

\*\*\*\*\*  
试验研究  
\*\*\*\*\*

# 不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响

梁志权<sup>1</sup>, 张思毅<sup>1</sup>, 卓慕宁<sup>1</sup>, 谢真越<sup>1</sup>, 廖义善<sup>1</sup>, 李定强<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院 广州分院 广东省科学院, 广东 广州 510650)

**摘要:** [目的] 研究不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响, 为认识红壤侵蚀过程和水土流失防治提供科学依据。[方法] 通过人工模拟降雨试验, 研究了不同降雨强度、不同坡度对华南红壤坡面降雨产流过程和侵蚀产沙过程的影响。[结果] (1) 相同坡度条件下, 坡面径流量、侵蚀产沙量均随着雨强的增大而线性增大; 相同雨强下, 径流量随坡度的增加而减小, 而产沙量随着坡度的变化比较复杂; (2) 雨强和坡度共同影响着坡面产沙过程, 当雨强小于等于 180 mm/h 时, 产沙量随坡度的增加而增大, 在 240 mm/h 出时呈现先增加后减小的趋势, 在 15°附近出现临界坡度。在降雨初期, 径流率表现为波动增加过程, 15 min 后趋于平稳, 一直持续到降雨结束, 其中雨强为 240, 180 mm/h 时波动较为剧烈, 而产沙率呈现急剧而短暂的上升后迅速下降, 在大雨强、陡斜坡条件下此现象尤为明显; (3) 坡面径流平均流速与单宽流量、坡度比存在显著的幂函数关系, 流速与径流量、侵蚀产沙量有着类似的变化规律。[结论] 红壤侵蚀过程中雨强为主要影响因素, 坡面流速可作为表征红壤坡面侵蚀特征的重要因子。

**关键词:** 模拟降雨; 红壤; 坡面侵蚀; 产流; 产沙; 流速

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)02-0001-06

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 梁志权, 张思毅, 卓慕宁, 等. 不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 1-6. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.001; Liang Zhiquan, Zhang Siyi, Zhuo Muning, et al. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Erosion Process in Red Soil Hillslopes[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 1-6. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.001

## Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Erosion Process in Red Soil Hillslopes

LIANG Zhiquan<sup>1</sup>, ZHANG Siyi<sup>1</sup>, ZHUO Muning<sup>1</sup>, XIE Zhenyue<sup>1</sup>, LIAO Yishan<sup>1</sup>, LI Dingqiang<sup>1,2</sup>

(1. Guangdong Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Pollution Integrated Control, Guangzhou, Guangdong 510650, China; 2. Guangzhou Branch of Chinese Academy of Sciences, and Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510650, China)

**Abstract:** [Objective] Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion process were studied in red soil hillslopes, to provide a scientific basis for soil and water loss control. [Methods] An simulated rainfall experiment was conducted to quantify the effects of rainfall intensity(240, 180, 120, 60 mm/h) and slope gradients(25°, 15°, 5°) on runoff generation and sediment yielding on red soil slope. [Results] (1) In same slope gradient, the accumulative runoff and accumulative sediment load both significantly and linearly increased with the increase of rainfall intensity. In same rainfall intensity, slope runoff increased with slope gradient increasing, but sediment transport exhibited an elusory variaton. (2) The soil loss increased when rainfall intensity increased from 60 to 180 mm/h, while there was a critical slope at 15° in the rainfall intensity of 240 mm/h, wherein the soil loss increased at first and then decreased. Runoff rate kept a relatively stable stage after an initial fluctuated increased from 0 to 15 min, this fluctuation phenomenon was obvious under rainfall intensity of the 240 and 180 mm/h. The sediment generation rate rapidly increased and then decreased quick-

收稿日期: 2016-07-17

修回日期: 2016-08-31

资助项目: 广东省省院产学研项目“南方典型小流域水土流失防灾减灾关键技术及示范研究”(2013B091500077); 水利部公益性行业科研专项(201501047); 省院创新平台建设专项; 广东省省级科技计划项目(2015B070701017)

第一作者: 梁志权(1989—), 男(汉族), 广东省佛山市人, 硕士, 研究实习生, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: zqliang@soil.gd.cn.

通讯作者: 李定强(1963—), 男(汉族), 湖南省安化县人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与非点源污染方面的研究。E-mail: lidq@gzb.ac.cn.

ly. This pattern was more pronounced when there were heavy rains and steep slopes. (3) The average flow velocity of slope flow had a significant fitting relationship of power function with the unit width discharge and slope ratio. The flow rate experienced a similar regular pattern with respect to surface runoff and sediment generation. [Conclusion] Rainfall intensity is the main factor in the red soil erosion process, and velocity could be used as important indicators to assess red soil slope erosion features.

**Keywords:** simulated rainfall; red soil; slope erosion; runoff generation; sediment yield; velocity

土壤侵蚀是中国普遍关注的主要环境问题之一。华南红壤区占中国土地总面积的 23%，该区域降雨充沛、热量丰富，是中国重要的农业生产区域，但由于该区以山地丘陵为主，长期风化作用下使得红壤侵蚀潜力大，加上大暴雨事件频发、长期以来土地资源不合理的开发与利用，华南红壤丘陵区已经成为国内仅次于黄土高原的严重水土流失区<sup>[1]</sup>。因此，保证土地资源的可持续发展、防控土壤侵蚀已成为红壤区的一个重大研究课题。降雨是引发红壤坡面侵蚀的主要推动力。雨滴溅蚀和地表径流冲刷是主要侵蚀方式，其过程受诸如土壤物理化学特性、降雨特征、坡度、植被覆盖等影响。研究表明<sup>[2-3]</sup>，红壤坡面侵蚀主要发生在裸露的地表，如农田两茬间期，开发建设项目工程开挖等<sup>[4]</sup>，裸露坡地的年均土壤侵蚀强度多在 5 000 t/km<sup>2</sup> 以上，达到强烈等级。目前，国内许多学者的研究主要集中于黄土高原地区<sup>[5-7]</sup>，对暴雨驱动下裸露红壤坡面的产流产沙过程的定量研究较为薄弱；其次，流速作为表征坡面流水动力学特性的重要因子，受径流量、坡度等条件的控制，在侵蚀量的计算上是重要的参数，与红壤坡地产流产沙过程紧密相连。因此，本试验利用室内人工模拟降雨，结合华南红壤区降雨、坡地特点，研究不同降雨强度、坡度对华南红壤裸露坡面侵蚀过程的影响，探讨不同雨强和坡度组合条件下坡面降雨产流、产沙过程动态特征，弄清流速与产流、产沙过程的耦合关系，为认识红壤侵蚀过程和水土流失防治提供科学依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 降雨及坡面土槽系统

本试验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。大厅装配下喷式模拟降雨器，有效降雨高度 13.4 m，可进行 15~300 mm/h 的各种雨强模拟降雨，均匀度 > 85%，雨滴大小、终点速度、均匀度与自然降雨类似，可满足红壤区不同的侵蚀模拟要求。试验土槽为可移动式变坡钢槽，规格为 2 m × 0.5 m × 0.5 m。试验用土采自广东省梅州市五华县的源坑水小流域的水土保持综合示范区内的弃耕

地。五华县水土流失严重，是广东省土壤侵蚀分组中“极强”和“剧烈”等级的集中分布区，其源坑水小流域面积为 4.3 km<sup>2</sup>，地处粤东花岗岩红壤丘陵风化区，其侵蚀类型以水蚀为主，主要有面蚀、沟蚀、崩岗侵蚀等。试验土壤初始体积含水量约为 18%，容重为 1.25 g/cm<sup>3</sup>，其粒径(mm)小于 0.002, 0.002~0.05, 大于 0.05 的质量分数分别为 25.4%, 27.8%, 46.8%，为砂质黏壤土。分别采集 0—10 cm, 10—30 cm, 30—50 cm 的土壤，搬运回实验室后，不进行过筛和研磨处理，尽量保持土壤自然结构状态，并按原来的容重和土层顺序分别填装 0—10 cm, 10—30 cm, 30—50 cm 的土壤到试验钢槽中，尽可能使试验土槽贴近原土性质。首先，在槽底部铺设两层纱网，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。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(最上面的一层不需要)，以使相邻两层土壤之间不产生分层效应。每次正式降雨试验前 1 d，将土槽调整到试验所需要坡度，采用 30 mm/h 的雨强进行前期预处理，目的是调整土壤含水量，土槽坡面开始产流时停止降雨，然后用塑料布覆盖并静置 12 h 以上，这样既可以通过降雨固结试验土槽表面分散的土粒，也能保证形成相对均匀的下垫面条件，满足在相似的土壤表面条件下研究坡度对侵蚀过程的影响，同时保证各场次正式降雨前的土壤水分状况基本一致。

### 1.2 试验设计及过程

华南红壤区内山地丘陵较多，坡耕地面积较大，有 90% 的坡耕地具有不同程度的水土流失，其坡度主要分布为 0°~25°<sup>[8-9]</sup>，因此试验设计 3 个坡度(5°, 15°, 25°)；华南地处低纬，属热带、亚热带季风气候区，季风气候特征极其显著，形成暴雨的热力、水汽及动力条件皆强于我在大陆其他区域，故暴雨发生频数之多、强度之大皆居全国前列。因此，根据现有监测气象数据，结合南方短历时暴雨计算方法<sup>[10]</sup>，设计 4 个雨强(60, 120, 180, 240 mm/h)。试验共计降雨 12 场次。

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，共计历时 1 h，在

最初的 10 min 内,每隔 2 min 采集 1 次;随后的 20 min 内,每隔 5 min 采集 1 次;最后 30 min 内,间隔为 10 min。试验结束后,量测所有径流样的体积,并用烘干称重法测定径流含沙量(精度为 0.1 g),所有样品重复数为 1。试验过程中,沿坡长水流方向,在槽边上以 20 cm 为间隔,把坡长共划分为 10 个坡段,采用染色剂法( $\text{KMnO}_4$  溶液)测量染色剂通过各坡段所需的时间(精度为 0.01 s),每隔 10 min 对各坡段进行测定,换算出不同坡段的表面流速,基于明渠水力学理论,结合不同流态相应的雷诺数判别式以及修正系数法(0.67, 0.70, 0.80),得到该断面层流、过渡流和紊流的平均流速<sup>[6,11]</sup>,试验数据采用 Excel 和 SPSS 17.0 进行统计分析,显著性水平为 0.05。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同雨强及坡度条件下的降雨产流过程

降雨过程的地表径流过程主要由降雨强度、坡度

坡度共同决定。试验结果如表 1—2 所示,同一坡度下,累积径流总量、平均径流率均随雨强增大而增大,雨强对累积径流总量的影响较为显著( $p < 0.01$ ),两者呈现较好的线性关系,决定系数  $R^2$  在 0.95 以上。另外,径流量随坡度的增加呈减小趋势,除 180 mm/h 外,5°下径流总量比 15°和 25°要大。从以往的研究来看,不少学者认为坡面侵蚀过程存在临界坡度,靳长兴<sup>[12]</sup>认为 15°是临界坡度,而蔡强国等<sup>[13]</sup>认为 18°为一个临界坡度,入渗量是影响径流产生的重要因素,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。本试验结果与上述研究有所不同,主要原因是南方红壤区属蓄满产流,加上进行了前期预降雨后,土壤含水量较高,径流量大小主要受承雨量决定<sup>[14]</sup>;随着坡度的增加,在同样的坡长下承雨面积减少,相同条件下产生的净雨量减小,累积径流总量随坡度的增加而减小<sup>[15]</sup>。

表 1 不同坡度下坡面累积径流总量与雨强的拟合方程

坡度/ (°)	不同雨强下坡面累积径流总量/ $\text{m}^3$				拟合函数	决定 系数 $R^2$	显著性 水平
	240 mm/h	180 mm/h	120 mm/h	60 mm/h			
25	0.266	0.215	0.100	0.051	$Q = -0.031 + 1.27 \times 10^{-3} I$	0.96	$p < 0.01$
15	0.291	0.202	0.121	0.054	$Q = -0.011 + 1.25 \times 10^{-3} I$	0.96	$p < 0.01$
5	0.309	0.212	0.128	0.059	$Q = -0.031 + 1.39 \times 10^{-3} I$	0.99	$p < 0.01$

表 2 不同雨强及坡度下的平均径流率 mm/min

坡度/ (°)	不同雨强下平均径流率			
	240 mm/h	180 mm/h	120 mm/h	60 mm/h
25	4.64±0.86 <sup>a</sup>	3.55±0.26 <sup>a</sup>	1.77±0.19 <sup>a</sup>	0.84±0.22 <sup>a</sup>
15	4.91±0.13 <sup>a</sup>	3.38±0.17 <sup>a</sup>	2.08±0.17 <sup>b</sup>	0.87±0.13 <sup>a</sup>
5	5.08±0.17 <sup>b</sup>	3.46±0.23 <sup>a</sup>	2.20±0.18 <sup>b</sup>	0.98±0.06 <sup>b</sup>

图 1 为不同降雨强度和坡度条件下坡面产流率随降雨历时的变化过程。随着降雨时间的增加,在产流初期(0~15 min)径流过程表现为波动增加过程,特别是大雨强下波动较为明显,15 min 以后径流量的波动逐渐趋于平稳,伴有较小的波动,一直持续到降雨结束。一般来说,大雨强下或需要更多的时间才能达到平稳状态,由图 1 可知,120 和 60 mm/h 下的径流率波动较平稳。Donjadee 和 Chinnarasri<sup>[16]</sup>的研究结果表明,每场试验的平稳时间点都不一样,大雨强下通常需要更多的时间才能达到平稳状态。从表 1 可知,除 180 mm/h 外,平均径流率随坡度的增加呈减小趋势,5°下径流率比 15°和 25°要大。胡世雄和靳长兴<sup>[17]</sup>等在黄土高原的研究结果表明,随着坡度的

增大,径流率呈现先增加后减少的变化,与本红壤试验的研究结果不相同,这可能是不同的土壤性质或者试验条件导致的临界坡面存在差异。

### 2.2 不同雨强及坡度条件下的降雨产沙过程

侵蚀产沙过程是研究坡面侵蚀过程的主要内容。将实测的结果统计分析,如表 3—4,图 2 所示。从表 3—4 可以看出,同一坡度下,累积泥沙总量随雨强增大而增大,与累积径流总量的结果类似,雨强对累积产沙总量有显著的影响,当坡度为 25°和 15°时,两者呈现较好的正相关关系,决定系数  $R^2$  在 0.91 以上;当坡度为 5°时, $p = 0.08$ ,未达到显著水平。研究结果表明,红壤坡面侵蚀产沙过程受雨强和坡度的共用影响,不同雨强下侵蚀产沙的临界坡度值不同:当雨强为 60~180 mm/h 时,累积泥沙总量随坡度的减小而减小,未出现临界坡度;当雨强为 240 mm/h 时,侵蚀量呈现先增加后减小的变化趋势,累积泥沙总量和平均产沙率的最大值出现在 15°的情况下。这说明 240 mm/h 下产沙过程主要受径流的剥蚀能力影响。当坡度为 5°~15°时,径流剥蚀能力不断增强,当坡度增

加到 15°附近,雨滴对水面的打击作用减弱,且坡面的承雨面积随坡度的增大而减小,导致径流剥蚀能力减弱,土壤侵蚀量降低,故在 15°附近出现临界坡度。耿晓东<sup>[18]</sup>等通过室内模拟降雨试验,认为雨强在 75,

100 mm/h 条件下红壤坡面侵蚀产沙量随坡度增大而增大,当雨强为 50 mm/h 时,在 20°附近存在一个侵蚀产沙量的临界坡度,说明雨强的大小影响着侵蚀的临界坡度,与本试验产沙量结果较为类似。

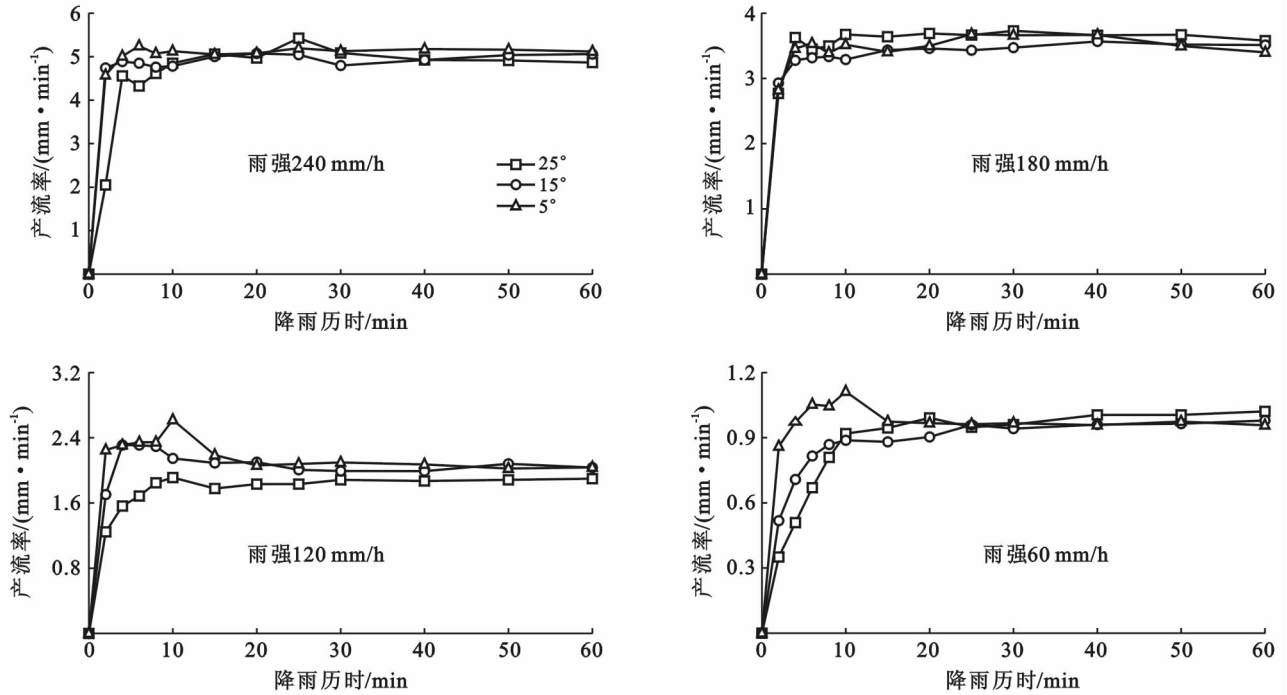


图 1 不同雨强及坡度下的坡面径流率的变化过程

表 3 不同坡度下坡面累积泥沙总量与雨强的拟合方程

坡度/ (°)	不同雨强坡面累积泥沙总量/g				拟合函数	决定 系数 $R^2$	显著性 水平
	240 mm/h	180 mm/h	120 mm/h	60 mm/h			
25	8 535.1	6 517.8	1 752.7	714.4	$W = -2.677 + 4.71 \times 10^{-2} I$	0.92	$p < 0.05$
15	9 138.9	5 521.4	1 406.1	576.9	$W = -3.289 + 4.97 \times 10^{-2} I$	0.92	$p > 0.05$
5	2 991.4	3 085.6	620.2	268.2	$W = -0.917 + 1.77 \times 10^{-2} I$	0.75	$p = 0.08$

表 4 不同雨强及坡度下的平均产沙率

坡度/ (°)	不同雨强平均产沙率/( $g \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$ )			
	240 mm/h	180 mm/h	120 mm/h	60 mm/h
25	$85.06 \pm 20.72^b$	$68.48 \pm 17.16^c$	$19.32 \pm 6.35^e$	$6.10 \pm 1.87^b$
15	$101.22 \pm 57.13^b$	$55.02 \pm 18.01^b$	$14.03 \pm 4.49^b$	$4.92 \pm 1.19^b$
5	$33.75 \pm 24.86^a$	$30.41 \pm 8.67^a$	$6.36 \pm 2.16^a$	$2.88 \pm 1.30^a$

图 2 为不同降雨强度和坡度条件下坡面产沙率随降雨历时的变化过程。从图 2 中可以看出,在降雨初期(0~10 min)红壤坡面产沙率随着雨强、坡度变化具有较大的差异性,特别是 240 mm/h 下,0~10 min 内 15°条件下产沙率比其余两个坡度条件下要高,说明该坡度下径流剥蚀能力最强。在降雨初期,侵蚀产沙率多数呈现急剧而短暂的上升,达到峰值后

迅速下降,随着降雨过程持续下降,保持相对稳定直到降雨结束,这种变化趋势在大雨强、斜陡坡下尤为明显,60 mm/h 条件下侵蚀率曲线相对平缓,与张会茹<sup>[8]</sup>的研究结果类似。其主要原因是降雨初期雨滴击溅产生大量分散的土粒,而坡面上主要是剥蚀能力较强的清水,加上坡面土壤颗粒尚未经过降雨径流分选,细颗粒较多,坡面土壤较容易被剥蚀,径流将坡面表层浮土冲刷下来,使得产流初始的径流含沙量较大,大雨强下径流搬运能力强,因此形成降雨初期急剧波动的产沙率变化过程;随着降雨历时的增加,由于径流中泥沙含量增加,坡面产沙率逐渐由径流挟沙力限制过渡到侵蚀能力限制,部分泥沙在重力作用下发生沉积,径流侵蚀能力降低,形成产沙率的持续下降。

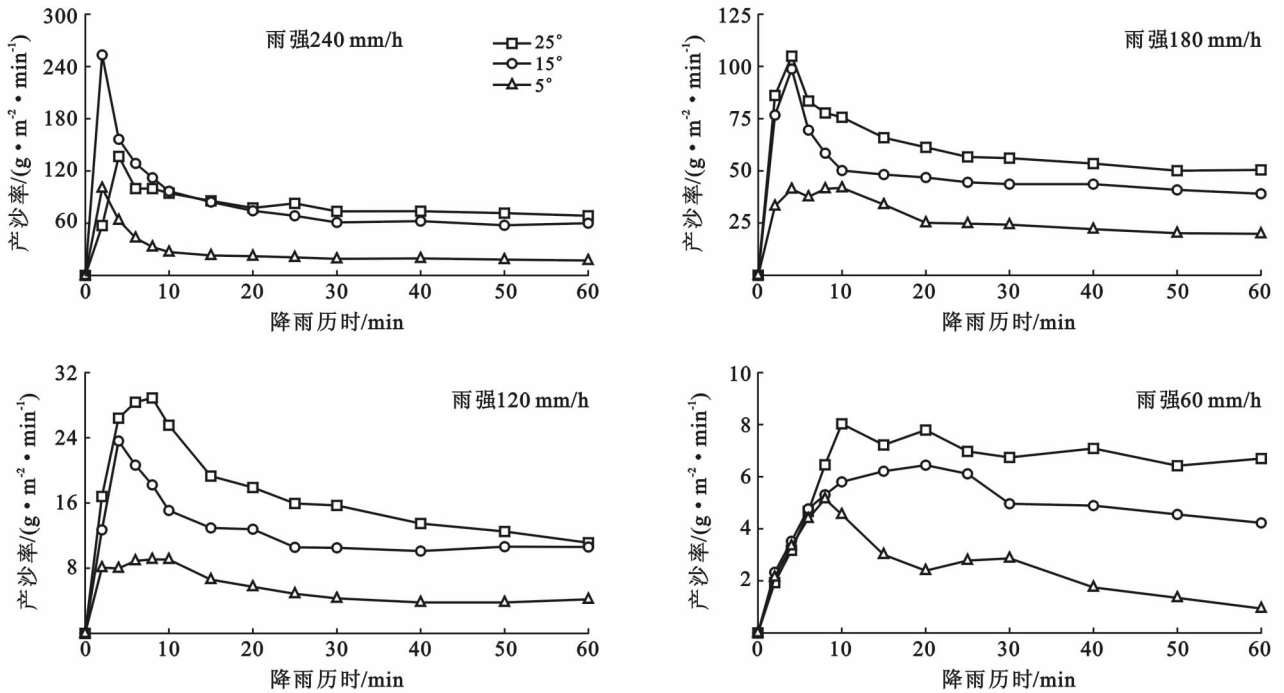


图 2 不同雨强及坡度下的产沙率的变化过程

### 2.3 坡面流流速与坡面产流产沙过程的关系

坡面水流速度是计算坡面流侵蚀动力的重要水动力参数,其变化影响着坡面水蚀的颗粒剥离、泥沙输移和沉积过程,与坡面侵蚀的产流、产沙过程有着密切的关系。经计算可知,本模拟降雨试验下坡面径流流态均属层流,坡面表层流速修正系数取 0.67。试验结果如表 5 所示,径流流速随雨强的增大而增加,降雨强度对华南红壤坡面径流流速有显著影响,两者拟合关系如表 5 和图 3 所示,拟合曲线的决定系数均大于 0.88,显著性水平  $p < 0.05$ 。相应的,流速随雨强的变化规律与径流量、侵蚀产沙量相类似。这可解释为,随着降雨强度的增大,坡面径流量增大,单位时间进入坡面的水量增大,在重力作用下沿坡面方向的径流动力也逐渐增加,导致径流流速也随之增大。

由表 5 可知,径流平均流速随坡度的增大而增大,与产沙过程相类似,流速变化与产沙量有着密切的联系,当坡度为  $5^\circ$  时,坡面流平均流速最小,径流剥蚀能力相对较弱,导致侵蚀产沙泥沙比另外两个坡度要低,随着坡度的增加,  $15^\circ$  与  $25^\circ$  条件下流速的涨幅很小,与侵蚀率的变化规律相同如图 3 所示,当坡度为  $15^\circ$  及  $25^\circ$  时,流速随降雨强度增长的斜率分别增加至  $3.80 \times 10^{-4}$  和  $4.25 \times 10^{-4}$ ,两者仅有微弱的增加。一般认为,当坡度增加到一定程度后,雨滴对水面的打击作用减弱,雨滴动量沿坡面的分量较大,更多的径流重力势能转化为沿坡的动能,水流速度有增大的

趋势,但此趋势会被随之增大的阻力削弱<sup>[19]</sup>;与此同时,坡面承雨面积也将减少,由表 1 可知,  $5^\circ$  下径流总量比  $15^\circ$  和  $25^\circ$  要大,因为减少坡度带来承雨面积的降低,使得坡面产生的净雨量减小,坡面上的径流重力势能减少,导致流速变小,而流速又是影响径流剥蚀能力的重要水动力参数,导致坡面侵蚀产沙量降低<sup>[7]</sup>。

从本试验结果来看,径流平均流速与单宽流量、坡度比存在函数关系:

$$v = 15.89q^{0.53}J^{0.20}$$

式中:  $v$ ——平均流速(m/s);  $q$ ——单宽流量 [ $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ];  $J$ ——坡度比(m/m),决定系数  $R^2$  为 0.95。江忠善<sup>[5]</sup>采用人工降雨对黄土裸地展开研究,上述流量指数与江忠善的 0.50 较为接近,但坡度比指数远小于江忠善的 0.35,说明红壤坡面径流平均流速主要受流量的控制,红壤坡面侵蚀中坡度对流速的贡献较小;随着坡度的增加,径流重力沿坡面方向的分力随之增大,更多的重力势能转化为在沿坡方向的动能,导致径流流速也越大<sup>[20]</sup>,径流剥离、搬运能力加强,侵蚀率随之增大;当坡度增加到  $15^\circ$  以上时,受雨滴击溅、能量转化、阻力因素、受雨面积等因素影响,坡度对流速的影响较薄弱,流速仅有小幅度增加。研究表明,径流流速与红壤坡面产流产沙过程有着紧密联系,可作为表征红壤坡面侵蚀特征的重要因子。

表 5 不同坡度下坡面径流流速与雨强的拟合方程

坡度/ (°)	不同雨强径流流速/(m·s <sup>-1</sup> )				拟合函数	决定 系数 R <sup>2</sup>	显著性 水平
	240 mm/h	180 mm/h	120 mm/h	60 mm/h			
25	0.130	0.103	0.073	0.055	$v=0.027+4.25\times 10^{-4}I$	0.99	$p<0.01$
15	0.128	0.090	0.087	0.053	$v=0.033+3.80\times 10^{-4}I$	0.88	$p<0.05$
5	0.098	0.080	0.053	0.047	$v=0.025+3.00\times 10^{-4}I$	0.93	$p<0.05$

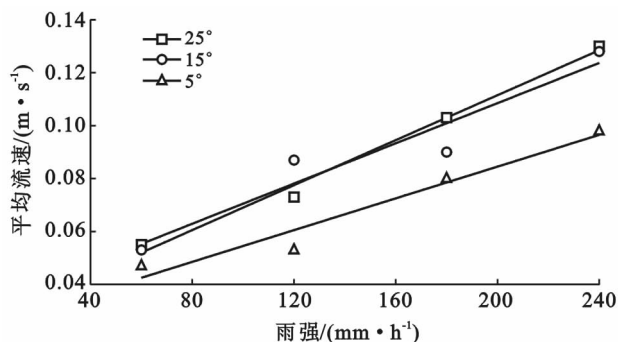


图 3 不同坡度及坡度下径流平均流速的变化

### 3 结论

(1) 不同降雨强度及坡度下,产流过程表现为累积径流总量随雨强增大而线性增加,其大小主要受承雨量决定;随着坡度的增加,坡面承雨面积变小,导致径流总量随之降低;产流过程在 0~15 min 表现为波动增加,在雨强为 240,180 mm/h 时波动较为剧烈,15 min 以后径流率趋于平稳,一直持续到降雨结束,但未探讨入渗量对产流过程的影响。

(2) 红壤坡面侵蚀产沙过程受雨强和坡度的共用影响,其中雨强的影响较为显著。同一坡度下,累积泥沙总量随雨强增大而增大,雨强的大小直接影响着侵蚀产沙过程的临界坡度值;在降雨初期,侵蚀产沙率多数呈现急剧而短暂的上升后迅速下降,这种波动在大雨强、大坡度下尤为明显。

(3) 坡面平均流速与单宽流量、坡度比存在显著的幂函数关系,决定系数  $R^2$  为 0.945。红壤坡面侵蚀中坡度对流速的贡献较黄土坡地要小,流速与径流量、侵蚀产沙量有着类似的变化规律,可作为表征红壤坡面侵蚀特征的重要因子。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 李定强,王继增,万洪富.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.

[2] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡面次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.

[3] 水建国,柴锡周,张如良.红壤坡地不同生态模式水土流失规律的研究[J].水土保持学报,2001,15(2):33-36.

[4] 张冠华,程冬兵,张平仓,等.工程开挖面水土流失特征试验研究[J].长江科学院院报,2015,32(3):27-30.

[5] 江忠善,宋文经.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,1988,1(7):46-52.

[6] 潘成忠,上官周平.不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J].水科学进展,2007,18(4):490-495.

[7] 张光辉.坡面薄层流水动力学特性的试验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.

[8] 张会茹,郑粉莉,耿晓东.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,2009,16(4):52-54.

[9] 王学强,蔡强国,和继军.红壤丘陵区水保措施在不同坡度坡耕地上优化配置的探讨[J].资源科学,2007,29(6):68-74.

[10] 刘丽诗.沿海地区可能最大暴雨及短历时暴雨计算方法的研究[D].江苏南京:河海大学,2007.

[11] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Resistance to overland-flow on desert hillslopes[J]. Journal of Hydrology, 1986,88(3/4):343-363.

[12] 靳长兴.坡度在坡面侵蚀中的作用[J].地理研究,1996,15(3):57-61.

[13] 蔡强国,陈浩.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,1989,8(4):28-35.

[14] 冯秀,查轩,黄少燕.人工模拟降雨条件下花岗岩红壤坡面侵蚀过程与特征分析[J].中国水土保持科学,2014,12(1):19-23.

[15] 余长洪,李就好,陈凯,等.强降雨条件下砖红壤坡面产流产沙过程研究[J].水土保持学报,2015,29(2):7-11.

[16] Donjadee S, Chinnarasri C. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the application of vetiver grass mulch in soil and water conservation[J]. International Journal Sediment Research, 2012,27(2):168-177.

[17] 胡世雄,靳长兴.坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与试验研究[J].地理学报,1999,54(4):347-356.

[18] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.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,2009,23(4):39-43.

[19] Nearing M, Simanton R, Norton D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999,24(8):677-686.

[20] 苏涛,张兴昌,赵怀玉.砒砂岩地区坡面径流水动力特性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(8):203-209.