

DOI: 10.5846/stxb201606181181

吴家梅, 霍莲杰, 纪雄辉, 谢运河, 田发祥, 彭华, 朱坚, 官迪. 不同施肥处理对土壤活性有机碳和甲烷排放的影响. 生态学报, 2017, 37(18): 6167-6175.

Wu J M, Huo L J, Ji X H, Xie Y H, Tian F X, Peng H, Zhu J, Guan D. Effects of organic manure application on active soil organic carbon and methane emission in paddy soils. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6167-6175.

不同施肥处理对土壤活性有机碳和甲烷排放的影响

吴家梅^{1,2,*}, 霍莲杰³, 纪雄辉^{1,2}, 谢运河¹, 田发祥¹, 彭 华¹, 朱 坚¹, 官 迪¹

1 湖南省土壤肥料研究所, 农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125

2 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410125

3 河南省新悦环境科学技术研究发展有限公司, 洛阳 471000

摘要:通过采集田间试验区连续 3a 施入有机肥的稻田耕层土壤, 分析土壤中微生物量碳 (MBC)、水溶性有机碳 (DOC)、易氧化有机碳 (ROC) 和可矿化有机碳 (readily mineralizable carbon, RMC) 等活性有机碳的含量, 稻田甲烷 (CH_4) 的排放通量, 探讨施用有机肥的土壤活性有机碳变化及与 CH_4 排放的关系。研究结果显示: (1) 施有机肥对土壤中的活性有机碳均有一定的促进作用。3a 不同施肥处理土壤中 DOC、ROC、MBC 和 RMC 的平均含量分别为 383.6、2501.2、640.4 mg/kg 和 291.7 mg/kg。3a 施猪粪 (猪粪+化肥, PM)、鸡粪 (鸡粪+化肥, CM) 和稻草 (稻草+化肥, RS) 的 DOC 的含量分别比化肥 (CF) 处理增加 5.6%、6.7% 和 19.3%, ROC 的含量分别比 CF 增加 6.6%、8.4% 和 9.8%; MBC 含量分别比 CF 增加 5.1%、14.8% 和 21.5%, RMC 增加 6.8%、22.0% 和 33.9%。不同施肥处理的稻田土壤活性有机碳为分蘖期高于成熟期。(2) 施肥处理显著增加稻田 CH_4 排放, CH_4 分蘖期的排放通量是成熟期的 143 倍, 3a PM、CM 和 RS 处理的 CH_4 排放分别比 CF 处理增加 37.0% ($P < 0.05$)、92.7% ($P < 0.05$) 和 99.4% ($P < 0.05$)。(3) 不同施肥处理的 DOC、ROC、MBC 和 RMC 含量与 CH_4 排放通量均存在显著正相关关系, ROC 与 CH_4 排放的相关系数最高, 为 0.754 ($P < 0.01$), 且 4 种有机碳间关系密切。稻田分蘖期土壤中的活性有机碳与稻田 CH_4 排放呈显著正相关关系。(4) 综合分析, 在 4 种有机碳中, 土壤中 ROC 和 MBC 的含量直接影响 CH_4 排放。

关键词:土壤活性有机碳; 水溶性有机碳; 微生物量碳; 易氧化有机碳; 可矿化有机碳; 甲烷排放

Effects of organic manure application on active soil organic carbon and methane emission in paddy soils

WU Jiamei^{1,2,*}, HUO Lianjie³, JI Xionghui^{1,2}, XIE Yunhe¹, TIAN Faxiang¹, PENG Hua¹, ZHU Jian¹, GUAN Di¹

1 Institute of Soil and Fertilizer in Hunan Province, Key Laboratory of Agro-Environment in Midstream of Yangtze Plain, Minister of Agriculture, Changsha 410125, China

2 China Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410125, China

3 He'nan Xinyue Environmental Science and Technology Research and Development Co., Ltd., Luoyang 471000, China

Abstract: Active soil organic carbon (ASOC) is an important component of soil. It plays a critical role in soil organic carbon turnover processes, which potentially contribute to future climate change. The properties of ASOC and its effects on methane (CH_4) emission from paddy soils remain unclear, and were therefore investigated in the present study. We determined ASOC, including microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC), readily oxidized organic carbon (ROC), and readily mineralizable carbon (RMC), for 3 consecutive years after application of organic fertilizer. The treatments used were as follows: (1) no fertilizer (NF); (2) chemical fertilizer (CF); (3) pig manure + chemical

基金项目:国家自然科学基金 (31300413); 国家科技支撑计划课题 (2013BAD11B02)

收稿日期:2016-06-18; **网络出版日期:**2017-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: waloe@163.com

fertilizer (PM); (4) chicken manure + chemical fertilizer (CM); and (5) rice straw + chemical fertilizer (RS). The results demonstrated that (1): ASOC increased upon application of organic manures. The 3-year average content of ASOC in DOC, ROC, MBC, and RMC was 383.6, 2501.2, 640.4, and 291.7 mg/kg, respectively. The content of soil DOC, ROC, MBC, and RMC under different treatments was in the following order: RS>CM>PM>CF>NF. The content of DOC was 5.6%, 6.7%, and 19.3% higher in PM, CM, and RS, respectively, than in CF. The content of ROC increased by 6.6%, 8.4%, and 9.8% with PM, CM, and RS, respectively, over that in the CF treatment. The PM, CM, and RS treatments showed 5.1%, 14.8%, and 21.5% higher MBC contents and 6.8%, 22.0%, and 33.9% higher RMC contents, respectively, than CF treatment. The ASOC content was higher at the tillering stage than at the maturity stage. (2): The CH₄ emissions significantly increased with application of organic manure. The CH₄ emissions under different treatments were in the following order: RS>CM>PM>CF>NF. The CH₄ emission in PM, CM, and RS treatments increased by 37.0% ($P<0.05$), 92.7% ($P<0.05$), and 99.4% ($P<0.05$), respectively, over those in the CF treatment. The CH₄ emission was 142-fold higher at the tillering stage than at the maturity stage. (3): With the increasing duration of application, CH₄ emission at rice tillering stage increased in different treatments. Positive correlations were observed among DOC, ROC, MBC, and RMC in all treatments. DOC, ROC, MBC, and RMC contents were strongly correlated with CH₄ emission, (e.g., the highest correlation coefficient between ROC and CH₄ emission, $r=0.754$, $P<0.05$). The contents in DOC, ROC, MBC, and RMC at the tillering stage had a significant correlation with CH₄ emission, with correlation coefficients of 0.537 ($P<0.01$), 0.754 ($P<0.01$), 0.728 ($P<0.01$), and 0.431 ($P<0.01$), respectively. However, no significant correlation was observed at the maturity stage. In conclusion, ASOC content showed a close correlation with CH₄ emission, especially ROC and MBC content, which might be directly associated with CH₄ emission. The results of the present study suggest that, among the treatments tested, pig manure is the best organic fertilizer because the soil has lower ROC and MBC contents. Application of pig manure could be an effective measure to improve the quality of the soil, render it suitable for sustainable development, and mitigate CH₄ emissions.

Key Words: active soil organic carbon; dissolved organic carbon; microbial biomass carbon; easily oxidized organic carbon; mineralizable organic carbon; methane emission

土壤活性有机碳指在一定的时空条件下,受植物、微生物影响强烈、具有一定溶解性、在土壤中移动比较快、不稳定、易氧化、分解、易矿化,其形态、空间位置对植物、微生物来说活性比较高的那一部分土壤碳素^[1],虽然占总有机碳的比例很小,但在碳循环中起着极为重要的作用^[2],对区域微环境的变化相应更为敏感的碳组分^[3],已经成为土壤、环境、生态等学科领域研究的焦点之一。活性有机碳组分较多,有学者认为土壤中的微生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(ROC)和可矿化有机碳(RMC)是土壤活性有机碳的主要表征指标^[1,4],可以敏感地反映土壤碳的变化,改善土壤质量以及维护土壤碳库平衡等方面具有重要意义^[5-6]。

土壤中 MBC、DOC、ROC 和 RMC 在施肥、耕作方式、土壤利用方式等对碳库的影响研究较多,但在稻田生态系统中,土壤活性有机碳动态变化及与土壤碳作为基质的 CH₄排放关系研究较少,稻田 CH₄排放研究是当今的热点问题。Bridgham 和 Richardson^[7]等认为有机质中活性有机碳的多少决定了土壤产 CH₄潜能的强弱和 CH₄产量的高低。作为土壤中周转较快的活性有机碳,哪种组成对土壤碳分解产生的 CH₄排放影响最大尚不清楚。本研究采用不同有机肥施入稻田的小区试验,研究土壤活性有机碳在稻田 CH₄排放高峰和低谷的动态变化,以揭示土壤活性有机碳的含量及与稻田 CH₄排放的关系,为稻田土壤活性有机碳的进一步研究和科学预测土壤活性有机碳对 CH₄排放变化的响应提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于湖南省长沙县干杉乡大屋组的水稻田(28°08'18"N,113°12'0"E),海拔 42 m,年平均温度为 17.1℃,年降水量 1500 mm,≥10℃年积温 5300—6500℃,为南方典型的水稻生产区。土壤类型为第四纪红壤发育的红黄泥水稻土,化学性状:土壤 pH 6.0、有机质 33.3 g/kg、全氮 2.04 g/kg、全磷 0.85 g/kg、全钾 9.2 g/kg、碱解氮 212 mg/kg、有效磷 11.1 mg/kg、速效钾 97 mg/kg。

1.2 试验设计

试验在 2010—2012 年开展,设置 5 个处理,分别为:不施肥、化肥、化肥+猪粪(猪粪,PM)、化肥+鸡粪(鸡粪,CM)和化肥+稻草(稻草,RS)。每个处理 3 个重复,采用单因素随机区组设计,每个处理的施肥量见表 1。前季作物为水稻,插秧前期田间保持淹水状态。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾,有机肥为风干样品。稻草为一季稻收获的稻草平均产量 7500 kg/hm²全部还田,再根据稻草的含碳量计算出施入稻田的总碳量,为保持稻田施入的总碳量相同,猪粪和鸡粪也相应的计算出施肥的总量,从而计算出施入稻田的有机肥的氮、磷和钾的含量,有机肥中氮素和钾素不够用尿素和氯化钾补充,由于鸡粪的有机碳含量比稻草低,其含磷和钾比稻草高,猪粪的总磷高,致使施入鸡粪处理的磷钾肥和猪粪处理的磷肥超过化肥处理相应的施用量。

稻草剪成约 20 cm 小段,踩入田间,其他肥料撒入田间,与土壤混匀。水分管理和病虫害防治与当地大面积生产相一致。水稻品种为准两优 608。

表 1 不同处理的施肥量

Table 1 Fertilizer application rates of different treatments

处理 Treatments	化肥 Chemical fertilizer/(kg/hm ²)			有机肥 Organic manures/(kg/hm ²)				总养分 Nutrient amount/(kg/hm ²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
NF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CF	270	135	180	0	0	0	0	270	135	180
PM	112	0	70	2850	158	197	110	270	197	180
CM	74	0	0	2850	196	218	197	270	218	197
RS	234	129	68	2850	36	6	112	270	135	180

NF: 无肥 no fertilizer; CF: 化肥 chemical fertilizer; PM: 猪粪 pig manure + chemical fertilizer; CM: 鸡粪 chicken manure + chemical fertilizer; RS: 稻草 rice straw + chemical fertilizer

1.3 采样与分析

水稻分蘖期、成熟期取土壤和气体样品测定。气体样品的采集和测定方法见吴家梅的文献^[8]。每个小区取 5 个土样混合,清除土样中的植物根系、凋落物和砂砾等,风干过 0.25mm 土壤筛,用于测定 DOC、MBC、ROC 和 RMC 含量。DOC 采用水土比 5:1,蒸馏水浸提、震荡,离心过 0.45μm 滤膜,上 TOC 仪测定^[9],MBC 采用氯仿熏蒸 K₂SO₄浸提法,滤液在 TOC 仪上测定^[10];ROC 采用 33mmol/L 高锰酸钾比色法测定^[11],RMC 的培养为称 12g 风干样品,加入田间持水量的 60%,按 Yagi 和 Minami 的方法培养和测定^[12]。

1.4 数据处理

数据经 Excel 2007 整理后,采用 SPSS 17.0 软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA),LSD($P=0.05$ 或 0.01)比较不同处理土壤活性有机碳含量之间的差异。土壤活性有机碳各组分与 CH₄排放通量间的相关性分析采用 Pearson 检验法。土壤活性有机碳组分与 CH₄排放通量采用多元线逐步回归法进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理土壤 DOC 的含量变化

3a 连续不同施肥处理稻田土壤 DOC 含量为 261.3—587.3 mg/kg(图 1),平均值为 383.6 mg/kg。同一水

稻生长季节,相同处理的 DOC 含量均为分蘖期高于成熟期(除 2011 年 RS 处理外)。不同年份间,施有机肥处理第 1 年和第 2 年分蘖期和成熟期的变化不大,施肥第 3 年后,分蘖期和成熟期相同处理的 DOC 含量明显高于前两年的含量,不同处理分蘖期 3a DOC 的平均含量分别为 400.2 mg/kg,比成熟期高 8.7%。

施肥后稻田土壤的 DOC 含量增加,而有机肥处理含量又高于化肥处理。不同处理分蘖期和成熟期 DOC 含量均为 RS>CM>PM>CF>NF,3a PM、CM 和 RS 处理分蘖期的 DOC 含量分别比 CF 处理增加 4.7%、5.6%和 18.4%;3a PM、CM 和 RS 处理成熟期的 DOC 含量分别比 CF 处理增加 6.4%、7.8%和 20.2%,不同施肥处理的 PM、CM 和 RS 的平均含量分别比 CF 增加 5.6%、6.7%和 19.3%。施肥第 1 年和第 2 年不同处理不同生育期的 DOC 含量无显著性差异,第 3 年 RS 处理的水稻分蘖期的 DOC 含量分别比 CF、PM 和 CM 高 6.2% ($P<0.05$)、10.7% ($P<0.05$) 和 39.7% ($P<0.05$)。

2.2 不同施肥处理土壤 ROC 的含量变化

不同施肥处理稻田土壤 ROC 的含量 2193.0—2816.3 mg/kg(图 2),其平均含量为 2501.2 mg/kg。同一水稻季节,相同处理分蘖期 ROC 含量高于成熟期,3a 不同处理分蘖期 ROC 的平均含量为 2507.9、2622.0 mg/kg 和 2973.8 mg/kg,分别比同季成熟期高 92%、11.4%和 20.2%。分蘖期和成熟期的 ROC 含量均随着施肥年份的增加而增加,施肥第 3 年 ROC 的含量均高于前两年。

同一季节,不同处理的 ROC 平均含量均为 RS>CM>PM>CF>NF。水稻分蘖期:施肥第 1 年不同处理的 ROC 含量无明显影响,施肥第 2 年,RS 处理比 CF 处理增加 11.4% ($P<0.05$),施肥第 3 年,RS、CM 和 PM 处理的 ROC 含量比 CF 处理增加 19.1% ($P<0.05$)、13.8% ($P<0.05$) 和 15.7% ($P<0.05$),有机肥间无显著性差异。3a PM、CM 和 RS 的施肥处理分蘖期 ROC 的平均含量分别比 CF 处理增加 7.3%、9.5%和 10.3%。水稻成熟期:施有机肥第 1 年,不同处理间无显著性差异,施肥第 2 年,RS 处理的 ROC 含量明显高于 NF 处理,施肥第 3 年,RS、CM 和 PM 处理的 ROC 含量分别比 CF 处理增加 5.2% ($P<0.05$)、6.7% ($P<0.05$) 和 9.6% ($P<0.05$),3a 成熟期 PM、CM 和 RS 处理的 ROC 平均含量分别比 CF 增加 5.9%、7.3%和 9.4%。水稻不同生长时期的 PM、CM 和 RS 分别比 CF 增加 6.6%、8.4%和 9.8%。

2.3 不同施肥处理土壤 MBC 的含量变化

3a 连续不同施肥处理稻田土壤 MBC 的含量为 392.0—926.6 mg/kg(图 3)。同一水稻季节,生育期和成熟期的 MBC 含量分别为 614.9 mg/kg 和 519.1 mg/kg。MBC 含量随施肥年份的增加而增加,3a 不同处理分蘖期 MBC 平均含量为 569.9、691.0 mg/kg 和 831.8 mg/kg,2012 年分蘖期土壤 MBC 含量比分别比 2011 年和 2012 年同一时期高 121.1 mg/kg 和 269.1 mg/kg。施肥处理的成熟期的含量比分蘖期少 5.3%—28.6%。

同一季节,不同处理的 MBC 平均含量均为 RS>CM>PM>CF>NF。3a 不同施肥处理,分蘖期的 PM、CM 和 RS 处理的 MBC 含量分别比 CF 处理高 1.8%、11.4 和 19.3%。施肥第 1 年,分蘖期不同处理间无显著性差异,施肥第 2 年,RS、CM 和 PM 处理分蘖期的 MBC 含量比 CF 处理增加 2.9% ($P<0.05$)、19.7% ($P<0.05$) 和 28.5% ($P<0.05$),施肥 3a 的 RS 和 CM 处理分蘖期的 MBC 含量比 CF 处理增加 8.9% ($P<0.05$) 和 11.9% ($P<0.05$)。施肥第 1 年和第 2 年成熟期的 RS 处理的 MBC 含量显著高于 NF 处理,其他均无显著性差异。不同水稻生育时期 PM、CM 和 RS 处理的 MBC 平均含量分别比 CF 增加 5.1%、14.8%和 21.5%。

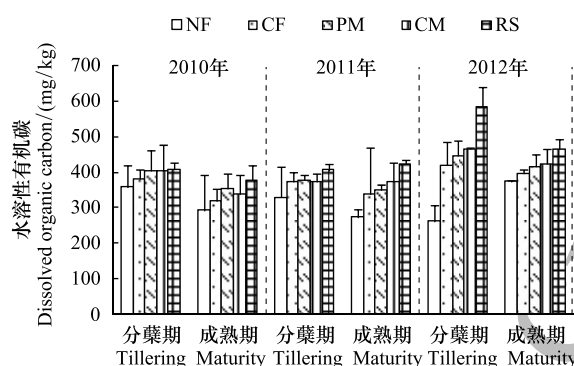


图 1 不同处理土壤 DOC 含量变化

Fig.1 Variations of soil DOC content under different fertilization treatments

NF: 无肥 no fertilizer; CF: 化肥 chemical fertilizer; PM: 猪粪 pig manure + chemical fertilizer; CM: 鸡粪 chicken manure + chemical fertilizer; RS: 稻草 rice straw + chemical fertilizer

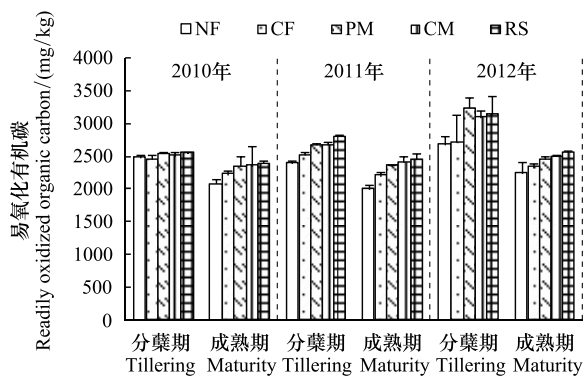


图2 不同处理土壤 ROC 含量变化

Fig.2 Variations of soil ROC content under different fertilization treatments

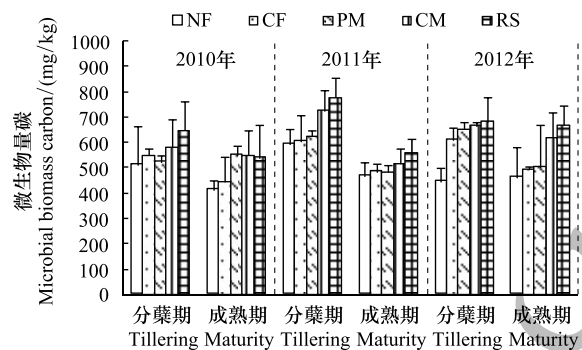


图3 不同处理土壤 MBC 含量变化

Fig.3 Variations of soil MBC content under different fertilization treatments

2.4 不同施肥处理土壤 RMC 的含量变化

3a 不同处理水稻分蘖期的土壤 RMC 平均含量为 291.7 mg/kg(图 4), 3a 分蘖期比成熟期的 RMC 含量高 30.9%。

施肥第 1 年和第 2 年不同处理水稻分蘖期 RMC 含量差别不大,但施入有机肥处理略高于无肥处理,施肥第 3a RMC 含量差别逐渐变大,尤其是 RS 处理,比 PM 和 CF 分别增加 50.0% ($P<0.05$) 和 71.0% ($P<0.05$)。施肥第 1 年和第 2 年的成熟期不同处理的 RMC 含量间无显著性差异,施肥 3a 后,成熟期 RS、CM 和 PM 处理分别比 CF 处理增加 71.1% ($P<0.05$)、70.6% ($P<0.05$) 和 141.4% ($P<0.05$),比 NF 增加 66.9% ($P<0.05$)、101.2% ($P<0.05$) 和 101.8% ($P<0.05$)。

NF 处理的 RMC 最低(除 2011 年成熟期外),分别比同一水稻季节 CF、PM、CM 和 RS 处理的 RMC 减少 87.7—417.3 mg/kg。3a 不同水稻时期 RMC 平均含量分别比 CF 增加 7.4%、20.7% 和 34.1%。

2.5 CH₄ 排放通量

CH₄ 排放通量可见(表 2),水稻分蘖期稻田 CH₄ 排放通量 15.4—59.6 mg m⁻² h⁻¹,成熟期排放通量为 0.1—0.7 mg m⁻² h⁻¹,3a 稻田 CH₄ 平均排放通量分别是成熟期的 45、89 和 295 倍。水稻分蘖期,随着施肥年份的增加,排放通量增加,成熟期不同处理的 CH₄ 排放通量低,且随年季变化不大,不同处理间无显著性差异。不同年份、不同时期 CH₄ 排放通量均为 RS>CM>PM>CF 和 NF。

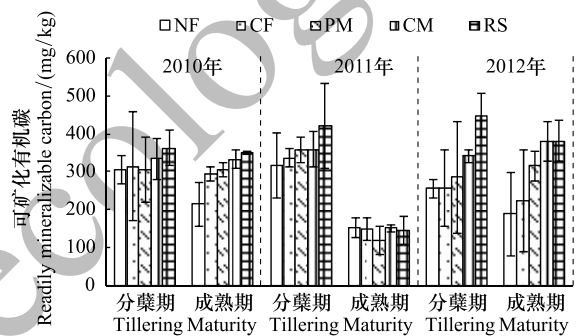


图4 不同处理土壤 RMC 含量变化

Fig.4 Variations of soil RMC content under different fertilization treatments

表 2 不同施肥处理的排放通量/(mg m⁻² h⁻¹)Table 2 CH₄ emissions under different fertilization treatments

处理	2010		2011		2012	
Treatments	分蘖期 Tillering	成熟期 Maturity	分蘖期 Tillering	成熟期 Maturity	分蘖期 Tillering	成熟期 Maturity
NF	15.4±2.5 b	0.6±0.7 a	26.6±5.4 b	0.3±0.1 a	27.3±4.8 c	0.2±0.1 a
CF	17.3±1.6 b	0.4±0.3 a	26.1±2.2 b	0.4±0.1 a	29.9±4.2 c	0.1±0.0 a
PM	23.8±3.0 b	0.5±0.7 a	27.4±2.9 b	0.2±0.0 a	41.0±0.5 b	0.2±0.1 a
CM	19.8±5.0 b	0.3±0.2 a	33.6±5.1 b	0.5±0.4 a	57.6±1.9 a	0.1±0.1 a
RS	37.0±8.4 a	0.7±0.5 a	55.7±7.2 a	0.5±0.1 a	59.6±3.6 a	0.2±0.1 a

平均值±标准差,表中同一列数据不同字母表示达到了 5% 的显著水平

施入有机肥处理第1年和第2年分蘖期的 CH_4 排放通量高于 NF 和 CF 处理, NF、CF、CM 和 PM 处理间无明显差异, RS 处理明显高于其他处理, 施肥第3年有机肥处理明显高于 CF 和 NF 处理, RS 处理最高, 其次为 CM 处理, 明显高于 PM 处理, RS、CM 和 PM 处理分别比 NF 处理增加 50.0% ($P<0.05$)、110.9% ($P<0.05$) 和 118.3% ($P<0.05$), 比 CF 处理增加 37.0% ($P<0.05$)、92.7% ($P<0.05$) 和 99.4% ($P<0.05$)。

2.5 土壤活性有机碳含量间的关系及与稻田 CH_4 排放的关系

稻田土壤不同组分活性有机碳分别与稻田 CH_4 进行相关性分析, 不同组分的土壤活性有机碳与 CH_4 排放均呈极显著正相关关系(表3), 以 ROC 与 CH_4 排放通量的相关系数最大, 说明此类有机碳与 CH_4 排放的关系最密切。不同的活性有机碳间也存在极显著正相关关系, 可见稻田土壤中不同组分的活性有机碳间的关系密切。4 种活性有机碳采用多元逐步回归法与稻田 CH_4 进行分析, 结果表明, ROC 和 MBC 与稻田 CH_4 有一定关系, 回归方程 $y = -121.239 + 0.055x_1$ ($P<0.01$) 和 $y = -122.155 + 0.049x_1 + 0.028x_2$ ($P<0.01$) (y 为 CH_4 排放通量, x_1 为 ROC, x_2 为 MBC)。可见稻田土壤中的 ROC 和 MBC 含量显著影响稻田 CH_4 排放。

表3 稻田土壤活性有机碳与 CH_4 排放通量的相关性

Table 3 Correlation analysis between active soil organic carbons and CH_4 fluxes

项目 Item	DOC/(mg/kg)	ROC/(mg/kg)	MBC/(mg/kg)	RMC/(mg/kg)	CH_4 /($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
DOC/(mg/kg)	1				
ROC/(mg/kg)	0.576 **	1			
MBC/(mg/kg)	0.366 **	0.509 **	1		
RMC/(mg/kg)	0.299 **	0.448 **	0.435 **	1	
CH_4 /($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	0.391 **	0.811 **	0.542 **	0.486 **	1

* * 表示极显著相关 $P<0.01$

稻田土壤分蘖期和成熟期不同组分活性有机碳与 CH_4 排放进行相关分析, 分蘖期 DOC、ROC、MBC 和 RMC 含量与 CH_4 排放存在呈极显著正相关, 其相关系数分别为 0.537 ($P<0.01$)、0.754 ($P<0.01$)、0.728 ($P<0.01$) 和 0.431 ($P<0.01$), 而成熟期稻田土壤的活性有机碳与 CH_4 排放均无相关性, 可见分蘖期的土壤活性有机碳与 CH_4 排放密切相关。

3 讨论

3.1 不同的活性有机碳组分

许多研究表明, 无论是短期还是长期有机肥配施化肥, 均有利于提高土壤 DOC 含量^[2,13-15]。本研究也表明 3a 施入猪粪、鸡粪和稻草有机肥的 DOC 平均含量分别比 NF 增加 5.7%、6.7% 和 19.3%。有机肥施入能增加土壤中的 DOC 含量, 可能的原因是有机肥施入改善土壤速效养分状况^[16], 提高土壤肥力, 进而促进根系和地上部的生长, 从而增加根系分泌物和有机残体等作物的归还量, 有机肥的施用又增加了土壤有机碳库, 在微生物作用下分解释放更多的水溶性有机碳^[9, 17]。

土壤中 ROC 含量对土壤管理措施的改变反应敏感^[11, 14, 18]。本研究表明, 无论是分蘖期和是成熟期的稻田土壤, 施用有机肥处理的 ROC 含量均高于 CF 处理, 也与前人的研究结果保持一致^[14,19-20]。可能的原因是有机肥或者有机物肥配施稻田, 增加的外源有机碳投入, 为微生物提高了充足的碳源, 促进微生物的生长, 提高其活性, 降低了土壤中有机质的氧化稳定性^[13,21], 能明显提高土壤 ROC 含量^[14]。

稻田中施用有机肥能明显提高土壤 MBC 含量, 与 Lagomarsino^[22]、Wang^[2] 和 Rehman^[23] 等的研究结果相同。有机肥施入稻田后, 改善土壤物理结构^[24], 提高土壤微生物学特性, 影响土壤有机碳的生物降解过程^[9, 25], 而土壤 MBC 是土壤中所有活微生物体的总量, 因此, 有机肥的施用能提高土壤中 MBC 的含量。

施用有机肥处理提高土壤中 RMC 的含量^[26-27]。本研究中, PM、CM 和 RS 处理的土壤 RMC 分别比施入化肥处理提高 7.4%、20.7% 和 34.1%。可能的原因是有机肥的施入及根系和植物凋落物的增加, 致使土壤中的有机物增加, 土壤中的容易分解的有机碳的也相应增加^[26]。土壤中微生物也相应增加, 致使 RMC 含量

增加。

水稻生长过程中,随着生育期的推移,气温逐渐升高,微生物活性增强,水稻分蘖期的气温高于水稻成熟期,水稻分蘖期根系活力也高于成熟期,有机肥自身含有的有机碳被大量分解,根系活力增强,致使土壤中的活性有机碳组分为分蘖期高于成熟期。水稻施有机肥第 1 年和第 2 年,土壤中的活性有机碳变化差异不大,施肥第 3 年土壤中活性有机碳明显高于前 2a,可能的原因是,有机物在第 1 年分解迅速,第 2 年以后分解缓慢^[28],施肥第 3 年的土壤中有当季有机物的分解,还有前两年的有机肥残留的分解,因此经过 3a 的施肥累积,对土壤中活性有效碳的影响效果凸显,致使第 3 年的活性有机碳比前 2 年高。

土壤中 RS 处理的 RMC 含量最高,其次是 CM 和 PM 处理。可能是 3 种有机肥中,有不同的碳氮比(C/N),分别为稻草>鸡粪>猪粪,有研究表明,有机肥施入土壤后一定时间范围内,土壤中的 C/N 越高,土壤中的微生物碳的水平也越高^[29-30],因而造成了土壤中的 MBC 含量为 RS>CM>PM。土壤 MBC 是土壤有机碳中最活跃的组分^[31],与土壤碳的转化有密切关系,其含量高低是衡量土壤肥力的重要指标^[32],土壤中的 RMC 越高,土壤中稻草的矿化速度较慢,使之施入有机肥足以补偿水稻生长过程对土壤有机质的耗损,在土壤中逐年积累,其他研究者和本研究都表明了活性有机碳间有显著的正相关关系^[2, 18, 33],因此造成了 DOC、ROC 和 RMC 的含量也是 RS>CM>PM。

3.2 不同的活性有机碳组分与 CH₄排放关系

DOC 在养分循环和淹水稻田的 CH₄产生中起着重要的作用^[34],土壤 DOC 容易被微生物所利用^[35-36],Vermoesen 等的培养试验证实土壤中 DOC 含量与淹水土壤的 CH₄排放呈正相关,主要是由于土壤 DOC 作为土壤微生物的碳源和能源,为 CH₄菌提供基质,从而增加 CH₄排放。而焦燕等^[36]表明稻田土壤中的 DOC 与 CH₄排放无明显相关性,可能的原因为有机物料的加入,为产 CH₄菌活^[37]提供碳源的物质不仅来自土壤本身的碳、水稻根系分泌物,同时有机物料提供的碳也是重要来源。而已证明土壤 DOC 含量主要来自水稻根系分泌物^[26, 38-39],CH₄排放与水稻根际 DOC 的含量呈正相关关系,而非根际土壤 DOC 含量无关系^[39],故有机物料处理的土壤 DOC 含量对 CH₄排放的贡献与其他碳源相比可能微不足道^[36],焦燕等取的土壤样品也为非根际土壤,因此稻田土壤中的 DOC 含量与 CH₄排放无相关性。

作为土壤中 CH₄产生的底物,土壤中的碳对其产生和排放具有重要影响,本研究表明,土壤中的几种活性有机碳对 CH₄的排放均有一定的影响,但相对其他的活性有机碳,土壤中 ROC 的含量对 CH₄的影响更大,曾从盛^[33]等在湿地的研究证实可能是 CH₄的产生和排放过程对环境的响应非常敏感,土壤中的 ROC 是指示不同生境厌氧条件下碳分解潜力的主要碳源,厌氧条件下碳分解主要有 CH₄和 CO₂,可见,厌氧条件下稻田土壤中的 CH₄主要来自土壤中的 ROC。

土壤微生物群落调节有机物的分解和养分循环,在维持生态系统的可持续性和功能方面起着重要的作用。由于其人为干扰和对环境变化的敏感,土壤 MBC 已经被广泛的研究。本研究证实土壤中的 MBC 含量与稻田 CH₄排放呈显著正相关关系,且直接影响 CH₄排放。

不同施肥处理的稻田土壤 RMC 含量与稻田 CH₄排放呈显著正相关关系($r=0.542, P<0.01$)。与其他研究者也认为土壤中的 RMC 与 CH₄排放有一定关系。Bossio 等用土壤中 RMC 含量指示土壤活性有机碳浓度,外加秸秆后土壤中的 RMC 与 CH₄排放密切相关^[40],Wang 等研究连续施用 4a 秸秆的土壤 RMC 含量增加 1.5 倍,土壤 CH₄排放增加 5 倍多^[41],Yagi 和 Minami 研究发现,在不同类型土壤和不同稻草和厩肥还田试验中, RMC 含量与 CH₄排放呈直线关系,是影响淹水稻田 CH₄排放的主要因素之一^[12],Mishra 等研究证实, RMC 与 CH₄排放之间的相关性达显著水平($r=0.938$),RMC 可以用作预示土壤有机质被产甲烷菌利用的强度^[42]。可见土壤中的 RMC 含量密切影响稻田 CH₄的排放。

4 结论

施有机肥提高土壤活性有机碳含量,有机肥处理的土壤 DOC、ROC、MBC 和 RMC 含量分别比化肥处理增

加 5.6%—19.3%、5.1%—21.5% 和 6.8%—22.9%。不同施肥处理的活性有机碳含量均为分蘖期大于成熟期。

施有机肥刺激稻田 CH_4 的排放, PM、CM 和 RS 处理的 CH_4 排放比 CF 处理增加 37.0% ($P < 0.01$)、92.7% ($P < 0.01$) 和 99.4% ($P < 0.01$), 3a 不同处理的排放通量均为 $\text{RS} > \text{CM} > \text{PM} > \text{CF}$ 和 NF。分蘖期排放通量高于成熟期。

不同活性有机碳组分与稻田 CH_4 排放通量存在显著正相关关系, 且四种有机碳间关系密切。不同的生育时期, 以分蘖期土壤中的活性有机碳明显影响稻田 CH_4 排放; 不同活性有机碳组分, 土壤中 ROC 和 MBC 显著影响稻田 CH_4 排放。

参考文献 (References):

- [1] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. 生态学报, 1999, 18(3): 32-38.
- [2] Wang W, Lai D Y F, Wang C, Pan T, Zeng C. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field. Soil and Tillage Research, 2015, 152: 8-16.
- [3] McLauchlan K K, Hobbie S E. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(5): 1616-1625.
- [4] 宋小艳, 张丹桔, 张健, 李建平, 纪托未, 欧江, 胡相伟. 马尾松 (*Pinus massoniana*) 人工林林窗对土壤不同形态活性有机碳的影响. 生态学报, 2015, 35(16): 5393-5402.
- [5] Zhang X Y, Meng X J, Gao L P, Sun X M, Fan J J, Xu L J. Potential impacts of climate warming on active soil organic carbon contents along natural altitudinal forest transect of Changbai Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 113-117.
- [6] Laik R, Kumar K, Das D K, Chaturvedi O P. Labile soil organic matter pools in a calcioriented after 18 years of afforestation by different plantations. Applied Soil Ecology, 2009, 42(2): 71-78.
- [7] Bridgman S D, Richardson C J. Mechanisms controlling soil respiration (CO_2 and CH_4) in southern peatlands. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24(11): 1089-1099.
- [8] 吴家梅, 纪耀辉, 霍莲杰, 彭华, 刘勇. 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. 生态学报, 2013, 33(15): 4599-4607.
- [9] 李森, 张世熔, 罗洪华, 周玲, 王贵胤, 沈义畅. 不同施肥处理土壤水溶性有机碳含量特征及动态变化. 农业环境科学学报, 2013, 32(2): 314-319.
- [10] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006: 54-64.
- [11] 安辉, 刘鸣达, 王耀晶, 闫颖. 不同稻蟹生产模式对土壤活性有机碳和酶活性的影响. 生态学报, 2012, 32(15): 4753-4761.
- [12] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. Soil Science and Plant Nutrition, 1990, 36(4): 599-610.
- [13] 吴祥颖, 张潇潇, 李伏生. 沟灌方式和有机无机氮比例对甜糯玉米种植土壤酶活性和活性有机碳的影响. 土壤, 2014, 46(5): 832-838.
- [14] 王丹丹, 周亮, 黄胜奇, 李成芳, 曹凑贵. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 735-740.
- [15] 曹宏杰, 汪景宽. 长期不同施肥处理对黑土不同组分有机碳的影响. 国土与自然资源研究, 2012, (3): 39-41.
- [16] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响. 生态学报, 2011, 31(10): 2837-2845.
- [17] Dormaar J F, Lindwall C W, Kozub G C. Effectiveness of manure and commercial fertilizer in restoring productivity of an artificially eroded Dark Brown Chernozemic soil under dryland conditions. Canadian Journal of Soil Science, 1988, 68(4): 669-679.
- [18] Chen H Q, Hou R X, Gong Y S, Li H W, Fan M S, Kuzyakov Y. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 85-94.
- [19] 袁新田, 朱玲, 焦加国, 刘满强, 李辉信, 胡锋. 施用玉米秸秆和接种蚯蚓后几种土壤活性有机碳的动态变化. 生态学报, 2010, 30(19): 5264-5271.
- [20] 路丹, 何明菊, 区惠平, 何冰, 沈方科, 顾明华. 耕作方式对稻田土壤活性有机碳组分、有机碳矿化以及腐殖质特征的影响. 土壤通报, 2014, 45(5): 1144-1150.
- [21] 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 王旭刚. 黑垆土长期轮作培肥土壤有机质氧化稳定性的研究. 土壤肥料, 2004, (3): 10-12, 16.
- [22] Lagomarsino A, Moscatelli M C, Tizio A D, Mancinelli R, Grego S, Marinari S. Soil biochemical indicators as a tool to assess the short-term impact of agricultural management on changes in organic C in a mediterranean environment. Ecological Indicators, 2009, 9(3): 518-527.
- [23] Rehman K, Ying Z, Andleeb S, Jiang Z, Olajide E K. Short term influence of organic and inorganic fertilizer on soil microbial biomass and DNA in

- summer and spring. *Journal of Northeast Agricultural University (English Edition)*, 2016, 23(1): 20-27.
- [24] Marinari S, Masciandaro G, Ceccanti B, Grego S. Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology*, 2000, 72(1): 9-17.
- [25] 肖伟伟, 范晓晖, 杨林章, 郝明德. 长期施肥对黄土旱塬黑垆土有机氮和有机碳的影响. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 672-675.
- [26] Xu M G, Lou Y L, Sun X L, Wang W, Baniyammuddin M, Zhao K. Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation. *Biology and Fertility Soils*, 2011, 47(7): 745-752.
- [27] 张恩平, 王维念, 张淑红. 长期定位施肥条件下土壤活性有机碳变化及其与土壤速效养分的相关性. *沈阳农业大学学报*, 2014, 45(5): 528-532.
- [28] 张璐, 沈善敏, 廉鸿志, 宇万太. 有机物料中有机碳、氮矿化进程及土壤供氮力研究. *土壤通报*, 1997, 28(2): 71-73.
- [29] 王利利, 董民, 张璐, 杜相革. 不同碳氮比有机肥对有机农业土壤微生物生物量的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21(9): 1073-1077.
- [30] Henriksen T M, Breland T A. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(1): 41-48.
- [31] 肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异. *生态学报*, 2015, 35(23): 7625-7633.
- [32] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘区红粘土红壤肥力的演化——II. 化学和生物学肥力的演化. *土壤学报*, 1999, 36(2): 203-217.
- [33] 曾从盛, 王维奇, 徐欢欢. 艾比湖湿地土壤活性有机碳及其对厌氧条件下碳分解的影响. *亚热带资源与环境学报*, 2011, 6(2): 10-15.
- [34] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Contribution of plant photosynthates to dissolved organic carbon in a flooded rice soil. *Biogeochemistry*, 2004, 71(1): 1-15.
- [35] Vermoesen A, Ramon H, van Cleemput O. Composition of the soil gas phase: permanent gases and hydrocarbons. *Pedologie*, 1991, 41: 119-132.
- [36] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 周权锁, Sass R L. 有机肥施用、土壤有效铜和氮素对稻田甲烷排放的影响. *农业环境科学学报*, 2003, 22(5): 565-569.
- [37] 王成己, 胡忠良, 李艳春, 王义祥, 黄毅斌. 不同类型水稻种植下稻田根际土壤活性有机碳含量的差异. *福建农业学报*, 2014, 29(10): 1003-1009.
- [38] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Contribution of plant photosynthates to dissolved organic carbon in a flooded rice soil. *Biogeochemistry*, 2004, 71(1): 1-15.
- [39] Lu Y H, Wassmann R, Neue H U, Huang C Y. Dynamics of dissolved organic carbon and methane emissions in a flooded rice soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(6): 2011-2017.
- [40] Bossio D A, Horwath W R, Mitters R G, VanKessel C. Methane pool and flux dynamics in a rice field following straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(9): 1313-1322.
- [41] Wang Z P, Lindau C W, Delaune R D, Patrick W H Jr. Methane emission and entrapment in flooded rice soils as affected by soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, 16(3): 163-168.
- [42] Mishra S, Rath A K, Adhya T K, Rao V R, Sethunathan N. Effect of continuous and alternate water regimes on methane efflux from rice under greenhouse conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 24(4): 399-405.