

蔗区小流域泥沙有机碳入河负荷的时空变化特征及其影响因素

吴宗猛, 郭豪, 李勇, 陈婷婷, 周小淇, 杨翠红, 杨江怡, 王旭, 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: [目的] 针对广西红壤区典型小流域坡耕地甘蔗土壤有机碳流失问题, 探究其流失时空特征和影响因素, 解析流域泥沙有机碳在甘蔗不同生长期入河负荷时空变化, 为揭示自然降雨侵蚀下土壤有机碳流失的影响机制提供科学依据。[方法] 试验区位于广西壮族自治区崇左市扶绥县客兰水库水源区那辣小流域, 流域分为下游子流域(S_1)和上游子流域(S_2, S_3)。利用无人机技术和径流泥沙自动监测—采样系统对甘蔗4个生长期(苗期、分蘖期、伸长期和成熟期)入河泥沙有机碳及植被覆盖度等进行监测, 并利用皮尔逊相关分析, 确定入河泥沙有机碳与降雨径流、植被覆盖度和施肥等影响因素的关系。[结果] ①甘蔗苗期的流域泥沙有机碳入河负荷占整个生长期总流失量的61.1%, 显著高于其他生长期, 其特征为苗期(5.1 kg/hm^2) > 成熟期(1.6 kg/hm^2) > 伸长期(1.4 kg/hm^2) > 分蘖期(0.3 kg/hm^2)。②流域降雨径流和植被覆盖度与泥沙有机碳入河负荷呈极显著相关, 分别解释了泥沙有机碳入河负荷生长期变化的45%和54%; 而流域施肥和土壤容重与泥沙有机碳入河负荷呈显著相关, 分别解释了泥沙有机碳入河负荷生长期变化的79%和36%。[结论] 流域入河泥沙有机碳流失变化主要是由降雨径流、植被覆盖度、施肥和土壤容重所引起。在蔗区小流域, 通过增加植被覆盖以减少地表径流的冲刷及调控施肥时间, 对降低土壤有机碳流失具有重要作用。

关键词: 蔗区小流域; 泥沙有机碳; 入河负荷; 时空变化特征; 地表径流; 植被覆盖度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0374-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 吴宗猛, 郭豪, 李勇, 等. 蔗区小流域泥沙有机碳入河负荷的时空变化特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 374-381. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230317.001; Wu Zongmeng, Guo Hao, Li Yong, et al. Factors influencing spatial and temporal characteristics of organic carbon loading to rivers from sediment in small watersheds in sugarcane areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 374-381.

Factors Influencing Spatial and Temporal Characteristics of Organic Carbon Loading to Rivers From Sediment in Small Watersheds in Sugarcane Areas

Wu Zongmeng, Guo Hao, Li Yong, Chen Tingting,

Zhou Xiaoqi, Yang Cuihong, Yang Jiangyi, Wang Xu, Huang Zhigang

(College of Agriculture, Guangxi University/Guangxi Key Laboratory of

Agricultural Environment and Agricultural Products Safety, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal characteristics and influencing factors of soil organic carbon loss from sugarcane in a typical small watershed in the red soil area of Guangxi Zhuang Autonomous Region were determined, and the spatial and temporal changes of organic carbon from watershed sediment entering the river during different growth periods of sugarcane were analyzed in order to identify the factors influencing soil organic carbon loss under natural rainfall erosion. [Methods] The experimental area was located in the Nala sub-basin of the water source area of Kailan Reservoir at Fusui County, Chongzuo City, Guangxi Zhuang

收稿日期: 2022-11-08

修回日期: 2022-12-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“湿热区土壤水蚀面源污染对垦殖强度的响应: 中缅泰对比研究”42220104004; 广西科技重大专项“甘蔗农机农艺融合规模化生产技术示范”桂科(AA17202005-1); 广西自然科学基金重点项目(2018JJD150014)

第一作者: 吴宗猛(1996—), 男(汉族), 广西壮族自治区钦州市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与碳循环。Email: 1344322736@qq.com.

通信作者: 李勇(1958—), 男(汉族), 陕西省蒲城县人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业面源污染成因与防控研究。Email: liyong@caas.cn.

Autonomous Region. The watershed was divided into the lower sub-basin (S_1) and the upper sub-basins (S_2 and S_3). The organic carbon of incoming sediment and vegetation cover were monitored during four growth periods (seedling, tillering, elongation, and maturity) of sugarcane using UAV technology and an automatic runoff sediment monitoring-sampling system. Pearson correlation analysis was used to determine the relationship between organic carbon of incoming sediment and influencing factors such as rainfall runoff, vegetation cover, and fertilizer application. [Results] ① The organic carbon load of sediment into the river during the seedling stage of sugarcane accounted for 61.1% of the total loss during the entire growing season, and this value was significantly greater than values observed in the other growing periods. Organic carbon load followed the order of seedling stage (5.1 kg/hm^2) > maturity stage (1.6 kg/hm^2) > elongation stage (1.4 kg/hm^2) > tillering stage (0.3 kg/hm^2); ② rainfall runoff and vegetation cover were significantly correlated with organic carbon loss from incoming sediment, explaining 45% and 54%, respectively, of the variation in organic carbon loss from incoming sediment during the growing season. Fertilizer application and soil bulk density were significantly correlated with organic carbon loss from incoming sediment in the watershed, explaining 79% and 36%, respectively, of the variation in organic carbon loss from incoming sediment during the growing season. [Conclusion] Studies have shown that organic carbon loss from watershed sediments is mainly influenced by rainfall runoff, vegetation cover, fertilizer application, and soil bulk density. In small watersheds in sugarcane areas, increasing vegetation cover to reduce surface runoff and regulating the timing of fertilizer application can play an important role in reducing soil organic carbon loss.

Keywords: small sugarcane catchments; organic carbon in sediment; in-stream loading; spatial and temporal characteristics; surface runoff; vegetation cover

土壤侵蚀是自然界中造成地球环境土壤有机碳迁移及流失加剧的主要因素^[1],每年由土壤侵蚀释放到自然大气中的碳约为 $8.00 \times 10^{11} \sim 1.20 \times 10^{12} \text{ kg}$ ^[2]。据研究表明,有 95% 的碳是随泥沙的迁移而流失的,所以泥沙的迁移是土壤有机碳流失的主要原因^[3],而且土壤有机碳的流失以泥沙载体为主,占总有机碳流失的 90% 左右^[4]。目前,土壤侵蚀对全球土壤碳循环以及碳平衡的影响是全球各国研究者探究的热点^[5],但研究者们对其中的研究认识各执己见,还是存在较大的争议,特别是关于侵蚀碳的“源与汇”之争的科学问题^[6-7],该争论的问题关键集中在两点,一是在土壤侵蚀的过程中土壤碳的动态变化过程,二是在景观过程中沉积后的去向问题^[7-8],而 IPCC(政府间气候变化委员会)^[9]认为土壤碳迁移是碳平衡中最大的不确定性因素,但相关理论还有待进一步的研究。这些研究尽管对土壤侵蚀和泥沙有机碳流失迁移过程进行了比较多的研究,但是从农田到水体的泥沙有机碳流失仍然受到较少的关注,一些关键驱动因素的联系仍未完全了解。

土壤有机碳流失主要是以泥沙为流失载体,其从农田到水体的迁移受土壤侵蚀过程影响。土壤侵蚀是一个比较复杂的过程,受到较多的因素所影响,如降雨特征、径流、植被覆盖、地形、土壤类型、土地利用方式和耕作方式等^[10-14]。前人的研究表明以上的影

响因素也会对土壤有机碳流失有重要影响^[14-18]。Jin 等^[15]在室内的模拟降雨试验发现,低覆盖度和大雨强会使更多的泥沙及土壤有机碳流失。刘春^[17]研究了降雨和径流对土壤有机碳流失的影响,结果表明土壤有机碳流失量与径流量呈显著正相关关系。何彦星^[18]采用¹³⁷Cs 示踪技术研究耕地坡面侵蚀对土壤有机碳氮的响应,发现土壤组分会影响土壤有机碳流失。李娜等^[14]通过径流小区试验,研究了不同耕作方式对土壤有机碳流失的影响,研究表明传统耕作下的土壤有机碳流失量最多,为 36.3 mg/m^2 。综上所述,目前国内外学者在土壤侵蚀及土壤有机碳流失的影响因素方面主要是通过室内模拟试验、径流小区观测试验和坡面试验研究影响坡面土壤侵蚀的因素来影响土壤有机碳的流失,各因素对土壤侵蚀和土壤有机碳流失的影响不完全相同,缺乏流域尺度上的相关研究。

广西壮族自治区(以下简称广西)地处南方亚热带区,地形主要以丘陵和山地为主,是中国最重要的甘蔗(*Saccharum officinarum*)种植生产基地,2021年占中国甘蔗种植总面积的达 64.7%^[19]。作为广西最重要的农作物,甘蔗多种植于 $0^\circ \sim 30^\circ$ 的坡耕地上^[20],极易发生土壤侵蚀,导致土壤有机碳流失量增加^[21]。然而,广西地区关于在流域尺度上对甘蔗坡耕地土壤有机碳流失过程及影响因素的研究较为匮乏。因此,为了更好地了解从农业山坡到水体的

泥沙有机碳流失出口的变化,有必要澄清不同降雨事件、植被覆盖度和生长期变化情况下的关键影响因素,进一步探究关键影响因素对中国南方亚热带红壤区土壤有机碳流失过程的影响,对了解土壤碳迁移的理论机制具有重要意义。

因此,本研究选择以广西甘蔗种植区典型小流域为研究对象,对流域内各子流域入河泥沙及土壤有机碳随甘蔗生长时期变化进行监测,探究其不同影响因素,解析甘蔗流域入河泥沙有机碳流失规律,以期为揭示自然降雨侵蚀下土壤有机碳流失的影响机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区位于广西崇左市扶绥县客兰水库水源区那辣小流域(22°20'N,107°39'E),该区域属亚热带季风气候,年平均气温 20.8 °C,年均降雨量 1 400 mm 左右。流域土壤类型为赤红壤,土壤呈酸性,pH 值变化范围为 4.5~5.2。该区域以坡地为主,种植作物以甘蔗为主,占流域总面积的 77%^[22],坡度 0°~35°,平均海拔 1 200 m。将研究流域划分为下游子流域(S₁)和上游子流域(S₂,S₃),并在各子流域出口处进行监测研究。S₁子流域面积为 27 hm²,S₂子流域面积为 54 hm²,S₃子流域面积为 39 hm²,3个子流域总面积为 120 hm²。甘蔗为一年生作物,包含苗期、分蘖期、伸长期和成熟期,根据 2021 年甘蔗种植生长情况 4 个生长时期的时间确定为:苗期(3月1日至5月15日)、分蘖期(5月16日至6月15日)、伸长期(6月16日至8月30日)和成熟期(9月1日至12月31日)。

1.2 样品采集

在 3 个子流域出口处设置监测站,建立径流泥沙自动监测—采样系统,监测站中安装有 ISCO 泥沙自动采样器(ISCO6712),哈希流量计(DYYF-WW-02 BGNDCR0 C4 MAPL-10-X)和翻斗式雨量计。通过径流泥沙自动监测—采样系统获取降雨事件下各子流域出口的径流参数与泥沙样品,具体采样方法和过程参考 Li Yong 等^[12]。通过无人机“大疆精灵 4 RTK(DJoPhantom 4 RTK)”采集流域航拍图,利用 ArcGIS 10.3 软件进行处理分析,计算得出流域的植被覆盖度。从 2021 年 3 月 1 日到 12 月 31 日总共记录了 19 场降雨事件。

1.3 样品处理与分析

1.3.1 径流泥沙样品处理 降雨事件采集的样品在降雨事件采集的样品通过 0.45 μm 聚丙烯滤膜的真

空抽滤泵过滤,然后将 1 L 瓶中的水沙混合物进行分离,得到泥沙样品,将泥沙样品 40 °C 下烘干称重,计算入河泥沙浓度,烘干后的泥沙样品用于测定泥沙中有机碳。

1.3.2 泥沙有机碳的测定 烘干的泥沙样品用研钵进行研磨,过 0.150 mm 筛,通过重铬酸钾容量法测定土壤有机碳含量 OC_i^[23]。

1.4 泥沙有机碳入河负荷计算

1.4.1 降雨事件泥沙浓度计算:

$$S_{ci} = \frac{S_i}{V} \quad (1)$$

式中:S_{ci}为泥沙浓度(g/L);S_i为 1 L 水沙混合物中泥沙的烘干质量(g);V为水沙混合物体积(L)。

1.4.2 降雨事件泥沙有机碳入河负荷计算 根据流域的入河径流量和降雨事件泥沙浓度来计算降雨事件过程中流域出口的泥沙有机碳入河负荷(organic carbon, kg/hm²):

$$OC = \sum_{i=1}^n \frac{S_{ci} \times V_i \times T_i \times OC_i}{A_x} \quad (2)$$

式中:OC为泥沙有机碳入河负荷;n为样品数;V_i为不同样本期的径流量(m³/h);T_i是不同样本数的采样间隔时间(h);OC_i为泥沙有机碳含量(g/kg);A_x为子流域面积(hm²)。

1.5 土样采集与测定

在每个子流域分上中下坡用环刀法分别采集土壤样品,用于测定土壤容重和土壤有机碳含量。其中,土壤容重以烘干称重法测定、土壤有机碳含量则以重铬酸钾容量法测定^[23]。

1.6 数据处理

用 Excel 2020 和 SPSS 21.0 进行统计分析,用皮尔逊相关分析确定泥沙有机碳入河负荷与降雨、径流、覆盖度、施肥、土壤容重及土壤有机碳含量的关系。

2 结果与分析

2.1 流域降雨与径流

图 1 为 2021 年不同降雨事件下的降雨分布和径流的变化。2021 年观测期内共有 19 次降雨事件,总降雨量为 651.0 mm,降雨量变化范围为 4.4~145.0 mm(表 1),最大降雨发生在 10 月 12 日,该日发生台风暴雨事件(“狮子山”台风)。在生长期,苗期、分蘖期、伸长期和成熟期的降雨量分别 164.2,27.4,230.0,229.4 mm,分别占总降雨量的 25.2%,4.2%,35.3%和 35.2%(表 1)。同样,流域地表径流随着降雨事件的变化而变化,范围为 0.06~44.25 mm,占

总降雨量的 58.6% (图 1)。苗期和成熟期的地表径流量显著高于分蘖期和伸长期 ($p < 0.05$, 表 1)。在流域空间上, 子流域 S_2 的地表径流比子流域 S_1 和 S_3 分别高 12.2% 和 12.6%, 但差异不显著 ($p > 0.05$, 表 1)。

2.2 泥沙有机碳浓度变化

图 2 反映了不同降雨事件的泥沙有机碳浓度。在全流域中, 泥沙有机碳浓度的变化范围为 6.61 ~ 14.06 g/kg, 平均浓度为 10.38 g/kg (图 2)。在生长期上, 泥沙有机碳浓度的平均浓度在苗期达到峰值 (11.51 g/kg), 该值明显高于 ($p < 0.05$, 表 2) 比其他生长期高 3% ~ 34%。在子流域中, 子流域 S_3 的泥沙有机碳浓度高于子流域 S_1 和 S_2 的 2% ~ 3%, 但差异不显著 ($p > 0.05$, 表 2)。

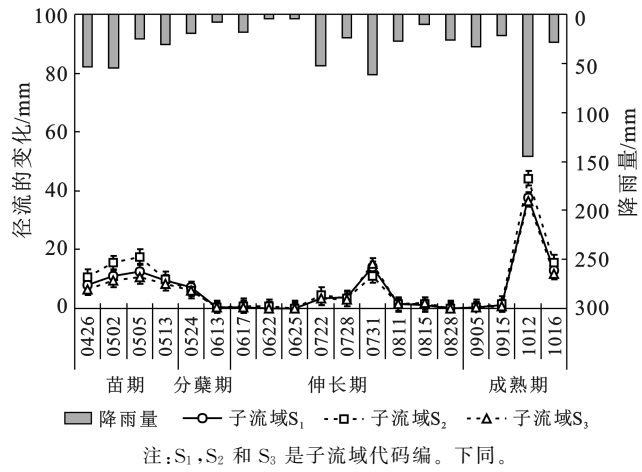


图 1 不同降雨事件下径流的变化

Fig.1 Variations in runoff under different rainfall events

表 1 不同生长期降雨和径流的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of rainfall and runoff in different growth periods

| 时期 | 项目 | 全流域 | | 子流域径流深度/mm | | |
|------|--------|--------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | 降雨量/mm | 径流深度/mm | S_1 | S_2 | S_3 |
| 苗期 | 最大值 | 54.40 | 17.60 | 12.57 | 17.60 | 10.53 |
| | 最小值 | 25.40 | 6.50 | 6.87 | 10.04 | 6.50 |
| | 均值 | 41.05 | 10.57 ^a | 9.56 | 13.50 | 8.65 |
| | 标准差 | 15.32 | 3.29 | 2.33 | 3.67 | 1.72 |
| | 变异系数/% | 37.3 | 31.1 | 24.4 | 27.2 | 19.9 |
| | 合计 | 164.2 | 126.8 | 38.2 | 54.0 | 34.6 |
| 分蘖期 | 最大值 | 19.40 | 7.12 | 7.12 | 5.93 | 6.25 |
| | 最小值 | 8.00 | 0.31 | 0.31 | 0.35 | 0.32 |
| | 均值 | 13.70 | 3.38 ^b | 3.71 | 3.14 | 3.28 |
| | 标准差 | 8.06 | 3.37 | 4.82 | 3.94 | 4.19 |
| | 变异系数/% | 58.8 | 99.7 | 129.8 | 125.6 | 127.8 |
| | 合计 | 27.4 | 20.3 | 7.4 | 6.3 | 6.6 |
| 伸长期 | 最大值 | 62.10 | 15.03 | 13.92 | 11.10 | 15.03 |
| | 最小值 | 4.40 | 0.06 | 0.09 | 0.13 | 0.06 |
| | 均值 | 26.36 | 2.60 ^b | 2.21 | 2.40 | 2.53 |
| | 标准差 | 19.16 | 4.10 | 4.23 | 3.38 | 4.55 |
| | 变异系数/% | 72.7 | 157.4 | 191.4 | 140.6 | 180.0 |
| | 合计 | 263.6 | 70.3 | 22.1 | 24.0 | 25.3 |
| 成熟期 | 最大值 | 145.00 | 44.25 | 37.66 | 44.25 | 36.68 |
| | 最小值 | 21.80 | 0.28 | 1.01 | 1.63 | 0.80 |
| | 均值 | 65.27 | 13.64 ^a | 17.24 | 20.51 | 16.47 |
| | 标准差 | 69.14 | 16.65 | 18.68 | 21.72 | 18.37 |
| | 变异系数/% | 105.9 | 122.0 | 108.3 | 105.9 | 111.5 |
| | 合计 | 195.8 | 163.7 | 51.7 | 61.5 | 49.4 |
| 总生长期 | 最大值 | 145.00 | 44.25 | 37.66 | 44.25 | 36.68 |
| | 最小值 | 4.40 | 0.06 | 0.09 | 0.13 | 0.06 |
| | 均值 | 34.26 | 6.69 | 6.29 ^a | 7.68 ^a | 6.10 ^a |
| | 标准差 | 31.78 | 9.39 | 9.07 | 10.68 | 8.76 |
| | 变异系数/% | 92.7 | 140.4 | 144.2 | 139.1 | 143.6 |
| | 合计 | 651.0 | 381.2 | 119.5 | 145.9 | 115.9 |

注: 同行或同列不同小写字母表示各处理在 5% 水平上差异显著。下同。

表 2 不同生长期泥沙有机碳浓度的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of organic carbon concentration of sediment in different growth periods

| 流域 | 项目 | 泥沙有机碳浓度/(g·kg ⁻¹) | | | | |
|--------------------|--------|-------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | | 苗期 | 分蘖期 | 伸长期 | 成熟期 | 总生长期 |
| 全流域 | 最大值 | 13.29 | 13.18 | 14.06 | 11.19 | 14.06 |
| | 最小值 | 9.68 | 9.98 | 6.63 | 6.61 | 6.61 |
| | 均值 | 11.51 ^a | 11.20 ^a | 10.50 ^a | 8.56 ^b | 10.38 |
| | 标准差 | 1.01 | 1.18 | 2.13 | 1.69 | 2.01 |
| | 变异系数/% | 8.7 | 10.5 | 20.3 | 19.7 | 19.4 |
| | 合计 | 138.1 | 67.2 | 283.4 | 102.7 | 591.5 |
| 子流域 S ₁ | 最大值 | 13.29 | 13.18 | 13.63 | 10.96 | 13.63 |
| | 最小值 | 10.42 | 10.68 | 6.63 | 7.18 | 6.63 |
| | 均值 | 11.79 | 11.93 | 9.86 | 8.68 | 10.24 ^a |
| | 标准差 | 1.18 | 1.77 | 2.19 | 1.82 | 2.13 |
| | 变异系数/% | 10.0 | 14.8 | 22.2 | 20.9 | 20.8 |
| | 合计 | 47.1 | 23.9 | 88.8 | 34.7 | 194.5 |
| 子流域 S ₂ | 最大值 | 12.16 | 11.84 | 13.12 | 11.08 | 13.12 |
| | 最小值 | 9.68 | 11.27 | 7.18 | 6.61 | 6.61 |
| | 均值 | 11.28 | 11.56 | 10.40 | 8.59 | 10.33 ^a |
| | 标准差 | 1.14 | 0.40 | 1.80 | 1.88 | 1.81 |
| | 变异系数/% | 10.1 | 3.5 | 17.3 | 21.9 | 17.6 |
| | 合计 | 45.1 | 23.1 | 93.6 | 34.4 | 196.2 |
| 子流域 S ₃ | 最大值 | 12.54 | 10.26 | 14.06 | 11.19 | 14.06 |
| | 最小值 | 10.44 | 9.98 | 6.75 | 7.10 | 6.75 |
| | 均值 | 11.46 | 10.12 | 11.23 | 8.40 | 10.57 ^a |
| | 标准差 | 0.92 | 0.20 | 2.37 | 1.89 | 2.17 |
| | 变异系数/% | 8.0 | 2.0 | 21.1 | 22.5 | 20.5 |
| | 合计 | 45.9 | 20.2 | 101.1 | 33.6 | 200.8 |

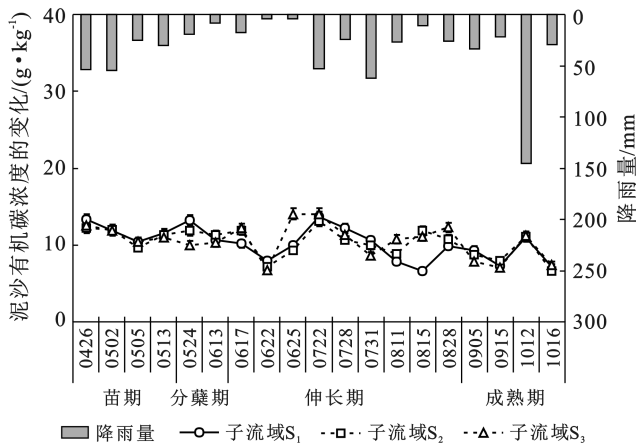


图 2 不同降雨事件下泥沙有机碳浓度的变化

Fig.2 Variations in sediment organic carbon concentrations of sediment under different rainfall events

2.3 泥沙有机碳入河负荷变化

图 3 为不同降雨事件下泥沙有机碳入河负荷变化,图 4 为流域甘蔗不同生长期泥沙有机碳入河负荷变化。泥沙有机碳入河负荷的不同生长期变化随降雨而变化,在全流域的泥沙有机碳入河负荷为 8.4 kg/hm²(图 3 和图 4)。

在生长期上看,整个流域最高的泥沙有机碳入河负荷出口(5.1 kg/hm²)发生在苗期,占整个生长期总流失量的 61.1%,显著高于($p < 0.05$,图 4)分蘖期的(0.3 kg/hm²)、伸长期的(1.4 kg/hm²)和成熟期的(1.6 kg/hm²),而伸长期和成熟期的泥沙有机碳入河负荷显著高于分蘖期($p < 0.05$,图 4)。

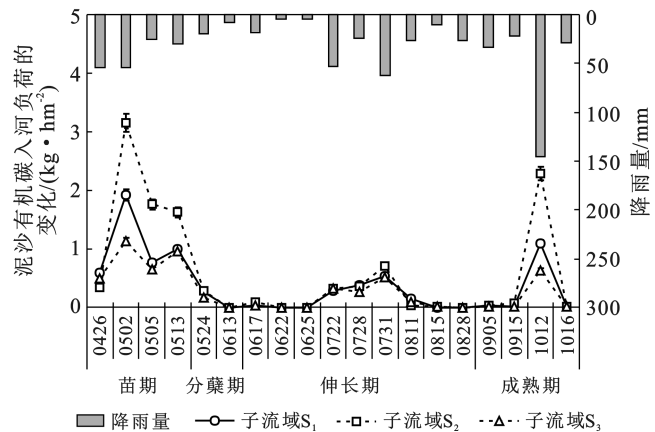


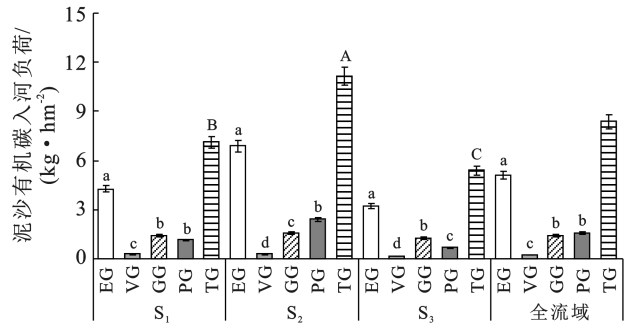
图 3 不同降雨事件下泥沙有机碳入河负荷变化

Fig.3 Variations in organic carbon load of sediment entering river under different rainfall events

从流域空间上看,子流域 S₂ 的泥沙有机碳入河负荷显著高于其他子流域 56.5%~106.5% ($p < 0.05$, 图 4)。流域最高出口泥沙有机碳入河负荷 (3.2 kg/hm²) 发生在子流域 S₂ 的 2021 年 5 月 2 日的降雨期间,在 4 月 20 日至 5 月 1 日,是流域的耕作作业和甘蔗种植之后(图 3)。

2.4 流域泥沙有机碳入河负荷关键影响因素

降雨量、地表径流、植被覆盖度、有机肥施用量、土壤容重及土壤有机碳含量对流域泥沙有机碳入河负荷的影响如图 5 所示。降雨量、地表径流和植被覆盖度与泥沙有机碳入河负荷均有极显著的正相关关系 ($p < 0.01$), R^2 分别为 0.35, 0.45, 0.54。有机肥施用量和土壤容重与泥沙有机碳入河负荷均有显著的正相关关系 ($p < 0.05$), R^2 分别为 0.79, 0.36。而土壤有机碳含量与泥沙有机碳入河负荷不存在关系 ($p > 0.05$)。



注:①同流域不同小写字母或不同流域不同大写字母代表表示各处理在 5% 水平上差异显著;②EG 为苗期;VG 为分蘖期;GG 为伸长期;PG 为成熟期;TG 为总生长期。

图 4 甘蔗不同生长期泥沙有机碳入河负荷变化

Fig.4 Variations in organic carbon load of sediment entering river at different sugarcane growth periods

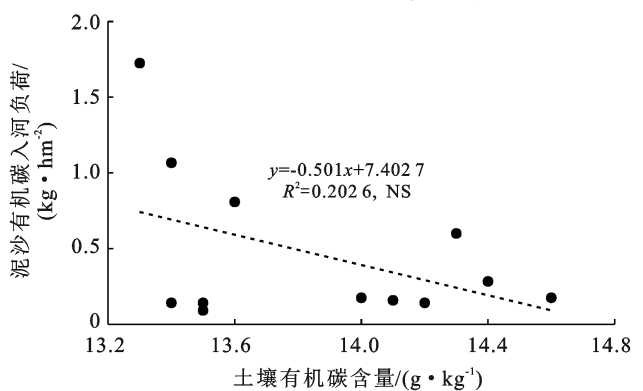
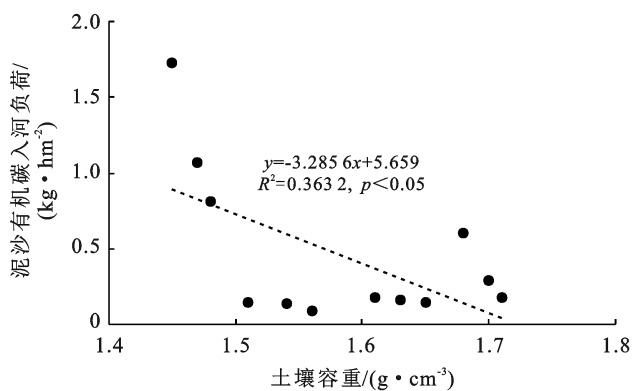
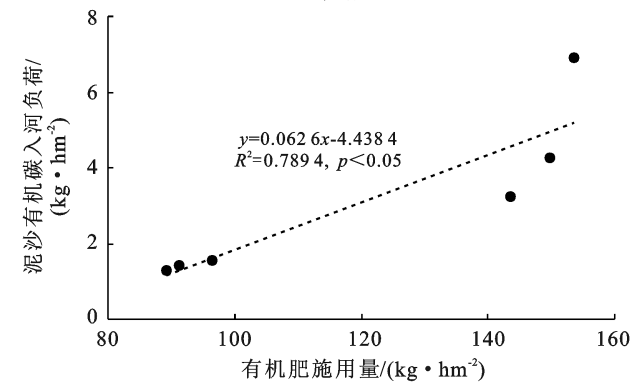
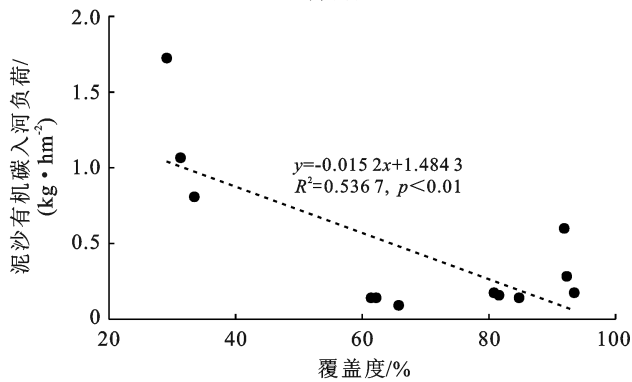
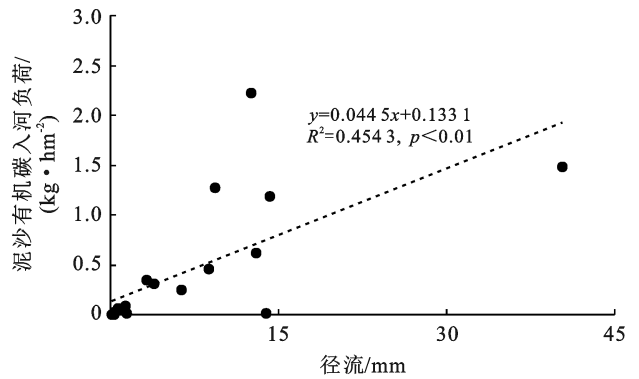
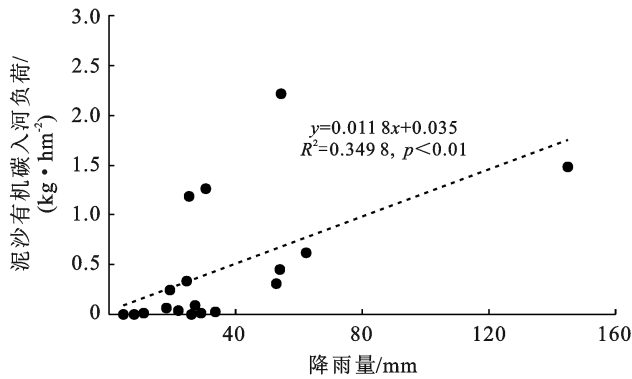


图 5 影响因素(降雨、径流、植被覆盖度、有机肥施用量、土壤容重及土壤有机碳含量)与泥沙有机碳入河负荷的关系

Fig.5 Relationships between influencing factors (rainfall, runoff, vegetation coverage, organic fertilizer application amount, soil capacity weight and soil organic carbon content) and organic carbon load of sediment entering river

3 讨论

3.1 入河泥沙有机碳的浓度变化

本研究表明,泥沙有机碳浓度在时间和空间上发生了变化,但在整个生长期中并不遵循降雨规律。地表径流中泥沙有机碳浓度在苗期高于其他生长期(分蘖期、伸长期和成熟期)3%~34%。这可能是由于在甘蔗苗期,农民采取的一些土地管理措施所导致的,如培土以及施用基肥,加上苗期地表覆盖度低,在降雨发生时,极易发生径流侵蚀土壤,导致土壤有机碳流失加剧。王文欣等^[16]通过模拟降雨试验,研究了植被覆盖度对泥沙流失的有机碳影响,结果表明土壤有机碳流失量与土壤植被覆盖度呈显著负相关关系,而且沈姣等^[24]发现施肥会影响土壤有机碳的流失。

3.2 泥沙有机碳入河负荷的变化

泥沙有机碳入河负荷随不同甘蔗生长时期降雨量的变化而变化。前人通过农田土壤有机碳空间变异特征及其影响因素的研究,结果表明土壤覆盖度越低,土壤有机碳入河负荷越多^[25]。强降雨会造成黄土坡面土壤有机碳流失严重,降雨与土壤有机碳流失密切相关^[26]。从我们的研究发现,泥沙有机碳入河负荷在苗期显著高于其他生长期,主要可能是因为苗期为4个生长期中最低的植被覆盖度,农民的土地管理措施疏松了土壤降低土壤容重,还有施用有机肥增加了表层土壤有机碳含量,加上苗期164.2 mm的降雨量,因此低覆盖度在降雨极易产生径流,径流冲刷泥沙及土壤有机碳。虽然施肥能增加提高土壤有机碳含量^[27],但也增加了径流对土壤有机碳冲刷的风险,所以特别是在植被覆盖度较低时,降雨强度对泥沙有机碳的流失起决定作用^[16],且土壤容重越小,土壤越疏松,易发生土壤流失^[28],这与本研究一致。虽然在甘蔗伸长期和成熟期的植被覆盖度较高,但泥沙有机碳入河负荷均显著高于分蘖期,主要可能是伸长期和成熟期的降雨量分别占总降雨量的35.3%和35.2%,土壤有机碳入河负荷随雨强增大而增加^[29]。在流域空间上,子流域S₂的泥沙有机碳入河负荷显著高于其他子流域,可能因为子流域S₂的植被覆盖度较低,植被覆盖度越低,土壤有机碳流失越多^[16,25]。

3.3 影响泥沙有机碳入河负荷的关键因素

在本研究中,泥沙有机碳入河负荷时空变化与降雨、地表径流、植被覆盖度、有机肥施用量及土壤容重的变化密切相关。降雨与泥沙有机碳入河负荷呈极显著的正相关关系,前人的许多研究也表明坡面降雨与土壤有机碳流失之间有显著的关系^[15-17,26,29]。但在本研究中,我们发现地表径流与泥沙有机碳入河负

荷出口的正相关关系显著强于降雨量。地表径流解释了泥沙有机碳入河负荷的45%($p < 0.01$),而降雨量仅占出口的35%($p < 0.01$)。因此,这意味着与高的降雨量相比,径流量与流域中泥沙有机碳的输出相关性更高。土壤有机碳的流失以径流中泥沙态为主^[4],土壤有机碳在被泥沙吸附和地表径流输移的共同作用下,土壤有机碳会随径流和泥沙向发生迁移^[30]。前人的许多研究也表明了径流有机碳含量与径流量之间呈显著的正相关关系,坡面径流是土壤有机碳流失的重要影响因素^[4,31-32]。甘蔗地表覆盖物对雨滴有缓冲作用,从而降低了雨水对土壤的溅蚀作用^[33-34],且植被覆盖度能有效减沙和减缓径流的速度^[35]。因此,在本研究中,我们发现甘蔗苗期的植被覆盖度在整个生长期中最低,可能导致了土壤侵蚀加剧,径流泥沙流失及其泥沙有机碳流失增加。前人的许多研究也表明了植被覆盖度与土壤有机碳流失之间存在显著的负相关关系^[16,25,36]。土壤的全松处理即土壤容重低,导致了土壤侵蚀量增加,水土流失严重^[28],在我们的研究中也发现甘蔗苗期前由于土壤翻耕种植及培肥,导致了土壤变得更加疏松,表层土壤容重低,所以在降雨径流下,土壤易被冲刷及土壤有机碳流失量增加。

4 结论

本文研究了蔗区小流域泥沙有机碳入河负荷生长期变化规律及其与关键影响因素的关系。降雨期泥沙有机碳随甘蔗生长时期流失入河主要是由降雨径流、植被覆盖度、施肥和土壤容重所影响产生变化。流域降雨径流和植被覆盖度与泥沙有机碳入河负荷呈极显著相关,分别解释了泥沙有机碳入河负荷变化的45%和54%,而流域施肥和土壤容重与泥沙有机碳入河负荷呈显著相关,分别解释了泥沙有机碳入河负荷变化的79%和36%。在蔗区小流域,通过提高植被覆盖度以减少暴雨径流的冲刷,以及调控施肥的时间,对防控土壤有机碳流失具有重要作用。

[参 考 文 献]

- [1] 贾松伟,贺秀斌,陈云明.侵蚀逆境下土壤有机碳的迁移[J].生态环境,2004,13(1):78-80.
- [2] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. Environment International,2003,29(4):437-450.
- [3] 贾松伟,贺秀斌,陈云明,等.黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[J].水土保持研究,2004,11(4):88-90.
- [4] 聂小东,李忠武,王晓燕,等.雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J].土壤学报,2013,50

- (5):900-908.
- [5] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [6] Smith S V, Renwick W H, Buddemeier R W, et al. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 697-707.
- [7] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [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] IPCC. *Climate change 2007: The physical science basis* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 6-7.
- [10] 李桂芳,王竖桦,谢福倩,等.降雨与作物种植方式对赤红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J].*中国水土保持科学* (中英文), 2022, 20(1): 65-73.
- [11] 王军,魏飒,刘凤婵,等.坡耕地降雨径流与土壤侵蚀特征研究[J].*河北农业科学*, 2021, 25(4): 88-92.
- [12] Li Yong, Are K S, Huang Zhigang, 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.
- [13] 孟祥冬,曾奕,方怒放.地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀速率的影响[J].*水土保持通报*, 2022, 42(5): 25-32.
- [14] 李娜,张哲,白伟,等.耕作方式下坡面土壤侵蚀对有机碳流失的影响[J].*东北农业大学学报*, 2022, 53(2): 82-90.
- [15] Jin K, Cornelis W M, Gabriels D, et al. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses [J]. *Catena*, 2009, 78(1): 81-86.
- [16] 王文欣,庄义琳,庄家尧,等.不同降雨强度下坡地覆盖对土壤有机碳流失的影响[J].*水土保持学报*, 2013, 27(4): 62-66.
- [17] 刘春.黄土高原丘陵区侵蚀土壤有机碳来源及影响机制 [D].湖南长沙:湖南大学, 2019.
- [18] 何彦星.东北黑土区坡耕地土壤碳氮变化对侵蚀强度的响应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2022.
- [19] 舒德志.广西糖业高质量发展的困境及应对措施[J].*广西糖业*, 2022, 42(2): 35-38.
- [20] 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].广西南宁:广西大学, 2021.
- [21] 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(G1): G01021.
- [22] 戴谅,王旭,李勇,等.径流与施肥对流域入河重金属污染负荷的控制[J].*植物营养与肥料学报*, 2022, 28(3): 379-391.
- [23] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社, 2000.
- [24] 沈皎,王小国,马晗.施肥对紫色土农田土壤有机碳损失过程的影响[J].*中国生态农业学报* (中英文), 2021, 29(9): 1571-1581.
- [25] 邹润彦.环鄱阳湖区农田土壤有机碳空间变异特征及其影响因素研究[D].江西南昌:江西财经大学, 2019.
- [26] 蒋秋玲.坡面土壤有机碳侵蚀过程与动力学机制[D].北京:北京林业大学, 2019.
- [27] 徐曼,余砾,王富华,等.紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应[J].*环境科学*, 2021, 42(11): 5491-5499.
- [28] 刘殿民,沈海鸥,武佳龙,等.黑土坡面垄侧少耕措施的土壤侵蚀特征分析[J].*水土保持学报*, 2022, 36(4): 1-6.
- [29] 马文明.侵蚀作用下南方红壤丘陵区土壤有机碳流失、更新及稳定性特征研究[D].湖南长沙:湖南大学, 2016.
- [30] 张雪,李忠武,申卫平,等.红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系[J].*土壤学报*, 2012, 49(3): 465-473.
- [31] 陆银梅,李忠武,聂小东,等.红壤缓坡地径流与土壤可蚀性对土壤有机碳流失的影响[J].*农业工程学报*, 2015, 31(19): 135-141.
- [32] 肖胜生,汤崇军,王凌云,等.自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移[J].*土壤学报*, 2017, 54(4): 874-884.
- [33] 贾莲莲,李占斌,李鹏,等.黄土区野外模拟降雨条件下坡面径流—产沙试验研究[J].*水土保持研究*, 2010, 17(1): 1-5.
- [34] 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.
- [35] 孙一,刘晓燕,田勇,等.坡面植被覆盖度对泥沙输移的影响特性[J].*工程科学与技术*, 2022, 54(5): 12-18.
- [36] 郭凯.不同条件下坡面侵蚀泥沙中有机碳的变化研究 [D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2022.