

# 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究\*

吴凤至<sup>1,2</sup> 史志华<sup>1,2†</sup> 岳本江<sup>1,2</sup> 王玲<sup>1</sup>

(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 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

## PARTICLE CHARACTERISTICS OF SEDIMENT IN EROSION ON HILLSLOPE

Wu Fengzhi<sup>1,2</sup> Shi Zhihua<sup>1,2†</sup> Yue Benjiang<sup>1,2</sup> Wang Ling<sup>1</sup>

(1 State Key laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**关键词** 泥沙侵蚀颗粒; 泥沙原始颗粒; 团聚率; 细沟侵蚀; 人工模拟降雨

**中图分类号** S157 **文献标识码** A

坡面侵蚀过程包括雨滴击溅和径流冲刷引起的土壤颗粒分离、泥沙输移和沉积三大过程<sup>[1]</sup>。降雨过程中, 由于表土团聚体的崩解、分散等水土间的相互作用, 改变了土壤表面结构使土壤颗粒更紧密地堆积, 入渗率降低、径流量增加。黄土高原土壤侵蚀导致土地质量退化和土壤细颗粒的流失。侵蚀泥沙挟带的养分、农药及其他化学物质造成水资源污染和生态环境恶化, 导致面源污染, 在许多面源模型中均涉及侵蚀泥沙颗粒大小分布情况。所以, 对侵蚀泥沙颗粒的研究倍受关注。

有关侵蚀泥沙颗粒变化的研究, 一直为国内外的热点。一般认为, 受土壤团聚体的影响, 侵蚀泥沙颗粒与土壤原始颗粒大小分布不同, 泥沙颗粒组成主要受土壤性能和土地利用的影响, 而降雨强度和地形因子等对泥沙颗粒大小分布的影响不甚明显。Massey 和 Jackson 提出富集率的概念<sup>[2]</sup>, 主要为了研究养分流失过程; Martinez-Mena 等在此基础上运用团聚率对泥沙颗粒进行分析<sup>[3]</sup>, 结果表明: 降雨动能是决定颗粒被作为土壤原始颗粒或团聚体搬运的重要因素; Warrington 等着重研究重度侵蚀和轻度侵蚀下泥沙颗粒组成的变化<sup>[4]</sup>, 研究结果

表明黏粒含量的大小主要取决于降雨对土壤表面团聚体的破坏程度; Berger 等在研究细沟发展与土壤侵蚀的关系中提出雨强相比于坡度对泥沙颗粒分布的影响较大<sup>[5]</sup>。国内在土壤颗粒流失对土壤质地影响的研究方面取得了一定进展, 但关于降雨强度、产沙产流强度、侵蚀发育等对泥沙颗粒组成变化的研究很少<sup>[6-7]</sup>。

本文选取塬土为研究对象, 通过人工模拟降雨, 定量研究坡面侵蚀过程中侵蚀泥沙颗粒和土壤原始颗粒分布特征, 探讨坡面侵蚀机理, 以为面源污染模型的建立提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品

试验选择了陕西省有代表性的坡耕地土壤(塬土), 采集表层(0~15 cm)原状土作土壤性质分析。土壤性质分析采用常规方法, 即有机质采用重铬酸钾外加热法, 容重采用环刀法, 机械组成采用激光粒度分析法, 按照美国制进行分级, 土壤样品的各种性质见表 1。

\* 国家自然科学基金项目(41071190)和中国科学院“百人计划”择优支持项目资助

† 通讯作者, E-mail: pengshi@mail.hzau.cn

作者简介: 吴凤至(1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀机理。E-mail: wuyang.426@163.com

收稿日期: 2011-09-15; 收到修改稿日期: 2012-03-20

表 1 土壤基本性质

样品	pH	有机质 (g kg <sup>-1</sup> )	容重 (g cm <sup>-3</sup> )	颗粒含量百分数(%)		
				砂粒	粉粒	黏粒
埧土	8.76	0.60	1.16	5.12	80.20	14.67

## 1.2 人工模拟降雨

实验在中国科学院水土保持研究所人工模拟降雨大厅利用可移动式土槽进行,采用下喷式降雨系统,纯净水作为降雨水源。室温为 10℃ 时,纯净水的电导率为 4.81 μS cm<sup>-1</sup>。国际上,采取纯净水作为水源来进行室内模拟降雨试验的方法已经被广泛应用<sup>[5,8-9]</sup>。根据 Shainberg 等<sup>[10]</sup>的试验结果可知,与自来水相比,使用纯净水进行模拟降雨减少不同水质的影响,从而更有利于对坡面土壤侵蚀过程的观察及研究。

供试土样风干过 10 mm 筛,实验土槽尺寸为 5 m × 1 m × 0.4 m (长 × 宽 × 深)。最下层装填 10 cm 细沙并用纱布覆盖,以保证良好的透水性。其上依次装填 30 cm 的供试土样,分层装填,每层装土深度 5 cm,使下垫面土壤条件的变异性达到最小。每次降雨前,采用环刀法测取坡面土壤容重及含水量。每场降雨试验统计结果显示土壤平均含水量为 13.18%,标准差为 0.02;土壤平均容重为 1.23 g cm<sup>-3</sup>,标准差为 0.08。由此可见数据集中程度较高,故可认为每场降雨的土壤初始条件达到一致。

依据黄土高原侵蚀性降雨的分布规律,确定实验雨强为 60、90 和 120 mm h<sup>-1</sup>,坡度为 10°、15°、20°、25°。自坡面开始产流,每 1 min 采集 1 次径流样,烘干法测定泥沙量,同时记录径流体积。量尺法测定坡面细沟变化过程,染色剂法测定坡面流速,并结合摄像机持续摄像对侵蚀过程进行动态监测,每场降雨重复 3 次。

## 1.3 泥沙颗粒分析及因子计算

泥沙颗粒分析采用 MS2000 型激光粒度分析仪(0.02 ~ 2 000 μm)测定,根据土壤性质将颗粒分为八个粒级:2, 10, 50, 100, 250, 500, 1 000, 2 000 μm;分别测定侵蚀泥沙颗粒和超声波分散之后的土壤原始颗粒含量。待坡面产流之后,每 3 min 采集 1 次泥沙样,带到实验室内进行测定。首先,将泥沙样搅拌均匀,提取 1 ~ 2 ml 的样品加到 800 ml 的蒸馏水中,控制折光率在 20% ~ 30% 之间,测量侵蚀泥沙颗粒含量历时 2 min;在测量土壤原始颗粒之前要先进行 60 s 的超声波分散,再进行测量,所得值为土壤原始颗粒含量。每一个样品均重复同样的步

骤,最后导出数据进行分析。

降雨是土壤流失的主要动力来源,降雨侵蚀力与雨强呈正相关。侵蚀因子包括产沙强度( $S_i$ )和产流强度( $V_R$ ),它们均为衡量坡面侵蚀过程的重要指标,产沙强度 = 土壤流失量 / (降雨面积 × 降雨历时),产流强度 = 10 × 径流量 / (坡面受雨面积 × 降雨历时)。

以上数据处理用 SPSS 13.0 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流和泥沙分析

黄土区地形破碎,坡长坡度均是影响土壤侵蚀的重要地形因子,而降雨强度是影响产沙强度最重要的动力因素。确定坡长坡度(5 m, 15°),选择三种雨强(60, 90 和 120 mm h<sup>-1</sup>),分析产沙强度( $S_i$ )和产流强度( $V_R$ )随着降雨量的增大在降雨过程中的变化情况。

随着雨强的增大,在降雨刚开始时,随着土体吸水湿润,含水量增加,土壤吸收的能量趋于减小,湿润后土壤黏结力减小,使土壤颗粒更容易被分离和溅散,含沙量增加。随着降雨时间的延长,坡面逐渐产生细沟,物体固有重力使细沟中的泥沙颗粒和溅散土粒向下坡运动,径流不断携带出细沟中的泥沙使得含沙量继续增加,导致产沙强度增大。不同雨强条件下, $S_i$ 随着降雨量的增大呈指数函数增长,且相关系数达到了 0.7 ( $n = 50$ ) 以上(图 1),这与 Huang 等的研究结果一致<sup>[11]</sup>。坡面产流强度随雨强的增大而明显增大,从坡面开始入渗到产流, $V_R$ 急剧增大;从土壤饱和到坡面超渗产流, $V_R$ 均呈很平缓的态势发展直至最后断流(图 1)。

### 2.2 泥沙颗粒特征分析

土壤颗粒组成状况是影响土壤抗蚀性的重要因素。颗粒组成越细的土壤,黏结力越强,在一定程度上使土壤形成团状结构体,其抗打击的能力也越高<sup>[12]</sup>。坡地土壤中黏粒的流失不但导致土壤质量砂化,细颗粒流失,而使粗颗粒相对富集,其结果使土壤质地变粗,土壤质量退化,更主要的使土壤团聚体减少,结构性变差,对水分、养分的保蓄性能降低。

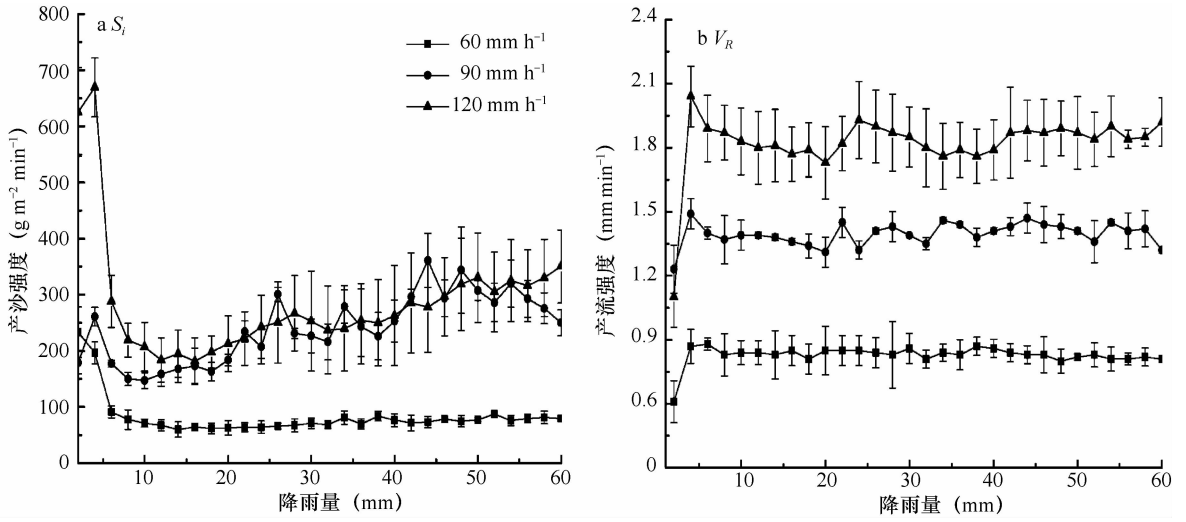
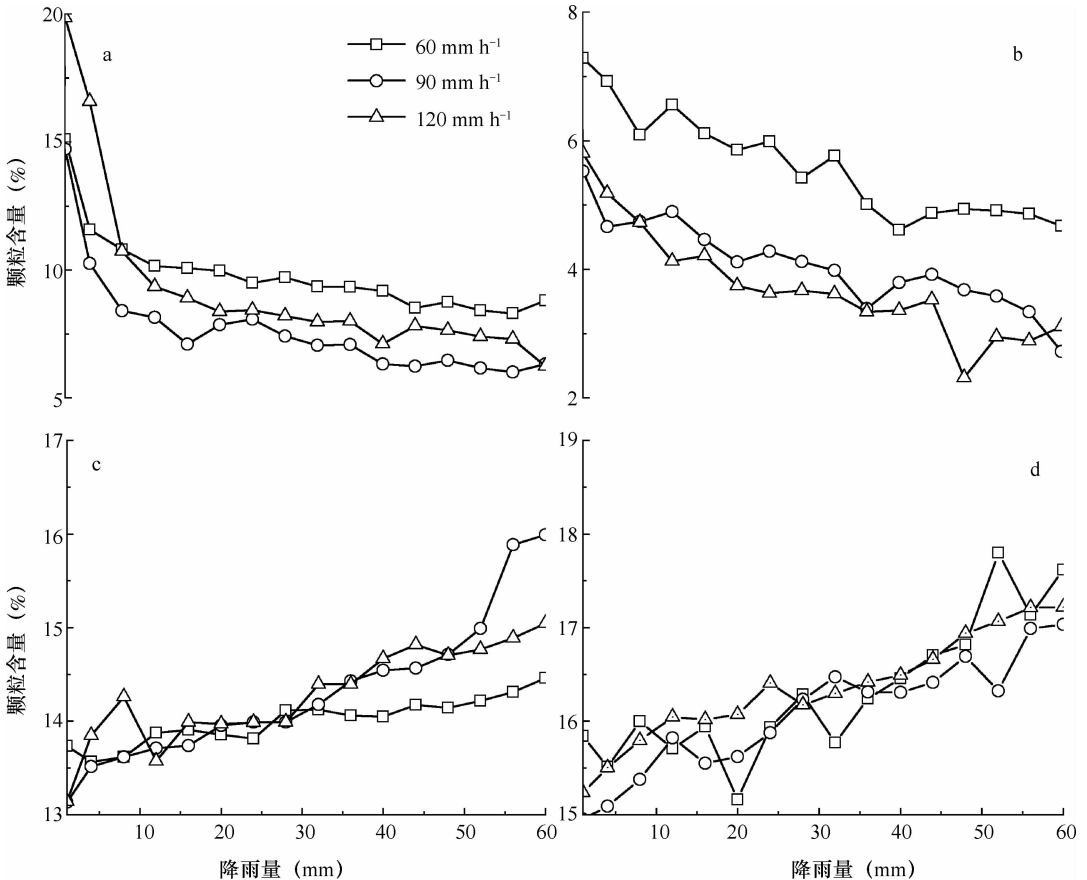


图1 不同降雨量下产沙强度和产流强度的变化

**2.2.1 < 2 μm 和 > 50 μm 侵蚀泥沙颗粒和土壤原始颗粒分布情况** 从图2可见, < 2 μm 和 > 50 μm 颗粒分散前后泥沙侵蚀颗粒与原始颗粒在降雨过

程中的整体趋势一致,即 < 2 μm 颗粒含量逐渐增加, > 50 μm 颗粒含量逐渐减少,这与 Slattery 和 Burt 的研究<sup>[13]</sup>一致。这两组颗粒在不同雨强下可



注:a, c 分别表示 > 50 μm 和 < 2 μm 的侵蚀泥沙颗粒分布, b, d 分别表示 > 50 μm 和 < 2 μm 的土壤原始颗粒分布

图2 黏粒和砂粒分散前后比较

以拟合成相应的函数, 决定系数  $R^2$  ( $n = 20$ ) 在 0.8 以上。不同雨强条件对  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒影响不大, 而  $> 50 \mu\text{m}$  颗粒含量则随着雨强的增大而减少。侵蚀泥沙颗粒中  $> 50 \mu\text{m}$  颗粒含量分散后较分散前减少了 4%~6%,  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒含量分散后较分散前增加了 2%。出现这一现象是因为在降雨初期, 坡面上有一层浮土, 含有大量的大团聚体、黏粒团和砂粒, 在降雨量较小时, 很多砂粒被径流所搬运所以在降雨初期侵蚀砂粒含量较大。

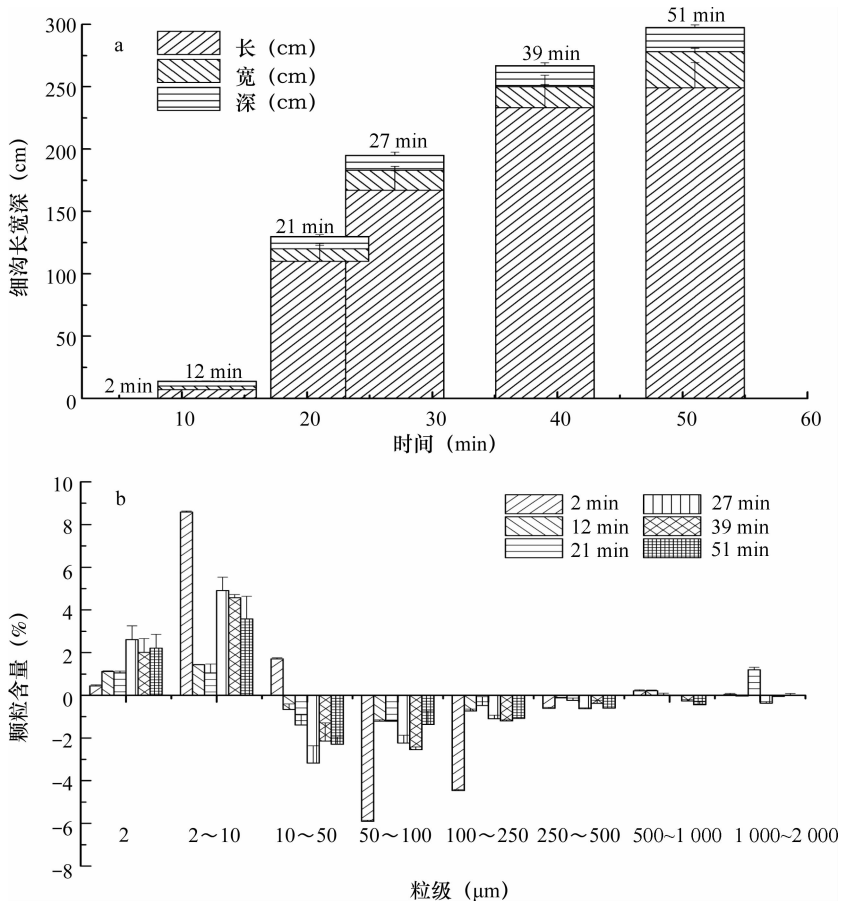
侵蚀泥沙中黏粒含量随降雨量增加而增加主要是颗粒起动所需的拽引力与颗粒大小成反比, 再者黄土高原土壤降沉中, 细颗粒到达较湿润地区后, 相互凝结成细粒团, 小颗粒黏在一起变成了大颗粒而“凝结降落”。经过激光粒度仪超声波分散之后, 很多大颗粒(复粒)又被分散为其原始形态的小颗粒(单粒), 导致  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒含量增加。

**2.2.2 溅蚀-细沟间侵蚀-细沟侵蚀过程中颗粒变化情况** 细沟在坡面上是按不同的发展阶段逐

步形成的, 在细沟形成初期, 其形态在坡面上是一系列大致呈等间距分布的小侵蚀穴, 随着降雨和径流冲刷时间的延长, 这些小侵蚀穴发生溯源侵蚀逐渐相互连通形成细沟。在这个变化过程中, 泥沙颗粒也存在着相应的变化。Foster 等<sup>[14]</sup>根据坡面侵蚀原理和泥沙输移的连续性将坡面降雨径流侵蚀分为两部分, 细沟间侵蚀与细沟侵蚀, 郑粉莉<sup>[15]</sup>在此基础上做了进一步的完善。

(1) 溅蚀阶段: 此时坡面主要侵蚀方式是溅蚀, 由雨滴击溅产生大量分散的土粒, 2 min 时, 2~50  $\mu\text{m}$  侵蚀颗粒含量明显较其他时间段的颗粒含量高, 此时颗粒分布取决于雨滴打击力、地面坡度和土壤的抗侵蚀能力(图 3b)。

(2) 细沟间侵蚀阶段: 随着降雨的进行, 在 2~12 min 时,  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒含量增多, 2~50  $\mu\text{m}$  颗粒含量急剧减少,  $> 50 \mu\text{m}$  颗粒含量也减少(图 3b)。此阶段的侵蚀产沙主要是薄层水流对溅散土粒的输移和对土壤表面的层状剥蚀, 使得细颗粒增多, 粗颗粒减少。



某一个时间段细沟的发展情况(a)对应的泥沙颗粒分散前后的差值变化(b)

图3 细沟形态变化对应的颗粒变化情况

(3)细沟侵蚀阶段:由于临时性结皮的形成,使坡面的入渗量减少,径流量增大,径流冲刷力相应增强,面状水流逐步汇聚成线状水流,使水流侵蚀能力迅速增大。雨强为  $90 \text{ mm h}^{-1}$  时,降雨进行到  $12 \sim 13 \text{ min}$  时,开始产生细沟,并且细沟发展较快,从  $20 \text{ cm}$  一直发展到  $270 \text{ cm}$ ,而从  $39 \text{ min}$  开始直至降雨结束,细沟发育缓慢并趋于稳定(图 3a)。细沟的长宽深均与降雨时间呈对数拟合,相关系数达到了  $0.9 (n=30)$  以上。由于坡面土壤抗侵蚀力的空间差异及坡面微地形对径流侵蚀力的再分配作用,使细沟侵蚀发展过程出现差异。与细沟间侵蚀相

比,  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒和  $> 50 \mu\text{m}$  颗粒没有显著性变化,  $2 \sim 50 \mu\text{m}$  颗粒随着细沟的发展含量逐渐增多。

### 2.3 影响侵蚀泥沙颗粒特征的因素

整个降雨过程中,径流在坡面开始汇集,受不同因素的影响侵蚀泥沙颗粒有不同的表现规律。实验表明细沟侵蚀过程中的侵蚀泥沙颗粒是一个由多因素共同影响的过程。控制其他变量对侵蚀泥沙颗粒和其他五个因素进行偏相关性分析,结果显示(表 2)侵蚀颗粒( $E$ )与原始颗粒( $U$ )、产沙强度( $S_i$ )、降雨量( $R_f$ )成正相关,与产流强度( $V_R$ )和坡面流速( $V$ )成负相关,可以进一步进行回归分析。

表 2 侵蚀颗粒与各因素偏相关分析结果

	土壤原始颗粒 $U$	产沙强度 $S_i$	产流强度 $V_R$	降雨量 $R_f$	坡面流速 $V$
相关系数 $r (n=20)$	0.287	0.313	-0.374	0.194	-0.189
Sig 值	0.220	0.180	0.105	0.414	0.425

侵蚀泥沙颗粒是最深入反映坡面侵蚀变化过程的因子,从前面的分析可知,泥沙颗粒 3 个粒级 ( $< 2 \mu\text{m}$ 、 $2 \sim 50 \mu\text{m}$ 、 $> 50 \mu\text{m}$ ) 在坡面侵蚀过程中的变化是截然不同的,所以分别对这 3 个粒级侵蚀泥沙颗粒( $E$ )与其他因素进行回归分析,得到如下关系式:

$$E_{<2} = 17.98 + 0.372 U_{<2} + 0.012 S_i - 9.635 V_R - 0.002 R_f + 2.674 V (r = 0.636^a, \text{Sig. } F = 0.158)$$

$$E_{2-50} = 87.53 - 1.02 U_{2-50} - 0.021 S_i + 55.81 V_R + 0.008 R_f - 0.772 V (r = 0.871^a, \text{Sig. } F = 0.001)$$

$$E_{>50} = 65.25 - 0.722 U_{>50} + 0.11 S_i - 39.571 V_R - 0.11 R_f - 7.673 V (r = 0.825^a, \text{Sig. } F = 0.004)$$

用 SPSS 中  $f$  检验得出  $2 \sim 50 \mu\text{m}$  和  $> 50 \mu\text{m}$  侵蚀泥沙颗粒 Sig.  $F < 0.01$ , 且相关系数  $r (n=20)$  达到了  $0.8$  以上,说明它们与其他因素达到了  $0.01$  水平的极显著相关具有高度统计学意义。从以上关系式可以看出,产流强度对 3 个粒级的影响最大,其中对  $2 \sim 50 \mu\text{m}$  颗粒呈正相关,  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒和  $> 50 \mu\text{m}$  颗粒呈负相关。

## 3 结 论

本文以垆土为研究对象,在  $60, 90, 120 \text{ mm h}^{-1}$  三种雨强条件下,分析坡面侵蚀动态变化下的泥沙

颗粒动态变化过程,结果为:

1) 在不同雨强条件下,产沙强度( $S_i$ )随着降雨量的增大呈指数函数增长,相关系数达到  $0.7 (n=50)$  以上;产流强度( $V_R$ )从开始坡面产流的急剧增大,到坡面超渗产流开始均保持一个稳定值直至降雨结束。

2)  $> 50 \mu\text{m}$  侵蚀泥沙颗粒含量分散后较分散前减少了  $4\% \sim 6\%$ ,  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒含量增加了  $2\%$ 。这两组颗粒在不同雨强下均符合回归方程,相关系数  $r (n=20)$  在  $0.8$  以上。坡面侵蚀的 3 个阶段中:溅蚀阶段,  $2 \sim 50 \mu\text{m}$  侵蚀泥沙颗粒含量最高;细沟间侵蚀阶段,  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒含量增多,  $> 2 \mu\text{m}$  颗粒含量减少;与细沟间侵蚀相比,细沟侵蚀阶段  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒和  $> 50 \mu\text{m}$  颗粒没有显著性变化,  $2 \sim 50 \mu\text{m}$  颗粒随着细沟的发展含量逐渐增多。

3) 坡面侵蚀过程中的泥沙颗粒分布是由土壤原始颗粒( $U$ )、产沙强度( $S_i$ )、降雨量( $R_f$ )、产流强度( $V_R$ )和坡面流速( $V$ )共同决定。回归分析得出,  $2 \sim 50 \mu\text{m}$  和  $< 50 \mu\text{m}$  的颗粒与其他因素达到了  $0.01$  水平的极显著相关,且相关系数达到了  $0.8 (n=20)$  以上。

## 参 考 文 献

- [1] 张科利,唐克利. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究. 土壤学报, 2000, 37(1): 9—15
- [2] Massey H F, Jackson M L. Selective erosion of soil fertility constituents. Soil Science Society of America Journal, 1952, 16: 353—356
- [3] Martinez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J. Relation between

- interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. *Geomorphology*, 2002, 45: 261—275
- [ 4 ] Warrington D N, Mamedov A I, Bhardwaj A K, et al. Primary particle size distribution of eroded material affected by degree of aggregate slaking and seal development. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60: 84—93
- [ 5 ] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35 ( 12 ): 1 456—1 467
- [ 6 ] 肖培青, 郑粉莉. 上方来水来沙对细沟侵蚀泥沙颗粒组成的影响. *泥沙研究*, 2003, 5: 64—68
- [ 7 ] 鲁克新, 李占斌, 张霞, 等. 室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 6—14
- [ 8 ] Igwe C A, Udegbunam O N. Soil properties influencing water dispersible clay and silt in an Ultisol in southern Nigeria. *International Agrophysics*, 2008, 22(4): 319—325
- [ 9 ] Tishmack J K, Peterson J R, Flanagan D C. Use of coal combustion by products to reduce soil erosion//*International Ash Utilization Symposium*, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, 2001: 63—73
- [ 10 ] Shainberg I, Warrington D, Laflen J M. Soil dispersibility, rain properties and slope interaction in rill formation and erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(1): 278—283
- [ 11 ] Huang C, Well L K, Norton L D. Sediment transport capacity and erosion processes: Concept and reality. *Earth Surface Processes and Landform*, 1999, 24: 503—516
- [ 12 ] Eshel G, Levy G J, Mingelgrin U, et al. Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle size distribution analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 736—743
- [ 13 ] Slattery M C, Burt T. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22: 705—719
- [ 14 ] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics II. Shear stress relationships. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(3): 797—807
- [ 15 ] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究. *土壤学报*, 1998, 35(1): 95—103