# 不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响

赵 峥1,岳玉波1,张 翼2,陆欣欣1,曹林奎1\*

(1.上海交通大学农业与生物学院,上海 200240; 2.吉林农业大学资源与环境学院,长春 130118)

摘 要:采用静态箱-气相色谱监测体系研究了上海郊区 3 种不同施肥条件下稻田系统温室气体(GHGs)排放特征及其全球增温潜能(GWP)。研究结果表明:施肥能显著增加稻田系统 CO<sub>2</sub>的排放通量,但不同施肥条件对其影响差异不显著;施用有机肥能显著增加稻田系统 CH<sub>4</sub>的排放通量,同时也能显著降低稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量。整个水稻生育期,不施肥 CK 处理的 GWP 最低,为 14 852 kg CO<sub>2</sub>·hm<sup>-2</sup>。相较于 CK 处理,施用尿素的 CT 处理、有机无机混施的 MT 处理和施用有机肥的 OT 处理分别增加了 86.9%、111.5%和 134.3%的稻田 GWP,表明施肥会增加稻田土壤 GHGs 的 GWP。

关键词:温室气体;甲烷(CH<sub>4</sub>);氧化亚氮(N<sub>2</sub>O);稻田;施肥

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)11-2273-06 doi:10.11654/jaes.2014.11.29

#### Impact of Different Fertilization Practices on Greenhouse Gas Emission from Paddy Field

ZHAO Zheng<sup>1</sup>, YUE Yu-bo<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>, LU Xin-xin<sup>1</sup>, CAO Lin-kui<sup>1\*</sup>

(1.School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2.School of Resource and Environment, Jilin Agriculture University, Changchun 130118, China)

**Abstract**: Greenhouse gas(GHG) emissions from agricultural production systems contribute largely to global warming. A field experiment was conducted to examine GHG emissions under three different fertilization practices(CT-urea alone, MT-80% urea plus 20% manure and OT-manure alone) in Shanghai suburb, China. Carbon dioxide, methane and nitrous oxide were collected and measured by static chambergas chromatography system. Compared to the control(CK), fertilization significantly increased carbon dioxide emission from paddy field, but no differences were found between fertilization treatments. Organic manure significantly increased methane emission, but greatly decreased nitrous oxide emission from paddy field. During the whole rice season, CK had the lowest seasonal Global Warming Potential(GWP) with 14 852 kg CO<sub>2</sub>·hm<sup>-2</sup>. Urea alone and organic manure alone and their combinations increased seasonal GWP by 86.9%, 134.3% and 111.5%, respectively, as compared with CK. The observed data demonstrate that fertilization could increase GHG emission and GWP from paddy field. **Keywords**: greenhouse gas(GHG); methane(CH<sub>4</sub>); nitrous oxide(N<sub>2</sub>O); paddy field; fertilization

全球气候变暖是人类生存面临的巨大挑战,人们 普遍认为温室效应的产生与3种温室气体——二氧 化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)排放的增加 密切相关<sup>[1]</sup>。政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC)第四次评估报告指 出,农田土壤是全球温室气体的主要排放源,且以 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放为主,约占全球温室气体排放总量的 14%,虽然 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 对于温室效应的贡献低于 CO<sub>2</sub>, 仅为 14.3%和 7.9%<sup>[2]</sup>, 但 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 在 100 年尺 度上的全球增温潜能(Global warming potential–GWP) 远高于 CO<sub>2</sub>, 分别是 CO<sub>2</sub> 的 25 倍和 298 倍<sup>[3]</sup>。此外, CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O在大气中的浓度正以每年 3%和0.22%的 速率持续增长<sup>[4]</sup>。

我国是水稻生产大国,而稻田是 CH4 和 N2O 的重要 排放源。相关研究表明,水分管理和施肥措施是影响 稻田 CH4 和 N2O 排放的重要因素<sup>[5-9]</sup>。近年来,我国水稻 种植普遍采用"淹水-中期烤田-淹水"的水分管理模 式,这种变化大幅度降低了稻田 CH4 的排放通量<sup>[10-11]</sup>, 但频繁的干湿交替却导致了反硝化过程中间产物 N2O 排放强度的剧增<sup>[12-14]</sup>。涉及稻田施肥措施的多数 研究结果认为,稻田施用有机肥会增加稻田温室气体

收稿日期:2014-04-10

**基金项目**:国家科技支撑计划课题(2012BAD15B03);国家自然科学基金重点项目(71333010)

作者简介:赵 峥(1988—),男,云南大理人,博士研究生,研究方向为 农田生态系统生态学。E-mail:zzkobe24@sjtu.edu.cn

<sup>\*</sup>通信作者:曹林奎 E-mail:clk@sjtu.edu.cn

的总排放通量,且不同来源的有机肥和不同的配施方 式,其增排效果往往存在较大差异<sup>[15-17]</sup>。不同施肥条件对 稻田温室气体排放的影响是一个综合的效应,由于 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O3种温室气体产生的机制和条件不同, 不同施肥条件对3种温室气体排放的影响规律并不 一致,往往存在一定的消长关系。因此,如何平衡且降 低三者的排放是稻田温室气体减排的关键。本试验以 上海郊区稻田为研究对象,采用静态箱-气相色谱监测 体系,考察了3种不同施肥条件对稻田3种温室气体 排放特征的影响,并综合评价3种施肥条件的全球增 温潜能,从而分析不同施肥条件下稻田对全球气候变 暖的贡献,以期为稻田温室气体减排提供科学依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验地概况

试验时间为 2012 年 6—11 月,试验地位于上海 市青浦区,采用野外田间原位观测试验。该地区为典 型稻作农区,种植制度以稻麦轮作为主。所选试验田 自 2009 年起种植水稻,并维持 3 种施肥方式不变,进 行长期定位试验:无机处理(CT)施用尿素;混施处理 (MT)施用 80% 尿素+20% 有机肥( 纯氮比); 有机处理 (OT)施用有机肥。该地区气候类型为亚热带潮湿型 季风气候,年平均气温为15.6℃,年平均降雨量为 1 178.2 mm, 2012 年的降雨量为 1 145.2 mm。试验地 土壤类型为脱潜型水稻土,属重壤土,稻季开始前采 集耕层 0~20 cm 土壤用于理化性质测定, 如表 1 所 示。试验稻田采用移栽种植方式,田间水分管理为传 统淹灌+中期烤田,烤田时间为10d左右。供试水稻为 当地常规品种"宝农 34",试验过程中关键农事操作 为:6月25日施基肥,6月27日移栽,7月20日第一 次追肥,8月2日至13日烤田,8月14日复水并第二 次追肥,11月8日水稻收割,其他农田管理措施参照 当地习惯。

## 1.2 试验设计

试验共设4种处理,包括空白对照和3种施肥处

表1 耕层土壤理化性质

Table 1	Physica	ıl and cher	nical chai	acteristics	of surfac	ce soils
处理方式	$TN/g \cdot kg^{-1}$	有效磷/ mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾/ mg·kg <sup>-1</sup>	有机质/ g•kg <sup>-1</sup>	рН	容重/ g·cm <sup>-3</sup>
СК	1.20	21.36	38.57	28.07	7.06	1.34
СТ	1.15	20.84	43.55	25.54	7.18	1.29
MT	1.23	25.85	51.32	23.72	7.08	1.23
ОТ	1.46	33.51	55.81	31.33	7.05	1.22

注:有效磷以 P 计;速效钾以 K 计。

## 农业环境科学学报 第 33 卷第 11 期

理,每种处理3次重复,各试验小区随机排列。3种施 肥处理控制总纯氮量相等,施肥水平参照当地农民常 规施肥量300 kg N·hm<sup>-2</sup>。本试验中所施有机肥含氮 量为1.66%,有机质含量51.97%,有机肥均以基肥的 方式施入,尿素分为基肥和两次追肥(比例为6:2:2)。 具体施肥方案如表2所示,其中空白对照(CK)不施 肥。

表 2 不同处理施肥方案 (kg N・hm<sup>-2</sup>)

Table 2 Fertilization schedules for different treatments

$(\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2})$							
计心丛理	基	制肥	追肥1	追肥 2			
风短处理 -	尿素	有机肥	尿素	尿素			
СК	0	0	0	0			
СТ	180	0	60	60			
MT	144	60	48	48			
ОТ	0	300	0	0			

#### 1.3 样品采集与测定

CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 3 种温室气体(GHGs)的采集与 分析测定采用静态箱-气相色谱监测体系进行。采样 频率为每周1~2次,当土壤水分(如烤田等)及养分 (如追肥等)管理发生明显改变时增加采样频率,为每 1~2d一次,采样时间为每日上午8:00—10:00。采样 所使用的静态箱为不透明的方形两段式组合型暗箱, 长、宽、高分别为 50 cm×50 cm×100(50+50)cm, 箱体 材料为有机玻璃,外覆铝箔用于反光隔热,箱内安装 直径 12 cm 风扇用于箱内气体混匀,箱体开有气压平 衡口、温度探测口和采样口,温度探测口用于采样过 程中箱内气体温度测定,采样口和乳胶管及三通阀连 接,用于气体样品的采集。样地中埋设回字形不锈钢 底座,采样时将静态箱放入底座并用水进行液封,等 箱体稳定数分钟后每隔 10 min 用 100 mL 医用注射 器采集1个气体样品。每次采样共采集5个气样,样 品用专用气袋存储并带回实验室对 3 种温室气体浓 度进行分析测定,根据5个气样中3种温室气体浓度 随时间的变化就可计算其排放速率,根据其排放速率 即可计算出3种温室气体的排放通量。气体样品采用 Agilent 6890D 气相色谱进行分析测定,在仪器使用前 对其进样系统、分析气路和阀驱动系统进行了改造, 使其能够同时检测气体样品中的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O,极 大提高了检测效率[18]。CO2和CH4采用火焰离子检测 器(FID)测定,N<sub>2</sub>O采用电子捕获检测器(ECD)测定, 温度分别为 200 ℃和 330 ℃;分离材料为 PQ 填充柱, 柱温为 55 ℃;载气为高纯 N<sub>2</sub>,燃气为 H<sub>2</sub>,助燃气为空

气;标准气体由国家标准物质中心提供。

1.4 数据分析

3种温室气体排放通量采用以下公式计算:

 $F = \rho \cdot H \cdot dC/dt \cdot 273/(273+T)$ 

式中:F为温室气体排放通量, $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 或  $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ; $\rho$ 为标准状态下温室气体密度, $CO_2$ 为1.816 kg·m<sup>-3</sup>,CH<sub>4</sub>为0.714 kg·m<sup>-3</sup>,N<sub>2</sub>O为1.964 kg·m<sup>-3</sup>; H为采样箱高度,m;dC/dt为相应温室气体排放速率,mL·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup>或  $\mu$ L·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup>;T为采样箱内气体温度, ℃。

相关研究表明,采样所选时间段(8:00—10:00) 所获得的温室气体排放通量可代表其日平均排放通 量。根据每次采样所获得的温室气体日平均排放通量 即可估算出整个水稻生长季3种温室气体的总排放 通量。此外,本研究选取100 a 尺度来计算3种 GHGs 的 GWP,计算公式如下:

GWP(kg CO<sub>2</sub>·hm<sup>-2</sup>)=[CO<sub>2</sub>]+25×[CH<sub>4</sub>]+298×[N<sub>2</sub>O] 式中:25 和 298 分别为 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 在 100 a 尺度上 相对于 CO<sub>2</sub> 的 GWP 倍数。

本试验中数据的处理分析及图表的绘制采用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 进行,显著性差异检验选择 *P*≤0.05 水平进行。

## 2 结果与讨论

## 2.1 不同施肥条件下稻田 CO<sub>2</sub> 排放特征

整个水稻生育期,不同施肥处理稻田 CO<sub>2</sub> 排放特 征如图 1 所示。各处理稻田 CO<sub>2</sub> 排放通量的季节变化 规律基本一致,其变化范围为 5.2~1 587.3 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。 在水稻幼苗期及返青期,各处理 CO<sub>2</sub> 排放通量均处于 较低水平;进入分蘖期后 CO<sub>2</sub> 排放通量迅速升高,并 在拔节期(烤田)达到峰值(1 587.3 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>),之后 缓慢下降;在水稻乳熟排水后稻田 CO<sub>2</sub> 排放通量再次 出现峰值(1 304.6 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>),但低于第一次排放 峰;此后,各处理稻田 CO<sub>2</sub> 排放通量缓慢降低,并在水 稻收割后稳定在较低水平。整个水稻季,CT、MT 和 OT 3 种施肥处理的 CO<sub>2</sub> 平均排放通量分别为 732.9、 779.6、738.1 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,相互间无显著差异,但均显 著高于 CK 的 381.8 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>(P<0.05)。

CO<sub>2</sub>是土壤呼吸作用的产物。在水稻移栽初期, 水稻根系不稳定,植物呼吸较弱,同时根系分泌物也 较少,对土壤微生物活动的促进作用不明显,因此稻 田 CO<sub>2</sub>的排放通量并不高;随着水稻生长进入分蘖 期,根系分泌物增加,为微生物提供了充足的营养源, 微生物活动的加剧促进了土壤 CO2 的排放<sup>109</sup>;当水稻 进入拔节期,水稻的生长速度进一步加快,呼吸作用 也明显加强,同时稻田处于烤田期,土壤良好的通气 性促进了好氧微生物的活动,整个系统的呼吸作用明 显增强<sup>[20-21]</sup>,而且 8 月份较高的气温也是 CO<sub>2</sub> 排放通 量升高的主要因素,因此稻田在此时出现 CO2 排放峰 值; 第二次 CO<sub>2</sub> 排放峰的出现也是土壤通气性增加, 好氧微生物活动加剧的结果。施肥能显著增加稻田系 统 CO,的排放通量,但3种不同施肥条件对稻田 CO, 排放特征及通量的影响并无显著差异,可能是稻田 CO2的排放受诸多因素的制约,而不仅仅是施肥。

# 2.2 不同施肥条件下稻田 CH4 排放特征

不同施肥条件下稻田 CH4 排放特征如图 2 所示。 各处理 CH4 排放的季节变化规律类似,均在水稻返青 之后迅速升高,并在水稻分蘖期出现排放峰值,之后 迅速下降;进入烤田期后,各处理稻田基本无 CH4 排 放;稻田复水后直至水稻成熟收割,各处理 CH4 排放 一直维持在较低水平。整个水稻季,各处理 CH4 排放



Figure 1 Dynamics of CO2 emissions from paddy field under different fertilization

#### 农业环境科学学报 第 33 卷第 11 期

通量变化范围为-0.5~98.5 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。各处理排放峰 值差异显著(P<0.05),其中 OT 处理峰值最高,为 98.5 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,显著高于其他 3 种处理;MT 处理次之,为 50.7 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,显著高于其他两种处理;CT 和 CK 处理的 CH<sub>4</sub> 排放峰值分别为 21.6、13.8 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,二 者之间无显著差异。整个水稻生育期,CK、CT、MT 和 OT 4 种处理的 CH<sub>4</sub> 平均排放通量分别为 1.3、2.0、 5.1、10.0 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。

稻田 CH4 的产生主要是产甲烷菌在厌氧条件下 还原土壤有机碳的产物<sup>[22-23]</sup>。因此,稻田 CH<sub>4</sub> 的产生 主要集中在水稻淹水期。进入烤田期后稻田处于曝气 状态,土壤通气良好,氧气充足,使得产甲烷菌的活动 受到抑制,同时好氧的甲烷氧化菌开始变得活跃,即 使此时产生了少量的 CH4 也将被其利用而不会排放 到大气中,此时稻田的 CH4 排放几乎为零,甚至出现 负值,与多数研究结果一致[24-25]。当稻田复水之后,虽 然土壤恢复了厌氧的还原环境,但由于烤田期产甲烷 菌的活动被严重抑制,短时间内较难恢复,同时前期 产甲烷菌的活跃和水稻的快速生长消耗了大量的土 壤有机碳,稻田产生 CH4 的底物明显减少,因此稻田 复水之后 CH4 的排放通量明显降低。不同处理之间稻 田 CH<sub>4</sub> 排放的差别则主要来自有机碳投入的不同,由 于 MT 和 OT 处理施用了不同比例的有机肥,为稻田 土壤产甲烷菌的活动提供了充足的原料,因此其 CH4 排放显著高于其他处理。

# 2.3 不同施肥条件下稻田 N<sub>2</sub>O 排放特征

不同施肥条件稻田 N<sub>2</sub>O 排放特征如图 3 所示。 试验结果表明,稻田 N<sub>2</sub>O 排放与施肥和田间水分管理 密切相关。整个水稻生育期,CT 和 MT 处理共出现 5 次 N<sub>2</sub>O 排放峰值,分别为基肥期、第一次追肥、烤田 期、第二次追肥和水稻黄熟排水;而 OT 处理出现 3 次 N<sub>2</sub>O 排放峰值,分别在基肥期、稻田复水后及水稻 排水黄熟期。各次N<sub>2</sub>O 排放峰值中以基肥期和烤田期 的峰值较高,最高排放峰值出现在烤田期的 CT 处理 中,达 458.3 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。整个水稻季,CK、CT、MT 和 OT 4 种处理的 N<sub>2</sub>O 平均排放通量分别为 5.9、83.6、 56.7、25.7 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,各处理间均有显著性差异(P< 0.05)。

N<sub>2</sub>O 是反硝化过程的中间产物,相关研究表明, 施肥和田间水分管理是影响稻田系统 N<sub>2</sub>O 排放的关 键因素[26-28]。本试验中,3次施肥之后各处理稻田均产 生了 N<sub>2</sub>O 排放峰,可能原因是由于施肥为反硝化菌提 供了大量氮源,且此时的稻田处于淹水状态,厌氧的 还原环境有利于反硝化作用的进行和 N<sub>2</sub>O 的产生。此 后,虽然稻田仍处于淹水状态,但 N<sub>2</sub>O 的排放消失。可 能原因:一方面是由于土壤中反硝化底物 NO<sub>3</sub>-N 被消 耗殆尽, 而产生 NO<sub>3</sub>-N 的硝化反应在厌氧环境下被 抑制;另一方面则是因为厌氧环境有利于反硝化反应 进行完全,产物为 N<sub>2</sub>,而不会过多的产生中间产物 N<sub>2</sub>O。在烤田期和水稻黄熟排水后,稻田 N<sub>2</sub>O 排放峰 值的出现则跟田间水分管理有关。当稻田水分管理发 生变化时,干湿交替的土壤环境有利于硝化反应和反 硝化反应同时进行,且此时的反硝化反应常常进行的 不完全,有利于中间产物 N<sub>2</sub>O 的产生。不同施肥处理 间 N<sub>2</sub>O 排放的显著差异则可能跟氮源的形态有关,施 用有机肥所提供的有机态氮可能不利于反硝化菌对 于氦的利用。

## 2.4 稻田温室气体季节排放通量及增温潜能

CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O是3种主要的温室气体,稻田系 统是其主要的农业排放源之一。整个水稻生育期,各



Figure 2 Dynamics of CH4 emissions from paddy field under different fertilization



Figure 3 Dynamics of N<sub>2</sub>O emissions from paddy field under different fertilization

处理3种温室气体的季节排放通量如表3所示。3种 温室气体对温室效应的贡献通常采用"全球增温潜 能"(Global Warming Potential-GWP) 来作为评价指 标。相关研究表明,CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 在 100 a 尺度上的 GWP 分别是 CO<sub>2</sub> 的 25 倍和 298 倍,依此计算了各处 理3种温室气体的总GWP。根据本研究的试验结果 可知,施肥能显著增加稻田 CO2 的排放,与 CK 相比, CT、MT 和 OT 3 种施肥处理分别增加了88.6%、97.9% 和 91.8%的稻田 CO2 排放,但不同施肥条件的影响无 显著差异。施用有机肥能显著增加稻田 CH4 的排放, 同时也能显著降低稻田 N<sub>2</sub>O 的排放,与 CT 处理相 比,施用有机肥的 MT 和 OT 处理分别增加了 170.7% 和 475.4%的稻田 CH<sub>4</sub> 排放,同时分别减少了 16.5% 和50.0%的稻田 N<sub>2</sub>O 排放。整个水稻生育期,不同施 肥处理的稻田总 GWP 为 OT 处理最高, MT 处理次 之,CT 处理最低,3 种施肥处理间差异显著且均显著 高于不施肥的 CK。与不施肥的 CK 相比, CT、MT 和 OT 3 种施肥处理分别增加了 86.9%、111.5% 和 134.3%的稻田 GWP; 与施用尿素的 CT 处理相比, 施 用有机肥的 MT 和 OT 处理则分别增加了 13.2%和 25.3%的稻田 GWP。由此可知,施肥会增加稻田系统

表 3 稻田温	室气体季节排放通量及增温潜能(kg·hm <sup>-2</sup> )
Table 3 Seasona	l GHG fluxes and global warming potential (GWP
	for rice season(kg $\cdot$ hm <sup>-2</sup> )

试验处理	$CO_2$	$CH_4$	$N_2O$	$GWP(CO_2)$
СК	13 722.1a	44.0a	0.1a	14 851.5a
СТ	25 875.9b	57.3a	1.5b	27 763.6b
MT	27 156.8b	155.2b	1.3c	31 415.8c
ОТ	26 315.2b	329.9c	0.8d	34 791.1d

注:3种温室气体 GWP 换算系数为 CO2:CH4:N2O=1:25:298(100 a)。

对全球气候变暖的贡献,而施用有机肥的增温潜能 更高。

## 3 结论

(1)施肥会显著增加稻田系统 CO<sub>2</sub> 排放潜能,但 不同施肥条件对稻田 CO<sub>2</sub> 排放的影响无显著差异。

(2)施用有机肥能显著增加稻田系统 CH<sub>4</sub>的排放 潜能,但同时也能显著降低 N<sub>2</sub>O 的排放潜能。

(3)施肥是影响稻田系统 GHGs 排放的关键因素。稻田施肥会增加稻田系统的 GHGs 排放和全球增 温潜能,增施有机肥的施肥方式对全球气候变暖的贡 献高于传统的无机施肥方式。

#### 参考文献:

- IPCC. Climate change 2007: Understanding and attributing climate change[R/OL]. http://www.ipcc. ch/pdf/assessment report/ar4/wg1/ar4wg1-chapter9. pdf.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 2007:63–67.
- [3] 张若玉,何金海,张 华. 温室气体全球增温潜能的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(28):17416–17419, 17422.
  ZHANG Ruo-yu, HE Jin-hai, ZHANG Hua. Overview of researches on global warming potential of greenhouse gases[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2011, 39(28):17416–17419, 17422.
- [4] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from irrigated rice of North India[J]. *Chemosphere*, 2003, 51(3):181-195.
- [5] 石生伟,李玉娥,李明德,等. 不同施肥处理下双季稻田 CH4 和 N<sub>2</sub>O 排放的全年观测研究[J]. 大气科学, 2011, 35(4):707-720. SHI Sheng-wei, LI Yu-e, LI Ming-de, et al. Annual CH4 and N<sub>2</sub>O emissions from double rice cropping systems under various fertilizer regimes in Hunan Province, China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,

2011, 35(4):707-720.

- [6] 代光照,李成芳,曹凑贵,等. 免耕施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放 及其温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9):2166-2172. DAI Guang-zhao, LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, et al. Effects of notillage and fertilization on paddy soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and the greenhouse effect in central China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9):2166-2172.
- [7] Pathak H. Mitigating greenhouse gas and nitrogen loss with improved fertilizer management in rice: Quantification and economic assessment[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 87(3):443–454.
- [8] 彭世彰,杨士红,徐俊增.控制灌溉对稻田 CH4和 N2O 综合排放及 温室效应的影响[J].水科学进展,2010,21(2):235-240.
  PENG Shi-zhang, YANG Shi-hong, XU Jun-zeng. Influence of controlled irrigation on CH4 and N2O emissions from paddy fields and subsequent greenhouse effect[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 235-240.
- [9] Kudo Y, Noborio K, Shimoozono N, et al. The effective water management practice for mitigating greenhouse gas emissions and maintaining rice yield in central Japan[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 186:77–85.
- [10] Yan X Y, Yagi K, Akiyama H, et al. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(7):1131-1141.
- [11] Khosa M K, Sidhu B S, Benbi D K. Methane emission from rice fields in relation to management of irrigation water[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2011, 32(2):169–172.
- [12] Akiyama H, Yagi K, Yan X Y. Direct N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy fields: Summary of available data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(1): 1-10.
- [13] Jiao Z, Hou A, Shi Y, et al. Water management influencing methane and nitrous oxide emissions from rice field in relation to soil redox and microbial community[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37(13):1889–1903.
- [14] Liu S, Zhang L, Jiang J, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice seedling nurseries under flooding and moist irrigation regimes in Southeast China[J]. Science of the Total Environment, 2012, 426:166-171.
- [15] 马义虎, 顾道健, 刘立军, 等. 玉米秸秆源有机肥对水稻产量与温室气体排放的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(5):520-528.
  MA Yi-hu, GU Dao-jian, LIU Li-jun, et al. Effects of the organic fertilizers made from maize straw on grain yield of rice and emission of greenhouse gases from paddy fields[J]. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27(5): 520-528.
- [16] 刘晓雨,李志鹏,潘根兴,等.长期不同施肥下太湖地区稻田净温 室效应和温室气体排放强度的变化[J].农业环境科学学报,2011, 30(9):1783-1790.

LIU Xiao-yu, LI Zhi-peng, PAN Gen-xing, et al. Greenhouse gas emission and C intensity for a long-term fertilization rice paddy in Tai Lake Region, China[J]. *Journal of A gro-Environment Science*, 2011, 30 (9):1783–1790.

- [17] Das S, Adhya T K. Effect of combine application of organic manure and inorganic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a tropical flooded soil planted to rice[J]. *Geoderma*, 2014, 213:185–192.
- [18] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态 系统 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003,

4(10):84-90.

WANG Yue-si, LIU Guang-ren, WANG Ying-hong, et al. Simultaneous measurement of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from terrestrial e – cosystem with one improved gas chromatography[J]. *Techniques and Equipment for Environment Control*, 2003, 4(10):84–90.

[19] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 不同耕作方式下稻田土壤 CH<sub>4</sub>和 CO<sub>2</sub>的排放及碳收支估算[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2482-2488.

LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from paddy soils and assessment of carbon budget in different tillage systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12);2482–2488.

- [20] 侯玉兰,王 军,陈振楼,等. 崇明岛稻麦轮作系统稻田温室气体排放研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9):1862–1867.
  HOU Yu-lan, WANG Jun, CHEN Zhen-lou, et al. Emissions of green-house gases from paddy fields of rice-wheat rotation system in Chong-ming island, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31 (9):1862–1867.
- [21] 展 茗,曹凑贵, 汪金平,等. 稻鸭复合系统的温室气体排放及其温室效应[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2):420–426.
  ZHAN Ming, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. Greenhouse gas e-missions from an integrated rice-duck system and its Global Warming Potentials[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(2):420–426.
- [22] Sakai S, Imachi H, Sekiguchi Y, et al. Isolation of key methanogens for global methane emission from rice paddy fields: A novel isolate affili– ated with the clone cluster rice cluster[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73(13):4326–4331.
- [23] Conrad R, Erkel C, Liesack W. Rice Cluster I methanogens, an important group of Archaea producing greenhouse gas in soil[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2006, 17(3):262–267.
- [24] 侯晓莉,李玉娥,万运帆,等.不同稻秆处理方式下双季稻温室气体 排放通量研究[J].中国环境科学,2012,32(5):803-809.
  HOU Xiao-li, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Greenhouse gases emission from paddy fields under different rice straw treatments[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(5):803-809.
- [25]张岳芳,周 炜,陈留根,等.太湖地区不同水旱轮作方式下稻季甲 烷和氧化亚氮排放研究[J].中国生态农业学报,2013,21(3): 290-296.

ZHANG Yue-fang, ZHOU Wei, CHEN Liu-gen, et al. Methane and nitrous oxide emission under different paddy-upland crop rotation systems during rice growth season in Taihu Lake Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3):290–296.

- [26] Cai Z, Xing G, Yan X, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1):7–14.
- [27] Zou J, Huang Y, Jiang J, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2):1–9.
- [28] 马二登, 马 静, 徐 华, 等. 施肥对稻田 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 农业 环境科学学报, 2009, 28(12):2453-2458.

MA Er-deng, MA Jing, XU Hua, et al. Effects of fertilization on nitrous oxide emission from paddy fields: A review[J]. *Journal of Agro–Envi–ronment Science*, 2009, 28(12):2453–2458.

#### 农业环境科学学报 第 33 卷第 11 期