

## 华南红壤坡面侵蚀水动力学机制试验研究

郭太龙<sup>1</sup>, 卓慕宁<sup>1</sup>, 李定强<sup>1,2\*</sup>, 蔡庆<sup>3</sup>, 谢真越<sup>1</sup>, 廖义善<sup>1</sup>, 胡建<sup>4</sup>

1. 广东省生态环境与土壤研究所, 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;  
3. 广东省水利厅, 广东 广州 510635; 4. 广东省水土保持监测站, 广东 广州 510150

**摘要:** 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。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, 研究探讨华南红壤坡面侵蚀过程及动力特征有着重要的现实意义。通过室内 35 场不同雨强(30、60、90、120、180、210、270 mm·h<sup>-1</sup>)、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水动力学机制。主要取得以下研究成果: (1) 红壤坡面侵蚀水流的流态大部分均处于“层流—缓流区”, 除平均流速随着模拟雨强的增加而增加外, 其他水动力参数(坡面侵蚀水流的阻力、曼宁糙率、径流剪切力、以及水流功)均会受到雨强和坡度改变的影响, 但是不呈现特定的函数关系, 规律不明显; (2) 从水动力学角度解析了红壤坡面水蚀过程, 得出了相对水深和曼宁糙率系数两种水动力因子共同组成的复合水动力特征参数, 可作为表征不同雨强及坡度下的坡面水蚀侵蚀产沙的特征水动力参数指标。

**关键词:** 红壤; 侵蚀; 模拟降雨; 水动力; 流速

**中图分类号:** S157

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2013) 09-1556-08

**引用格式:** 郭太龙, 卓慕宁, 李定强, 蔡庆, 谢真越, 廖义善, 胡建. 华南红壤坡面侵蚀水动力学机制试验研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1556-1563.

GUO Tailong, ZHUO Muning, LI Dingqiang, CAI Qing, XIE Zhenyue, LIAO Yishan, HU Jian. Experimental study on soil erosion and flow hydraulics on red soil slope [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(9): 1556-1563.

土壤侵蚀是全球普遍关注的问题, 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探索, 从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<sup>[1-16]</sup>。一些学者揭示了坡面薄层水流的滚波流动力特征<sup>[17-19]</sup>。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<sup>[11]</sup>, 坡面流动力机制的探讨中会不可避免的涉及到阻力问题, 还有一些学者探讨了坡面流的阻力问题<sup>[20-28]</sup>。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。

侵蚀区域的不同使得水土流失的特征也存在极大的差异。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; 而在我国北方, 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。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

#### 1.1 区域地学特征

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<sup>[29-31]</sup>。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等, 以上诸点使得研究探讨华南红壤坡面侵蚀过程及动力特征有着重要的现实意义。

试验地点位于华南红壤区的中心地带广州市的近郊(113°15'53"E, 23°06'32"N), 该区具有南

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41101257; 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:** 郭太龙(1979年生), 男, 副研究员, 博士, 主要从事土壤侵蚀与溶质运移的研究。E-mail: tlguo@soil.gd.cn

\*通信作者: 李定强(1963年生), 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: 水土保持与非点源污染。

E-mail: dqli@soil.gd.cn

收稿日期: 2013-07-24

亚热带季风气候特征, 南亚热带季风气候, 气候特点是气温高、暴雨频繁等。多年平均气温22℃, 雨量充沛, 多年平均降水量为1736 mm。

### 1.2 供试土壤的理化性质

供试土壤为红壤, 采自广州郊区的弃耕地, 质地为壤土, 试验前过2 mm的孔筛, 具体土壤理化性质指标如下表1所示。

### 1.3 试验设计

由于自然坡地条件下土壤的结构、土层结构、土壤松紧度以及地表覆盖类型等等均表现出极大的时空差异, 加之天然降雨在雨强、雨量、以及时空分布等方面的不确定性, 这就加大了侵蚀研究工作任务的难度, 为了简化科学问题, 通常侵蚀模拟研究中采用室内人工模拟降雨、下垫面采用土壤性质均一的装填土坡面的方法, 这既可以深刻地揭示侵蚀过程的本质, 也可在很大程度上反映了实际情况。

本文采用室内人工模拟降雨的方法, 试验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。试验还需配套可动式移动钢槽2台(自行研制, 尺寸: 长×宽×高=2 m×0.5 m×0.5 m), 土槽装土深度为0.5 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。试验设计模拟雨强7个水平: 30、60、90、120、180、210、270 mm·h<sup>-1</sup>; 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。主要测定的指标: 径流量、泥沙量、坡面流流速。径流量采用体积法量测, 泥沙量采用烘干称重法测定, 坡面流流速采用染色剂法测定(指示剂为高锰酸钾溶液)。试验数据采用Excel和SPSS10.0进行统计分析, 显著性水平为0.01。

模拟试验操作过程如下: (1) 土壤初始含水量: 土壤初始含水量为8% (质量含水量), 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, 试验前一天喷撒一定量蒸馏水(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 g·cm<sup>-3</sup>, 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) 模拟降雨试验进行: 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 mm·h<sup>-1</sup>, 雨强利用雨量桶采用梅花布点法结合秒表进行量测。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面流水动力特征

目前坡面流理论尚不完善, 坡面流水深通常很小, 约几个毫米, 水流的运动受边界影响复杂, 而且关键动力指标参数(如流速或水深)的测定方法也有待改进, 故通常对于坡面侵蚀水流的水动力学机制探讨是基于水力学的明渠水流理论假定, 以简化实际问题。坡面侵蚀水流的水动力学特征主要包括: 水流的平均流速、平均水深、雷诺数、费如的数、曼宁糙率、达西-韦斯巴赫阻力系数、水流功、剪切力等。表1给出了不同模拟雨强及坡度下红壤坡面侵蚀水流的水动力学特征。

#### 2.1.1 平均流速

坡面水流流速是坡面径流最主要的水动力学要素之一, 坡面水流流速的变化会直接影响到坡面水蚀的颗粒剥离、泥沙输移和沉积整个过程, 而坡面水流的流速主要受到地表特征、坡度、流量、降雨雨强等因素影响。从表2可以看出, 在相同坡度条件下改变模拟雨强, 随着模拟雨强的增大, 坡面侵蚀水流的流速也逐渐增大, 这表明模拟雨强大小的改变直接决定了输入系统的雨量大小和强度, 其对坡面水流的运动快慢起着关键作用, 雨强对于坡面侵蚀水流的流速影响显著; 在相同模拟雨强条件

表1 供试土壤的物理化学性质指标

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

土壤	各级粒径质量分数/%			w(有机质)/ (g·kg <sup>-1</sup> )	w(全氮)/ (g·kg <sup>-1</sup> )	w(全磷)/ (g·kg <sup>-1</sup> )	w(全钾)/ (g·kg <sup>-1</sup> )
	<0.002	0.002~0.05	>0.05				
红壤	8.9	35.4	55.7	1.89	0.079	0.249	24.6

表2 不同模拟雨强及坡度下红壤坡面侵蚀水流的水动力学特征  
Table 2 Flow hydraulics on red soil slope erosion under different simulated rainfall intensity and slope gradient

模拟降雨处理		平均流速 $v/$	平均水深 $h/$	雷诺数	费如的数	曼宁糙率 $n/$	达西-韦斯巴赫阻力	水流功/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-3})$	剪切力/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$
坡度/ $(^\circ)$	雨强/ $(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	mm	Re	Fr	$(\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s})$	$f$		
5	270	0.058	1.23	70.8	0.533	0.058	2.454	0.061	1.046
	210	0.051	1.12	56.2	0.488	0.062	2.929	0.049	0.952
	180	0.059	0.81	47.1	0.667	0.043	1.567	0.041	0.686
	120	0.066	0.43	27.9	1.028	0.025	0.660	0.024	0.363
	90	0.042	0.64	26.6	0.528	0.052	2.504	0.023	0.549
	60	0.049	0.28	13.5	0.941	0.026	0.788	0.012	0.237
	30	0.026	0.07	1.9	0.969	0.020	0.743	0.002	0.064
10	270	0.070	0.92	63.5	0.744	0.056	2.513	0.109	1.553
	210	0.062	1.08	66.8	0.607	0.070	3.766	0.115	1.838
	180	0.067	0.97	64.2	0.685	0.061	2.957	0.110	1.651
	120	0.048	1.02	48.0	0.478	0.088	6.092	0.083	1.731
	90	0.045	0.98	43.9	0.462	0.091	6.519	0.075	1.668
	60	0.056	0.48	26.9	0.818	0.046	2.075	0.046	0.822
	30	0.034	0.53	18.2	0.477	0.079	6.101	0.031	0.907
15	270	0.079	0.78	60.6	0.900	0.055	2.556	0.155	1.974
	210	0.064	0.87	55.1	0.696	0.072	4.274	0.141	2.199
	180	0.053	0.91	47.8	0.568	0.089	6.418	0.122	2.292
	120	0.052	0.57	29.3	0.695	0.067	4.292	0.075	1.445
	90	0.044	0.52	22.2	0.614	0.075	5.494	0.057	1.305
	60	0.037	0.45	16.6	0.554	0.081	6.758	0.043	1.152
	30	0.020	0.15	2.9	0.526	0.071	7.497	0.007	0.369
20	270	0.089	0.68	60.0	1.089	0.051	2.306	0.203	2.282
	210	0.064	0.95	59.6	0.660	0.089	6.284	0.202	3.173
	180	0.079	0.71	55.4	0.949	0.059	3.036	0.188	2.373
	120	0.057	0.51	29.1	0.809	0.065	4.176	0.099	1.718
	90	0.058	0.45	25.9	0.878	0.059	3.550	0.088	1.506
	60	0.043	0.52	22.5	0.606	0.088	7.462	0.076	1.753
	30	0.014	0.19	2.7	0.322	0.139	26.328	0.009	0.642
25	270	0.059	0.79	46.0	0.671	0.094	7.511	0.192	3.264
	210	0.053	0.94	49.6	0.554	0.117	11.014	0.207	3.898
	180	0.062	0.66	40.5	0.765	0.080	5.785	0.169	2.747
	120	0.059	0.48	28.0	0.859	0.068	4.584	0.117	1.989
	90	0.036	0.62	22.1	0.459	0.132	16.068	0.093	2.581
	60	0.034	0.42	14.2	0.535	0.106	11.821	0.059	1.730
	30	0.016	0.13	2.1	0.441	0.106	17.349	0.009	0.552

下调整试验坡度,随着坡度的增加坡面水流的流速变化规律不明显,这说明坡度对于坡面侵蚀水流的流速影响不显著。不同坡度( $5^\circ \sim 25^\circ$ )、不同雨强( $30 \sim 270 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )下红壤坡面侵蚀水流的平均流速取值范围为  $0.012 \sim 0.090 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,坡度对平均流速的影响不显著,雨强对平均流速的影响较为显著,平均流速随着模拟雨强的增加而增加。

### 2.1.2 雷诺数与费如的数

雷诺数表征坡面水流的紊动程度,费如的数表征的是坡面水流的缓急程度。从表1可见,在相同坡度条件下改变模拟雨强,随着模拟雨强的增大,坡面侵蚀水流的雷诺数也逐渐增大,这说明模拟雨强的增加会使得坡面水流的流动状态发生改变,水

流的紊动程度增加;而在相同模拟雨强条件下改变坡度,随着坡度的增加坡面水流的雷诺数变化不大,规律不明显,说明坡度对水流的紊动状态影响不显著。雷诺数和费如的数是共同反映坡面水流流态的指标参数。不同坡度( $5^\circ \sim 25^\circ$ )、不同雨强( $30 \sim 270 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )下红壤坡面侵蚀水流的雷诺数取值范围为  $1.9 \sim 70.8$ ,费如的数的取值范围为  $0.322 \sim 1.089$ ,这说明试验条件下坡面侵蚀水流流态大部分均处于“层流—缓流区”,只有两场次( $5^\circ/120 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $20^\circ/270 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )的模拟降雨坡面流流态为“层流—急流区”为,这也进一步说明了改变雨强和坡度对于坡面侵蚀水流的流态影响不大(表2)。

### 2.1.3 曼宁糙率

曼宁糙率为表征水流流动边界表面影响水流阻力的各种因素的一个综合系数, 其大小受到坡面土壤的性质、表面覆盖物的覆盖程度以及水流运动边界的形态特征等因素的共同影响。由表2可知, 红壤坡面侵蚀下, 改变坡度或模拟雨强, 曼宁糙率发生改变, 坡度和雨强会对曼宁糙率产生影响, 但是变化规律不明显, 这可能与室内试验装填土条件下, 很难保证各处理间土壤表面的状况完全一致所致。

### 2.1.4 达西-韦斯巴赫阻力系数

达西-韦斯巴赫阻力系数反应了下垫面对水流的水力阻力大小, 在流量、坡度等水力条件相同的情况下, 阻力系数越大水流克服阻力所消耗的能量越多, 土壤侵蚀就越强烈, 反之则土壤侵蚀微弱。从表1可以看出, 红壤坡面侵蚀下, 改变坡度或模拟雨强, 坡面侵蚀水流的阻力也发生变化, 但是不呈现特定的函数关系, 这说明雨强和坡度对坡面流的阻力有着重要的影响, 但是规律不明显(表2)。

### 2.1.5 径流剪切力和水流功

坡面水流的侵蚀能力与水流的剪切应力之间有着密切的关系, 坡面水流的剪切力反映的是坡面运动的水流对土水界面上土壤颗粒的分散、剪切作用, 它是径流分离土壤的主要动力。水流功是径流剪切力与流速的乘积, 从能量学角度反映的是径流分散、剪切土壤颗粒作用中的功率大小。从表2可以看出, 当增加坡度或模拟雨强时, 坡面流的平均流速逐渐增大, 但是径流剪切力和水流功却表现出类似于达西-韦斯巴赫阻力系数的变化, 有着重要影响, 但是规律不明显。这可以解释为: 坡度增加, 则坡面水流的水力能坡增加; 模拟雨强增加, 则坡面流的流速增加, 但是在坡宽不变的情况下流速增加却导致平均水深和水力半径变小, 水力半径和水力能坡共同决定着径流剪切力的大小变化, 因此径流剪切力受坡度和雨强影响显著, 但是不呈现单一的线性函数关系, 变化规律不明显。

## 2.2 坡面侵蚀水动力学特征参数量化

目前对于坡面水流侵蚀中特征水动力学参数指标的选定还差异, 一部分学者认为坡面水流的雷诺数 $Re$ 可以较好的作为一个判别坡面侵蚀过程的水动力学指标<sup>[32]</sup>, 另一部分学者则认为水流在边界上的剪切力是判别坡面侵蚀过程的重要指标<sup>[33-34]</sup>, 笔者认为反映坡面侵蚀过程的水动力学指标应该综合某几个水动力学因子更为适宜<sup>[35]</sup>。坡面水流的侵蚀过程的实质是土水界面的能量交换过程, 因此坡面水流的能量变化与坡面水流侵蚀过程的演变有着密切的联系。代表坡面水流能量的水动力学参数较

多, 有单一水动力因子形式的流速、流量、水深、加速度等, 也有综合几个水动力因子的复合参数形式, 如雷诺数、弗罗德数、水流剪切力、水流功等, 究竟采取何种形式的水动力学参数作为判别坡面侵蚀过程的水动力学指标参数, 我们的思路是寻求一个综合考虑几种或多种动力因子共同影响作用的、而且在坡面地表状况发生改变时对于侵蚀参量影响作用又相对稳定的指标, 以此来衡量和反映坡面侵蚀过程将更有普遍的实际意义。

### 2.2.1 径流与水动力学参数的量间关系

径流的变化是坡面侵蚀水流水动力学特性的实质和现实表象, 因为水流是发生侵蚀现象的动力和载体, 坡面流水动力学特征参数的变化势必会揭示坡面水蚀径流本身的一些变化规律或特征, 径流量与水动力学参数量间存在密切关系。图1给出了不同模拟雨强及坡度下红壤坡面水蚀径流率与水动力学特征参数平均流速、雷诺数 $Re$ 、费如的数 $Fr$ 、达西-韦斯巴赫阻力系数 $f$ 、径流剪切力、水流功、相对水深曼宁糙率 $n/h$ 、以及雷诺数与费如的数的几何平方根 $(Re^2+Fr^2)^{1/2}$ 之间的变化关系。从图1可知, 雷诺数 $Re$ 、相对水深曼宁糙率 $n/h$ 、以及雷诺数与费如的数的几何平方根 $(Re^2+Fr^2)^{1/2}$ 三个水动力学参数可以较好的反映红壤坡面水蚀径流率的变化, 其他的水动力学参数虽然与径流率之间存在一定的关系, 但是变化规律不明显。水动力学参数雷诺数 $Re$ 、以及雷诺数与费如的数的几何平方根 $(Re^2+Fr^2)^{1/2}$ 均反映了坡面侵蚀水流的流动状态(紊动状态以及缓急程度), 可以看出径流率随相对水深曼宁糙率 $n/h$ 增加而减小, 而径流率随着雷诺数 $Re$ 或者雷诺数与费如的数的几何平方根 $(Re^2+Fr^2)^{1/2}$ 的增加而线性增加, 这一规律也揭示了现实状态下坡面侵蚀水流的紊动程度越大、水流缓急程度越强烈, 则径流的强度越大的侵蚀现象。以上结果表明了, 从坡面水蚀的径流角度来看, 水动力学参数雷诺数 $Re$ 、相对水深曼宁糙率 $n/h$ 、以及雷诺数与费如的数的几何平方根 $(Re^2+Fr^2)^{1/2}$ 可以较好的表征不同雨强、不同坡度下的径流的变化。

### 2.2.2 侵蚀泥沙与水动力学参数的量间关系

坡面水蚀中, 侵蚀泥沙是研究的核心, 泥沙颗粒的运动是以径流为载体和驱动力的, 径流的水动力学行为势必会深刻影响其中的泥沙颗粒运动, 泥沙运动特性与水动力学参数间的关系密切。图2给出了不同模拟雨强及坡度下红壤坡面水蚀的侵蚀产沙量与水动力学特征参数平均流速、雷诺数 $Re$ 、费如的数 $Fr$ 、达西-韦斯巴赫阻力系数 $f$ 、径流剪切力、水流功、相对水深曼宁糙率 $n/h$ 、以及雷诺数与费如的数的几何平方根 $(Re^2+Fr^2)^{1/2}$ 之间的变化关系。

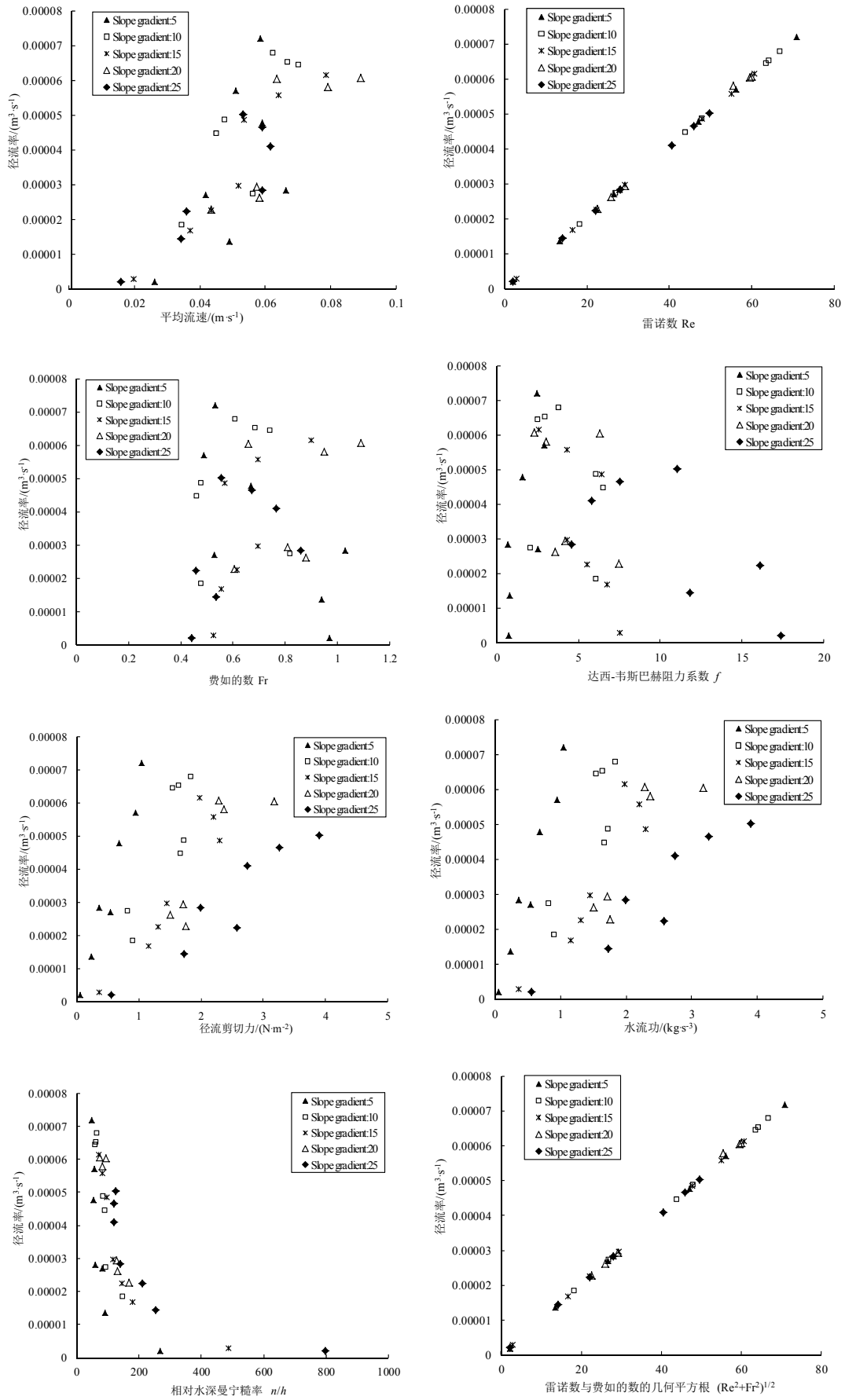


图1 径流率与坡面流水动力参数间关系

Fig.1 Relationships between runoff rates and flow hydraulics

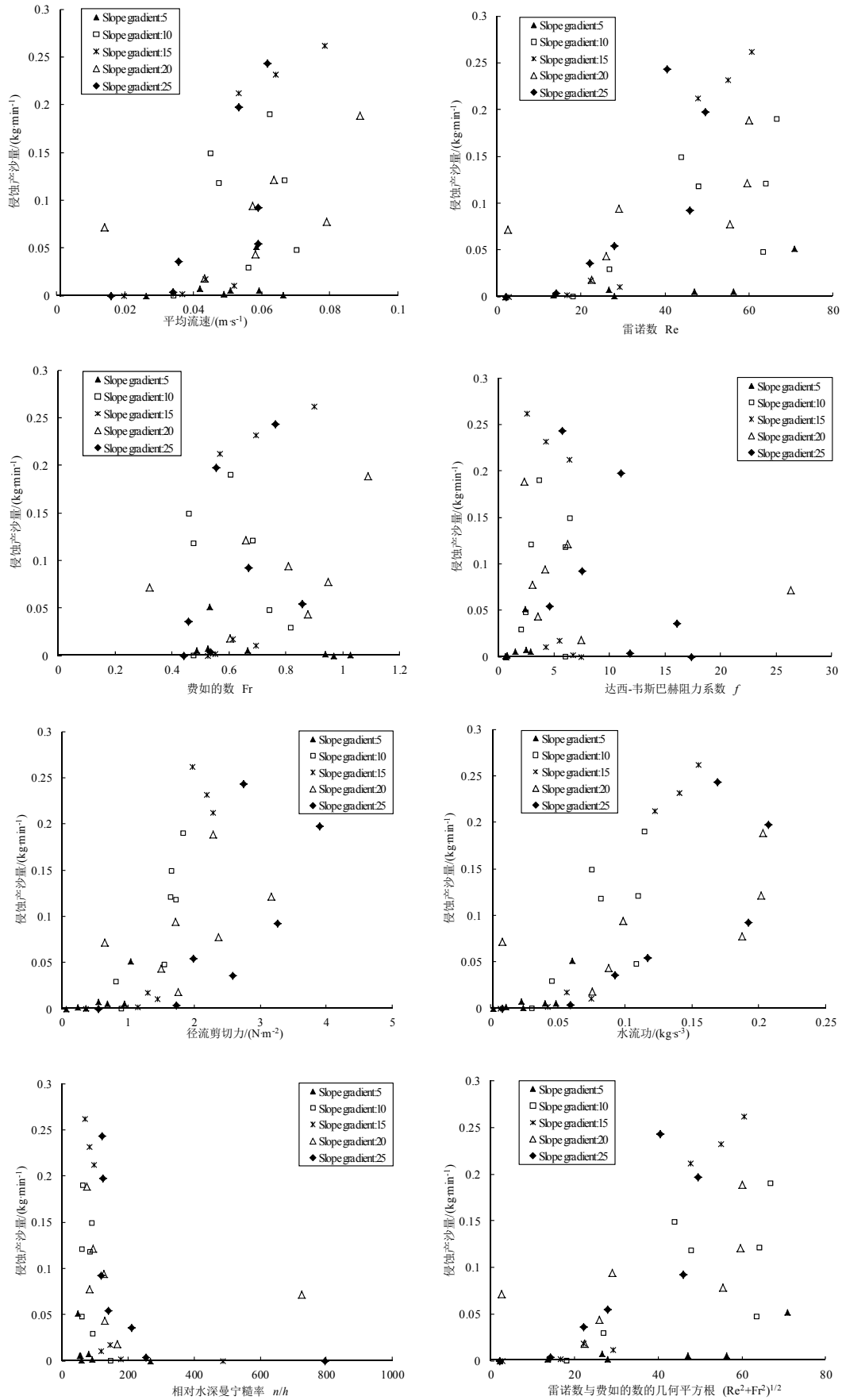


图2 侵蚀产沙量与坡面流水动力参数间关系

Fig.2 Relationships between sediment yields and flow hydraulics

由图2可知,只有水动力参数相对水深曼宁糙率 $n/h$ 可以较好的反映红壤坡面水蚀侵蚀产沙量的变化,侵蚀产沙量随相对水深曼宁糙率 $n/h$ 的增加而减小,其他的水动力参数虽然会对侵蚀产沙量产生一定影响,但是规律不明显。这一结果说明,由相对水深和曼宁糙率系数两种水动力因子共同组成的复合水动力特征参数,可以较好的反映不同雨强及坡度下的坡面水蚀侵蚀泥沙。

综上所述,如果单从坡面水蚀的径流角度来看,雷诺数 $Re$ 、相对水深曼宁糙率 $n/h$ 、以及雷诺数与费如的数的几何平方根 $(Re^2+Fr^2)^{1/2}$ 三个水动力参数可以认为是表征不同模拟雨强及坡度条件下坡面水蚀的特征水动力参数;如果从泥沙的角度来看,只有相对水深曼宁糙率 $n/h$ 可被认为是表征不同模拟雨强及坡度条件下坡面水蚀的特征水动力参数。

### 3 结论

本文通过不同雨强、不同坡度的红壤坡面人工模拟降雨试验,研究探讨了华南红壤坡面侵蚀的水动力学特征规律,主要取得如下一些研究结果:

(1) 红壤坡面侵蚀水流的流态大部分均处于“层流—缓流区”,除平均流速随着模拟雨强的增加而增加外,其他水动力参数(坡面侵蚀水流的阻力、曼宁糙率、径流剪切力、以及水流功)均会受到雨强和坡度改变的影响,但是不呈现特定的函数关系,规律不明显。

(2) 从水动力学角度解析了红壤坡面水蚀过程,得出了相对水深和曼宁糙率系数两种水动力因子共同组成的复合水动力特征参数,可作为表征不同雨强及坡度下的坡面水蚀侵蚀产沙的特征水动力参数指标。

### 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. 中国水土保持[J]. 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[J]. 中国水土保持, 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[J]. 中国科学院院刊, 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[J]. 水土保持通报, 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. 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] ABEAHAMS 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]//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.

[32] 肖培青, 郑粉莉, 张成娥. 上方来水来沙对细沟水流水力学参数的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 54-57, 125.

[33] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 9-15.

[34] 张光辉, 卫海燕. 刘宝元. 坡面流水动力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 58-61.

[35] GUO T L, WANG Q J, LI D Q, et al. Flow hydraulic characteristics effect on sediment and solute transport on slope erosion[J]. Catena, 2013, 107: 145-153.

## Experimental study on soil erosion and flow hydraulics on red soil slope

GUO Tailong<sup>1</sup>, ZHUO Muning<sup>1</sup>, LI Dingqiang<sup>1,2\*</sup>, CAI Qing<sup>3</sup>, XIE Zhenyue<sup>1</sup>, LIAO Yishan<sup>1</sup>, HU Jian<sup>4</sup>

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

**Abstract:** In China, there is another potential heavy erosion area of china is red soil slope land in south China except loess slope. There is soil erosion potential danger due to heavy storm rainfall affairs often occur in red soil slope land in south China. It is very important to study mechanism of flow hydraulics on red soil slope in such area. This study used simulated rainfall method to investigate the interactive influence by soil slope gradient( 5°, 10°, 15°, 20°, 25° )and rainfall intensity( 30, 60, 90, 120, 180, 210, 270 mm·h<sup>-1</sup> ) on red soil erosion processes and flow hydraulics. The results show that: (1) the most treatments were shown erosion flow regimes usually indicated in sub-critical laminar flow and a little indicated in super-critical laminar (Except for two treatments: 5° slope gradient and 120mm/h rainfall intensity; 20° slope gradient and 270mm/h rainfall intensity). Except for average flow velocity increased as simulated rainfall intensity increased, the other flow hydraulics, such as Manning roughness coefficient, Manning roughness coefficient, Shear stress, and Steam power can impacted by rainfall intensity and slope gradient, but cannot fitted by a simple function. (2) The rate of Manning roughness coefficient ( $n/h$ ) is a better hydraulic parameter indicator for predicting the sediment load in red soil slope erosion.

**Key words:** red soil; erosion; simulated rainfall; flow hydraulics; flow velocity