

杨翠红,周小洪,郭 豪,等. 甘蔗种植配置模式对坡面沟蚀及土壤有机碳流失的影响研究[J]. 江苏农业科学,2023,51(14):240-249.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.14.032

# 甘蔗种植配置模式对坡面沟蚀及土壤有机碳流失的影响研究

杨翠红,周小洪,郭 豪,王 旭,吴宗猛,杨江怡,陈婷婷,李 勇,黄智刚

(广西大学农学院/广西农业环境与农产品安全重点实验室,广西南宁 530004)

**摘要:**坡面沟蚀引起泥沙及有机碳流失入河,导致土壤退化,造成农田耕地质量下降等一系列环境问题。探明甘蔗种植配置模式对坡面沟蚀及土壤有机碳流失的影响,对提升蔗区农田耕地质量具有重要意义。本研究在广西甘蔗种植小流域,基于农民甘蔗种植情况选择了 7 种甘蔗种植配置模式处理,在不同甘蔗生长时期(苗期、分蘖期、伸长期和成熟期)进行坡面侵蚀沟测量,同时分析有机碳流失及其影响因素。结果表明,7 种配置模式中,宿根横坡模式(PC)在不同甘蔗生长时期的沟蚀量与有机碳流失量最低,其沟蚀量与土壤有机碳流失量分别在  $2.6 \sim 15.6 \text{ t/hm}^2$  和  $38.3 \sim 217.2 \text{ kg/hm}^2$  之间;新植顺坡模式(RS)在不同甘蔗生长时期的沟蚀量与有机碳流失量均最大,其流失量分别在  $2.6 \sim 25.1 \text{ t/hm}^2$  和  $46.9 \sim 520.9 \text{ kg/hm}^2$  之间,比其他模式分别高了  $5.1\% \sim 142.9\%$  和  $4.1\% \sim 144.1\%$ 。受不同配置模式的影响,在苗期与分蘖期,地面凋落物覆盖度和甘蔗根系密度是影响沟蚀与土壤有机碳流失的重要因素。合理的甘蔗种植配置模式可以有效减少坡面沟蚀和土壤有机碳流失,提高农业生态环境质量与经济效益。

**关键词:**甘蔗坡面;沟蚀;配置模式;不同生长时期;有机碳流失

**中图分类号:**S157.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)14-0240-10

甘蔗是全球重要的糖料和能源作物,种植面积约为  $2\ 600 \text{ 万 hm}^2$ ,蔗糖产量占全球食糖量的  $60\%^{[1-2]}$ 。近年来,随着糖类需求的增长,甘蔗种植规模不断扩大,种植区域逐渐从平原地区往山坡、林地扩展<sup>[3-4]</sup>。然而,甘蔗种植规模的扩大破坏了原有森林草地等的土壤结构,加剧了甘蔗种植区的土壤侵蚀强度,尤其是沟蚀的发生,严重影响了农业生产的可持续性<sup>[5-6]</sup>。且随着甘蔗坡地种植规模的增大,土壤侵蚀也在增加<sup>[3,5]</sup>,土壤有机碳储量减少<sup>[7]</sup>,导致坡耕地生产力降低,造成大气  $\text{CO}_2$  浓度持续攀升<sup>[8-9]</sup>。侵蚀形成的细沟、浅沟会破坏土壤结构,不仅会导致表层土壤流失,土壤有机碳储量减少,降低农田耕地质量和土地生产力<sup>[7-9]</sup>;还会连结成临时水网,在降雨径流的作用下加快侵蚀土壤及其携带养分的迁移速率<sup>[10]</sup>。沟蚀是坡地土壤侵

蚀产沙的主要来源<sup>[11]</sup>。田磊研究发现,细沟侵蚀是黄土高原坡面侵蚀重要的形式之一,侵蚀量最高可占坡面土壤流失的  $90\%^{[12]}$ ;Capra 等研究发现,包括细沟、浅沟形成的短暂性沟蚀产沙量占土壤侵蚀产沙总量的  $20\% \sim 100\%^{[13]}$ 。然而,郑粉莉等研究认为,浅沟侵蚀与短暂性沟蚀均属沟蚀,其中浅沟由主细沟演变而来,并能发展为切沟,是一种沟渠发育的过渡状态,在农业耕作活动中容易被填埋<sup>[14-15]</sup>。广西作为我国最大的甘蔗生产基地,1985—2011 年间土壤侵蚀面积增加了  $4.7\% \sim 21.3\%^{[16-17]}$ 。该地区的甘蔗主要种植在地势起伏较大的丘陵坡地上,且甘蔗种植期与雨季重叠,水土流失的风险较高<sup>[18]</sup>。莫雅棋对广西客兰水库那辣流域坡面沟蚀的研究表明,沟蚀导致的泥沙养分流失入河是加剧广西甘蔗种植小流域农业面源污染的重要原因之一,合理的新植宿根比例可以有效减少坡面沟蚀的发生<sup>[5]</sup>。然而,广西地区关于甘蔗种植对土壤侵蚀影响的研究较为匮乏,特别是土壤有机碳流失的相关研究。因此,进一步探究甘蔗种植配置模式对坡面沟蚀及土壤有机碳流失的影响具有重要意义。

土壤性质、地形、降雨、种植与管理模式以及植物特性是影响坡面沟蚀的重要因素。Thomaz 等综

收稿日期:2022-08-30

基金项目:广西科技重大专项(编号:桂科 AA17202005-1);广西科技基地和人才专项(编号:桂科 AD17195098);广西自然科学基金重点项目(编号:2018JJD150014)。

作者简介:杨翠红(1999—),女,广西贵港人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与碳循环研究。E-mail:369309839@qq.com。

通信作者:黄智刚,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与农业面源污染方面研究。E-mail:hzg@gxu.edu.cn。

述巴西甘蔗土壤侵蚀状况发现,沙壤土比黏土更易流失,其年平均流失量为  $23 \text{ t/hm}^2$ , 占总土壤流失量的 77%, 土壤容重与渗透性影响侵蚀<sup>[19]</sup>。莫雅棋通过研究坡面新植与宿根甘蔗的空间分布对细沟侵蚀及养分流失的影响发现,新植甘蔗坡面年沟蚀量和有机碳流失量分别为  $43.20$ 、 $0.73 \text{ t/hm}^2$ , 比宿根甘蔗坡面分别高 163.4% 和 179.5%; 地面枯落物覆盖度以及甘蔗根系是控制坡面细沟侵蚀的主要因子,坡长和坡度在很大程度上也会影响坡面沟蚀量<sup>[5]</sup>。杨任翔等基于径流小区原位观测的试验结果表明,横坡种植比顺坡种植的水土保持效果更好,强降雨(历时长、雨强和雨量大)的雨型是导致水土流失的主要原因<sup>[20]</sup>。Abdalla 等在南非径流小区的试验结果显示,水土流失与植被覆盖呈显著负相关关系<sup>[21]</sup>,与 Wang 等基于  $^7\text{Be}$  示踪确定次降雨事件下广西甘蔗种植坡面的研究结果<sup>[22]</sup> 一致。因此,在自然降雨条件下,地形、坡面景观结构与土壤理化性质相近时,调控甘蔗种植与管理模式已成为控制甘蔗坡面侵蚀的主要措施。然而,在实际生产过程中,缺乏甘蔗种植与管理对沟蚀影响的相关研究,尤其是关于不同甘蔗生长时期坡面沟蚀及其影响因素的研究。

因此,本研究以广西客兰水库那辣小流域典型甘蔗种植坡面为研究对象,通过野外原位观测试验,分析包括甘蔗种植模式(新植和宿根)、种植方向(等高和顺坡)和种植坡位(上坡和下坡)耦合的配置模式对甘蔗种植坡面沟蚀的影响,旨在确定不

同甘蔗生长时期(苗期、分蘖期、伸长期、成熟期)下,不同配置模式坡面的沟蚀量及有机碳流失量,明确不同生长时期影响坡面沟蚀的主要因素,为广西甘蔗种植筛选出合适的配置模式,以减少坡面沟蚀及有机碳的流失,提高农业生态环境质量与经济效益。

## 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左江水系客兰水库水源区那辣流域( $107^{\circ}39'29'' \sim 107^{\circ}40'17'' \text{E}$ 、 $22^{\circ}20'36'' \sim 22^{\circ}20'50'' \text{N}$ , 图 1)。属亚热带季风气候,光热充足,雨热同期,多年平均降水量约为  $1\,100 \text{ mm}$ 。流域面积  $1.2 \text{ km}^2$ , 丘陵地貌,坡度在  $0 \sim 35^{\circ}$  之间;土壤类型为赤红壤,土壤全氮、全磷及有机质含量分别在  $0.9 \sim 1.6$ 、 $0.5 \sim 0.8$ 、 $17 \sim 28 \text{ g/kg}$  之间。2017 年底至 2018 年初,那辣流域田块扩增,甘蔗种植面积不断扩大,占比超过 80%。流域内甘蔗种植年限在 3~4 年,每年 3—12 月是甘蔗生长季,12 月至次年 3 月是甘蔗砍收季。

### 1.2 试验设计

本研究于 2021 年初在那辣流域甘蔗种植结束后,选择包括 2 个坡位(上、下坡位)、2 种植模式(新植和宿根,分别记作 R 和 P)和 2 个种植方向(等高种植和顺坡种植,分别记作 C 和 S)在内的 7 种甘蔗种植配置模式典型坡面,分别为全坡新植的全坡顺坡种植(RS)、上坡等高种植(RC-RS)、

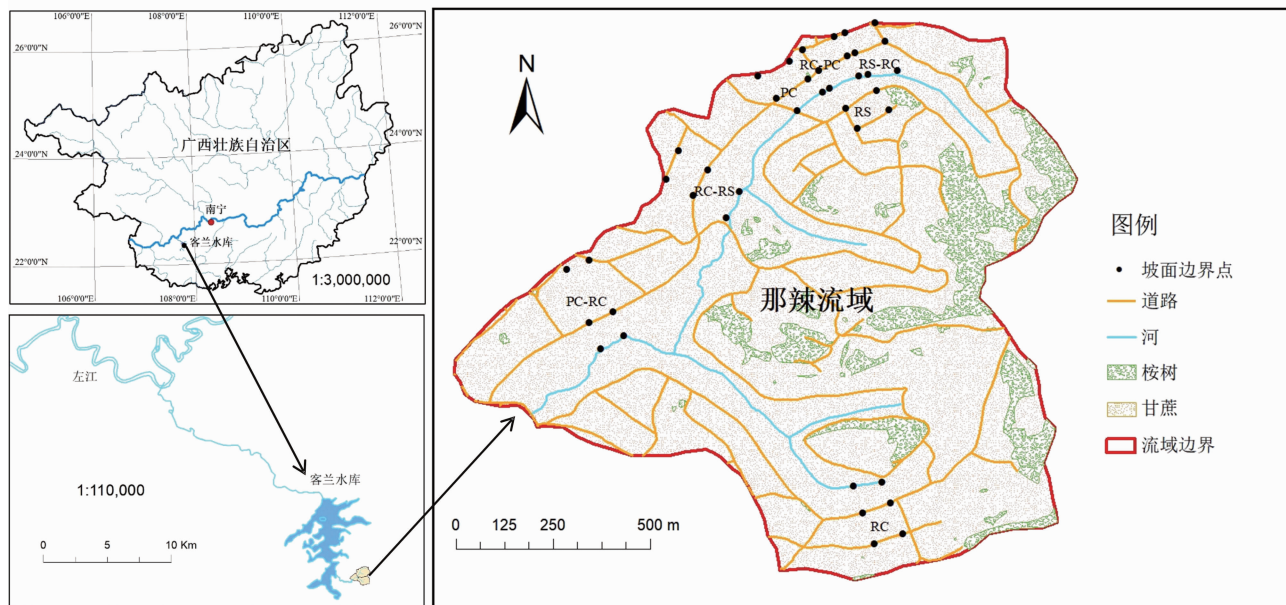


图1 那辣流域地理位置及坡面选择

下坡等高种植(RS - RC)和全坡等高种植(RC), 全坡等高种植的上坡宿根种植(PC - RC)、下坡宿根种植(RC - PC)和全坡宿根种植(PC)。每个坡面划分为3个面积相当的3个小区作为重复试验,

共21个试验区,在试验区的边界点插旗标记并记录全球定位系统(GPS)信息。试验坡面特征详见表1。

表1 试验坡面特征

配置模式	坡位	面积 (m <sup>2</sup> )	坡度 (°)	坡长 (m)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	分蘖率 (%)
RS	上	1 892 ± 110	10.2 ± 0.3	61 ± 2	1.43 ± 0.06	131 ± 13a
	下	1 757 ± 74	6.2 ± 0.3	54 ± 1	1.45 ± 0.11	117 ± 10abc
RC - RS	上	2 028 ± 68	15.3 ± 0.7	77 ± 2	1.50 ± 0.10	132 ± 7a
	下	2 410 ± 140	8.7 ± 0.2	93 ± 3	1.42 ± 0.14	122 ± 9a
RS - RC	上	1 376 ± 218	13.9 ± 0.5	56 ± 2	1.43 ± 0.05	126 ± 14a
	下	1 764 ± 67	5.1 ± 0.3	73 ± 10	1.41 ± 0.12	124 ± 12a
RC	上	2 010 ± 177	12.8 ± 0.2	80 ± 2	1.45 ± 0.16	114 ± 3abcd
	下	1 435 ± 91	6.3 ± 0.3	55 ± 1	1.41 ± 0.08	118 ± 5ab
RC - PC	上	1 467 ± 63	13.2 ± 0.2	54 ± 2	1.40 ± 0.05	124 ± 16a
	下	1 685 ± 67	4.2 ± 0.2	62 ± 3	1.66 ± 0.07	99 ± 12cd
PC - RC	上	4 292 ± 148	17.6 ± 0.4	148 ± 0	1.69 ± 0.07	101 ± 7bcd
	下	1 785 ± 44	8.2 ± 0.6	63 ± 2	1.37 ± 0.10	123 ± 5a
PC	上	1 770 ± 30	16.6 ± 0.7	59 ± 1	1.68 ± 0.07	101 ± 9bcd
	下	1 543 ± 824	8.3 ± 0.2	50 ± 2	1.70 ± 0.08	96 ± 11d

注:同列数据后不同小写字母表示不同配置模式在该项存在显著差异( $P < 0.05$ )。表3、表4同。

1.3 沟蚀测量及样品采集与分析

本试验在甘蔗种植后立即进行坡面初始侵蚀状况测量,而后在甘蔗生长的4个时期末期对坡面沟蚀进行测量与采样,一个时期的末期沟蚀量减去其初期沟蚀量即为该时期的沟蚀量。甘蔗生长期划分与降水量见表2。

表2 2021 年那辣流域各甘蔗生长期划分与降雨

生育期	日期划分 (年-月-日)	降水量 (mm)
苗期	2021 - 03 - 01—2021 - 05 - 15	204.2
分蘖期	2021 - 05 - 16—2021 - 06 - 15	95.6
伸长期	2021 - 06 - 16—2021 - 08 - 30	299.9
成熟期	2021 - 09 - 01—2021 - 12 - 31	385.0

1.3.1 侵蚀沟测量 首先确定侵蚀沟起点,然后用卷尺沿着侵蚀沟走向测定沟长,每间隔2~5 m 测量1次侵蚀沟的沟宽、沟深,同时用GPS定位记录侵蚀沟分布位置,确定每个试验小区的侵蚀沟数量。侵蚀沟体积计算如下<sup>[5]</sup>:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (tw_i + bw_i) \times d_i \times l_i。$$

(1)

式中: $V$ 为侵蚀沟的体积,m<sup>3</sup>;  $n$ 为侵蚀沟的数量,

条; $tw_i$ 为第*i*条沟截面的上部宽度,m; $bw_i$ 为第*i*条沟截面的下部宽度,m; $d_i$ 是第*i*条沟截面的高度,m; $l_i$ 是第*i*条侵蚀沟的长度,m。

1.3.2 土样采集与测定 在每条侵蚀沟的沟头、中部以及沟尾的沟壁处用环刀法分别采集2个土壤样品,分别用于测定土壤容重和土壤有机碳含量。其中,土壤容重以烘干称质量法测定,用重铬酸钾容量法测定土壤有机碳含量<sup>[23]</sup>。

1.3.3 坡面沟蚀及有机碳流失 坡面沟蚀量计算公式如下<sup>[5]</sup>:

$$EG = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i \times BD_i)}{A_x}。$$

(2)

式中: $EG$ 为坡面沟蚀量,t/hm<sup>2</sup>;  $V_i$ 为坡面第*i*条侵蚀沟的体积,m<sup>3</sup>;  $BD_i$ 为第*i*条侵蚀沟的土壤容重,g/cm<sup>3</sup>;  $A_x$ 是第*x*个试验区的面积,hm<sup>2</sup>。

土壤有机碳流失量计算公式如下:

$$OC = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i \times BD_i \times OC_i)}{A_x}。$$

(3)

式中: $OC$ 为坡面沟蚀导致的有机碳流失量,kg/hm<sup>2</sup>;  $OC_i$ 为坡面第*i*条侵蚀沟的土壤有机碳含量,g/kg。

1.3.4 地面凋落物覆盖度 以样带法测量甘蔗地面凋落物覆盖度(Glc)<sup>[5]</sup>。在试验区的每个半坡按上、中、下采集单位面积样带内的甘蔗枯叶等凋落物,称鲜质量后取 0.5 kg 鲜样经烘箱干燥后,记录干质量。地面凋落物覆盖度计算公式如下:

$$Glc = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \left( \frac{dr_i}{0.5} \times fr_i \right) \quad (4)$$

式中:Glc 为试验区的地面凋落物覆盖度,kg/m<sup>2</sup>;dr<sub>i</sub> 为坡面第 i 个单位面积上的凋落物干质量,kg;fr<sub>i</sub> 为坡面第 i 个单位面积上的凋落物鲜质量,kg。

1.3.5 甘蔗根系密度 参考 Li 等的方法<sup>[3]</sup>,采集、测定甘蔗根系密度。具体采样与处理步骤为:利用荷兰根钻(高 15 cm、直径 10 cm)在距甘蔗秆 5 cm 处分 2 次采集 0~30 cm 深度中的甘蔗根系样品。在试验区的每个半坡按上、中、下采集样品,每个时期采集 126 个样品。通过湿筛法获取甘蔗根系,烘干称质量。

甘蔗根系密度计算公式为

$$R_d = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \frac{Rw_i}{\pi \times r^2 \times h} \quad (5)$$

式中:R<sub>d</sub> 为试验区的甘蔗根系密度,mg/dm<sup>3</sup>;Rw<sub>i</sub> 为第 i 个坡面甘蔗根系的干质量,mg;r 为根钻的底面半径,取值为 0.5 dm;h 为取样深度,取值为 3 dm;π 取 3.14。

## 1.4 数据统计与分析

本研究数据处理在 Excel 2019 中完成,数据统计分析在 SPSS 25.0 中完成,通过 ArcMap 10.3 以及 Origin 2018 进行绘图。采用单因素方差分析(ANOVA)在 α=0.05 水平对不同的配置模式沟蚀特征、沟蚀量及有机碳流失量进行显著性比较;通过独立样本 t 检验比较不同种植模式、方向和坡位的沟蚀量差异;通过 Pearson 双变量相关分析法,分别建立沟蚀量与地面凋落物覆盖度、甘蔗根系密度之间的相关关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同甘蔗种植配置模式在各生长时期中的坡面侵蚀沟特征

由表 3 可知,不同配置模式苗期沟数在 8~16 条之间,新植蔗坡沟体回填后,分蘖期产生新沟 6~11 条,此后 2 个时期沟数增加 1~2 条;宿根坡地 4 个时期间沟数变化不大。

将每个全坡面区分出上坡和下坡,研究其沟体

表 3 不同甘蔗种植配置模式在各生长时期中的坡面侵蚀沟特征

配置模式	坡位	平均沟数(条)				平均沟密度(×10 <sup>5</sup> cm <sup>3</sup> )				平均沟密度(cm/m <sup>2</sup> )			
		苗期	分蘖期	伸长期	成熟期	苗期	分蘖期	伸长期	成熟期	苗期	分蘖期	伸长期	成熟期
RS	上	7±2bcd	4±1cd	5±1cde	5±1cde	6.5±2.0a	3.3±1.2d	5.6±1.3cdef	6.5±1.4bcd	5.3±0.5bc	2.2±0.3de	3.4±0.6cd	3.6±0.7bc
	下	9±1ab	7±2b	8±3b	8±3b	6.2±2.2a	4.0±0.3d	4.6±0.7def	5.6±0.9cde	7.1±0.4a	5.2±1.1a	6.0±1.6a	7.7±3.8a
RC-RS	上	5±0cde	3±1de	4±1e	4±1e	7.1±1.4a	4.7±0.6d	6.3±0.6bcde	6.9±0.4bcd	4.1±0.7cd	2.9±1.0cde	3.1±0.6cd	3.2±0.5bc
	下	10±3a	6±2bc	6±1c	6±1c	6.9±3.0a	4.7±1.6cd	6.9±0.8bcd	7.9±0.6abc	6.4±1.5ab	3.3±0.5bcde	4.1±0.9bc	3.9±0.5bc
RS-RC	上	5±1cde	3±2de	4±1de	4±1de	6.6±0.9a	3.3±1.1d	4.9±0.1def	5.6±0.2cde	4.7±0.2cd	2.8±0.1cde	3.7±0.8bcd	3.7±0.7bc
	下	7±2abc	5±1cd	6±0cd	6±0cd	5.8±1.1a	3.5±0.4d	4.1±0.7ef	4.9±0.5de	6.3±1.1ab	3.7±0.4abc	3.4±0.3cd	3.7±0.3bc
RC	上	5±1cde	3±1de	4±1e	4±1e	6.8±1.2a	4.8±0.9cd	4.8±1.1def	5.6±1.2cde	4.0±0.8de	2.2±0.9de	2.6±0.5cd	2.8±0.6bc
	下	5±3cde	3±1de	4±1de	4±1de	5.4±1.9a	3.7±0.8d	4.8±1.2def	5.6±1.2cde	5.7±0.6bc	2.8±1.1cde	3.2±0.6cd	3.2±0.4bc
RC-PC	上	4±1de	2±1e	4±1e	4±1e	6.9±2.2a	3.3±1.2d	3.4±0.3f	3.9±0.8e	4.8±0.3cd	1.9±0.3e	3.1±1.2cd	3.4±1.3bc
	下	5±1cde	5±1bc	6±1cde	6±1cde	5.8±0.5a	7.1±1.8abc	7.7±2.3abc	8.5±2.6ab	4.0±1.0de	4.4±1.4ab	5.0±1.1ab	4.8±1.0b
PC-RC	上	9±2ab	9±2a	10±1a	10±1a	7.6±2.8a	8.5±2.4a	9.9±2.0a	9.8±1.3a	3.8±0.8de	3.9±0.5abc	3.9±0.2bc	3.8±0.4bc
	下	5±1cde	3±1de	4±1e	4±1e	8.0±1.4a	4.3±1.4d	5.3±2.3cdef	6.4±2.5bcd	5.1±1.1bcd	2.2±0.7de	2.9±0.2cd	3.1±0.2bc
PC	上	4±1de	4±1cd	5±1cde	6±1cde	4.4±1.5a	5.1±1.2bcd	4.9±0.6def	5.2±0.8de	2.6±0.4e	2.8±0.4cde	2.4±0.7d	2.3±0.5c
	下	4±2e	5±2cd	5±2cde	5±2cde	7.5±2.0a	7.3±2.1ab	8.3±2.4ab	8.4±2.2ab	3.8±1.3de	3.6±1.0bcd	3.4±1.0cd	3.4±0.9bc

注:(1)新植整地后,侵蚀产生前,土地侵蚀背景值为 0;(2)宿根坡地在试验开始前已调查侵蚀情况作为背景值;(3)苗期、分蘖期交替之际,农民在新植蔗地对侵蚀沟进行过 1 次填埋,填埋后侵蚀背景值为 0。

积与沟密度。苗期的平均沟体积在  $4.4 \times 10^5 \sim 8.0 \times 10^5 \text{ cm}^3$  之间,但各配置模式之间的沟体积差异不显著。新植甘蔗坡面填埋侵蚀沟后产生的新生沟平均体积小于苗期,分蘖期后侵蚀沟体积则随甘蔗生长时期递进而增大。回填后,分蘖期时,新植坡面新产生的侵蚀沟平均体积在  $3.3 \times 10^5 \sim 4.8 \times 10^5 \text{ cm}^3$ ,小于宿根坡面的沟体积( $5.1 \times 10^5 \sim 8.5 \times 10^5 \text{ cm}^3$ );随着甘蔗生长时期的推进,沟体积逐渐增大,成熟期时,新植坡面平均沟体积为  $3.9 \times 10^5 \sim 7.9 \times 10^5 \text{ cm}^3$ ,宿根坡面平均沟体积为  $5.2 \times 10^5 \sim 9.8 \times 10^5 \text{ cm}^3$ 。

整个生长期,全坡新植顺坡模式(RS)下坡的平均沟密度大于其上坡及全坡宿根等高模式(PC),而PC的上、下坡沟密度无显著差异。宿根甘蔗种植坡面的平均沟密度在整个生长期变化不大,平均沟密度在  $2.6 \sim 5.1 \text{ cm/m}^2$  之间。苗期各配置模式下全坡新植 RC-RS、RS-RC、RC 的下坡沟密度大于

其上坡及宿根坡面,而分蘖期 RC-PC 全坡的下坡面沟密度大于上坡。在分蘖期到伸长期期间,新植坡面的平均沟密度变化比宿根坡面大,而到成熟期平均沟密度则不再变化。在成熟期,RS 下坡沟密度最大,为  $7.7 \text{ cm/m}^2$ ,显著大于其他坡面;PC 上坡沟密度最小,为  $2.3 \text{ cm/m}^2$ ,而其他坡面沟密度为  $2.8 \sim 4.8 \text{ cm/m}^2$ 。

## 2.2 不同甘蔗种植配置模式坡面沟蚀量与有机碳流失量

不同配置模式在不同生长期的坡面沟蚀量与有机碳流失量如图2、图3所示。结果显示,坡面沟蚀量随生长期递进而逐渐减少,有机碳流失量与沟蚀量变化趋势相同。苗期为沟蚀产生及有机碳流失的主要时期,沟蚀量为  $15.6 \sim 35.1 \text{ t/hm}^2$ ,占全生长期总沟蚀量的  $50.0\% \sim 53.9\%$ 。分蘖期与伸长期沟蚀量相近,两者共占总沟蚀量的  $40.0\%$  左右。成熟期的沟蚀量最小,仅为总沟蚀量的  $5.1\% \sim 8.4\%$ 。

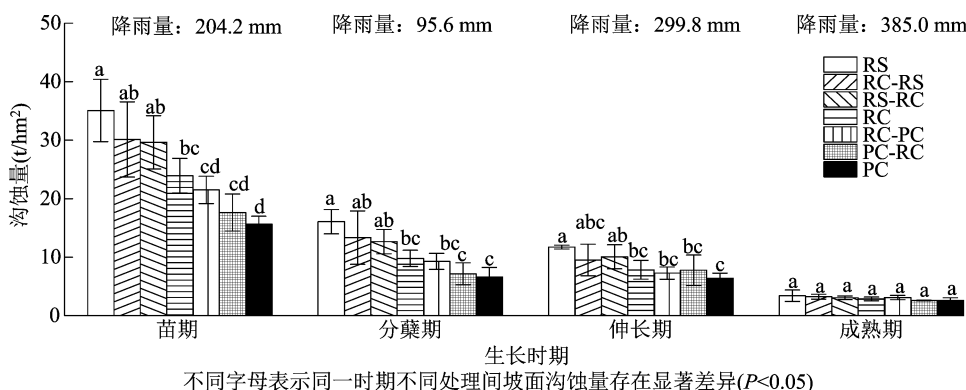


图2 不同甘蔗种植配置模式在不同生长时期坡面沟蚀量

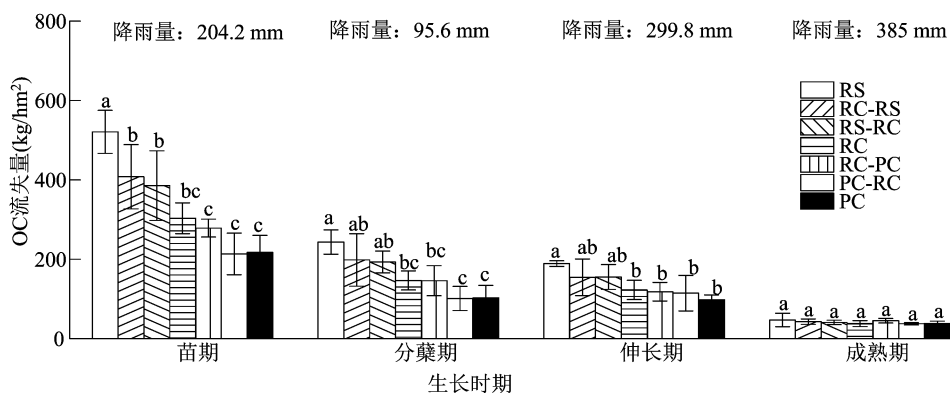


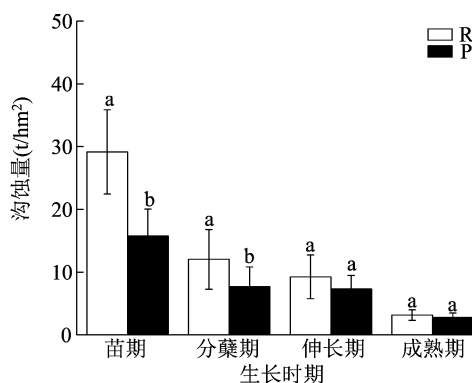
图3 不同甘蔗种植配置模式在不同生长时期坡面有机碳流失量

苗期各配置模式侵蚀量大小排序为  $RS > RC - RS > RS - RC > RC > RC - PC > PC - RC > PC$ 。全坡新植 RS、RC-RS、RS-RC 和 RC 这 4 个配置模式间,只有 RS 的沟蚀量显著高于 RC;全坡面进行等

高种植的情况下,相较于全坡新植 RC,全坡宿根 PC 的沟蚀量显著降低;全坡新植且半坡等高 RC-RS、RS-RC 的沟蚀量明显比半坡新植且全坡等高 RC-PC、PC-RC 剧烈。全坡宿根且等高种植时,

沟蚀量与养分流失最少,沟蚀量为  $15.6 \text{ t/hm}^2$ ,是其他模式的  $44.6\% \sim 88.7\%$ ,显著低于除 RC-PC、PC-RC 模式外的其他配置模式,其 OC 流失量为  $217.2 \text{ kg/hm}^2$ 。分蘖期时,沟蚀量最大的全坡新植顺坡 RS 沟蚀量为  $16.1 \text{ t/hm}^2$ ;全坡新植且含顺坡的 RS、RC-RS、RS-RC 的沟蚀量显著高于全坡等高并含宿根的配置 PC-RC、PC,是其  $1.8 \sim 2.4$  倍,宿根程度越高其与 RS 差异越大。分蘖期时全坡新植的坡面 RS、RC-RS、RS-RC、RC 的沟蚀量关系与苗期相同;有机碳流失量趋势与沟蚀量趋势完全一致,RS 坡面 OC 流失量为  $243.3 \text{ kg/hm}^2$ 。伸长期时,全坡新植的全坡顺坡 RS、上坡顺坡 RS-RC 的沟蚀量显著大于全坡宿根等高 PC;RS 的沟蚀量和有机碳流失量最大,分别为  $11.7 \text{ t/hm}^2$  和  $189.1 \text{ kg/hm}^2$ 。其他配置模式的沟蚀量和有机碳流失量分别是 RS 的  $54.5\% \sim 85.9\%$  和  $51.8\% \sim 82.1\%$ 。在成熟期,各个配置模式之间的沟蚀量与有机碳流失量无显著差异。沟蚀量范围在  $2.6 \sim 3.4 \text{ t/hm}^2$  之间,有机碳流失量在  $37.4 \sim 46.9 \text{ kg/hm}^2$  之间。

由表 4 可知,甘蔗生长期,不同配置模式坡面沟蚀量与有机碳流失量情况不同。各配置模式沟蚀量为  $31.2 \sim 66.3 \text{ t/hm}^2$ ,不同配置模式坡面沟蚀量排序为  $\text{RS} > \text{RC-RS} > \text{RS-RC} > \text{RC} > \text{RC-PC} > \text{PC-RC} > \text{PC}$ 。新植坡面中,半坡顺坡 RC-RS、RS-RC 的沟蚀量差异不显著;等高线种植时,全坡新植 RC 和上坡新植 RC-PC 的沟蚀量大小接近;和 PC 相比,下坡新植 PC-RC 并没有显著增加沟蚀量,其余配置之间均存在明显差异。全坡新植顺坡 RS 的沟蚀量最大,为  $66.3 \text{ t/hm}^2$ ,是其他配置模式的  $1.2 \sim 2.1$  倍,其 OC 流失量则达到了  $1000.1 \text{ kg/hm}^2$ 。



同一指标同时期不同小写字母代表 2 种植模式在该指标存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。图 5、图 6 同

图 4 不同种植模式坡面沟蚀及有机碳流失量

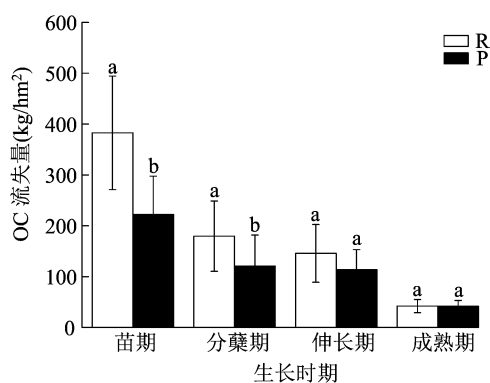
表 4 不同甘蔗种植配置模式沟蚀量与养分流失量

配置模式	沟蚀量 ( $\text{t/hm}^2$ )	有机碳流失量 ( $\text{kg/hm}^2$ )
RS	$66.3 \pm 8.2\text{a}$	$1000.1 \pm 103.6\text{a}$
RC-RS	$56.2 \pm 8.8\text{b}$	$804.6 \pm 120.6\text{b}$
RS-RC	$55.4 \pm 0.9\text{b}$	$774.7 \pm 41.8\text{b}$
RC	$44.4 \pm 1.0\text{c}$	$610.4 \pm 32.5\text{c}$
RC-PC	$41.2 \pm 3.3\text{cd}$	$587.7 \pm 77.9\text{cd}$
PC-RC	$35.2 \pm 2.8\text{de}$	$466.4 \pm 60.6\text{cd}$
PC	$31.2 \pm 2.6\text{e}$	$456.4 \pm 76.5\text{d}$

### 2.3 甘蔗种植配置模式对坡面沟蚀及有机碳流失的影响

如图 4 所示,苗期和分蘖期时,新植坡面沟蚀总量和 OC 流失总量显著高于宿根坡面 ( $P < 0.05$ );苗期新植坡面沟蚀量及有机碳流失量分别为  $29.2 \text{ t/hm}^2$ 、 $382.8 \text{ kg/hm}^2$ ,分蘖期新植坡面沟蚀量及有机碳流失量分别为  $12.1 \text{ t/hm}^2$ 、 $179.7 \text{ kg/hm}^2$ ;苗期时宿根坡面沟蚀量与有机碳流失量是新植的  $54.1\% \sim 58.1\%$ ,而分蘖期这个比例达到  $63.8\% \sim 67.2\%$ ;其他 2 个时期时,不同模式之间沟蚀量及有机碳流失量无显著差异。

如图 5 所示,顺坡种植的坡面苗期、分蘖期、伸长期沟蚀量分别是  $34.0$ 、 $15.0$ 、 $11.7 \text{ t/hm}^2$ ,显著高于等高种植坡面沟蚀量(苗期  $21.9 \text{ t/hm}^2$ 、分蘖期  $9.1 \text{ t/hm}^2$ 、伸长期  $7.4 \text{ t/hm}^2$ )。有机碳流失量与沟蚀量的趋势一致,苗期有机碳流失量为  $477.7 \text{ kg/hm}^2$ 、分蘖期为  $224.1 \text{ kg/hm}^2$ 、伸长期为  $188.4 \text{ kg/hm}^2$ ,均为同时期等高坡面的  $1.7$  倍。成熟期时,不同种植方向对沟蚀量及有机碳流失量无显著影响。



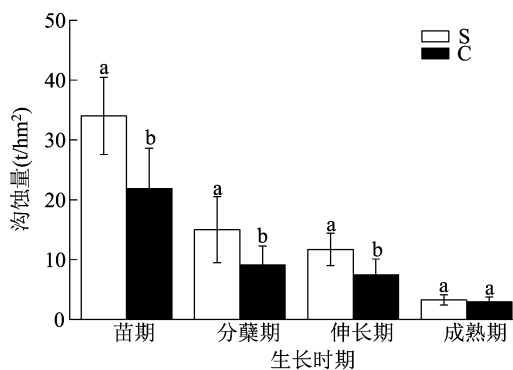


图5 不同种植方向坡面沟蚀及有机碳流失量

如图6所示,苗期和伸长期时,上、下2个坡位间的沟蚀量和有机碳流失量无显著差异。分蘖期和成熟期时,上坡的沟蚀量分别为8.8、2.6 t/hm<sup>2</sup>,显著低于下坡的沟蚀量(分蘖期12.8 t/hm<sup>2</sup>、成熟期

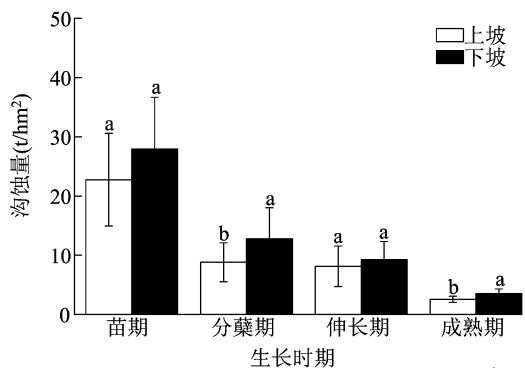
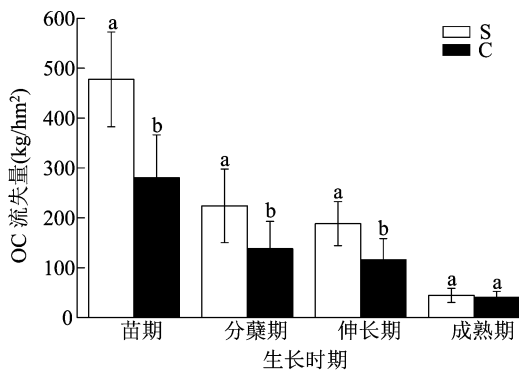
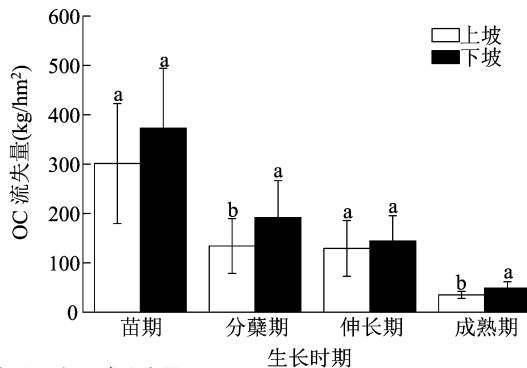


图6 不同坡位坡面沟蚀及有机碳流失量

3.5 t/hm<sup>2</sup>)。分蘖期时,上坡有机碳流失量为134.1 kg/hm<sup>2</sup>,比下坡低30.0%;成熟期时,上坡有机碳流失量是34.9 kg/hm<sup>2</sup>,比下坡低28.7%。



### 3 讨论

侵蚀沟特征变化是沟蚀程度的直观表征。本研究中,宿根坡面4个时期间的平均沟数变化不大,侵蚀沟数增加主要集中在苗期,分蘖期后沟数基本稳定不变;平均沟体积随时期推进而缓慢增加,但平均沟密度则呈现出先增加再减小的趋势。新植坡面中,侵蚀沟的数量、体积和沟密度在苗期达到最大,此后呈先减小再增大的趋势,在成熟期达到与苗期侵蚀沟相近的沟体积与沟密度。这可能与农民在苗期降雨结束后会填埋侵蚀沟,并进行培土起垄等措施有关,人为填埋会导致分蘖期时沟数量、体积与密度较小<sup>[5]</sup>。分蘖期后,新植坡面产生大量新沟,新产生的侵蚀沟数量随甘蔗生长期变化无明显增长,但侵蚀沟体积在降雨径流的作用下迅速扩张,这可能与土壤质地有关,新植坡面的土壤质地疏松,容重较小,易被降雨径流冲刷<sup>[3]</sup>。整体而言,新植坡面的沟数量、沟密度比宿根坡面大,这与莫雅棋的研究结果<sup>[5]</sup>一致;两者的沟体积在苗期

无差异,但新植坡面的沟体积在分蘖期、伸长期和成熟期小于宿根坡面,这是由于苗期、分蘖期交替之际,农民在新植蔗地对侵蚀沟进行过1次填埋,但已形成的浅沟、细沟很难通过1次填埋措施消除,恢复平坦坡面<sup>[3,10,14]</sup>。

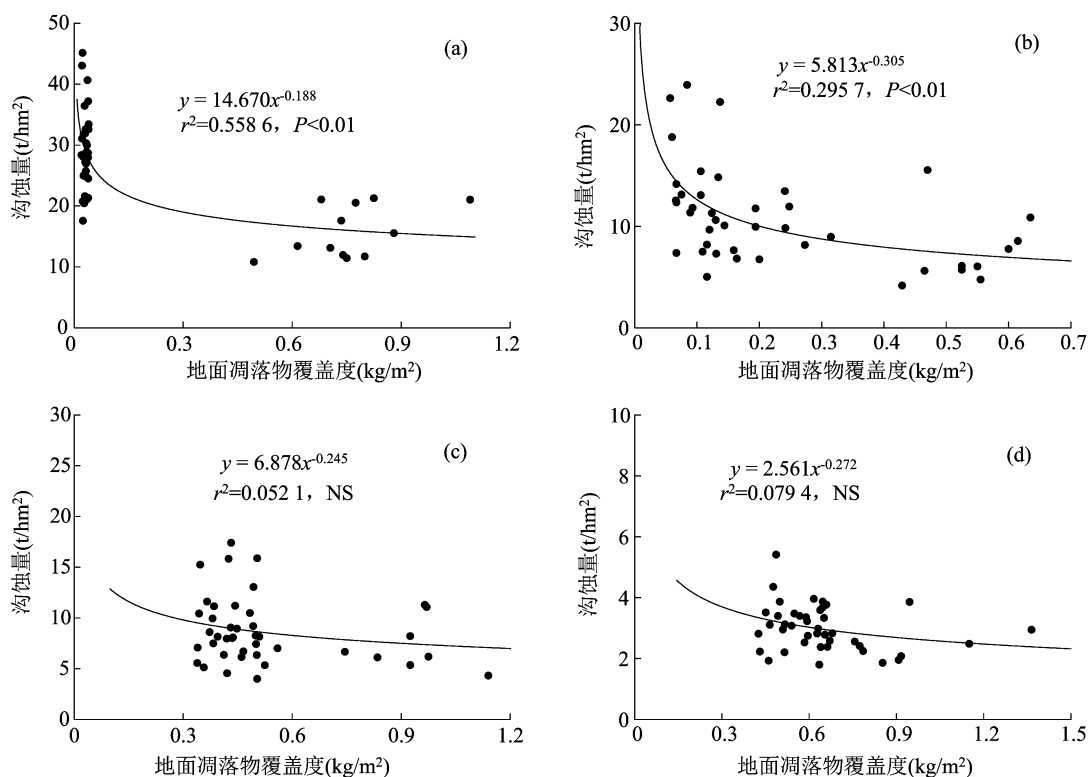
本研究中,不同配置模式坡面的沟蚀量与有机碳流失量趋势一致,二者随甘蔗种植时期、种植模式变化而变化。苗期是沟蚀与有机碳流失发生的主要时期,分蘖期和伸长期次之,成熟期最少;这与Li等在该流域监测的不同甘蔗生长时间的泥沙入河负荷趋势基本一致(初夏:27.3%;晚秋:34.1%;初秋:37.5%;晚秋:1.1%)<sup>[24]</sup>。RC的坡面沟蚀量和有机碳流失量比PC分别高了42.3%和33.7%,说明新植甘蔗坡面的沟蚀量和有机碳流失量显著大于宿根甘蔗坡面,这与Li等在该流域中的研究结果<sup>[3,22]</sup>相似。研究表明,植被在侵蚀过程中发挥着重要作用,而土壤有机碳流失与侵蚀呈正相关关系<sup>[8,25]</sup>。一方面,植被覆盖可以在土壤表面形成有效保护层,避免雨滴与土壤的直接接触,削弱地表



雨滴溅蚀、截断径流,阻碍和拦截侵蚀泥沙和表层土壤有机碳流失以达到水土保持的目的<sup>[3,5,22]</sup>;另一方面,植物通过根系固持土壤颗粒,增加土壤入渗能力、稳定土壤结构,提高土壤抗冲性<sup>[3,5,25]</sup>。本研究中,坡面沟蚀量与凋落物覆盖度、根系密度回归分析结果(图 7、图 8)显示,苗期、分蘖期的甘蔗地面凋落物覆盖度、根系密度与坡面沟蚀量呈显著负相关( $P < 0.01$ ),地面凋落物覆盖度及根系密度越大,坡面沟蚀量越小;而伸长期和成熟期的地面凋落物覆盖度与根系密度对不同配置的坡面沟蚀量无影响。甘蔗新植时,焚烧枯叶及翻耕等活动会极大地降低新植甘蔗坡面的地面凋落物覆盖度,因此苗期及分蘖期时新植甘蔗坡面抵抗雨滴溅蚀和径流冲刷的能力较差;而宿根甘蔗坡面在甘蔗收获后采取免耕措施,地面枯落物覆盖度较高,表层土壤有机碳含量也比新植坡面高,土壤稳定性较强,降雨径流剥离土壤的能力较弱<sup>[3,5,22]</sup>。此外,苗期和分蘖期新植甘蔗坡面的甘蔗根系发育程度与宿根坡面相比较差,土壤抗冲性较弱,因此,苗期和分蘖期时坡面沟蚀剧烈。新植坡面沟蚀量在苗期时是宿根坡面的 1.9 倍,在分蘖期时则减小到 1.5 倍,这可能与甘蔗分蘖率有关。郭豪通过分析甘蔗不同播

期的生长状况发现,甘蔗的出芽率、分蘖率以及植被覆盖度均会随着甘蔗播期推迟而降低<sup>[26]</sup>,而本研究中宿根坡面的甘蔗分蘖率较低,低分蘖率可以降低覆盖度、增加沟蚀量和有机碳流失量,这在一定程度上抵消了新植与宿根坡面的沟蚀量差异。随着甘蔗进入伸长期与成熟期后,地面枯落物覆盖度与甘蔗根系对沟蚀量无显著影响。这可能是进入伸长期后,甘蔗叶片增多,根系发育完全,植物冠层增大,截留、再分配降雨,此时植物冠层已成为影响沟蚀与土壤有机碳流失的主要因素<sup>[8,27]</sup>。这种影响在新植和宿根坡面中差异不大,巨大的生长量使得新植和宿根甘蔗在缓冲、截留与吸纳雨水上的差距消失,从而导致伸长期与成熟期的坡面沟蚀量较小,且在新植和宿根坡面中无差异。

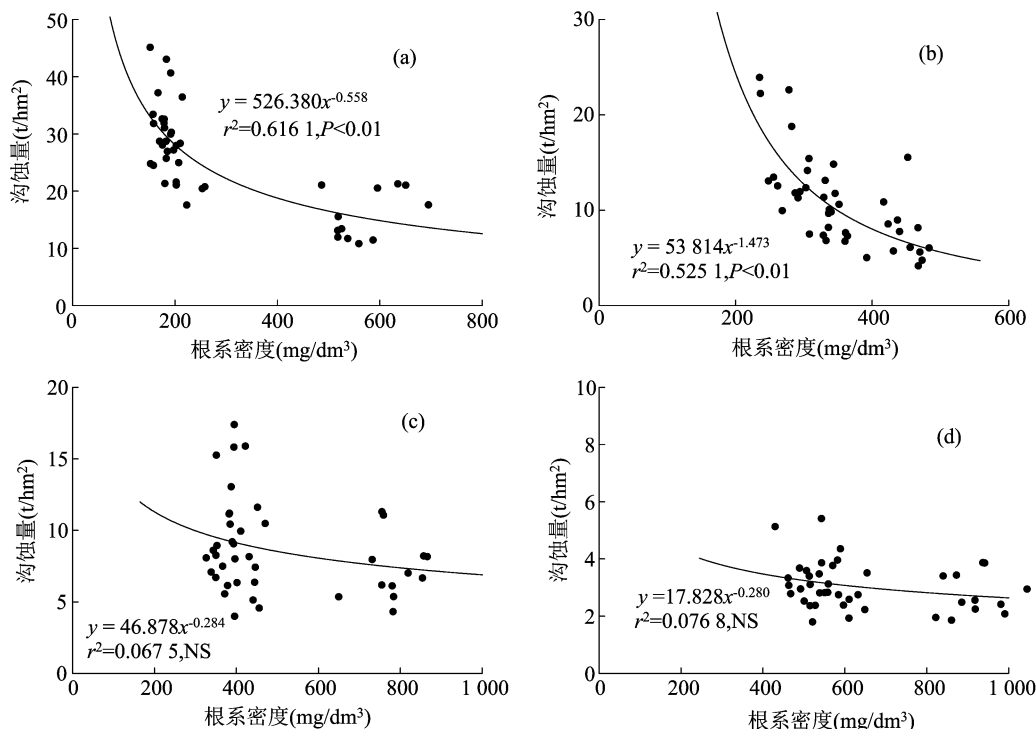
此外,种植方向与坡位对坡面沟蚀量和有机碳流失量也有影响。本研究中,RS 与 RC 坡面的沟蚀量和有机碳流失量结果表明,等高种植可以有效降低坡面沟蚀和有机碳流失,这与杨任翔等的研究结果<sup>[20]</sup>一致,这可能是由于顺坡种植汇水能力强、坡面径流速度大,容易造成沟蚀<sup>[28]</sup>;而等高种植可以截断地表径流,削弱地形地势的影响,减少沟蚀<sup>[29-30]</sup>。而 RC - RS、RS - RC 沟蚀量和有机碳流



(a)、(b)、(c)、(d)分别表示苗期、分蘖期、伸长期、成熟期坡面沟蚀量与地面凋落物覆盖度的关系

图7 不同甘蔗生长时期坡面沟蚀量与地面凋落物覆盖度的关系





(a)、(b)、(c)、(d)分别表示苗期、分蘖期、伸长期、成熟期坡面沟蚀量与甘蔗根系密度的关系

图8 不同甘蔗生长时期坡面沟蚀量与甘蔗根系密度的关系

失量均无显著差异,说明坡位对等高种植减少二者发生的效果无影响,这可能与刘冉等综述提出的径流、侵蚀量与坡长呈正相关关系会导致水流中泥沙含量增加,但同时会导致径流侵蚀能力减弱,二者相互消长,不同坡位间的侵蚀量无差异<sup>[31]</sup>有关。PC 坡面沟蚀量显著低于 RC-PC 坡面,但有机碳流失量之间无显著差异;此外,PC 坡面沟蚀量和有机碳流失量与 PC-RC 坡面相比均无差异,说明在全坡等高种植的情况下,坡下部新植甘蔗不会显著增加沟蚀量和有机碳流失量,这可能是由于坡上部的宿根甘蔗根系发达,土壤入渗能力较强<sup>[3,5]</sup>;地表凋落物较大,对降雨径流有较好的拦截吸纳作用,汇集到下坡的径流较少,对下坡土壤的冲刷能力较弱<sup>[3,22,31]</sup>。然而,等高种植本质上是一种人为短暂改变地表微地形的耕作手段,容易受外力影响<sup>[30]</sup>。等高种植在苗期、分蘖期与伸长期时可显著降低沟蚀量和有机碳流失量,但成熟期无影响;这可能是因为苗期至伸长期时农民会在等高种植过程中田间培土,并形成垄,截断径流并使其在垄间汇集,减少沟蚀。成熟期时,等高行在经历了前3个时期大量的雨水冲刷后,地表糙度降低,等高种植的培土行被搬运填平,坡面趋于平整,失去等高行拦截的径流不断向坡下部汇集,造成了等高种植与顺坡种

植坡面沟蚀量相近、下坡沟蚀强于上坡<sup>[31-32]</sup>。

## 4 结论

本研究探究了甘蔗种植配置模式对不同甘蔗生长时期坡面沟蚀量及土壤有机碳流失量的影响,确定了不同甘蔗生长时期影响沟蚀和土壤有机碳流失的主要因素。种植模式(新植、宿根)、种植方向(顺坡、等高)、种植坡位(上坡、下坡)这3种配置模式的坡面沟蚀量与有机碳流失量相关具体研究结果如下。

(1)不同配置模式全生长期沟蚀总量大小排序为 RS > RC-RC > RS-RC > RC > RC-PC > PC-RC > PC。

(2)坡面沟蚀量与有机碳流失量呈显著正相关,且不同配置模式的沟蚀量与有机碳流失量大小排序依次为苗期、分蘖期、伸长期、成熟期。

(3)顺坡种植甘蔗和新植活动会导致剧烈沟蚀,但在新植坡面进行半个坡面的等高种植可以有效降低当年新植坡面土壤沟蚀和有机碳流失的风险,等高种植面积越大坡面沟蚀量和有机碳流失量越少。

(4)全坡等高宿根的坡面进行新植活动时,选择坡下部进行新植甘蔗不会显著增加次年沟蚀量。

(5) 种植模式、种植方向、种植坡位在不同甘蔗生长时期对坡面沟蚀的控制效果不同,苗期的坡面沟蚀量主要由新植和顺坡的坡面贡献;分蘖期时坡面受到种植模式、种植方向、种植坡位 3 种因素共同影响;伸长期,不同坡面沟蚀量的减少可以归功于等高种植;成熟期时,坡位显著影响了沟蚀发生,上坡面沟蚀量比下坡面小。

#### 参考文献:

- [1] FAOSTAT. Crops and livestock products [DB/OL]. (2022-02-17) [2022-08-30]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- [2] Kaab A, Sharifi M, Mobli H, et al. Combined life cycle assessment and artificial intelligence for prediction of output energy and environmental impacts of sugarcane production [J]. Science of the Total Environment, 2019, 664: 1005-1019.
- [3] Li Y, Mo Y Q, Are K S, et al. Sugarcane planting patterns control ephemeral gully erosion and associated nutrient losses: evidence from hillslope observation [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 309: 107289.
- [4] Vera I, Wicke B, van der Hilst F. Spatial variation in environmental impacts of sugarcane expansion in Brazil [J]. Land, 2020, 9 (10): 397.
- [5] 莫雅棋. 广西集约化蔗区坡面沟蚀时空变化及主控因子分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [6] Cherubin M R, Karlen D L, Franco A L C, et al. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil [J]. Geoderma, 2016, 267: 156-168.
- [7] Li Y, Zhang Q W, Reicosky D C, et al. Changes in soil organic carbon induced by tillage and water erosion on a steep cultivated hillslope in the Chinese Loess Plateau from 1898—1954 and 1954—1998 [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: G01021.
- [8] 黄金权, 程冬兵, 王志刚, 等. 水力侵蚀作用下土壤有机碳动态研究进展 [J]. 长江科学院院报, 2016, 33 (12): 27-32.
- [9] Li Y, Quine T A, Yu H Q, et al. Sustained high magnitude erosional forcing generates an organic carbon sink: test and implications in the Loess Plateau, China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 411: 281-289.
- [10] 赵龙山, 侯 瑞, 吴发启. 黄土坡面细沟侵蚀研究进展与展望 [J]. 中国水土保持, 2017 (9): 47-51, 67.
- [11] de Vente J, Poesen J, Verstraeten G. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain [J]. Journal of Hydrology, 2005, 305 (1/2/3/4): 63-86.
- [12] 田 磊. 黄河中游多沙粗沙区侵蚀环境若干要素分析 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2007, 17 (1): 23-26.
- [13] Capra A, Ferro V, Porto P, et al. Quantifying interrill and ephemeral gully erosion in a small Sicilian basin [J]. Zeitschrift Für Geomorphologie, 2012, 56 (1): 9-25.
- [14] 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.
- [15] 徐锡蒙, 郑粉莉, 武 敏. 雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (11): 124-132.
- [16] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [J]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [17] 王正兴, 李 芳. 中国分省土壤侵蚀变化数据集 (1985—2011) [J]. 全球变化数据学报 (中英文), 2018, 2 (1): 51-58, 后插 52-后插 59.
- [18] 王 旭, 郭 豪, 阮红燕, 等. 间作减少甘蔗种植坡面土壤及养分流失与输移: 基于  $^{7}\text{Be}$  同位素示踪技术 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51 (3): 219-226.
- [19] Thomaz E L, Marcatto F S, Antoneli V. Soil erosion on the Brazilian sugarcane cropping system: an overview [J]. Geography and Sustainability, 2022, 3 (2): 129-138.
- [20] 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, 78.
- [21] Abdalla K, Dickey M, Hill T, et al. Assessment of soil erosion under rainfed sugarcane in KwaZulu-Natal, South Africa [J]. Natural Resources Forum, 2019, 43 (4): 241-252.
- [22] Wang X, Li Y, Dai L, et al. Control of sugarcane planting patterns on slope erosion-induced nitrogen and phosphorus loss and their export coefficients from the watershed [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 336: 108030.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Li Y, Are K S, Huang Z G, et al. Particulate N and P exports from sugarcane growing watershed are more influenced by surface runoff than fertilization [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2020, 302: 107087.
- [25] 李 勇. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [26] 郭 豪. 基于模型的不同播期甘蔗生长和水肥条件下土壤氮素状况研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [27] 余长洪, 李就好, 陈 凯, 等. 甘蔗冠层对降雨再分配的影响 [J]. 水土保持通报, 2015, 35 (3): 85-87.
- [28] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46 (12): 2492-2500.
- [29] 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): 49-54.
- [30] 罗 键, 郑子成, 李廷轩, 等. 横垄坡面地表微地形多重分形特征及其对侵蚀产沙的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29 (4): 66-72.
- [31] 刘 冉, 余新晓, 蔡强国, 等. 坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积过程影响的研究进展 [J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2020, 18 (6): 140-146.
- [32] 秦 凤, 郑子成, 李廷轩, 等. 玉米季坡耕地地表糙度的变化特征及其对土壤侵蚀的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, 27 (3): 18-22, 27.