

紫色土坡面细沟侵蚀过程中泥沙颗粒特性

蒋倩, 郑子成*, 王永东, 李廷轩

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要:为探究侵蚀泥沙粒径分布及分选特征, 更好地理解紫色土坡面泥沙分离、输移和沉积过程, 该研究以西南地区典型紫色土为研究对象, 通过室内放水冲刷试验, 开展了不同流量条件下 10°和 15°坡面细沟侵蚀过程以及泥沙颗粒变化特征研究。结果表明: 1) 各坡面产流率、产沙率均随冲刷流量的增加而增大, 当冲刷流量从 4 L/min 增加至 8 L/min, 坡面平均产流率增加了 1.35~2.37、1.70~1.97 倍, 坡面平均产沙率增加了 1.31~3.51、7.70~8.58 倍, 产沙率受坡度影响高于产流率。2) 各坡面侵蚀泥沙中粉粒占比最高, 介于 47%~55%。黏粒的富集率 (Enrichment Ratio, ER) < 1, 团聚率 (Aggregation Ratio, AR) > 1, 表明该粒级的泥沙颗粒在侵蚀过程中发生了损耗, 并以团聚体的形式迁移; 粉粒的 ER > 1, AR ≈ 1, 表明该粒级的泥沙颗粒发生了富集, 并且大部分颗粒以单粒方式被运移。各坡面黏粒与粉粒富集率随流量增加而增大, 且在高流量下, 细颗粒更易富集。3) 体积分形维数变化范围为 2.43~2.63。各坡面随着冲刷时间的持续, 体积分形维数呈现降低的趋势, 且分形维数与黏粒含量、粉粒含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与砂粒含量呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。该研究结果有助于阐明坡面侵蚀过程中泥沙粒径的变化规律, 可为指纹因子的粒径选择及揭示紫色土坡面流失机理提供数据支撑和理论依据。

关键词: 土壤; 侵蚀; 颗粒分选; 富集率; 团聚率; 分形维数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.013

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-Supp.-0114-08

蒋倩, 郑子成, 王永东, 等. 紫色土坡面细沟侵蚀过程中泥沙颗粒特性[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 114-121.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.013 <http://www.tcsae.org>

Jiang Qian, Zheng Zicheng, Wang Yongdong, et al. Characteristics of sediment particles during rill erosion on purple soil slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp.): 114-121. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.013 <http://www.tcsae.org>

0 引言

土壤侵蚀与土地退化、农业面源污染等生态环境问题密切相关, 直接威胁国家和区域经济的可持续发展^[1]。在水蚀区域, 雨滴和径流侵蚀力往往导致土壤分离、运移和沉积过程的发生^[2]。坡耕地通常以细沟侵蚀为主^[3], 细沟侵蚀的发生、发展及演化过程与坡面泥沙颗粒分布密切相关, 不同粒径泥沙其径流分离能力各异。侵蚀泥沙不仅是水蚀过程的产物, 也是养分迁移的载体。侵蚀泥沙粒径的分布特征, 可以较好地解释泥沙的侵蚀、搬运和沉积过程^[4], 在土壤侵蚀预报模型构建方面具有重要作用^[5]。此外, 土壤养分伴随侵蚀泥沙迁移、流失, 也与面源污染模型构建密切相关^[6-7]。

已有研究表明, 土壤侵蚀过程对于土壤颗粒具有选择性^[8-9], 普遍认为在侵蚀初始阶段细颗粒泥沙优先被搬运且距离相对较远, 粗颗粒泥沙因水流输送能力不足而沉积^[10-11]。而一旦细沟形成后, 存在侵蚀泥沙颗粒粗化现象^[9], 未经化学分散的土壤颗粒更能有效反映侵蚀过程^[12], 因而其可能更具代表性^[13-14]。富集率 (Enrichment Ratio, ER)^[15]和团聚率 (Aggregation Ratio, AR)^[16],

常被用于表征侵蚀泥沙颗粒被搬运的状态。多数研究表明, 细小颗粒更易富集于侵蚀泥沙中^[9,12]; 而有学者则认为细沟形成且径流流速较大时, 以砂粒级泥沙颗粒 (>0.05 mm) 富集为主^[17-18]。泥沙粒径分布会影响径流在坡面的运移方式等, 坡面径流特征又会影响土壤侵蚀^[19]。可见, 研究不同粒级侵蚀泥沙颗粒分布及分选特征具有重要意义。

四川盆地作为紫色土分布较为集中, 且人口众多的农业地区之一, 因其物理风化强烈, 土体结构相对较差, 加之降雨集中, 坡耕地土壤侵蚀严重^[20], 细沟侵蚀尤为突出^[21], 研究紫色土坡面的侵蚀泥沙颗粒分选特征有助于揭示其坡面侵蚀机理。近年来, 众多研究人员从坡度和雨强^[22]、土壤类型^[19,23-24]、下垫面条件^[4,10]等不同角度对侵蚀泥沙颗粒进行研究。其中涉及细沟发展对产流产沙^[23]和侵蚀泥沙颗粒分布的影响研究^[4,22], 但因其基于人工模拟降雨条件, 重点关注了溅蚀过程, 而对细沟侵蚀过程的关注相对缺乏。因此, 本研究采用室内放水冲刷试验, 开展紫色土坡面细沟侵蚀过程中产流产沙、侵蚀泥沙颗粒分布与分选特征研究, 以期为建立区域具有物理成因的侵蚀模型提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土样采自农业部资阳长江上游农业资源与生态环境重点野外科学观测试验站 (104°34'12" ~

收稿日期: 2022-10-19 修订日期: 2022-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42177316)

作者简介: 蒋倩, 博士生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: yynldjj@163.com

※通信作者: 郑子成, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: zichengzheng@aliyun.com

104°35'19"E, 30°05'12"~30°06'44"N) 耕层土壤(0~20 cm), 研究区属于亚热带季风气候, 年平均气温 16.8℃, 年均降雨量为 965.8 mm。土壤为侏罗纪遂宁组母质发育的红棕紫泥, 质地较轻, 土壤肥力中等。土壤理化性质: pH 值为 8.0, 土壤容重为 1.25 g/cm³, 粒径组成(体积分数)为黏粒 22%、粉粒 29%、砂粒 49%。

1.2 研究方法

1.2.1 土样填充

将土壤自然风干后过 10 mm 筛, 按容重还原法进行每 10 cm 分层填充, 土壤平均容重控制在 1.20 g/cm³ 左右, 同时在土槽底部铺设 10 cm 厚的粗砂, 以保证填土均匀且尽可能接近自然坡面。

1.2.2 试验设计

采用室内放水冲刷试验, 试验装置包括试验土槽、溢流槽、稳定供水系统(图 1)。供试土槽设置为 2.0 m×1.0 m×0.4 m, 用以模拟研究区的零散坡耕地。试验土槽上方设有长、宽、高分别为 0.4 m×1.0 m×0.4 m 溢流槽, 通过抽水泵引水入溢流槽, 以消除径流湍流, 再经上方土槽和下方土槽间连接装置进入下方土槽。基于研究区坡耕地地形特征, 10°和 15°是坡耕地常见坡度, 故本试验坡度设置为 10°和 15°。结合区域多年水文资料及降雨特点, 试验冲刷流量设计为 4、6、8 L/min, 冲刷时间为 60 min。坡面细沟发育过程参照 Bingner 等^[25]研究, 跌坎出现标志着坡面细沟侵蚀开始, 跌坎贯穿形成断续细沟为第一阶段; 沟头溯源和沟底下切, 形成连续细沟为第二阶段; 细沟沟道兼并、袭夺, 导致沟壁坍塌, 不断拓宽加深为第三阶段; 之后逐渐趋于稳定, 为第四阶段。土槽填土后人工整平, 在冲刷试验前, 为了保证试验条件一致性, 采用 0.5 mm/min 降雨强度进行预降雨 5 min, 所有试验均重复 2 次。

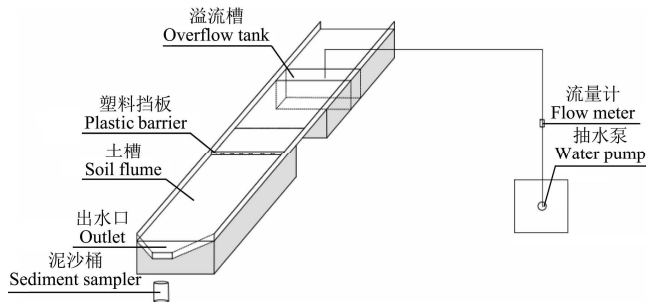


图 1 试验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of experimental device

1.3 测定项目及方法

1.3.1 径流及泥沙测定

产流开始, 每 1 min 收集 1 次径流泥沙样, 采用体积法测定径流量, 采用烘干法测定泥沙量。从开始产流至细沟稳定每 2 min 收集 1 次泥沙样, 采用激光粒度仪(英国 Malvern 3000E)进行泥沙粒径的测定, 侵蚀泥沙粒径按照美国制进行分级。

1.3.2 富集率(ER)和团聚率(AR)

富集率计算式^[11]如下:

$$ER = \frac{P_e}{P_o} \quad (1)$$

式中 ER 为富集率; P_e 为侵蚀泥沙某一粒级的百分比, %; P_o 为原状土样某一粒级百分比, %。ER>1 表示发生富集, ER<1 表示损耗。

团聚率计算式^[4]如下:

$$AR = \frac{E}{U} \quad (2)$$

式中 AR 为团聚率; E 为侵蚀泥沙颗粒某一粒级的百分比, %; U 为泥沙原始颗粒某一粒级百分比, %。当 AR≠1 时, 侵蚀泥沙颗粒以团粒的形式输移; 当 AR=1 时, 侵蚀泥沙颗粒以单粒的形式输移。

1.3.3 分形维数(D)

采用分形维数来表征泥沙颗粒分布特征^[26], 计算式如下:

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (3)$$

式中 r 为土壤粒径, mm; R_i 为粒径等级 i 的土壤粒径, mm; R_{\max} 为土壤粒径的极大值, mm; $V(r < R_i)$ 为土壤粒径小于 R_i 的土壤体积百分含量, %; V_T 为土壤颗粒总体积, %; D 为土壤体积分形维数。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 进行数据处理与分析, 采用 Origin 2022b 作图。

2 结果与分析

2.1 坡面产流产沙特征

由图 2 可知, 随冲刷时间的持续, 坡面产流率总体可分为增长、稳定两个变化阶段。冲刷过程中, 土壤含水量不断增大, 下渗率减小, 从开始产流至断续细沟的形成, 产流率急剧增大; 之后随着溯源侵蚀作用, 细沟得以贯通, 水流沿细沟流动, 除沟壁崩塌导致产流率有轻微波动外, 均呈相对平缓的增加趋势。随着冲刷流量的增加, 产流率总体呈增加的变化趋势。与 4 L/min 冲刷流量相比, 10°和 15°坡面 6、8 L/min 冲刷条件下平均产流率分别增加了 1.35、2.37 倍和 1.70、1.97 倍。

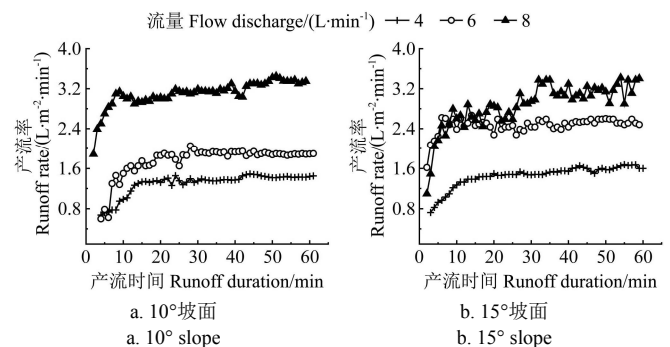


图 2 不同流量条件下产流率随产流时间的变化
Fig.2 Variation of runoff rate with runoff duration under different flow discharge conditions

由图 3 可知, 不同条件下产沙率总体随冲刷流量的增加而增大。相较于 4 L/min 冲刷流量, 10°坡面 6 和 8 L/min 条件下平均产沙率分别增加了 1.31 和 3.51 倍, 15°坡面分别增加 7.70 和 8.58 倍。坡度对于产沙率的影响更加明显, 当流量超过 6 L/min, 15°坡面产沙率较 10°坡面

明显增加。流量的增加使得细沟边壁坍塌、细沟扩宽更加明显,故输沙能力更强。此外,10°和15°坡面8 L/min流量条件下随着冲刷时间的持续,产沙率均表现出先急剧下降后迅速增加的趋势。这主要是由于一方面在产流初期,表层土壤相对较为疏松,使得径流泥沙含量最高,随后快速下降到最低。另一方面,坡面侵蚀从片蚀-跌坎阶段,土壤含水量增加导致湿润后的土壤黏结力减小,土粒易于分离,但坡面局部形成跌坎,滞留了部分迁移的泥沙颗粒,故产沙率下降^[27]。而断续细沟-连续细沟-沟壁崩塌过程的出现,径流和重力共同作用,径流含沙量持续增加,导致产沙率增大。而10°坡面流量为8 L/min时,产沙率增加后出现第二次下降可能是因为连续细沟的逐渐形成,为泥沙的输移提供通道,但坡面还未发生沟壁崩塌,因而径流中携带泥沙逐渐减少,产沙率出现明显下降。

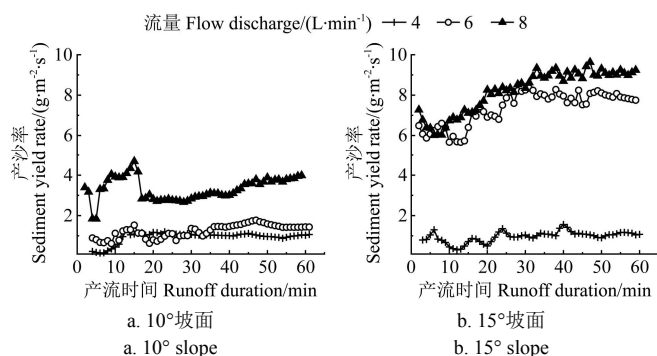


图3 不同流量条件下产沙率随产流时间的变化

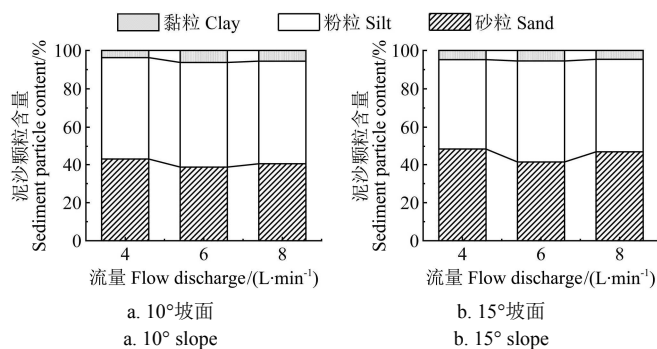
Fig.3 Variation of sediment yield rate with runoff duration under different flow discharge conditions

2.2 侵蚀泥沙分选特性分析

2.2.1 侵蚀泥沙颗粒分布特征

由图4可知,不同流量条件下坡面侵蚀泥沙变化特征较为一致,均以粉粒为主,占比在47%~55%,平均达

50%以上。其次为砂粒,10°坡面砂粒含量占比在39%~43%,15°坡面则在41%~48%。黏粒含量占比最低,两坡面均在5%左右,其值远小于原土(22%)。不同流量条件下,坡度增加使得粉粒含量有所下降,而砂粒含量增加。当流量从4 L/min增加为6和8 L/min时,侵蚀泥沙中粉粒含量有所增加,砂粒含量有所降低,黏粒则无明显变化。其中,冲刷流量为6 L/min时,侵蚀泥沙中粉粒含量最多,砂粒含量最少。



注:图中泥沙颗粒含量均为体积分数,下同。

Note: The sediment particle content in the figure is the volume fraction, the same below.

图4 不同流量条件下侵蚀泥沙粒径分布

Fig.4 Particles size distribution of eroded sediment under different flow discharge conditions

由图5可知,随着冲刷时间的持续,侵蚀泥沙中黏粒含量总体呈减少趋势;除了15°坡面8 L/min流量条件下粉粒呈波动增加、而砂粒呈波动减少的趋势外,其他条件下粉粒均呈波动减少、砂粒呈波动增加的趋势。供试土壤的黏粒含量为22%,但侵蚀泥沙中仅有3%~10%黏粒颗粒。虽然侵蚀泥沙中砂粒含量呈增加趋势,但其平均值为43%,与原土相比略有减少。相较于原土而言,侵蚀泥沙中粉粒含量增加了20%以上,平均值高于50%。

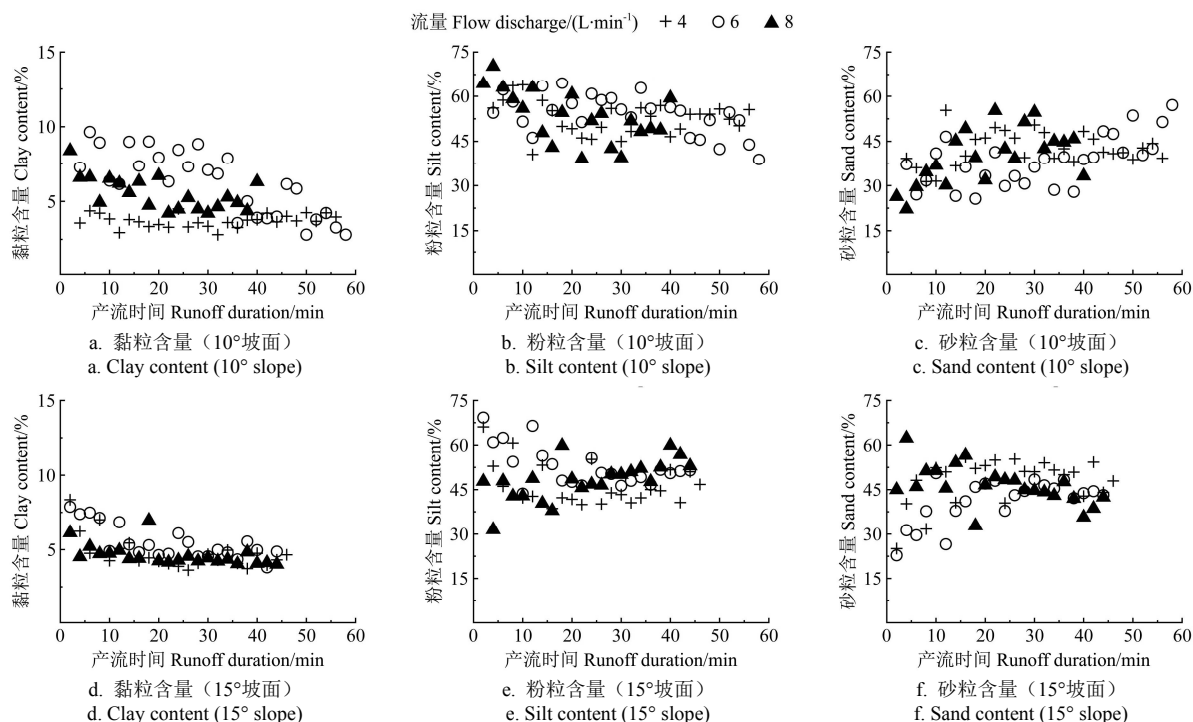


图5 不同流量条件下侵蚀泥沙颗粒随产流时间的变化

Fig.5 Variation of eroded sediment particles with runoff duration under different flow discharge conditions

2.2.2 富集率及团聚率变化特征

由表 1 可知，不同流量条件下，10°和 15°坡面侵蚀泥沙黏粒富集率平均值远小于 1，表明该粒级的泥沙颗粒在侵蚀过程中发生了损耗；侵蚀泥沙粉粒富集率平均值均大于 1，表明该粒级泥沙颗粒发生了富集；侵蚀泥沙砂粒富集率趋近于 1，且 15°坡面平均富集率高于 10°坡面。

10°坡面，随冲刷流量增加至 6 和 8 L/min，侵蚀泥沙中黏粒和粉粒富集率总体上增加，表明流量增加会对侵蚀泥沙细颗粒的富集产生影响，大流量条件下细颗粒更易富集。15°坡面，侵蚀泥沙中黏粒和粉粒富集率变化趋势与 10°坡面相似。砂粒富集率在 4、6 和 8 L/min 流量条件下分别为 0.87、0.78、0.82，且在 15° 坡面增加为 0.98、

0.84、0.95，逐渐靠近 1，表明坡度增加会使更难被侵蚀迁移的粗颗粒发生迁移。两坡面侵蚀泥沙中黏粒和粉粒富集率均是流量为 6 L/min 时最高，而该流量下砂粒富集率却最低。

另外，由表 1 可知，随着冲刷流量的增加，10°坡面黏粒、砂粒和 15°坡面粉粒的团聚率（AR）总体呈增加的变化趋势。不同的流量条件下，10°和 15°坡面侵蚀泥沙中黏粒 AR<1，砂粒 AR>1，表明该粒级的泥沙主要以团粒方式输移。而侵蚀泥沙中粉粒 AR 均接近 1，表明该粒级的泥沙大部分是以单粒输移。10°和 15°坡面侵蚀泥沙中黏粒 AR 均是 6 L/min 流量条件时最大，而砂粒 AR 在 8 L/min 流量条件时最大。

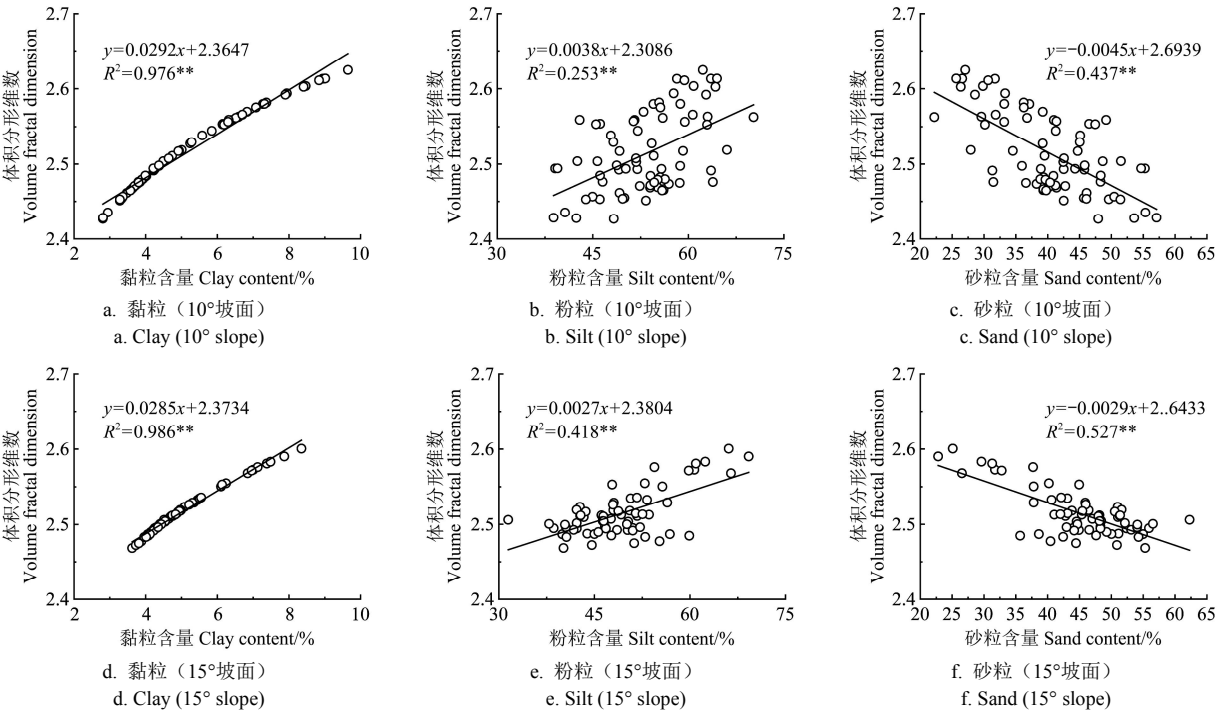
表 1 不同流量条件下侵蚀泥沙颗粒富集率和团聚率
Table 1 Enrichment ratio and aggregation ratio of eroded sediment particles under different flow discharge conditions

坡度 Slope gradient/(°)	流量 Flow discharge /(L·min ⁻¹)	黏粒 Clay		粉粒 Silt		砂粒 Sand	
		富集率 Enrichment ratio	团聚率 Aggregation ratio	富集率 Enrichment ratio	团聚率 Aggregation ratio	富集率 Enrichment ratio	团聚率 Aggregation ratio
10	4	0.17	0.09	1.82	1.06	0.87	16.42
	6	0.28	0.16	1.88	1.05	0.78	17.90
	8	0.25	0.13	1.84	1.05	0.82	19.18
15	4	0.21	0.10	1.61	0.95	0.98	15.76
	6	0.25	0.12	1.82	1.04	0.84	13.01
	8	0.22	0.10	1.66	0.98	0.95	18.03

2.3 侵蚀泥沙颗粒体积分形维数

由图 6 可知，侵蚀泥沙体积分形维数与黏粒和粉粒含量呈极显著正相关关系，与砂粒呈极显著负相关关系，且分形维数与黏粒含量之间的关系更集中，而与粉粒及砂粒含量之间的关系较离散，侵蚀泥沙体积分形维数主要由黏粒含量决定。由图 7 可知，各坡度随着产流时间持续侵蚀体积分形维数呈降低的变化趋势，可能由于冲

刷初期，坡面薄层水流搬运的细颗粒相对较多，因此体积分形维数相对较大。但随着溯源侵蚀、细沟连续，细沟逐渐发育并不断趋于稳定，沟内径流动能增大，大颗粒更易迁移，粗颗粒体积分数增加，体积分形维数逐渐降低。15°坡面流量为 4 L/min 时，分形维数平均值略高于 10°坡面，而流量 6、8 L/min 则呈相反趋势。



注：“**”表示在 0.01 的水平下差异显著。
Note: “**” indicates significant difference at the level of 0.01.

图 6 侵蚀泥沙体积分形维数与黏粒、粉粒及砂粒含量的相关关系
Fig.6 Correlation between volume fractal dimension of eroded sediment and the content of clay, silt, and sand

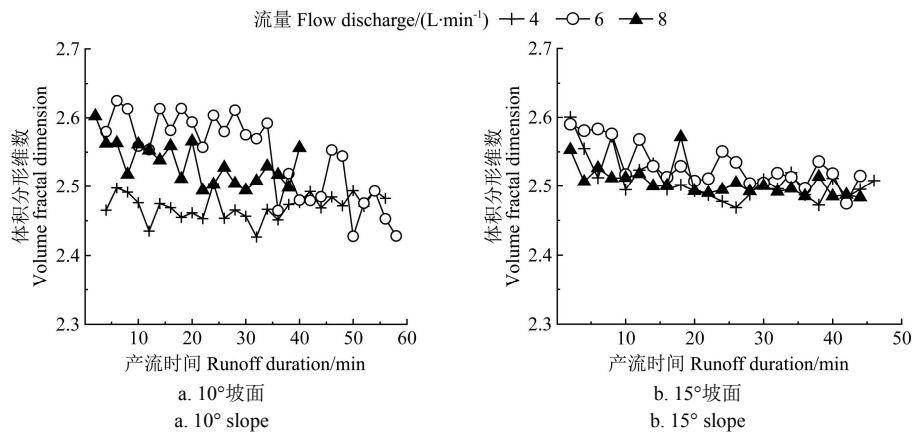


图7 不同流量条件下侵蚀泥沙颗粒体积分形维数随产流时间的变化
Fig.7 Variation of volume fractal dimension of eroded sediment particle size with runoff duration under different flow discharge conditions

3 讨论

侵蚀泥沙通常由团粒和单粒组成,即未经化学分散的颗粒^[12]。研究表明团粒比单粒对侵蚀更敏感^[16],由于团粒的破碎程度与其颗粒大小及分布密切相关,粒径越小的团粒因其内聚力强而结合更紧密,而团粒的大小和分布决定了其迁移距离^[28]。

本研究结果表明,侵蚀泥沙中粉粒占比最高,随着坡度增加,侵蚀泥沙中粉粒含量下降,而砂粒增加,这与 Lin 等^[29]研究结果较为相似。随着坡度的增加,坡面径流输沙能力的影响增大^[28],故出现这一结果。另外,黏粒、粉粒大小的侵蚀泥沙颗粒含量逐渐减少,砂粒大小的颗粒含量逐渐增加,这与张德谦等^[23]的研究结果相似,而与吴凤至等^[30]的研究结果不尽一致,可能有两方面原因:一方面是土壤性质差异所致,吴凤至等研究对象为分散后的土壤颗粒,故而造成侵蚀泥沙中颗粒分布不同的结果;另一方面,在冲刷初期,坡面侵蚀为片蚀,主要通过悬移-跃移的方式搬运泥沙颗粒^[6],因此优先选择较细泥沙颗粒运移,这也是初期产沙率相对较低的原因。与砂粒不同,黏粒通常不以分散矿物颗粒的形式存在,而与重排和絮凝引起的团聚体有关^[31-32],因此细小颗粒可能在径流的作用下形成团粒,即“小颗粒”黏结成“大颗粒”,当坡面细沟侵蚀出现,径流功率增加,增强了对大颗粒或团聚体的搬运能力,从而使侵蚀泥沙中黏粒减少、砂粒增加,故冲刷后期产沙率增加。

本研究中,黏粒大小的侵蚀泥沙颗粒富集率小于1,即与供试土壤颗粒含量相比,黏粒含量远小于原土,而其团聚率也小于1,说明在侵蚀过程中该粒级的土壤发生了损耗,并主要以团粒的形式被搬运。此结果不同于 Han 等^[28]研究中黏粒 $ER > 1$ 、 $AR < 1$ 的结果。虽然同样是放水冲刷试验,但 Han 等^[28]研究中供试土壤采用的是饱和土壤,在饱和土壤细沟侵蚀过程中,因土壤团聚体破碎,尤其是黏粒出现明显的富集。黏粒通常不以分散矿物颗粒的形式存在,而是以团聚体的形式存在。因而在水浸泡的影响下其发生膨胀和分解,从而分解成更易运输更

小的颗粒,导致侵蚀泥沙中黏粒富集^[33]。另外,粉粒富集率大于1,团聚率在1左右,表明其主要以单粒的形式迁移,并在侵蚀泥沙中富集,粉粒是最容易被侵蚀的土壤组成部分^[34]。当径流功率一定,在泥沙中细颗粒更易被优先迁移^[2,35]。泥沙的输移过程对颗粒大小具有选择性,且用于示踪泥沙迁移的部分土壤特性对大小不同的土粒亲和力各异^[36]。因此基于部分指纹因子对于土壤细颗粒的亲和力,结合细颗粒的选择性输移可能会影响泥沙来源指纹识别结果。此外,侵蚀泥沙中砂粒团聚率大于1,富集率小于1,表明在侵蚀过程中,该粒径的泥沙主要以团粒的形式运移。与供试土壤相比,侵蚀泥沙中砂粒含量减少,可能是在侵蚀过程中发生了部分沉积。不同水力条件下,侵蚀泥沙有效颗粒分布结果表明粗砂粒含量很低^[9,28,37],主要由于粗砂粒自身的质量及其沉降速率导致其较少地被径流输移^[38]。

侵蚀泥沙颗粒分形维数可以表征粒径分布、土壤质地均一程度、团粒结构、通透性等,可用来反映坡面土壤结构对侵蚀的响应^[39]。本研究结果表明,侵蚀泥沙颗粒分形维数与黏粒、粉粒含量呈极显著正相关关系,与砂粒呈极显著负相关关系,这与相关学者^[2,35]的研究结果相似。本研究结果还表明,不同流量条件下15°坡面侵蚀泥沙颗粒分形维数略高于10°坡面。坡度增大,细沟侵蚀更易发生,侵蚀过程较剧烈,沟内动能更大,导致砂粒体积分数增加,产沙率有所增大,进而侵蚀泥沙体积分形维数增加。此外本研究结果中侵蚀泥沙体积分形维数介于2.43~2.63,相较于王国梁等^[26]研究结果较高,但不及其他学者^[23,35]的结果。这可能与试验土壤黏粒含量有关,黏粒含量越高、质地越细、分形维数越高,本研究供试土壤黏粒含量为22%,因而导致了侵蚀泥沙体积分形维数的差异结果。

4 结论

1) 产流率对流量的敏感度大于坡度,随着冲刷流量的增加,产流率呈明显增加趋势。而坡度增加导致的产沙率变化更明显,流量超过6 L/min,15°坡面产沙率较

10°坡面明显增加。两坡面 8 L/min 流量条件下整个细沟发育过程和产沙率的变化规律,二者之间并不存在一一对应关系,但产沙率在坡面变化过程中的突变时刻与细沟出现的时刻大体一致。

2) 侵蚀泥沙以粉粒为主,砂粒次之,黏粒最少。黏粒富集率小于 1,粉粒的富集率大于 1,砂粒的富集率趋近于 1,表明本试验条件下,相较于砂粒,细颗粒(黏粒、粉粒)分选性更强。整个细沟侵蚀过程中,黏粒、砂粒团聚率均不等于 1,主要以团粒的形式存在,而粉粒团聚率均接近 1,主要以单粒的形式存在。

3) 侵蚀泥沙体积分形维数与黏粒和粉粒含量呈极显著正相关关系,与砂粒呈极显著负相关关系。整个侵蚀过程中各坡度黏粒含量随冲刷时间总体呈降低趋势,而粉粒和砂粒呈“此消彼长”的趋势。侵蚀体积分形维数变化趋势与黏粒变化趋势一致,侵蚀泥沙颗粒体积分形维数主要由黏粒含量决定。

[参 考 文 献]

- [1] WEF. The global risks report 2018, 13th edition[R]. Geneva, Switzerland: World Economic Forum, 2018: 1-66. <http://reports.weforum.org/global-risks-2018/>.
- [2] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, et al. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow[J]. Catena, 2019, 173: 494-504.
- [3] 吕刚, 贾晏泽, 刘雅卓, 等. 褐土与棕壤坡耕地细沟侵蚀发生的阶段性水沙变化[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 42-48.
Lv Gang, Jia Yanze, Liu Yazhuo, et al. Periodic variation of water and sediment in rill erosion of cinnamon soil and brown soil sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- [4] 汤珊珊, 高海东, 李占斌, 等. 坡面覆沙后侵蚀泥沙颗粒分选特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 125-130.
Tang Shanshan, Gao Haidong, Li Zhanbin, et al. Characteristics of particle separation of erosion sediment in slope surface covered with sand[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(2): 125-130. (in Chinese with English abstract)
- [5] 周梦玲, 郭建斌, 崔明, 等. 喀斯特坡地侵蚀泥沙养分流失与粒径分布的关系[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 54-60, 71.
Zhou Mengling, Guo Jianbin, Cui Ming, et al. Relationship between nutrient loss and particle size distribution of eroded sediment of Karst slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 54-60, 71. (in Chinese with English abstract)
- [6] Asadi H, Moussavi A, Ghadiri H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment[J]. Journal of Hydrology, 2011, 406(1): 73-81.
- [7] Batista P V G, Laceby J P, Silva M L N, et al. Using pedological knowledge to improve sediment source apportionment in tropical environments[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(9): 3274-3289.
- [8] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 32(5): 711-724.
- [9] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slope[J]. Journal of Hydrology, 2012, 454(1): 123-130.
- [10] 沈子雅, 程金花, 管凝, 等. 模拟降雨条件下灌草配置对坡面侵蚀泥沙颗粒分布的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 125-133.
Shen Ziya, Cheng Jinhua, Guan Ning, et al. Effects of shrub-herb arrangements on the distribution of sediment particles eroded from slopes under simulated rainfall conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 125-133. (in Chinese with English abstract)
- [11] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 512: 168-176.
- [12] 郝燕芳, 佟帆. 侵蚀泥沙颗粒特征研究进展[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 1-7.
Hao Yanfang, Tong Fan. Research progress of the particle-size characteristics of eroded sediment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴凤至, 史志华, 方怒放, 等. 不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2497-2502.
Wu Fengzhi, Shi Zhihua, Fang Nufang, et al. Temporal Variations of clay content in eroded sediment under different rainfall conditions[J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2497-2502. (in Chinese with English abstract)
- [14] Slattery M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2015, 22(8): 705-719.
- [15] Massey H F, Jackson M L. Selective Erosion of Soil Fertility Constituents[J]. Soil Science Society of America Journal, 1952, 16(4): 353-356.
- [16] Martinez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain[J]. Geomorphology, 2002, 45(3/4): 261-275.
- [17] Sutherland R A, Wan Y, Lee C T, et al. Aggregate enrichment ratios for splash and wash transported sediment from an Oxisol[J]. Catena, 1996, 26(3/4): 187-208.
- [18] Wan Y, El-Swaify S A. Flow-induced transport and enrichment of erosional sediment from a well-aggregated and uniformly-textured Oxisol[J]. Geoderma, 1997, 75(3/4): 251-265.
- [19] 沈海鸥, 肖培青, 李洪丽, 等. 黑土坡面不同粒级泥沙流失特征分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 111-117.
Shen Haiou, Xiao Peiqing, Li Hongli, et al. Analysis of sediment particle loss at different gradations on Mollisol hillslopes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(20): 111-117. (in Chinese with English abstract)

- [20] Miao C, Ashouri H, Hsu K L, et al. Evaluation of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(3): 1387-1396.
- [21] Chen X Y, Huang Y H, Zhao Y, et al. Comparison of loess and purple rill erosions measured with volume replacement method[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 476-483.
- [22] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 974-982.
Jiang Fangshi, Huang Yanhe, Lin Jinshi, et al. Effects of slope gradient and rainfall Intensity on particle size composition of erosion sediment from colluvial deposits of benggang[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 974-982. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张德谦, 倪世民, 王军光, 等. 不同侵蚀程度花岗岩红壤坡面侵蚀泥沙颗粒特征研究[J]. *土壤学报*, 2020, 57(6): 1387-1398.
Zhang Deqian, Ni Shimin, Wang Junguang, et al. Particle-size composition of erosion sediment on granite-derived red soil slope relative to erosion degree[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1387-1398. (in Chinese with English abstract)
- [24] 周萍, 文安邦, 严冬春, 等. 紫色土坡耕地不同坡位不同高度地埂土壤颗粒组成及分形特征[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 84-93.
Zhou Ping, Wen Anbang, Yan Dongchun, et al. Particle distribution and fractal features of hedge soils with different hedge heights along the slope position of the purple sloping cultivated lands[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 84-93. (in Chinese with English abstract)
- [25] Bingner R L, Wells R R, Momm H G, et al. Ephemeral gully channel width and erosion simulation technology[J]. *Natural Hazards*, 2016, 80(3): 1949-1966.
- [26] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 19-24.
Wang Guoliang, Zhou Shenglu, Zhao Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its application to land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- [27] 和继军, 宫辉力, 李小娟, 等. 细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 90-97.
He Jijun, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. Effects of rill development on runoff and sediment yielding processes[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1): 90-97. (in Chinese with English abstract)
- [28] Han Z, Li J W, Li Y H, et al. Assessment of the size selectivity of eroded sediment in a partially saturated sandy loam soil using scouring experiments[J]. *Catena*, 2021, 201: 105234.
- [29] Lin J S, Huang Y H, Zhao G, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes using colluvial deposits in a permanent gully[J]. *Catena*, 2017, 157: 47-57.
- [30] 吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1235-1240.
Wu Fengzhi, Shi Zhihua, Yue Benjiang, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1235-1240. (in Chinese with English abstract)
- [31] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [32] Durnford D, King J P. Experimental study of processes and particle-size distributions of eroded soil[J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 1993, 119(2): 383-398.
- [33] Teixeira P C, Misra R K. Erosion and sediment characteristics of cultivated forest soils as affected by the mechanical stability of aggregates[J]. *Catena*, 1997, 30(2/3): 119-134.
- [34] Rienzi E A, Fox J F, Grove J H, et al. Interrill erosion in soils with different land uses: The kinetic energy wetting effect on temporal particle size distribution[J]. *Catena*, 2013, 107: 130-138.
- [35] 杨帅, 李永红, 高照良, 等. 黄土堆积体植物篱减沙效益与泥沙颗粒分形特征研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 270-278.
Yang Shuai, Li Yonghong, Gao Zhaoliang, et al. Runoff and sediment reduction benefit of hedgerows and fractal characteristics of sediment particles on loess plateau slope of engineering accumulation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 270-278. (in Chinese with English abstract)
- [36] Laceby J P, Evrard O, Smith H G, et al. The challenges and opportunities of addressing particle size effects in sediment source fingerprinting: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 169: 85-103.
- [37] Ding W F, Huang C H. Effects of soil surface roughness on interrill erosion processes and sediment particle size distribution[J]. *Geomorphology*, 2017, 295: 801-810.
- [38] 郭进, 文安邦, 严冬春, 等. 三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 18-21.
Guo Jin, Wen Anbang, Yan Dongchun, et al. Particle characteristics of eroded purple soil from slope land in the Three Gorges Reservoir Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3): 18-21. (in Chinese with English abstract)
- [39] 马云, 何丙辉, 何建林, 等. 三峡库区皇竹草植物篱对坡面土壤分形特征及可蚀性的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 79-82.
Ma Yun, He Binghui, He Jianlin, et al. Effects of *Herba andrographitis* hedgerow on soil fractal characteristics and erodibility on sloping cropland in Three Gorges Reservoir Retion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 79-82. (in Chinese with English abstract)

Characteristics of sediment particles during rill erosion on purple soil slope

Jiang Qian, Zheng Zicheng^{*}, Wang Yongdong, Li Tingxuan

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Studies of sediment particle distribution and sorting properties at different gradations can reveal hillslope soil erosion mechanisms and better understand the processes of sediment detachment, transport, and deposition on purple soil slopes. In this study, the research object selected was the typical purple soil in southwest China. The indoor water flushing experiments were carried out on the purple soil slopes, with two types of slope gradients: 10° and 15°, and three types of flow discharge conditions: 4, 6, and 8 L/min. The rill erosion processes as well as the various characteristics of sediment particles on the slope were thoroughly investigated. The results showed that: 1) the runoff rate and sediment yield rate of 10° and 15° slopes both increased with the increase of flow discharge conditions. Under 6 L/min and 8 L/min flow discharge conditions, the average runoff rate of each slope increased by 1.35-2.37 and 1.70-1.97 times, respectively, compared to the flow discharge condition of 4 L/min. The average sediment yield rate increased by 1.31-3.51 and 7.70-8.58 times. As a whole, the influence of slope gradient on sediment yield rate was greater than that of runoff rate. 2) The silt was the main particle composition of the eroded sediment on each slope, ranging from 47% to 55% depending on the flow discharge conditions. The Enrichment Ratio (ER) and Aggregation Ratio (AR) of eroded sediment particles with different grain sizes differed significantly. The ER of clay particles was less than 1, and the AR was more significant than 1, which indicated that the sediment particles of this size were quickly lost in the process of erosion and migrated in the form of aggregates. Furthermore, the ER of silt particles was more significant than 1, indicating that particles of this size were enriched in the eroded sediment. The AR of silt particles was close to 1, which stated that the majority of them migrated as primary particles. For different slopes, the enrichment ratios of clay and silt in eroded sediment increased with the increase in flow discharge conditions, indicating that the rise in discharge would affect the enrichment of fine particles. Under the conditions of high flow discharge, fine particles were more susceptible to enrichment. 3) The volume fractal dimension varied from 2.43 to 2.63 in different flow discharge conditions and showed a decreasing trend with the duration of the scouring time. Furthermore, the volume fractal dimension had a very significant positive correlation with clay and silt content and a very significant negative correlation with sand content. The volume fractal dimension values were primarily determined by the clay particle content. The research can help to clarify the laws of the sediment particle size varying with the development of the rill erosion process on a slope. Meanwhile, it can provide data support and a theoretical basis for particle size selection of fingerprint factor and reveal the erosion mechanism on a slope.

Keywords: soil; erosion; particle sorting; enrichment ratio; aggregation ratio; fractal dimension