

马晨蕾, 裴自伟, 李伏生. 灌溉方式及施氮对双季稻田甲烷排放及有机碳组分的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(5): 41-49.
MA Chenlei, PEI Ziwei, LI Fusheng. Effects of irrigation method and nitrogen application on methane emission and organic carbon fraction in double-cropping rice field[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(5): 41-49.

灌溉方式及施氮对双季稻田甲烷排放 及有机碳组分的影响

马晨蕾, 裴自伟, 李伏生
(广西大学农学院, 广西南宁 530005)

摘要:【目的】获得稻田甲烷(CH_4)减排的水氮管理模式, 揭示不同灌溉方式和施氮处理下土壤有机碳组分和甲烷氧化菌对稻田 CH_4 排放通量的影响。【方法】通过田间试验测定 3 种灌溉方式(常规灌溉、“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉)和 3 种氮肥处理(N1 : $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮, 20% 基肥 80% 追肥; N2 : $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮, 50% 基肥 50% 追肥; N3 : $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮, 50% 基肥 50% 追肥)下双季稻不同生育期稻田 CH_4 排放通量、土壤有机碳组分含量和甲烷氧化菌数量, 分析稻田 CH_4 排放通量与土壤有机碳组分和甲烷氧化菌之间的关系。【结果】干湿交替灌溉 N3 处理稻田 CH_4 排放通量最低, 晚稻分蘖期稻田 CH_4 排放通量较常规灌溉 N1 处理降低 70.5%。干湿交替灌溉下, N2 处理早稻孕穗期土壤微生物量碳含量较 N1 及 N3 处理均增加 23.5%, N3 处理晚稻分蘖期土壤可溶性有机碳含量较 N1 及 N2 处理分别增加 12.0% 和 12.9%。 N3 处理下, 常规灌溉早稻孕穗期土壤易氧化有机碳含量较“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉分别增加 38.8% 和 40.9%。双季稻田 CH_4 排放通量仅与土壤可溶性有机碳含量呈极显著正相关($r=0.55$, $P<0.01$)。【结论】土壤可溶性有机碳含量显著影响双季稻田 CH_4 排放通量, 干湿交替灌溉 N3 处理稻田 CH_4 排放通量较低。

关键词: 灌溉方式; 氮肥处理; 稻田; CH_4 排放通量; 土壤有机碳组分; 甲烷氧化菌

中图分类号: S158.3; X511

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2021)05-0041-09

Effects of irrigation method and nitrogen application on methane emission and organic carbon fraction in double-cropping rice field

MA Chenlei, PEI Ziwei, LI Fusheng
(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract: 【Objective】The objective was to obtain water and nitrogen management mode for methane (CH_4) emission reduction, and reveal the effects of soil organic carbon fraction and methane oxidizing bacteria on CH_4 emission flux from rice fields treated by different irrigation methods and nitrogen application. 【Method】Through field experiment, CH_4 emission fluxes, soil organic carbon fraction contents and methane oxidizing bacteria numbers at different growth stages of double-cropping rice were determined under three irrigation methods (conventional irrigation, “thin-shallow-wet-dry” irrigation and alternate drying and wetting

收稿日期: 2021-01-27 网络首发时间: 2021-06-18 11:21:24

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20210617.1650.006.html>

作者简介: 马晨蕾 (1994—), 女, 硕士研究生, E-mail: 1213699172@qq.com; 通信作者: 李伏生 (1963—), 男, 教授, 博士, E-mail: zhenz@gxu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51469003); 广西科技计划基地和人才专项 (AD17195060)

irrigation) and three nitrogen application methods (N1: 120 kg·hm⁻² nitrogen, 20% basal fertilizer and 80% topdressing; N2: 120 kg·hm⁻² nitrogen, 50% basal fertilizer and 50% topdressing; N3: 90 kg·hm⁻² nitrogen, 50% basal fertilizer and 50% topdressing). The correlation relationships of CH₄ emission fluxes with soil organic carbon fractions and methane oxidizing bacteria were analyzed. 【Result】 The treatment of alternate drying and wetting irrigation combining with N3 had the lowest CH₄ emission flux from rice fields, and CH₄ emission flux at the tillering stage of late rice decreased by 70.5% compared with the treatment of conventional irrigation combining with N1. Under the alternate drying and wetting irrigation, the soil microbial biomass carbon content at the booting stage of early rice in N2 treatment increased by 23.5% compared with both N1 and N3 treatments, and the soil soluble organic carbon content at the tillering stage of late rice in N3 treatment increased by 12.0% and 12.9% compared with N1 and N2 treatments, respectively. Under the N3 treatment, conventional irrigation increased the soil readily oxidizable organic carbon content by 38.8% and 40.9% compared to “thin-shallow-wet-dry” irrigation and alternate drying and wetting irrigation at the booting stage of early rice, respectively. CH₄ emission flux from double-cropping rice fields was significantly positively correlated only with soil soluble organic carbon content ($r=0.55$, $P<0.01$). 【Conclusion】 Soil soluble organic carbon content significantly affects CH₄ emission fluxes from double-cropping rice fields, and alternate drying and wetting irrigation combining with N3 treatment had lower CH₄ emission flux from rice fields.

Key words: irrigation method; nitrogen treatment; rice field; CH₄ emission flux; soil organic carbon fraction; methane oxidizing bacteria

甲烷 (CH₄) 是一种主要的温室气体, 稻田 CH₄ 排放量占全球温室气体总产生量的 19%^[1]。合理的灌溉和施肥等管理技术对稻田 CH₄ 减排有重要作用。目前稻田节水灌溉方式有“薄浅湿晒”灌溉、干湿交替灌溉等, 干湿交替灌溉稻田的 CH₄ 排放量较常规灌溉和“薄浅湿晒”灌溉低^[2]。与常规灌溉相比, “薄浅湿晒”灌溉可使稻田 CH₄ 排放量显著减少 12.6%~44.9%^[3], 干湿交替灌溉可使稻田 CH₄ 累积排放量显著降低 37%^[4]。施氮量也会影响稻田 CH₄ 排放^[5], 但是施氮量对稻田 CH₄ 排放量影响的研究结果不一致。有研究表明, 相对于不施氮肥, 高无机氮处理 (249 kg·hm⁻²) 稻田 CH₄ 排放量降低 15%^[6]; 但也有研究发现, 随着尿素用量的增加, 稻田 CH₄ 排放量随之增加^[5]。除了施氮量, 不同生育时期施氮比例也会影响稻田 CH₄ 排放, 基肥、分蘖肥、穗肥和粒肥施氮比例为 4.5:2:1.5:2 的稻田 CH₄ 排放量低于施氮比例为 5:2.5:1:1.5 和 4:2:2:2 的^[7]。不同灌溉方式及施氮量条件下, 土壤易氧化有机碳、微生物量碳以及甲烷氧化菌可直接影响稻田 CH₄ 排放^[2], 且稻田 CH₄ 排放通量与土壤可溶性有机碳和微生物量碳含量呈正相关关系^[8], 而甲烷氧化菌则会降低稻田 CH₄ 排放量^[9]。本研究通过 3 种灌溉方式和 3 种氮肥处理 (氮肥用量与基、追肥比例结合) 早、晚稻田田间试验, 研究双季稻不同生育期稻田 CH₄

排放通量、土壤有机碳组分含量以及甲烷氧化菌数量的变化, 分析稻田 CH₄ 排放通量与土壤有机碳组分含量和甲烷氧化菌数量之间的关系, 以期获得稻田 CH₄ 减排的水氮管理模式, 并揭示土壤有机碳组分含量和甲烷氧化菌数量对稻田 CH₄ 排放通量的影响规律。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

2016 年 7 月至 2017 年 7 月在南宁市灌溉试验站 (N22°52'58.33", E108°17'38.86") 进行双季稻大田试验。试验所用土壤为第四纪红色黏土发育的水稻土, 土壤理化特征如下: 饱和含水率 49.2%, 容重 1.2 g·cm⁻³, 有机碳 26.9 g·kg⁻¹, 全氮 1.3 g·kg⁻¹, 碱解氮 113.6 mg·kg⁻¹, 有效磷 50.0 mg·kg⁻¹, 速效钾 110.6 mg·kg⁻¹, pH 7.6。试验期间早稻在分蘖期、孕穗期、乳熟期和成熟期的降雨量分别为 186.3、83.0、97.7 和 222.3 mm, 晚稻分别为 619.2、6.4、81.0 和 7.8 mm。早稻和晚稻品种均为 ‘内 5 优 8015’, 为广西本地优良三系杂交水稻品种。

1.2 灌溉方式与施氮处理

试验设 3 种灌溉方式和 3 种氮肥处理, 完全随机设计, 共 9 个处理。每个处理设 3 个小区, 共 27 个小区。每个小区面积 25 m², 小区之间用 25 cm 厚红砖水泥墙隔离分开, 以保证小区之间水分相互

不侧渗和各小区独立灌排水, 并安装水表记录每次灌溉量。

3 种灌溉方式包括常规灌溉、“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉。常规灌溉是在移栽返青期以及分蘖期到乳熟期田间均保持 20~30 mm 水层, 但分蘖后期和成熟期仅保持土壤湿润。“薄浅湿晒”灌溉在移栽返青期保持 20~40 mm 水层, 分蘖前期仅保持土壤湿润, 分蘖后期由湿润状态自然落干至土壤干燥状态并继续晒田, 孕穗期及乳熟期仅保持 10 mm 左右水层, 成熟期晒田。干湿交替灌溉是在各小区均安装 TEN45 水分张力计(南京土壤仪器公司)监测土壤水势的变化, 移栽后 10 d 内田间保持 10~20 mm 水层, 7 d 后进行干湿交替灌溉, 即当土壤水势为-15 kPa 时, 灌溉 20 mm, 再自然落干至土壤水势为-15 kPa, 再灌溉 20 mm, 如此循环, 至水稻成熟。详细水分控制方法见本研究的前期工作报道^[2, 10]。

3 种施氮处理包括 N1: 120 kg·hm⁻² 氮 (20% 基肥 80% 追肥), N2: 120 kg·hm⁻² 氮 (50% 基肥 50% 追肥), N3: 90 kg·hm⁻² 氮 (50% 基肥 50% 追肥)。所用肥料为: 尿素 (氮质量分数为 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 质量分数为 12%) 和氯化钾 (K₂O 质量分数为 60%)。各处理 P₂O₅ 用量为 60 kg·hm⁻², K₂O 用量为 120 kg·hm⁻², 其中, 全部过磷酸钙和 50% 氯化钾作基肥, 在插秧前 1 d 耕地时施入土壤中, 余下的 50% 氯化钾分别以分蘖肥和穗肥均按 25% 的比例施入土壤中。

晚稻试验于 2016 年 7 月 4 日播种, 8 月 1 日选取长势均匀的秧苗单株栽培, 株行距为 20 cm×20 cm, 8 月 16 日施分蘖肥, 9 月 13 日开始晒田, 9 月 22 日复水后施穗肥, 11 月 8 日收割。生育期内“薄浅湿晒”灌溉、干湿交替灌溉和常规灌溉平均灌溉量分别为 157.8、130.8 和 227.9 mm。整个生育期为 99 d。

早稻试验于 2017 年 3 月 10 日播种, 4 月 12 日选取长势均匀的秧苗单株栽培, 株行距为 20 cm×20 cm, 4 月 16 日施分蘖肥, 5 月 27 日开始晒田, 6 月 3 日复水后施穗肥, 7 月 18 日收割。生育期内“薄浅湿晒”灌溉、干湿交替灌溉和常规灌溉平均灌溉量分别为 107.3、79.6 和 157.4 mm。整个生育期为 95 d。

1.3 稻田 CH₄ 采集与测定

分别于晚稻移栽后 37(分蘖期)、63(孕穗期)、77(乳熟期) 和 98 d(成熟期), 早稻移栽后 24(分蘖期)、64(孕穗期)、74(乳熟期) 和 94 d(成熟

期) 用静态箱法采集稻田 CH₄ 气体^[11]。稻田 CH₄ 排放通量的测定用 Agilent 7890A 气相色谱仪(美国安捷伦科技有限公司), 检测器为氢火焰离子检测器(FID), 采用填充柱, 当检测器温度升至 350 ℃ 且基线平稳时, 开始测样。CH₄ 通量的计算参考王明星^[11]的方法。

1.4 土壤采集与指标测定

在晚稻和早稻各生育期采集稻田 CH₄, 同时在各小区按五点法采集 0~20 cm 耕层土壤样品, 测定土壤微生物量碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳含量和甲烷氧化菌数量。

微生物量碳含量测定用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法-总有机碳法^[12], 可溶性有机碳含量测定用无氯仿熏蒸-硫酸钾浸提-总有机碳法^[13], 易氧化有机碳含量测定用高锰酸钾氧化-分光光度计法^[14], 甲烷氧化菌数量测定用培养基-滚管法^[15]。

1.5 统计分析

数据整理和分析采用 DPS 12.26 和 Excel 2003 软件, 结果用 3 次重复的平均值±标准误表示。用 Duncan’s 多重比较法分析各处理指标间的差异显著性 ($P<0.05$), 将稻田 CH₄ 排放通量与土壤有机碳组分含量和甲烷氧化菌数量进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理各生育期双季稻田 CH₄ 排放通量

不同处理下双季稻田 CH₄ 排放通量随生育期的变化如图 1 所示, CH₄ 排放通量在分蘖期较高, 在孕穗期和乳熟期较低, 在成熟期几乎为 0。3 种灌溉方式下, CH₄ 在晚稻分蘖期集中排放, 不同氮肥处理间 CH₄ 排放通量为 N1>N2>N3。N3 处理下, 干湿交替灌溉稻田 CH₄ 排放通量在晚稻分蘖期、孕穗期和乳熟期较常规灌溉分别降低 53.5%、99.4% 和 99.2%, 在早稻分蘖期、孕穗期和乳熟期较常规灌溉分别降低 19.9%、29.2% 和 63.9%。从图 1 可看出, 在 N1、N2 和 N3 处理下, 干湿交替灌溉双季稻田 CH₄ 排放通量均低于“薄浅湿晒”灌溉和常规灌溉, 而在相同灌溉方式下, N3 处理稻田 CH₄ 排放通量较 N1、N2 降低; 因此, 干湿交替灌溉 N3 处理稻田 CH₄ 排放通量最低。

2.2 不同处理各生育期土壤有机碳组分的变化

由表 1 可知, 不同处理下双季稻田整个生育期土壤微生物量碳在 0.08~0.23 g·kg⁻¹ 范围内变化, 以乳熟期较高。在“薄浅湿晒”灌溉下, 晚稻分蘖期、孕穗期和乳熟期以及早稻 4 个生育期 N2 处理土壤微生物量碳均较高于 N1 和 N3 处理。干湿交替灌

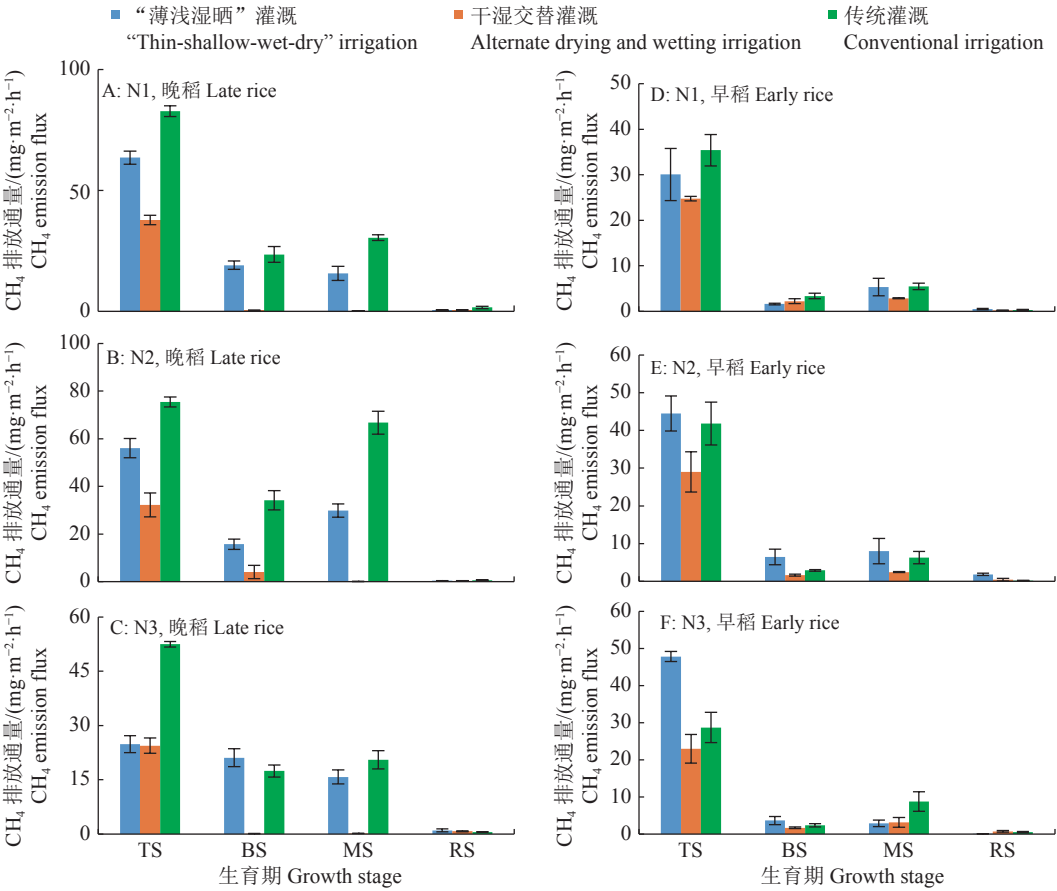


图 1 不同处理各生育期双季稻田 CH₄ 排放通量

Fig. 1 CH₄ emission fluxes from double-cropping paddy field at each growth stage in different treatments

表 1 不同处理各生育期土壤微生物量碳含量¹⁾

Table 1 Soil microbial biomass carbon contents at each growth stage in different treatments w/(g·kg⁻¹)

施氮处理 Nitrogen treatment	灌溉方式 Irrigation method	晚稻 Late rice				早稻 Early rice			
		TS	BS	MS	RS	TS	BS	MS	RS
N1	BG	0.15±0.01b	0.17±0.01ab	0.17±0.01b	0.17±0.01ab	0.16±0.01ab	0.17±0.01bc	0.18±0.01bc	0.15±0.01b
	GG	0.17±0.02ab	0.17±0.01ab	0.17±0.01b	0.17±0.01ab	0.17±0.02ab	0.17±0.01bc	0.18±0.01bc	0.15±0.01b
	CG	0.17±0.04ab	0.19±0.01ab	0.19±0.01b	0.16±0.01ab	0.14±0.02b	0.12±0.01d	0.12±0.01d	0.08±0.01c
N2	BG	0.18±0.01ab	0.18±0.01ab	0.19±0.01b	0.17±0.01ab	0.19±0.01a	0.19±0.01ab	0.20±0.01b	0.18±0.01a
	GG	0.19±0.01ab	0.18±0.01ab	0.18±0.01b	0.20±0.03a	0.20±0.01a	0.21±0.01a	0.23±0.01a	0.18±0.01a
	CG	0.21±0.02a	0.21±0.02a	0.23±0.02a	0.15±0.02bc	0.17±0.01ab	0.14±0.01cd	0.18±0.01bc	0.14±0.02b
N3	BG	0.17±0.01ab	0.18±0.01ab	0.18±0.01b	0.17±0.01ab	0.17±0.02ab	0.17±0.01bc	0.18±0.01b	0.16±0.01ab
	GG	0.19±0.01ab	0.18±0.01ab	0.17±0.01b	0.17±0.01ab	0.18±0.01a	0.17±0.01bc	0.18±0.01bc	0.16±0.01ab
	CG	0.17±0.01ab	0.20±0.01ab	0.19±0.01b	0.11±0.02c	0.16±0.01ab	0.14±0.02cd	0.16±0.01c	0.11±0.02c

1)N1: 120 kg·hm⁻²氮(20%基肥80%追肥), N2: 120 kg·hm⁻²氮(50%基肥50%追肥), N3: 90 kg·hm⁻²氮(50%基肥50%追肥); BG: “薄浅湿晒”灌溉, GG: 干湿交替灌溉, CG: 传统灌溉; TS: 分蘖期, BS: 孕穗期, MS: 乳熟期, RS: 成熟期; 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05, Duncan’s法)

1) N1: 120 kg·hm⁻² nitrogen (20% basal fertilizer and 80% topdressing), N2: 120 kg·hm⁻² nitrogen (50% base fertilizer and 50% topdressing), N3: 90 kg·hm⁻² nitrogen (50% basal fertilizer and 50% topdressing); BG: “Thin-shallow-wet-dry” irrigation, GG: Alternate drying and wetting irrigation, CG: Conventional irrigation; TS: Tillering stage, BS: Booting stage, MS: Milk stage, RS: Ripening stage; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments (P<0.05, Duncan’s method)

溉下, 晚稻孕穗期和成熟期以及早稻 4 个生育时期 N2 处理土壤微生物量碳均高于 N1 和 N3 处理, 其中早稻孕穗期、乳熟期和成熟期 N2 处理较 N1 处理分别增加 23.5%、27.8% 和 20.0%, 早稻孕穗期和乳熟期 N2 处理较 N3 处理分别增加 23.5% 和 27.8%。常规灌溉下, 晚稻土壤微生物量碳在分蘖期、孕穗期和乳熟期以 N2 处理较高, 乳熟期 N2 处理较 N1 和 N3 处理均增加 21.0%。早稻分蘖期、乳熟期和成熟期 N2 处理均高于 N1 和 N3 处理, 其中乳熟期和成熟期较 N1 处理分别增加 50.0% 和 75.0%, 成熟期较 N3 处理增加 27.3%。3 种氮肥处理下, 常规灌溉早稻土壤微生物量碳均低于“薄浅湿晒”灌溉及干湿交替灌溉。因此在相同灌溉方式下, N2 处理稻田土壤微生物量碳高于 N1 和 N3 处理; 在相同氮肥处理下, 常规灌溉早稻土壤微生物量碳低于“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉。

由表 2 可知, 不同处理双季稻田整个生育期土壤可溶性有机碳含量在 45.6~106.3 mg·kg⁻¹ 范围内变化。“薄浅湿晒”灌溉下, 晚稻 4 个生育期及早稻孕穗期、乳熟期和成熟期 N3 处理土壤可溶性有

机碳含量均大于 N1 和 N2 处理, 其中晚稻乳熟期 N3 处理较 N1 和 N2 处理分别增加 23.8% 和 22.5%。干湿交替灌溉下, 晚稻分蘖期、乳熟期和成熟期 N3 处理土壤可溶性有机碳含量较 N1 处理分别增加 12.0%、12.6% 和 13.3%, 同时较 N2 处理分别增加 12.9%、18.0% 和 11.8%; 早稻乳熟期和成熟期 N3 处理土壤可溶性有机碳含量较 N1 处理分别增加 36.2% 和 42.1%, 较 N2 处理分别增加 25.4% 和 36.4%。常规灌溉方式下, 晚稻乳熟期和成熟期 N3 处理土壤可溶性有机碳含量较 N1 处理分别增加 9.6% 和 21.3%, 乳熟期较 N1、N2 处理分别增加 9.6% 和 6.6%。在 3 种氮肥处理下, 不同灌溉方式对稻田土壤可溶性有机碳含量影响顺序为干湿交替灌溉>“薄浅湿晒”灌溉>常规灌溉, 早稻田在分蘖期及孕穗期以干湿交替灌溉土壤可溶性有机碳含量最高, 在乳熟期及成熟期以“薄浅湿晒”灌溉土壤可溶性有机碳含量最高。因此, 相同灌溉方式下, 双季稻田 N3 处理土壤可溶性有机碳含量均大于 N1 和 N2 处理; 相同氮肥处理下, 干湿交替灌溉土壤可溶性有机碳含量较高。

表 2 不同处理各生育期土壤可溶性有机碳含量

Table 2 Soil soluble organic carbon contents at each growth stage in different treatments

施氮处理 Nitrogen treatment	灌溉方式 Irrigation method	晚稻 Late rice				早稻 Early rice			
		TS	BS	MS	RS	TS	BS	MS	RS
N1	BG	80.1±5.2d	83.2±3.5abc	82.3±1.2c	61.1±2.0bc	86.9±5.6a	84.8±4.9ab	88.5±6.3abc	64.2±8.6abc
	GG	92.8±1.2bc	89.5±3.4a	89.0±2.2b	61.1±3.1bc	89.5±11.6a	84.9±21.9ab	77.1±6.4c	54.9±10.4c
	CG	92.6±5.5bc	73.6±5.4c	73.6±2.0e	45.6±3.2d	85.0±15.5a	74.9±15.9b	83.1±4.9bc	62.9±5.0abc
N2	BG	84.6±2.0cd	82.7±4.9abc	83.2±4.4c	58.9±3.1bc	88.2±10.3a	70.9±6.1b	97.2±13.5ab	71.6±4.7ab
	GG	92.0±0.1bc	84.2±3.1ab	84.9±3.1bc	61.9±1.3bc	94.7±38.3a	87.6±13.9ab	83.7±2.4bc	57.2±1.9bc
	CG	90.6±3.0bc	76.4±2.2bc	75.7±1.9de	46.9±4.8d	92.5±13.9a	77.6±4.2ab	70.4±8.1c	49.8±5.1c
N3	BG	85.4±4.1cd	87.2±6.7a	101.9±3.0a	66.6±5.0ab	71.3±31.4a	87.6±4.8ab	106.3±6.7a	78.3±6.2a
	GG	103.9±2.4a	89.5±2.3a	100.2±3.9a	69.2±2.5a	102.9±19.2a	99.1±17.2a	105.0±6.2a	78.0±4.7a
	CG	99.2±6.7ab	79.5±2.0abc	80.7±4.3cd	55.3±3.1c	96.6±9.6a	93.7±3.7ab	89.1±5.8abc	71.1±4.6ab

1) N1: 120 kg·hm⁻²氮(20%基肥80%追肥), N2: 120 kg·hm⁻²氮(50%基肥50%追肥), N3: 90 kg·hm⁻²氮(50%基肥50%追肥); BG: “薄浅湿晒”灌溉, GG: 干湿交替灌溉, CG: 传统灌溉; TS: 分蘖期, BS: 孕穗期, MS: 乳熟期, RS: 成熟期; 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan’s法)

1) N1: 120 kg·hm⁻² nitrogen (20% basal fertilizer and 80% topdressing), N2: 120 kg·hm⁻² nitrogen (50% base fertilizer and 50% topdressing), N3: 90 kg·hm⁻² nitrogen (50% basal fertilizer and 50% topdressing); BG: “Thin-shallow-wet-dry” irrigation, GG: Alternate drying and wetting irrigation, CG: Conventional irrigation; TS: Tillering stage, BS: Booting stage, MS: Milk stage, RS: Ripening stage; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, Duncan’s method)

由表 3 可以看出, 不同处理晚稻田土壤易氧化有机碳含量在 1.08~7.10 g·kg⁻¹ 范围内变化。N1 处理下, 晚稻分蘖期和孕穗期以及早稻分蘖期、孕穗期和成熟期常规灌溉土壤易氧化有机碳含量均大

于“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉; 常规灌溉土壤易氧化有机碳含量在早稻孕穗期较“薄浅湿晒”灌溉增加 47.7%, 在成熟期较“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉方式分别增加 93.5% 和 61.3%。

表 3 不同处理各生育期土壤易氧化有机碳含量

Table 3 Soil readily oxidizable organic carbon contents at each growth stage in different treatments

w/(g·kg⁻¹)

施氮处理 灌溉方式		晚稻 Late rice				早稻 Early rice			
Nitrogen treatment	Irrigation method	TS	BS	MS	RS	TS	BS	MS	RS
N1	BG	4.53±1.66ab	3.55±0.21ab	4.65±0.58a	5.74±0.60a	2.41±0.39d	3.08±0.29d	4.48±0.42abc	1.70±0.44b
	GG	1.08±0.13b	3.82±0.34ab	5.30±0.38a	4.70±0.20bc	2.81±0.17d	3.82±0.34bcd	5.11±0.36a	2.04±0.48b
	CG	6.48±1.65ab	4.33±0.28ab	5.13±0.31a	5.31±0.12ab	3.67±1.17bcd	4.55±0.23abc	5.06±0.26a	3.29±0.61a
N2	BG	4.18±2.84ab	3.05±0.25b	5.27±0.40a	4.12±0.37c	4.74±1.33abcd	4.13±0.12abcd	3.95±0.25bc	1.86±0.32b
	GG	3.08±1.52ab	4.34±0.65ab	5.57±0.35a	4.52±0.10bc	4.62±1.00abcd	4.15±0.24abcd	4.84±0.20ab	2.23±0.34ab
	CG	7.10±0.79a	4.58±0.66a	5.51±0.32a	5.54±0.18ab	7.25±0.67a	5.12±0.18a	5.02±0.12a	2.71±0.37ab
N3	BG	3.68±1.89ab	4.34±0.65ab	5.94±0.51a	4.79±0.40abc	5.65±1.23abc	3.40±0.86cd	5.15±0.08a	1.55±0.21b
	GG	5.02±1.79ab	4.34±0.25ab	4.76±0.18a	4.10±0.17c	2.96±0.15cd	3.35±0.29cd	3.77±0.56c	1.74±0.19b
	CG	6.27±1.95ab	3.62±0.18ab	4.59±0.51a	4.73±0.32abc	6.39±0.28ab	4.72±0.41ab	4.24±0.20abc	2.31±0.16ab

1) N1: 120 kg·hm⁻²氮(20%基肥80%追肥), N2: 120 kg·hm⁻²氮(50%基肥50%追肥), N3: 90 kg·hm⁻²氮(50%基肥50%追肥); BG: “薄浅湿晒”灌溉, GG: 干湿交替灌溉, CG: 传统灌溉; TS: 分蘖期, BS: 孕穗期, MS: 乳熟期, RS: 成熟期; 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, Duncan’s法)

1) N1: 120 kg·hm⁻² nitrogen (20% basal fertilizer and 80% topdressing), N2: 120 kg·hm⁻² nitrogen (50% base fertilizer and 50% topdressing), N3: 90 kg·hm⁻² nitrogen (50% basal fertilizer and 50% topdressing); BG: “Thin-shallow-wet-dry” irrigation, GG: Alternate drying and wetting irrigation, CG: Conventional irrigation; TS: Tillering stage, BS: Booting stage, MS: Milk stage, RS: Ripening stage; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, Duncan’s method)

N2 处理下, 除晚稻乳熟期外, 常规灌溉双季稻各生育期土壤易氧化有机碳含量均大于“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉; 常规灌溉土壤易氧化有机碳含量在晚稻孕穗期和成熟期较“薄浅湿晒”灌溉分别增加 50.2% 和 34.5%, 在早稻乳熟期增加 27.1%。N3 处理下, 常规灌溉土壤易氧化有机碳含量在早稻分蘖期较干湿交替灌溉增加 115.9%, 在早稻孕穗期较“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉分别增加 38.8% 和 40.9%; 在“薄浅湿晒”和干湿交替灌溉下, 不同氮肥处理之间土壤易氧化有机碳含量没有明显变化规律, 在常规灌溉下, 除早稻孕穗期、乳熟期及成熟期外, 土壤易氧化有机碳含量均是 N2>N1>N3。因此, 相同氮肥处理下, 常规灌溉土壤易氧化有机碳含量较“薄浅湿晒”灌溉和干湿交替灌溉增加。

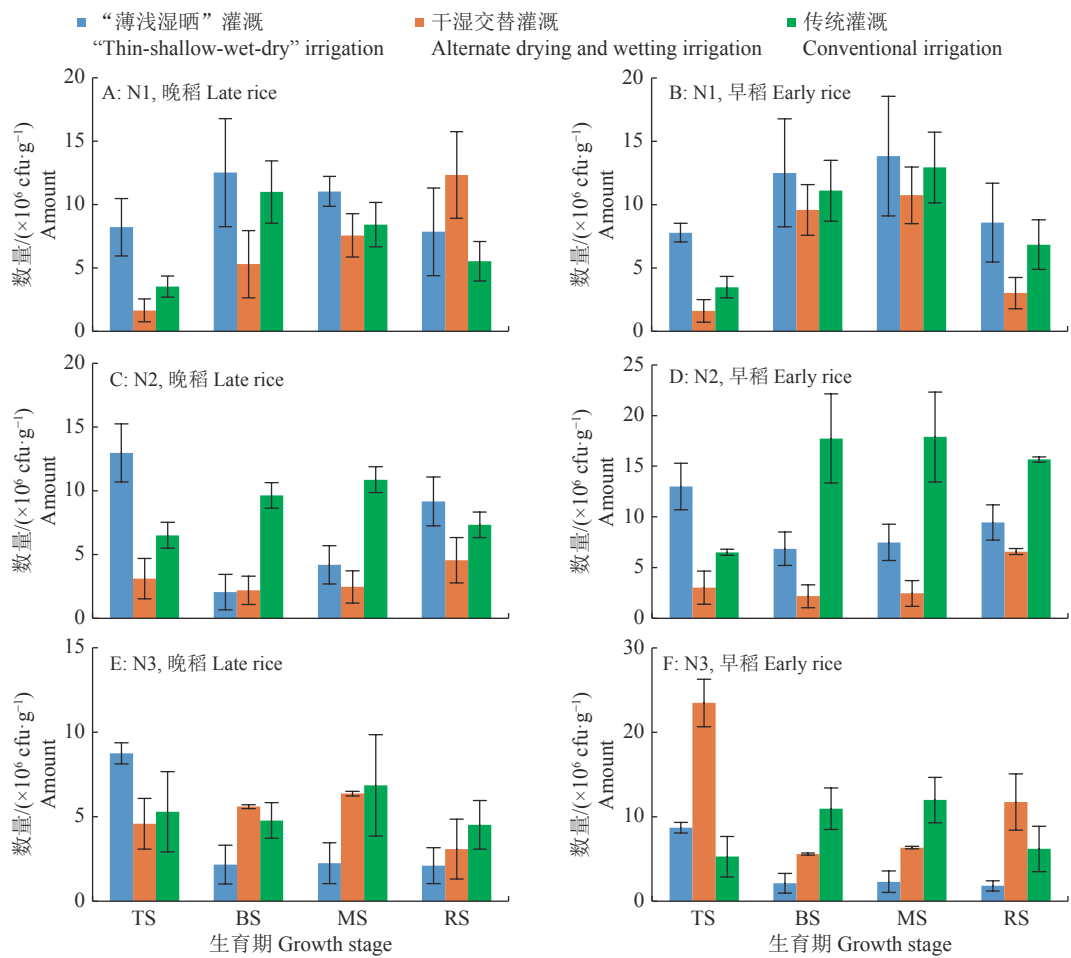
2.3 不同处理各生育期土壤甲烷氧化菌数量的变化

如图 2 所示, 不同处理晚稻各生育期土壤甲烷氧化菌数量变化范围为 1.64×10⁶~12.98×10⁶ cfu·g⁻¹, 早稻为 1.63×10⁶~23.50×10⁶ cfu·g⁻¹。在 N1 处理下, 常规灌溉土壤甲烷氧化菌数量在晚稻成熟期以及早稻孕穗期、乳熟期和成熟期均大于干湿交替灌溉和“薄浅湿晒”灌溉。在 N3 处理下, 常规灌溉土壤甲烷氧化菌数量在早稻孕穗期和乳熟期较“薄浅湿晒”灌溉分别增加 419.2%

和 457.8%。在 N2 处理下, 干湿交替灌溉土壤甲烷氧化菌数量在双季稻 4 个生育期均低于“薄浅湿晒”灌溉和常规灌溉, 在晚稻分蘖期较“薄浅湿晒”灌溉方式减少 76.0%, 在孕穗期和乳熟期较常规灌溉方式分别减少 77.2% 和 77.3%; 在早稻分蘖期较“薄浅湿晒”灌溉减少 76.6%, 在孕穗期、乳熟期和成熟期较常规灌溉方式分别减少 87.7%、86.2% 和 57.9%。在 N1 处理下, “薄浅湿晒”灌溉土壤甲烷氧化菌数量在晚稻分蘖期、孕穗期和乳熟期均大于干湿交替灌溉和常规灌溉, 其中在孕穗期较干湿交替灌溉方式增加 136.5%; 在早稻分蘖期和乳熟期也较干湿交替灌溉和常规灌溉大。在 3 种灌溉方式下, 3 种氮肥处理土壤甲烷氧化菌数量没有明显变化规律。因此, 相同氮肥处理下, 干湿交替灌溉土壤甲烷氧化菌数量较“薄浅湿晒”灌溉和常规灌溉低。

2.4 双季稻田 CH₄ 通量与土壤有机碳组分和甲烷氧化菌的关系

由表 4 可知, 晚稻田 CH₄ 排放通量与土壤可溶性有机碳含量之间呈极显著正相关 ($r=0.55$, $P<0.01$), 早稻田 CH₄ 排放通量与土壤可溶性有机碳和土壤易氧化有机碳含量之间呈显著正相关, 双季稻田 CH₄ 排放通量与土壤微生物量碳和甲烷氧化菌数量之间的关系均不显著; 因此, 土壤可溶性有机碳是影响稻田 CH₄ 排放通量的主要因素。



N1: 120 kg·hm⁻² 氮 (20% 基肥 80% 追肥), N2: 120 kg·hm⁻² 氮 (50% 基肥 50% 追肥), N3: 90 kg·hm⁻² 氮 (50% 基肥 50% 追肥); TS: 分蘖期, BS: 孕穗期, MS: 乳熟期, RS: 成熟期
N1: 120 kg·hm⁻² nitrogen (20% basal fertilizer and 80% topdressing), N2: 120 kg·hm⁻² nitrogen (50% base fertilizer and 50% topdressing), N3: 90 kg·hm⁻² nitrogen (50% basal fertilizer and 50% topdressing); TS: Tillering stage, BS: Booting stage, MS: Milk stage, RS: Ripening stage

图 2 不同处理各生育期土壤甲烷氧化菌数量

Fig. 2 Soil methane oxidizing bacteria population amounts at each growth stage in different treatments

表 4 双季稻田 CH₄ 排放通量与土壤有机碳组分和甲烷氧化菌相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analyses of CH₄ emission flux with soil organic carbon fraction and methane oxidizing bacteria

稻季 Rice season	微生物量碳含量 Microbial biomass carbon content	可溶性有机碳含量 Soluble organic carbon content	易氧化有机碳含量 Readily oxidizable organic carbon content	甲烷氧化菌数量 Methane oxidizing bacteria number
晚稻 Late rice	0.31	0.55**	0.25	0.12
早稻 Early rice	0.22	0.34*	0.42*	-0.04

1) “*”、“**” 分别表示在0.05、0.01水平显著相关
1) “*”, “**” indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels respectively

3 讨论与结论

3.1 不同灌溉、氮肥处理对稻田 CH₄ 排放通量的影响

在水稻整个生育期内稻田 CH₄ 集中在分蘖期排放, 原因可能是在水稻生长初期, 刚淹水后土壤中的有机质剧烈分解, 导致土壤中有较多的 CH₄ 产生^[12], 而后期随着有效氮素的消耗减少, 微生物缺

乏基质和能源使稻田 CH₄ 排放减少。有研究认为, 水层深度和 CH₄ 排放通量有很强的负相关关系, 水层深度通过影响厌氧环境和水温水量控制水稻根系和根系分泌物数量, 而这些物质将为 CH₄ 产生提供底物^[16]。

相同氮肥处理下, 相对于干湿交替灌溉, 常规灌溉和“薄浅湿晒”灌溉稻田 CH₄ 排放通量降低

时间较晚;是因为干湿交替灌溉破坏土壤产甲烷菌的生存环境,CH₄产生土层随水分降低而下降,待重新灌溉后需一段时间恢复^[17],而且干湿交替灌溉灌溉频率较低,导致稻田CH₄排放通量降低时间较早。成熟期土壤中CH₄的产生可能与根系渗出物和根系的腐烂有关^[17]。

氮肥施入增加土壤中氮素有效性,会相应地提高产甲烷菌所需有机底物有效性,使得产甲烷菌有较多可利用底物,增加CH₄排放量^[18]。总体来说,在相同灌溉方式下,N3处理稻田CH₄排放通量较N1和N2处理低,可能是因为N1和N2处理能刺激更多微生物生长繁殖,改变土壤有机质含量,增加根系分泌物数量等,为CH₄生成提供底物^[19]。但有研究表明施入尿素使稻田CH₄排放通量减少^[20],可能与稻田土壤理化性质有关,因为低氮水平增施氮肥刺激土壤有机底物生成,高氮会形成长期氮肥输入,增加土壤酸度,抑制微生物活性和CH₄的产生^[21]。

3.2 不同灌溉、氮肥处理对土壤有机碳组分含量的影响

不同灌溉、氮肥处理下土壤微生物量碳含量在分蘖期较低,在孕穗期较高,之后降低,与Banerjee等^[22]在单施氮、磷、钾肥处理的结果一致。相同灌溉方式下,N2处理土壤微生物量碳较N3高,史登林等^[23]在减量施氮40%条件下有相似的结果;这是因为增施氮肥可以为土壤微生物提供营养物质,促进其生长,进而增加土壤微生物量碳含量^[24]。

3种灌溉方式和3种氮肥处理下,双季稻田土壤可溶性有机碳含量在分蘖期、孕穗期及乳熟期没有明显差异,但是在成熟期均减少;原因可能是土壤可溶性有机碳是土壤中微生物生活的重要物质及能量来源,当水稻生长前期淹水灌溉时,土壤中可溶性有机质分解,导致土壤可溶性有机碳含量升高,从而微生物数量增多,相应所需的土壤可溶性有机碳更多,土壤可溶性有机碳含量减少,因而形成一个稳定的体系^[25]。在成熟期,追施氮肥较多,再加上甲烷氧化菌呼吸作用增强,充分利用剩余碳素,使土壤可溶性有机碳相对减少。相同灌溉方式下,N3处理双季稻田土壤可溶性有机碳含量大于N1及N2处理,说明相同灌溉方式下,低氮较高氮更有利于提高稻田土壤可溶性有机碳含量,这与前人在减量施氮40%处理下得到的结果相似^[23]。相同施氮处理下,虽然不同灌溉方式的稻田土壤可溶性碳含量在不同生育期内有波动,但总体上以干湿交替灌溉较高。

N1处理干湿交替灌溉晚稻田土壤易氧化有机碳含量较少,可能是因为干湿交替灌溉土壤通透性高,微生物活性增强,加之易分解,所以含量较少^[26]。N2处理常规灌溉土壤易氧化有机碳含量较高,可能是因为常规灌溉使微生物活性减弱,土壤易氧化有机碳被利用量减少,从而为土壤易氧化有机碳的移动提供便利条件。

土壤可溶性有机碳含量和稻田CH₄排放通量有相同的变化趋势,因此,双季稻田CH₄排放通量与土壤可溶性有机碳含量呈显著正相关,表明稻田土壤可溶性有机碳含量的高低可以间接反映稻田CH₄排放量大小。

3.3 不同灌溉、氮肥处理对土壤甲烷氧化菌数量的影响

干湿交替灌溉土壤甲烷氧化菌数量较“薄浅湿晒”灌溉和常规灌溉少,原因可能是干湿交替灌溉土壤环境不适合甲烷氧化菌生存。N1和N2处理下,总体上“薄浅湿晒”灌溉土壤甲烷氧化菌数量较大,因为“薄浅湿晒”灌溉不仅满足稻田水分需求,且比常规灌溉有良好的土壤通气性,有利于土壤甲烷氧化菌的生存^[26]。但也有研究表明CH₄氧化过程也可能在厌氧环境中,是产CH₄过程的逆向代谢^[27]。

3.4 结论

晚稻分蘖期N3(90 kg·hm⁻²氮,50%基肥和50%追肥)处理干湿交替灌溉稻田CH₄排放通量较其他灌溉方式低,而土壤可溶性有机碳含量较其他灌溉方式高。双季稻田CH₄排放通量仅与土壤可溶性有机碳含量呈显著正相关,其中,晚稻田相关系数为0.55,早稻田相关系数为0.34。因此,土壤可溶性有机碳含量显著影响双季稻田CH₄排放通量,且在供试土壤和栽培管理条件下,干湿交替灌溉N3处理稻田CH₄排放通量较低。

参考文献:

[1] Intergovernmental panel on climate change. Climate change 2007: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] 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.

[3] 李健陵.水氮管理方式对水稻生长发育和温室气体排放的影响[D].北京:中国农业科学院,2018.

[4] ISLAM S M M, GAIHRE Y K, ISLAM M R, et al. Effects of water management on greenhouse gas emissions from farmers' rice fields in Bangladesh[J]. Science of the Total Environment, 2020, 734: 139382. doi: 10.1016/j.

scitotenv.2020.139382.

[5] 马艳芹, 钱晨晨, 孙丹平, 等. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 128-134.

[6] LINQUIST B A, ADVIENTO-BORBE M A, PITTELKOW C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis[J]. *Field Crops Research*, 2012, 135: 10-21.

[7] 廖松婷. 东北黑土区不同种植模式下水稻田 CH₄、N₂O 排放研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.

[8] 展茗. 不同稻作模式稻田碳固定、碳排放和土壤有机碳变化机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.

[9] 梁战备, 史奕, 岳进. 甲烷氧化菌研究进展[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 198-205.

[10] 韦至激, 方泽涛, 李伏生, 等. 不同灌溉模式和施氮量下稻田 N₂O 排放与有机氮组分的关系[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(9): 246-251.

[11] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 83-172.

[12] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 周叶锋, 廖晓兰. 影响甲烷排放量的两种细菌——产甲烷细菌和甲烷氧化菌的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(S1): 340-346.

[16] 陈槐, 周舜, 吴宁, 等. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(5): 726-733.

[17] 李晶, 王明星, 陈德章. 水稻田甲烷的减排方法研究及评价[J]. *大气科学*, 1998, 22(3): 354-362.

[18] NYKANEN H, VASANDER H, HUTTUNEN J T, et al. Effect of experimental nitrogen load on methane and nitrous oxide fluxes on ombrotrophic boreal peatland[J]. *Plant and Soil*, 2002, 242(1): 147-155.

[19] KONG Y H, NAGANO H, KATAI J, et al. CO₂, N₂O and CH₄ production/consumption potential of soils under different land-use types in central Japan and eastern Hungary[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59(3): 455-462.

[20] YAO H, CONRAD R. Thermodynamics of methane production in different rice paddy soils from China, the Philippines and Italy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(3): 463-473.

[21] 胡敏杰, 全川, 邹芳芳. 氮输入对土壤甲烷产生、氧化和传输过程的影响及其机制[J]. *草业学报*, 2015, 24(6): 204-212.

[22] BANERJEE B, AGGARWAL P K, PATHAK H, et al. Dynamics of organic carbon and microbial biomass in alluvial soil with tillage and amendments in rice-wheat systems[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 119(1/2/3): 173-189.

[23] 史登林, 王小利, 段建军, 等. 氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4117-4124.

[24] 肖新, 朱伟, 肖靛, 等. 适宜的水氮处理提高稻基农田土壤酶活性和土壤微生物量碳氮[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 91-98.

[25] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 240-246.

[26] 闵航, 陈美慈, 钱泽澍. 不同栽培措施对水稻田甲烷释放、甲烷产生菌和甲烷氧化菌的影响[J]. *农村生态环境*, 1993(S1): 36-39.

[27] 张坚超, 徐镡钦, 陆雅海. 陆地生态系统甲烷产生和氧化过程的微生物机理[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6592-6603.

【责任编辑 李庆玲】