

鄱阳湖流域3种典型母质发育红壤溅蚀特征

刘窑军¹, 杨广勇², 徐铭泽³, 汤崇军¹, 杨洁¹

(1. 江西省水土保持科学研究院, 南昌 330029;

2. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 3. 江西农业大学园林与艺术学院, 南昌 330045)

摘要: 为了研究鄱阳湖流域3种典型母质对土壤溅蚀的影响, 设计一种可收集过程样的溅蚀盘, 通过室内模拟降雨试验, 分析不同降雨强度(30, 60, 90, 120, 150 mm/h)和母质(第四纪沉积物母质、花岗岩母质、红砂岩母质)条件下红壤溅蚀特征。结果表明: 第四纪沉积物母质红壤总溅蚀量最低, 其次是花岗岩母质红壤, 红砂岩母质红壤总溅蚀量最高, 土壤质地、有机质、游离氧化铁等指标对总溅蚀量影响较大; 随着雨强的增大, 总溅蚀量呈对数函数关系增加; 总溅蚀量80%以上分布在0—15 cm范围内, 随着雨强增大, 溅蚀颗粒分布越集中。

关键词: 土壤母质; 红壤; 溅蚀; 模拟降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0055-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.009

Splash Erosion Features of Three Red Soils in Poyang Lake Basin

LIU Yaojun¹, YANG Guangyong², XU Mingze³, TANG Chongjun¹, YANG Jie¹

(1. Jiangxi Provincial Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029; 2. Soil and Water Research Center of Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070; 3. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045)

Abstract: A process-collectable splash erosion plate was designed to analyze the impacts of parent materials on splash erosion in the Poyang lake basin. The simulated rainfall experiments were conducted with five rainfall intensities (30, 60, 90, 120, 150 mm/h) in this paper. The splash erosion features of red soils were studied under different parent materials including quaternary sediments (SQ), granite (SG) and red sandstone (SR), respectively. The results showed that the total splash erosion differed significantly between parent materials. SR was more sensitive to the rain drop and generated the highest splash erosion, but the value of SQ was the lowest. Soil texture, organic matter and free iron oxide were more effective to the splash erosion. The total splash erosion increased logarithmically with the increased rainfall intensities. Over 80% of the splash sediments were distributed within the distance of 15 cm, the more concentratedly with the higher rainfall intensities.

Keywords: parent material; red soil; splash erosion; rainfall simulation

土壤溅蚀是土壤侵蚀过程的开始, 雨滴击溅作用将粗颗粒破碎分散成细颗粒, 分散后的细小颗粒被雨滴击溅起从而发生短距离搬运, 是坡面水蚀的一个重要过程^[1-4]。雨滴击溅形成的细小颗粒为径流侵蚀提供了丰富的可蚀性物质^[5]。国内外学者对溅蚀的影响因素做了多方面的研究, 土壤颗粒组成对土壤侵蚀过程有重要的影响^[6-8], 郝好鑫等^[8]研究表明, 土壤颗粒级配对土壤溅蚀特征起主导作用; Hairsine等^[9]、Asadi等^[10]试验结果指出, 土壤颗粒运动形式及输移

距离与土壤颗粒自身性质有关, 特别是颗粒大小及其密度。雨滴击溅是一个雨滴做功的过程, Asadi等^[11]认为, 只要有足够大的雨滴动能, 即便土壤大团聚体也能被破碎搬运, 降雨动能决定泥沙的颗粒分布; Wei等^[5]研究表明, 雨滴动能与溅蚀量有良好的幂函数关系; 蔡强国等^[6]研究表明, 溅蚀量与雨滴直径有明显的线性关系; 高学田等^[12]研究表明, 溅蚀量与降雨强度之间存在很好的回归关系; 塔娜等^[13]、赵龙山等^[14]还针对地表微地形等因子开展溅蚀特征研究。

收稿日期: 2018-08-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(41877084, 41501287, 41501289); 江西省水利科技项目(KT201417, KT201522); 中国博士后科学基金项目(2018M632597)

第一作者: 刘窑军(1986—), 男, 江西吉安人, 博士, 工程师, 主要从事红壤坡面水文过程研究。E-mail: liuyj461@163.com

通信作者: 汤崇军(1976—), 男, 江西崇义人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事红壤水土流失综合治理研究。E-mail: tangchongjun@126.com

分析现有研究发现,学者更多关注的是溅蚀的影响因素和不同颗粒组成被溅蚀的难易程度,而对溅蚀颗粒的迁移规律关注并不多,颗粒迁移直接关系雨滴击溅搬运过程,是侵蚀初期一个重要的泥沙搬运形式。

鄱阳湖流域是南方红壤的中心区域,其中花岗岩、红砂岩和第四纪沉积物 3 种母质广泛分布,不同母质发育的土壤性质差异很大,侵蚀特征也明显不同。为进一步分析母质差异对溅蚀特征及溅蚀颗粒的迁移规律的影响,本文以花岗岩、红砂岩、第四纪沉积物 3 种典型土壤为试验土壤,结合区域气候条件,开展不同降雨强度的模拟试验,研究结果有助于深入了解溅蚀的发生过程及其机理,为南方红壤区溅蚀模型建立提供基础,还可为 3 种母质发育红壤的水土流失治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样点概况

结合土壤母质分布特征及野外前期调查,选择土壤采集样地。第四纪沉积物发育红壤(quaternary sediments weather red soil,简称 SQ)采集地位于鄱阳湖区的德安县江西水土保持生态科技园,土地利用为柑橘园;花岗岩发育红壤(granite weathered red soil,简称 SG)采集自赣南地区的宁都县小洋小流域,土地利用为脐橙园;红砂岩发育红壤(red sandstone weathered red soil,简称 SR)采集自赣南地区的宁都县还安小流域,土地利用为脐橙园。所选样地均为该种母质主要的土地利用方式,土壤容重 $1.13 \sim 1.32 \text{ g/cm}^3$ 。野外土壤样品于 2017 年 6 月进行采集,采样时,清除地表杂物,多点采样混合后,带回实验室风干,过 2 mm 筛装袋备用。

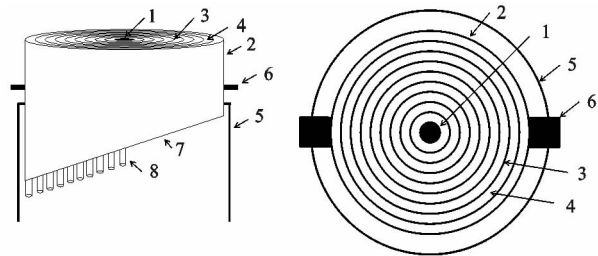
1.2 土壤理化性质测定

为了分析土壤基本理化性质对溅蚀的影响,将试验用土进行室内分析:土壤质地采用吸管法测定;土壤水稳性团聚体采用湿筛法测定;土壤 pH 采用电极法测定;全氮含量采用高氯酸—浓硫酸消煮—凯氏定氮法测定;全磷含量采用高氯酸—浓硫酸消煮—钼锑抗比色法测定;有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法测定;游离氧化铁采用 ICP 测定^[15]。

1.3 溅蚀盘设计

为有效收集溅蚀过程中,不同溅蚀距离土壤溅蚀量,设计了一种可收集过程样的土壤溅蚀盘^[16],溅蚀盘的设计见图 1。整个溅蚀盘由 2 个主体部分构成,上部为溅蚀盘,下部为支撑装置。上部溅蚀盘由 10 个同心圆柱组成,同心圆柱材质为亚克力透明管,管壁厚为 3 mm,每个同心圆柱等间距为 3 cm,10 个同心圆柱按直径由小到大依次胶粘在一块倾斜角度为

45°的椭圆底板上,相邻 2 个同心圆柱之间形成间距为 3 cm 的环形空间用于收集溅蚀土壤。降雨和溅蚀土壤颗粒落入环形空间,在倾斜底板作用下汇集,在汇集处开 1 个导水孔,导水孔外接 1 根塑料软管,通过软管将降雨和溅蚀土壤颗粒导入收集瓶中,每个环形空间均设置导水孔、外接软管和收集瓶。所有同心圆柱胶粘在圆底板上之后,将顶部截平。中心圆柱用来存放溅蚀试验用土样,其直径 10 cm,底部放置直径约 2 cm 的粗砾石,便于降雨自由入渗防止积水。下部支撑装置为半径 40 cm(大于最大圆心土柱半径)、高 50 cm 的亚克力透明圆管,圆管顶部用一个圆环与溅蚀盘胶结在一起,形成的下部防水空间用于放置收集瓶,收集瓶容积为 2 L。



注:1 为圆心土柱;2 为外柱;3 为同心圆柱;4 为同心圆环;5 为支撑圆管;6 为提手;7 为 45°倾斜底板;8 为导水管。

图 1 溅蚀盘结构示意图

1.4 模拟降雨

模拟降雨试验于 2017 年 7—8 月在江西省德安县江西水土保持生态科技示范园内的降雨大厅进行,降雨设备为西安清远测控技术有限公司生产的 QYJY-503T 型降雨器,下喷式喷头,降雨有效高度为 18 m,降雨强度可连续变化范围为 $10 \sim 200 \text{ mm/h}$,降雨均匀度 > 0.80 ,降雨强度变化响应时间 $< 30 \text{ s}$ 。根据野外采样点土壤容重资料,试验过程中,按照容重 1.20 g/m^3 将试验土壤填入溅蚀盘圆心土柱中,自然风干土壤水分含量为 $(5.2 \pm 0.8)\%$ 。为了研究南方红壤区不同降雨强度条件下土壤溅蚀特征,试验设置降雨强度梯度为 30, 60, 90, 120, 150 mm/h,考虑溅蚀发生发育特点,降雨历时设置为 30 min,每个处理降雨重复 3 次取均值。

降雨过程中,将导水管置于收集瓶中,收集降雨过程中不同溅蚀距离的水沙样,降雨结束之后,用细嘴喷壶将相对应的同心圆环内的泥沙颗粒全部洗入收集瓶中,带回实验室过滤,烘干,称重,计算不同溅蚀距离土壤溅蚀量(splashed sediment of i'th distance,简称 SS_i , g)和总溅蚀量(total splashed sediment,简称 SS_t , g);

$$SS_t = \sum_{i=1}^n SS_i$$

式中: n 为次降雨下总的收集数量。

1.5 数据分析

采用 SPSS 18.0 和 Excel 软件对试验数据进行

检测分析,不同处理间总溅蚀量采用单因素方差分析计算统计性差异($p<0.05$),采用主成分分析法分析土壤理化性质与溅蚀量之间的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤性质

从表 1 可以看出,SQ 为粉质壤土,土壤颗粒分布主

要集中在粉粒(561.3 g/kg),尤其是细粉粒含量(362.4 g/kg),黏粒含量在 3 种母质土壤中最高,为 191.93 g/kg。SG 为砂质壤土,其中砂粒含量 725.43 g/kg,且以粗砂为主(486.57 g/kg),粉粒含量为 120.03 g/kg。SR 为壤质砂土,其中砂粒含量在 3 种母质中最高,为 762.65 g/kg,黏粒含量最低,为 6.24 g/kg。

表 1 试验土壤基本理化性质

母质类型	粗砂粒/ (g·kg ⁻¹)	细砂粒/ (g·kg ⁻¹)	粗粉粒/ (g·kg ⁻¹)	细粉粒/ (g·kg ⁻¹)	黏粒/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	CEC/ (mol·kg ⁻¹)	pH	游离氧化铁/ (mg·kg ⁻¹)
SQ	75.13±21.81c	171.69±39.68c	198.88±7.31a	362.37±12.41a	191.93±29.08a	11.04±1.64a	0.88±0.06a	0.17±0.06a	19.34±3.32a	4.29±0.14b	41.16±6.04a
SG	486.57±22.62a	238.86±18.74b	43.52±11.66c	76.51±6.90c	154.54±29.0b	5.29±0.97c	0.37±0.08c	0.12±0.03b	11.91±0.96b	4.65±2.91a	13.84±1.98c
SR	334.46±31.04b	428.19±45.20a	101.36±18.37b	129.75±21.40b	6.24±2.81c	6.11±0.32b	0.49±0.02b	0.08±0.02c	13.07±1.26c	4.72±0.22a	21.92±2.45b

注:粗砂粒粒径为 200~2 000 μm,细砂粒粒径为 50~200 μm,粗粉粒粒径为 20~50 μm,细粉粒粒径为 2~20 μm,黏粒粒径为 0~2 μm。表中数据为平均值±标准差;同列不同字母之间表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

由表 1 还可看出,3 种土壤母质均为酸性土壤,pH 分布区间为 4.29~4.72;有机质、全氮、全磷含量 SQ 均显著高于 SG 和 SR。受土壤质地及有机质的差异影响,红壤中 CEC 含量和游离氧化铁含量在不同母质中也存在显著差别,SQ 土壤 CEC 含量最高,为 19.34 mol/kg,其次为 SR 的 13.07 mol/kg 和 SG 的 11.91 mol/kg;相比 CEC,3 种母质游离氧化铁含量的差异更大,SQ 游离氧化铁含量分别是 SG 的 2.97 倍和 SR 的 1.88 倍。

2.2 土壤溅蚀量

3 种母质下土壤溅蚀量最高为 SR,溅蚀量为 4.06 g,显著高于 SG(3.29 g)和 SQ(3.24 g),不同雨强下,母质对溅蚀量有显著影响,且随雨强的增大而增加(表 2)。30 mm/h 雨强下,土壤溅蚀量最低为 SG 的 0.09 g,其次为 SR 0.11 g,SQ 最高为 0.25 g,随着雨强增加至 60 mm/h,土壤溅蚀量显著增加,尤其是 SR 增加 43 倍,其次 SG 增加 33 倍,最低的 SQ 也增加 14 倍,但随着雨强继续增大,增幅显著变缓,当雨强从 60 mm/h 增加至 150 mm/h,溅蚀量增加幅度最大的为 SG(56.7%),其次为 SQ(20.1%),SR 仅增长 13.1%。溅蚀量与降雨强度的关系符合对数函数关系(表 3),其中花岗岩与降雨强度的相关性显著大于其他 2 种母质土壤。

表 2 不同雨强下试验母质红壤溅蚀量

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	红壤溅蚀量/g		
	SQ	SG	SR
30	0.25±0.10Ac	0.09±0.07Bc	0.11±0.06Bc
60	3.58±0.47Bb	3.00±0.58Cb	4.74±0.78Ab
90	4.00±0.88Cab	4.30±0.59Bab	4.89±1.12Ab
120	4.06±0.39Cab	4.36±2.22Bab	5.22±0.97Aab
150	4.30±2.01Ca	4.70±0.69Ba	5.36±1.14Aa

注:多重比较中大写字母表示同一行之间比较结果差异显著($P<0.05$),小写字母表示同一列之间比较结果差异显著($p<0.05$)。

表 3 总溅蚀量与降雨强度的函数关系

土壤类型	方程式	决定系数 r^2
SQ	$SS_t = 3.135\ln(I) - 9.599$	0.802
SG	$SS_t = 2.434\ln(I) - 7.369$	0.834
SR	$SS_t = 2.889\ln(I) - 9.302$	0.929

2.3 溅蚀分布规律

为了进一步揭示不同母质影响下红壤溅蚀特征,按照距离远近收集溅蚀量,其结果见图 2~图 4。离中心土柱越近,溅蚀量越大,0—3 cm 区间溅蚀量占总溅蚀量的比重最大,且雨强越大,占比越高。SQ 土壤 0—3 cm 区间溅蚀量占总溅蚀量的比例为 30.13%~54.91%,SG 土壤为 34.95%~62.87%,SR 土壤为 36.77%~67.63%。

30~90 mm/h 降雨下,SQ 土壤 80%以上的溅蚀量分布在 0—15 cm 区间,120~150 mm/h 降雨下,80%溅蚀量分布区间缩小至 0—12 cm。SG 和 SR 则略有不同,30 mm/h 降雨下,SG 和 SR 土壤 80%溅蚀量集中分布在 0—9 cm 范围内,60~90 mm/h 降雨下,范围增加至 0—15 cm,至 150mm/h 降雨下降低至 0—9 cm 范围,呈现单峰变化趋势,而 SQ 表现为递减变化趋势。

不同雨强及母质条件下,溅蚀量与溅蚀距离的关系可以用幂函数递减关系表示,拟合系数随雨强增大而增加。由函数关系式中的系数项可知,随着雨强增大,递减越明显,粗颗粒母质土壤(SG 和 SR)随距离递减越严重,而细颗粒母质土壤(SQ)溅蚀量随距离递减幅度越缓慢。

2.4 土壤性质对溅蚀的影响

土壤不同指标之间关系复杂,部分指标之间相关性显著或者互相掩盖,因此运用主成分分析方法,将冗杂的土壤性质简化为几个综合性指标,指示不同土壤性质对溅蚀性的影响。由表 4 可知,前 3 个主成分

特征值均大于 1, 累计方差贡献率达到 88.375%, 满足主成分分析的要求。第 1 个主成分(F1)方差贡献率为 62.039%, 其中系数绝对值超过 0.8 的有 5 个, 即粗砂粒(-0.974)、细砂粒(-0.808)、粗粉粒(0.832)、细粉粒(0.878)和 CEC(0.903), 主要表征土壤质地特征, 粗颗粒含量越高, 溅蚀量越小, 溅蚀搬

运越困难; 第 2 个主成分(F2)和第 3 主成分(F3)方差贡献率分别为 14.887% 和 11.449%, 系数绝对值比较高的为黏粒(0.525)、有机质(0.514)、游离氧化铁(0.483)和 pH(0.662), 黏粒、有机质以及游离氧化铁都是影响土壤团聚体形成的重要指标^[17-19], 土壤团聚体含量越高, 抵抗雨滴溅蚀的能力越强^[7,20]。

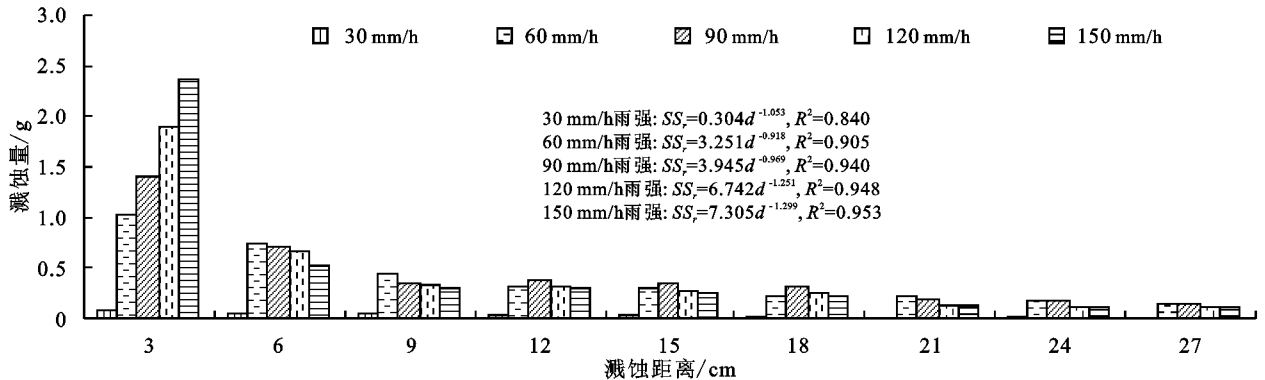


图 2 第四纪沉积物发育红壤溅蚀量随距离分布规律及溅蚀量与溅蚀距离的函数关系

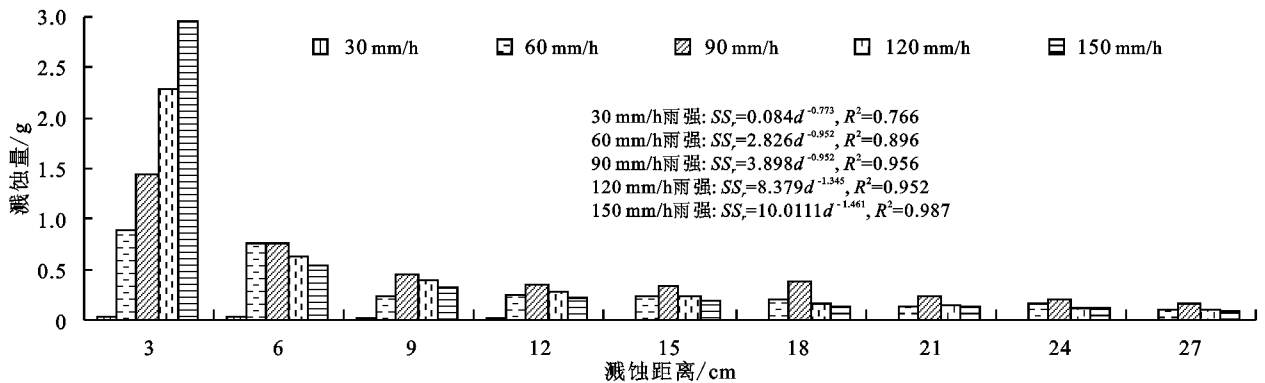


图 3 花岗岩发育红壤溅蚀量随距离分布规律及溅蚀量与溅蚀距离的函数关系

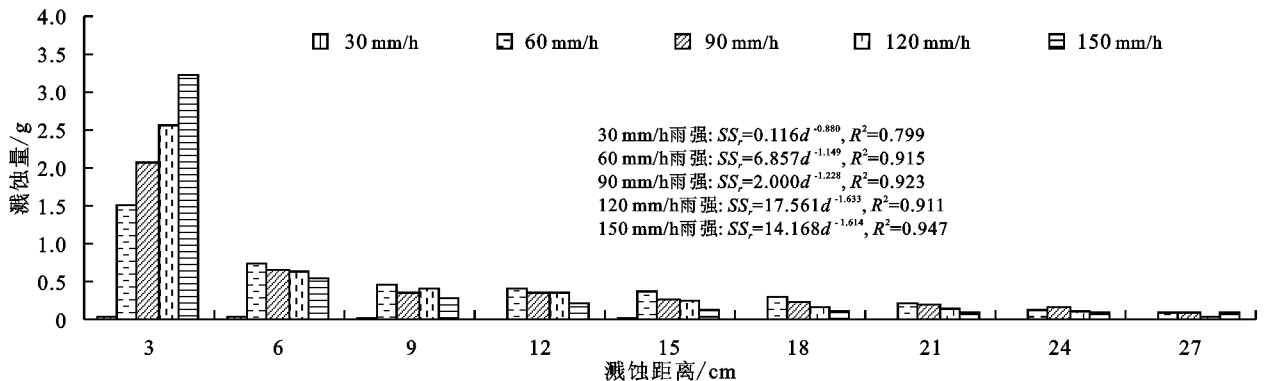


图 4 红砂岩发育红壤溅蚀量随距离分布规律及溅蚀量与溅蚀距离的函数关系

根据主成分分析结果, 由因子荷载矩阵和主成分特征值可计算得到得分系数矩阵, 根据得分系数的矩阵和各主成分的函数表达式以及各主成分特征值的比重, 计算 3 个主成分的综合得分(表 5), 综合得分越高, 表示土壤抗侵蚀能力越强。SQ 土壤的综合得分最高为 14.720, 而花岗岩(-3.056)和红砂岩(-3.013)两者之间得分接近, 这表明不同母质发育的 SQ 土壤的抗溅蚀能力最强, 结构性差和粗骨质的 SG 和 SR 土壤抗溅蚀能力较差。

3 讨论

雨滴击溅土壤表面的作用力使得表层土壤颗粒分离、溅散、跃起并离开原来的位置而产生位移, 雨滴直径和降雨动能受降雨强度的影响, 进而影响溅蚀过程^[6,21]。胡伟等^[21]研究显示, 总溅蚀量及其上下迁移分量均随降雨能量的增加而增大, 通过定量分析东北黑土各溅蚀分量、总溅蚀量、净溅蚀量与降雨能量的关系, 提出了溅蚀发生的降雨能量阈值, 发现雨滴溅蚀发生的临界能量为 3~6 J/(m²·mm)。当降雨

量较小时,降雨雨滴小,雨滴动能小,雨滴击溅能力有限,溅蚀颗粒迁移距离也近,当降雨强度增加,雨滴直径和雨滴动能增大,溅蚀量显著增加,且溅蚀迁移距离也大幅增加。本研究结果也表明,当降雨强度增加到 60 mm/h 时,溅蚀量显著增加。除了雨滴动能之外,地表产流状况也是溅蚀发生变化的一个重要因素,在地表产流发生之前,溅蚀率随降雨历时的增加而递增,产流之后逐渐减小并趋于稳定^[21],地表薄层水流一旦形成,雨滴击溅作用迅速减弱^[3]。本研究结果显示,随着雨强增大,溅蚀量并没有相应大幅增加,其主要原因是当降雨强度超过土壤入渗率时,降雨在地表积聚形成薄层水流,薄层水流消耗了雨滴动能,降低雨滴溅蚀量,并且溅蚀颗粒迁移距离也大幅减少。本文所用 3 种母质土壤中,SQ 土壤质地较黏重,土壤入渗能力差,且降雨过程中容易形成结皮,结皮和地表薄层水流的影响导致大雨强条件下溅蚀量比 SG 和 SR 更低,而粗骨性的 SG 和 SR 土壤,结皮和薄层水流影响较小,主要影响因子是土壤质地,由于容易被溅蚀的细颗粒含量低,随着降雨持续,地表颗粒粗化,溅蚀量降低^[22-26]。

表 4 主成分分析结果

土壤指标	主成分		
	F1	F2	F3
粗砂粒	-0.974	-0.019	-0.190
细砂粒	-0.808	-0.133	-0.008
粗粉粒	0.832	0.200	0.194
细粉粒	0.878	-0.217	0.405
黏粒	0.751	0.525	-0.349
全氮	0.769	0.447	-0.329
全磷	0.767	0.256	0.056
有机质	-0.628	0.514	0.391
CEC	0.903	0.059	-0.006
游离氧化铁	0.728	-0.214	0.483
pH	-0.475	0.662	0.459
特征值 λ	5.584	1.340	1.030
贡献率/%	62.039	14.887	11.449
累计贡献率/%	62.039	76.926	88.375

表 5 不同母质发育红壤土壤抗蚀性指标
主成分分析综合得分指数

土壤 类型	主成分得分			综合得分
	F1	F2	F3	
SQ	15.336	-2.932	34.358	14.720
SG	-5.521	6.966	-2.737	-3.056
SR	-5.601	-2.467	10.304	-3.013

4 结论

(1)第四纪沉积物母质发育红壤溅蚀量最低,其次是花岗岩发育红壤,红砂岩母质发育红壤溅蚀量最高;主成分分析结果表明,土壤质地、有机质、CEC 和游离氧化铁等指标对溅蚀影响较大。

(2)溅蚀颗粒主要集中分布在 0—3 cm 范围内,降雨强度越大,0—3 cm 范围溅蚀所占比重越高,80%以上的溅蚀颗粒都分布在 0—15 cm 范围内。

(3)总溅蚀量随降雨强度的增加呈对数函数增加,溅蚀量与溅蚀距离之间可用幂函数递减关系表示。

参考文献:

[1] Morgan R P C. Field studies of rain splasherosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2010,3(3):295-299.

[2] Van Dijk A, Meestess A, Bsuijnzeel L. Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments[J]. Soil Science Society of America Journal,2002,66:1466-1474.

[3] Kinnell P I A. Raindrop-impact- induced erosion processes and prediction: A review[J]. Hydrological Processes,2005,19(14):2815-2844.

[4] 罗亲普,刘文杰. 土壤溅蚀过程和研究方法综述[J]. 土壤通报,2012,43(1):230-235.

[5] Wei H, Zheng F L, Bian F. The directional components of splash erosion at different raindrop kinetic energy in the Chinese Mollisol Region[J]. Soil Science Society of America Journal,2016,80:1329-1340.

[6] 蔡强国,陈浩. 降雨特性对溅蚀影响的初步试验研究[J]. 中国水土保持,1986,6:32-35.

[7] 倪世民,杨伟,王杰,等. 不同类型土壤团聚体斥水性及其对溅蚀的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(1):167-173.

[8] 郝好鑫,马仁明,占海歌,等. 不同粒径红壤团聚体坡面溅蚀特征[J]. 水土保持学报,2017,31(1):37-42.

[9] Hairsine PB, Rose CW. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles. I. Sheet flow[J]. Water Resource Research,1992,28:237-243.

[10] Asadi H, Moussavi A, Ghadiri H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment[J]. Journal of Hydrology,2011,406:73-81.

[11] Asadi H, Ghadiri H, Rose CW, et al. An investigation of flow-driven soil erosion processes at low stream powers[J]. Journal of Hydrology,2007,342:134-142.

[12] 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.

[13] 塔娜,王健,张慧荟,等. 黄土耕作坡面溅蚀过程中微地形响应特征[J]. 水土保持通报,2016,36(1):110-114.

[14] 赵龙山,梁心蓝,张青峰,等. 裸地雨滴溅蚀对坡面微地形的影响与变化特征[J]. 农业工程学报,2012,28(19):71-77.

[15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.

[16] 刘窑军. 一种可收集过程样的溅蚀盘:中国,201621287373. 2[P]. 2016-11-29.

[17] 黄义端,田积堂,雍绍萍. 土壤内在性质对侵蚀影响的研究[J]. 水土保持学报,1989,3(3):9-14.

型和水保措施小区的主导降雨类型,占各径流小区侵蚀性降雨场次的50%以上,且该类降雨也是黄壤和红壤各小区坡面产流产沙以及紫色土各小区产流的主导雨型,应重点防范。此外,中雨强、长历时、高雨量的降雨是引起各小区单次降雨径流泥沙流失量最大的雨型,也应引起重视。

参考文献:

- [1] 宋江平,李忠武,刘春,等. 湘北红壤低山丘陵区典型水土流失治理模式径流泥沙效应[J]. 水土保持学报, 2018,32(1):32-38.
- [2] 史志华,王玲,刘前进,等. 土壤侵蚀:从综合治理到生态调控[J]. 中国科学院院刊,2018,33(2):198-205.
- [3] 湛芸,何丙辉,赵秀兰,等. 小江流域农地水土流失对水体富营养化的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(4):32-43.
- [4] 江森华,谢锦升,王维明,等. 闽北不同土地利用方式与不同降雨强度对水土流失的影响[J]. 中国水土保持科学,2012,10(4):84-89.
- [5] 杨学震,钟炳林,谢小东,等. 丘陵红壤的土壤侵蚀与治理[M]. 北京:中国农业出版社,2005:23-52.
- [6] 胥哲明,杨晓明. 降雨特征因子与坡面土壤侵蚀关系分析[J]. 宁夏农林科技,2011,52(10):92-94.
- [7] 王改玲,王青杵,石生新. 晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(1):1-5.
- [8] 余长洪,李就好,陈凯,等. 砖红壤区降雨因子对产流产沙的影响[J]. 水土保持研究,2015,22(1):17-20.
- [9] 郭新送,宋付朋,高杨,等. 模拟降雨下3种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应[J]. 水土保持学报,2014,28(3):23-26.
- [10] 徐铭泽,杨洁,刘窑军,等. 不同母质红壤坡面产流产沙特征比较[J]. 水土保持学报,2018,32(2):34-39.
- [11] 卜建霞,叶功富,尤龙辉,等. 福建省长汀县不同土地利用方式降雨产流产沙特征[J]. 水土保持研究,2017,24(4):1-5.
- [12] 马琦,王琦. 几种草被植物的水土保持效应研究[J]. 草业学报,2005,22(10):72-74.

(上接第59页)

- [18] 范荣生,李占斌. 坡地降雨溅蚀及输沙模型[J]. 水利学报,1993,6:24-29.
- [19] 汤立群. 坡面降雨溅蚀及其模拟[J]. 水科学进展, 1995,6(4):304-310.
- [20] 马仁明,王军光,李朝霞,等. 降雨过程中红壤团聚体粒径变化对溅蚀的影响[J]. 长江流域资源与环境,2013, 22(6):779-785.
- [21] 胡伟,郑粉莉,边锋. 降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J]. 生态学报,2016,36(15):4708-4717.
- [22] 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.

- [13] 张文源,王百田,杨光敏,等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J]. 生态环境学报,2014,23(11): 1776-1782.
- [14] 杜波,唐丽霞,潘佑静,等. 贵州喀斯特地区侵蚀性次降雨产流产沙特征研究[J]. 西南林业大学学报,2016,36(5):111-117.
- [15] 李林育,王志杰,焦菊英. 紫色丘陵区侵蚀性降雨与降雨侵蚀力特征[J]. 中国水土保持科学,2013,11(1):8-17.
- [16] 郑海金,杨洁,左长清,等. 红壤坡地侵蚀性降雨及降雨动能分析[J]. 水土保持研究,2009,16(3):30-33.
- [17] 谢红霞,邝美娟,隋兵,等. 湖南省近50年侵蚀性降雨及降雨侵蚀力特征研究[J]. 南阳理工学院学报,2012, 4(4):108-113.
- [18] 马星,郑江坤,王文武,等. 不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J]. 水土保持学报,2017,31(2):17-21.
- [19] 王小博,朱永清,吴宜进,等. 不同植被下降雨类型对红壤坡地土壤侵蚀特征的影响[J]. 水土保持研究,2017, 24(2):6-11.
- [20] 王万忠,焦菊英,郝小品,等. 中国降雨侵蚀力R值的计算与分布(D)[J]. 水土保持学报,1995,9(4):5-18.
- [21] Fang N F, Shi G H, Li I, et al. The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed[J]. Catena, 2012, 99(12):1-8.
- [22] 秦伟,左长清,晏清洪,等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报,2015,31(2):124-132.
- [23] 湖南省农业厅. 湖南土壤[M]. 北京:农业出版社, 1989:247-248.
- [24] 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.
- [25] 尹先平,周运超,罗明,等. 赣江源区主要土壤抗蚀性能对比[J]. 中国水土保持科学,2010,8(2):8-14.
- [26] 戴金梅,查轩,黄少燕,等. 不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(3):33-38.

- [23] Leguédais S, Bissonnais Y. Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2004,29(9):1117-1129.
- [24] 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.
- [25] Legout C, Leguédais S, Bissonnais Y, Le, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. Geoderma,2005,124(3):279-292.
- [26] Fu Y, Li G L, Zheng T H, et al. Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action[J]. Catena,2017,150:154-160.