

模拟雨滴条件下崩壁不同土层的溅蚀特征

梁双双, 林金石, 黄炎和, 蒋芳市, 葛宏力, 汪倩, 王正清, 贾坤, 曹彤彤

(福建农林大学 资源与环境学院, 福州 350002)

摘 要:崩壁是崩岗侵蚀的重要组成部分,为了研究崩壁不同土层的溅蚀特征,采用自制雨滴发生装置模拟不同直径雨滴,分析了不同雨滴大小和雨强下崩壁3个土层溅蚀量、溅蚀土壤颗粒特征的差异。结果表明:崩壁3个土层的溅蚀土粒均大都分布在0—5 cm的范围内,其中,红土层的溅蚀量随雨滴强度的变化率最大,碎屑层次之,砂土层最小;通过双因素方差分析可知,土壤特性对溅蚀量的影响大于雨滴强度;溅蚀土粒中砂粒(0.05~2 mm)百分比最大,而黏粒(<0.002 mm)百分比最小,可以推测出使溅蚀量达到最大的粒径范围;崩壁3个土层的溅蚀土粒中,随着溅蚀距离的增加,砾石(>2 mm)最不易被溅移,粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)最易被溅移。

关键词:雨滴溅蚀;雨滴强度;距离分布;粒径分选

中图分类号:S152; S153; S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0043-06

Splash Erosion Characteristics of Different Soil Layers on the Collapsing Wall Under Simulated Raindrop

LIANG Shuangshuang, LIN Jinshi, HUANG Yanhe, JIANG Fangshi,
GE Hongli, WANG Qian, WANG Zhengqing, JIA Shen, CAO Tongtong

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

Abstract: Collapsing wall is an important part of the collapsing hill erosion. In order to study splash erosion characteristics in different soil layers of collapsing wall, a raindrop generator was made to simulate different diameter raindrops, and we studied the splash amount and different characteristics of the soil particles in different soil layers of collapsing wall under the raindrop size and different raindrop intensities. The result shows that the soil particles of splash erosion present the concentrated distribution in the range of 0 to 5 cm, among which the red soil splash erosion with the rate change of rain intensity is the maximum, the second is the clastic, and the minimum is the sand layer. By two-factor variance analysis, the influence of soil characteristic on splash erosion amount is greater than the rain intensity. The mass percentage of particles with size of 0.05~2 mm was the most, while the mass percentage of particles with size less than 0.002 mm was the least, which can speculate the size range that makes splash amount reach the maximum. With the increase of splash erosion distance, soil particles with size more than 2 mm are the most difficult to be moved due to splash, while soil particles with size of 0.002~0.05 mm and with size less than 0.002 mm are the most vulnerable to be moved through splash.

Keywords: splash erosion; raindrop intensity; splash distance; size distribution

崩岗是南方花岗岩红壤区的一种特殊侵蚀形式,主要发生在风化母质残积物深厚、降雨集中的地区,且崩岗的发展速度快、危害严重、治理难度大^[1-3]。崩壁作为崩岗的重要组成部分,是水力和重力复合作用最明显的部位,也是崩岗继续失稳崩塌和崩积堆产生的前提^[4]。溅蚀是裸露崩壁在降雨过程中最容易遭受的一种侵蚀形式,对其侵蚀过程和侵蚀特征的分析

是研究崩岗侵蚀机理的前提。因此,研究崩壁不同土层的溅蚀特征,对于摸清南方花岗岩区崩壁侵蚀机理具有重要意义。

关于土壤击溅侵蚀,国内外许多学者已经做了大量的相关研究,分析了植被覆盖^[5]、坡度^[6]、土层厚度^[7-8]等因素对表土的击溅侵蚀特征的影响,在国内,相关学者还进行了土壤击溅侵蚀与土壤表土结皮关

收稿日期:2016-01-06

修回日期:2016-03-16

资助项目:国家自然科学基金(41001169,41571272);国家科技支撑计划项目(2014BAD15B0303)

第一作者:梁双双(1988—),女,河北定州人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与治理。E-mail:317252227@qq.com

通信作者:林金石(1980—),男,福建武夷山人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail:linjs18@163.com

系^[9-10]等的研究。其中,秦越等^[11]研究认为当雨滴动能小于 $0.067\ 4\times 10^3\text{J}$ 时,雨滴不产生溅蚀,且存在使土壤溅蚀量达到最大的前期含水量,土壤前期含水量与土壤抗蚀性呈负相关关系;赵晓光等^[12]通过对黄土溅蚀土粒进行不同距离段的收集,表明击溅对一般土壤组成的分选不明显,但粗粒被溅移的量随着击溅动能增大而增加,分选性逐渐显露;程琴娟等^[13]对 14 种不同粒径范围的黄绵土样品进行溅蚀试验,结果表明溅蚀量随粒径增大而增加,粒径在 0.15 mm 处达到最大值后,溅蚀量随着粒径的增大逐渐减少。扰动土试验的结论较原状土存在较大误差^[14],高学田等^[15]的研究表明原状土的溅蚀量仅是扰动土溅蚀量的 22%~30%。可见,目前学者们对于击溅侵蚀的研究多集中于黄土区,而在花岗岩崩岗侵蚀地区进行的溅蚀研究较少,且相关研究取原状土进行模拟试验的研究亦较少。由于崩壁剖面从上到下依次分为红土层、砂土层、碎屑层,各土层在岩土特性、理化性质等方面存在较大差异,这直接导致各土层击溅侵蚀特征存在明显的差异。

因此,本文通过自制模拟雨滴发生器,对崩壁不同

表 1 各土层土壤理化性质

土层	黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.05 mm)	砂粒(0.05~2 mm)	砾石(>2 mm)	pH 值	有机质 /(g·kg ⁻¹)
	含量/%	含量/%	含量/%	含量/%		
红土层	20.40	54.03	16.56	9.01	4.90	7.79
砂土层	1.58	58.50	20.06	19.86	5.45	1.96
碎屑层	1.20	50.24	33.20	15.36	5.43	1.05

1.3 试验方法

试验选用自制雨滴发生装置(直径 20 cm,高 15 cm 的圆柱形密封容器)模拟降雨,设定 4 种针头雨滴直径分别为:2.7,3.3,3.8,4.3 mm。本试验的溅蚀盘在 Morgan 溅蚀盘^[17]和周一杨^[18]试验采用的溅蚀盘的基础上进行改进,其中,装土盘直径改为 10 cm,收集盘增加一个 5 cm 的收集范围。试验装置采用精密蠕动泵进行调节、控制供水,并利用雨滴谱仪(OTT Parsivel2)多次重复率定雨滴直径和雨滴强度。试验雨滴降落高度为 12 m。最终测定 4 种针头的雨滴直径从小到大依次为:(2.7 ± 0.2) mm,(3.3 ± 0.2) mm,(3.8 ± 0.2) mm,(4.3 ± 0.2) mm,4 种雨滴直径对应的雨滴强度分别为:43,62,105,136 mm/h。

试验设计每次模拟雨滴溅蚀试验历时均为 20 min,试验结束后,用铝盒分层收集溅蚀盘中的土粒,并用烘干法测量溅蚀泥沙重量。为了测定溅蚀土粒中砾石、砂粒、粉粒、黏粒的粒径分选规律,将称重后的样品分别过孔径为 2,1,0.25 mm 的土壤湿筛,尽量减少溅蚀土粒中水溶性团聚体的干扰。再将过筛后<0.25 mm 的土壤

土层采集的原状土样进行雨滴击溅侵蚀试验,分析不同雨滴强度、不同溅蚀距离对崩壁 3 个土层溅蚀量的影响,并研究溅蚀土粒的颗粒组成特征。从中总结规律,为崩岗崩壁侵蚀机理的深入研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省安溪县龙门镇洋坑村(24°57'N,118°03'E),该区属于亚热带气候区,年平均气温 16~22℃,年平均降水量 1 600~2 000 mm,研究区的土壤为酸性花岗岩,以中—粗粒似斑状结构为主,矿物成分主要有长石、石英、云母等^[16]。

1.2 土样采集

本研究于 2015 年 8—9 月期间进行土壤采样,在预先选定的研究区内,分红土层、砂土层和碎屑层 3 个土层将试验土盘(直径 10 cm,高 3 cm)垂直打入表层,进行原状取样,其中,每层取 48 个原状土样,本研究共采集 144 个原状土样。此外,每个土层测定土壤容重、孔隙度等指标。同时,还在每层取样并测定所取土样点的理化性质,见表 1。

颗粒用激光粒度分布仪(BT—9300 ST)分析。

溅蚀试验结束后分别收集 0~5,5~10,10~15,15~22,22~33,33~45 cm 范围内的溅蚀土粒,烘干后称重计算溅蚀量(M)

$$M=\frac{m}{s}$$

(1)

式中: M 为溅蚀量(g/cm²); m 为溅蚀土粒质量(g); s 为环的面积(cm²)。

1.4 数据处理

数据处理及统计分析采用 SPSS 18.0 软件进行,制图采用 Excel 2007。

2 结果与分析

2.1 溅蚀土粒的距离分布特征

试验收集了距离装土盘 0~45 cm 范围的溅蚀颗粒,表 2 中崩壁 3 个土层的溅蚀量均随溅蚀距离的增加而减少,其中分布在 0~5 cm 范围内的溅蚀量最多,且显著多于其他距离的溅蚀量;33~45 cm 范围的溅蚀量最少,只有 0~5 cm 范围的 1/10。这主要由于雨滴打击地

表,受到重力作用的溅蚀颗粒做抛物线运动,被溅散土粒的大小不同导致抛物线路径的差异,从而溅蚀土粒会产生距离分布上的差异。理论上,距离装土盘越近,土粒溅蚀需要的能量越小,溅蚀距离越远所需的能量也就

越大,所以近距离分布的溅蚀土粒较多,远距离分布的溅蚀土粒较少。试验结果表明,溅蚀量随着溅蚀盘分布距离的增加而减小,溅蚀量与溅蚀距离呈负相关关系,这一研究结果与程金花等^[19]的结论相吻合。

表 2 崩壁 3 个土层在不同溅蚀距离的溅蚀量 g

雨滴强度/ (mm · h ⁻¹)	土层	溅蚀距离/cm					
		0~5	5~10	10~15	15~22	22~33	33~45
43	红土层	20.77	6.3	5.42	3.76	2.43	0.4
	砂土层	32.62	10.73	6.03	5.05	3.96	3.01
	碎屑层	11.29	4.17	1.75	1.7	1.47	1.46
62	红土层	21.91	4.33	2.35	2.03	1.55	1.49
	砂土层	41.08	13.28	6.91	6.42	4.54	4.97
	碎屑层	42.24	11.77	6.55	5.7	4.33	4.29
105	红土层	51.77	20.68	10.55	8.92	6.54	5.47
	砂土层	51.87	18.14	10.71	9.12	7.76	6.75
	碎屑层	66.93	18.69	9.9	7.73	5.91	5.26
136	红土层	89.19	31.59	17.06	14.33	11.08	9.67
	砂土层	83.63	20.33	12.95	11.45	8.16	9.35
	碎屑层	74.15	20.14	10.2	8.01	5.35	6.93

由图 1 可知,崩壁 3 个土层土壤的溅蚀量均随着雨滴强度的增加而增加。其中,红土层溅蚀量受雨滴强度的变化率最大,碎屑层次之,砂土层最小。在小雨滴强度下,砂土层最易遭受溅蚀,而红土层的抗蚀性较强,这表明特定的土壤类型在一定的雨滴强度范围,小雨滴易于产生溅蚀,这一结论与秦越等^[11]的研究结果相一致;雨滴强度不断增大,碎屑层含有的大量大颗粒原生矿物遭到侵蚀,溅蚀量加大;试验雨滴强度达到最大,红土层的团聚颗粒被溅散、崩解,遭到大量侵蚀,砂土层则由于大颗粒含量少,溅蚀量相对减少,碎屑层虽大颗粒含量较高,但其本身土体坚硬的特点致使这一阶段的溅蚀量相对减少。

对崩壁 3 个土层的溅蚀量与溅蚀距离进行回归分析,发现溅蚀量 M 与溅蚀距离 r 呈现 $M=ar^{-b}$ 幂函数关系,相关性较高(表 3)。这与 Van Dijk 等^[20]分析的二者呈现指数函数关系这一结论有些差异,主要由于本试验所选的崩壁土壤与其所研究土壤的质地存在很大差异:红土层的黏粒、有机质含量较高,土壤的团聚性好,抗雨滴击打的能力较强,但随着雨滴强度增加,红土层的团聚颗粒就会被大量溅散、崩解,遭到严重侵蚀;砂土层土体松散,粉粒含量较多,遇水易膨胀、崩解;碎屑层存在大量大颗粒的石英、长石等原生矿物,土体坚硬,随着雨滴强度增加,碎屑层的大颗粒原生矿物易遭到侵蚀。崩岗区崩壁土体质地的特殊性,使得溅蚀颗粒大范围地在近距离分布,并随着溅蚀距离的增加呈现先快速,后又缓慢减小的趋势。此外,不仅二者试验土体的性质有很大不同,试验采用的雨滴直径大小、降落高度等也都存在明显的差异,故而本试验的研究结果与其他作者的结论存在差异。

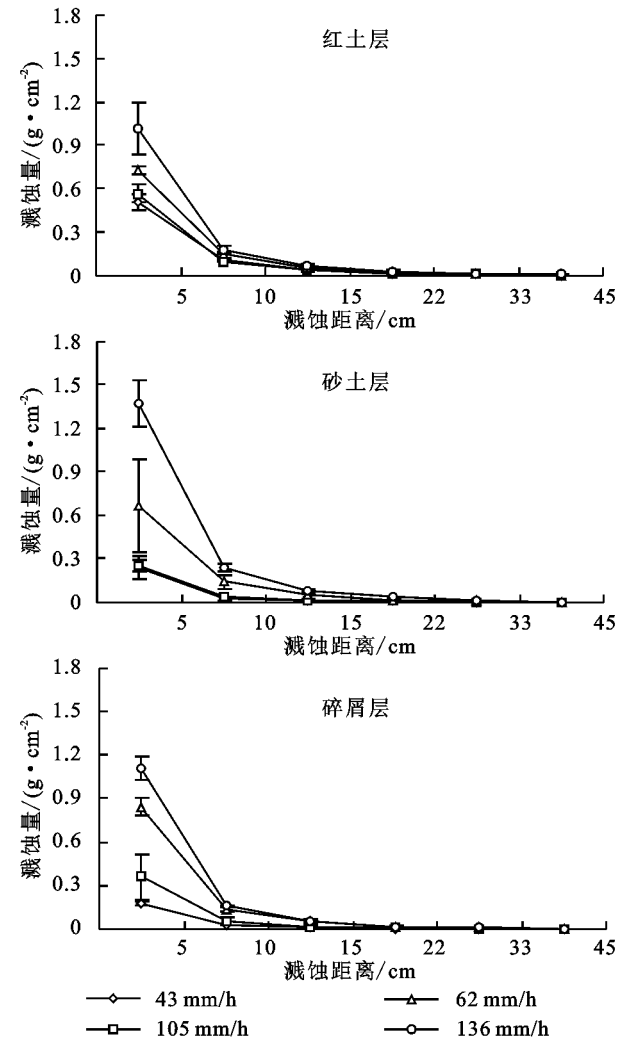


图 1 不同雨滴强度下 3 个土层的溅蚀量随溅蚀距离分布

此外,本研究对雨滴强度和崩壁不同土层土壤对溅蚀量的影响进行方差分析。通过双因素方差分析可知,雨滴强度对溅蚀量的影响不显著,而不同土层土

壤对溅蚀量的影响达显著水平,说明土壤特性对溅蚀量的影响大于雨滴强度($F_{雨强}=19.35, F_{0.01}=18.90$; $F_{土壤特性}=1.95, F_{0.01}=18.50$)。

表 3 溅蚀量与溅蚀距离的拟合函数

土层	雨滴强度/ (mm·h ⁻¹)	溅蚀量与溅蚀 距离的关系式	R ²
红土层	43	$M=79.30r^{-1.16}$	0.907
	62	$M=84.73r^{-1.09}$	0.960
	105	$M=223.5r^{-1.08}$	0.926
	136	$M=456.7r^{-1.12}$	0.914
砂土层	43	$M=130.9r^{-0.94}$	0.910
	62	$M=154.8r^{-0.97}$	0.889
	105	$M=165.7r^{-0.88}$	0.882
	136	$M=255.8r^{-0.97}$	0.884
碎屑层	43	$M=41.99r^{-0.97}$	0.859
	62	$M=92.30r^{-1.03}$	0.865
	105	$M=259.7r^{-1.09}$	0.913
	136	$M=361.6r^{-1.17}$	0.887

2.2 雨滴强度对溅蚀粒径的影响

通过对崩壁红土层、砂土层和碎屑层 3 个土层的

表 4 崩壁 3 个土层不同粒级的溅蚀量及其质量百分比

雨滴强度/ (mm·h ⁻¹)	土层	砾石(>2 mm)		砂粒(0.05~2 mm)		粉粒(0.002~0.05 mm)		黏粒(<0.002 mm)	
		溅蚀量/g	质量百分比/%	溅蚀量/g	质量百分比/%	溅蚀量/g	质量百分比/%	溅蚀量/g	质量百分比/%
43	红土层	1.36	16	6.03	70	1.00	12	0.18	2
	砂土层	0.30	5	5.06	87	0.37	6	0.07	1
	碎屑层	0.27	9	2.26	75	0.42	14	0.05	2
62	红土层	1.77	16	7.60	70	1.29	12	0.17	2
	砂土层	0.44	7	5.61	86	0.38	6	0.08	1
	碎屑层	1.34	13	8.27	78	0.90	8	0.13	1
105	红土层	1.91	13	9.76	64	2.89	19	0.69	5
	砂土层	0.42	3	12.70	86	1.40	9	0.28	2
	碎屑层	2.18	13	13.44	80	1.19	7	0.09	1
136	红土层	2.57	13	15.13	74	2.28	11	0.45	2
	砂土层	0.62	3	19.21	80	3.43	14	0.64	3
	碎屑层	3.40	19	13.66	75	1.07	6	0.14	1

对不同溅蚀距离下土壤各粒径的重量百分比进行分析,结果表明(表 4):在红土层中,砾石百分比随着雨滴强度的变化没有明显的规律,碎屑层中,砾石百分比随着雨滴强度的增加而增加,而在砂土层中,砾石百分比在较小雨滴强度下的值较高;在红土层中,砂粒百分比在较大雨滴强度下的值较低,在较小雨滴强度下的值相对较高,在碎屑层中,砂粒百分比随着雨滴强度的增加而增加,而在砂土层中,砂粒百分比在雨滴强度为 105 mm/h 时的值异常低;在红土层中,粉粒随着雨滴强度的增加而增加,在碎屑层中,粉粒随着雨滴强度的增加而减少,而在砂土层中,粉粒百分比值在雨滴强度为 105 mm/h 时的值异常高;在红土层中,黏粒随着雨滴强度的增加而增加,碎屑层中,黏粒百分比在较大雨滴强度下较低,在较小雨滴强度下相对较高,在砂土层中,黏粒百分比在雨滴强度为 105 mm/h 时的值最高。

溅蚀颗粒进行筛分,得到 4 种雨滴强度下的溅蚀颗粒的粒径组成情况(表 4)。由表 4 和表 1 对比可知,在崩壁 3 个土层的原状土壤中,砾石和粉粒含量很高,溅蚀土粒中的含量却不多;相反,原状土壤中砂粒的含量不高,在溅蚀土粒中的含量却最多;红土层原状土壤中,黏粒含量虽高,在溅蚀土粒中的含量却很少。表 4 中,砂粒(0.05~2 mm)的溅蚀量最大;粉粒(0.002~0.05 mm)的溅蚀量次之;黏粒(<0.002 mm)的溅蚀量最小;砾石(>2 mm)溅蚀量次小。这一结论与程金花等^[19]的研究结果有一定的差异,其研究认为溅蚀土粒中细砂粒(0.05~0.2 mm)百分比最大,占溅蚀量的 39.3%;粗粉粒(0.02~0.05 mm)百分比次大;粗砂粒(0.2~2 mm)百分比最小。分析原因,两个研究所选用土壤的机械组成存在差异,程金花的试验土壤粉粒含量为 54.7%,砂粒含量 35.5%,黏粒含量为 9.8%。这主要是其土壤与本研究崩壁碎屑层土壤的机械组成较为接近,但与红土层和砂土层土壤的机械组成有很大不同,故而试验结果会存在差异。

因此,雨滴强度对红土层和砂土层溅蚀颗粒含量的影响规律比较稳定,砂土层的溅蚀颗粒含量对雨滴强度变化的反应相对比较敏感。这一研究中,碎屑层的结论与秦越等^[11]的研究结果较为接近,但结果明显与红土层和砂土层不同,这可能是其试验土壤与本研究碎屑层土壤的机械组成较为接近,却与红土层和砂土层土壤的机械组成差异较大引起的。

2.3 溅蚀土粒的粒径分选特征

由图 2 可知,崩壁 3 个土层的 4 种不同粒径的溅蚀颗粒百分比,随溅蚀距离变化的规律明显。砾石在红土层、砂土层和碎屑层中均随着溅蚀距离的增加而呈急速下降的趋势,且砾石在碎屑层的溅蚀百分比值最高,在红土层的溅蚀百分比值最低,其中,3 个土层溅蚀的砾石主要分布在 0~5 cm 的溅蚀距离内,在溅蚀距离大于 22 cm 的范围基本没有砾石的分布。砂粒在红土层、砂土层和碎屑层中随着溅蚀距离的变化

相对比较复杂,4 种雨滴强度下,砂土层中,砂粒在 0~5 cm 溅蚀距离的分布较为集中稳定,其中,在雨滴强度为 105 mm/h、溅蚀距离在 22~45 cm 时,砂粒百分比异常的低,而在红土层和碎屑层中,砂粒在 0~10 cm 溅蚀距离的分布较为集中稳定,但在红土层中较大雨滴强度下,砂粒在溅蚀距离为 15,33,45 cm 百分比变化较大。从整体上看,砂粒在砂土层和碎屑层随着溅蚀距离的变化没有明显的规律性,在红土层随着溅蚀距离的增加砂粒百分含量呈现减小的趋势。粉粒在 3 个土层中随着溅蚀距离的变化也比较复杂,4 种雨滴强度下,砂土层中,粉粒在 0~5 cm 溅蚀距离的分布较为集中稳定,其中,在雨滴强度为 105 mm/h、溅蚀距离在 22~45 cm 时,粉粒百分

比值异常高,而在红土层和碎屑层中,粉粒在 0~10 cm 溅蚀距离的分布较为集中稳定,但在红土层中较大雨滴强度下,粉粒在溅蚀距离为 15,33,45 cm 百分比变化较大。粉粒和黏粒的百分含量在 3 个土层中随着溅蚀距离的增加,整体上呈现增加的趋势。其中,砂土层中,黏粒的百分含量在雨滴强度为 105 mm/h 时,随着溅蚀距离的增加最为显著。

总之,崩壁 3 个土层中,随着溅蚀距离的增加,砾石的百分含量急速减少,而粉粒和黏粒的百分含量有增加的趋势,其中,红土层中,砂粒的百分含量随着溅蚀距离的增加呈现下降的趋势。溅蚀土粒中,砾石最不易被溅移,砂粒也相对不易被溅移,粉粒和黏粒最易被溅移。

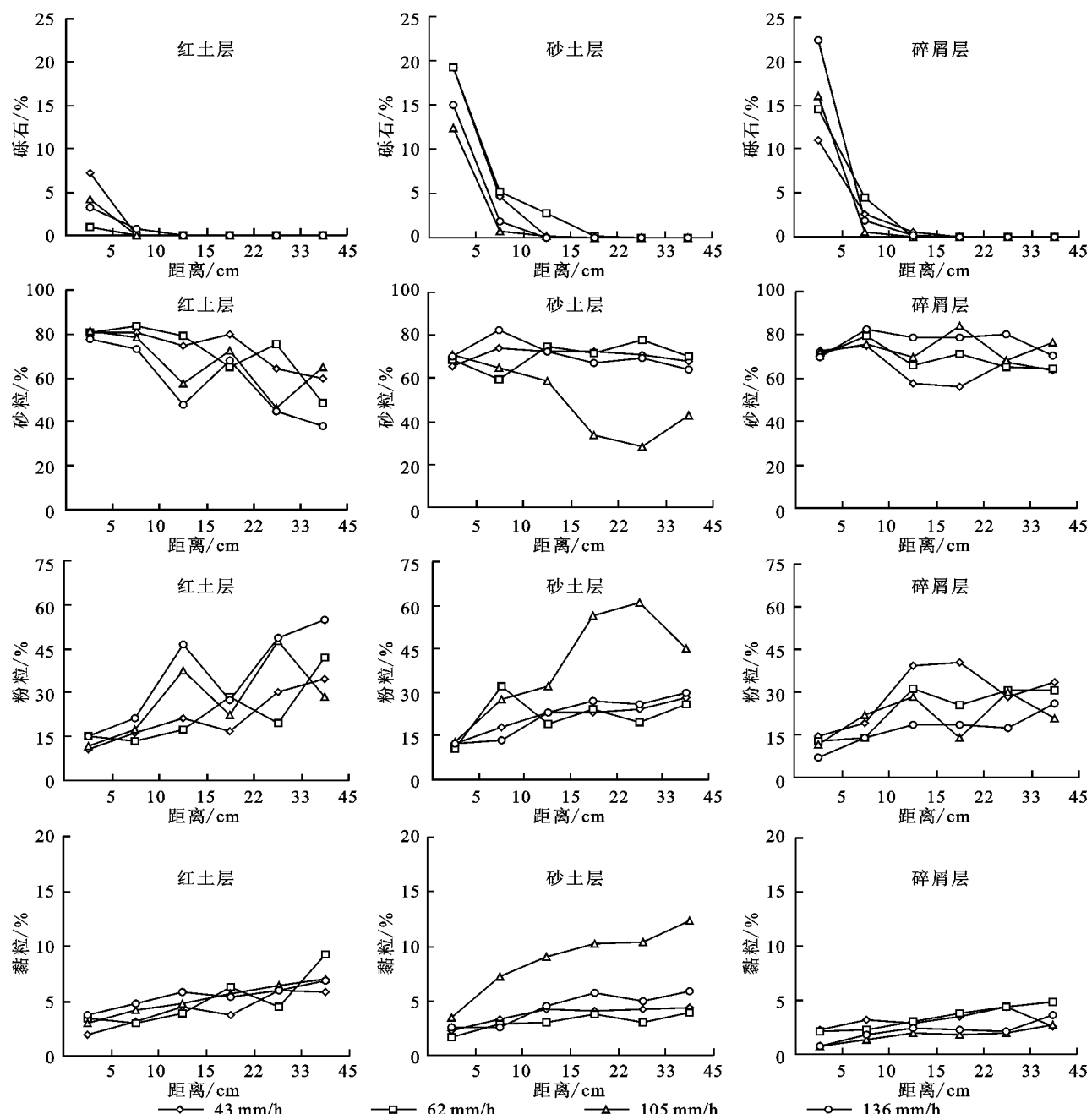


图 2 不同雨滴强度、不同溅蚀距离内溅蚀颗粒的百分含量

3 结论

(1) 崩壁3个土层的溅蚀土粒均主要分布在0~45 cm范围,集中在0~5 cm的溅蚀距离内,溅蚀量随溅蚀距离的增加而减少,溅蚀量 M 与溅蚀距离 r 呈现 $M=ar^{-b}$ 幂函数关系。溅蚀量随着雨滴强度的增加而增加,其中,红土层的溅蚀量随雨滴强度的变化率最大,碎屑层次之,砂土层最小。通过双因素方差分析可知,土壤特性对溅蚀量的影响大于雨滴强度。

(2) 溅蚀土粒中砂粒(0.05~2 mm)所占百分比最大。在崩壁3个土层的原状土壤中,砾石和粉粒含量很高,溅蚀土粒中的含量却不多;相反,原状土壤中砂粒的含量不高,在溅蚀土粒中的含量却最多;红土层原状土壤中,黏粒含量虽高,在溅蚀土粒中的含量却很少。由此可以推测出使溅蚀量达到最大的粒径范围。

(3) 崩壁3个土层中,随着雨滴强度的变化,溅蚀颗粒变化规律比较复杂。其中,随着溅蚀距离的增加,砾石的百分含量急速减少,而粉粒和黏粒的百分含量有增加的趋势。因此,溅蚀土粒中,砾石最不易被溅移,粉粒和黏粒最易被溅移。

参考文献:

- [1] 梁音,刘宪春,曹龙熹,等.中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布[J].中国水土保持,2013(10):35-40.
- [2] 牛德奎.华南红壤丘陵区崩岗发育的环境背景与侵蚀机理研究[D].南京:南京林业大学,2009.
- [3] 王秋霞,丁树文,赵欣,等.花岗岩风化土不同土层抗蚀性差异分析[J].水土保持研究,2015,22(3):6-9.
- [4] 吴志峰,邓南荣.崩岗侵蚀地貌与侵蚀过程[J].中国水土保持,1999(4):10-12.
- [5] Ma B, Liu Y, Liu X, et al. Soil splash detachment and its spatial distribution under corn and soybean cover[J].

Catena,2015,127:142-151.

- [6] 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[J].水土保持研究,2014,21(1):1-5.
- [7] 尹武君,王健,刘旦旦.地表水层厚度对雨滴击溅侵蚀的影响[J].灌溉排水学报,2011,30(4):115-117.
- [8] 吴普特,周佩华.地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究[J].水土保持通报,1993,13(3):1-5.
- [9] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2004,41(4):632-635.
- [10] 宋维秀,樊萍,魏国良.单雨滴降雨对结皮土壤溅蚀的影响[J].青海大学学报:自然科学版,2005,23(1):59-61.
- [11] 秦越,程金花,张洪江,等.雨滴对击溅侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,2014,28(2):74-78.
- [12] 赵晓光,吴发启.单雨滴击溅规律及其对溅蚀土粒的分选作用[J].水土保持学报,2001,15(1):43-45.
- [13] 程琴娟,蔡强国,胡霞.不同粒径黄绵土的溅蚀规律及表土结皮发育研究[J].土壤学报,2007,44(3):392-396.
- [14] 秦百顺,李占斌,刘海波.扰动土与原状土侵蚀产沙规律研究[J].水土保持通报,2013,33(5):78-81.
- [15] 高学田,包忠谟.降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J].水土保持学报,2001,15(3):24-26.
- [16] 林金石,庄雅婷,黄炎和,等.不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J].农业工程学报,2015,31(24):106-110.
- [17] Morgan R P C. Field studies of rain splash erosion[J]. Earth Surface Processes,1978,3(3):295-299.
- [18] 周一杨.典型黑土击溅侵蚀特征的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2009.
- [19] 程金花,秦越,张洪江,等.华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J].农业机械学报,2015,46(2):153-161.
- [20] Van Dijk A, Meesters A, Bruijnzeel L A. Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments[J]. Soil Science Society of America Journal,2002,66(5):1466-1474.

(上接第42页)

- [19] 陈涛.呼伦贝尔退化羊草草甸物种多样性及土壤理化性质的研究[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
- [20] 杨成德,龙瑞军,陈秀蓉,等.东祁连山高寒草甸土壤微生物量及其与土壤物理因子相关性特征[J].草业学报,2007,16(4):62-68.
- [21] 李绍良,康师安.内蒙古草原土壤退化进程及其评价指标的研究[J].土壤通报,1997,28(6):241-243.
- [22] 高超.东祁连山不同退化程度高寒草甸草原土壤有机质特性及其对草地生产力的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2007.
- [23] 石红霄,侯向阳,师尚礼,等.高山嵩草草甸初级生产力、多样性与土壤因子的关系[J].草业学报,2015,24

(10):40-47.

- [24] Pal D, Broadbent F E. Influence of moisture on rice straw decomposition in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975,39(1):59-63.
- [25] 徐跃,姚天全.气候因素对土壤有机质组成和性质的影响[J].山地研究,1994,12(3):163-168.
- [26] 王淑平,周广胜,吕育财,等.中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J].植物生态学报,2002,26(5):513-517.
- [27] 王长庭,龙瑞军,王启基,等.高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J].草业学报,2005,14(4):15-20.