

白雪, 农梦玲, 龙鹏宇, 等. 蔗田滴灌施肥土壤甲烷排放通量与活性有机碳含量的关系 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(3): 31-37.
BAI Xue, NONG Mengling, LONG Pengyu, et al. Relationship between soil methane emission flux and active organic carbon content in sugarcane field under drip fertigation[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(3): 31-37.

蔗田滴灌施肥土壤甲烷排放通量与活性有机碳含量的关系

白雪, 农梦玲, 龙鹏宇, 李伏生

(广西大学 农学院/广西喀斯特地区节水农业新技术院士工作站/广西高校

作物栽培学与耕作学重点实验室, 广西南宁 530005)

摘要:【目的】研究蔗田滴灌施肥对土壤活性有机碳含量和甲烷排放通量的影响, 探讨蔗田滴灌施肥土壤甲烷排放通量与土壤活性有机碳含量之间的关系。【方法】2018年3—12月在南宁市灌溉试验站开展不同滴灌灌水、施肥的田间试验, 试验设4种施肥水平: 常规施肥 (F_{100} , N 250 kg·hm⁻²、P₂O₅ 150 kg·hm⁻²、K₂O 200 kg·hm⁻²)、增量施肥 1 (F_{110} , 在 F_{100} 基础上增加 10%)、增量施肥 2 (F_{120} , 在 F_{100} 基础上增加 20%) 和减量施肥 (F_{90} , 在 F_{100} 基础上减少 10%), 以及 2 种滴灌灌水水平: W_{180} (180 m³·hm⁻²) 和 W_{300} (300 m³·hm⁻²)。用常规法测定不同生育时期蔗田土壤甲烷排放通量和土壤活性有机碳含量, 用 Pearson 法分析土壤甲烷排放通量与土壤活性有机碳含量的关系。【结果】在分蘖期, $W_{300}F_{120}$ 处理土壤可溶性有机碳 (DOC) 含量较 $W_{300}F_{100}$ 提高了 156%, 而土壤 CH₄ 排放通量较其他处理低。在成熟期, $W_{300}F_{120}$ 处理土壤 DOC 含量较 $W_{300}F_{110}$ 增加了 114%, 微生物量碳 (MBC) 较 $W_{300}F_{110}$ 增加了 49.6%。蔗田土壤 CH₄ 排放通量仅与土壤 DOC 含量呈显著正相关, 相关系数为 0.38。【结论】土壤 DOC 含量显著影响蔗田土壤甲烷排放通量。 $W_{300}F_{120}$ 处理可以提高分蘖期和成熟期蔗田土壤可溶性有机碳含量、减少分蘖期蔗田土壤 CH₄ 排放。

关键词: 蔗田; 滴灌施肥; 活性有机碳含量; 甲烷排放通量

中图分类号: S158.3; X511

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2020)03-0031-07

Relationship between soil methane emission flux and active organic carbon content in sugarcane field under drip fertigation

BAI Xue, NONG Mengling, LONG Pengyu, LI Fusheng

(College of Agriculture, Guangxi University/Guangxi Academician Work Station of the New Technology of Water-Saving Agriculture in Karst Region/Guangxi Colleges and Universities Key

Laboratory of Crop Cultivation and Tillage, Nanning 530005, China)

Abstract: 【Objective】To study the effects of drip fertigation on soil active organic carbon content and methane (CH₄) emission flux in sugarcane field, and investigate the relationship between soil methane emission flux and soil active organic carbon content. 【Method】The field experiment with different irrigation and fertilization treatments under drip irrigation was conducted in Nanning Irrigation Experimental Station from March to December in 2018. Four fertilization levels were designed: Conventional fertilization (F_{100} , N 250 kg·hm⁻², P₂O₅ 150 kg·hm⁻², K₂O 200 kg·hm⁻²), incremental fertilization 1 (F_{110} , 10% increase based on

收稿日期: 2019-07-14 网络首发时间: 2020-04-22 11:00:04

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20200421.1055.002.html>

作者简介: 白雪 (1994—), 女, 硕士研究生, E-mail: 2428479916@qq.com; 通信作者: 李伏生 (1963—), 男, 教授, 博士, E-mail: 19880066@gxu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (31760603); 广西科技计划“基地和人才专项” (AD17195060)

F_{100}), incremental fertilization 2 (F_{120} , 20% increase on the basis of F_{100}), and reducing fertilization (F_{90} , 10% reduction based on F_{100}). Two drip irrigation levels were set: W_{180} ($180 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) and W_{300} ($300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$). Soil CH_4 emission flux and active organic carbon contents at different growth stages of sugarcane were measured using conventional method, and the relationships between soil CH_4 emission flux and active organic carbon contents in sugarcane field were analyzed by Pearson method. 【Result】 At tillering stage, $W_{300}F_{120}$ treatment increased soil soluble organic carbon (DOC) content by 156% compared with $W_{300}F_{100}$ but had lower CH_4 emission flux in soil than the other treatments. At maturing stage, $W_{300}F_{120}$ treatment increased soil DOC content and microbial biomass carbon (MBC) by 114% and 49.6% compared with $W_{300}F_{100}$, respectively. CH_4 emission flux in sugarcane field was only positively correlated with soil DOC content, with the correlation coefficient of 0.38. 【Conclusion】 Soil DOC content significantly affects CH_4 emission flux in sugarcane field. $W_{300}F_{120}$ treatment can increase soil soluble organic carbon content in sugarcane field at tillering and maturing stages, and reduce soil CH_4 emission in sugarcane field at tillering stage.

Key words: sugarcane field; drip fertigation; active organic carbon content; methane emission flux

土壤活性有机碳是指土壤中稳定性差、周转速率快并且易矿化分解的那部分有机碳, 主要包括易氧化有机碳、微生物量碳和可溶性有机碳^[1]。虽然土壤活性有机碳占总有机碳的比例较小, 但它能够反映出土壤有机碳微小的变化^[2], 可作为指示土壤有机碳有效性^[3]和土壤质量的早期指标。其中, 能被 $333 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KMnO_4 氧化的有机碳称作易氧化有机碳 (Labile oxidizable carbon, LOC)^[4], 其在种植作物时变化最大, 并且对外部环境变化的响应非常敏感, 其变化可在不同程度上反映土壤有机碳的有效性^[5]。土壤微生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC) 能调节土壤养分的矿化和固定过程^[6]。土壤可溶性有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC) 是微生物生长和分解过程中的重要能量来源^[7], 会影响土壤中有机和无机物质的转化、迁移和降解, 以及土壤有机碳的矿化过程^[8], 其含量高低和周转速率会直接影响微生物活性, 在土壤生态系统碳循环过程中具有重要作用^[9]。

甲烷 (CH_4) 是大气中仅次于二氧化碳的第 2 大温室气体, 在 100 年的时间尺度内其单个分子的温室效应比 CO_2 高 25 倍^[10]。以往研究表明, 土壤有机碳的微量降低可引起温室气体的大量排放, 从而加剧温室效应^[11]。虽然土壤活性有机碳占总有机碳的比例很小^[1], 但是活性碳的含量高低和周转速率对土壤养分的有效性及其循环具有重要作用^[12]。有研究指出, 易氧化有机碳对 CH_4 排放有显著影响^[13-15], 微生物量碳的变化会直接影响植物对土壤中可利用碳的供应、改变微生物的活性, 从而会对 CH_4 排放产生一定影响^[14-15]。土壤 DOC 含量与

CH_4 排放显著相关^[6]。还有研究表明, 土壤对大气碳的固持、对减少 CH_4 排放具有积极作用^[16], 因此, 有必要对土壤活性有机碳组分与 CH_4 气体减排的关系作进一步的研究。

滴灌施肥既能满足甘蔗不同生育期对水分的不同需求, 同时能有效地提高肥料利用率^[17]。齐玉春等^[18] 研究发现, 滴灌施肥对提高土壤活性有机碳有积极的作用。Singh 等^[19] 研究表明, 滴灌施肥比传统水肥管理可以显著提高土壤活性有机碳水平。滴灌施肥会影响土壤水分分布和碳循环, 从而影响土壤 CH_4 的排放速率^[20]。考虑到滴灌施肥对土壤活性有机碳组分和甲烷排放均有影响, 而滴灌施肥蔗田土壤活性有机碳组分和 CH_4 排放之间的关系尚不明晰, 还需要进一步研究。

因此, 本文在滴灌条件下, 通过田间试验研究不同滴灌水肥处理对蔗田土壤 CH_4 排放通量和土壤活性有机碳组分的影响, 分析土壤 CH_4 排放通量与活性有机碳组分之间的关系, 以揭示滴灌施肥蔗田土壤活性有机碳组分对土壤 CH_4 排放的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料与地点

2018 年 3—12 月在南宁市灌溉试验站 ($108^{\circ}29'E$, $22^{\circ}88'N$) 开展了不同滴灌灌水、施肥的田间试验。试验地点属亚热带季风气候, 试验期间月均温和月降雨量如图 1 所示, 总降雨量 $1\,371.4 \text{ mm}$ 。土壤为水稻土, 表土 (0~20 cm) 基本理化性质: pH 7.8, 有机碳 $9.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $73.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $127.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $93.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 田间持

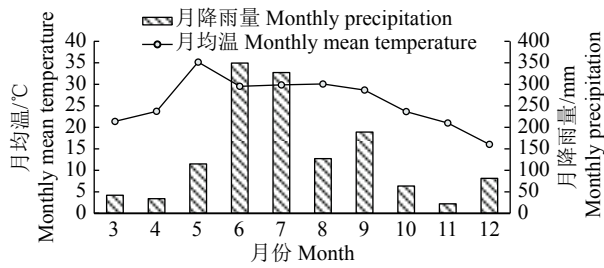


图1 试验期间月均温和月降雨量

Fig. 1 Monthly average temperature and rainfall during experimental period

水量 19.9%，容重 1.61 g cm^{-3} 。供试甘蔗品种为桂糖 42 号，控苗 $65\,000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，3 月 24 日播种，大田甘蔗试验生育期划分如下：苗期，播种后 42~72 d；分蘖期，播种后 73~108 d；伸长期，播种后 109~225 d；成熟期，播种后 225~282 d。

1.2 试验设计

田间试验设 4 种施肥水平：常规施肥 (F_{100} , $N\ 250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $P_2O_5\ 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $K_2O\ 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)，增量施肥 1 (F_{110} , 在 F_{100} 基础上增加 10%)，增量施肥 2 (F_{120} , 在 F_{100} 基础上增加 20%)，减量施肥 (F_{90} , 在 F_{100} 基础上减少 10%)。所有处理将全部 $15\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的商品有机肥 (有机质质量分数 $\geq 45\%$, $N+P_2O_5+K_2O$ 的质量分数 $\geq 5\%$, 广西田东力源宝科技有限公司产品)、全部钙镁磷肥 (P_2O_5 质量分数为 18%, 云南昆阳磷肥厂有限公司产品)、50% 的钾肥 (氯化钾, K_2O 质量分数为 60%, 中化化肥有限公司产品) 和 30% 的尿素 (N 质量分数为 46%, 陕西陕化煤化工集团有限公司产品) 作为基肥, 直接施入土壤中, 均匀撒开。余下 70% 的尿素作为追肥分别在幼苗期施用 10%、分蘖期施用 20%、伸长期施用 30% (分 2 次施入, 每次 15%), 成熟前期施用 10%, 以及剩余 50% 的钾肥 (硫酸钾, K_2O 质量分数为 52%, 广东米高化工有限公司产品) 作为追肥分别在分蘖期和伸长期各施用 25%, 所有追肥均先将肥料溶于灌溉水中, 再通过滴头随滴灌系统一起施入土壤中, 每行甘蔗两侧各摆放 1 条滴管带, 以保证对甘蔗两侧的土壤都进行灌溉或施肥, 且使各个时期水分和肥料均匀分布在甘蔗植株两侧。

本试验另设 2 种滴灌灌水水平: W_{180} , 在甘蔗生长时期总灌水量为 $180 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; W_{300} , 在甘蔗生育期总灌水量为 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 各生育时期灌水量如表 1 所示, 每次灌水均通过滴灌系统进行。试验为完全方案设计, 共 8 个处理, 每个处理重复 3 次, 共 24 个小区, 小区面积 36.96 m^2 ($6.6 \text{ m} \times 5.6 \text{ m}$), 试验地两边设有保护行, 保护行宽度为 1 m。

表 1 蔗田各生育期灌水量

生育期 Growth stage	灌溉水平 Irrigation level	
	W_{180}	W_{300}
苗期 Seedling stage	60	90
分蘖期 Tillering stage	30	60
伸长期 Elongating stage	60	120
成熟期 Ripening stage	30	30
合计 Total	180	300

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤采集和活性有机碳组分的测定 试验分别在苗期 (播种后 53 d)、分蘖期 (播种后 100 d)、伸长期 (播种后 171 d) 和成熟期 (播种后 236 d), 从各试验处理小区用直径为 5 cm 不锈钢土钻按 S 形散点法采集 0~20 cm 的耕作层土壤, 混合成一个土壤样品装入已编号的自封袋中, 采集的土壤鲜样除去可见杂质 (作物根系、杂草和小石子等), 装入低温贮藏箱并迅速运回实验室, 每个处理共采集 3 个土壤样品。部分新鲜土壤样品过 2 mm 筛后用于测定微生物量碳和可溶性有机碳含量, 剩余土样在室内自然风干后过 1 mm 筛, 用于测定土壤易氧化有机碳含量, 所有指标测定共进行 3 次重复试验。

微生物量碳含量用三氯甲烷熏蒸-硫酸钾浸提的方法测定^[21]。易氧化有机碳含量用高锰酸钾氧化-分光光度计法测定^[22]。可溶性有机碳含量用硫酸钾浸提-总有机碳法测定^[23]。

1.3.2 甲烷气体采集与测定 试验分别在各生育期采集土壤样品当天及后一天, 用静态箱法连续采集蔗田土壤 CH_4 气体。静态箱由不锈钢材料制成, 包括底座 (正方形, 边长为 37 cm, 高度 30 cm, 埋入地下 30 cm) 和盖箱 (正方形柱体, 顶部密封, 边长为 35 cm, 高度 25 cm) 两部分。每小区固定采样底座 (布置在距离甘蔗植株 10 cm 的土壤中) 1 个, 底座上部有 5 cm 深的凹槽, 取样时静态箱垂直安放在底座凹槽内并用水密封, 保证箱内气体与大气不进行交换。采样前将箱内顶部风扇打开, 以保持气体均匀混合, 采气孔位于顶部, 用注射器采集气样, 采样同时记录箱温。每个采样点在盖箱后第 0、10、20 和 30 min 时采样, 抽出 50 mL 气体保存于密封注射器内迅速带回实验室分析。 CH_4 气体采集时段为 5—11 月, 采样时间为上午 08:00—09:00。

CH_4 排放通量的测定采用 Agilent 7890A 气相色谱仪分析, 检测器为 FID, 将装有载气的高压瓶、氢气发生器、纯净空气泵、气体进样系统和主机打

开,当检测器温度升至 350 °C 和主机基线稳定后开始分析样品^[24]。CH₄ 排放通量的计算公式如下:

$$F = H \times \frac{M \times P}{R \times (273 + T)} \times \frac{dc}{dt}$$

式中: F 为土壤 CH₄ 排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; H 为箱体高度, 25 cm; M 为 CH₄ 气体的摩尔质量分数, $16.047 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; P 为标准大气压, $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$; R 为普适气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; T 为采气时箱体内的平均温度, °C; dc/dt 为土壤 CH₄ 排放速率, $\text{mL} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1.4 数据分析

显著性检验用方差分析法,多重比较采用 Duncan's 法, 均用 SPSS 24.0 软件进行分析。用 Pearson 法分别分析土壤易氧化有机碳、微生物量碳和可溶性有机碳与土壤 CH₄ 排放通量的关系。

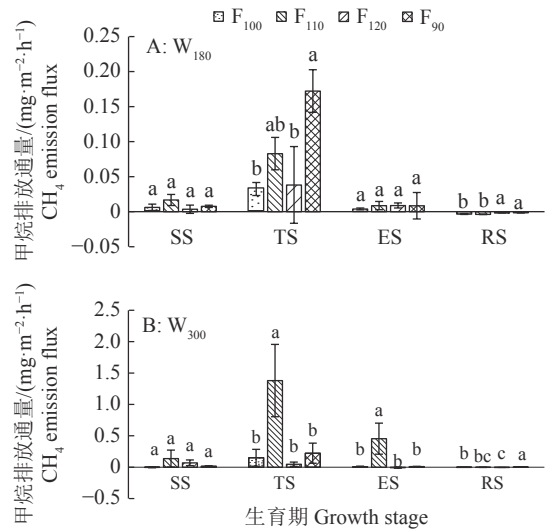
2 结果与分析

2.1 滴灌施肥对蔗田土壤甲烷排放通量的影响

不同滴灌施肥处理对不同生育时期蔗田土壤 CH₄ 排放通量的影响见图 2。各处理土壤 CH₄ 排放通量均在分蘖期达到排放高峰。W₁₈₀ 滴灌水平下, 各施肥处理在苗期、伸长期和成熟期土壤 CH₄ 排放通量接近 0, 分蘖期蔗田土壤 CH₄ 排放通量 $F_{100} < F_{120} < F_{110} < F_{90}$ 。W₃₀₀ 滴灌水平下, F_{100} 和 F_{90} 施肥处理在苗期、伸长期和成熟期的土壤 CH₄ 排放通量接近 0; F_{120} 施肥处理的土壤 CH₄ 排放通量在苗期和分蘖期较低, 而在伸长期和成熟期接近 0; 分蘖期以 F_{110} 施肥处理的土壤 CH₄ 排放通量最高, F_{120} 施肥处理的土壤 CH₄ 排放通量最低。

2.2 滴灌施肥对蔗田土壤活性有机碳组分的影响

各生育期不同滴灌施肥处理的土壤易氧化有机碳 (LOC) 含量见表 2。在苗期, 不同处理土壤



SS: 苗期, TS: 分蘖期, ES: 伸长期, RS: 成熟期; 相同生育期不同柱子上, 凡是有一个相同小写字母者表示差异不显著 ($P > 0.05$, Duncan's 法)

SS: Seedling stage; TS: Tillering stage; ES: Elongating stage; RS: Ripening stage. The same lowercase letters at the same growth stage indicated no significant difference ($P > 0.05$, Duncan's test)

图 2 不同生育期蔗田土壤甲烷排放通量

Fig. 2 Soil CH₄ emission flux at different growth stages in sugarcane field

LOC 含量之间差异不显著。在分蘖期, W₁₈₀ 滴灌水平下 F_{110} 施肥处理的土壤 LOC 含量较 F_{100} 显著增加 28.48%, F_{110} 施肥处理下 W₁₈₀ 滴灌的土壤 LOC 含量较 W₃₀₀ 显著提高 38.57%。在伸长期, W₁₈₀ 滴灌水平下 F_{90} 施肥处理的土壤 LOC 含量较 F_{100} 显著增加 39.20%, F_{110} 施肥处理下 W₃₀₀ 滴灌的土壤 LOC 含量较 W₁₈₀ 显著增加 25.20%。在成熟期, W₁₈₀ 滴灌水平下 F_{120} 施肥处理的土壤 LOC 含量较 F_{100} 显著增加 35.77%, W₃₀₀ 滴灌水平下 F_{90} 施肥处理的土壤 LOC 含量较 F_{100} 显著提高 28.79%, 且 W₃₀₀ F_{90} 处理的土壤 LOC 含量显著高于除

表 2 不同滴灌施肥处理土壤易氧化有机碳含量¹⁾

Table 2 Content of soil labile organic carbon in different drip fertigation treatments

滴灌灌水水平	施肥水平	苗期	分蘖期	伸长期	成熟期
Drip irrigation level	Fertilization level	Seedling stage	Tillering stage	Elongating stage	Ripening stage
W ₁₈₀	F ₁₀₀	1.59±0.16a	1.51±0.16bcd	1.25±0.16d	1.23±0.08d
	F ₁₁₀	1.51±0.34a	1.94±0.01a	1.23±0.12d	1.45±0.03b
	F ₁₂₀	1.56±0.07a	1.74±0.07ab	1.60±0.15ab	1.67±0.08a
	F ₉₀	1.52±0.30a	1.59±0.14bcd	1.74±0.11a	1.47±0.06b
W ₃₀₀	F ₁₀₀	1.23±0.30a	1.29±0.04d	1.31±0.14cd	1.32±0.06cd
	F ₁₁₀	1.38±0.37a	1.40±0.07cd	1.54±0.18abc	1.38±0.05bc
	F ₁₂₀	1.20±0.12a	1.64±0.10bc	1.36±0.06bcd	1.43±0.10bc
	F ₉₀	1.61±0.16a	1.43±0.01cd	1.25±0.18d	1.70±0.06a

1) 表中数据为平均值±标准误, 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)

1) The values in the table are mean ± standard error, and different lowercase letters in the same column indicated significant difference ($P < 0.05$, Duncan's test)

W₁₈₀F₁₂₀ 之外的其他处理。

各生育期不同滴灌施肥处理土壤微生物量碳 (MBC) 含量见表 3。在苗期, W₃₀₀ 滴灌水平下 F₁₀₀ 施肥处理的土壤 MBC 含量较 F₁₂₀ 显著提高 38.93%。在分蘖期, 不同处理之间土壤 MBC 含量的差异不显著。在伸长期, W₁₈₀ 和 W₃₀₀ 滴灌水平下 F₁₁₀ 施肥处理的土壤 MBC 含量较 F₁₀₀ 分别显著

提高 300.00% 和 113.20%, F₁₂₀ 施肥处理下 W₁₈₀ 滴灌水平的土壤 MBC 含量较 W₃₀₀ 显著提高 58.54%, 且 W₃₀₀F₁₁₀、W₃₀₀F₉₀、W₁₈₀F₁₁₀ 和 W₁₈₀F₁₂₀ 处理的土壤 MBC 含量较高。在成熟期, W₁₈₀ 滴灌水平下 F₉₀ 施肥处理的土壤 MBC 含量较 F₁₀₀ 显著增加 33.57%, W₃₀₀ 滴灌水平下 F₁₂₀ 施肥处理的土壤 MBC 含量较 F₁₁₀ 显著提高 49.57%。

表 3 不同滴灌施肥处理的土壤微生物量碳含量¹⁾

Table 3 Content of soil microbial biomass carbon in different drip fertigation treatments

g·kg⁻¹

滴灌灌水水平 Drip irrigation level	施肥水平 Fertilization level	苗期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	伸长期 Elongating stage	成熟期 Ripening stage
W ₁₈₀	F ₁₀₀	1.32±0.14b	0.66±0.31a	0.16±0.03c	1.40±0.21bc
	F ₁₁₀	1.31±0.19b	0.67±0.25a	0.64±0.09a	1.02±0.11c
	F ₁₂₀	1.27±0.16b	0.41±0.23a	0.65±0.03a	1.46±0.14abc
	F ₉₀	1.26±0.38b	0.54±0.16a	0.25±0.08bc	1.87±0.04a
W ₃₀₀	F ₁₀₀	1.82±0.03a	0.64±0.16a	0.38±0.05b	1.30±0.20bc
	F ₁₁₀	1.40±0.29ab	0.63±0.08a	0.81±0.09a	1.15±0.11c
	F ₁₂₀	1.31±0.34b	0.25±0.19a	0.41±0.05b	1.72±0.11ab
	F ₉₀	1.67±0.05ab	0.31±0.29a	0.67±0.09a	1.71±0.10ab

1) 表中数据为平均值±标准误, 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 (P<0.05, Duncan's 法)

1) The values in the table are mean ± standard error, and different lowercase letters in the same column indicated significant difference (P<0.05, Duncan's test)

各生育期不同滴灌施肥处理土壤可溶性有机碳 (DOC) 含量见表 4。在苗期, 不同处理土壤 DOC 含量之间的差异不显著。在分蘖期, W₃₀₀ 滴灌水平下 F₁₂₀ 处理的土壤 DOC 含量最高, 较 F₁₀₀ 和 F₉₀ 分别显著提高 156% 和 205%。在伸长期, 相同滴灌水平下, F₁₁₀、F₁₂₀ 和 F₉₀ 施肥处理的土壤 DOC 含量均高于 F₁₀₀, 但差异不显著 (W₁₈₀F₉₀ 处理除

外)。在成熟期, W₁₈₀ 滴灌水平下 F₉₀ 施肥处理的土壤 DOC 含量较 F₁₀₀ 显著提高 183%, W₃₀₀ 滴灌水平下 F₁₂₀ 和 F₉₀ 施肥处理的土壤 DOC 含量分别较 F₁₀₀ 显著提高 114% 和 143%, 且在相同灌水水平下, F₁₁₀、F₁₂₀ 和 F₉₀ 施肥处理的土壤 DOC 含量均高于 F₁₀₀。此外, W₃₀₀F₉₀ 处理土壤 DOC 含量较其他处理高。

表 4 不同滴灌施肥处理的土壤可溶性有机碳含量¹⁾

Table 4 Content of soil dissolved organic carbon in different drip fertigation treatments

g·kg⁻¹

滴灌灌水水平 Drip irrigation level	施肥水平 Fertilization level	苗期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	伸长期 Elongating stage	成熟期 Ripening stage
W ₁₈₀	F ₁₀₀	0.12±0.06a	0.29±0.11cd	0.14±0.06b	0.12±0.02c
	F ₁₁₀	0.28±0.10a	0.43±0.03abcd	0.15±0.07b	0.23±0.03bc
	F ₁₂₀	0.31±0.15a	0.50±0.05abc	0.15±0.05b	0.30±0.14abc
	F ₉₀	0.13±0.05a	0.41±0.12bcd	0.30±0.06a	0.34±0.14ab
W ₃₀₀	F ₁₀₀	0.10±0.08a	0.25±0.15d	0.15±0.09b	0.21±0.09bc
	F ₁₁₀	0.28±0.13a	0.57±0.20ab	0.23±0.12ab	0.23±0.12bc
	F ₁₂₀	0.26±0.10a	0.64±0.13a	0.18±0.05ab	0.45±0.18a
	F ₉₀	0.24±0.17a	0.21±0.07d	0.16±0.08ab	0.51±0.08a

1) 表中数据为平均值±标准误, 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 (P<0.05, Duncan's 法)

1) The values in the table are mean ± standard error, and different lowercase letters in the same column indicated significant difference (P<0.05, Duncan's test)

2.3 滴灌施肥蔗田土壤甲烷排放通量与活性有机碳组分的关系

将 4 个生育期土壤 CH_4 排放通量与对应时期土样采集当天的土壤活性有机碳组分进行相关性分析, 结果表明, 土壤 CH_4 排放通量与土壤 DOC 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 相关系数为 0.38; 与土壤 MBC 和 LOC 含量的相关系数分别为 -0.21 和 -0.02, 且相关性不显著, 说明蔗田土壤可溶性有机碳含量对土壤甲烷排放有显著影响。

3 讨论与结论

CH_4 的产生和排放是严格厌氧条件下产甲烷菌作用的结果, 充足的产甲烷基质和适宜的产甲烷菌生长环境是 CH_4 产生的先决条件^[25], 而好气土壤环境利于 CH_4 氧化菌的生长, 可氧化消耗大气中的 CH_4 ^[26]。本研究结果表明, W_{180} 和 W_{300} 滴灌水平下蔗田土壤 CH_4 排放在全生育期基本上呈双峰型变化规律, 这可能是因为甘蔗苗分蘖期正处于南方雨季, 高降雨量造成土壤较长时间处于淹水状态, 使产甲烷菌在厌氧条件下利用土壤中的有机质进行呼吸作用, 导致 CH_4 的大量排放^[27], 这也与齐玉春等^[18] 得出的水分变化可在短期内激发温室气体排放的结论相一致。石生伟等^[28] 研究结果表明增加施氮量可有效降低甲烷排放量, 本研究中, $W_{300}F_{120}$ 处理在分蘖期蔗田土壤 CH_4 排放量最低, 这可能是因为增加施肥量使土壤中的 NH_4^+-N 含量提高^[29], 从而增加土壤甲烷氧化菌的数量并促进其活动^[30], 进而降低了土壤中 CH_4 的排放。

Yagi 等^[13] 指出, 土壤 LOC 含量对 CH_4 排放有显著的影响, 但吴家梅等^[31] 研究也表明, 土壤 LOC 含量与甲烷排放相关性不大, 本文研究结果同样显示, 蔗田土壤 CH_4 排放通量与 LOC 含量相关性不显著。LOC 属于活性有机碳, 在淹水土壤中容易分解且变化比较明显, 而本试验为旱地滴灌试验, 很难使土壤长期处于严格厌氧环境, 因此本试验条件下, 土壤 LOC 含量与甲烷排放的关系不密切。

Masto 等^[32] 研究表明, 施用化肥具有提高土壤 MBC 含量的效应。本试验结果表明, $W_{180}F_{120}$ 和 $W_{300}F_{110}$ 可分别提高伸长期蔗田土壤 MBC 含量, 这可能与商品有机肥的加入提高了土壤微生物活性有关^[33]。MBC 含量的变化会影响植物对土壤中可利用碳的供应, 从而对 CH_4 排放产生影响^[14]。本文研究表明, 蔗田土壤 CH_4 排放通量与土壤 MBC 无显著相关性, 这可能与不同土壤类型和滴

灌施肥方式对微生物活性的影响不同有关, 具体机理还需进一步研究。

李睿^[34] 的研究表明, 土壤中微生物具有分解土壤有机质和为植物提供营养物质的作用, 土壤中有相当比例的 DOC 来源于土壤微生物的代谢产物, 且微生物死亡后躯体本身的结构组织也易分解成 DOC^[35]。本试验结果表明, $W_{300}F_{120}$ 较 $W_{300}F_{100}$ 处理显著提高了分蘖期和成熟期蔗田土壤可溶性有机碳含量, 这可能是因为施肥量增加使土壤微生物能利用更多的有机质进行代谢活动, 从而对蔗田土壤 DOC 含量的提高产生了积极影响。莫永亮等^[36] 指出, 土壤中 DOC 是 CH_4 产生的必要条件, 它是微生物生长必需的碳源, 又是微生物代谢的产物, 其含量可能影响 CH_4 排放通量。本研究结果同样表明, 土壤 CH_4 排放通量与土壤 DOC 含量有显著正相关关系, 这一结果也与王瑞^[7] 的研究结果一致。

综上所述, 在分蘖期, $W_{300}F_{120}$ 土壤可溶性有机碳 (DOC) 较其他处理高, 但是土壤 CH_4 排放通量较其他处理低。在成熟期, $W_{300}F_{120}$ 蔗田土壤 DOC 含量较高。土壤 CH_4 排放通量仅与土壤 DOC 含量之间呈显著正相关, 相关系数为 0.38, 说明土壤 DOC 含量可显著影响蔗田土壤甲烷排放通量。因此, $W_{300}F_{120}$ 可提高分蘖期和成熟期蔗田土壤可溶性有机碳含量, 同时降低分蘖期蔗田土壤甲烷排放。

参考文献:

- [1] 罗梅, 田冬, 高明, 等. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4327-4337.
- [2] SAVIOZZI A, LEVI-MINZI R, CARDELLI R, et al. A comparison of soil quality in adjacent cultivated, forest and native grassland soils[J]. *Plant Soil*, 2001, 233(2): 251-259.
- [3] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性碳的表征及其生态意义[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38.
- [4] LEFROY R D B, BLAIR G J, STRONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. *Plant Soil*, 1993, 155/156(1): 399-402.
- [5] 张哲, 王邵军, 李霁航, 等. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(17): 6257-6263.
- [6] PURI G, ASHMAN M R. Relationship between soil microbial biomass and gross N mineralisation[J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30(2): 251-256.
- [7] 王瑞. 秸秆添加对土壤温室气体排放和溶解性有机碳 DOC 组分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [8] 刘霞娇, 段亚峰, 叶莹莹, 等. 耕作扰动对喀斯特土壤可溶性有机质及其组分迁移淋失的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6981-6991.

- [9] 汪景宽,李丛,于树,等.不同肥力棕壤溶解性有机碳、氮生物降解特性[J].生态学报,2008,28(12):6165-6171.
- [10] 寇永珍.草海高原湿地湖滨带甲烷产生与氧化潜力研究[D].贵阳:贵州师范大学,2015.
- [11] SMITH P, FANG C M. Carbon cycle:A warm response by soils[J]. Nature, 2010, 464(7288): 499-500.
- [12] 倪进治,徐建民,谢正苗.有机肥料施用后潮土中活性有机质组分的动态变化[J].农业环境科学学报,2003,22(4):416-419.
- [13] YAGI K, MINAMI K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. Soil Sci Plant Nutr, 1990, 36(4): 599-610.
- [14] BLAGODATSKAYA E, YUYUKINA T, BLAGODATSKY S, et al. Three-source-partitioning of microbial biomass and of CO₂ efflux from soil to evaluate mechanisms of priming effects[J]. Soil Biol Biochem, 2011, 43(4): 778-786.
- [15] 王楷,李伏生,方泽涛,等.不同灌溉模式和施氮量条件下稻田甲烷排放及其与有机碳组分关系[J].农业环境科学学报,2017,36(5):1012-1020.
- [16] WIESMEIER M, HÜBNER R, SPÖRLEIN P, et al. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation[J]. Glob Change Biol, 2014, 20(2): 653-665.
- [17] 魏长宾,刘胜辉,何应对,等.甘蔗滴灌施肥效果研究初报[J].广东农业科学,2008,35(7):60-61.
- [18] 齐玉春,郭树芳,董云社,等.灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J].中国农业科学,2014,47(9):1764-1773.
- [19] SINGH A, GULATI I J, CHOPRA R, et al. Effect of drip-fertigation with organic manures on soil properties and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) yield under arid condition[J]. Ann Biol, 2014, 30(2): 345-359.
- [20] 刘岳燕.水分条件与水稻土壤微生物生物量、活性及多样性的关系研究[D].杭州:浙江大学,2009.
- [21] 俞慎,李振高.薰蒸提取法测定土壤微生物量研究进展[J].土壤学进展,1994,22(6):42-50.
- [22] 王莹,阮宏华,黄亮亮,等.围湖造田不同土地利用方式土壤有机碳和易氧化碳[J].生态环境学报,2010,19(4):913-918.
- [23] 刘涛泽,刘丛强,张伟,等.喀斯特地区坡地土壤可溶性有机碳的分布特征[J].中国环境科学,2009,29(3):248-253.
- [24] 董艳芳,黄景,李伏生,等.不同灌溉模式和施氮处理下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放[J].植物营养与肥科学报,2017,23(3):578-588.
- [25] 汤桂容,周旋,田昌,等.有机无机氮肥配施对菜地土壤二氧化碳和甲烷排放的影响[J].中国土壤与肥料,2019(3):29-35.
- [26] 李玉娥,林而达.土壤甲烷吸收汇研究进展[J].地球科学进展,1999,14(6):613-618.
- [27] 道力格亚.长期不同施肥处理下旱地 CO₂ 和 CH₄ 排放特征的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [28] 石生伟,李玉娥,刘运通,等.中国稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及减排整合分析[J].中国农业科学,2010,43(14):2923-2936.
- [29] 焦燕,黄耀,宗良纲,等.氮肥水平对不同土壤 CH₄ 排放的影响[J].环境科学,2005,26(3):21-24.
- [30] BODELIER P L E, HAHN A P, ARTH I R, et al. Effects of ammonium-based fertilization on microbial processes involved in methane emission from soils planted with rice[J]. Biogeochemistry, 2000, 51(3): 225-257.
- [31] 吴家梅,纪雄辉,霍莲杰,等.稻田土壤氧化态有机碳组分变化及其与甲烷排放的关联性[J].生态学报,2013,33(15):4599-4607.
- [32] MASTO R E, CHHONKAR P K, SINGH D, et al. Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a sub-tropical inceptisol[J]. Soil Biol Biochem, 2006, 38(7): 1577-1582.
- [33] 杨文元,董博,赵记军,等.追施不同量尿素下麦后复种油菜对耕层土壤有机碳及微生物量碳氮的影响[J].水土保持通报,2017,37(3):59-62.
- [34] 李睿.DOM对紫色土中养分有效性的影响[D].重庆:西南农业大学,2005.
- [35] 孙冬晔.施肥措施对红壤性水稻土可溶性有机碳组成及生物有效性的影响[D].南京:南京农业大学,2014.
- [36] 莫永亮,胡荣桂,赵劲松,等.冬水田转稻麦轮作对小麦生长季温室气体排放的影响[J].环境科学学报,2014,34(10):2675-2683.

【责任编辑 李晓卉】