

间歇降雨对红壤坡面土壤侵蚀特征的影响

李霞^{1,2}, 金鑫^{1,2}, 谢斯琴³, 宋颖¹, 王春振¹, 赵华荣^{1,2}, 汤珊珊¹

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心,

广西 桂林 541004; 3. 广西壮族自治区区域地质调查研究院, 广西 桂林 541003)

摘要: 自然条件下降雨多以间歇形式出现, 而坡面土壤侵蚀又是一个渐变发育的复杂过程。通过 3 个雨强 (60, 90, 120 mm/h)、5 个坡度 (5°, 10°, 15°, 20°, 25°) 下的 15 场室内模拟降雨, 研究一、二次降雨条件下不同雨强、坡度及降雨量对红壤坡面径流和侵蚀过程的影响, 探讨间歇降雨条件下坡面侵蚀发育过程及其主要影响因素的变化。结果表明: (1) 二次降雨的产流时间相比一次降雨均提前, 一次降雨径流总量受到雨强、坡度和降雨量的共同影响, 15° 坡度是径流总量变化的一个转折点, 二次降雨时降雨量的作用减弱, 各雨强下的最大相差倍数减小, 各坡度之间的倍数差距也减小。 (2) 一次降雨发生细沟侵蚀最主要的动力是降雨强度, 大雨强、陡坡情况下细沟侵蚀更容易产生, 而 15° 坡度对细沟侵蚀的产生具有重要作用, 此时若发生细沟侵蚀, 坡面侵蚀则多以细沟侵蚀为主, 二者侵蚀量呈正比例函数关系, 二次降雨的细沟侵蚀量和一次降雨过程中细沟发育情况相关, 一次降雨的细沟发育越剧烈, 二次降雨的细沟侵蚀量越少, 此时细沟侵蚀量和总侵蚀量呈一次函数关系。总体来说, 侵蚀总量的变化和细沟发育所处阶段紧密相关。 (3) 间歇降雨条件下, 不同雨强、坡度、降雨量对坡面土壤径流和侵蚀过程的影响存在差异; 同时, 一次降雨土壤径流和侵蚀的变化对后期二次降雨径流和侵蚀的发展具有重要影响, 使得在不同土壤侵蚀发展阶段, 雨强、坡度、降雨量等因子对坡面土壤径流和侵蚀影响的程度也随之改变。

关键词: 间歇性降雨; 坡度; 雨强; 细沟侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0096-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.01.014

Slope Erosion and Its Changes in Red Soil Under Intermittent Rainfall

LI Xia^{1,2}, JIN Xin^{1,2}, XIE Siqin³, SONG Ying¹,

WANG Chunzhen¹, ZHAO Huarong^{1,2}, TANG Shanshan¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology,

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2. Guangxi Collaborative Innovation

Center of Water Pollution Control and Water Security in Karst Area, Guilin University of Technology,

Guilin, Guangxi 541004; 3. Guangxi Institute of Regional Geological Survey, Guilin, Guangxi 541003)

Abstract: Under natural conditions, rainfall mostly occurs intermittently, and slope soil erosion is a gradual and complex process. Through 15 indoor simulated rainfall experiments, including three rain intensities (60, 90, 120 mm/h) and five slopes (5°, 10°, 15°, 20°, 25°), the runoff and erosion process were studied under the conditions of primary and secondary rainfall. The slope erosion development process and the changes of main influencing factors under intermittent rainfall conditions were discussed. The results showed that: (1) The runoff time of the second rainfall was earlier than that of the first rainfall. The total runoff of the first rainfall was affected by rain intensity, slope, and rainfall. The slope of 15° was a turning point for the change of the total runoff. The effect of rainfall was weakened during a single rainfall, the maximum difference multiple under each rainfall intensity was reduced, and the multiple gap between the slopes was also reduced. (2) The main driving force for rill erosion in a single rainfall was the rainfall intensity. Rill erosion was more likely to occur in the case of steep slopes, and the 15° slope was of great significance to the generation of rill erosion. At this time, if rill erosion occurred, the slope erosion was mostly dominated by rill

收稿日期: 2020-08-11

资助项目: 国家自然科学基金项目 (51369009); 广西自然科学基金项目 (2016GXNSFAA380116)

第一作者: 李霞 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文物理规律研究。E-mail: glli18@163.com

通信作者: 宋颖 (1970—), 女, 硕士, 高级实验师, 主要从事水文过程实验及研究。E-mail: 402355505@qq.com

erosion, and both erosion showed a positive proportional function relationship. The amount of rill erosion caused by the secondary rainfall was related to the development of the rill during the primary rainfall. The more intense the rill development of the primary rainfall, the less the amount of rill erosion caused by the secondary rainfall. The amount of rill erosion had a linear function relationship with the total erosion amount. In general, the change in the total erosion amount was closely related to the stage of rill development. (3) Under intermittent rainfall conditions, there were differences in the influences of different rainfall intensity, slope, and rainfall on the slope soil runoff. At the same time, the change of soil runoff and erosion in the primary rainfall had an important impact on the development of secondary rainfall runoff and erosion in the later period, so that at different stages of soil erosion development, the influencing extent of rain intensity, slope, rainfall and other factors on the slope soil runoff and erosion also changed accordingly.

Keywords: intermittent rainfall; slope; rain intensity; rill erosion

土壤侵蚀是土地退化的主导因素之一^[1],并会造成或引起其他的环境问题^[2]。而其又受许多因素的共同影响,如降雨特征,雨强^[3]、雨量^[4]、时长^[5]、雨型^[6]、移动方向^[7]等,同时还受到坡度^[8]、覆盖条件^[9]、耕作方式^[10]等下垫面条件的影响。此外,土壤水物理性质^[11]决定土壤的抗蚀性和抗冲性,同时也对土壤径流和侵蚀产生影响。在实际侵蚀过程中,以上多种因子的影响同时存在,使得土壤侵蚀的研究较为复杂和困难。在这些影响土壤侵蚀的因子中,降雨强度、坡度及降雨量被认为是响应坡面水文过程的3个主要参数,学者们^[12]通过大量的模拟试验和数值分析展开了研究。

坡面上形成细小沟道后,径流对细沟沟壁、沟底、沟头土壤的分散、冲刷和搬运过程即称为细沟侵蚀^[13]。它是水流面蚀中侵蚀强度最剧烈的侵蚀方式,它的发生往往标志着土壤侵蚀逐步向沟蚀发展^[14]。已有研究^[15]表明,细沟的发育程度对侵蚀有重要影响,细沟形成后土壤侵蚀量会显著增加,而水流的侵蚀力与坡面土壤的抗蚀性是影响细沟发生的两大因素。坡面跌水和细沟的发育速度及侵蚀速率均随坡度和雨强的增加而增大^[16]。已有学者^[17]对坡面细沟侵蚀过程进行了研究,结果表明,细沟侵蚀中存在临界流量、临界流速、临界剪切力和临界地形因子等。面蚀—细沟发育—细沟稳定是坡面次降雨条件下的侵蚀过程,面蚀量占侵蚀总量30%左右,细沟侵蚀量占70%左右^[18]。

降雨间歇时间在6 h以上或连续6 h降雨量不足1.2 mm,则视为二次降雨事件,否则看作一次降雨事件^[19]。降雨入渗事件中积水发生时间不仅与雨强和表层5 cm初始土壤含水量密切相关,还受降雨间歇时间影响^[20]。间歇降雨条件下,2次降雨期间的累积径流量均随降雨历时的延长呈近似线性增加,湿润锋也随降雨时间的延长而增加^[21]。第2次降雨的稳定产流强度、径流量和侵蚀泥沙量均大于第1

次降雨,初始产流时间和产流强度达到稳定的时间也比第1次降雨提前^[22]。供试土壤为黄土时,3次降雨的初始含水率不同,但产流规律相似,降雨径流率均为先增大后趋于平稳,第1次降雨的泥沙量远高于第2,3次,泥沙率先迅速增大到峰值后缓慢减少,平均泥沙率随降雨次数的增多而递减^[23]。而红壤在降雨特征相同条件下,3次降雨的总径流量无明显差异,但第3次降雨形成的产沙量分别是第1,2次的7.0,2.2倍^[24]。

中国南方红壤总面积为 $2.18 \times 10^6 \text{ km}^2$,约占国土面积的22%,该地区气候温暖,雨量充沛,降雨通常强度高,持续时间长,暴雨频繁^[25];且华南红壤区本身具有的土壤深度浅、坡度陡、土壤质地不均衡、气温高、降雨量多、土地集约利用率高条件^[26],使得南方红壤区土壤退化和侵蚀的研究受到越来越多的关注。红壤区已有研究^[27-33]表明,产流时间随雨强和坡度的增大均提前;随坡度的增加有所提前但不明显,主要受降雨强度的控制;坡面径流量、侵蚀产沙量均随着雨强的增大而线性增大;径流系数大小随坡度增加而增加;坡度对径流量的贡献率在60%以上,坡度对产沙量贡献率则保持在30%左右;坡度对侵蚀产沙量影响存在着临界坡度,其值变化于 $20^\circ \sim 25^\circ$;雨量通过改变雨强产生一定的间接影响。

虽然有关红壤区降雨强度、坡度及降雨量等因素对土壤侵蚀的影响已经有不少的研究成果,但由于初始试验条件的不同,其结果存在一定的差异。而且这些研究多是基于一次降雨的试验,但在实际自然降雨过程中,降雨多以间断性降雨形式出现。对于间断性降雨,前人^[20-23]的研究多集中在黄土,且以研究降雨过程中的溶质、养分运移为主,有关红壤在间歇降雨条件降雨强度、坡度及降雨量等因素对坡面径流和侵蚀变化的研究还较为缺乏,且对降雨过程中坡面细沟侵蚀的情况也鲜有探究。此外,土壤侵蚀是一个渐变的复杂过程,每场降雨对土壤侵蚀产生的影响是一个

递进而不是孤立的过程,在已有一次降雨的坡面上进行二次降雨,通过对一、二次降雨条件下土壤径流、侵蚀的对比分析,既有利于了解间歇降雨过程中不同影响因子对土壤径流、侵蚀发展变化的影响,也能清楚在不同侵蚀发育阶段,各侵蚀因子对土壤侵蚀影响强弱的变化及其原因,对深化研究土壤侵蚀过程及其过程中影响因子变化具有重要意义。故本文通过设置具有代表性的 3 个雨强(60,90,120 mm/h)、5 个坡度(5°,10°,15°,20°,25°)下间隔 24 h 的 1,2 场降雨试验,深入探究一次降雨和二次降雨条件下雨强、坡度、降雨量对坡面径流和侵蚀,以及侵蚀过程中细沟侵蚀发育的影响及其变化,期望能为深化红壤坡面侵蚀研究提供一定的基础资料。

1 试验设计与研究方法

1.1 试验设计

本试验在桂林理工大学降雨实验大厅进行。试验采用人工模拟坡面降雨,降雨装置由土槽与人工模拟降雨器 2 个部分组成,土槽为钢质,尺寸长×宽×高为 4 m×1.2 m×0.8 m,土槽坡度可以自动调节,变化范围为 0~30°,土槽尾部设有出水口,用来收集坡面径流;人工模拟降雨器为全自动不锈钢模拟降雨器,配有旋转下喷式喷头,为带压力垂直下喷式降雨,喷头距土槽的高度为 6 m,滤纸色斑法测定雨滴的中值粒径及降雨动能与自然降雨条件较为接近^[34]。根据红壤区坡耕地地形特点,采用 5°,10°,15°,20°,25°共 5 个坡度,60,90,120 mm/h 共 3 个雨强,组合进行 15 场降雨。每次降雨分为 2 场,降雨强度均保持不变,降雨强度为 90,120 mm/h 时降雨时间总共为 1 h,每次降雨历时 30 min。60 mm/h 时的降雨强度较小,为了减弱降雨量对坡面径流侵蚀差异的影响,总降雨时间设置为 2 h,2 次降雨历时均为 1 h。每次降雨前后对坡面进行扫描,并人工量取细沟(指平均沟宽 2~15 cm 细沟,深度 0.5~10 cm 内的沟)的长宽深,静置 24 h 后进行第 2 场降雨,结束后对坡面进行扫描并对细沟进行人工测量。

1.2 试验过程

试验用土取自桂林市雁山镇,桂林地处南岭山系的西南部,属红壤土带,依其成土的母质可分为红土壤、石灰土、紫色土、冲击土、水稻土 5 个土类。试验用土为第四纪红黏土母质发育而成的典型红壤土,呈弱酸性,其黏粒含量为 35.53%,粉粒含量为 51.42%,砂粒含量为 13.05%,土壤质地为粉砂质黏土。采集回来的土样风干后,过 1.2 cm 的筛去除土块和杂质,用于土槽填土。为保证试验土层的透水状况接近于天然坡面,先在土槽底部铺上 10 cm 细砂,并盖上透水纱布。在填土时,采用分层填土的方法,10 cm 为 1

层,边填土边压实。

正式开始降雨试验前 24 h 先进行预降雨,以保证各场次坡面含水率基本一致且拥有接近自然状态下的土壤水分分布,各场次试验平均初始含水率见表 1。降雨时,从降雨开始至有径流流出集流口的时间记为产流时间,径流产生后,用 1 000 mL 量筒根据实际产流及产沙情况每隔 1~4 min 在出水口采集样品,记录样品采集时间和体积,用精度为 0.01 g 的电子天平进行称重,并通过烘干法获得泥沙样品。同时采用径流测量系统对径流过程进行观测,该系统以容量为 1 L 的翻斗收集径流,并记录相应的采样时间,可详细监测整个径流过程。

表 1 初始含水率

单位: %

坡度/(°)	120 mm/h	90 mm/h	60 mm/h
5	37.51	35.94	39.66
10	39.83	31.51	37.16
15	38.92	38.52	34.92
20	39.33	39.67	36.50
25	38.13	38.46	37.73

每场降雨前后通过 Artec Eva 3D 扫描仪扫描坡面,其工作原理是基于白色结构光和通过数学算法而获取三维形状信息,免去了被数据化目标实物的预处理过程,且扫描速度快,以 16 帧/s 的速度获取三维数据,比三维激光扫描仪快 12 倍,扫描的同时数据处理以 288 000 点/s 的速度同步进行,分辨率高达 0.5 mm,精度高达 0.1 mm。同时,利用人工测量的方法,用标尺测量细沟的总长度,并每隔 5 cm 测量 1 个深度和宽度,用于校正扫描数据。

试验于 2016 年 8 月 26 日至 2017 年 1 月 18 日进行,每个组合重复 2 次,取平均值进行计算和分析。重复试验的产流时间和径流总量相对误差均在 10% 以内,细沟侵蚀量和总侵蚀量的相对误差均在 20% 以内。

2 结果与分析

2.1 间歇降雨条件下坡面径流的变化

2.1.1 间歇降雨条件下坡面产流时间的变化 由图 1 可知,一次降雨时,产流时间随雨强增大明显减小。60,90 mm/h 产流时间随坡度变化均先增加后减小,15°坡度时初始产流时间最长,120 mm/h 时各坡度之间产流时间差异缩小,无明显变化规律,表明当雨强较大时,坡度对产流时间的影响程度降低。二次降雨时,同坡度下,产流时间在 60,90 mm/h 时仍呈现随雨强增大而减小的趋势,但在 90,120 mm/h 时,以 15°为转折点,90 mm/h 的产流时间开始小于 120 mm/h;60,90 mm/h 产流时间随坡度变化先减小后增加,20°时初始产流时间最短;120 mm/h 时,各坡

度之间产流时间经历先减后增再减的过程,与 60, 90 mm/h 雨强时相反,20°时坡面初始产流时间最长。二次降雨与一次降雨相比,由于一次降雨提高了坡面土壤含水率,红壤黏粒吸水膨胀后使土壤裂隙较少,以及土壤表面产生的结皮,导致在二次降雨时,坡面入渗率减小,因此产流时间均提前,这与王辉等^[24]研究结果相同。但与一次降雨相比,二次降雨产流时间受坡度和雨强变化的影响更为复杂,这是因为二次降雨时,坡面已经发生细沟侵蚀,坡面由平整坡面转变为不平整坡面,影响产流的因素增加,不再是简单地受到雨强和坡度的影响,使得在图像上表现得相对交错复杂。

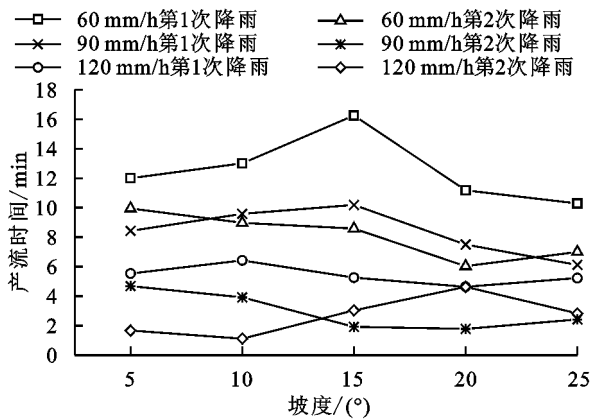


图 1 间歇降雨条件下产流时间

2.1.2 间歇降雨条件下径流总量的变化 由图 2 可知,一次降雨时,60, 90 mm/h 径流总量随坡度增长交错变化,且除 25°坡度外,其余 4 个坡度二者的径流总量差距较小;120 mm/h 时,径流总量随坡度变化不明显,10°时径流总量最少;各坡度下,120 mm/h 的径流总量分别为 60 mm/h 的 1.83, 1.13, 2.43, 1.44, 1.49 倍,90 mm/h 的 1.90, 1.55, 1.80, 1.67, 2.75 倍。90 mm/h 各坡度下径流总量分别为 60 mm/h 的 0.96, 0.73, 1.35, 0.86, 0.54 倍,而 60, 90, 120 mm/h 降雨强度下各场次降雨总量之比为 4 : 3 : 4,这表明在第 1 次降雨中,当降雨量相同时(60, 120 mm/h 相比较),雨强对径流总量的影响较大,且随坡度增加呈现先降后升再降又升的过程,在 10°时最小,15°时最大;当雨强较小而雨量多时(60, 90 mm/h 相比较),雨量对径流总量影响的作用凸显,随坡度增加先增强后减弱再增强,在 15°最弱,25°时最强;当雨强大雨量也多时(90, 120 mm/h 相比较),在雨强和雨量的共同作用下,其径流总量差距明显,随坡度增加经历 1 个先减后增再减又增的过程,15°时差距最小,25°时最大。

二次降雨时,60, 90 mm/h 径流总量仍随坡度增长交错变化,但二者差值缩小;120 mm/h 时,径流总量随坡度变化不明显,20°时径流总量最少;各坡度

下,120 mm/h 的径流总量分别为 60 mm/h 的 2.02, 1.60, 1.79, 1.32, 1.64 倍,90 mm/h 的 2.02, 1.74, 1.36, 1.32, 1.17 倍。90 mm/h 各坡度下径流总量分别为 60 mm/h 的 1.00, 0.92, 1.31, 1.00, 1.40 倍。与第 1 次降雨相比,二次降雨的降雨量相同时,雨强对径流总量的影响仍比较大,且相差最大倍数超过 2 倍,随坡度增加仍呈先降后升再降的过程,在 20°时最小,5°时最大;当雨强较小而雨量多时,二次降雨雨量对径流总量影响的作用基本不见,90 mm/h、30 min 降雨的径流总量已经相当或者高于 60 mm/h、60 min 降雨的径流总量;当雨强大雨量也多时,其径流总量差距仍然明显,但随坡度增加逐渐减弱,25°时最小相差倍数仅为 1.17 倍。总体来说,与一次降雨相比,二次降雨各雨强下的最大相差倍数减小,各坡度之间的倍数差距也减小。

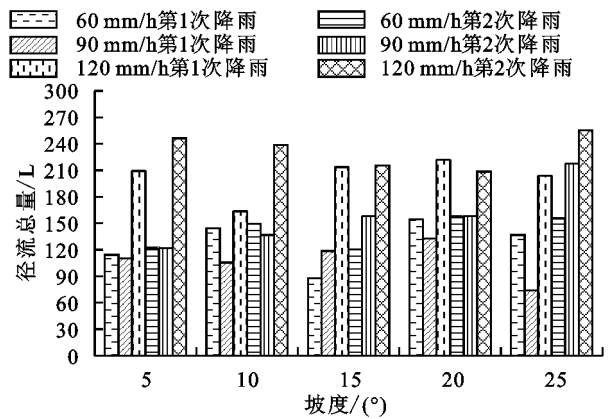


图 2 间歇降雨条件下径流总量

2.2 间歇降雨条件下坡面侵蚀的变化

2.2.1 间歇降雨条件下坡面细沟侵蚀量的变化 从图 3 可知,一次降雨时,60 mm/h 在 15°坡度时发生细沟侵蚀;90 mm/h 也从 15°开始出现细沟侵蚀,但细沟侵蚀量随坡度增加而增加;只有 120 mm/h 各坡度均发生细沟侵蚀,且细沟侵蚀量随坡度递增而递增;而 3 个雨强一次降雨的降雨量之比为 4 : 3 : 4,表明发生细沟侵蚀最主要的动力是降雨强度,雨强越大,坡度越陡,降雨量越多,细沟侵蚀量越多。

二次降雨时,60 mm/h 在 15°坡度时发生细沟侵蚀,90 mm/h 时各坡度下均出现细沟侵蚀,且侵蚀量随坡度增加缓慢上升,120 mm/h 时细沟侵蚀量随坡度变化趋势已不明显,各坡度下细沟侵蚀量相差不大;二次降雨 90 mm/h 与 120 mm/h 的细沟侵蚀量交错变化,20°时 90 mm/h 的细沟侵蚀量超过 120 mm/h 细沟侵蚀量。一次降雨发生细沟侵蚀后,二次降雨的细沟侵蚀量相对要少,120 mm/h 时各坡度下的二次降雨的细沟侵蚀量仅为一次降雨的 0.42, 0.36, 0.24, 0.13, 0.15 倍,随坡度增加而减小,这是因为细沟侵蚀一般要经历片蚀、细沟雏形、细沟发育、细

沟调整几个阶段,坡度、雨强较大时,一次降雨时细沟多已发育较好,二次降雨主要是细沟调整阶段,所以侵蚀量反而较一次降雨少。

整体来看,细沟侵蚀受到雨强和坡度的共同影响,降雨量的影响相对较小,大雨强、大坡度情况下细沟侵蚀容易发生,小雨强时,15°坡度易发生细沟侵蚀。

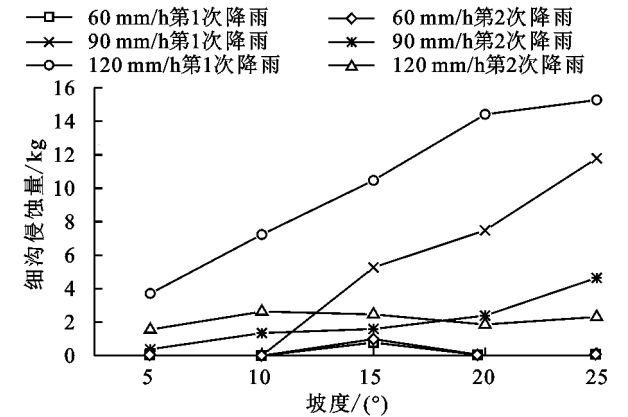


图 3 间歇降雨条件下细沟侵蚀量

2.2.2 间歇降雨条件下坡面总侵蚀量的变化 从图 4 可以看出,一次降雨时,60 mm/h 的侵蚀总量随坡度先增加后减小,以 15°为分界点;90 mm/h 在 5°, 10°时侵蚀总量水平较低,15°开始侵蚀总量增长较快,且随着坡度增加而增加;120 mm/h 时,侵蚀总量随坡度增加明显;90 mm/h 各坡度下的侵蚀总量为 120 mm/h 时侵蚀总量的 0.07,0.03,0.54,0.57,0.78 倍,原因是随着坡度增加,90 mm/h 开始出现细沟侵蚀,土壤侵蚀速度加快,使得 2 个雨强下的侵蚀总量倍数差距显著减小。

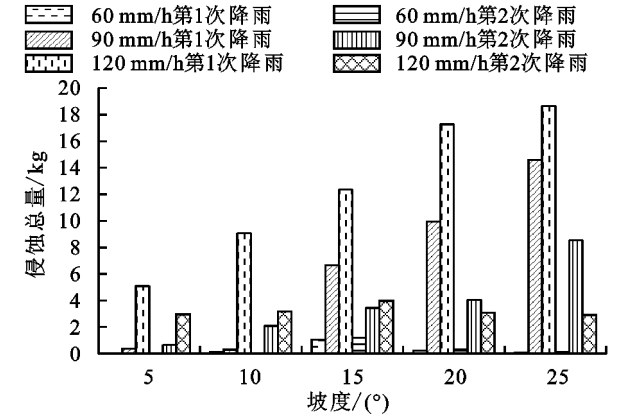


图 4 间歇降雨条件下侵蚀总量

二次降雨时,60 mm/h 的侵蚀总量变化与一次降雨基本相同,90 mm/h 时各坡度下的侵蚀总量随坡度增加而缓慢上升,到 120 mm/h 时,各坡度下的侵蚀总量变化已相差不大;90 mm/h 各坡度下的侵蚀总量为 120 mm/h 时侵蚀总量的 0.22,0.66,0.87, 1.32,2.93 倍,这是因为坡度越大,120 mm/h 在一次降雨细沟发育趋于完善,二次降雨进入细沟调整阶段,而 90 mm/h 雨强在一次降雨细沟发育还不成熟,

二次降雨时继续发育,因此二者的侵蚀总量倍数表现为随着坡度增加明显增大。

总体来看,一次降雨的侵蚀总量主要取决于雨强和坡度的大小,二次降雨时侵蚀总量则除了坡度和雨强外,还与一次降雨时发生的细沟侵蚀程度有关,变化更为复杂。

2.2.3 间歇降雨条件下细沟侵蚀贡献率的变化 由图 5 可知,一次降雨发生细沟侵蚀时,细沟侵蚀贡献率随坡度、雨强变化不明显,细沟侵蚀贡献率均在 70%以上,说明一次降雨若发生细沟侵蚀,坡面侵蚀多以细沟侵蚀为主。二次降雨时,90,120 mm/h 的细沟侵蚀贡献率整体随雨强增大而增加,随坡度变化则表现为波动状态。60 mm/h 时,由于雨强较小,细沟侵蚀尚在发育期,一次降雨和二次降雨的细沟侵蚀贡献率仅相差 9.14%,均在 75%以上。90 mm/h 时,小坡度一次降雨无细沟侵蚀,二次降雨才发生细沟侵蚀,且侵蚀贡献率小于大坡度第 1 次降雨时的细沟侵蚀贡献率;大坡度时,一次降雨与二次降雨侵蚀贡献率分别相差 32.74%,16.37%,26.28%。120 mm/h 时,一次降雨与二次降雨侵蚀贡献率在 10°和 25°坡度时相差不大,5°,15°,20°时相差均在 20%以上,表明在细沟侵蚀发育早期,细沟对总侵蚀的贡献率均较高,此时坡度、雨强对细沟侵蚀的贡献率影响有限;而二次降雨时,细沟侵蚀进入调整期,其对总侵蚀的贡献率除受到坡度、雨强的影响,还与一次降雨后坡面细沟发育进程、坡面侵蚀形态相关,其不确定性增加,变化无规律。

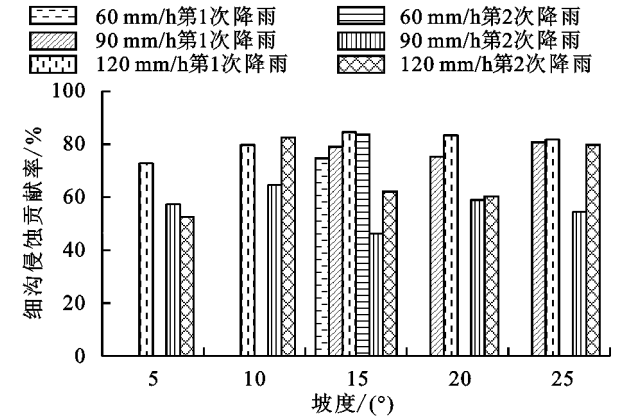


图 5 间歇降雨条件下细沟侵蚀贡献率

2.3 间歇降雨条件下变量相关性分析

对一次降雨和二次降雨的雨强、坡度、降雨量、径流总量、侵蚀总量、细沟侵蚀量、细沟侵蚀贡献率通过 SPSS 25 软件进行相关性分析(表 2)表明,一次降雨时,雨强和产流时间呈极显著负相关关系($P < 0.01$),与侵蚀总量、细沟侵蚀量、细沟侵蚀贡献率呈显著正相关关系($P < 0.01$),坡度与细沟侵蚀量呈正相关关系($P < 0.05$),而降雨量与径流总量呈正相关关系($P < 0.05$);二次降雨时,雨强仍与产流时间呈

极显著负相关关系($P<0.01$),与径流总量、细沟侵蚀量呈显著正相关关系($P<0.01$),与细沟侵蚀贡献率、侵蚀总量呈正相关关系($P<0.05$),坡度、降雨量和其他诸因子的相关性则不显著。

由上述分析可知,雨强是坡面径流、侵蚀的直接动力,产流时间始终受到雨强的影响,一次降雨时,由于坡面入渗的影响,降雨量显著影响坡面径流,到二次降雨时,前期一次降雨使坡面含水率整体升高,此时土壤入渗速率下降,入渗需水量减小,雨强成为

径流的显著影响因素,降雨量的作用减弱,与径流总量相关性变小。对于细沟侵蚀量和侵蚀总量而言,一次降雨时,雨强越大,雨滴击溅和径流冲刷的作用越显著,而坡度升高,则能强化这种作用,增强径流的动能和势能,从而增加细沟侵蚀和总侵蚀量,但二次降雨时,由于大雨强、陡坡条件下一次降雨时细沟发育趋于完善,此时进入细沟调整阶段,细沟的发育不只受雨强和坡度的影响,坡度的作用被削弱,相关性不显著。

表 2 间歇降雨条件下相关系数

降雨条件	降雨因子	产流时间	径流总量	侵蚀总量	细沟侵蚀量	细沟侵蚀贡献率
一次降雨	雨强	-0.823 **	0.417	0.665 **	0.621 **	0.645 **
	坡度	-0.165	0.062	0.370	0.433 *	0.322
	降雨量	0.028	0.524 *	-0.110	0	0.060
二次降雨	雨强	-0.620 **	0.642 **	0.507 *	0.638 **	0.499 *
	坡度	-0.082	0.267	0.247	0.233	0.021
	降雨量	0.276	0.138	-0.359	-0.227	-0.028

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

同时对一次降雨和二次降雨的细沟侵蚀量和侵蚀总量关系进行分析发现,二者呈明显的线性关系。一次降雨二者的拟合方程为 $y=0.814x,R^2=0.997\ 6$,二次降雨的拟合方程为 $y=0.5669x+96.753,R^2=0.942\ 3$,其中因变量 y 为侵蚀总量,自变量 x 为细沟侵蚀量。根据线性函数关系可知,在一定程度上,细沟侵蚀量的大小可以表征坡面总侵蚀量的大小,尤其是在细沟发育阶段。这与前人^[18]的研究也相符合,坡面土壤侵蚀量的主要来源是细沟侵蚀。

3 结 论

(1)二次降雨的产流时间相比一次降雨均提前,一次降雨径流总量受到雨强、坡度、降雨量的共同影响,15°坡度是径流总量变化的转折点,二次降雨时降雨量的作用减弱,各雨强下的最大相差倍数减小,各坡度之间的倍数差距也减小。

(2)一次降雨发生细沟侵蚀最主要的动力是降雨强度,大雨强、陡坡情况下细沟侵蚀更容易产生,而15°坡度对细沟侵蚀的产生具有重要意义,此时若发生细沟侵蚀,坡面侵蚀则多以细沟侵蚀为主,二者侵蚀量呈正比例函数关系;二次降雨的细沟侵蚀量和一次降雨过程中细沟发育情况有关,一次降雨的细沟发育越剧烈,二次降雨的细沟侵蚀量越少,此时细沟侵蚀量和总侵蚀量呈一次函数关系。总体来说,侵蚀总量的变化与细沟发育所处阶段紧密相关。

(3)间歇降雨条件下,不同雨强、坡度、降雨量对坡面土壤径流、侵蚀过程的影响存在差异;同时,一次降雨土壤径流、侵蚀的变化对后期二次降雨径流、侵

蚀的发展具有重要影响,使得在不同土壤侵蚀发展阶段,雨强、坡度、降雨量等因子对坡面土壤径流、侵蚀产生影响的程度也随之改变。

参考文献:

[1] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.

[2] Chen J, Xiao H B, Li Z W, et al. How effective are soil and water conservation measures (SWCMs) in reducing soil and water losses in the red soil hilly region of China? A meta-analysis of field plot data [J].Science of the Total Environment,2020,735:139517.

[3] Parsons A J, Stone P M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion [J].Catena,2006,67:68-78.

[4] 马良,左长清.基于水蚀预测模型的红壤坡面侵蚀主要影响因素研究[J].水土保持通报,2012,32(6):26-29,33.

[5] 杨凯,赵军,赵允格,等.生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征[J].农业工程学报,2019,35(23):135-141.

[6] Xu Q X, Wu P, Dai J F, et al. The effects of rainfall regimes and terracing on runoff and erosion in the Three Gorges area, China [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2018,25(10):9474-9484.

[7] Fox D M, Bryan R B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient [J].Catena, 2000, 38: 211-222.

[8] Wu S B, Yu M H, Chen L. Nonmonotonic and spatial-temporal dynamic slope effects on soil erosion during rainfall-runoff processes [J].Water Resources Research, 2017,53(2):1369-1389.

- [9] 王洪德,徐小明,余冬立.砾石覆盖对海涂围垦区粉砂土坡面土壤可蚀性影响试验研究[J].排灌机械工程学报,2019,37(6):498-503.
- [10] Kouselou M, Hashemi S, Eskandari I, et al. Quantifying soil displacement and tillage erosion rate by different tillage systems in dryland northwestern Iran[J]. Soil Use and Management,2018,34(1):48-59.
- [11] Zhao X N, Wu P T, Chen X L, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China [J].Soil Research,2013,51(1):50-58.
- [12] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59,116.
- [13] 蔡强国,朱远达,王石英.几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J].水科学进展,2004,15(1):12-18.
- [14] 陈俊杰,孙莉英,蔡崇法,等.不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J].土壤学报,2013,50(2):281-288.
- [15] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):149-156.
- [16] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope [J].Soil and Tillage Research,2016,155:429-436.
- [17] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等.降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J].农业工程学报,2017,33(8):134-140.
- [18] 郑良勇,李占斌,李鹏,等.稀土元素示踪坡面次降雨条件的侵蚀过程[J].农业工程学报,2010,26(3):87-91.
- [19] 章文波,谢云,刘宝元.降雨侵蚀力研究进展[J].水土保持学报,2002,16(5):43-46.
- [20] 刘金涛,李晓鹏,陈喜,等.间歇降雨中土壤含水量分布及其对入渗的影响[J].水土保持学报,2009,23(5):96-100.
- [21] 李毅,邵明安.间歇降雨和多场次降雨条件下黄土坡面土壤水分入渗特性[J].应用生态学报,2008,19(7):1511-1516.
- [22] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等.间歇降雨条件下黄土坡面土壤溶质的迁移特征[J].中国农业科学,2009,42(4):1299-1305.
- [23] 彭遥,周蓓蓓,陈晓鹏,等.间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):54-60.
- [24] 王辉,平李娜,潘景副,等.溶质施放部位对红壤坡面溶质迁移特征的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):7-11.
- [25] Zhang Y, Zhao D F, Lin J S, et al. Impacts of collapsing gullies on the dynamics of soil organic carbon in the red soil hilly region of southeast China [J].Catena, 2020,190:104547.
- [26] Zhao Q H, Li D Q, Mu N, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope [J].Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2015,229(2):609-621.
- [27] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.
- [28] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [29] 梁志权,张思毅,卓慕宁,等.不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):1-6.
- [30] 姚冲,查瑞波,黄少燕,等.模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程[J].水土保持学报,2018,32(3):10-15.
- [31] 王丽园,查轩,黄少燕,等.不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):40-44.
- [32] 张会茹,郑粉莉,耿晓东.地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响研究[J].水土保持研究,2009,16(4):52-54,59.
- [33] 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.
- [34] 金鑫,谢斯琴,宋颖,等.人工红壤坡面对超大雨强降雨的响应过程[J].水土保持学报,2017,31(5):19-24.

(上接第 95 页)

- [16] 张燕,黄炎和,林金石,等.崩岗不同土层渗透差异及其影响因素研究[J].水土保持研究,2014,21(3):37-40.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [18] Tang C S, Shi B, Liu C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology,2018,101(3/4):204-217.
- [19] 曹玲,王志俭,张振华,等.降雨—蒸发条件下膨胀土裂隙演化特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):413-421.
- [20] 武敏,范昊明,刘爽,等.SAR,EC 与水温对辽西褐土入渗速率的影响研究[J].水土保持研究,2015,22(3):276-279.
- [21] 崔颖,缪林昌.非饱和压实膨胀土渗透特性的试验研究[J].岩土力学,2011,32(7):2007-2012.