

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.
WANG Kai, LI Fu-sheng, FANG Ze-tao, et al. Soil CH₄ emission and its relationship with organic carbon fraction under different irrigation methods and nitrogen rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 1012–1020.

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

王 楷^{1,2,3}, 李伏生^{1,2,3*}, 方泽涛^{1,2,3}, 董艳芳^{1,2,3}, 刘靖雯^{1,2,3}, 黄忠华⁴, 罗维钢⁴

(1. 广西大学农学院, 南宁 530004; 2. 广西喀斯特地区节水农业新技术院士工作站, 南宁 530004; 3. 广西高校作物栽培学与耕作学重点实验室, 南宁 530005; 4. 南宁市灌溉试验站, 南宁 530001)

摘 要: 通过田间试验, 研究不同灌溉模式和施氮量下早晚稻不同生育期土壤有机碳(SOC)和易氧化有机碳(LOC)含量、微生物量碳(MBC)和甲烷氧化菌(MOB)数量的变化, 以及水稻生育期内稻田甲烷排放通量变化情况, 并分析当日稻田甲烷排放通量与土壤SOC、LOC、MBC和MOB的关系, 以期获得稻田甲烷减排的灌溉模式和施氮量。两季试验均设3种灌溉模式, 即常规灌溉(C)、“薄浅湿晒”灌溉(T)和干湿交替灌溉(D); 2种施氮量, 即120 kg·hm⁻²(N1)和150 kg·hm⁻²(N2)。结果表明, N1时D模式土壤SOC含量在晚稻乳熟期和早稻孕穗期较高, N2时早、晚稻4个时期SOC含量均以D模式最高; 早晚稻土壤LOC含量以D模式较低, 土壤MOB数量均以C模式较低, 而MBC则以C模式较高。N2处理稻田MOB、SOC、LOC和MBC含量均高于N1处理。稻田甲烷排放量在分蘖期和乳熟期较高, 而在孕穗期和成熟期较低。D模式早、晚稻全生育期甲烷排放通量和累计排放量均显著低于T和C模式, 而N2处理这些指标均高于N1。稻田甲烷排放通量受土壤MOB、LOC和MBC的直接影响和SOC含量的间接影响, 在干湿交替模式和施氮量120 kg·hm⁻²下稻田甲烷排放量最低。

关键词: 甲烷排放; “薄浅湿晒”灌溉; 干湿交替灌溉; 施氮量

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)05-1012-09 **doi:**10.11654/jaes.2016-1581

Soil CH₄ emission and its relationship with organic carbon fraction under different irrigation methods and nitrogen rates

WANG Kai^{1,2,3}, LI Fu-sheng^{1,2,3*}, FANG Ze-tao^{1,2,3}, DONG Yan-fang^{1,2,3}, LIU Jing-wen^{1,2,3}, HUANG Zhong-hua⁴, LUO Wei-gang⁴

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Academician Work Station of The New Technology of Water-saving Agriculture in Karst Region, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Crop Cultivation and Tillage, Nanning 530005, China; 4. Nanning Irrigation Experimental Station, Nanning 530001, China)

Abstract: The readily decomposed organic matter in the paddy ecosystem increase soil methane (CH₄) emission under anaerobic environment, while methane oxidizing bacteria (MOB) oxidation of methane reduces soil CH₄ emission under better aeration environment. Field experiments with different irrigation methods and nitrogen (N) rates were carried out to measure the contents of organic carbon (SOC) and easily oxidized organic carbon (LOC), microbial biomass carbon (MBC) and the number of MOB at different growth stages, and CH₄ emission fluxes from paddy field during the growth stage, and then the relationships between the CH₄ emission flux and the contents of SOC and LOC, MBC and MOB in soils at the sampling days were analyzed, so as to obtain the rational irrigation mode and N rate for CH₄ reduction. Two-season field experiments included three irrigation methods, i.e. conventional irrigation (C), "thin-shallow-wet-dry" irrigation (T) and alter-

收稿日期: 2016-12-09

作者简介: 王 楷(1992—), 女, 硕士, 主要从事水土资源利用与环境方面的研究。E-mail: 569131430@qq.com

* 通信作者: 李伏生 E-mail: lpfu6@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469003)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (51469003)

nate drying and wetting irrigation (D), and two N rates (N1 120 kg·hm⁻² and N2 150 kg·hm⁻²). Results show that D mode had lower SOC content at the booting stage of late rice and tillering stage of early rice under N1, and D mode had the highest SOC content at the four growth stages of early rice and late rice under N2. When planting early rice and late rice, D mode had lower LOC content, and C mode had lower MOB and higher MBC. The contents of SOC, LOC, MBC and MOB in N2 were higher than those of N1. Accumulative CH₄ emissions over the whole growth stage of early rice or late rice and the total of both seasons in D mode were significantly lower than those of T and C modes, but these indices in N2 were higher than those of N1. CH₄ emission flux was directly influenced by the soil MOB, LOC and MBC and indirectly affected by the SOC. CH₄ emission from paddy soil was the lowest under alternate drying and wetting irrigation and N rate of 120 kg·hm⁻².

Keywords: CH₄ emission; "Thin-shallow-wet-dry" irrigation; alternate drying and wetting irrigation; nitrogen rate

甲烷(CH₄)是主要的温室气体之一,稻田土壤CH₄排放量约占全球的19%^[1]。稻田节水灌溉技术包括间歇灌溉,控制灌溉,“薄、浅、湿、晒”灌溉和干湿交替灌溉等。节灌方式通过灌溉、排水、晒田等措施,改变土壤氧化还原电位,促进水稻根系和植株生长,对CH₄排放会产生直接或间接的影响^[2-5]。与持续淹灌相比,间歇灌溉可使整个季节的排放量减少42%~71%^[4],控制灌溉稻田CH₄排放通量明显低于淹灌稻田^[5]。采用“薄、浅、湿、晒”灌溉和干湿交替灌溉,可以实现增产节水^[6-7],并降低温室气体排放量^[8-9]。施用氮肥对稻田生态系统CH₄排放量的影响与氮肥种类、施用量等有关^[9-12],与不施肥相比,单施无机氮肥或有机肥和无机氮肥配施均增加稻田CH₄的排放^[11]。虽然有关单独水分管理或氮肥施用对温室气体排放的研究较多^[13-14],但“薄、浅、湿、晒”灌溉、干湿交替灌溉与施氮量相结合对稻田CH₄排放的影响尚不清楚。

有机碳可为土壤CH₄的产生提供碳源和能源,活性有机碳及C/N是影响土壤产CH₄能力的重要因素。土壤C/N较高(如有机物还田)时,在外源氮作用下稻田CH₄排放显著提高^[15]。易氧化有机碳对CH₄排放有显著的影响^[16],微生物量碳的变化影响植物对土壤中可利用C、N供应,改变微生物的活性,从而对CH₄排放产生影响^[17]。而土壤甲烷氧化菌可利用CH₄作为其唯一的碳源和能源,是CH₄的唯一生物汇^[18],其功能的发挥需要充足的CH₄和O₂,还有适宜的环境条件。目前对“薄、浅、湿、晒”灌溉和干湿交替灌溉稻田有机碳组分以及甲烷氧化菌及其与CH₄排放通量的关系还不明确。

本文研究了3种灌溉模式和2种施氮量条件下早稻和晚稻不同生育期土壤有机碳(SOC)含量、易氧化有机碳(LOC)含量、微生物量碳(MBC)和甲烷氧化菌(MOB)数量的变化,以及水稻生育期内稻田CH₄排放变化情况,并分析当日稻田CH₄排放通量与土壤SOC、LOC、MBC和MOB的关系,以期确定稻田CH₄

减排的灌溉方式和施氮量。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

2015年7月至2016年7月在南宁市灌溉中心试验站开展晚稻和早稻田间试验,两季水稻品种均为内5优8015,为广西本地优良三系杂交水稻品种。供试土壤为第四纪红色黏土发育的潴育性水稻土,其pH值为7.03、有机碳18.31 g·kg⁻¹、全氮1.37 g·kg⁻¹、碱解氮107.7 mg·kg⁻¹、速效磷44.8 mg·kg⁻¹、速效钾87.98 mg·kg⁻¹、容重1.13 g·cm⁻³、饱和含水率49.5%。试验期间月降雨量和月均温见图1。

1.2 试验方法

田间试验的3种灌溉模式为当地常规灌溉(C)、“薄浅湿晒”灌溉(T)和干湿交替灌溉(D),2种施氮量为120 kg·hm⁻²(N1)和150 kg·hm⁻²(N2),完全方案设计,共6个处理。每个处理有3个小区,共18个小区。每个小区面积25 m²,均以25~26 cm厚的红砖水泥墙隔离,独立灌排水,并用水表计量每次灌水量。当地常规灌溉移栽返青期保持浅水层,此后田间保持20~40 mm水层,分蘖末期晒田和黄熟期自然落干。“薄浅湿晒”灌溉的水分管理如下^[6]:插秧返青期田面保持20~

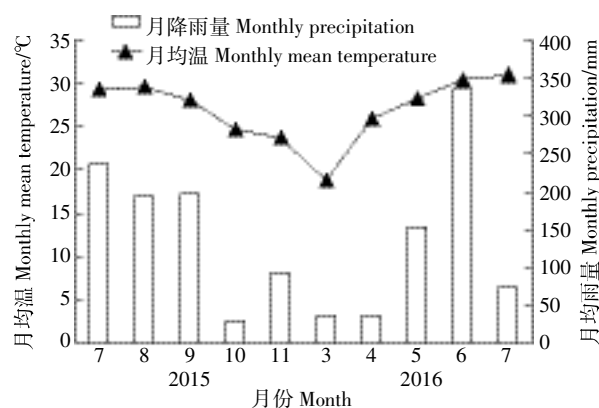


图1 试验期间月降雨量和月均温

Figure 1 Monthly precipitation and mean temperature during the experimental period

40 mm 水层,分蘖前期和乳熟期保持土壤湿润(90%饱和含水率至10 mm水层),拔节孕穗期到抽穗扬花期田面保持10~40 mm水层,分蘖后期晒田(60%饱和含水率至10 mm水层),成熟期自然落干(50%饱和含水率至0 mm水层)。降雨后,返青期至乳熟期田面水层可增加10~30 mm,成熟期田面水层不增加。干湿交替灌溉^[7]是在各小区均安装土壤水分张力计监测土壤水势的变化,在水稻移栽后10 d内保持浅水层(15~20 mm),10 d后进行干湿交替灌溉,当田间由浅水层自然落干,即张力计水势降至-15 kPa时,灌水至20 mm,待自然落干至土壤水势为-15 kPa再灌至20 mm,如此循环,直至稻谷成熟^[7]。各处理P肥和K肥用量相同,P肥用量为60 kg·hm⁻²,K₂O用量为120 kg·hm⁻²。其中全部P肥,50%的N肥和K肥作基肥,在插秧前1 d耕地时施入,余下的50%N肥和K肥分别以分蘖肥、穗肥均按25%的比例面施施入。所有处理均不施用有机肥,N肥用尿素(含N 46%),P肥用过磷酸钙(含P₂O₅ 14%),K肥用氯化钾(含K₂O 60%)。

1.3 气体采集与分析

稻田甲烷排放量用静态箱收集,静态箱规格为50 cm×50 cm×100 cm,由不锈钢制成,厚约5 mm,底部开口,箱内两侧安装风扇以混匀气体,并安装电子温度计监测箱内温度变化,箱外包裹层隔热泡棉,以降低外界对箱内温度的影响。每个小区内随机选取0.25 m²,安装静态箱底座(50 cm×50 cm),底座入泥20 cm。取样时将静态箱置于底座凹槽内且用水密封,以防漏气。采气孔位于箱侧面上部,用100 mL注射器采集气体样品,3个小区箱体平行采样,采样时间集中在上午9:00—11:00,因为这一时段内植物光合速率和呼吸速率都较稳定。采样时刻为盖箱后第0、5、10、15、20、25、30 min,即每个采样点分别采集7次,同时记录箱温。用Agilent 7890AGC气相色谱仪分析甲烷排放量。所有处理小区每7 d采样1次,整个生育期晚稻共采样10次,早稻共采样12次。

1.3.1 甲烷排放通量计算^[14]

$$F=H \times \frac{M \times P}{R \times (273+t)} \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为甲烷排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹; H 为静态箱高度,1 m; M 为甲烷的摩尔质量,16.123 g·mol⁻¹; P 为标准大气压,1.013×10⁵ Pa; R 为普适气体常数,8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹; T 为采样时静态箱内平均温度,℃; dc/dt 为甲烷排放速率,mL·m⁻³·h⁻¹。

1.3.2 甲烷排放量计算

不同生育期甲烷排放量(f_{CH_4})是相邻两次气体排放通量平均值乘以间隔时间,再累加而得。

$$f_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(F_i + F_{i-1})}{2} \times d \times 24 \times 10^{-2} \right] \quad (2)$$

式中: f_i 是第*i*次与第*i*-1次时间间隔内甲烷累积排放量; F_i 是第*i*次所测甲烷排放通量; F_{i-1} 是第*i*-1次所测甲烷排放通量; d 是相邻两次采集气体相隔天数; n 为同一生育期甲烷测定总次数。

全生育期甲烷累计排放量(mg·m⁻²·h⁻¹)为不同生育期甲烷排放量之和。

1.4 土壤采集与测定

晚稻分别在分蘖期(移栽42 d)、孕穗期(移栽54 d)、乳熟期(移栽62 d)和成熟期(移栽92 d),早稻在分蘖期(移栽10 d)、孕穗期(移栽61 d)、乳熟期(移栽83 d)和成熟期(移栽97 d)采集0~20 cm深度土壤,用S形多点法取样。采集的土壤鲜样放入低温贮藏箱并迅速运回实验室,部分新鲜土壤用于分析甲烷氧化菌数量,剩余土样风干过筛后用于测定有机碳、易氧化有机碳和微生物量碳。

用滚管法测定土壤中甲烷氧化菌数量^[19]:培养基配制好后分装于PVC管中,每管4.5 mL,各管加入不同浓度的土壤悬液1 mL,用异丁基橡胶塞密封,滚管后加入甲烷气体,30℃恒温培养7 d,计数管内菌落数量。MOB培养基的配制^[20]:矿质元素溶液10 mL,蒸馏水990 mL,琼脂20 g,pH 6.8。SOC用重铬酸钾容量法-外加加热法测定^[21],LOC用KMnO₄氧化法测定^[22],MBC用氯仿熏蒸0.5 mol·L⁻¹硫酸钾提取法测定^[23]。

1.5 数据分析

所测数据用DPS 7.05软件分析,采用3次结果的平均值,用LSD多重比较法分析不同处理间的差异显著性($P<0.05$)。用采土当日稻田甲烷排放通量与土壤各测定指标进行相关性分析,并用主成分分析说明各项指标对甲烷排放通量的综合影响。

2 结果与分析

2.1 不同处理SOC及其组分的变化

由图2可知,早晚稻各生育期SOC含量的范围在16~22 g·kg⁻¹之间,但早晚稻成熟期SOC含量比分蘖期减少17%~21%。N1时,早晚稻土壤SOC含量并无明显的规律性,晚稻土壤SOC含量孕穗期C模式较高,而乳熟期D模式较高,早稻分蘖期和乳熟期T模式较高,孕穗期D模式较高;N2时,晚稻分蘖期SOC含量差异不显著,其他生育期D模式较高,早稻

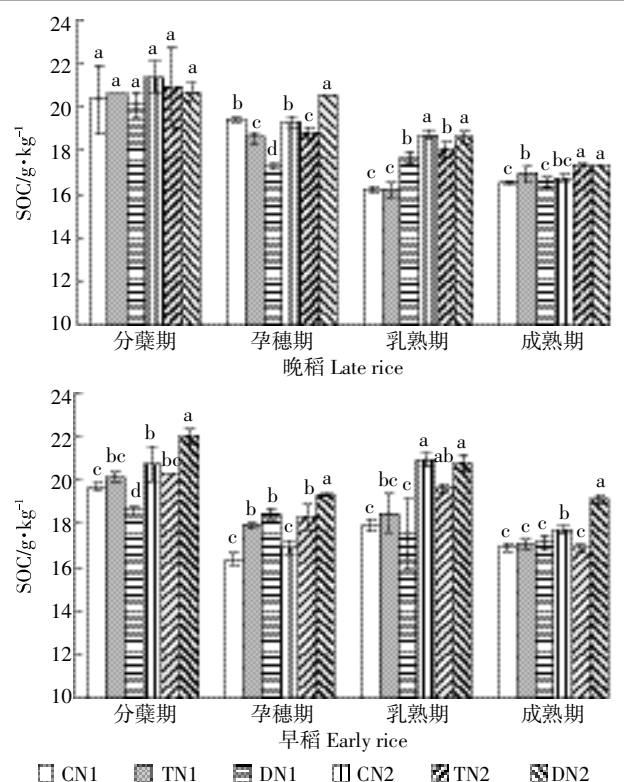


图 2 各处理不同生育期土壤 SOC 含量
Figure 2 Soil organic carbon(SOC) content at different growth stages for different treatments

各生育期除乳熟期外也以 D 模式较高。因此,不同灌溉模式 SOC 含量之间的差异与施氮量和生育期有关,但总体来看,D 模式 SOC 含量高于 T 模式和 C 模式。3 种灌溉模式下,晚稻和早稻各生育期 N2 处理 SOC 含量一般高于 N1 处理。

晚稻土壤 LOC 含量在 $4\sim 6.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间变化,早稻土壤 LOC 含量在 $2\sim 5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间变化,如图 3。N1 时,晚稻 C 模式土壤 LOC 含量较高,早稻除分蘖期 D 模式较高外,其他各生育期均以 T 模式和 C 模式较高;N2 时,晚稻除乳熟期外,T 模式 LOC 含量较高,早稻分蘖期和孕穗期 C 模式较高,乳熟期和成熟期 C 模式较低。但总体来看,D 模式土壤 LOC 含量较 C 模式和 T 模式低。3 种灌溉模式下,N2 处理早晚稻土壤 LOC 含量一般高于 N1,但是晚稻分蘖期 D 模式下和孕穗期 C 模式下 N2 低于 N1,早稻分蘖期 D 模式下 N2 低于 N1。

如图 4 所示,早晚稻土壤 MBC 在 $0.09\sim 0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$

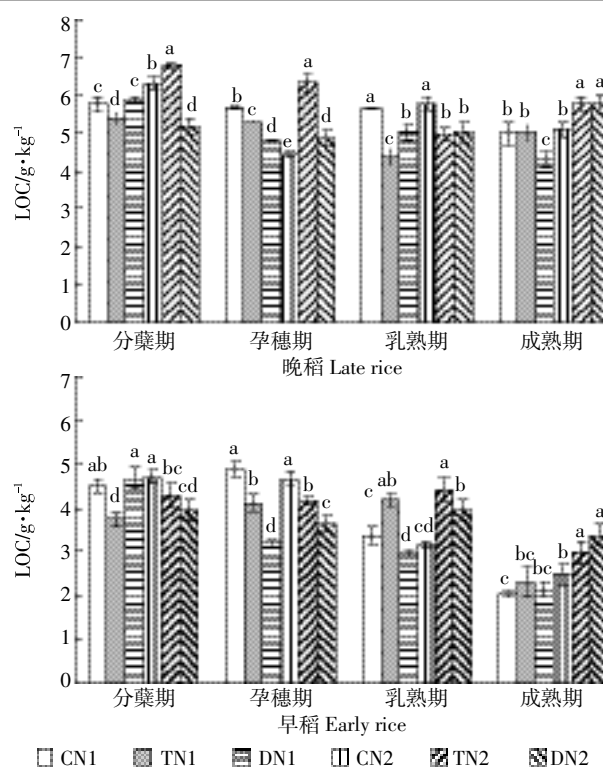


图 3 各处理不同生育期土壤 LOC 含量
Figure 3 Soil labile organic carbon(LOC) content at different growth stages for different treatments

之间变化。N1 时晚稻除成熟期外各生育期土壤 MBC 均以 C 模式最高,而早稻各生育期不同灌溉模式之间的差异不显著。N2 时晚稻各生育期土壤 MBC 以 C 模式较高,早稻分蘖期和孕穗期土壤 MBC 以 C 模式较高,乳熟期以 T 模式较高,成熟期则以 D 模式较高。3 种灌溉模式下,N2 处理早晚稻土壤 MBC 均高于 N1 处理。

2.2 不同处理土壤甲烷氧化菌的变化

如图 5,土壤 MOB 的数量在 $5\times 10^5\sim 1.4\times 10^7\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 干土之间变化,早、晚稻不同生育期土壤 MOB 数量都呈现高-低-高-低的趋势,孕穗期和成熟期土壤 MOB 数量较少,而分蘖期和乳熟期较多。N1 时,晚稻 MOB 数量以乳熟期和成熟期 D 模式较多,而 T 模式较少,但是分蘖期则 T 模式较多,孕穗期 3 种灌溉模式之间的差异不显著,早稻分蘖期和乳熟期 D 模式 MOB 数量较多,但孕穗期 C 模式较多,成熟期差异不显著。N2 时,晚稻土壤 MOB 数量分蘖期和成熟期以 D 模式较多,孕穗期和乳熟期 T 模式较多,而早稻 3 种灌溉模式之间的差异不显著。总体看来,C 模式土壤 MOB 数量较少。3 种灌溉模式下,N2 处理土壤 MOB 数量较多。

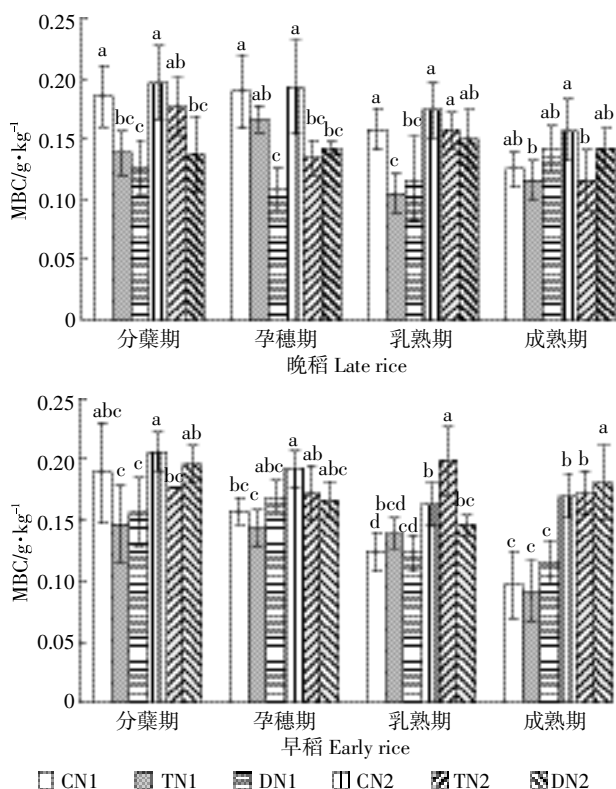


图4 各处理水稻不同生育期土壤 MBC

Figure 4 Soil microbial biomass carbon(MBC) at different growth stages of rice for different treatments

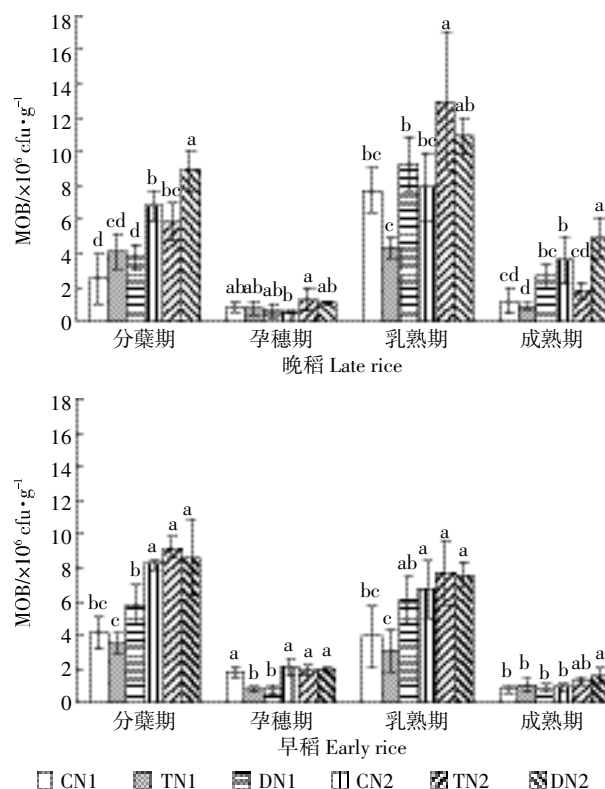


图5 各处理不同生育期土壤 MOB 数量

Figure 5 Soil methane-oxidizing bacteria(MOB) at different growth stages for different treatments

2.3 不同处理稻田甲烷排放的变化

不同处理稻田甲烷排放通量的变化如图6。早稻和晚稻各处理甲烷排放通量都是在分蘖期达到峰值($199.1, 82.72 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),而在成熟期最低($<0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)。表1为不同处理早晚稻在不同时期和全生育期甲烷累积排放量,晚稻和早稻分蘖期甲烷排放通量分别占全生育期累计甲烷排放量的86%和71%。

从图6和表1还可以看出,相同施氮量下,D模式早、晚稻全生育期累计甲烷排放量以及两季甲烷累计排放量最低,而T模式和C模式均较高,说明干湿交替灌溉模式显著降低稻田甲烷排放量。N1时T模式两季甲烷累积排放量低于C模式,而N2时T模式两季甲烷累积排放量高于C模式。N2处理各生育期内甲烷排放通量一般高于N1处理,表1也表明N2处理两季甲烷累积排放量高于N1处理。

2.4 相关性分析

从表2可以看出,早稻和晚稻季采土当日稻田甲烷排放通量与MOB、LOC和MBC呈极显著或显著正相关。SOC含量与稻田甲烷排放通量相关性不显著,但与MBC和LOC呈现显著正相关关系。

2.5 主成分分析

对早晚稻所测MOB数量、MBC、LOC含量和SOC含量进行主成分分析,结果如表3所示。

根据85%累计贡献率的原则,晚稻舍弃第4个主成分,用前3个主成分反映原指标的绝大部分信息,可以代替原来的4个单项指标对稻田甲烷排放量的影响。对晚稻主成分列出如下方程:

$$Y_1 = 0.076x_1 + 0.568x_2 + 0.528x_3 + 0.626x_4 \quad (3)$$

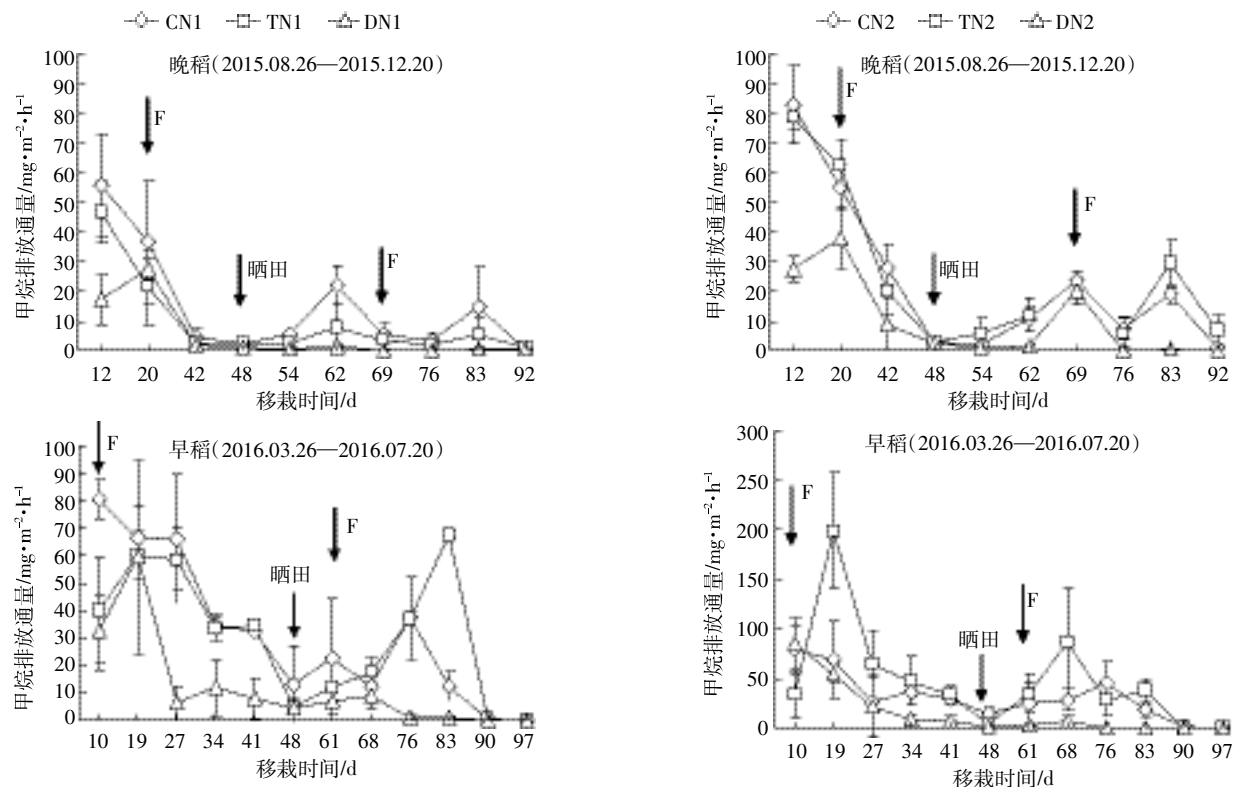
$$Y_2 = 0.940x_1 - 0.137x_2 - 0.311x_3 + 0.025x_4 \quad (4)$$

$$Y_3 = 0.324x_1 - 0.641x_2 + 0.694x_3 - 0.043x_4 \quad (5)$$

式中: x_1 表示MOB含量; x_2 表示MBC含量; x_3 表示LOC含量; x_4 表示SOC含量。

对以上3个方程可以作如下的解释:主成分1的特征向量中MBC、LOC和SOC起主要作用,因此第1主成分主要代表生育期晚稻土壤有机碳组分特点;主成分2的特征向量中MOB有主要贡献,因此第2主成分主要代表生育期晚稻土壤甲烷氧化菌数量特点;主成分3中LOB有主要贡献,因此第3主成分主要代表生育期晚稻田土壤易氧化有机碳含量特点。

舍弃第3、4主成分,对早稻前2个主成分列出如

图 6 各处理水稻生育期内 CH_4 排放通量的变化(F 表示追肥)Figure 6 Changes of CH_4 flux at rice growing stage for different treatments(F topdressing)表 1 各处理早晚稻不同生育期 CH_4 排放量Table 1 CH_4 emission at different growth stages of early rice and or late rice for different treatments

稻季	处理	CH_4 排放量/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$					
		CN1	TN1	DN1	CN2	TN2	DN2
早稻	分蘖期	619.8±36.7a	452.5±56.9ab	311.4±99.3b	509.6±121.4ab	547.6±184.9a	433.7±74.0ab
	孕穗期	75.8±1.9bc	60.3±7.1b	28.0±11.2cd	98.1±32.5a	93.8±20.0a	14.8±10.2d
	乳熟期	109.4±83.6bc	165.1±25.9b	24.9±14.8cd	171.0±69.6b	316.5±32.1a	17.4±11.8d
	成熟期	11.5±5.1ab	58.2±60.5a	1.1±0.3b	18.8±6.9ab	32.5±9.9ab	0.5±0.1b
	全生育期	816.5±97.3ab	737.5±61.3b	365.4±114.4c	797.5±32.2ab	1 189.8±208.2a	497.1±85.5c
晚稻	分蘖期	438.5±3.3c	262.2±82.2d	227.9±20.6d	588.9±40.6b	702.4±16.6a	264.5±118.0d
	孕穗期	10.9±3.3b	7.1±4.2b	3.5±0.7b	26.0±4.3a	23.2±6.3a	5.3±1.4b
	乳熟期	35.3±2.6ab	10.3±3.0b	3.4±1.7b	66.9±58.8a	45.6±17.1ab	5.0±1.9b
	成熟期	41.1±35.0a	7.5±1.1b	2.5±2.1b	56.0±7.4a	52.2±4.1a	1.0±0.6b
	全生育期	525.8±21.3ab	287.0±91.0bc	237.3±97.8c	737.7±81.7a	823.3±260.6a	275.8±130.7bc
两季合计		1 364.4±118.7c	1 047.5±152.3d	546.1±212.2f	1 535.2±113.9b	1 927.2±468.8a	810.6±216.1e

注(Notes):表中数值为平均值±标准差($n=3$), mean ± standard deviation($n=3$);同一列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$) different letters at the same column mean significant difference at $P<0.05$ level.

下方程:

$$Y_1=0.504x_1+0.493x_2+0.491x_3+0.512x_4 \quad (6)$$

$$Y_2=-0.510x_1+0.506x_2+0.509x_3-0.474x_4 \quad (7)$$

对以上 2 个方程可以做如下的解释:主成分 1 的特征向量中各个指标的作用基本一致,因此第 1 主成分主要代表生育期早稻土壤 MOB 数量和 SOC 组分特

点;主成分 2 的特征向量中是 MBC 和 LOC 有主要贡献,因此第 2 主成分主要代表生育期早稻土壤 MBC 和 LOC 组分特点。

3 讨论

灌溉模式通过改变田间水分状况影响土壤 SOC

表2 早晚稻各项指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of related indices for early rice and late rice

稻季	指标	CH ₄ 排放通量	甲烷氧化菌 MOB	微生物量碳 MBC	易氧化有机碳 LOC
早稻	甲烷氧化菌 MOB	0.52**			
	微生物量碳 MBC	0.50*	0.42*		
	易氧化有机碳 LOC	0.66**	0.49*	0.71**	
	有机碳 SOC	0.40	0.77**	0.51**	0.43*
晚稻	甲烷氧化菌 MOB	0.43*			
	微生物量碳 MBC	0.45*	0.09		
	易氧化有机碳 LOC	0.46*	-0.07	0.31	
	有机碳 SOC	0.29	0.08	0.51**	0.46*

注(Note): * 显著 Significant difference, $r_{0.05}=0.404\ 39$, $n=22$; ** 极显著 Markedly significant difference, $r_{0.01}=0.515\ 1$, $n=22$.

表3 早晚稻 CH₄ 排放量与相关指标的主成分分析Table 3 Principal component analysis of CH₄ emission fluxes and related indexes in late rice and early rice

项目	晚稻				早稻			
	因子 1 PC1	因子 2 PC2	因子 3 PC3	因子 4 PC4	因子 1 PC1	因子 2 PC2	因子 3 PC3	因子 4 PC4
甲烷氧化菌 MOB	0.076	0.940	0.324	0.073	0.504	-0.510	0.391	0.578
微生物量 MBC	0.568	0.137	-0.641	0.497	0.493	0.506	-0.578	0.408
易氧化有机碳 LOC	0.528	-0.311	0.694	0.377	0.491	0.509	0.595	-0.381
有机碳 SOC	0.626	0.025	-0.043	-0.778	0.512	-0.474	-0.398	-0.595
特征值	1.864	1.039	0.656	0.441	2.665	0.809	0.343	0.183
百分率/%	46.597	25.963	16.411	11.029	66.624	20.233	8.573	4.570
累计百分率/%	46.597	72.560	88.971	100	66.624	86.857	95.431	100

及其组分含量。不同灌溉模式土壤 SOC 含量之间的差异与施氮处理和生育期有关,但总体看来,D 模式高于 T 模式和 C 模式,可能是因为 T 模式和 C 模式增强了土壤微生物的活性,促进了土壤有机质的分解,而对于 D 模式土壤 SOC 含量降低可能是因为频繁干湿交替灌溉增强土壤呼吸作用所致^[24]。土壤 LOC 可作为微生物的碳源^[25],D 模式土壤 LOC 在通透性较好的情况下更易分解变化,所以含量较少。由于灌溉模式对土壤有机质矿化分解速率、微生物生物量及其活性、根系生物量等影响不同^[26],不同灌溉模式对土壤 MBC 的影响不同,且本研究不同灌溉模式土壤 MBC 之间的差异还与施氮处理和生育期有关。N2 处理有机碳及其组分含量一般高于 N1 处理,可能是 N2 处理提供了较多氮源,增加了水稻生物量,从而提高土壤固碳潜势和微生物活性所致。MOB 功能的发挥需要适宜的环境条件。C 模式土壤水层较厚,虽然甲烷排放显著增加,但因缺乏 O₂ 仍然阻碍了 MOB 的繁殖,故 MOB 数量相对减少;而 T 模式和 D 模式土壤处于水层极薄或无水层状态,通气状况好,O₂ 充足,MOB 活性相对较高,故 MOB 数量有所增加。N2 处理 MOB 数量较 N1 高,则可能是因为增加氮肥用量促进

甲烷排放,为 MOB 提供较多的底物,利于 MOB 菌群的生长繁殖。

甲烷排放集中在分蘖期和乳熟期,变化趋势与吴家梅等^[27]的研究一致,即水稻在分蘖期稻田甲烷排放量最高。因为此时期土壤基肥的肥效作用正在发挥,水层较厚,植物体通气组织传输甲烷的净效应较大^[28]。本试验分蘖前期稻田水层较厚,土壤中氧气含量低,利于厌氧菌产生甲烷;基肥和分蘖肥为土壤微生物提供了充足养分,提高了产甲烷微生物的活性;成熟期晒田使土壤通气性增加,破坏了产甲烷微生物的厌氧环境。Kreye 等^[29]研究指出,在水稻特定生育期特定时间段内保持田面无水层或土壤含水量低于饱和含水量,可以使土壤通气状况得到极大改善,抑制甲烷的产生。C 模式水层一直较厚,有利于甲烷排放;T 模式也一直处于有水层状态,虽然水层较薄,也可以为甲烷的产生提供一定的厌氧环境;而 D 模式由于水层在极薄和无水层之间交替,土壤通气状况好于其他两种模式,对甲烷产生的抑制作用很强,因此显著降低了甲烷排放。N2 处理生育期内甲烷排放通量和累积排放量一般高于 N1 处理,则是由于尿素施用可以促进水稻根系发育,增加根系分泌物,为甲烷产生提供

更多的碳基质所致^[30]。

在不同灌溉模式和施氮量下,早稻和晚稻季采土样当日稻田甲烷排放通量与 MOB 呈显著正相关。这是甲烷排放通量与 MOB 的整体数量在不同时期的变化特征造成的,因为分蘖期和乳熟期甲烷排放通量与 MOB 数量都较高,孕穗期和成熟期甲烷排放通量与 MOB 数量都较低。MOB 是甲烷的消耗者,但是在甲烷排放量较少时,MOB 的数量在碳源不足情况下也会有明显的降低,因此本试验条件下会得到稻田甲烷排放通量与 MOB 之间呈正相关。岳进等^[31]研究也表明,沈阳稻田生长季甲烷通量季节变化与季节变化具有显著正相关性。早稻和晚稻季采土样当日稻田甲烷排放通量与 LOC 和 MBC 之间呈极显著或显著正相关。Yagi 等^[16]和 Blagodatskaya 等^[17]也有类似的结果报道。虽然两季水稻 SOC 含量与稻田甲烷排放通量相关性不显著,但与 MBC 和 LOC 却呈现显著正相关关系,说明 SOC 在一定程度上也可以间接反映甲烷的排放规律。焦燕等^[32]研究也发现,土壤 SOC 含量与甲烷排放关系不密切,稻田在淹水的还原环境下,有机物的数量和对厌氧微生物的有效性在甲烷形成过程中起着决定性作用^[33]。但是,也有一些研究表明,甲烷排放通量与土壤 SOC 含量呈显著正相关^[34]。

4 结论

不同灌溉模式土壤有机碳组分之间的差异与施氮量和生育期有关,且 N2 处理有机碳组分一般高于 N1 处理。土壤 MOB 数量以 C 模式较低,D 模式较高,N2 处理 MOB 高于 N1 处理。稻田甲烷排放通量在分蘖期和乳熟期较高。D 模式两季稻田甲烷排放通量与累计排放量均显著低于 T 模式和 C 模式,且 N2 高于 N1。此外,稻田甲烷排放通量与土壤 MOB、LOC 和 MBC 间呈显著正相关关系,土壤 SOC 含量也间接影响稻田甲烷的排放。

参考文献:

- [1] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007: 37–39.
- [2] 王孟雪, 张忠学, 吕纯波, 等. 不同灌溉模式下寒地稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 95–100.
WANG Meng-xue, ZHANG Zhong-xue, LÜ Chun-bo, et al. CH₄ and N₂O emissions from rice paddy field and their GWPs research in different irrigation modes in cold region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(2): 95–100.
- [3] Towprayoon S, Smakgahn K, Poonkaew S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(11): 1547–1556.
- [4] Zhang G B, Ji Y, Ma J, et al. Intermittent irrigation changes production, oxidation, and emission of CH₄ in paddy fields determined with stable carbon isotope technique[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 52(8): 108–116.
- [5] Yang S H, Peng S Z, Xu J Z, et al. Methane and nitrous oxide emissions from paddy field as affected by water-saving irrigation[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2012, 53(12): 30–37.
- [6] 茆 智. 水稻节水灌溉及其对环境的影响[J]. 中国工程科学, 2002, 4(7): 8–16.
MAO Zhi. Water saving irrigation for rice and its effect on environment [J]. *Engineering Science*, 2002, 4(7): 8–16.
- [7] 张自常. 水稻高产优质节水灌溉技术及其生理基础[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
ZHANG Zi-chang. Water-saving irrigation techniques for high yield and good quality of rice and their physiological bases[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [8] Nobuko K, Yuichiro F, Tamon F, et al. Validation of the DNDC-rice model by using CH₄ and N₂O flux data from rice cultivated in pots under alternate wetting and drying irrigation management[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(3): 360–372.
- [9] 李健陵, 李玉娥, 周守华, 等. 节水灌溉、树脂包膜尿素和脲酶/硝化抑制剂对双季稻温室气体减排的协同作用[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3958–3967.
LI Jian-ling, LI Yu-e, ZHOU Shou-hua, et al. Synergistic effects of water-saving irrigation, polymer-coated nitrogen fertilizer and urease/nitrification inhibitor on mitigation of greenhouse gas emissions from the double rice cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3958–3967.
- [10] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 578–584.
XIE Yi-qin, ZHANG Jian-feng, JIANG Hui-min, et al. Effects of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 578–584.
- [11] 石生伟, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同氮、磷肥用量下双季稻田的 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 1899–1907.
SHI Sheng-wei, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Observation for CH₄ and N₂O emissions under different rates of nitrogen and phosphate fertilization in double rice fields[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 1899–1907.
- [12] 陈冠雄, 黄国宏, 黄 斌, 等. 稻田 CH₄ 和 N₂O 的排放及养萍和施肥的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 378–382.
CHEN Guan-xiong, HUANG Guo-hong, HUANG Bin, et al. CH₄ and N₂O emission from a rice field and effect of *Azolla* and fertilization on them[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4): 378–382.
- [13] 李茂柏, 曹黎明, 程 灿, 等. 水稻节水灌溉技术对甲烷排放影响的研究进展[J]. 作物杂志, 2010(6): 98–102.
LI Mao-bai, CAO Li-ming, CHENG Can, et al. Advances in the research on water-efficient irrigation and its effects on methane emis-

- sions from paddy field[J]. *Crops*, 2010(6):98-102.
- [14] 易 琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1432-1437.
- YI Qiong, PANG Yu-wan, YANG Shao-hai, et al. Methane and nitrous oxide emissions in paddy field as influenced by fertilization[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2013, 22(8): 1432-1437.
- [15] Aerts R, Ludwig F. Water-table changes and nutritional status affect trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29(11): 1691-1698.
- [16] Yagi K, Minami K. Effects of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, 36(4): 559-610.
- [17] 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 Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4): 778-786.
- [18] Trotsenko Y A, Murrell J C. Metabolic aspects of aerobic obligate methanotrophy[J]. *Advances in Applied Microbiology*, 2008, 63: 183-229.
- [19] 钱泽澍, 闵 航. 沼气发酵微生物学[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1986: 224-226.
- QIAN Ze-shu, MIN Hang. Microbiology for methane fermentation[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1986: 224-226.
- [20] 陈中云, 吴伟祥, 闵 航, 等. 两株能利用甲烷的吸水链霉菌的分离和鉴定[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2000, 26(4): 384-388.
- CHEN Zhong-yun, WU Wei-xiang, MIN Hang, et al. Isolation and identification of two methane-utilizing strain of *Streptomyces hygroscopicus*[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2000, 26(4): 384-388.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 30-34.
- BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2005: 30-34.
- [22] 徐明岗, 于 荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459-469.
- XU Ming-gang, YU Rong, SUN Xiao-feng, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 459-469.
- [23] 李振高, 俞 慎, 吴胜春, 等. 不同氮肥对水稻根圈微生物生物量及硝化-反硝化细菌的影响[J]. 土壤, 2003, 35(6): 490-494.
- LI Zhen-gao, YU Shen, WU Sheng-chun, et al. Effects of different nitrogen fertilization on the microbial biomass and the population of nitrifying-denitrifying bacteria in the rice rhizosphere[J]. *Soils*, 2003, 35(6): 490-494.
- [24] Wang Y S, Liu F L, Andersen M N, et al. Carbon retention in the soil-plant system under different irrigation regimes[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(3): 419-424.
- [25] 沈 宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38.
- SHEN Hong, CAO Zhi-hong, HU Zheng-yi. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3): 32-38.
- [26] 张前兵, 杨 玲, 王 进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2420-2430.
- ZHANG Qian-bing, YANG Ling, WANG Jin, et al. Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(12): 2420-2430.
- [27] 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.
- WU Jia-mei, JI Xiong-hui, HUO Lian-jie, et al. Fraction changes of oxidation organic carbon in paddy soil and its correlation with CH₄ emission fluxes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4599-4607.
- [28] 徐 华, 蔡祖聪, 李小平. 土壤 Eh 和温度对稻田甲烷排放季节变化的影响[J]. 农业环境保护, 1999, 18(4): 145-149.
- XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping. Effect of soil Eh and temperature on seasonal variation of CH₄ emission from rice[J]. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(4): 145-149.
- [29] Kreye C, Dittert K, Zheng X. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77(3): 293-304.
- [30] Inubushi K, Cheng W G, Aonuma S, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on CH₄ emission from a rice paddy field[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(10): 1458-1464.
- [31] 岳 进, 黄国宏, 梁 巍, 等. 不同水分管理下稻田土壤 CH₄ 和 N₂O 排放与微生物菌群的关系[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2273-2277.
- YUE Jin, HUANG Guo-hong, LIANG Wei, et al. Relationship between CH₄ and N₂O emissions and related microorganism populations in paddy soils under different water management regimes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2273-2277.
- [32] 焦 燕, 黄 耀, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 环境科学, 2002, 23(5): 1-7.
- JIAO Yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Methane emission from rice paddy soils as influenced by soil physico-chemical properties[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(5): 1-7.
- [33] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(10): 1672-1679.
- DING Wei-xin, CAI Zu-cong. Effects of soil organic matter and exogenous organic materials on methane production in and emission from wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1672-1679.
- [34] Minamikawa K, Sakai N, Hayashi H. The effects of ammonium sulfate application on methane emission and soil carbon content of a paddy field in Japan[J]. *Agriculture and Environment*, 2005, 107(4): 371-379.