

坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响*

蒋芳市¹ 黄炎和^{1†} 林金石¹ 赵淦¹ 葛宏力¹ 林敬兰²

(1 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

(2 福建省水土保持试验站, 福州 350003)

摘要 不同侵蚀条件下崩积体的侵蚀产沙特性是阐明崩积体侵蚀机理的关键。采用人工模拟降雨试验, 研究不同坡度和雨强条件下崩积体坡面侵蚀泥沙颗粒的变化特征。结果表明: 随着雨强和坡度的增大, 泥沙粗颗粒含量及粗颗粒的富集率均增加; 侵蚀物质随降雨过程逐渐变粗, 后趋于稳定, 大雨强条件下细沟侵蚀阶段表现为对供试土壤的“整体搬运”; 侵蚀泥沙颗粒的平均重量直径 (Mean weight diameter, *MWD*) 随雨强的增大而增大, 1.00 mm min⁻¹ 和 1.33 mm min⁻¹ 雨强下, 细沟间及细沟侵蚀泥沙的 *MWD* 随坡度变化均存在临界坡度 (30° ~ 35° 之间), 其他雨强条件下则无此种情况; 雨强对侵蚀泥沙 *MWD* 的影响大于坡度。

关键词 崩岗; 崩积土; 土壤侵蚀; 颗粒组成; 人工模拟降雨

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

崩岗是我国南方红壤区特有的侵蚀现象, 具有发展速度快, 突发性强, 土壤侵蚀严重, 危害性巨大, 治理难度大的特征。崩岗一般由集水坡面、崩壁、崩积体、冲刷沟道、冲积扇组成^[1-2]。其中, 崩积体是崩壁土体崩塌后在其下方堆积的物质, 由于受到扰动, 土质疏松, 土壤的抗侵蚀能力弱, 加上坡度大 (一般为 20° ~ 40°), 非常容易被侵蚀, 形成大量泥沙, 直接加剧崩岗的危害^[1-2]。因此, 崩积体的侵蚀也引起了关注, 已有学者对崩积体的入渗性能^[1]及其土壤分离的动力学特征^[2]进行了研究, 但对于崩积体的侵蚀机理研究还不够透彻, 需进一步深入研究。

土壤侵蚀与颗粒的关系一直为国内外所关注。在颗粒富集方面, 由于受土壤团聚体的影响, 侵蚀泥沙颗粒与原始土壤颗粒大小分布不同, 未分散与分散的泥沙颗粒大小的分布不同^[3], 侵蚀泥沙对细颗粒具有富集作用^[4]。在泥沙侵蚀过程中, 雨滴的作用使黏粒细颗粒优先被侵蚀^[5], 细沟间水流侵蚀搬运能力不足也选择性的搬运细颗粒^[6], 当细沟水流超过临界剪切力之后几乎不选择性搬运坡面原始土壤^[7]。影响泥沙颗粒分布因素方面, 彭怡

等^[8]认为随雨强增加, 紫色土细砂含量随雨强的增大而增大, 而粉粒与黏粒含量均下降, 细砂含量随坡度的增加先增大后减小; Berger 等^[9]研究认为雨强对细沟侵蚀泥沙颗粒分布的影响大于坡度; 吴凤至等^[10]研究则表明黄土坡面土壤颗粒流失由土壤原始颗粒、产沙强度、降雨量、产流强度和坡面流速共同决定。这些研究从不同角度探讨了流失土壤颗粒与侵蚀的关系, 但针对于陡坡的粗颗粒含量高的疏松土壤的颗粒流失特征研究还很少。鉴于此, 笔者利用人工模拟降雨试验, 分析不同雨强和坡度下崩积体侵蚀泥沙的颗粒组成, 探究崩积体坡面侵蚀过程中泥沙颗粒大小分布情况及变化过程, 以期进一步阐明崩积体坡面侵蚀过程, 为揭示坡面侵蚀泥沙搬运机理提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤于 2012 年 6 月采自福建省安溪县龙门镇洋坑村 (E118°03', N24°57'), 为花岗岩发育的典型崩岗崩积土, 土壤质地属于砾石土。供试土壤理化性

* 国家自然科学基金项目 (41001169, 40671113)、国家科技支撑项目 (2014BAD15B03) 资助

† 通讯作者, 黄炎和 (1962—), 男, 广东饶平人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与侵蚀退化生态系统恢复研究。E-mail: yanhehuang@163.com

作者简介: 蒋芳市 (1979—), 男, 福建大田人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: jfsfafu@163.com

收稿日期: 2014-03-16; 收到修改稿日期: 2014-05-07

质见表 1。由表 1 可知,供试土壤的有机质含量低,仅为 1.65 g kg^{-1} ;石砾 ($>2 \text{ mm}$)、砂粒 ($2 \sim 0.05 \text{ mm}$)、粉粒 ($0.05 \sim 0.002 \text{ mm}$) 及黏粒 ($< 0.002 \text{ mm}$) 的含量分别为 40.09%、34.01%、23.32% 和 2.58%, 四者

的比例为 1:0.80:0.74:0.09,表现出高石砾、砂粒和粉粒的特征,黏粒含量极低;无大团粒结构,土质疏松,结构性差。

表 1 供试土壤的理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of test soil

土壤类型 Soil type	pH	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	粒径分布 Particle distribution (%)			
			$>2 \text{ mm}$	$2 \sim 0.05 \text{ mm}$	$0.05 \sim 0.002 \text{ mm}$	$<0.002 \text{ mm}$
砾石土 Gravelly soil	5.17	1.65	40.09	34.01	23.32	2.58

1.2 试验装置

试验于 2012 年 7~12 月在福建省福州金山水土保持科教园人工模拟降雨实验室进行。试验土槽为固定式可变坡钢槽,长 5 m,深 1 m,宽 2 m;土槽按宽 1 m 分成两个槽;可调坡度 $0 \sim 40^\circ$ 。人工降雨采用下喷式自动模拟降雨系统,降雨高度为 12 m,可以让模拟降雨的雨滴终点速度接近自然降雨;模拟降雨器降雨面积为 $3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,雨强变化范围为 $15 \sim 200 \text{ mm h}^{-1}$,降雨均匀度大于 0.85。

1.3 试验设计与测定

根据野外调查可知,崩积体的坡度大多为 $20^\circ \sim 40^\circ$,且崩积体侵蚀主要在大雨或暴雨条件下发生。因此,根据崩积体侵蚀的降雨特征和野外崩积体前期调查,本研究采用 2 个因素组合设计,设置土槽坡度分别为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° ;雨强设置 5 个,分别为 1.00 、 1.33 、 1.67 、 2.00 、 2.33 mm min^{-1} 。试验重复两次。

试验开始前,首先在土槽底部铺 60 cm 厚细沙,在沙层之上覆盖一层纱布,保证试验土层的透水状况接近供试土壤,然后在沙层上填 30 cm 的试验用土。填装过程中为保证试验土层容重均匀,按 5 cm 一层分层填装,平均容重控制在 1.35 g cm^{-3} ,与野外崩积体的容重相似。降雨试验前用 0.5 mm min^{-1} 雨强的降雨使供试土壤达到水分饱和但不产生径流,静止 18 h 后进行降雨试验,每次降雨前均要确保土壤含水率基本一致。

降雨开始后开始计时产流时间,降雨历时为 60 min,每隔 3 min 收集一次径流量和泥沙。用量筒测定径流样体积,用烘干法 ($105 \text{ }^\circ\text{C}$) 测定泥沙量。试验过程中,实时记录坡面侵蚀沟发生的时间,并用数码相机定时对坡面的侵蚀状况进行拍照。泥沙样品在室温下自然晾干后分别过 5、2、1 mm 筛,而

$<1 \text{ mm}$ 筛的样品的颗粒采用激光粒度分析仪 (BT-9300ST) 进行测定。根据筛分和激光粒度分析仪测定数据计算各粒级颗粒的含量。颗粒按美国制分为 6 个粒级,分别为:石砾 ($>2 \text{ mm}$)、粗砂粒 ($2 \sim 0.25 \text{ mm}$)、细砂粒 ($0.25 \sim 0.05 \text{ mm}$)、粗粉粒 ($0.05 \sim 0.02 \text{ mm}$)、细粉粒 ($0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$)、黏粒 ($<0.002 \text{ mm}$)。

1.4 指标计算

富集率 (ER) 用来表述土壤流失过程中泥沙颗粒的富集现象,参见文献 [11] 的公式进行计算:

$$ER = \text{侵蚀泥沙颗粒含量} / \text{供试土壤颗粒含量} \quad (1)$$

土壤颗粒平均重量直径 (Mean weight diameter, MWD) 参见文献 [5] 的公式计算:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times w_i \quad (2)$$

式中, r_i 为第 i 个粒级孔径 (mm); $r_0 = r_1$; $r_n = r_{n+1}$; w_i 为第 i 个粒级颗粒重量百分比。

1.5 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS18.0 进行数理统计分析;双因素方差分析采用 SPSS18.0 进行;绘图采用 Excel 2003 进行。

2 结果与讨论

2.1 侵蚀泥沙的颗粒组成及富集率

各条件下的侵蚀泥沙颗粒含量及富集率平均值见表 2。从表中可以看出,各场次降雨侵蚀泥沙颗粒的细粉粒、粗砂粒和砂粒含量较高,平均值分别达到了 23.26%、25.75% 和 23.18%,这与供试土壤本身的颗粒组成有关,供试土壤的细粉粒、粗砂粒和砂粒含量为 15.42%、26.65% 和 39.28%,说明降雨径流冲刷产生的颗粒具有与供试土壤的颗粒

性质相匹配的特征。从富集率来看,黏粒、细粉粒、粗粉粒及细砂粒富集率均大于1,分别达到了1.53、1.51、1.71和1.21。一些学者对侵蚀泥沙的颗粒组成研究也发现,侵蚀泥沙中的粉粒和黏粒含量占多数^[8,11-12]。这是因为降雨泥沙颗粒之间的粘结力直接被雨滴击溅动能所作用,泥沙的大颗粒细化为小颗粒或者从小颗粒凝结为大颗粒^[12],且以悬移的

方式被径流搬出坡面^[8],因此泥沙中细颗粒含量较高,造成细颗粒的富集率大于1^[12]。吴凤至等^[11]对黄土研究也表明,由于黄土特殊的“凝结降落”方式,小颗粒凝聚成大颗粒流失,造成黏粒富集率大于1。细颗粒的优先流失,使土壤的结构粗化,造成崩积体原本很弱的抗侵蚀能力进一步下降,其结果使崩积体的侵蚀泥沙量增大。

表 2 不同坡度和雨强条件下侵蚀泥沙颗粒含量及富集率

Table 2 Particle size composition of sediment and enrichment rates of various fractions of the sediment as affected by slope gradient and rainfall intensity

坡度 Slope (°)	雨强 Rainfall intensity (mm min ⁻¹)	石砾 Gravel		粗砂粒 Coarse sand		细砂粒 Fine sand		粗粉粒 Coarse silt		细粉粒 Fine silt		黏粒 Clay	
		含量	富集率	含量	富集率	含量	富集率	含量	富集率	含量	富集率	含量	富集率
		Content (%)	Enrichment ratio	Content (%)	Enrichment ratio	Content (%)	Enrichment ratio	Content (%)	Enrichment ratio	Content (%)	Enrichment ratio	Content (%)	Enrichment ratio
20	1.00	0.00	0.00	13.97	0.52	10.45	1.42	20.50	2.37	47.60	3.09	7.48	2.82
	1.33	11.69	0.30	20.84	0.78	9.06	1.23	16.31	1.887	36.38	2.36	5.72	2.15
	1.67	14.57	0.37	24.68	0.93	9.33	1.27	20.05	2.32	26.28	1.70	5.08	1.91
	2.00	17.45	0.44	28.53	1.07	9.60	1.31	23.79	2.75	16.19	1.05	4.43	1.67
	2.33	33.30	0.85	27.54	1.03	7.52	1.02	9.86	1.14	18.81	1.22	2.98	1.12
25	1.00	5.61	0.14	39.52	1.48	10.05	1.37	13.64	1.58	27.07	1.75	4.10	1.54
	1.33	11.37	0.29	23.89	0.90	11.01	1.50	16.18	1.87	32.49	2.11	5.07	1.91
	1.67	24.67	0.63	26.96	1.01	9.00	1.23	12.05	1.39	23.55	1.53	3.77	1.42
	2.00	29.49	0.75	28.53	1.07	8.07	1.10	9.69	1.12	18.10	1.17	2.83	1.07
	2.33	35.63	0.91	31.41	1.18	6.43	0.88	14.62	1.69	9.43	0.61	2.48	0.93
30	1.00	5.60	0.14	24.31	0.91	11.07	1.51	17.36	2.01	35.93	2.33	5.74	2.16
	1.33	21.85	0.56	30.44	1.14	8.27	1.13	11.93	1.38	23.59	1.53	3.92	1.47
	1.67	31.05	0.79	27.08	1.02	8.00	1.09	10.51	1.22	20.07	1.30	3.28	1.23
	2.00	32.32	0.82	25.01	0.94	8.42	1.15	18.79	2.17	12.17	0.79	3.29	1.24
	2.33	32.21	0.82	25.02	0.94	8.03	1.09	10.88	1.26	20.56	1.33	3.30	1.24
35	1.00	16.03	0.41	24.79	0.93	9.70	1.32	14.59	1.69	30.13	1.95	4.76	1.79
	1.33	23.58	0.60	22.13	0.83	9.80	1.33	13.85	1.60	26.49	1.72	4.14	1.56
	1.67	32.08	0.82	26.35	0.99	8.52	1.16	10.23	1.18	19.64	1.27	3.19	1.20
	2.00	31.90	0.81	25.87	0.97	7.61	1.04	10.58	1.22	20.72	1.34	3.33	1.25
	2.33	31.22	0.79	29.81	1.12	8.00	1.09	16.96	1.96	10.99	0.71	3.01	1.13
40	1.00	7.63	0.19	17.90	0.67	10.95	1.49	33.11	3.83	23.84	1.55	6.57	2.47
	1.33	19.94	0.51	23.91	0.90	9.79	1.33	14.43	1.67	27.67	1.79	4.24	1.60
	1.67	41.00	1.04	23.55	0.88	6.97	0.95	9.10	1.05	16.75	1.09	2.61	0.98
	2.00	32.16	0.82	24.57	0.92	8.91	1.21	10.85	1.26	20.15	1.31	3.36	1.26
	2.33	37.14	0.95	27.03	1.01	7.11	0.97	9.08	1.05	16.96	1.10	2.68	1.01
总平均值 Mean		23.18	0.59	25.75	0.97	8.87	1.21	14.76	1.71	23.26	1.51	4.05	1.53

从表 2 还可以看出,随着雨强和坡度的增大,泥沙粗颗粒含量及粗颗粒的富集率均增加,泥沙的流失呈粗颗粒化趋势。这是因为在较小雨强和坡度条件下,径流的冲刷能力较弱,土壤坡面不易形成股流,大颗粒不易被搬运,而小颗粒则被侵蚀搬运流失^[8],尤其是黏粒和粉粒;但随着坡度和雨强的增加,土壤坡面更易形成细沟汇聚水流,径流的冲刷侵蚀和搬运能力随之增加,更多的大颗粒被径流搬运携带,进而造成细颗粒所占比例相应的降低^[8,10]。这与李光录等^[13]对黄土丘陵区侵蚀泥沙颗粒随雨强和坡度变化的研究结果相似。

2.2 降雨过程中泥沙颗粒变化特征

根据野外调查可知,崩积体的平均坡度约为 30°,故以 30°坡面为例,对其各雨强条件下的颗粒变化特征进行分析(图 1)。在产生径流的初始阶段,细颗粒均有一个迅速增加过程,而粗颗粒却是一个减小的过程,时间在 1~2 min,在 1.00 和 1.33 mm min⁻¹雨强下表现得尤为明显。这是因为产流初始阶段的侵蚀方式主要为溅蚀,土体在雨滴的作用下消散,黏粒膨胀,雨滴打击和物理化学弥散,土体产生大量分散的土粒,土壤黏粒优先被溅蚀^[5],黏粒的富集导致初始产流阶段富集比很大。这与张雪等^[14]对红壤侵蚀泥沙的研究结果相似。随着降雨的进行,坡面侵蚀进入细沟间侵蚀阶段,此时溅散土粒开始被坡面产生的薄层水流输移,且坡面表层的土体被层状剥蚀,水流选择性的携带土壤细颗粒,因此,侵蚀泥沙携带细颗粒的含量进入一个高峰期,之后由于结皮的形成,土体颗粒分离受到限制,相应时间的细颗粒含量降低。细沟间侵蚀持续时间为 2~20 min,高峰期持续时间与坡度和雨强有关,坡度和雨强越小,其持续的时间越长。30°坡面 1.00 mm min⁻¹雨强下细沟间侵蚀持续了 20 min 左右,而 2.33 mm min⁻¹雨强各坡度下的细沟间侵蚀均只持续了 2~3 min。此阶段由于径流输移以细小颗粒为主,所以黏粒、细粉粒、粗粉粒、细砂粒甚至粗砂粒的富集率均大于 1。这是由于细沟间水流搬运能力不足,细沟间侵蚀选择性的搬运细颗粒,细颗粒产生富集^[12]。

对图 1 进一步分析可知,30°坡面各雨强下,随着降雨的进行,细颗粒含量减小,而粗颗粒含量相应地增加,特别是石砾和粗砂粒含量的增加,之后颗粒的组成比例趋于稳定。这是由于随着降雨的进行,坡面形成细沟,径流水流功率增强,主动分离侵蚀大颗粒泥沙,粗砂粒增多^[15];而许多雨滴能量

被细沟的水流吸收^[16],造成雨滴对土壤的作用力降低,细小颗粒被侵蚀的量降低^[17];当径流超过临界剪切力之后,几乎不选择性搬运坡面土壤^[7],所以,侵蚀泥沙的颗粒组成趋于稳定,且与供试土壤的比例接近。以 30°坡面的 2.33 mm min⁻¹雨强下的降雨 48 min 后的泥沙颗粒比例平均值为例,石砾、粗砂粒、细砂粒、粗粉粒、细粉粒、黏粒富集率分别为 1.05、0.97、0.96、0.97、0.98、0.91,与供试土壤(均为 1)相接近。

以上分析可知,降雨初期,细颗粒被优先搬运,土壤的抗侵蚀能力下降,随着时间延长,侵蚀物质逐渐变粗,并且趋于稳定,特别是在大雨强条件下,降雨后期细沟径流的作用使侵蚀物质表现为对供试土壤的“整体搬运”,表现出了崩积体易侵蚀的特征。同时,也表明可利用产流产沙颗粒组成比例特别是富集率参数来表征土壤的侵蚀强度。

2.3 不同侵蚀阶段泥沙颗粒平均重量直径

为了更深入地研究细沟间侵蚀与细沟侵蚀过程颗粒的变化,对不同阶段的泥沙颗粒 *MWD* 进行分析,以揭示不同侵蚀阶段的泥沙颗粒的分选特性。因为在大坡度和大雨强条件下,降雨历时 4 min 内就发生细沟侵蚀,所以为保证比较前提的一致性,选择产流后 0~4 min 阶段细沟间侵蚀泥沙的 *MWD* 进行分析;同时选择细沟发育比较完整的侵蚀后期(产流后 52~56 min)的细沟侵蚀泥沙的 *MWD* 进行分析。

对 *MWD* 分析可知(表 3),细沟侵蚀泥沙的 *MWD* 大于细沟间侵蚀,说明细沟发生后侵蚀泥沙颗粒变粗,这与前文的分析结果一致。1.67、2.00 及 2.33 mm min⁻¹雨强下 30°以上坡面细沟侵蚀泥沙 *MWD* 大于坡面供试土壤的 *MWD*(1.96 mm),这是由于侵蚀前期细颗粒的优先搬运,造成表层土壤的粗颗粒化,后期水流的整体搬运使粗颗粒化土壤搬出坡面,因此大雨强及大坡度条件下侵蚀后期的泥沙颗粒较供试土壤粗。

对表 3 进一步分析可知,无论是细沟间侵蚀还是细沟侵蚀,*MWD* 随雨强的增大呈增大的趋势。在细沟间侵蚀阶段,其破坏力主要来自雨滴的打击,受降雨动能的影响较大,在形成薄层水流之前,泥沙颗粒被击溅到空气当中或搬出土槽;薄层水流产生后,雨滴的打击作用降低,但雨强及坡度决定了径流的量及速度^[18]。同时,侵蚀泥沙颗粒的组成还与不同颗粒粒级的沉降速度有关^[19]。由于坡面粗颗粒沉降速度快,在较小雨强条件下,其产生的流

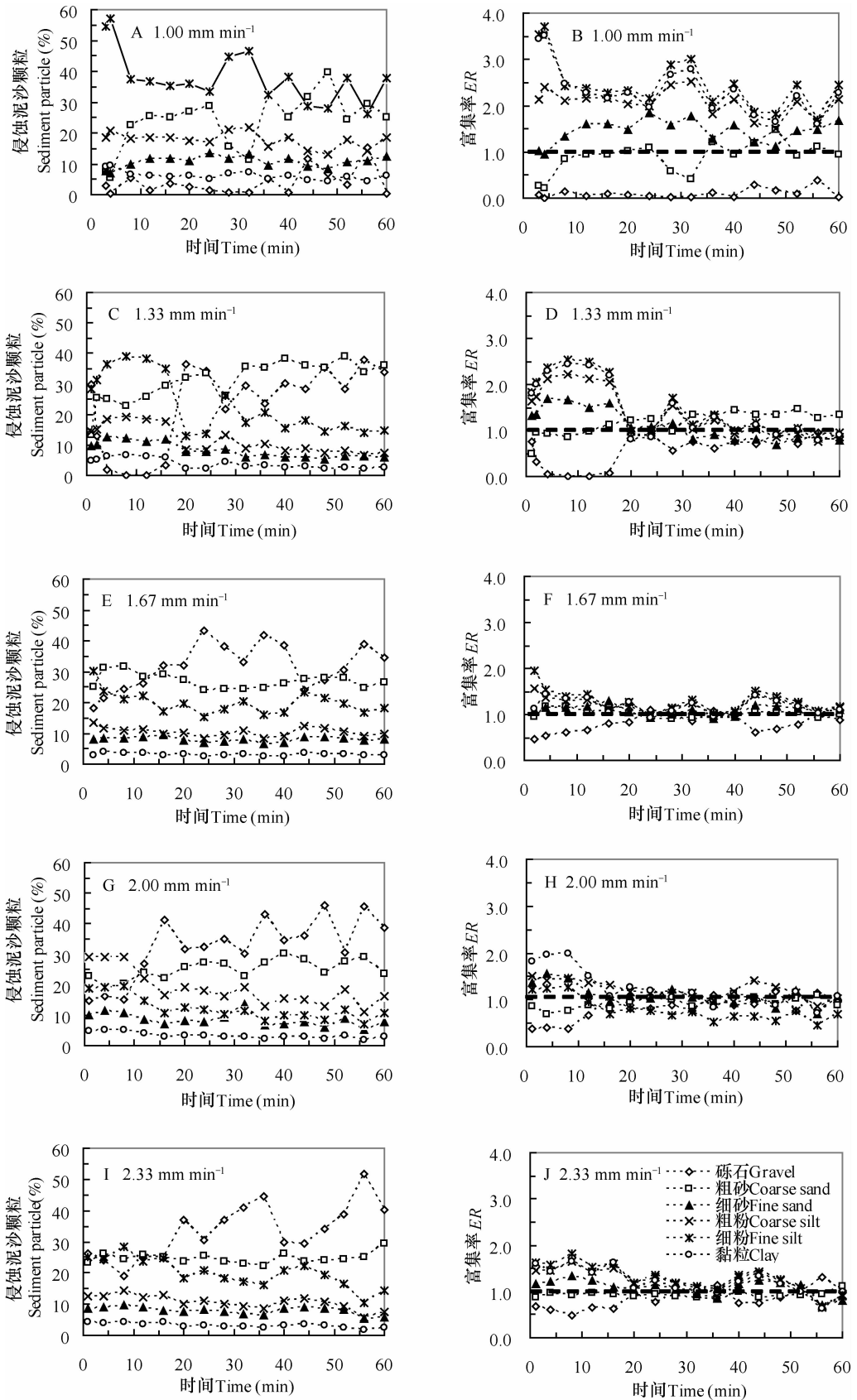


图 1 30°坡面各雨强下侵蚀泥沙颗粒及富集率随降雨历时的变化过程

Fig. 1 Temporal variation of particle size composition and enrichment rates of various fractions of erosion sediment on slope 30° in gradient as affected by rainfall intensity

量和流速均较小,薄层水流的拖拽力无法克服粗颗粒沉降,则优先冲刷细颗粒,而较大雨强恰好相反,其产生的径流不仅能够携带细颗粒也能拖拽粗颗粒。但不同雨强下,细沟间及细沟侵蚀泥沙的 *MWD* 随坡度的变化有差异。1.00 mm min⁻¹雨强下,细沟间及细沟侵蚀泥沙的 *MWD* 随坡度的增加先增加后减小,在 35°达到峰值;1.33 mm min⁻¹雨强下,细沟间侵蚀泥沙的 *MWD* 也在 35°达到最大值,但细沟侵蚀随坡度的增大而增强;1.67、2.00 及 2.33 mm min⁻¹雨强下,细沟间及细沟侵蚀泥沙的 *MWD* 均随

坡度的增大而增大。以上表明 1.00 和 1.67 mm min⁻¹雨强下侵蚀泥沙的 *MWD* 的变化有临界坡度,这与降雨面积随坡度的增加而减小造成坡面雨滴的溅蚀及径流的冲刷能力随坡度无法持续增加有关;1.67、2.00 及 2.33 mm min⁻¹雨强下的径流动力较大,加上坡度增大,流速增加,侵蚀泥沙的 *MWD* 均随坡度的增大而增大。因此,不管是细沟间侵蚀还是细沟侵蚀,其 *MWD* 均随坡度和雨强的变化而变化,不同大小粒径的颗粒搬运均具有选择性。

表 3 不同侵蚀阶段侵蚀泥沙颗粒的平均重量直径

Table 3 Mean weight diameter of sediment particle at different erosion stages(mm)

坡度 Slope (°)	1.00mm min ⁻¹		1.33mm min ⁻¹		1.67 mm min ⁻¹		2.00 mm min ⁻¹		2.33 mm min ⁻¹	
	0~4 min	52~56 min	0~4 min	52~56 min	0~4 min	52~56 min	0~4 min	52~56 min	0~4 min	52~56 min
20	0.05b	0.15a	0.18b	1.13a	0.21b	1.51a	0.35b	1.68a	1.12a	1.64a
25	0.07b	0.61a	0.38b	1.39a	0.52b	1.90a	0.66b	1.85a	1.14b	2.09a
30	0.08b	0.78a	0.71b	1.88a	0.91b	2.22a	0.83b	2.09a	1.23b	2.30a
35	0.13b	1.35a	0.71b	1.51a	0.95b	2.19a	1.04b	2.28a	1.71a	2.40a
40	0.11b	0.89a	0.21b	1.86a	1.04b	2.35a	1.15b	2.37a	1.72a	2.41a

注:同一雨强下,同一行具有不同字母者表示差异显著($p < 0.05$) Note: For each element, values in the same line under the same rainfall intensity by different letter representsignificant difference at $p < 0.05$

通过双因素方差分析可知,雨强和坡度对细沟间及细沟 *MWD* 的影响均达到极显著水平,且雨强对 *MWD* 的影响均大于坡度(表 4~表 5),这是因为雨滴动能和径流剥蚀能力随雨强的变化而变化,进

而影响坡面泥沙颗粒的迁移^[4]。Berger 等^[9]在研究细沟发展与土壤侵蚀的关系中也得出雨强对泥沙颗粒分布的影响大于坡度。

表 4 坡度和雨强对细沟间侵蚀 *MWD* 影响的方差分析结果

Table 4 ANOVA of effects of slope gradient and rainfall intensity on *MWD* of interrill erosion

差异源 Source of variation	离均差平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方差 Mean square	<i>F</i>	<i>p</i>
坡度 Slope gradient	0.94	4	0.23	6.28 **	0.000
雨强 Rainfall intensity	4.61	4	1.15	30.83 **	0.000
误差 Deviation	0.60	16	0.04		
总计 Total	6.14	24			

注: ** 表示达到极显著水平($p < 0.01$) Note: ** significant at $p < 0.01$

表 5 坡度和雨强对细沟侵蚀 *MWD* 影响的方差分析结果Table 5 ANOVA of effects of slope gradient and rainfall intensity on *MWD* of rill erosion

差异源 Source of variation	离均差平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方差 Mean square	<i>F</i>	<i>p</i>
坡度 Slope gradient	1.89	4	0.47	15.48**	0.000
雨强 Rainfall intensity	6.83	4	1.71	56.04**	0.000
误差 Deviation	0.49	16	0.03		
总计 Total	9.21	24			

注: ** 表示达到极显著水平 ($p < 0.01$) Note: ** significant at $p < 0.01$

3 结 论

本研究表明在陡坡条件下,降雨侵蚀优先选择细颗粒,各场次降雨侵蚀泥沙颗粒的黏粒、细粉粒、粗粉粒及细砂粒平均富集率均大于 1;随着雨强和坡度的增大,侵蚀泥沙呈粗颗粒化趋势。随着降雨进行,侵蚀泥沙朝粗颗粒变化,后趋于稳定;细沟侵蚀阶段的泥沙颗粒组成与供试土壤相似,表现为对供试土壤的“整体搬运”。细沟间侵蚀和细沟侵蚀的 *MWD* 随雨强的增大而增大;1.00 mm min⁻¹ 和 1.33 mm min⁻¹ 雨强下,侵蚀泥沙的 *MWD* 随坡度变化存在临界坡度,为 30~35° 之间,而其他雨强条件下则无此种情况。双因素方差分析表明,雨强对侵蚀泥沙 *MWD* 的影响大于坡度。

参 考 文 献

- [1] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等. 崩岗崩积体土壤渗透特性分析. 水土保持学报, 2013, 27(3): 49—54. Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Study on the permeability of slumping deposits in Benggang (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3): 49—54
- [2] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等. 坡面水流分离崩岗崩积体土壤的动力学特征. 水土保持学报, 2013, 27(1): 86—89, 229. Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Study on the dynamic characteristics of soil detachment of slumping deposit by surface runoff in Benggang (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 86—89, 229
- [3] Meyer L D, Line D E, Harmon W C. Size characteristics of sediment from agricultural soils. Soil and Water Conservation, 1992, 47(1): 107—111
- [4] 聂小东,李忠武,王晓燕,等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究. 土壤学报, 2013, 50(5):

- 900—908. Nie X D, Li Z W, Wang X Y, et al. Effect of rainfall intensity on soil loss from slope farmland of red soil and organic carbon enrichment in sediment (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 900—908
- [5] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. European Journal of Soil Science, 1996, 47: 425—437
- [6] Parsons A J, Abrahams A D, Luk S H. Size characteristics of sediment in interrill overland flow on a semiarid hillslope, southern Arizona. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16: 143—152
- [7] 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
- [8] 彭怡,王玉宽,傅斌,等. 紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素. 水土保持通报, 2010, 30(2): 142—144. Peng Y, Wang Y K, Fu B, et al. Particle characteristics and influencing factors of eroded purple soil (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2): 142—144
- [9] 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): 1456—1467
- [10] 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. 土壤学报, 2012, 49(6): 1235—1240. Wu F Z, Shi Z H, Yue B J, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslopes (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1235—1240
- [11] 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. 环境科学, 2012, 33(7): 2497—2502. Wu F Z, Shi Z H, Fang N F, et al. Temporal variations of clay content in eroded sediment under different rainfall condition (In Chinese). Environmental Science, 2012, 33(7): 2497—2502
- [12] Slatery M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspension sediment in hillslope runoff and stream flow. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22: 705—719

- [13] 李光录, 姚军, 庞小明. 黄土丘陵区土壤和泥沙不同粒径有机碳分布及其侵蚀过程. 土壤学报, 2008, 45(4): 740—744. Li G L, Yao J, Pang X M. Distribution and erosion process of organic carbon in the different particle size fractions in loess hills region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(4): 740—744
- [14] 张雪, 李忠武, 申卫平, 等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系. 土壤学报, 2012, 49(3): 465—473. Zhang X, Li Z W, Shen W P, et al. Characteristics of loss of organic carbon in red soil and their quantitative relationships with sediment and runoff generation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 465—473
- [15] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion process and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. Journal of Hydrology, 2012, 454/455: 123—130
- [16] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European soil erosion model: A process-based approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 527—544
- [17] Proffitt A P B, Rose C W. Soil erosion processes: II. Settling velocity characteristics of eroded sediment. Australian Journal Soil Research, 1991, 29: 685—695
- [18] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China. Catena, 2010, 81: 240—248
- [19] Asadi H, Moussavi A, Ghadiri H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. Journal of Hydrology, 2011, 406: 73—81

EFFECTS OF SLOPE GRADIENT AND RAINFALL INTENSITY ON PARTICLE SIZE COMPOSITION OF EROSION SEDIMENT FROM COLLUVIAL DEPOSITS OF BENGANG

Jiang Fangshi¹ Huang Yanhe^{1†} Lin Jinshi¹ Zhao Gan¹ Ge Hongli¹ Lin Jinglan²

(1 College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(2 Fujian Soil Conservation Experimental Station, Fuzhou 350003, China)

Abstract A particular type of gully erosion with a steep collapsing wall, locally called “Benggang”, is widely distributed in the granite-covered areas of tropical and subtropical South China. These gullies develop fast and erupt suddenly, cause great damage. “Benggang” is generally composed of upper catchment, collapsing wall, colluvial deposit, scour channel, gully mouth, and alluvial fan. Colluvial deposits are materials accumulated at the foot of the collapsing wall. They were originally part of the collapsing wall and surface of mountain slopes and fell apart under hydraulic pressure and gravity. As a type of disturbed soil, colluvial deposits feature high contents of gravel, sand, and loose materials, so that they are often weak in structure, low in cohesion, poor in stability steep in slope (generally varying between 20° and 40°) and high in erodibility. Furthermore, rainfall splash erosion and runoff scouring erosion occur easily because in addition to the above listed properties, they lack vegetation cover and organic matter. As a result, erosion of colluvial deposits triggers redistribution of materials from the collapsing walls, generating large volumes of sediments, which in turn aggravate the harm of Benggang. Particle size composition of sediment is an important factor of soil erosion. The study on peculiarity of erosion sediment will be of great significance to illustration of mechanism of the erosion on slopes of colluvial deposits. However, so far few reports are available on erosion of colluvial deposits. To study properties of erosion sediment from colluvial deposits, rainfalls were artificially simulated, with intensity ranging between 1.00 and 2.33 mm min⁻¹ over a plot 5 m² (5 m × 1 m) in area and 20° ~ 40° in slope. Results show the following:

(1) Changes in sediment particle size composition and enrichment rate: As fine particles are washed preferentially by rainfall, after each rainfall event, the mean enrichment rates of clay, fine silt, course silt, and fine sand are all higher than 1; With rising rainfall intensity and slope gradient, both the content and enrichment rate of coarse particles increase in the sediment, making it coarser in texture.

(2) Processes of sediment generation during a rainfall event: At the initial stage of runoff generation, as a result of splash erosion caused by rain drops, fine particles display a process of rapid increase, while coarse particles do a reverse one, which is especially obvious under rainfalls 1.00 and 1.33 mm min⁻¹ in intensity. At the interrill erosion stage, interrill flow is far from strong enough in transport capacity, and carries only fine particles, like clay, fine silt, coarse silt and

fine sand, of which the enrichment ratios all exceed 1; but the formation of crust reduces loss of soil particles. After rills form on the slope, scouring capacity of runoff enhances, so content of coarse particles, especially coarse sands and gravels, increases while that of fine particles decreases correspondingly, and then particle size composition gradually becomes stable and approximate to that of the original soil. So, with rainfall going on, particle size of erosion products turns gradually from fine into coarse and levels off in the end. During rainfalls, high in intensity, interrill erosion manifests “overall transport” of original soil.

(3) Mean weight diameter (*MWD*) of sediment: The sediment *MWD* of rill erosion is greater than that of interrill erosion; which once again shows that sediment becomes coarser in particle size after rill erosion starts. Sediment *MWD* increases with rising rainfall intensity. Sediment *MWD* of interrill and rill erosion varies with slope gradient and comes across a critical gradient, around $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ under rainfalls 1.00 or 1.33 mm min^{-1} in intensity, but no such phenomenon was observed during rainfalls with intensity either higher or lower. Under rainfalls 1.67 , 2.00 , and 2.33 mm min^{-1} in intensity, *MWD* of rill erosion sediment is higher than that of the test soil (1.96 mm), on slopes higher than 30° in gradient, which demonstrates that at the late stage of a heavy rainfall event, erosion sediment is coarser than the original soil in particle size. Therefore, *MWD* varies with rainfall intensity and slope gradient as well, and particles are selectively transported in light of particle size. Dual-factor variance analysis show that rainfall intensity is higher than slope gradient in effect on *MWD* of interrill erosion sediment.

Key words Benggang; Colluvial soil; Soil erosion; Particle composition; Rainfall simulation

(责任编辑:檀满枝)