

不同雨强和覆盖度条件下崩积体侵蚀泥沙颗粒特征^{*}

朱高立^{1, 2} 文 博² 李 静² 黄炎和^{1†} 邹 伟² 林金石¹
蒋芳市¹ 张 建²

(1 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

(2 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

摘 要 崩积体坡面侵蚀泥沙颗粒的变化特征及过程研究是揭示崩岗崩积体侵蚀机理的关键。基于崩岗崩积体土质疏松、粗颗粒含量高、极易被侵蚀的特性, 通过室内人工模拟降雨试验, 研究 30° 坡度条件下, 不同覆盖度 (0, 25%, 50%, 75%, 100%) 和雨强 (60, 90, 120 mm h⁻¹) 组合坡面侵蚀泥沙颗粒特征。结果表明: 降雨过程中, 坡面径流优先搬运的是粒径较小的泥沙颗粒; 侵蚀泥沙中粗颗粒 (砾石和粗砂) 泥沙含量随着覆盖度的增加呈先减小后增大趋势; 侵蚀泥沙颗粒的平均重量直径 (MWD) 与覆盖度之间呈极显著相关; 当覆盖度达到 50% 时, 坡面粗颗粒泥沙的减少效果最明显, 75% 覆盖度坡面较容易发生崩塌。以上结果表明, 侵蚀泥沙颗粒的大小与坡面秸秆覆盖度的高低密切相关, 50% 左右的秸秆覆盖度可以达到较好的减沙效果。

关键词 人工模拟降雨; 秸秆覆盖; 崩积土; 土壤侵蚀; 颗粒组成

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一种土壤侵蚀类型^[1], 具有侵蚀量大、爆发性强、治理难度大等特点^[2]。崩积体是崩壁土体塌陷后堆积在其下方的物质, 是崩岗的重要组成部分, 同时也是崩岗产生泥沙的主要来源, 具有土质疏松、粗颗粒含量高、易侵蚀等特征^[3-4]。崩积体的侵蚀已经引起了学界的广泛关注, 不少学者对崩积体侵蚀的影响因素、防治手段、侵蚀过程及动力学机制等方面进行了研究并取得了一些进展, 如蒋芳市等^[5]采用模拟降雨试验研究了崩积体在不同雨强和坡度条件下侵蚀泥沙的颗粒特征, 发现雨强对侵蚀泥沙平均重量直径 (MWD) 的影响大于坡度; 朱高立等^[6]研究了秸秆覆盖对崩积体侵蚀的防治效果, 发现坡面侵蚀产沙量的临界覆盖度为 75%; 张新和^[7]采用人工模拟降雨及侵蚀形态测量的方法研究了坡面片

蚀—细沟侵蚀—沟壑侵蚀的演变过程及其机理。尽管如此, 现阶段关于崩岗崩积体的研究依然存在一些不足, 如对崩积体的高沙扰动土体的特征及其再侵蚀规律研究尚属空白, 对崩积体扰动土特别是陡坡 (> 30°) 扰动土侵蚀机理的研究不够透彻, 对坡面侵蚀—搬运过程中的泥沙颗粒分布特征及其搬运机制的研究较少, 因此需要继续深入研究。

侵蚀泥沙的颗粒特征是土壤侵蚀研究的重点, 土壤侵蚀与颗粒的关系也一直被国内外学者所关注。在侵蚀泥沙颗粒富集方面, 由于坡面径流的分选作用, 质量轻而松散的细小颗粒最容易流失, 进而出现不同程度的细颗粒富集^[8]; 在泥沙颗粒变化方面, 胡宏祥等^[9]的研究表明, 随着降雨的进行, 地表颗粒组成呈现黏粒与粉粒含量减少, 砂粒含量相对增加的趋势。张颖^[10]通过模拟降雨试验

^{*} 国家自然科学基金项目 (41571272, 41001169)、国家科技支撑计划项目 (2014BAD15B0303) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41571272, 41001169) and the National Key Technology R&D Programs of China (No. 2014BAD15B0303)

[†] 通信作者 Corresponding author, E-mail: yanhehuang@163.com

作者简介: 朱高立 (1989—), 男, 博士研究生, 从事土壤侵蚀与土地经济研究。E-mail: zhugaoli1989@126.com

收稿日期: 2016-02-22; 收到修改稿日期: 2016-05-08; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-07-05

研究了森林植被影响下坡面侵蚀泥沙颗粒的变化情况,发现相比较裸露地表,树木覆盖后坡面所受到的击溅作用变小,侵蚀量变少,在侵蚀泥沙中,粗颗粒变少,平均粒径变小;在泥沙颗粒分布的影响因素方面,吴凤至^[11]认为侵蚀泥沙颗粒与产沙强度、产流强度、坡面流速、降雨量和泥沙原始颗粒之间有极显著的线性相关性,相关系数在0.8以上。Berger等^[12]认为雨强和坡度对细沟侵蚀泥沙颗粒的分布均有影响,且雨强的影响大于坡度。吴新亮等^[13]通过研究不同降雨条件下坡面侵蚀泥沙的颗粒分布特征,发现侵蚀泥沙的颗粒分布主要受土壤母质和降雨侵蚀力的影响,但两者的影响差异较大。这些研究从不同角度分析了坡面土壤侵蚀颗粒与侵蚀的关系,但研究区域多集中在黄土区、黑土区及紫色土区^[14-16],而以南方红壤区崩岗崩积体为对象,研究不同雨强、不同覆盖度条件下该崩积体坡面侵蚀流失的泥沙颗粒特征的文献较少。为了揭示秸秆覆盖条件下崩积土体侵蚀颗粒的变化规律,本文通过室内模拟降雨试验,分析不同雨强和覆盖度条件下崩积体坡面侵蚀泥沙颗粒的变化特征,为深入分析崩岗崩积体侵蚀机理提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤取自福建省安溪县龙门镇洋坑村(118°03'E, 24°57'N),采样地为河谷小盆地,海拔196m,属亚热带季风气候区,年平均温度为18℃,年活动积温5 633~7 238℃。该地雨量充沛,年平均降雨量1 800mm,全年无霜期293~340 d,年日照时数为2 030 h。研究区土体属于酸性花岗岩类,土壤的理化性质如下:土壤pH为5.2;有机质含量为1.70 g kg⁻¹;砂粒含量高,可达到54.67%,黏粒含量低;砾石:粗砂:细砂:粗粉:细粉:黏粒=19.78:46.06:8.61:8.18:14.55:2.81。试验所用覆盖物为秸秆,秸秆长度控制在30~40 cm之间。

1.2 试验装置

模拟降雨试验于2014年7月—11月在福建农林大学金山水土保持科教园人工降雨大厅内进行,试验装置采用西安清远测控技术有限公司生产的QYJY-501型模拟降雨控制器,降雨高度为12 m,

雨滴降落到地表的终速可以达到自然降雨终速;模拟降雨器的有效降雨面积为3 m×6 m,降雨均匀度大于0.85。试验土槽为固定式可变坡钢槽,可调坡度为0°~40°,土槽长、宽、高依次为5、2、1 m,土槽按1 m宽间隔平均分成2个槽。

1.3 试验设计

通过野外调查可知,安溪县崩岗崩积体的坡度主要集中在25°~35°,因此选取中间值30°作为试验坡度。通过分析安溪县常年降雨数据和降雨强度特征,将试验雨强设定为60、90和120 mm h⁻¹。坡面均匀覆盖秸秆,秸秆覆盖量分别为0、1 500、3 000、4 500、6 000 kg hm⁻²五种,折合覆盖率为0、25%、50%、75%、100%。每次降雨时间为1 h,两次降雨试验间隔为48 h,试验重复三次。

首先对试验用土进行简单处理,将试验土体自然风干后过10 mm筛以清除土样中的植物根系、石块等杂物。填土前,先在土槽底部铺60 cm厚沙石,沙石上铺设棉纱布,以保证试验土层的透水状况接近供试土壤,之后采用分层填土的方式向土槽中填入30 cm厚的试验用土,平均容重控制在1.25~1.40 g cm⁻³,保证土体与野外崩积体容重相似。降雨开始前在坡面均匀覆盖秸秆,之后用30 mm h⁻¹雨强的降雨使供试土壤达到水分饱和但不产生径流,之后用塑料布覆盖坡面,使水分充分运动渗透,放置18 h后开始试验。试验过程中,坡面产流开始后记录下产流时间,每隔2 min收集一次径流和产沙。用烘干法(105℃)测定泥沙量,用量筒测定径流样体积。之后将干泥沙过5、2、1、0.5和0.25 mm筛并记录各粒级的质量,对于粒径小于0.25 mm的样品通过激光粒度分析仪进行测定,激光粒度分析仪型号为BT-9300ST,由丹东百特仪器有限公司生产。

1.4 数据处理与分析

富集率(ER)用来表述土壤流失过程中泥沙的颗粒分选及其严重程度。某一颗粒分级下颗粒的富集率等于侵蚀泥沙中此颗粒级泥沙含量和相同质量供试土壤中的此颗粒级别土壤含量的百分比^[17]。

土壤颗粒的平均重量直径的计算公式为:

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

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。

试验数据采用Excel 2013和SPSS 18.0进行分析。通过Excel 2013进行数据处理与绘图等, 利用SPSS 18.0进行双因素方差分析等。

2 结 果

2.1 侵蚀泥沙颗粒组成及其富集率特征

坡面侵蚀泥沙颗粒的变化主要表现在两个方面: 一是坡面产流过程中泥沙颗粒的变化; 二是降雨前后泥沙颗粒组成的变化。为深入分析崩积体坡面侵蚀机理, 有必要对坡面侵蚀过程中泥沙颗粒分布情况及分选特性和搬运机制进行研究。本研究将泥沙颗粒分为砾石 ($> 2 \text{ mm}$)、粗砂 ($2 \sim 0.25 \text{ mm}$)、细砂 ($0.25 \sim 0.05 \text{ mm}$)、粗粉粒 ($0.05 \sim 0.02 \text{ mm}$)、细粉粒 ($0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$) 和黏粒 ($< 0.002 \text{ mm}$) 六个粒级。用富集率 (ER) 表示土壤侵蚀过程中泥沙颗粒的富集现象, 当 $ER > 1$ 时, 侵蚀泥沙颗粒含量较供试土壤颗粒含量增加, 导致颗粒的富集; 当 $ER < 1$ 时, 表明在降雨过程中主要富集的是泥沙原始颗粒而不是泥沙侵蚀颗粒^[11]。

表1为不同条件下各粒级侵蚀泥沙颗粒含量及其富集率。由表可以看出, 在颗粒组成方面, 不同条件下侵蚀泥沙中砾石、细砂和粗粉的平均含量分别为16.01%, 9.88%和13.96%, 而供试土壤中砾石、细砂和粗粉含量分别为19.78%, 8.61%和8.18%, 两者之间的比例相差不大, 说明侵蚀泥沙颗粒中这几个粒级含量与供试土壤颗粒的性质相匹配, 这与蒋芳市^[5]和赵淦^[18]的研究结果相似。此外, 研究发现, 侵蚀泥沙颗粒中粗砂的平均含量为26.63%, 细粉的平均含量为28.21%, 而供试土壤中粗砂平均含量为46.06%, 细粉的平均含量为14.55%, 侵蚀泥沙颗粒中粗砂平均含量远远低于供试土壤中粗砂平均含量, 而细粉的平均含量远远高于供试土壤细粉的平均含量, 原因可能是由于土壤团聚体的崩解、分散作用改变了土壤表面结构, 使得土壤颗粒更紧密地堆积, 导致入渗率降低、径流量增加^[19], 坡面径流对细粉的搬运作用大于对粗砂的搬运作用造成的。在富集率方面, 细砂粒、粗粉粒、细粉粒和黏粒的平均富集率均大于1, 分别达到1.15, 1.71, 2.05和1.89, 说明在降雨过程中, 坡面径流优先搬运的是粒径较小的泥沙颗粒, 这与蒋芳市等^[20]的研究结论相同, 主要原因是在

降雨过程中, 颗粒之间的黏结力受到雨滴动能的影响, 大颗粒被击溅冲刷为较小的颗粒, 小颗粒以悬移的方式流失^[21], 从而导致流失泥沙颗粒中细颗粒含量的增加。高燕^[2]通过研究面蚀和沟蚀对东北黑土区土壤团聚体流失状况时发现, 坡面侵蚀泥沙以小于0.25 mm的小颗粒为主, 与本试验的研究结论相似。

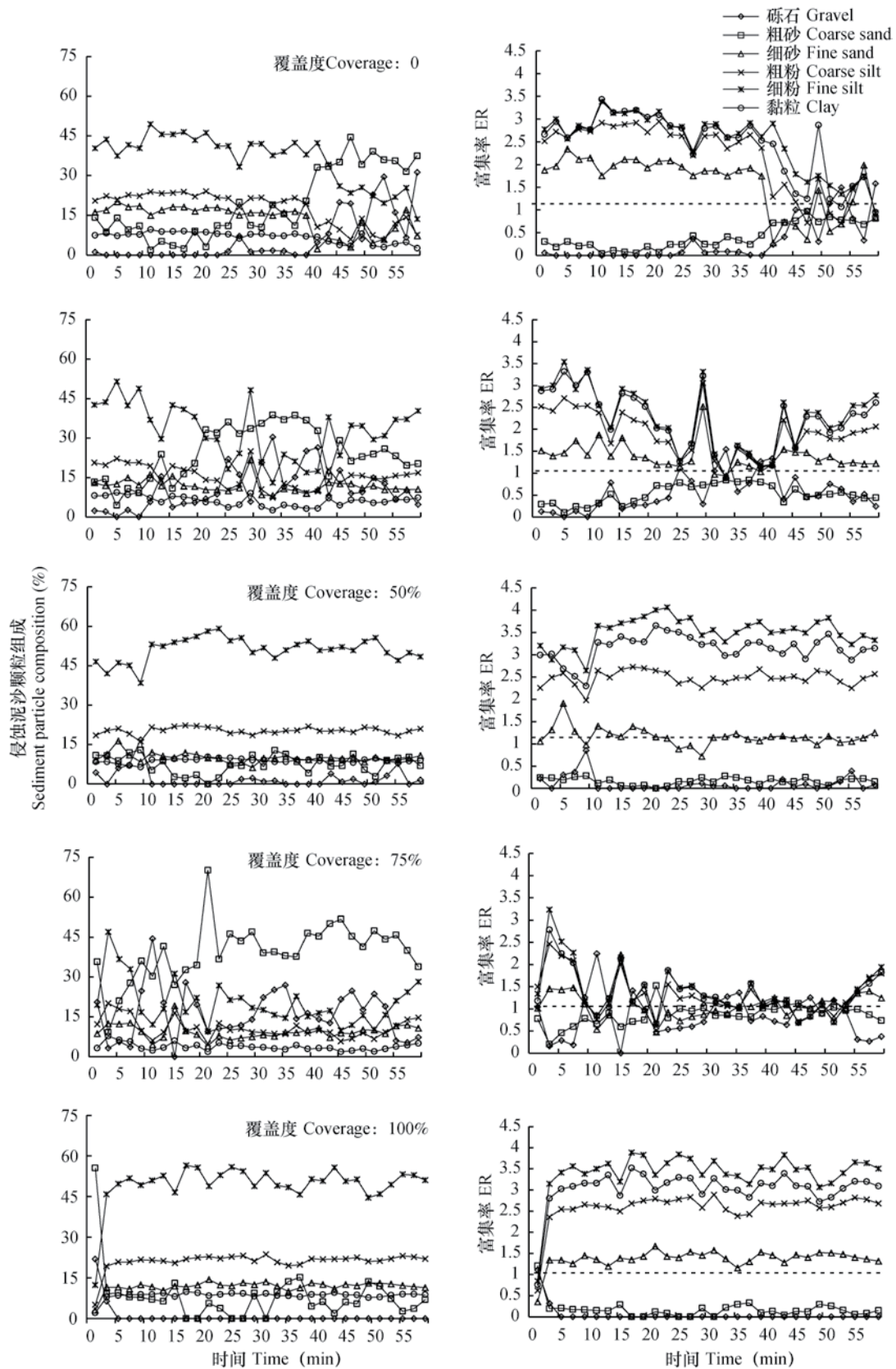
由表1还可以看出, 不同雨强条件下, 侵蚀泥沙颗粒中粒径较大的砾石和粗砂含量随着覆盖度的增加呈先减小后增大的趋势。以 120 mm h^{-1} 雨强条件下的砾石含量变化为例, 当坡面无覆盖时, 侵蚀泥沙中砾石含量为19.27%, 随着覆盖度增加至50%, 砾石含量减小至最低值 (1.64%), 说明50%的秸秆覆盖度对砾石的减少效果最明显。随着覆盖度的继续增加, 侵蚀泥沙中砾石含量开始上升, 最终在覆盖度为100%时达到最高值 (32.42%)。分析其原因, 当坡面无覆盖时, 侵蚀泥沙颗粒中砾石和粗砂含量处于正常水平, 随着秸秆的出现, 粒径较大的砾石和粗砂被坡面秸秆阻截, 不易被径流冲刷流失, 因此大颗粒泥沙的流失量较少。当覆盖度超过50%时, 秸秆易吸水的特性使得坡面承重加大, 加上高坡度与大雨强的影响, 使得坡体结构稳定性下降, 当坡面秸秆产生的剪切力超过坡体自身稳定性时, 坡面开始发生崩塌, 崩塌之后的坡体会产生大小不等的细沟, 坡面径流在细沟中汇集, 使得水流的携沙能力大大增加, 使得粗颗粒泥沙的搬运流失成为可能, 最终导致侵蚀泥沙中砾石和粗砂含量升高。此外, 可以发现, 相比较较大颗粒, 小颗粒 (如细砂、粗粉、细粉和黏粒) 泥沙颗粒含量随着覆盖度的增加无显著变化, 主要原因是由于秸秆之间存在间隙, 这些间隙对大颗粒有较明显的拦截作用, 但对小颗粒的拦截效果不显著, 粒径较小的泥沙颗粒可以顺着径流轻易地从秸秆空隙中穿过流失, 使得小颗粒泥沙含量随覆盖度的改变变化较小。

2.2 侵蚀泥沙颗粒及其富集率变化过程

图1为坡度 30° , 雨强 90 mm h^{-1} 条件下不同覆盖度坡面侵蚀泥沙颗粒及富集率随降雨时间的变化过程。由图可以看出, 较小覆盖度 (0和25%) 情况下, 细颗粒泥沙含量随降雨的进行呈缓慢下降的趋势, 而粒径较大的砾石和粗砂含量随降雨的进行呈逐渐上升的趋势, 这两种现象在降雨中后期表现的最为明显。主要原因是在降雨中后期, 由于长时

表1 不同雨强和覆盖度条件下侵蚀泥沙颗粒含量及富集率

雨强 Rainfall intensity (mm · h ⁻¹)	覆盖度 Coverage (%)	Table 1 Particle size composition and enrichment rates of various fractions of the sediment as affected by rainfall intensity and coverage											
		砾石 Gravel			粗砂 Coarse sand			细砂 Fine sand			粗粉 Coarse silt		
		含量 Content (%)	富集率 Enrichment ratio	富集率 Enrichment ratio	含量 Content (%)	富集率 Enrichment ratio	富集率 Enrichment ratio	含量 Content (%)	富集率 Enrichment ratio	富集率 Enrichment ratio	含量 Content (%)	富集率 Enrichment ratio	富集率 Enrichment ratio
60	0	24.23	1.22	39.45	0.86	8.80	1.02	8.68	1.06	15.77	1.08	3.06	1.09
	25	3.55	0.18	38.62	0.84	9.30	1.08	16.39	2.00	27.88	1.92	4.26	1.52
	50	11.50	0.58	14.33	0.31	10.43	1.21	16.75	2.05	39.81	2.74	7.18	2.56
	75	18.10	0.91	32.43	0.70	15.94	1.85	11.34	1.39	19.45	1.34	2.74	0.98
	100	36.36	1.84	31.71	0.69	5.72	0.66	7.43	0.91	16.07	1.10	2.70	0.96
90	0	14.20	0.72	30.70	0.67	9.79	1.14	12.81	1.57	27.53	1.89	4.97	1.77
	25	14.71	0.74	28.84	0.63	10.43	1.21	13.30	1.63	27.55	1.89	5.17	1.84
	50	3.66	0.19	7.90	0.17	9.80	1.14	19.86	2.43	50.14	3.45	8.64	3.08
	75	18.64	0.94	33.70	0.73	10.62	1.23	11.58	1.42	21.42	1.47	4.04	1.44
	100	22.92	0.15	23.66	0.27	10.98	1.28	14.59	2.39	20.97	3.16	7.89	2.81
120	0	19.27	0.97	37.71	0.82	10.90	1.27	10.60	1.30	17.97	1.24	3.55	1.26
	25	13.33	0.67	37.20	0.81	8.31	0.97	11.60	1.42	25.06	1.72	4.49	1.60
	50	1.64	0.08	5.23	0.11	10.98	1.28	21.15	2.59	52.02	3.58	8.97	3.19
	75	5.64	0.29	12.74	0.28	10.14	1.18	19.19	2.35	43.71	3.00	8.58	3.05
	100	32.42	1.64	31.30	0.68	6.13	0.71	9.16	1.12	17.78	1.22	3.22	1.15
平均值 Mean		16.01	0.74	26.63	0.57	9.88	1.15	13.96	1.71	28.21	2.05	5.30	1.89

图1 90 mm h⁻¹雨强下各覆盖度坡面侵蚀泥沙颗粒组成及富集率变化过程Fig. 1 Variation of particle size composition and enrichment rate of various fractions of erosion sediment under rainfall, 90 mm h⁻¹ in intensity relative to coverage

间的径流冲刷和雨滴击溅,坡面开始出现细沟侵蚀,原本分散的径流在坡面细沟中汇集,细沟水流功率增加,使得较大粒径的泥沙颗粒被侵蚀流失成为可能,最终导致侵蚀土壤中大颗粒泥沙含量的上升^[23]。与此同时,雨滴动能被细沟径流吸收,雨滴对坡面土体的作用力减弱,导致细颗粒泥沙的搬运量降低;当覆盖度增加至50%时,细颗粒泥沙含量在降雨过程中始终处于较高值,粗颗粒泥沙含量始终处于较低值,说明此时的覆盖度对粗颗粒泥沙的减少效果明显,对细颗粒泥沙无法有效阻截。此时细颗粒泥沙的富集率普遍大于1,粗颗粒泥沙的富集率普遍小于1,主要原因是大部分粗颗粒泥沙由于秸秆的阻截无法流失,一部分粗颗粒泥沙由于雨滴的击溅侵蚀被分散为细颗粒后流失,从而使得侵蚀泥沙中细颗粒含量增加,最终导致细颗粒泥沙和粗颗粒泥沙富集率的差异;当覆盖度为75%时,各粒径泥沙颗粒含量在降雨过程中起伏变化较大,主要原因是坡面在该覆盖度下容易发生崩塌,使得泥沙颗粒含量变化出现无序状态。通过观察该覆盖度条件下各粒径颗粒富集率的变化情况,可以发现,在降雨中后期,不同粒径泥沙颗粒的富集率趋于1,这表明各粒径侵蚀泥沙颗粒的富集率与供试土壤相近,原因可能是此时坡面土体被侵蚀的方式以整体侵蚀为主;当覆盖度达到100%时,在降雨初期,侵蚀泥沙中粗颗粒泥沙迅速下降,细颗粒泥沙则逐渐升高,在降雨中后期,各泥沙颗粒含量维持稳定,此时细颗粒泥沙含量处于较高水平,粗颗粒泥沙含量处于较低水平,细颗粒泥沙的富集率大于1,粗颗粒泥沙的富集率小于1。这里需要说明的是,与75%覆盖度坡面不同,虽然100%覆盖度坡面同样发生了崩塌,但崩塌范围较小,程度较轻,原因可能是此时坡面秸秆量较高,产生的重力势能较大,秸秆对坡体稳定性的贡献率超过了惯性力导致的坡体下滑崩塌的贡献率,使得大范围崩塌现象未出现。

2.3 侵蚀泥沙颗粒的平均重量直径

为了揭示不同条件下侵蚀泥沙颗粒的分选特性,本研究对泥沙颗粒的平均重量直径进行了分析。图2表示不同雨强和覆盖度条件下侵蚀泥沙颗粒平均重量直径(MWD)的变化情况。由图可以看出,不同雨强和覆盖度条件下,侵蚀泥沙颗粒平均重量直径的变化规律存在一定的差异性。总体上,不同雨强条件下,坡面侵蚀泥沙的平均

重量直径随着覆盖度的增加呈先减小后增大的趋势。具体来看,当雨强为60 mm h⁻¹时,侵蚀泥沙平均重量直径的最高值出现在覆盖度为100%时,为1.150 mm,最低值出现在覆盖度为50%时,为1.133 mm;当雨强为90 mm h⁻¹时,侵蚀泥沙平均重量直径的最高值出现在覆盖度为100%时,为1.151 mm,最低值出现在覆盖度为50%时,为1.127 mm;当雨强为120 mm h⁻¹时,侵蚀泥沙平均重量直径的最高值出现在覆盖度为100%时,为1.148 mm,最低值出现在覆盖度为50%时,为1.125 mm。可以发现,不同雨强条件下的坡面侵蚀泥沙平均重量直径的最高值均出现在覆盖度为100%的坡面,最低值均出现在覆盖度为50%的坡面,原因可能是当坡面覆盖度达到50%时,虽然其对细颗粒泥沙的拦截效果不明显,但是对粗颗粒泥沙的拦截效果较好,从而使得流失的泥沙以细颗粒为主,导致侵蚀泥沙的平均重量直径较小。当坡面覆盖度增加至75%~100%时,过多的秸秆覆盖量反而会造成坡面土体的崩塌,导致坡面侵蚀泥沙的平均重量直径增大。

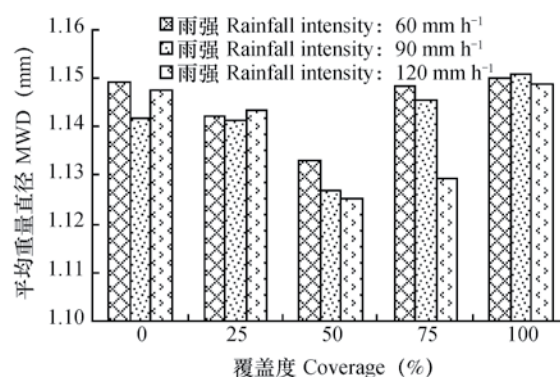


图2 不同雨强和覆盖度下坡面侵蚀泥沙颗粒的平均重量直径

Fig. 2 Mean weight diameter of sediment particles as affected by rainfall intensity and coverage

通过双因素方差分析可知,在覆盖度为0、25%、50%、75%和100%、雨强为60、90、120 mm h⁻¹条件下,覆盖度与坡面侵蚀颗粒平均重量直径(MWD)之间极显著相关,雨强与坡面侵蚀颗粒平均重量直径(MWD)之间无显著相关性。

3 结 论

研究结果表明坡面径流优先搬运的是粒径较

小的泥沙颗粒; 各场次侵蚀泥沙颗粒中细砂粒、粗粉粒、细粉粒和黏粒的平均富集率均大于1; 在较小覆盖度下, 侵蚀泥沙中细颗粒含量与粗颗粒呈反向变化; 方差分析表明覆盖度与坡面侵蚀泥沙平均重量直径 (MWD) 呈极显著相关, 坡面侵蚀泥沙的平均重量直径随覆盖度的增加呈先减小后增大趋势; 坡面秸秆覆盖度达到50%时对粗颗粒泥沙的减少效果较明显, 当覆盖度达到75%时, 坡面容易发生崩塌。因此, 在防治坡面侵蚀的过程中应注意覆盖度高低的控制。

参考文献

- [1] 赵其国. 我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题. 水土保持通报, 2006, 26 (2) : 1—8
Zhao Q G. Some considerations for present soil and water conservation and ecology security of South China (In Chinese) . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26 (2) : 1—8
- [2] 梁音. 南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理. 中国水土保持, 2009 (1) : 31—32
Liang Y. The features and way of governance of benggang in red soil region of Southern China (In Chinese) . Soil and Water Conservation in China, 2009 (1) : 31—32
- [3] 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 soil permeability of slumping deposits in benggang (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (3) : 49—54
- [4] Jiang F S, Huang Y H, Wang J S, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in Southeast China. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78 (5) : 1741—1752
- [5] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对花岗岩崩岗崩积体细沟侵蚀的影响. 水土保持研究, 2014, 21 (1) : 1—5
Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Effects of different rainfall intensities and slope gradients on rill erosion of alluvial deposits in granite benggang (In Chinese) . Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21 (1) : 1—5
- [6] 朱高立, 黄炎和, 林金石, 等. 模拟降雨条件下秸秆覆盖对崩积体侵蚀产流产沙的影响. 水土保持学报, 2015, 29 (3) : 27—31, 37
Zhu G L, Huang Y H, Lin J S, et al. Effect of straw mulch on alluvial soil erosion and yield of runoff and sediment under simulated rainfall (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 (3) : 27—31, 37
- [7] 张新和. 黄土坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变与侵蚀产沙过程研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2007
Zhang X H. Experimental study on evolution process of sheet erosion-rill erosion-gully erosion and sediment yield process on loess hillslope (In Chinese) . Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2007
- [8] 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. 水土保持学报, 2012, 26 (3) : 18—21
Guo J, Wen A B, Yan D C, et al. Particle characteristics of eroded purple soil from slope land in the Three Gorges Reservoir Region (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26 (3) : 18—21
- [9] 胡宏祥, 洪天求, 马友华, 等. 土壤及泥沙颗粒组成与养分流失的研究. 水土保持学报, 2007, 21 (1) : 26—29
Hu H X, Hong T Q, Ma Y H, et al. Study on soil and sediment particle size distribution and nutrient loss (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21 (1) : 26—29
- [10] 张颖. 黄土地区森林植被对坡面土壤侵蚀过程影响机理研究. 北京: 北京林业大学, 2007
Zhang Y. Dynamic effects of forest vegetation on hill-slope water erosion in loess area (In Chinese) . Beijing: Beijing Forestry University, 2007
- [11] 吴凤至. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究. 武汉: 华中农业大学, 2012
Wu F Z. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope (In Chinese) . Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012
- [12] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity (In Chinese) . Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35 (12) : 1456—1467
- [13] 吴新亮, 魏玉杰, 李朝霞, 等. 亚热带地区几种红壤坡面侵蚀泥沙的物质组成特性. 土壤学报, 2014, 51 (5) : 1223—1233
Wu X L, Wei Y J, Li C X, et al. Composition of sediments of erosion from different red soil slopes in subtropical area (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (5) : 1223—1233
- [14] 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.
Xiao P Q, Zheng F L. Effects of up-slope runoff

- and sediment on rill erosive sediment particle size distribution (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2003 (5): 64—68
- [15] 王晓燕, 陈洪松, 田均良, 等. 侵蚀泥沙颗粒中¹³⁷Cs的含量特征及其示踪意义. *泥沙研究*, 2005 (2): 61—65
Wang X Y, Chen H S, Tian J L, et al. Character of ¹³⁷Cs concentration in erosive sediment and its tracing meaning (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2005 (2): 61—65
- [16] 温磊磊, 郑粉莉, 沈海鹏, 等. 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征. *土壤学报*, 2015, 52 (3): 489—498
Wen L L, Zheng F L, Shen H O, et al. Characteristics on soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China (In Chinese). *ActaPedologicaSinica*, 2015, 52 (3): 489—498
- [17] 汤珊珊, 李鹏, 任宗萍, 等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究. *土壤学报*, 2016, 53 (1): 39—47
Tang S S, Li P, Ren Z P, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall (In Chinese). *ActaPedologicaSinica*, 2016, 53 (1): 39—47
- [18] 赵淦. 不同上方来水及坡度条件下崩岗崩积体坡面侵蚀机理研究. 福州: 福建农林大学, 2014
Zhao G. The erosion mechanism of colluvial deposits under different discharge and slope gradient (In Chinese). Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014
- [19] 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 (5): 1235—1240
Wu Z F, Shi Z H, Yue B J, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope (In Chinese). *ActaPedologicaSinica*, 2012, 49 (5): 1235—1240
- [20] 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. *土壤学报*, 2014, 51 (5): 974—982
Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Effect of slope gradient and rainfall intensity on particle size composition of erosion sediment from colluvial deposits of benggang (In Chinese). *ActaPedologicaSinica*, 2014, 51 (5): 974—982
- [21] 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 [J]. *水土保持通报*, 2010, 02: 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
- [22] 高燕. 黑土区不同侵蚀方式对土壤团聚体和泥沙颗粒流失的影响研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014
Gao Y. Impacts of soil erosion on soil aggregates and particles losses in the black soil region (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2014
- [23] 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

Particle Size Composition of Erosion Sediment from Colluvial Deposits of Collapsing Hill as Affected by Rainfall Intensity and Coverage

ZHU Gaoli^{1, 2} WEN Bo² LI Jing² HUANG Yanhe^{1†} ZOU Wei² LIN Jinshi¹ JIANG Fangshi¹
ZHANG Jian²

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

(2 College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract 【Objective】Collapsing hills are widely distributed in granite-covered areas of tropical and subtropical South China, characterized by being high in erosion rate, strong in explosiveness and difficult to control. Colluvial deposits, formed of materials accumulated at the foot of the collapsing wall, are an important component of a collapsing hill, and meanwhile as they are loose in texture, high in content of coarse particles and high in erodibility, they become the main source of erosion sediment in the area. The erosion of colluvial deposits has aroused widespread attention, however, the current study on colluvial

deposits still has some shortages. For instance, so far nothing has been reported on characteristics of the disturbed soil of colluvial deposits and laws of the erosion thereon. 【Method】 Therefore, to study properties of erosion sediment from colluvial deposits, an indoor rainfall simulation experiment was carried out on slopes of colluvial deposits, 30° in gradient, different in coverage (0, 25%, 50%, 75%, 100%) and different rainfall intensity (60, 90, 120 mm h^{-1}), SPSS18.0 was used to analyze relationships of the characteristics of particle size composition with coverage. 【Result】 Results show as follow: (1) The mean content of coarse sand was much lower, and the mean content of fine silt much higher than that in the test soil. During the process of rainfall, runoff on the slopes carried long with it soil, particles small in size first; The mean enrichment rates of fine sand, coarse silt, fine silt and clay were all higher than 1 in the sediment. (2) The content of coarse particles (gravel and coarse sand) reduced first, then rose again and the content of fine particles (fine sand, coarse powder, fine silt and clay) did not very much with increasing coverage. (3) On slopes, varying in the range of 0 ~ 25% in coverage, the content of fine particles reduced slowly, while the content of gravel and coarse sand rose gradually with the rainfall going on; on slopes 50% in coverage, the content of fine particles remained high, while the content of coarse particles stayed low throughout the rainfall event; and on slopes reaching 75% in coverage, the content of soil particles various in size fluctuated sharply during the course of a rainfall event, and in this case, collapse of the slopes occurred readily. (4) And the mean weight diameter (MWD) of the erosion sediment decreased first and then increased with increasing coverage. 【Conclusion】 MWD of sediment particles was found to be significantly related to coverage of the slope, rather than rainfall intensity. When the coverage of the slope was around 50%, the effect of sediment reducing was better. Therefore, in the process of prevention of erosion, we should pay attention to the control of the coverage on slopes.

Key words Rainfall simulation; Straw mulch; Colluvial soil; Soil erosion; Particle composition

(责任编辑：檀满枝)