

# 自然降雨对广西赤红壤坡地土壤侵蚀特征的影响

陈钊柱<sup>1</sup>, 蔡卓杰<sup>2</sup>, 谢福倩<sup>2</sup>, 王坚桦<sup>1</sup>, 李桂芳<sup>1</sup>

(1.广西大学 农学院, 广西 南宁 530004; 2.广西壮族自治区水土保持监测站, 广西 南宁 530023)

**摘要:** [目的] 探讨自然降雨对赤红壤坡地土壤侵蚀特征的影响, 为赤红壤地区水土保持综合治理提供理论依据。[方法] 基于野外径流小区原位观测试验, 测定 2020 年 5—10 月次降雨下广西壮族自治区赤红壤坡耕地(蔗地)、撂荒地和裸地的产流产沙量, 结合降雨特征分析, 探讨降雨特征及分布对赤红壤坡地土壤侵蚀特征的影响。[结果] ①2020 年 5—10 月, 坡面径流和侵蚀量整体上表现为: 裸地>蔗地>撂荒地, 不同处理下坡面径流和侵蚀均主要集中在 8 月, 其中撂荒地径流和侵蚀各月差异相对较小。②不同处理次降雨降雨量与坡面径流量和侵蚀量呈极显著的正相关关系, 降雨历时显著影响蔗地和撂荒地坡面径流量。中雨和暴雨降雨等级占观测期内侵蚀性降雨总量的 70.9%, 其产生的径流量占蔗地、裸地和撂荒地处理坡面径流量的 68.2%, 78.6% 和 67.8%; 暴雨降雨等级是坡面侵蚀量的主要来源, 占不同处理下总侵蚀量的 63.8%~83.4%。[结论] 在广西壮族自治区的赤红壤坡地区域, 与裸地相比, 蔗地和撂荒地能够有效减小坡面产流产沙量, 且撂荒地的降低效果更为明显; 降雨量是影响坡面产流产沙最关键的因子, 中雨和暴雨降雨等级是坡面径流和侵蚀的主要来源, 坡面径流和侵蚀分布特征受降雨分布和降雨频次等因素的综合影响。

**关键词:** 坡耕地; 赤红壤; 土壤侵蚀; 自然降雨

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)03-0036-07

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 陈钊柱, 蔡卓杰, 谢福倩, 等. 自然降雨对广西赤红壤坡地土壤侵蚀特征的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 36-42. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.006; Chen Zhaozhu, Cai Zhuojie, Xie Fuqian, et al. Effects of natural rainfall on soil erosion characteristics of lateritic red soil slope in Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 36-42.

## Effects of Natural Rainfall on Soil Erosion Characteristics of Lateritic Red Soil Slope in Guangxi Zhuang Autonomous Region

Chen Zhaozhu<sup>1</sup>, Cai Zhuojie<sup>2</sup>, Xie Fuqian<sup>2</sup>, Wang Jianhua<sup>1</sup>, Li Guifang<sup>1</sup>

(1. Agricultural College of Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. Guangxi Water and Soil Conservation Environment Protection, Nanning, Guangxi 530023, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of natural rainfall on soil erosion characteristics of sloping lateritic soil was analyzed in order to provide a theoretical basis for the comprehensive management of soil and water conservation in a lateritic soil area. [Methods] Based on in-situ observations from runoff plots, runoff amounts and sediment yields under erosive rainfall events from May to October 2020 for sloping farmland (cropped to sugarcane), abandoned land, and bare land in the Guangxi Zhuang Autonomous Region were analyzed, and combined with rainfall characteristics to determine the effects of rainfall characteristics and distribution on soil erosion characteristics of sloping soil. [Results] ① During the observation period, runoff amounts and sediment yields under different treatments followed the order of bare land>sugarcane land>abandoned land. Runoff amounts and sediment yields under all treatments were concentrated in August. Monthly differences for

收稿日期: 2021-08-30

修回日期: 2022-01-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“植蔗坡耕地土壤侵蚀及养分流失特征和机制”(41967010); 广西自然科学基金资助项目(2018GXNSFBA138024); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD17195060)。

第一作者: 陈钊柱(1996—), 男(汉族), 广西壮族自治区梧州市人, 硕士研究生, 研究方向为坡面土壤侵蚀及其环境效应。Email: 320361798@qq.com。

通信作者: 李桂芳(1987—), 女(汉族), 河南省商丘市人, 博士, 讲师, 主要从事农田水土流失及其对生态环境的影响研究。Email: lifangdyx@163.com。

runoff amounts and sediment yields in abandoned land were relatively small. ② Runoff amounts and sediment yields were significantly related to rainfall amounts for all treatments. Only rainfall duration had significant positive correlations to runoff amounts for sugarcane land and abandoned land. Moderate rain and heavy rain accounted for 70.9% of the total erosive rainfall amounts. For the sugarcane land, bare land, and abandoned land treatments, the main sources of runoff were moderate rain and heavy rain, which accounted for 68.2%, 78.6%, and 67.8%, respectively, of the total runoff. Erosion was mainly caused by heavy rain, accounting for 63.8%~83.4% of the total amount of erosion. [Conclusion] For a lateritic red soil slope in the Guangxi Zhuang Autonomous Region, sugarcane land and abandoned land effectively reduced runoff and sediment yield on the slope more than bare land, and the reduction effect was more significant for abandoned land. Rainfall amount was the most important rainfall characteristic affecting runoff and sediment yields. Moderate rain and heavy rain were the mainly sources of runoff sediment yields. The distribution characteristics of runoff and erosion on slopes were influenced by rainfall distribution and rainfall frequency.

**Keywords:** slope farmland; lateritic red soil; soil erosion; natural rainfall

水土资源是人类生存发展中重要的自然资源,水土流失问题更是成为了当今社会最受关注的环境问题之一<sup>[1]</sup>。降雨是导致水土流失的直接动力因子,是影响坡面土壤侵蚀的主要因素之一<sup>[2-3]</sup>。降雨特征不同,其对坡面土壤侵蚀的影响也不同<sup>[4]</sup>。降雨强度是影响土壤侵蚀最直接也是最主要的动力因素<sup>[5]</sup>,降雨强度越大,雨滴动能和终极速度就越大,对土壤的打击就越强<sup>[6]</sup>。自然降雨下,降雨量和 $I_{30}$ (最大30 min降雨强度)均与坡地产流产沙呈显著或极显著的正相关关系<sup>[7]</sup>,整体上降雨量显著影响坡面径流,而 $I_{30}$ 对坡面侵蚀影响较大<sup>[8]</sup>。由于自然降雨的随机性和不确定性等因素,不同学者根据降雨量将降雨划分为不同等级,研究表明大雨和暴雨是引起紫色土区<sup>[9]</sup>、喀斯特黄壤区<sup>[10]</sup>和岩溶槽谷区<sup>[11]</sup>坡地发生侵蚀的主要降雨等级。胡伟等<sup>[12]</sup>对东北黑土区研究指出,坡面径流的贡献表现为:大雨>暴雨>中雨,坡面产沙的贡献则表现为:大雨>中雨>暴雨。郑江坤等<sup>[13]</sup>对川西丘陵区沙壤土的研究表明,坡耕地产流产沙量并未随降雨等级的增加而增加,作者指出不同降雨等级的降雨次数会对坡面土壤侵蚀产生影响。此外,自然降雨下降雨时空分布以及前期降雨等<sup>[14]</sup>因子均会对坡面侵蚀产生影响。我国不同区域降雨分布存在明显的时空差异,其必然导致各区域土壤侵蚀特征存在明显不同<sup>[15]</sup>。

对于坡耕地而言,作物类型及田间管理措施对坡耕地土壤侵蚀有重要的影响<sup>[16]</sup>。作物种植对坡耕地土壤侵蚀产生影响,一是通过植株对降雨的拦截及再分配,二是作物根系对坡面土壤抗侵蚀能力的作用<sup>[17]</sup>。整体而言,与裸地相比,作物种植均不同程度地降低坡面产流产沙<sup>[18]</sup>,大豆整个生育期较裸地可减小61%的侵蚀量<sup>[19]</sup>,花生和红薯作物可降低约60%的坡面径流量,而坡面侵蚀量则分别降低68%

和91%<sup>[20]</sup>。不同作物对坡面侵蚀的研究表明,作物地表覆盖度越高,坡面侵蚀量越小,同时作物高矮等植株形态也显著影响坡面侵蚀过程<sup>[21]</sup>。罗兴录等<sup>[22]</sup>指出广西地区3种作物(玉米、甘蔗、木薯)坡面侵蚀量表现为:玉米>木薯>甘蔗,但作者仅从年际的尺度探讨不同作物对坡面侵蚀的影响。甘蔗是中国最主要的糖料作物,与玉米等其他作物相比,其生长周期较长(>8个月),在中国广西、云南和广东等地均有大量种植<sup>[23]</sup>。

此外,与其他研究区相比,南方红壤区,尤其是赤红壤分布区降雨特征具有年降雨量高、降雨侵蚀力强且年内分布分散等特征<sup>[15]</sup>。因此,基于径流小区的野外观测试验,本研究以赤红壤蔗地为例,以撂荒地和裸地为对照,通过测定2020年5—10月自然降雨下坡面产流产沙量,结合自然降雨年内分布及侵蚀性降雨特征参数进行分析,探讨自然降雨特征对赤红壤坡地土壤侵蚀特征的影响,以期对赤红壤地区水土保持综合治理提供理论支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区(以下简称“广西”)南宁市良庆区那马镇广西木棉麓小流域内的水土保持科技示范园,地理位置介于东经 $108^{\circ}19'00''$ — $108^{\circ}19'24''$ E,北纬 $22^{\circ}37'26''$ — $22^{\circ}37'55''$ N。该地区为亚热带湿润季风气候,雨量充沛,年均降雨量1 232.2 mm;降雨集中,其中4—9月份降雨量占到全年降雨量的80%以上;气候炎热,年均气温 $21.8^{\circ}\text{C}$ ,年均日照时间1 687.6 h。研究区地貌类型是构造剥蚀低丘,南北长1 km,东西宽0.25~0.65 km,流域内高差45~90 m,坡度 $6^{\circ}$ ~ $30^{\circ}$ 。研究区处于广西南部亚热带赤红壤地带内( $22^{\circ}$ ~ $23.5^{\circ}$ ),地带性

土壤为赤红壤,其面积为 485.1 km<sup>2</sup>,占广西土壤总面积的 30.1%,是广西南亚热带地区的代表性土壤<sup>[24]</sup>。研究区赤红壤成土母质主要由砂质岩类风化物发育而成,该类成土母岩风化物形成的赤红壤占广西赤红壤的 62.0%,由砂页岩成土母岩发育的赤红壤土壤质地从壤土至黏土均有<sup>[24]</sup>。研究区的土壤质地为壤黏土,土壤颗粒组成为砂粒占 48.0%,粉粒占 20.4%,黏粒占 31.6%。土层厚度为 100—150 cm,土壤 pH 值为 4.5~5.5,有机质含量 2%~3%,土壤容重为 1.2~1.3 g/cm<sup>3</sup>。园区内现种有甘蔗、玉米和木薯等农作物,自然植被主要是荒草和灌丛,主要荒草类型为鬼针草(*Bidens bipinnata*)和狼把草(*Bidens tripartita*)。

表 1 试验小区概况

处理	坡度/(°)	坡宽/m	坡长/m	植被类型	管理措施
蔗地			20	甘蔗	横坡种植,浇水、施肥、不定期除草
撂荒地	16.5	5	10	鬼针草、狼把草	无
裸地			10	无	不定期除草,保持坡面处于裸露状态

### 1.3 研究方法

本研究采取径流小区野外水文观测法,观测时间为 2020 年 5—10 月。每次降雨结束后,选取 3 个不同位置,用水尺测定集流桶和分流桶深,用以计算地表径流量。桶内样品进行搅拌均匀后,用 500 ml 塑料瓶进行取样,每次取 3 个重复样,烘干后测定其泥沙含量,计算得到含沙浓度。参照《径流小区和小流域控制站监测手册》计算总径流量以及土壤流失量等参数。在径流小区附近配备有人工雨量站和数字气象站,用于收集气象资料。降雨资料的记录包括日降雨量、降雨过程摘录(5 min 间隔)、次降雨起止时间、降雨历时、平均雨强、 $I_{30}$  等参数。降雨过程中如果间歇时间连续超过 6 h,则视为 2 次降水事件。

### 1.4 数据处理

利用 SPSS 19.0 进行数据的相关性分析,利用 Origin 2018 和 Microsoft Office 2013 进行图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理下赤红壤坡面产流特征

观测期内,不同处理间赤红壤坡面径流量差异明显,整体上表现为裸地(712.2 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>蔗地(255.6 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>撂荒地(165.6 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)(图 1)。2020 年 5—10 月研究区共发生 19 场侵蚀性降雨,次降雨下蔗地的坡面径流量在 2.4~62.8 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 之间,裸地的坡面径流量介于 4.7~230.0 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,撂荒地的坡面径流量则在 2.4~44.0 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 范围内波动变化。

### 1.2 试验设计

径流小区建于 2012 年,是根据《水土保持监测设施通用技术条件》(SL342-2006)<sup>[25]</sup>和《水土保持试验规程》(SL419-2007)<sup>[26]</sup>,同时参考国内相关行业标准,结合研究区域的实际情况进行统一布设。小区设在山坡中部,坡面平整,每个小区坡度、坡宽和土壤条件均一。小区周围均设有砖砌围埂和防护带,与周围环境进行隔离。小区下方均设有圆形集流桶和分流桶,用以承接次降雨下小区径流泥沙样。甘蔗是广西赤红壤分布区广泛种植的旱地作物<sup>[22-23]</sup>,野外调查表明,广西存在一定面积的耕地撂荒现象。因此,本试验研究设置蔗地、撂荒地和裸地 3 种处理。不同小区的处理、规格及管理措施等见表 1。

由 2020 年 5—10 月各处理坡面径流量分布可知(图 1),不同处理下坡面径流量在 5—10 月分布表现为先上升后下降。蔗地、裸地和撂荒地的坡面径流量均主要集中在 8 月,分别为 98.5,360.3,69.9 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,占总径流量的 38.5%,50.6%和 42.2%。这主要是由于 8 月的降雨量最多,占观测期总降雨量的 36.2%(237.0 mm),其中侵蚀性降雨 188.5 mm(图 2),说明坡面径流受降雨影响较大。刘洁等<sup>[27]</sup>研究结果指出,降雨是影响径流的重要因子,本文研究结果与其一致。不同处理间坡面径流量的差异,表明不同植被措施对坡面径流的消减程度存在明显不同<sup>[21]</sup>。杨任翔等<sup>[28]</sup>研究指出裸地的径流量为甘蔗地的 3.2 倍,与本文的研究结果(2.8 倍)接近。此外,相较于蔗地,撂荒地坡面荒草密集,地表覆盖度更高,且人为扰动更少,因而其消减径流的作用更为明显<sup>[29]</sup>。

对比其余月份不同处理坡面径流量变化可知,坡面月径流量与月降雨量无明显的正相关关系。例如,5 月的侵蚀性降雨量(107.6 mm),除低于 8 月外,均高于其余月份(图 2),但各处理坡面产流量均较低。原因主要是 5 月的侵蚀性降雨量主要集中在 5 月 12 日的 1 场降雨,占 5 月侵蚀性降雨总量的 67.8%(73 mm),且 5 月 12 日降雨前径流小区已接近 15 d 没有降雨(图 3),地表土壤较为干燥。前期土壤含水量较低时,红壤黏结力大且结构稳定,产流时间延长,土壤坡面入渗量增多<sup>[30]</sup>。其余月份降雨量均相对较为分散,尤其是 9 月的降雨量主要分散在 9 月 19 日

至26日的几场降雨中,在此期间,总降雨天数为6 d(图3),侵蚀性降雨4场。连续性的降雨导致土壤湿润,降雨前土壤含水量较高( $>30\%$ ),雨水入渗率降低,因而坡面产流量较大。张向炎等<sup>[31]</sup>对红壤裸地坡面产流产沙特征研究指出,前期土壤含水量越高,坡地累积入渗量越小,雨水转化为土壤水分的比率越小。结果也再次表明,坡面产流是降雨分布、降雨频次、前期降雨及下垫面条件等因子综合作用的结果。

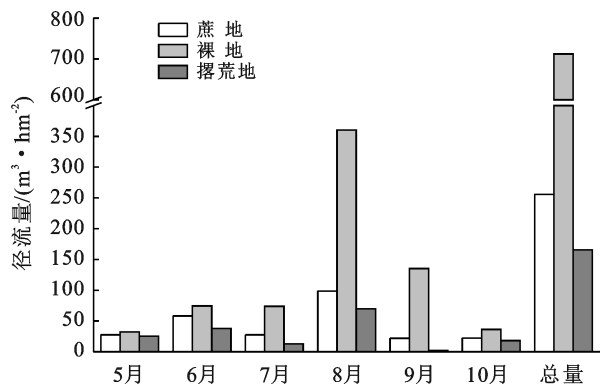


图1 研究区2020年5—10月各处理坡面径流量

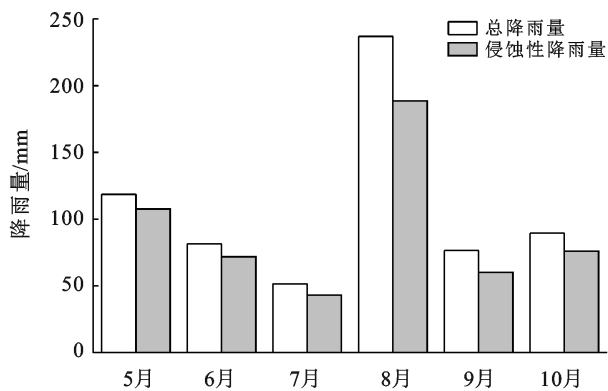


图2 研究区2020年5—10月降雨量

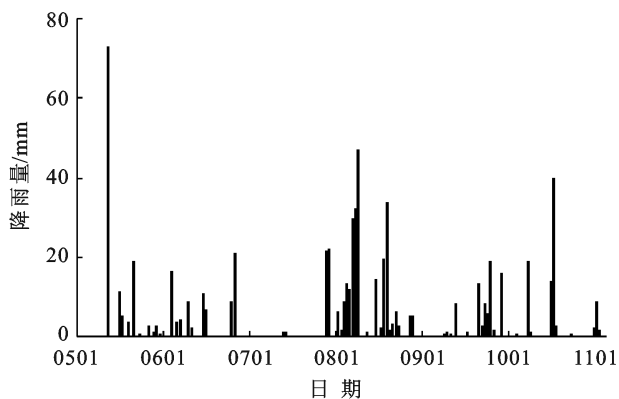


图3 研究区2020年5—10月降雨分布

对比不同处理下坡面径流量分布可知,裸地处理分别是蔗地和撂荒地的2.8,4.3倍,而蔗地处理是撂

荒地的1.5倍。表明与裸地相比,蔗地和撂荒地能够有效降低坡面径流量,且撂荒地的减流效果优于蔗地。此外,随着坡面植被的生长,蔗地和撂荒地处理坡面地表覆盖度越来越高,而裸地坡面长期保持裸露状态,因而其坡面径流量与蔗地和撂荒地间差异逐渐明显。对比不同处理下各月坡面径流量可知,2020年5—10月各月蔗地相较于裸地分别能减少14.6%~83.8%的径流量,尤其是降雨量较高的8月和9月,分别减少了72.6%和83.8%。甘蔗为一年一熟作物,其快速生长期与雨季同步(6—9月),生长期内有很长的一段时间植被覆盖度维持在60%以上(8—10月),能够有效降低坡面径流量。表明,甘蔗的防蚀作用主要发挥在其中后期(8—10月),对于南方甘蔗种植区而言,刚好处于雨季,降雨量大且降雨强度高,此时甘蔗能起到明显的减流效果。

## 2.2 不同处理下赤红壤坡面产沙特征

与坡面径流量相比,不同处理下坡面侵蚀量的差异更为明显(图4)。观测期内,裸地的坡面总侵蚀量最高,其次为蔗地和撂荒地,分别为9 570.5 kg/hm<sup>2</sup>, 4 439.7 kg/hm<sup>2</sup>,143.8 kg/hm<sup>2</sup>(图4)。次降雨下蔗地坡面侵蚀量在0.2~3 667.8 kg/hm<sup>2</sup>之间,裸地的坡面侵蚀量介于0.7~7 248 kg/hm<sup>2</sup>,撂荒地的坡面侵蚀量则在0.1~73.0 kg/hm<sup>2</sup>范围内波动变化。整体上,蔗地和裸地处理坡面侵蚀量在5—8月逐渐增加,撂荒地处理坡面侵蚀量在各月变化相对较为平稳。与坡面径流分布特征相似,蔗地、裸地和撂荒地的侵蚀量均主要集中在8月,分别为4 078.1 kg/hm<sup>2</sup>, 9 101.5 kg/hm<sup>2</sup>,85.3 kg/hm<sup>2</sup>,但其占坡面总侵蚀量的比例高达91.9%,95.1%和59.3%。结果表明,与径流量相比,集中降雨对坡面侵蚀的影响更为明显,且不同下垫面条件其影响程度存在差异。对比9月和10月降雨分布及各处理坡面侵蚀量可知(图2和图4),各处理下坡面侵蚀量均10月最低,分别为0.8 kg/hm<sup>2</sup>(蔗地),3.6 kg/hm<sup>2</sup>(裸地)和0.1 kg/hm<sup>2</sup>(撂荒地)。10月降雨量(89.5 mm)及侵蚀性降雨量(76 mm)均高于9月,但9月坡面侵蚀量整体高于10月,尤其是裸地处理。主要原因是10月的次降雨较为分散(图3),且侵蚀性降雨仅有2场,总降雨历时为32.7 h,此时蔗地和撂荒地处理下坡面地表覆盖度均较高( $>80\%$ ),因此未产生严重的土壤侵蚀。对比观测期内降雨分布可知(图2),除8月外,其余月份不同处理坡面侵蚀量与降雨分布存在明显不同。研究表明,降雨量对坡面产沙的影响较为复杂,受下垫面和次降雨特征的综合作用。



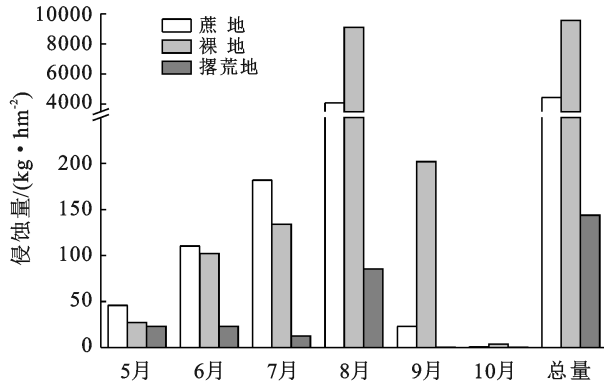


图 4 研究区 2020 年 5—10 月各处理坡面侵蚀量

对比不同处理下坡面侵蚀量可知,裸地处理是蔗地和撿荒地的 2.2,66.5 倍,蔗地处理是撿荒地的 30.9 倍。这表明与裸地相比,有植被覆盖的坡地能够显著降低坡面侵蚀。蔗地和裸地处理下,5—7 月的坡面侵蚀量表现为:蔗地>裸地,而 8—10 月表现为裸地>蔗地。主要是因为前期蔗地的地表覆盖度低,且在种植甘蔗时,对土壤进行了翻动,导致地表土壤较为疏松,抗冲刷能力低,坡面易发生侵蚀。赵娅君等<sup>[32]</sup>研究了玉米作物对坡耕地的防蚀效果,指出玉米生长前期由于冠层较小,因而其抗侵蚀能力较弱,与本文中甘蔗作物的防蚀效应相一致。而到了后期,随着甘蔗

的快速生长,蔗地的植被覆盖度迅速增加,其防蚀作用远大于裸地。因此,虽然甘蔗种植能够减少坡面侵蚀量,但其防蚀功能是随着甘蔗生长而不断增大,只有甘蔗生长达到一定的覆盖度以后,才能起到较好的保水固土作用<sup>[28]</sup>。

综合来看,蔗地、裸地和撿荒地处理下坡面产流产沙均主要发生在 6—8 月,分别占观测期内坡面总径流量和总侵蚀量的 72.0%,71.4%,72.5%和 98.4%,97.6%,83.9%。因此我们进行农业生产活动时,在水土流失高发期间,要注意加强防护,从而减少坡地水土流失。撿荒地相对于裸地和坡耕地有着更好的保水固土效果。

### 2.3 降雨特征与赤红壤坡面产流产沙特征相关分析

2020 年 5—10 月研究区侵蚀性降雨共 19 场,降雨量变化范围为 5.5~73.0 mm,平均雨强为 1.4~219.0 mm/h, $I_{30}$  为 3.0~147.0 mm/h。按照中国气象降雨等级划分标准<sup>[13]</sup>,研究区侵蚀性降雨划分为小雨、中雨、大雨和暴雨 4 个降雨等级(表 2)。中雨降雨等级发生的频次最高,共 12 场,总降雨量 220.0 mm,占总降雨场次和侵蚀性降雨总量的 63.2%和 39.6%。小雨、大雨和暴雨降雨等级分别为 2,3,2 场,分别占侵蚀性降雨总量的 4.1%~31.3%不等。

表 2 研究区 2020 年 5—10 月研究区侵蚀性降雨特征

降雨等级	降雨历时/h	降雨量/mm	平均雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	$I_{30}$ /(mm·h <sup>-1</sup> )	降雨场次/场	总降雨量/mm	占侵蚀性降雨总量比例/%
小雨	2.5—7.2	5.5~9.0	1.2~1.4	3.0~14.9	2	22.9	4.1
中雨	1.2—19.2	10.4~23.0	1.9~14.3	7.1~38.3	12	220.0	39.6
大雨	9.7—28.0	29.6~39.0	1.3~3.1	6.0~18.5	3	138.6	25.0
暴雨	0.3—8.8	62.0~73.0	7.0~219.0	35.2~147.0	2	174.0	31.3

为进一步探究坡面产流产沙的影响因素,对不同降雨特征参数与坡面水沙指标进行相关分析,结果见表 3。

表 3 各处理下研究区坡面水沙指标与降雨特征参数的相关分析

处理	水沙指标	降雨历时	降雨量	平均雨强	$I_{30}$
蔗地	侵蚀量	0.418	0.729**	-0.050	0.092
	径流量	0.514*	0.861**	0.111	0.280
撿荒地	侵蚀量	0.336	0.803**	0.175	0.318
	径流量	0.575**	0.882**	0.120	0.256
裸地	侵蚀量	0.517*	0.758**	-0.063	0.081
	径流量	0.442	0.706**	-0.070	0.106

注: $n=19$ ; \* 表示显著相关( $p<0.05$ ); \*\* 表示极显著相关( $p<0.01$ )。

如表 3 所示,不同处理下,降雨量与坡面径流量和侵蚀量均呈极显著性正相关关系,且相关系数均大于 0.7。表明降雨量是影响赤红壤坡地产流产沙最主要的因素。孙从建<sup>[7]</sup>、肖继兵等<sup>[8]</sup>在研究不同地区坡地土壤侵蚀时,同样指出降雨量与坡面产流产沙呈极显著的相关关系,与本文中研究结果一致。此外,李桂芳等<sup>[33]</sup>对该区域的研究表明, $I_{30}$  是影响坡耕地土壤侵蚀最重要的降雨特征参数,与侵蚀量、径流量均呈极显著的相关关系,且  $I_{30}$  整体上数值较大且分布均匀(1.6~89.6 mm/h)。而本研究中  $I_{30}$  与不同处理坡面径流量和侵蚀量均无显著相关关系,原因可能是本研究中除 5 月 12 日次降雨的  $I_{30}$ (147 mm/h) 较高外,其余处理下  $I_{30}$  均低于 40 mm/h。

不同处理下,坡面径流量和侵蚀量与降雨历时的相关性差异较大。降雨历时与蔗地和撂荒地处理的坡面径流量呈显著或极显著正相关关系,而与裸地则无显著性相关关系。降雨历时与裸地处理坡面侵蚀量表现为显著性相关关系,而与蔗地和撂荒地则无显著性相关关系。由此表明,降雨历时对蔗地与撂荒地处理产流影响较大,产沙影响较小;而对裸地产沙影响较大,产流影响较小。平均雨强仅仅反映的是某次降雨的总体特征,而不是降雨过程集中程度的差异,因而对坡面产流产沙影响较小<sup>[34]</sup>。周晗等<sup>[35]</sup>研究了晋西黄土区不同降雨因子对坡耕地土壤侵蚀的影响,同样指出平均雨强与坡面产流产沙相关性较低。

由图 5a 可知,不同处理下各降雨等级对坡面径流量的贡献率存在差异。蔗地、裸地和撂荒地处理下,中雨和暴雨是坡面径流的主要来源,其产生的径流量分别占观测期径流总量的 36.1%,43.2%,33.2%和 32.1%,35.4%,34.6%。而大雨和小雨产生的径流量分别占径流量的 3.5%~26.1%不等。而任雨之

等<sup>[9]</sup>对西南地区紫色土的研究指出,中雨降雨等级基本不造成侵蚀,坡面侵蚀主要来源是大雨和暴雨,本文研究结果与其存在明显不同。主要是因为观测期内降雨分布不同,本研究观测期内中雨降雨等级的降雨场次(12次)和降雨量均远高于大雨(3次)和暴雨(2次)降雨等级(表 2)。除降雨总量外,降雨场次对坡地产流也有一定的影响<sup>[11,13]</sup>。

蔗地、裸地和撂荒地处理下坡面侵蚀量则主要来源于暴雨、降雨等级(图 5b),分别占总侵蚀量的 83.4%,76.0%和 63.8%,其中 8月6日的 1场暴雨下,产生侵蚀量分别占总侵蚀量的 82.6%(蔗地),75.7%(裸地)和 50.7%(撂荒地),再次表明坡面产沙与高强度降雨关系密切。中雨或者大雨产生的侵蚀量则分别占总侵蚀量的 5.3%~24.3%不等。此外,暴雨下裸地的坡面侵蚀量分别是蔗地和撂荒地的 40.4倍和 79.3倍,说明有植被覆盖的坡地能够有效抵御高强度的降雨,且整体上自然植被的水土保持效果要优于作物。

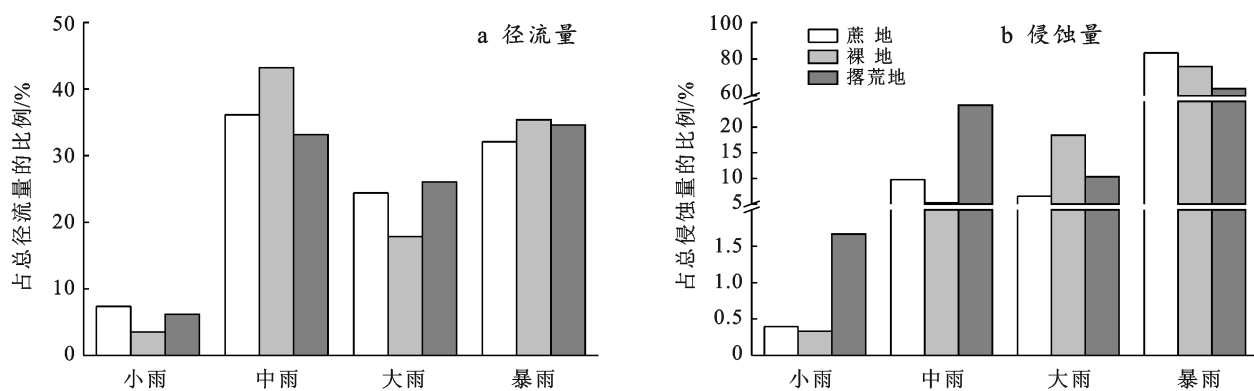


图 5 广西壮族自治区不同降雨等级坡面径流量和侵蚀量比例

### 3 结论

(1) 2020年5—10月,蔗地、裸地和撂荒地处理下坡面径流和侵蚀量整体上表现为先上升后下降的变化趋势,且主要集中在8月,分别占坡面总径流量和总侵蚀量的 38.5%,50.6%,42.2%和 91.9%,95.1%,59.3%。与裸地相比,蔗地和撂荒地能够有效降低坡面产流产沙量。裸地处理的坡面径流量分别为蔗地和撂荒地的 2.8和 4.3倍,侵蚀量分别为 2.2和 66.5倍。蔗地处理在前期(5—7月)抗侵蚀能力较弱,后期(8—10月)抗侵蚀能力较强,与地表覆盖关系密切。

(2) 坡面径流量和侵蚀量与侵蚀性降雨的分布特征密切相关。降雨量是影响坡面产流产沙最关键的因子,与坡面径流量和侵蚀量均呈极显著的正相关

关系;其次是降雨历时因子,仅显著影响一定处理下的产流产沙。不同处理下,中雨和暴雨降雨等级是坡面径流的主要来源;坡面产沙则主要来源于暴雨,其次是中雨和大雨。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Liang Yue, Jiao Juying, Tang Bingzhe, et al. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124694.
- [2] 张晶晶,王力.黄土高原高塬沟壑区坡面表层土壤水分研究[J].水土保持通报,2011,31(1):93-97.
- [3] Wang Zhijie, Jiao Juying, Rayburg S, et al. Soil erosion resistance of "Grain for Green" vegetation types under extreme rainfall conditions on the Loess Plateau, China

- [J]. *Catena*, 2016, 141: 109-116.
- [4] Dunkerley D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: Rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(15): 2211-2224.
- [5] 林锦阔, 李子君, 许海超, 等. 降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 7-12.
- [6] 卫伟, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J]. *生态学报*, 2006, 26(11): 3847-3853.
- [7] 孙从建, 侯慧新, 陈伟, 等. 黄土丘陵沟壑区典型农作物产流产沙效应研究[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 99-103.
- [8] 肖继兵, 孙占祥, 蒋春光, 等. 辽西地区农耕坡地土壤侵蚀影响因素及相关关系[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 13-19.
- [9] 任雨之, 郑江坤, 付滢, 等. 不同耕种模式下降雨等级对紫色土坡耕地产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(3): 90-98.
- [10] 陈美淇, 张卓栋, 王晓岚, 等. 西南黄壤和西北黄土坡面侵蚀产沙规律比较研究[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(6): 53-60.
- [11] 张彩云, 蒋勇军, 马丽娜, 等. 岩溶槽谷区不同土地利用方式下的坡地产流产沙规律[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 49-55.
- [12] 胡伟, 翟星雨, 李浩, 等. 黑土区农地集水区次降雨径流与输沙特征研究[J]. *土壤与作物*, 2019, 8(4): 405-414.
- [13] 郑江坤, 杨帆, 王文武, 等. 不同降雨等级下耕作措施对坡地产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(1): 38-45.
- [14] Wei Linhong, Zhang Bin, Wang Mingzhu. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 94(1/2/3): 54-62.
- [15] 殷水清, 薛筱婵, 岳天雨, 等. 中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(9): 105-113.
- [16] Zhang Baojun, Zhang Guanghui, Yang Hanyue, et al. Soil erodibility affected by vegetation restoration on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. *Soil Research*, 2018, 56(7): 712.
- [17] 肖继兵, 孙占祥, 刘志, 等. 降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 159-166.
- [18] 马璠. 作物植被对坡耕地土壤侵蚀的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [19] 马波, 吴发启, 马璠. 种植大豆地表土壤溅蚀效应及其空间分布特征[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 50-58.
- [20] 朱司航, 王红, 周大迈, 等. 石灰岩地不同作物坡面土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 12-18.
- [21] 马传功, 陈建军, 郭先华, 等. 坡耕地不同种植模式对农田水土保持效应及土壤养分流失的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(1): 72-79.
- [22] 罗兴录, 樊吴静, 杨鑫. 不同作物种植垦作对水土流失影响研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(36): 232-236.
- [23] 周一帆, 杨林生, 孟博, 等. 中国甘蔗主产区产量差及影响因素分析[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(11): 2377-2388.
- [24] 赵其国, 黄国勤. 广西红壤[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [25] 中华人民共和国水利部. 水土保持监测设施通用技术条件 SL342-2006 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [26] 水利部. 水土保持试验规程: SL 419-2008 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [27] 刘洁, 陈晓宏, 许振成, 等. 降雨变化对东江流域径流的影响模拟分析[J]. *地理科学*, 2015, 35(4): 483-490.
- [28] 杨任翔, 邱凡, 王坚桦, 等. 雨型和甘蔗种植对赤红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 65-70.
- [29] 王全九, 赵光旭, 刘艳丽, 等. 植被类型对黄土坡地产生流产沙及氮磷流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 195-201.
- [30] 沈紫燕, 王辉, 平李娜, 等. 前期土壤含水量对粘性红壤产流产沙及溶质运移的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 58-62.
- [31] 张向炎, 史学正, 于东升, 等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 23-29.
- [32] 赵娅君, 吴发启, 徐宁, 等. 不同雨强下各生育期玉米坡耕地的侵蚀产沙研究[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 23-28.
- [33] 李桂芳, 杨任翔, 谢福倩, 等. 不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤侵蚀特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 101-107.
- [34] 张思毅, 梁志权, 谢真越, 等. 植被调控红壤坡面土壤侵蚀机理[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 1-5.
- [35] 周晗, 严俊霞, 李洪建, 等. 晋西黄土区坡耕地不同下垫面水土流失对侵蚀性降雨的响应[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 7-12.