宽流量影响存在临界坡度, 其变化值在 10° 附近。试验结果揭示了试验槽内红壤坡面侵蚀过程中雨强、坡度与水动力特性的关系。

关键词: 模拟降雨; 红壤; 坡面侵蚀; 水动力学特性

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.04.014

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2015) 04-0638-05

引用格式: 梁志权, 卓慕宁, 郭太龙, 谢真越, 廖义善, 张思毅, 李定强. 不同雨强及坡度下坡面流的水动力特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 638-642.

LIANG Zhiqun, ZHUO Muning, GUO Tailong, XIE Zhenyue, LIAO Yishan, ZHANG Siyi, LI Dingqiang. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Hydrodynamic Characteristics of Overland Flow [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4): 638-642.

华南红壤区占中国土地总面积的 22%, 这一地区热量丰富, 生产力较高。但是, 华南地区降雨量大, 长期的土地开发利用导致养分淋溶与水土流失严重。如何防控土壤侵蚀以维持土地生产力一直是华南地区一个重大的环境问题。影响水土流失的因素很多, 包括降雨特征、下垫面条件、土壤水分子物理特性等。强降雨条件下的坡面水流是华南地区土壤侵蚀的主要动力, 引起土壤颗粒分散、剥离、泥沙输移和沉积。坡面流是降水扣除地面截留、填洼与下渗等损失后, 在坡面上形成的一种浅层明流, 其水动力学特性对于坡面侵蚀预报模型的构建具有重要的理论意义。国内外许多学者对坡面流做了很多工作 (Foster 等, 1984; Abrahams 等, 1996)。江忠善和宋文经 (1988) 讨论了坡面流速的影响因素; 姚文艺 (1993) 根据试验资料建立了不同流态坡面流速计算式; 也有些学者 (Shen, 1973; 姚文

艺, 1996) 从阻力规律特性对坡面流展开研究, 主要依据 Darcy-weisbach 阻力参数和曼宁系数反映坡面流阻力特性。前人建立起的多种不同侵蚀模型, 对认识坡面侵蚀过程提供了重要手段, 但每一种坡面流模型均有其自身局限性, 其中的关键因素是华南地区独特的气候和红壤自身的特性。

首先, 华南红壤区土壤具有独特性, 长期高温高雨量下的风化使华南红壤侵蚀潜力大, 目前对暴雨驱动下的红壤坡面侵蚀机制方面的研究较为缺乏; 其次, 华南地貌多为山地丘陵, 地形坡度大; 再次, 雨热不同季, 干湿交替明显造成坡耕地严重的水土流失 (朱丽琴和王莉, 2012)。因此, 针对华南地区强度大、历时长、大暴雨事件频发的降雨特点和红壤区坡耕地地形特点, 研究不同雨强及坡度下华南红壤坡面侵蚀过程, 可以为本地区水土流失的防控提供重要的科学依据。本文在前人研究的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171221); 广东省自然科学基金项目 (S2012030006144; S2011020005896); 广东省水利厅委托项目 (GPCGD112197FT141F1; GPCGD122197FD096F)

作者简介: 梁志权 (1989 年生), 硕士研究生, 主要从事方向为水土保持。E-mail: quan_228@126.com

*通信作者。李定强 (1963 年生), 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为水土保持与非点源污染。E-mail: lidq@gzb.ac.cn

收稿日期: 2015-04-02

基础上, 开展室内人工模拟降雨试验, 研究不同雨强及坡度条件下红壤坡面流的水动力特性, 分析红壤水土流失过程中的流速、水深及单宽流量变化特征, 对于认识红壤侵蚀过程与寻找科学对策具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 降雨及坡面土槽系统

试验设在广东省生态环境与土壤研究所人工模拟降雨大厅内进行。装配国际先进的下喷式模拟降雨器, 有效降雨高度 13.4 m, 可以使所有的雨滴达到终点速度。降雨均匀度与自然降雨相似, 可进行 15~400 mm·h⁻¹ 的各种雨强模拟降雨, 均匀度>85%。可满足红壤区不同侵蚀模拟的要求。

试验土槽为可移动式变坡钢槽, 规格为 2 m×0.5 m×0.5 m, 根据红壤区坡耕地形特点(王学强等, 2007; 张会茹等, 2009), 共设计 5 种坡度(5°、10°、15°、20°、25°); 根据华南地区常见的雨强范围和南方短历时暴雨计算方法(刘丽诗, 2007), 设计 5 种雨强(60、90、120、180、270 mm·h⁻¹), 每个处理设 1 次重复, 共计降雨场次 25 次。试验用土采自广州郊区的弃耕地, 土壤初始容积含水量为 $w=8\%$, 用于试验的土壤前期经风干后水分含量约为 $w=5.2\%$, 土壤有机质、全氮、全磷和全钾的质量分数分别为 1.89、0.079、0.249、24.6 g·kg⁻¹。试验前过 2 mm 的孔筛, 粒径可划分为: < 0.002 mm, 0.002~0.05 mm, > 0.05 mm。各级粒径质量分数分别为 8.9%、35.4%、55.7%。

1.2 试验设计

试验前 1 天向填装土壤喷撒一定量的蒸馏水在土壤表面(水量根据控制的含水量 $w=8\%$ 和现场实测含水量的差值进行计算), 在土壤表面覆盖薄膜以防止水分蒸发; 装土前需要均匀搅拌土壤。试验土槽采用分层装土, 首先在槽底部铺设一层 5 cm 厚的细砂, 其上以 10 cm 为间隔, 共装填 50 cm 的供试土壤。槽壁上以 10 cm 为间隔划出刻度线, 再根据每层土槽的体积和所需装土容重计算出每层土壤质量, 通过称量将每层土壤容重控制在 1.25 g·cm⁻³。填土时采用边填充边压实的方法, 每层装好后用钢毛刷将表面刮平打毛(最上面的一层则不打毛), 以使相邻 2 层土壤之间不产生分层效应。由于模拟的坡面无植被覆盖, 故无需考虑植被情况。装土容重与原状土相同, 因此松紧度近似, 能够保证不同雨强、坡度实验的坡面土壤结构、土层结构一致。试验结束后清理槽内所有土壤, 按相同的土壤容重、含水量填装未经试验的土壤, 尽可能缩小每场试验的土槽间的差异。

本试验研究不同雨强、坡度对华南红壤坡面流

水力学特性——流速、平均水深和单宽流量的定量影响。从开始降雨记时, 对产流时间进行记录。产流后开始采集径流段的径流量、泥沙量, 在最初的 20 min 内, 每隔 5 min 采集 1 次, 随后的 40 min 里, 则以 10 min 为间隔, 共计历时 1 h。同时, 沿坡长水流方向, 在槽边上以 20 cm 为间隔, 把坡长划分为 10 个坡段, 采用染色剂法(KMnO₄ 溶液)测量染色剂通过各坡段所需的时间, 每隔 10 min 对各坡段进行测定, 将 6 次的测量值平均后, 再换算出不同坡段的平均流速, 分别乘以不同的修正系数 0.67、0.70、0.80 得到该断面层流、过渡流和紊流的平均流速(Abrahams 等, 1986; 潘成忠和上官周平, 2007)。由于染色剂法在测量坡度较小且坡长小于 1.5 m 时会出现较大的误差(罗榕婷, 2010), 故结果分析中没有对坡度为 5° 条件下的沿程流速进行讨论。降雨实验结束后, 测量所有径流样的体积, 并用烘干称质量法测定径流含沙量, 所有样品重复数为 1 次。采用水动力特性参数并基于明渠水力学理论(吴持恭, 1998)进行计算。统计所有坡段的流速; 所得平均值乘以修正系数得到全坡长平均流速。平均水深用式(1)进行计算。单宽流量采用容积法, 用式(2)计算。试验数据采用 Excel 和 SPSS17.0 进行统计分析, 显著性水平为 0.01。

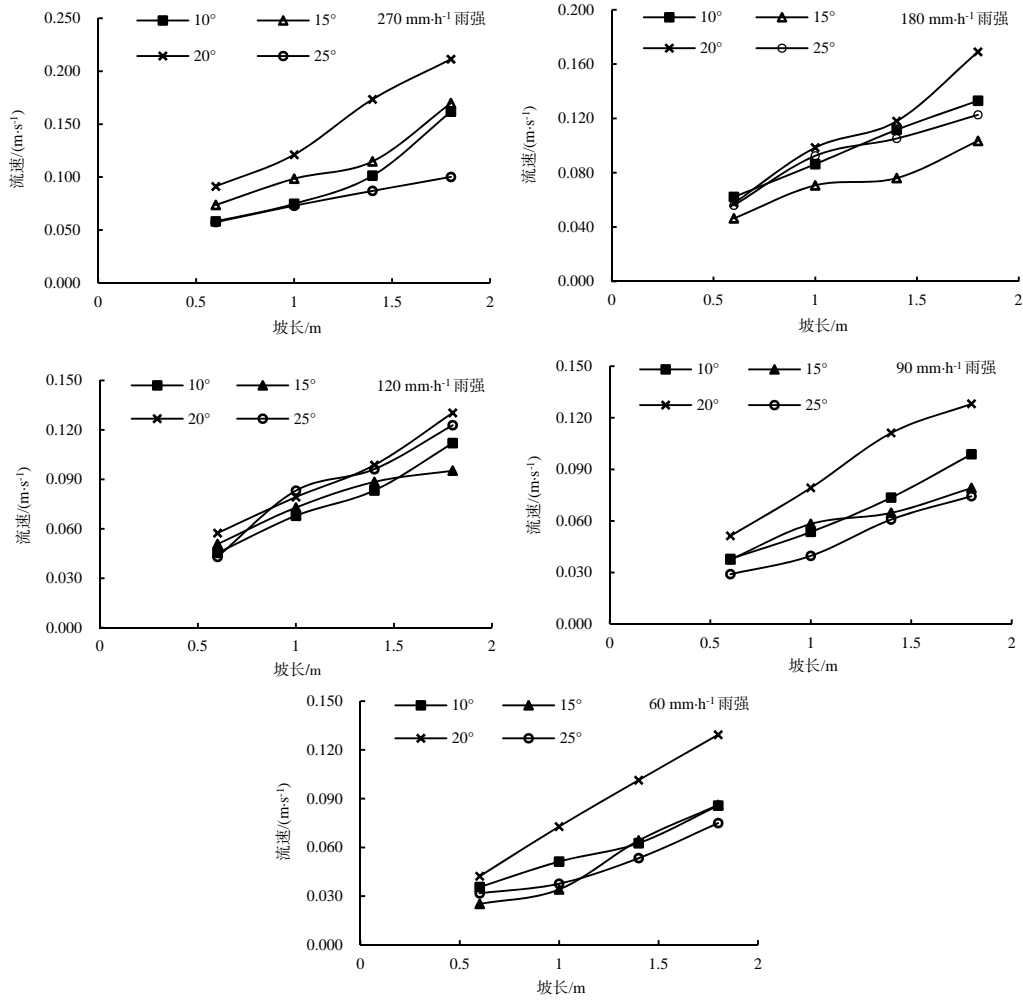
$$\text{平均水深} = \frac{\text{单宽流量}}{\text{平均流速}} \quad (1)$$

$$\text{单宽流量} = \frac{\text{累积径流总量}}{\text{降雨历时} \times \text{槽宽}} \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 不同雨强及坡度条件下沿程流速的变化

坡面水流速度是坡面径流主要的水动力要素之一, 其变化影响着坡面水蚀的颗粒剥离、泥沙输移和沉积过程。经计算验证, 该坡面流的流态为层流, 修正系数为 0.67。统计得到沿程 0.6、1.0、1.4、1.8 m 处的流速, 试验结果如图 1 所示。从图 1 曲线可看出, 相同雨强下薄层水流的沿程流速不断增大, 坡长对流速的影响显著, 而 0.6 和 1.0 m 处的水流速度的差异性很小, 说明坡长对流速的影响随沿程距离的增大而增强。赵小娥等(2009)认为 50 mm·h⁻¹ 下坡长对流速的影响很大。除了雨强为 120 mm·h⁻¹ 外, 当坡度为 20° 时水流速度大于另外 3 种坡度(10°、15°和 25°), 表明流速的差异性是由降雨强度、坡度等因素共同决定的。当雨强分别为 120、90 和 60 mm·h⁻¹ 时, 除坡度为 20° 之外, 从 3 种不同坡度(10°、15°和 25°)所得的实验结果来看, 红壤坡面侵蚀过程中, 水流速度差异性很小,



沿程流速测定的重复次数为 6

图 1 不同雨强及坡度条件下沿程流速的变化

Fig. 1 Flow velocity change with slope length under different simulated rainfalland slope gradient

表明在中低雨强下，坡长大小对流速影响更为显著；当雨强较大时（180 和 270 mm·h⁻¹），同坡度下流速也较大，而且不同坡度下流速相差也较大，说明雨强较大时，雨强为主要影响因子，这与吕宗强等（2010）采用人工降雨模拟薄层水流的流速变化结论相似。根据层流的谢才公式和紊流的曼宁公式，流速总是随着坡度的增大而增大的，而目前土壤侵蚀机理分析及模型构建、坡面流速计算大都采用上述 2 式，与本文结论有所不同。因此，很有必要对坡面流体力学特性与坡度的关系进行更进一步的深入研究。

2.2 不同雨强及坡度条件下平均水深的变化

与坡面水流速度一样，平均水深也是最基本的水动力学特性之一。但由于坡面水流水层较薄，同时受到下垫面条件、降雨强度等因素的影响，边界扰动较强烈，水深复杂多变。平均水深与降雨强度、坡度的关系如图 2 所示。从试验结果来看，径流平均水深随雨强的增加而增大。坡度对平均水深的影

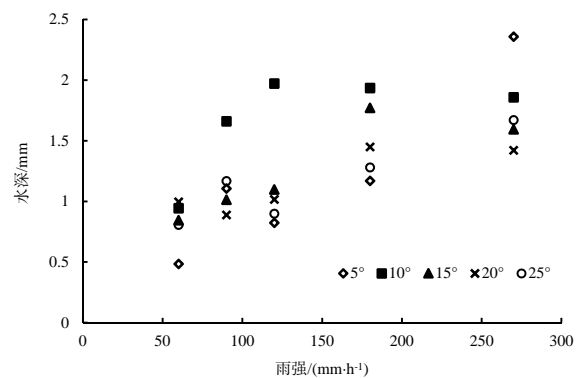


图 2 不同雨强及坡度条件下平均水深的变化

Fig. 2 Average flow depth change under different simulated rainfall and slope gradient

响比较复杂，不同坡度下水深随雨强的变化有较大的差异。不同雨强下，坡度为 10°时水深为 (1.67±0.43) mm，比坡度为 15°、20°、25°时要大，显著性水平分别为 0.05、0.04、0.04。在中大雨强下（120、180 和 270 mm·h⁻¹），坡度为 20°和 25°

时水深偏小,分别为(1.30+0.24) mm和(1.28+0.39) mm。这可解释为随着坡度的增大,试验土槽的受雨面积变小;根据式(1)可知径流量越小,则平均水深越小。吕宗强等(2010)采用测压管水位差的方法,测得坡度较大时水深较小。张光辉等(2001)通过变坡土槽试验发现水深与流量和坡度间呈线性关系。目前对径流水深的研究主要在室内条件下开展,以底部糙率相对稳定的实验水槽进行试验为主,大部分研究指出平均水深与流量和坡度间呈简单的幂函数关系(于朋等,2009)。目前关于降雨条件下坡面流理论尚不完善,对侵蚀水流的水动力学机制探讨是基于明渠水流理论假定,其水力要素之间的关系从形式上可借鉴明渠水流的公式近似求解。综上所述,华南红壤坡面径流的平均水深受雨强及坡度双因子影响;与流速类似,水深的差异性是由降雨强度、坡度等因素共同决定的;水深随雨强的增加呈增大的趋势,中大雨强下水深受坡度的影响更为显著。

2.3 不同雨强及坡度条件下单宽流量特征

坡面侵蚀过程中,土壤流失程度与坡面径流等水文特征密切相关。其中,单宽流量作为比较重要的水动力特征,直观地反映流速、平均水深对红壤侵蚀过程的影响。图3为不同雨强及坡度条件下单宽流量的变化。从图3曲线可看出,在同一坡度下,单宽流量随雨强的增大而增大。拟合函数关系式如表1所示,雨强对单宽流量的影响较为显著,两者呈现较好的线性关系,决定系数 r^2 在0.91以上。这与部分学者的研究结论相似(赵小娥等,2009)。在同一雨强下,随着坡度的增大,单宽流量2次呈现先增加后减少的变化趋势,其变化在 10° 附近较为剧烈。首先,当坡度增大至 10° 时单宽流量达到峰值,比另外4种坡度要大,这表明在 10° 附近存在临界坡度;随后在 15° 时大幅度下降,并在 20° 时略有上升。这可以解释为随着坡度的继续增大,

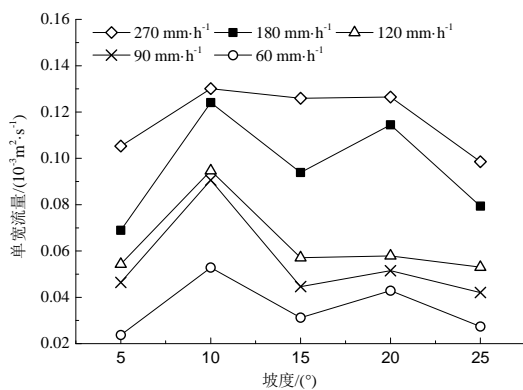


图3 不同雨强及坡度条件下单宽流量特征

Fig. 3 Unit width discharge characteristics under different simulated rainfall and slope gradient

表1 单宽流量与雨强的拟合函数及相关性分析

Table 1 Fitting function and correlation analysis between unit width discharge and rainfall intensity

坡度/ $^\circ$	拟合函数	决定系数 r^2	显著性水平
5	$q=0.000\ 537I-0.015\ 6$	0.960	$P=0.003$
10	$q=0.000\ 637I-0.006\ 2$	0.928	$P=0.008$
15	$q=0.000\ 551I-0.012\ 2$	0.990	$P=0.000$
20	$q=0.000\ 457I-0.005\ 5$	0.919	$P=0.010$
25	$q=0.000\ 471I-0.005\ 0$	0.974	$P=0.002$

q 为单宽流量($10^{-3}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$); I 为降雨强度($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)

平均水深减少而流速增大。在 20° 时流速增大的幅度比水深减少的幅度要大,而流量与流速、水深密切相关,故流量出现小范围的增大。这进一步表明华南红壤坡面侵蚀的过程是由降雨强度、坡度等其他因素共同决定的。单宽流量与累积入渗量密切相关(耿晓东等,2009),相同条件下入渗量越小,则单宽流量越大。坡面侵蚀过程存在一个临界坡度,当坡度小于临界值时,径流量随坡度的增大而增大,反之,当坡度大于临界值时,径流量随着坡度的增大而减少。蔡强国和陈浩(1989)认为 18° 为一个临界坡度,当坡度小于 18° 时,入渗量随着坡度的增大而减小;当坡度大于 18° 时,坡度对入渗量影响不大。靳长兴(1996)则认为 15° 是临界坡度。另外,也有学者通过分析坡面流侵蚀机理和小区实测资料,得出临界坡度与泥沙受力状况有关的结论。但是,也有部分研究认为,坡度范围为 $0^\circ\sim 25^\circ$ 时,单宽流量随坡度的增大而减少,不存在临界坡度。

试验结果也显示,在中小雨强条件下单宽流量的差异性较小,而在大雨强下差异性非常明显,表明大雨强对产流影响较大。当雨强分别为 120 、 90 、 $60\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,从不同坡度所得的实验结果来看,坡度对径流的影响不显著,表明在低雨强及中雨强下,单宽流量主要受雨强大小的影响,而受坡度的影响较小。此外,大雨强下坡度对单宽流量影响很大,尤其是坡度范围为 $10^\circ\sim 20^\circ$ 。

3 结论

(1) 相同雨强条件下,沿程水流速度不断增大,坡长对流速的影响显著;当坡度为 20° 时,水流速度大于另外3种坡度(10° 、 15° 和 25°)。总的来说,坡长对流速的影响随着沿程距离的增大而增强。

(2) 平均水深均随雨强的增加而呈增大的趋势。不同雨强条件下,坡度为 10° 时,坡面径流平均水深相对较大;而中大雨强下 20° 和 25° 时平均水深均处于较低水平。

(3) 在同一坡度下,单宽流量随雨强的增大而增大,两者呈现较好的线性关系,拟合函数的决定系数在0.91以上,雨强对单宽流量的影响较为显

著。另外,随着坡度的增大,单宽流量在 10° 和 20° 附近均出现先增加后减少的变化趋势,坡面侵蚀过程存在临界坡度,本研究的结果为 10° 附近。

研究结果进一步说明了试验槽内红壤坡面侵蚀过程中雨强、坡度与水动力特性的关系,但对降雨条件下的入渗量问题研究不够全面,要得到一般性的研究结论,尚需开展一系列相关试验研究。

参考文献:

- ABRAHAM A D, LI G, PARSONS J. 1996. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(1): 35-47.
- ABRAHAM A D, PARSONS A J, LUK S H. 1986. Resistance to overland-flow on desert hillslopes [J]. *Journal of Hydrology*, 88(3-4): 343-363.
- FOSTER G R, HUGGINS L F, MEYER L D. 1984. A laboratory study of rill hydraulics Shear stress relationships [J]. *Transaction of ASAE*, 27(3): 790-796.
- SHEN H W. 1973. Rainfall effect on sheet flow over smooth surface [J]. *Transactions of ASAE*, 99: 771-792.
- 蔡强国, 陈浩. 1989. 影响降雨击溅侵蚀过程的多元回归正交试验研究 [J]. *地理研究*, 8(4): 28-35.
- 耿晓东, 郑粉莉, 张会茹. 2009. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究 [J]. *水土保持学报*, 23(4): 39-43.
- 江忠善, 宋文经. 1988. 坡面流速的试验研究 [J]. *中国科学院西北水土*

- 保持研究所集刊, (7): 46-52.
- 靳长兴. 1996. 坡度在坡面侵蚀中的作用 [J]. *地理研究*, 15(3): 57-61.
- 刘丽诗. 2007. 沿海地区可能最大暴雨及短历时暴雨计算方法的研究 [D]. 南京: 河海大学: 71-72.
- 罗榕婷, 张光辉, 沈瑞昌, 等. 2010. 染色剂测量坡面流速的最佳测流区长度研究 [J]. *水文*, 30(3): 5-9.
- 吕宗强, 雷孝章, 张鹏飞. 2010. 人工降雨条件下坡面流试验分析 [J]. *水电能源科学*, 28(5): 1-3.
- 潘成忠, 上官周平. 2007. 不同坡度草地含沙水流水力特性及其拦沙机理 [J]. *水科学进展*, 18(4): 490-495.
- 王学强, 蔡强国, 和继军. 2007. 红壤丘陵区水土保持措施在不同坡度坡耕地上优化配置的探讨 [J]. *资源科学*, 29(6): 68-74.
- 吴持恭. 1998. 水力学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社: 190-201.
- 姚文艺. 1993. 坡面流流速计算的研究 [J]. *中国水土保持*, (3): 25-29.
- 姚文艺. 1996. 坡面流阻力规律试验研究 [J]. *泥沙研究*, (1): 74-82.
- 于朋, 雷孝章, 陈平安, 等. 2009. 坡面流水力学特性研究的进展 [J]. *四川水利*, (4): 40-44.
- 张光辉, 卫海燕, 刘宝元. 2001. 坡面流水动力学特性研究 [J]. *水土保持学报*, 15(1): 58-61.
- 张会茹, 郑粉莉, 耿晓东. 2009. 地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响研究 [J]. *水土保持研究*, 16(4): 52-54.
- 赵小娥, 魏琳, 曹叔尤, 等. 2009. 强降雨条件下坡面流的水动力学特性研究 [J]. *水土保持学报*, 23(6): 45-57.
- 朱丽琴, 王莉. 2012. 红壤坡耕地水土流失综合治理的实践与经验——以江西省南昌市进贤县为例 [J]. *亚热带水土保持*, 24(4): 26-29.

Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Hydrodynamic Characteristics of Overland Flow

LIANG Zhiquan^{1,2,3}, ZHUO Muning², GUO Tailong², XIE Zhenyue²,
LIAO Yishan², ZHANG Siyi², LI Dingqiang⁴

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Pollution Integrated Control//Guangdong Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Guangzhou Branch of Chinese Academy of Sciences//Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract: Soil erosion is a critical environmental problem in south China. To investigate and understand erosion flow hydraulics could help to understand the erosion processes in this region. An simulated rainfall experiment was conducted to quantify the effects of rainfall intensity (60, 90, 120, 180, and 270 mm·h⁻¹) and slope gradients (5°, 10°, 15°, 20°, and 25°) on flow velocity, flow depth and unit width discharge on runoff and soil erosion processes on red earth hillslopes. The results showed that in fixed rainfall intensity, the flow velocity increased along the slope length. The flow velocity occurring on the 20° slope was always higher than that on the other slopes (15°, 20°, and 25°). The average flow depth increased with the increase in rainfall intensity, and higher flow depth occurred on 10°, while lower flow depth occurred on 20° and 25° under the moderate and large rainfall intensity. In the same slope gradient, the unit width discharge significantly and linearly increased with increasing rainfall intensity, with $r^2 > 0.91$. In addition, the unit width discharge at first increased and then decreased near 10° and 20°, respectively. The critical slope degree on effects of slope gradient on the unit width discharge and the value was near 10°. Results from this study expanded the understanding of the relationship among slope gradient, rainfall intensity, and erosion processes characteristics.

Key words: simulated rainfall; red soil; hillslope erosion; hydrodynamic characteristics