

雨型和甘蔗种植对赤红壤坡面土壤侵蚀特征的影响

杨任翔, 邱凡, 王坚桦, 许振欣, 黄夏凯, 李桂芳

(广西大学农学院, 南宁 530004)

摘要: 为探究南方高强度、高频次降雨下甘蔗种植对赤红壤坡面土壤侵蚀的影响, 基于径流小区原位观测试验, 分析不同种植方式下(顺坡和横坡)蔗地和裸坡坡面径流和侵蚀泥沙特征, 探讨甘蔗种植方式对坡面侵蚀产沙的影响, 获得影响赤红壤坡面侵蚀的主要雨型。结果表明: (1) 坡面径流量和侵蚀量均表现为裸坡 > 顺坡蔗地 > 横坡蔗地, 裸坡坡面径流量和侵蚀量是顺坡蔗地和横坡蔗地的 1.7~5.3 倍; 顺坡蔗地坡面径流量和侵蚀量是横坡蔗地的 1.9、2.3 倍。(2) 次降雨条件下, 裸坡坡面径流量与侵蚀量均整体高于蔗地处理, 而顺坡蔗地整体上大于横坡蔗地, 但二者差异随甘蔗生长逐渐缩小。(3) A 型雨(中历时、小雨强、小雨量)发生频次最高, 但 B 型雨(短历时、大雨强、中雨量)是引起裸坡和顺坡蔗地坡面产流产沙的主要雨型, 径流量和侵蚀量分别占总量的 49.9%, 57.6% 和 62.3%, 64.2%; D 型雨(长历时、极大雨强、极大雨量)是造成横坡蔗地坡面水土流失严重的主要雨型, 由其产生的坡面径流量和侵蚀量分别占总量的 49.5% 和 72.2%。研究结果可为明晰南方赤红壤区蔗地土壤侵蚀特征及防治提供理论依据。

关键词: 雨型; 甘蔗种植; 赤红壤; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0065-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.01.009

Effects of Rainfall Pattern and Sugarcane Planting on Soil Erosion Characteristics of Lateritic Red Soil Slope

YANG Renxiang, QIU Fan, WANG Jianhua, XU Zhenxin, HUANG Xiakai, LI Guifang

(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004)

Abstract: In order to explore the influence of sugarcane planting on the soil erosion of lateritic red soil slope under high intensity and high frequency rainfall in southern China, we based on the in-situ observation test of runoff plot, analyzed runoff and erosion characteristics of bare slope and sugarcane land that under different planting methods (down-slope and cross-slope), and discussed the effects of sugarcane planting on slope erosion. At the same time, we obtained the main rainfall patterns that affecting the slope erosion of lateritic red soil. The results showed that: (1) The runoff amounts and sediment yields were both showed that bare slope > down-slope sugarcane planting slope > cross-slope sugarcane planting slope. The runoff amounts and sediment yields of bare slope were 1.7 ~ 5.3 times of the down-slope and cross-slope sugarcane planting slope. The runoff amount and sediment yield of down-slope sugarcane planting slope were 1.9 and 2.3 times of the cross-slope sugarcane planting slope. (2) Under different rainfall events, runoff amount and sediment yield of bare slope were higher than all sugarcane planting slopes, and the runoff amount and sediment yield of down-slope were larger than that of the cross-slope. However, the difference between the two sugarcane lands decreased with the sugarcane growth. (3) The highest frequency rainfall pattern was type A (mid duration, low rainfall intensity, low rainfall depth). However, type B (short duration, strong rainfall intensity and medium rainfall depth) was the main rainfall pattern that caused runoff and erosion in bare slope and down-slope sugarcane planting slope, the runoff and erosion accounted for 49.9%, 57.6% and 62.3%, 64.2%, respectively. Type D (long duration, extremely strong rainfall intensity and extremely great rainfall depth) was the main type that caused the soil and water loss in cross-slope sugarcane planting slope, and the

收稿日期: 2020-06-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(41967010); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA138024); 广西科技基地和人才专项(桂科AD17195060)

第一作者: 杨任翔(1994—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: yr340121@163.com

通信作者: 李桂芳(1987—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀及其环境效应研究。E-mail: lifangdyx@163.com

runoff amount and sediment yield caused by the rain of type D accounted for 49.5% and 72.2% respectively. The results can provide a theoretical basis for clarifying the mechanism and control of soil erosion on the sugarcane land in the lateritic red soil region of southern China.

Keywords: rainfall pattern; sugarcane planting; lateritic soil; soil erosion

南方红壤对我国农业乃至整个国民经济的持续发展和人民生活水平的提高具有重要作用^[1-2]。由于红壤分布区独特的自然地理环境,高强度降雨及不合理的耕作措施等,使得我国南方红壤区的水土流失问题日益严重^[3]。坡面土壤侵蚀受降雨特征、地形、植被和土壤类型等多种因素共同影响^[4-5],其中降雨是导致坡面水土流失最主要的因素之一,是引起坡面土壤侵蚀的动力来源^[6]。降雨量、降雨历时、雨强等特征参数的不同,其对坡面土壤侵蚀的影响也不同^[7]。众多学者根据降雨量、降雨历时和降雨强度等参数对自然降雨进行雨型划分,探讨雨型对坡面土壤侵蚀的影响。Fang 等^[8]对黄土高原地区的次降雨研究表明,短时、高强度降雨是造成该区土壤侵蚀的主要雨型。Peng 等^[9]研究表明,西南岩溶区坡地土壤侵蚀主要由大雨量、中历时、大雨强的雨型贡献。而对于南方红壤区,高频次、短历时、小雨量、大雨强是造成红壤裸露坡地土壤侵蚀的主要降雨类型^[1]。研究区不同,雨型特征及其对坡面侵蚀的影响也明显不同。

作物种植对坡耕地的土壤侵蚀特征具有显著影响^[10],作物类型、耕作方式等对坡耕地土壤侵蚀的影响一直备受关注^[11-12]。王双等^[13]研究表明,玉米和花生种植均可以一定程度减缓黄壤的坡面侵蚀,但不同作物的减蚀效果不同^[14]。甘蔗是我国最主要的糖料作物^[15],2018 年广西甘蔗种植面积达 88.6 万 hm^2 ,占全国甘蔗种植总面积的 63.0%^[16]。野外调查表明,甘蔗生长周期长,且主要种植在旱作坡耕地上,种植方式以顺坡为主,因此大规模的甘蔗种植必然对区域土壤侵蚀产生影响。已有研究^[2]表明,与横坡耕作相比,顺坡耕作的侵蚀量明显较大。我国赤红壤分布区具有降雨集中,降雨量大且降雨侵蚀力大等特征^[1],此条件下坡耕地土壤侵蚀的特征又将如何变化,目前尚不清晰。基于此,本文以广西赤红壤蔗坡耕地为研究对象,通过径流小区原位观测试验,分析不同雨型和甘蔗种植方式(横坡和顺坡)下赤红壤坡耕地产生沙特征,探讨甘蔗种植对赤红壤坡地土壤侵蚀的特征影响,同时获得影响赤红壤蔗地坡面土壤侵蚀的主要雨型。研究结果可为明晰区域土壤侵蚀机理及坡耕地水土流失防治提供理论依据。

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南宁市,试验地点位于

广西大学校内农科试验基地(108°17'38"E,22°50'59"N)。研究区属亚热带季风气候区,年平均降水量 1 304 mm,且降雨集中于 5—9 月,达全年降水量的 70%左右^[17],年均气温 22 °C,年均相对湿度为 79%。试验土壤类型为赤红壤,质地为黏性中壤土,土壤母质为第四纪红黏土,土壤容重为 1.2~1.3 g/cm^3 ,土壤 pH 为 6.7,有机质含量 6.6 g/kg ,全氮含量 1.3 g/kg ,铵态氮含量 13.1 mg/kg ,硝态氮含量 24.7 mg/kg ,全磷含量 0.6 g/kg 。

1.2 试验处理

试验共设 6 个径流小区,小区坡度为 10°,坡长 5 m,宽度 2 m。小区底部修建出水口,出水口处安置矩形集流槽,用于收集降雨过程中坡面径流泥沙样。试验以裸坡为对照,布设顺坡与横坡种植方式,每种处理设置 1 个重复。供试甘蔗品种为“桂柳 05136 号”,于 2019 年 5 月 8 日播种。采用双芽段单行双株种植,顺坡种植 2 列,列宽为 1 m,横坡种植 5 行,行距为 1 m。施肥量为氮肥(N)360 kg/hm^2 ,磷肥(P_2O_5)90 kg/hm^2 ,钾肥(K_2O)75 kg/hm^2 ,其中氮肥与钾肥按基肥 30%+追肥 70%施用,磷肥全部作基肥施用。其他田间管理措施均按当地农耕习惯进行。

1.3 研究方法

试验采取径流小区野外原位观测法,主要观测径流小区甘蔗生长、降雨、土壤以及坡面侵蚀状况,观测时间为 2019 年 5—10 月,包含萌芽期、苗期、分蘖期和伸长期 4 个甘蔗生长时期。次降雨结束后,测定集流槽内水深,将集流槽内径流与泥沙充分搅匀后,用 500 mL 塑料瓶采集坡面径流泥沙样,每次采集 1.5 L。静置样品,待样品充分沉淀后,滤除上清液,以烘干法(105 °C)测定其中泥沙量,并参照《径流小区和小流域控制站监测手册》^[18]计算次降雨下坡面径流量、土壤流失量、含沙浓度等参数。

径流小区附近配备有自记雨量器,记录降雨参数。由自记雨量器收集的降雨资料可获得日降雨量、降雨过程参数(5 min 间隔)、次降雨起止时间、降雨历时、次降雨量、平均雨强、最大 30 min 降雨强度(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^[19]。本研究采用 K-均值分类法划分雨型^[8],以降雨量、降雨历时、最大 30 min 降雨强度为特征指标,将侵蚀性降雨分为 4 类雨型。

1.4 数据处理

利用 SPSS 19.0 进行数据的聚类分析与显著性

分析;利用 Origin 2018 和 Microsoft office 2013 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

图 1 为研究区 2019 年 5—10 月降雨量分布。观测期降雨总量为 753.0 mm,其中,7 月降雨量最多,其次为 8,6 月,降雨量分别为 187.8,170.4,162.4 mm,分别占观测期总降雨量的 24.9%,22.6%和 21.6%;9 月降雨量最小,仅为 42.0 mm。观测期内共发生次降雨 94 场,降雨量变化范围为 0.2~56.4 mm,最大次降雨发生在 5 月 28 日。

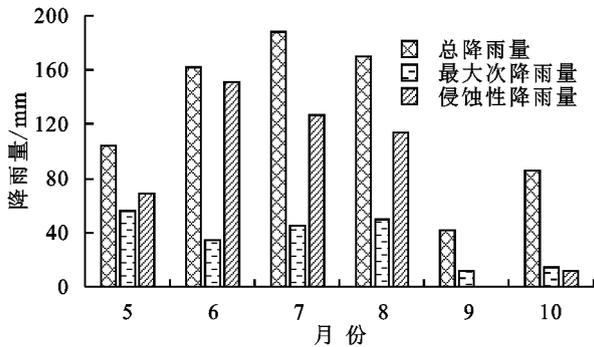


图 1 2019 年研究区 5—10 月降雨量

94 场次降雨中侵蚀性降雨共 21 场,降雨量变化

范围为 3.0~56.4 mm,总量为 472.8 mm,占观测期总降雨量的 62.8%。5—10 月中,除 9 月无侵蚀性降雨外,其余各月均有 1 场以上侵蚀性降雨,侵蚀性降雨量分别为 69.0,151.2,126.6,113.8,12.2 mm。其中 6,7 月侵蚀性降雨量最大,二者之和占总侵蚀性降雨量的 58.8%。已有研究^[14,20]表明,黄土丘陵沟壑区和太行山土石山区年均侵蚀性降雨量在 300 mm 左右,年均侵蚀性降雨次数为 10 场左右,与之相比,本研究区侵蚀性降雨不仅更为频繁,雨量也更大。

2.2 降雨类型划分

根据 K—均值聚类分析结果,4 类雨型特征见表 1。由表 1 可知,不同雨型的特点为 A 雨型为中历时、小雨强、小雨量,降雨历时介于 0.8~9.8 h, I_{30} 介于 4.3~18.8 mm/h,降雨量介于 3.0~14.6 mm;B 雨型为短历时、大雨强、中雨量,降雨历时介于 0.8~9.1 h, I_{30} 介于 28.3~54.4 mm/h,雨量介于 16.2~45.6 mm;C 雨型呈长历时、中雨强、大雨量,降雨历时介于 1.7~14.9 h, I_{30} 介于 13.6~32.4 mm/h,雨量介于 20.4~49.8 mm。D 型雨仅发生 1 场,历时为 7.4 h, I_{30} 为 73.6 mm/h,雨量为 56.4 mm,雨型特征表现为长历时、极大雨强、极大雨量,是研究区试验期间的极端降雨事件。

表 1 不同雨型降雨特征参数

雨型	降雨日期 (月-日)	降雨量/mm	降雨 历时/h	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	I_{30} / (mm·h ⁻¹)	EI_{30} / (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)
A	05-31	12.6	0.8	16.1	18.8	54.5
	06-01	14.6	7.8	1.9	8.7	22.4
	06-12	14.0	9.8	1.4	9.8	24.2
	06-23	10.6	2.5	4.2	7.0	12.8
	07-03	5.0	3.2	1.6	5.5	5.3
	07-04	3.4	3.9	0.9	4.3	3.2
	07-11	8.0	0.2	43.6	15.2	32.5
	08-29a	3.0	0.2	22.5	5.6	4.1
	10-21	12.2	4.0	3.1	11.8	27.3
B	06-13	23.4	1.2	19.8	34.1	205.7
	06-29a	29.2	0.8	38.9	54.4	435.3
	06-29b	34.4	1.5	23.5	32.0	291.7
	07-07	25.4	3.7	7.0	34.0	204.8
	07-14	45.6	9.1	5.0	39.6	460.3
	08-08	24.4	3.2	7.7	32.4	201.8
C	08-31	16.2	2.6	6.2	28.3	116.0
	06-25	25.0	6.7	3.7	24.4	137.1
	07-09	39.2	13.3	2.9	13.6	96.3
D	08-26	49.8	14.9	3.4	32.4	369.7
	08-29b	20.4	1.7	11.9	22.6	125.4
D	05-28	56.4	7.4	7.7	73.6	1097.8

注: I_{30} 和 EI_{30} 分别表示最大 30 min 降雨强度和降雨侵蚀力。下同。

由表 1 可知,在 21 场侵蚀性降雨中,A、B、C、D 4 种雨型降雨场次分别为 9,7,4,1 场,表明研究区 A

型雨发生频次最高,其次为 B 型雨,D 型雨最少。A、B、C、D 4 种雨型总降雨量分别为 83.4,198.6,134.4,

56.4 mm, 分别占侵蚀性降雨总量的 17.7%, 42.0%, 28.4% 和 11.9%, 表明研究区侵蚀性降雨量主要由 B 型雨贡献。从降雨侵蚀力来看, A 型雨降雨侵蚀力最低, 均在 $60 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h)}$ 以下, C 型雨次之, 在 $96.3 \sim 369.7 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h)}$, B 型雨降雨侵蚀力较高, 介于 $116.0 \sim 460.3 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h)}$, D 型雨降雨侵蚀力最高, 达 $1097.8 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h)}$, 表明, D 型雨侵蚀能力最强, 其次为 B 型雨, A 型雨侵蚀能力最弱。与北方黄土区的雨型研究相比^[8], 本研究区降雨更为频繁, 降雨量更大; 与江西、湖北红壤区雨型研究^[1, 21]相比, 虽然次降雨雨量接近, 但是本研究区降雨历时更短, 雨强也更大。

2.3 植蔗赤红壤坡面侵蚀特征

观测期内, 蔗地坡面侵蚀量和径流量与裸地存在明显不同(表 2)。不同处理下, 裸地坡面径流量显著高于横坡蔗地, 但与顺坡蔗地无显著差异。裸地坡面径流量

表 2 不同处理下坡面径流泥沙量

处理	径流系数	径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	含沙浓度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	侵蚀量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
裸地	0.37±0.04a	1746.9±183.9a	26.2±0.6a	45630.6±3751.5a
顺坡蔗地	0.22±0.04b	1038.6±205.5ab	19.5±3.0ab	19662.0±877.7b
横坡蔗地	0.11±0b	537.6±0.3b	16.0±0.4b	8582.2±170.8c

注: 表中数据为平均值±标准差; 同列不同小写字母表示各处理在 5% 水平上差异显著。下同。

2.4 次降雨条件下坡面产流产沙特征分析

为进一步探讨植蔗赤红壤坡面土壤侵蚀特征, 对 21 场侵蚀性降雨下坡面产流产沙特征展开进一步分析。由图 2 可知, 次降雨条件下, 赤红壤坡面径流量总体表现为裸地 > 顺坡蔗地 > 横坡蔗地, 各处理下坡面径流量呈现出较大的波动性。裸地坡面径流量在 $2.9 \sim 263.3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 顺坡蔗地坡面径流量介于 $1.0 \sim 260.8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 横坡蔗地坡面径流量在 $0.1 \sim 265.9 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。整体而言, 次降雨条件下, 在 6 月中旬之前, 不同蔗地处理坡面径流量均与裸地差异不大, 坡面径流量主要随降雨量增加而增加。而在 6 月中旬以后, 蔗地处理与裸地处理间差异逐渐明显。Patin 等^[12]研究指出, 不同作物生长期, 由于植被覆盖度不同, 降雨对坡面产流的影响存在明显不同。杨帅等^[10]研究表明, 玉米生长初期坡面产流较高, 随着玉米生长, 坡面产流逐渐减少。

不同种植方式下, 植蔗赤红壤坡面径流量差异主要在 6 月中旬至 8 月之前, 此阶段, 顺坡蔗地坡面产流量均明显高于横坡蔗地。6 月 29 日 2 场降雨下, 顺坡蔗地坡面径流量分别是横坡蔗地的 2.6, 5.9 倍, 主要原因是与顺坡种植相比, 横坡种植在一定程度上可以阻断坡面径流的连续性^[5]。而在 8 月之后, 由于此时 2 种蔗地处理下地表覆盖度均较高 (>60%), 使

分别是顺坡和横坡坡面下的 1.7, 3.2 倍。不同处理下坡面侵蚀量介于 $8582.2 \sim 45630.6 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 且 3 种处理之间存在显著性差异。裸地坡面侵蚀量最大, 横坡蔗地侵蚀量最小, 裸地坡面侵蚀量分别是顺坡和横坡的 2.3, 5.3 倍。与裸地相比, 坡面种植甘蔗可以在一定程度降低坡面产流产沙量, 且对坡面侵蚀量的降低更为明显, 但降低程度与甘蔗种植方式密切相关。顺坡蔗地坡面径流量和侵蚀量分别是横坡蔗地坡面下的 1.9, 2.3 倍, 且侵蚀量存在显著性差异, 主要原因是横坡种植可以拦截坡面径流, 降低径流流速, 不仅能降低坡面径流量, 也能减弱径流的挟沙能力, 达到减沙的效果^[3]。谢颂华等^[2]对南方红壤区耕作措施的水土保持效应研究表明, 横坡种植保水减流减沙效应均优于顺坡种植, 与本文研究结果相符。不同种植方式下蔗地坡面土壤侵蚀存在较大差异, 为减少蔗地土壤侵蚀, 有必要在南方蔗区推广横坡种植。

二者坡面径流量均有下降且差距减小, 而王双等^[13]研究四川黄壤坡耕地径流特征, 指出在玉米成熟期, 顺坡垄作地表径流显著大于横坡垄作, 这与本文中蔗地生长后期坡面径流特征不同, 一方面可能由于其玉米成熟期处在该区降雨最为频繁的时期(7—8 月), 与蔗地生育后期降雨特征存在差异; 另一方面, 本研究区甘蔗种植密度更大, 生长更为密集, 地表覆盖度更高, 导致蔗地与玉米地坡面径流特征对降雨的响应存在明显不同。

由图 2 可知, 次降雨条件下, 各处理坡面侵蚀量与坡面径流变化情况存在明显不同。次降雨下, 赤红壤坡面侵蚀量总体表现为裸地 > 顺坡蔗地 > 横坡蔗地。裸地坡面侵蚀量在 $0.1 \sim 15013.4 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 顺坡蔗地侵蚀量在 $0.3 \sim 5911.6 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 横坡蔗地侵蚀量介于 $0.2 \sim 6195.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。整体而言, 次降雨条件下, 6 月中旬之前, 不同蔗地处理下坡面侵蚀量均与裸地接近, 可能的原因是此时甘蔗主要处于生长期前期(萌芽期和苗期), 甘蔗植株较小, 地表覆盖度低 (<10%), 导致蔗地与裸地坡面侵蚀量差异不大。在 6 月中旬以后, 随着甘蔗的快速生长, 蔗地地表覆盖度迅速增加, 高大而密集的山蔗植株能有效降低降雨侵蚀力, 使得蔗地与裸地处理间坡面侵蚀量差异逐渐明显。肖继兵等^[22]在辽西褐土区坡耕地土壤侵蚀的研究中指出,

与裸地相比,种植作物能够降低坡耕地侵蚀量,但农作物只有达到一定覆盖度才能起到良好的保水固土作用。从图 2 还可看出,在 7—8 月,裸坡坡面侵蚀量均总体小于 7 月以前,除次降雨特征存在差异外,还有可能是 7—8 月研究区降雨频繁(降雨日数合计 32 天),此时坡面长期处于湿润状态,土壤黏结力较大且结

构稳定^[23],加之多次降雨,坡面土壤经冲刷、压实等作用提高了土壤抗蚀性^[24],从而减少了裸坡土壤流失量。由于对蔗地不定期除草等措施,导致坡面土壤和植被覆盖状况发生改变,使坡面产沙增加,甚至高于裸坡处理(7 月 14 日),因此,对作物种植坡耕地需合理安排田间农事活动,避免严重侵蚀事件的发生。

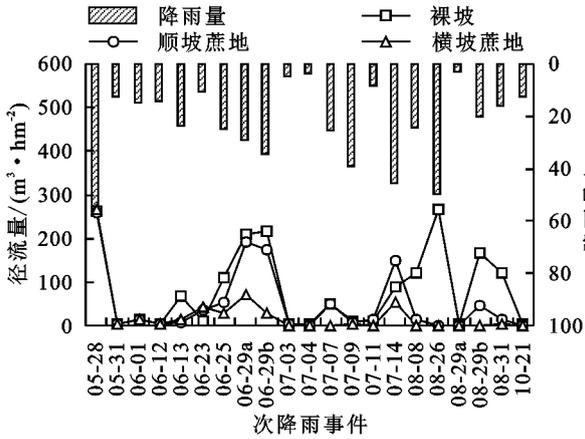


图 2 次降雨条件下不同处理坡面产流输沙特征

不同种植方式下,植蔗赤红壤坡面侵蚀量差异主要在 6 月中旬至 7 月底,在此期间,顺坡蔗地坡面侵蚀量均明显高于横坡种植处理。6 月 29 日 2 场降雨下,顺坡蔗地坡面侵蚀量分别是横坡蔗地的 4.5, 9.1 倍,横坡蔗地减沙效应明显优于顺坡蔗地。而在 8 月之后,不同种植方式下蔗地坡面侵蚀量均较小,且没有明显差异,这主要与蔗地后期甘蔗生长状况及降雨特征等因素有关。邱学礼等^[24]在云南红壤水土流失特征研究中指出,烤烟在生长前期更容易发生水土流失,烤烟进入成熟期后,受地表盖度的影响,顺坡垄作与横坡垄作处理侵蚀量均降低,且差异不再显著,与本研究结果类似,但是当降雨量接近时,烤烟各处理坡面侵蚀量远高于蔗地处理,作物类型和土壤类型的不同,坡面侵蚀特征也存在明显不同。因此有必要针对不同地区不同作物展开相应的研究。

由次降雨条件下坡面降雨量与产流产沙的对比分析可知,整体上随着降雨量的增加,坡面径流量和侵蚀量均不同程度的增加。但是,6 月 29 日的 2 场降雨降雨量(29.2, 34.4 mm)明显小于 7 月 9 日(39.2 mm)和 7 月 14 日(45.6 mm),而其产生的径流量和侵蚀量却明显高于后面 2 场降雨,降雨对坡面侵蚀不仅仅受降雨量变化的影响,还受到其他降雨特征的影响,因而有必要针对降雨特征对坡面侵蚀的影响展开进一步探讨。

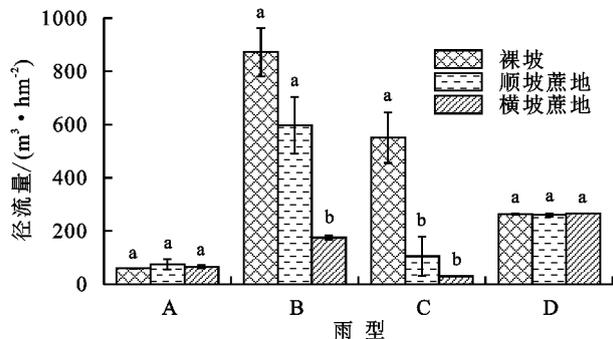
2.5 不同处理赤红壤坡面对降雨类型的响应

由图 3 可知,不同雨型下 3 种处理坡面径流量均存在差异。裸坡处理中,B 型雨(短历时、大雨强、中雨量)下坡面径流量最大,为 872.4 m³/hm²,其次为

C 型雨(长历时、中雨强、大雨量)和 D 型雨(长历时、极大雨强、极大雨量),A 型雨(中历时、小雨强、小雨量)最少,径流量分别为 551.2, 263.3, 60.0 m³/hm²,分别占裸坡总径流量的 49.9%, 31.6%, 15.1%, 3.4%。顺坡蔗地下,坡面径流量表现为 B 型雨>D 型雨>C 型雨>A 型雨,径流量分别为 597.8, 260.8, 105.4, 74.7 m³/hm²,分别占顺坡蔗地坡面径流总量的 57.6%, 25.1%, 10.1%, 7.2%。横坡蔗地下,D 型雨下产生的径流量最高,为 265.9 m³/hm²,分别是 A 型雨(66.0 m³/hm²)、B 型雨(175.5 m³/hm²)和 C 型雨(30.2 m³/hm²)下坡面径流量的 4.0, 1.5, 8.8 倍。可见,不同雨型对坡面径流影响存在明显不同,B 型雨对裸坡和顺坡蔗地坡面产流贡献最大,而 D 型雨是导致横坡蔗地坡面径流的主要雨型。高磊等^[20]研究表明,不同雨型下有植物措施坡面径流量均小于裸地坡面,雨型对坡面径流的影响存在明显差异,与本研究结果相符。

裸坡处理中,B 型雨下坡面侵蚀量最大,为 28 417.4 kg/hm²,其次为 C 型雨(10 640.5 kg/hm²)和 D 型雨(6 030.0 kg/hm²),A 型雨(542.7 kg/hm²)最少,分别占裸坡总侵蚀量的 62.3%, 23.3%, 13.2%, 1.2%。顺坡蔗地下,不同雨型下坡面侵蚀量由大到小表现为 B 型雨>D 型雨>C 型雨>A 型雨,分别占顺坡蔗地总侵蚀量的 64.2%, 30.0%, 3.3%, 2.5%。横坡蔗地下,D 型雨引起的侵蚀量最高,为 6 195.5 kg/hm²,分别是 A 型雨(46.0 kg/hm²)、B 型雨(2 242.9 kg/hm²)和 C 型雨(97.8 kg/hm²)产生侵蚀量的 134.6, 2.8, 63.4 倍。表明 B 型雨是造成裸坡和顺坡蔗地坡面侵蚀的主要雨型,而横坡蔗地坡面侵蚀

量主要由D型雨贡献。马星等^[19]对紫色土区坡耕地侵蚀沙特征研究表明,短历时、大雨强降雨型是造成坡面土壤侵蚀的主要降雨类型,雨型对坡面侵蚀的作用受到耕作方式及植被类型等因素的影响,本文研



究结果与之相似。此外,虽然极端降雨(D型雨)发生频次较低,但单场降雨对坡面侵蚀的贡献最大,因此在农业生产中需重点预防此类降雨造成的水土流失问题。

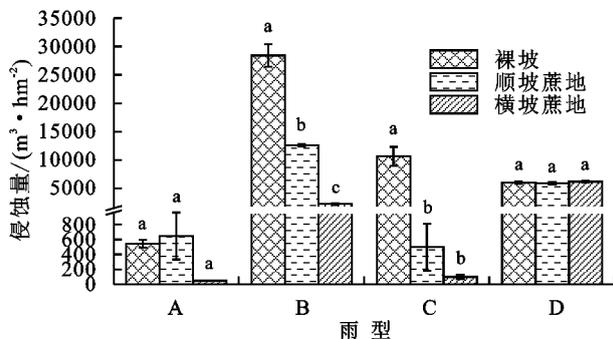


图 3 不同雨型下坡面径流量和侵蚀量特征

3 结论

(1)本研究区 2019 年 5—10 月降雨总量为 753.0 mm,侵蚀性降雨总量 472.8 mm。本研究区侵蚀性降雨集中于 6—7 月,占侵蚀性降雨量的 58.8%。

(2)不同处理下坡面径流量和侵蚀量由大到小均表现为裸坡>顺坡>横坡。与裸坡相比,蔗地可以在一定程度上降低坡面产流产沙量,但不同种植方式下,横坡种植坡面侵蚀量和径流量均最小。

(3)次降雨下,坡面径流量与侵蚀量随降雨和地表盖度的变化均呈波动变化趋势。整个观测期内,裸坡径流量与侵蚀量整体上高于植蔗坡地,6月中旬至8月之前,顺坡蔗地径流量与侵蚀量整体高于横坡蔗地,在8月以后,顺坡蔗地与横坡蔗地坡面径流量与侵蚀量均有减少,且两者差异减小。

(4)21 场侵蚀性降雨中 A 型雨(中历时、小雨强、小雨量)发生频次最高,其次为 B 型雨(短历时、大雨强、中雨量),D 型雨(长历时、极大雨强、极大雨量)最少。B 型雨是造成裸坡和顺坡蔗地坡面产流产沙的主要雨型,对坡面产流产沙贡献均超过 50%;D 型雨是造成横坡蔗地坡面土壤侵蚀的主要雨型。

参考文献:

[1] 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.

[2] 谢颂华,曾建玲,杨洁,等.南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应[J].农业工程学报,2010,26(9):81-86.

[3] 周怡雯,戴翠婷,刘窑军,等.耕作措施及雨强对南方红壤坡耕地侵蚀的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):51-56.

[4] Zhang Q W, Liu D H, Cheng S H, et al. Combined effects of runoff and soil erodibility on available nitrogen losses from sloping farmland affected by agricultural practices [J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 1-8.

[5] 安娟,于妍,吴元芝.降雨类型对褐土横垄坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):150-156.

[6] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, et al. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow [J].Catena, 2019, 173: 494-504.

[7] Dunkerley D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: Rainfall simulations on dryland soils, Fowlers Gap, Australia [J].Hydrological Processes, 2012, 26(15): 2211-2224.

[8] Fang N F, Shi Z H, Li L, 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: 1-8.

[9] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karts slopes in southwest China [J].Catena, 2012, 90: 53-62.

[10] 杨帅,尹忠,郑子成,等.四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J].水土保持学报, 2016, 30(4): 7-12.

[11] Wu X L, Wei Y J, Wang J G, et al. Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient [J].Catena, 2017, 156: 205-215.

[12] Patin J, Mouche E, Ribolzi O, et al. Effect of land use on interrill erosion in a montane catchment of Northern Laos: An analysis based on a pluri-annual runoff and soil loss database [J].Journal of Hydrology, 2018, 563: 480-494.

[13] 王双,叶良惠,郑子成,等.玉米成熟期黄壤坡耕地径流及其氮素流失特征研究[J].水土保持学报, 2018, 32(6): 30-35.

[14] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型次降雨产流产沙特征[J].草地学报, 2019, 27(1): 28-34.

[15] Zu Q, Mi C R, Liu D L, et al. Spatio-temporal distribution of sugarcane potential yields and yield gaps in Southern China [J].European Journal of Agronomy, 2018, 92: 72-83.

- [5] Yao W Y, Xiao P Q, Shen Z Z, et al. Responses of runoff process and threshold of sediment generation for different vegetation-covered plot [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(12): 1438-1444.
- [6] 王健, 尹武君, 刘旦旦. 玉米苜蓿间作对黄土坡耕地降雨产流产沙的影响[J]. *节水灌溉*, 2011(8): 43-46, 54.
- [7] 任雨之, 郑江坤, 付滢, 等. 不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 30-38.
- [8] 边锋, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 11-16.
- [9] 王磊, 何超, 郑粉莉, 等. 黑土区坡耕地横坡垄作措施防治土壤侵蚀的土槽试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 141-148.
- [10] Gebreegziabher T, Nyssen J, Govaerts B, et al. Contour furrows for in situ soil and water conservation, Tigray, Northern Ethiopia [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(2): 257-264.
- [11] Liu Q J, Zhang H Y, An J, et al. Soil erosion processes on row sideslopes within contour ridging systems [J]. *Catena*, 2014, 115: 11-18.
- [12] Arnhold S, Ruidisch M, Bartsch S, et al. Simulation of runoff patterns and soil erosion on mountainous farmland with and without plastic-covered ridge-furrow cultivation in South Korea [J]. *Transactions of the Asabe*, 2013, 56(2): 667-679.
- [13] 卢齐齐. 人工模拟降雨条件下紫色土氮磷流失规律试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [14] 雷红富, 谢平, 陈广才, 等. 水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J]. *水电能源科学*, 2007, 25(4): 36-40.
- [15] 陈康, 苏佳林, 王延贵, 等. 黄河干流水沙关系变化及其成因分析[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(6): 19-26.
- [16] Wang L H, Dalabay N, Lu P, et al. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 147-156.
- [17] 郑子成, 林代杰, 李廷轩, 等. 不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 24-28.
- [18] Borselli L, Torri D, Poesen J, et al. Effects of water quality on infiltration, runoff and interrill erosion processes during simulated rainfall [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 26(3): 329-342.
- [19] 林庆明, 丁文峰, 张长伟, 等. 模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 16-21.
- [20] Vermang J, Norton L D, Huang C, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 903-916.
- [21] 李坤, 姚文艺, 肖培青, 等. 植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展[J]. *中国水土保持*, 2017(3): 27-30.
- [22] 宋玥, 张忠学. 不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 14-16, 25.
- [23] 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.
- [24] 张佳琪, 王红, 张瑞芳, 等. 雨强对片麻岩坡面径流养分流失规律的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 42-45, 51.
- [25] Seeger M. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations [J]. *Catena*, 2007, 71: 60-67.
- [26] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 401-407.
- [27] 安娟, 卢嘉, 郑粉莉, 等. 不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 100-104.
- [28] 董元杰, 付伟章, 陈为峰, 等. 鲁中山区小流域坡面土壤侵蚀产流、产沙及侵蚀方式变化过程的研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(1): 185-188.
- [29] 马悦, 郭年冬, 张瑞芳, 等. 片麻岩坡面花生不同生长时期水土及养分流失规律[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 304-309.
- (上接第 70 页)
- [16] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [17] 杜懿, 麻荣永. 1961—2016 年南宁市年降雨量变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 136(6): 53-58.
- [18] 水利部水土保持监测中心. 径流小区和小流域水土保持监测手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [19] 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.
- [20] 高磊, 饶良懿, 崔飞波, 等. 太行山土石山区侵蚀性降雨对典型植物措施产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 8-14.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 邱学礼, 段宗颜, 胡万里, 等. 降水特征与农作处理对坡耕地水土流失的动态研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 85-88.