

太湖地区不同集约化栽培模式下稻田 CH₄ 排放*

马煜春 孙丽英 孔宪旺 黄太庆 熊正琴†

(江苏省低碳农业与温室气体减排重点实验室, 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要 采用静态暗箱—气相色谱法对太湖地区水稻生态系统甲烷 (CH₄) 排放进行田间原位观测, 共设置无氮 (NN)、常规 (FP)、增产增效 (YE) (增产 10%~15%, 氮肥利用率 (NUE) 提高 20%~30%)、再增产 (HY) (增产 30%~40%)、再增效 (HE) (NUE 提高 30%~50%) 和保产增效 (IE) (产量不变, NUE 提高 20%~30%) 六种不同的栽培模式。结果表明, 稻田 CH₄ 排放具有明显的季节变化, 在水稻生长期先升高后降低, 从水稻移栽至抽穗期 CH₄ 排放通量占全生育期的 93%~98%。不同栽培模式间 CH₄ 累积排放量差异显著 ($p<0.05$), HY 处理高达 258.8 kg hm⁻², 显著高于未施有机肥各处理; 单位稻谷产量 CH₄ 排放量差异不显著, 平均为 CO₂ 0.60 kg kg⁻¹, 提高稻谷产量的模式不会显著影响 CH₄ 排放; 其中 YE 处理单位稻谷产量 CH₄ 排放量最低, 为 CO₂ 0.49 kg kg⁻¹, 可以同时实现增产、增效和减排, 值得推广。

关键词 栽培模式; CH₄ 排放通量; 氮肥利用率; 产量; 增温潜能

中图分类号 X511 文献标识码 A

保障粮食安全是我国甚至全球面临的重大战略问题。全球近 1/2 的人口以稻谷为主食^[1], 我国是世界上最大的水稻生产国和消费国, 水稻种植面积达 2 860 万 hm², 稻谷产量达 1.81 亿 t, 占粮食总产量的 43.6%^[2]。为了满足人们生活水平提高及人口数量日益增长对粮食生产的需求, 至 2030 年我国粮食总产必须在现有基础上提高 40% 以上, 单产增加 45% 以上。氮肥用量过多和氮肥利用效率低是造成我国目前水稻生产中资源浪费、环境破坏的突出问题^[3-5]。如何同步提高水稻产量和氮肥利用效率是水稻生产中实现环境友好、保障粮食安全的

* 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2009CB118603)、教育部新世纪人才支持计划 (NCET-10-0475)、南京市科技发展计划项目 (200901063)、国家自然科学基金项目 (40971139) 资助

† 通讯作者, E-mail: zqxiong@njau.edu.cn

作者简介: 马煜春 (1986-), 博士研究生, 研究方向为农田温室气体排放研究

收稿日期: 2010-11-01; 收到修改稿日期: 2011-04-01

关键科学问题，是当前研究的热点和难点。

针对上述问题，本研究以不施氮肥和当地常规模式为对照，设计了实现高产高效、保产增效、水稻更高产以及氮肥更高效四种不同水稻栽培模式。不同栽培模式涉及不同氮肥水平、有机肥施用以及栽插密度等具体措施的整合，在决定水稻产量、氮肥利用效率的同时，还直接影响温室气体 CH_4 的排放^[6,8,11,17]。在 100 年时间尺度上单位质量 CH_4 的增温潜能大约是 CO_2 的 25 倍^[7]，是大气中仅次于 CO_2 的最重要的温室气体^[8-9]。据估计，全球稻田 CH_4 排放量为 47~60 Tg，约占大气 CH_4 总量的 10%~20%^[10,12]。对于稻田 CH_4 的研究多集中在当前不同的水管理方式、不同的施肥水平及有机物料添加等方面^[13-16]，缺乏专门针对未来同时提高水稻产量和氮肥利用效率的不同综合栽培模式对 CH_4 排放影响的研究。

本研究旨在原位观测评价上述不同集约化栽培模式对稻田 CH_4 排放规律的影响，为不同栽培模式的推广提供基础资料，同时为温室气体减排方案提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区

大田试验在江苏省常熟市辛庄镇中国科学院常熟农业生态试验站（120°41'88"E，31°32'93"N）进行。该试验区位于太湖流域，历史上长期实行水稻-小麦周年轮作生产体系，属北亚热带湿润气候，年平均气温 15.5 °C，年降雨量 1 038 mm，无霜期 224 d。供试土壤为湖积物发育的潜育型水稻土（乌栅土），土壤有机质含量为 35.0 g kg⁻¹，全氮含量为 2.01g kg⁻¹，pH（H₂O）为 7.35。

1.2 试验设计

试验共设置无氮（NN）、常规（FP）、增产增效（YE）（与 FP 相比，产量增加 10%~15%，氮肥利用率（NUE）提高 20%~30%）、再增产（HY）（与 FP 相比，产量增加 30%~

40%)、再增效 (HE) (与 FP 相比, NUE 提高 30%~40%) 和保产增效 (IE) (与 FP 相比, 产量不变, NUE 提高 20%~30%) 六种不同的栽培模式, 即 6 个处理, 4 次重复, 共 24 个小区, 每小区面积为 40 m²。为了达到上述产量和 NUE 目标, 各栽培模式涉及到不同的氮肥总量、氮肥分施次数及比例、有机肥施用、种植密度等, 各处理具体方案见表 1。磷肥采用过磷酸钙, 含 P₂O₅ 12%, 氮肥用尿素, 钾肥用氯化钾。有机肥、磷肥、硅肥均作为基肥一次施用。除了 NN 和 FP 处理钾肥作为基肥一次施用外, 其余 4 种处理均按照基肥:追肥=1:1 的比例在拔节期施用追肥。较密植处理 (YE、HE、IE) 气体采样框内包含 9 穴苗, 较稀植处理 (NN、FP、HY) 气体采样框内包含 6 穴苗, 每穴 2 苗。各处理均采用统一的水分管理模式, 即前期淹水、中期烤田、后期间歇湿润灌溉模式。

表 1 2009 年常熟水稻试验肥料施用量和主要栽培措施

Table 1 Fertilization rates in kg hm⁻² and cultivation practices during the rice season at Changshu,

2009

处理代号	化肥用量	氮肥施用比例	菜籽饼肥	栽培密度
Treatment	Chemical fertilizer application	Split N application	Rapeseed cake	Planting density
code	rate(N:P:K:Si, kg hm ⁻²)	ratio	manure (t hm ⁻²)	(cm)
NN	0:90:120:0		0	20×20
FP	300:90:120:0	6:2:0:2	0	20×20
YE	270:90:120:0	5:1:2:2	0	20×15
HY	375:126:180:225	5:1:2:2	2.25	20×20
HE	300:108:144:225	5:1:2:2	2.25	20×15
IE	225:90:120:0	5:1:2:2	0	20×15

注: NN 为无氮处理; FP 为常规处理; YE 为增产增效处理; HY 为再增产处理; HE 为再增效处理;

IE 为保产增效处理 Note: NN: no N control, FP: farmers' practice, YE: 10%~15% higher in yield and 20%~30% higher in N use efficiency, HY: 30%~40% higher in yield, HE: 30%~50% higher in N use efficiency, and IE: currently integrated management for the same as FP in yield and 20%~30% higher in NUE

1.3 采样方法

试验于 2009 年进行, 水稻供试品种为常优 3 号, 生育期为 136 d。试验采用静态暗箱法测定。采样箱用 5 mm 厚的 PVC 板制成, 分成两截。顶层为 50 cm×50 cm×50 cm, 底层为 50 cm×50 cm×60 cm, 外包锡箔纸以免太阳直射导致箱内气温增加过快, 随水稻生长高度的变化采用顶层或两层采样。底座于水稻移栽前装入小区, 底座及底层箱体顶端均设计有 4 cm 深的水槽, 用于采样时加水密封用。顶层箱盖留有温度计插孔, 用来观测箱内温度变化; 箱体中部留有抽气孔。采样时每次用注射器抽取箱内气体 20 ml, 四个连续样品分别在箱体密闭后 0 min、10 min、20 min 和 30 min 采集, 48 h 内用安捷伦气相色谱 7890A 完成浓度测定, 检测器为 FID, 检测器温度 300℃, 色谱柱为 80~100 目 poropak Q, 用 N₂ 作载气, 载气流量保持 40 ml min⁻¹。标准物质为南京特种气体厂生产的 CH₄/N₂, 日常工作标样为压缩空气。根据箱内样品浓度的线性变化规律分析 CH₄ 排放通量。气体采集观测在水稻全生育期内连续进行, 从移栽第 1 天采样开始, 每周采集气体 2 次, 基本在 9:00~11:00 时段内完成。

1.4 数据处理

CH₄ 排放通量计算公式为:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中, F 表示 CH₄-C 的排放通量 (mg m⁻² h⁻¹); ρ 表示标准状况下 CH₄-C 密度为 0.54 g L⁻¹; V 为采样箱体积 (m³); A 为采样底座内框面积 (m²); $\frac{\Delta C}{\Delta t}$ 表示 CH₄ 的排放速率 (CH₄ 为 $\mu\text{l L}^{-1} \text{h}^{-1}$); T 为采样箱内的气温 (°C)。

每次观测时各处理 CH₄ 排放通量用 4 次重复的平均值表示; 作物生长季节 CH₄ 平均排

放通量的计算则以相邻两次采样时间间隔为权重，将各次排放通量进行加权平均；CH₄ 累积排放量用平均排放通量和全生长季节时间的乘积表示。本文用 Excel 计算 CH₄ 排放通量及制作图表，用 SPSS 软件对数据结果进行方差分析及多重比较（Duncan 法）。

2 结果与分析

2.1 不同栽培模式下稻田 CH₄ 排放规律

2.1.1 不同栽培模式对稻田 CH₄ 排放季节变化的影响 从图 1 可以看出，未施有机肥的 4 种不同栽培模式下（NN、FP、YE、IE）CH₄ 排放的季节变化趋势基本相同。稻田 CH₄ 排放通量在水稻生长前期随着水稻生长发育进程呈递增趋势，峰值约为 15 mg m⁻² h⁻¹；直至水稻分蘖期开始排水烤田以控制无效分蘖，CH₄ 排放通量急剧降低；之后 CH₄ 排放维持在较低水平，至成熟期 CH₄ 接近于零排放。

施用有机肥的 2 种不同栽培模式（HY 和 HE）CH₄ 排放的季节变化趋势明显有别于上述未施有机肥的 4 种模式。水稻移栽后 1 周各处理即达到排放峰值，峰值高达 71.2 mg m⁻² h⁻¹，排放高峰持续约 20 d，显著大于其他 4 个处理。CH₄ 排放通量在水稻分蘖期开始排水烤田后也急剧降低，之后也维持在较低水平，成熟期则接近于零排放。

此外，CH₄ 排放的季节动态与大气平均温度变化趋势密切相关（图 1），两者之间存在极显著的线性相关关系（ $p < 0.01$ ）。

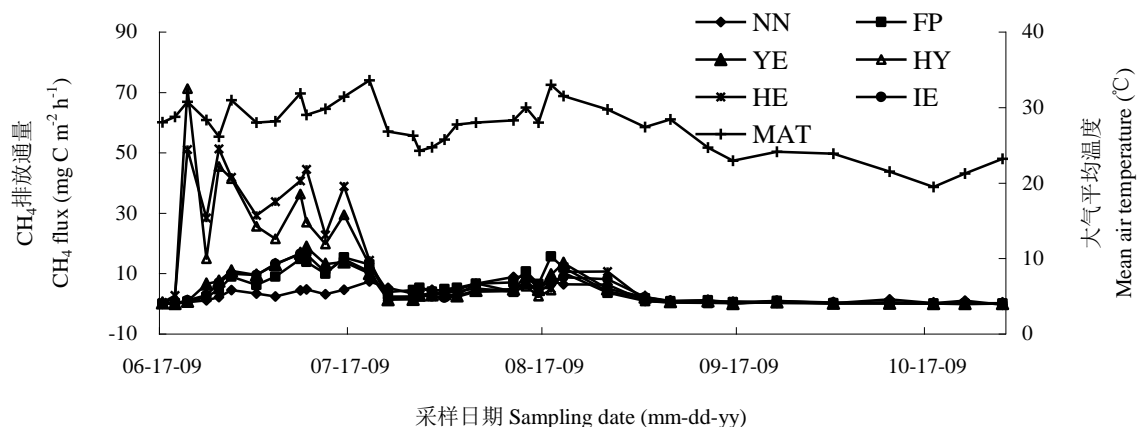


图 1 2009 年常熟站不同栽培模式下水稻季节 CH₄ 排放通量和大气平均温度的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of CH₄ emission from rice paddy fields under different cultivation patterns and mean air temperature during the rice growing season in 2009 at Changshu

2.1.2 不同栽培模式对 CH₄ 平均排放通量和累积排放量的影响 不同栽培模式对稻田 CH₄ 排放具有明显的影响 (表 2)。HY 和 HE 处理增加菜籽饼有机肥作为基肥, 其 CH₄ 平均排放通量高于其他未施有机肥的 4 个处理。其中, HY 处理 CH₄ 平均排放量与其他未施有机肥的各处理达到显著差异, CH₄ 季节累积排放量高达 259 kg hm⁻², 与处理 FP 相比, 增加 91%, 差异显著。HE 处理次之, CH₄ 季节累积排放量为 199 kg hm⁻², 较处理 FP 增加 46%。其他 4 个处理的 CH₄ 累积排放量差异不显著, 顺序依次为: FP>YE>IE>NN; YE 和 IE 处理分别较 FP 处理减少 2.6%和 5.1%, NN 处理排放量最低, 仅 92 kg hm⁻², 较 FP 处理减少 32%。

表 2 不同栽培模式下稻田 CH₄ 排放通量及其与当地常规栽培模式的比较

Table 2 Comparison between rice paddy fields under different cultivation patterns and field under the local pattern in methane flux during rice growing season in 2009

处理代号	平均排放通量	季节累积排放量	增加量	增加百分比
Treatment code	Mean CH ₄ fluxes	Cumulative CH ₄ emission	Increment	Increment in percentage
	(mg m ⁻² h ⁻¹)	(kg hm ⁻²)	(kg hm ⁻²)	(%)

FP	4.2±0.7b	135.7±23.0b	—	—
NN	2.8±0.7b	92.3±22.6b	-43.4	-32.0
YE	4.1±1.1b	132.2±37.3b	-3.6	-2.6
HY	7.9±3.1a	258.8±99.6a	123.1	90.7
HE	6.7±4.7ab	198.7±112.1ab	62.9	46.4
IE	4.1±0.8b	128.9±27.2b	-6.9	-5.1

注：同一列数据后标识不同字母表示差异显著 ($p<0.05$) Note: Means followed by different letters within the same column are significantly different ($p<0.05$)

2.1.3 水稻各生育期对不同栽培模式下 CH₄ 累积排放的贡献率 CH₄ 排放在整个生水稻生育时期具有明显的季节变化 (图 1)。依次将水稻生育期分为移栽返青期、分蘖期、拔节抽穗期和成熟期 4 个时期,水稻各生育期对 CH₄ 累积排放的贡献率随不同栽培模式而异(表 3)。其中未施有机肥的 4 个处理 (YE、IE、FP 和 NN) 移栽返青期 CH₄ 累积排放量低, 仅占整个生育期的 4.8%~11.6%, 成熟期所占比例也很低, 仅为 2.9%~7.2%, 绝大部分 CH₄ 排放量集中在分蘖期至拔节抽穗期, 占整个生育期的 86%~90%。其中 NN 和 FP 处理在成熟期前 CH₄ 排放量均随着水稻生育进程而显著增加, 拔节抽穗期 CH₄ 累积排放量的相对贡献率最高。旨在提高氮肥利用效率的 YE 和 IE 两个处理 CH₄ 累积排放量的贡献率在分蘖期和拔节抽穗期并列最高, 显著高于移栽期和成熟期。

施用有机肥的 HY 和 HE 两个处理不同生育期对 CH₄ 累积排放量的相对贡献率明显不同于上述 4 个处理, 移栽期的相对贡献率就高达 26%~33%, 与其他处理差异显著, 分蘖期达到峰值, 占 48%~51%, 其中 HY 处理与单施化肥的 4 个处理差异显著。因此移栽期和分蘖期即水稻生长前期 CH₄ 累积排放量占整个生育期的 77%~81%, 之后则随生育期进程显著降低, 成熟期的相对贡献率仅为 1.6%。施入菜籽饼基肥是导致 HE 和 HY 处理 CH₄ 排放集中在水稻生育前期的重要原因。

表 3 不同栽培模式下水稻不同生育阶段 CH₄ 累计排放量及其占全生育期排放总量的比例¹⁾

Table 3 CH₄ emissions during different rice growing stages and their percentages of the total seasonal CH₄ emission under different cultivation patterns in 2009

处理代号 Treatment code	移栽返青期 (13 d) ²⁾ Transplanting		分蘖期 (18 d) ²⁾ Tillering		拔节抽穗期 (48 d) ²⁾ Elongating to heading		成熟期 (57 d) ²⁾ Maturing	
	累积排放量 Cumulative CH ₄ (kg hm ⁻²)	占全生育期百分比 Percentage (%)	累积排放量 Cumulative CH ₄ (kg hm ⁻²)	占全生育期百分比 Percentage (%)	累积排放量 Cumulative CH ₄ (kg hm ⁻²)	占全生育期百分比 Percentage (%)	累积排放量 Cumulative CH ₄ (kg hm ⁻²)	占全生育期百分比 Percentage (%)
NN	4.3±0.6Cb	4.8±1.1Bc	16.0±2.2Cb	17.8±3.3Bb	64.9±16.9Aa	70.0±6.4Aa	7.1±6.4Ab	7.2±5.1Ac
FP	8.5±1.8Cc	6.5±2.0Bc	48.1±10.1Cb	36.1±8.1Ab	73.6±20.5Aa	53.7±6.3ABa	5.5±5.6Ac	3.7±3.3ABc
YE	14.1±10.2Cb	11.6±10.1Bb	58.5±23.6BCa	44.2±9.8Aa	55.3±25.8Aa	41.3±18.2Ba	4.2±2.8Ab	2.9±1.3Bb
HY	87.7±37.9Ab	33.3±5.6Ab	116.9±42.6Aa	47.5±11.8Aa	50.4±34.5Abc	17.6±10.4Cc	3.8±2.1Ac	1.6±0.8Bd
HE	48.3±22.2Bab	26.0±11.4Ab	99.7±53.3ABa	50.8±2.0Aa	47.1±44.4Aab	21.6±10.5Cb	3.5±3.4Ab	1.6±0.7Bc
IE	10.7±3.0Cb	8.7±3.3Bb	56.6±7.0BCa	45.1±10.0Aa	55.9±27.1Aa	41.9±11.9Ba	5.7±2.7Ab	4.3±1.5ABb

注: 1) 同一行数据后标识不同小写字母表示差异显著, 同一列数据后标识不同大写字母表示差异显著 ($p < 0.05$); 2) 括号内为该时期的持续天数 Note: 1) Means followed by different lower case letters within the same row are significantly different. Means followed by different capital letters within the same column are significantly different ($p < 0.05$). 2) Numbers in parentheses indicate days that stage lasted

2.2 不同栽培模式下水稻产量与 CH₄ 排放的关系

六种不同栽培模式下水稻产量差异显著，再增产 HY 处理稻谷产量最高，达 10 898 kg hm⁻²，依次为 HY>HE>>YE>>IE>FP>>NN。与当地常规 FP 相比，增产增效处理 YE 产量显著增加，主要是通过增加种植密度、增施促花肥、追施钾肥、适当减少氮肥总量（表 1）等措施综合作用来提高产量和氮肥利用率，实现了未来水稻生产对高产和氮肥高效的目标，也实现了未来水稻生产对产量和氮肥利用率同步增加的目标要求。

以大田水稻生长期的 CH₄ 排放量和产量来计算单位稻谷产量 CH₄ 排放量（表 4），适用于评价不同栽培模式对稻田 CH₄ 排放的影响。这种同时考虑水稻产量和甲烷排放量的评价指标，对于未来水稻生产的可持续发展和减排是十分必要的。在 100 年时间尺度上，各处理的 CH₄ 累积排放对温室效应的贡献以 HY 处理最高，显著高于其他未施有机肥的 4 个处理；但不同栽培模式各处理单位产量的 GWP（Global Warming Potential）差异不显著，平均为 CO₂ 0.60 kg kg⁻¹（表 4），提高稻谷产量的模式不会显著影响 CH₄ 排放；各处理单位稻谷产量 CH₄ 排放量依次为 HY>HE>NN>FP>IE>YE（表 4）。YE 处理单位稻谷产量 CH₄ 排放量最低，为 CO₂ 0.49 kg kg⁻¹，且氮肥利用率（NUE）较 FP 处理提高了 25%，可以同时实现增产、增效和减排，值得推广。

表 4 不同栽培模式下水稻产量、氮肥农学利用率、稻田 CH₄ 排放总量及单位产量 GWP¹⁾

Table 4 Rice grain yield, agronomic efficiency of nitrogen, total CH₄ emissions, and per unit grain yield GWP from paddy fields under different cultivation patterns

处理代号	稻谷产量	氮肥农学利用率	季节累积排放量	温室效应	单位产量的 GWP
Treatment code	Rice grain yield (kg hm ⁻²)	Agronomic efficiency of nitrogen (grain kg kg ⁻¹ N)	Cumulative CH ₄ fluxes (kg hm ⁻²)	GWP ²⁾ (CO ₂ kg hm ⁻²)	GWP per unit yield (CO ₂ kg kg ⁻¹)
NN	5 627±587d		92.3±22.6b	3 077±752b	0.58±0.15a
FP	8 059±177c	26.9±0.6d	135.7±23.0b	4 524±766b	0.56±0.09a
YE	9 049±268b	33.5±1.0b	132.2±37.3b	4 406±1 243b	0.49±0.14a
HY	10 898±305a	29.1±0.8c	258.8±99.6a	8 629±3 320a	0.80±0.32a
HE	10 461±285a	34.9±0.9b	198.7±112.1ab	6 622±3 735ab	0.64±0.12a
IE	8 605±265bc	38.2±1.2a	128.9±27.2b	4 295±908b	0.50±0.12a

注: 1) 同一列数据后标识不同字母表示差异显著 ($p<0.05$); 2) $GWP_{CH_4}=25 \times GWP_{CO_2}$ Note: 1) Means followed by different letters within the same column are significantly

different ($p<0.05$). 2) $GWP_{CH_4}=25 \times GWP_{CO_2}$

3 讨论和结论

本研究中水稻生长期 CH_4 排放通量季节变化呈单峰模式，主要受到前期淹水、中期烤田、后期间歇性湿润灌溉的水管理模式的影 响，这与前人研究结果一致^[18-20]。 CH_4 排放是其产生、氧化和传输共同作用的结果^[21-22]。长期处于淹水状态的稻田为产甲烷菌提供了适宜的生存环境^[23]。我国稻田的常规灌溉方式一般采用淹水和烤田相结合，烤田往往导致 CH_4 排放显著下降^[24-25]，虽然中期烤田后重新复水， CH_4 排放通量直至水稻收获一直保持在较低水平。同时，本研究也证实了温度在一定程度上影响甲烷排放的季节变化^[26-28]。

本研究表明施用有机肥的 HY 和 HE 处理 CH_4 排放显著增加，尤其是移栽返青期显著高于其他 4 个未施有机肥的处理。这与前人关于有机肥施用极大地促进 CH_4 排放的研究一致^[29-30]。邹建文等^[31]采用不同种类的有机肥进行研究，发现稻田 CH_4 排放总量为：菜饼、麦秆>牛厩肥>猪厩肥。

提高水稻产量和氮肥利用率是现阶段水稻生产的重要目标。农业温室气体减排措施必须同时能够获得较高的稻谷产量。本研究采用单位稻谷产量的 CH_4 排放量这一指标来评价不同栽培模式对温室效应的影响。不同栽培模式下各处理单位产量的 GWP 差异不显著，表明我国水稻生产在实现高产的同时并不会增加 CH_4 排放，有望在保障粮食安全的同时实现节能减排。YE 处理单位产量 CH_4 温室效应最低，氮肥利用率提高了 25%，产量增加了 12%，可以同时实现增产、增效和减排，是当前可持续发展的水稻栽培模式，值得推广。

参考文献

- [1] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 42-216. Ling Q H. Population quality of rice (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000: 42-216
- [2] FAO. FAO statistical databases. FAO of the United Nations, Rome. 2004. www.fao.org

- [3] Zhu Z L, Xiong Z Q, Xing G X, et al. Impacts of population growth and economic development on the nitrogen cycle in Asia. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005, 48: 729-737
- [4] Xiong Z Q, Freney J R, Mosier A R, et al. Impacts of population growth, changing food preferences and agricultural practices on the nitrogen cycle in East Asia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 80: 189-198
- [5] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9): 3 041-3 046
- [6] Xiong Z Q, Xing Y X, Zhu Z L, et al. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen. *Pedosphere*, 2007, 17(2): 146-155
- [7] IPCC. Technical summary//Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. New York: Cambridge University Press, 2007: 31-34
- [8] IPCC. Coupling between changes in the climate system and biogeochemistry//Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the IPCC. New York: Cambridge University Press, 2007: 539-542
- [9] 张广斌, 马静, 徐华, 等. 中国稻田 CH₄ 排放量估算研究综述. *土壤学报*, 2009, 46(5): 907-916. Zhang G B, Ma J, Xu H, et al. Literature review on estimation of methane emission from paddy fields in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 907-916
- [10] Yan X Y, Akiyama H, Yagi K, et al. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006

- Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): 45-50
- [11] 马静, 徐华, 蔡祖聪. 施肥对稻田甲烷排放的影响. *土壤*, 2010, 42(2): 153-163. Ma J, Xu H, Cai Z C. Effect of fertilization on methane emissions from rice field (In Chinese). *Soils*, 2010, 42(2): 153-163
- [12] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立, 等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田 CH₄ 的排放. *生态学报*, 2008, 28(6): 2 878-2 886. Liu J J, Wu P P, Xie X L, et al. Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2 878-2 886
- [13] Wu L Q, Ma K, Qi L, et al. Composition of archaeal community in a paddy field as affected by rice cultivar and N fertilizer. *Microbial Ecology*, 2009, 58(4): 819-826
- [14] Dong H B, Yao Z S, Zheng X H, et al. Effect of ammonium-based, non-sulfate fertilizers on CH₄ emissions from a paddy field with a typical Chinese water management regime. *Atmospheric Environment*, 2010, 45(5): 1 095-1 101
- [15] Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Influence of controlled irrigation on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields and subsequent greenhouse effect. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 235-240
- [16] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 469-475
- [17] Gupta P, Gupta V, Sharma C, et al. Development of methane emission factors for Indian paddy fields and estimation of national methane budget. *Chemosphere*, 2009, 74(4): 590-598

- [18] Smith P, Martino D, Zai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1098): 789-813
- [19] Kai F, Tyler S, Randerson J, et al. Modeling methane emissions from rice agriculture in China during 1961-2007. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 2010, 7: 49-60
- [20] Xie B, Zheng X, Zhou Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer on CH₄ emission from rice fields: Multi-site field observations. *Plant and Soil*, 2010, 326(1): 393-401
- [21] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 722-732. Huang Y. Emissions of greenhouse gases in China and its reduction strategy (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 722-732
- [22] Sharpatyi V. On the mechanism of methane emission by terrestrial plants. *Oxidation Communications*, 2007, 30(1): 48
- [23] Conrad R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs. *Advances in Agronomy*, 2007, 96: 1-63
- [24] Muhr J, Goldberg S, Borken W, et al. Repeated drying and rewetting cycles and their effects on the emission of CO₂, N₂O, NO, and CH₄ in a forest soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(5): 719-728
- [25] 张广斌, 李香兰, 马静, 等. 水分管理对稻田土壤 CH₄ 产生、氧化及排放的影响. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 1 066-1 070. Zhang G B, Li X L, Ma J, et al. Effect of water management on production, oxidation, and emission of CH₄ from rice paddy soil (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3): 1 066-1 070
- [26] 马静, 徐华, 蔡祖聪, 等. 水稻植株对稻田 CH₄ 排放日变化的影响. *土壤*, 2007, 39(6): 859-862. Ma J, Xu H, Cai Z C, et al. Diurnal variation of CH₄ emission from rice field as

affected by rice plant (In Chinese). *Soils*, 2007, 39(6): 859-862

- [27] Yao Z S, Zheng X H, Xie B, et al. Tillage and crop residue management significantly affects N-trace gas emissions during the non-rice season of a subtropical rice-wheat rotation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(10): 2 131-2 140
- [28] 白小琳, 张海林, 陈阜, 等. 耕作措施对双季稻田 CH₄ 与 N₂O 排放的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 282-289. Bai X L, Zhang H L, Chen F, et al. Tillage effects on CH₄ and N₂O emission from double cropping paddy field (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 282-289
- [29] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 143-148. Qin X B, Li Y E, Liu K Y, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 143-148
- [30] 马静, 徐华, 蔡祖聪, 等. 施肥对稻田甲烷排放的影响. *土壤*, 2010, 42(2): 153-163. Ma J, Xu H, Cai Z C, et al. Effect of fertilization on methane emissions from rice fields (In Chinese). *Soils*, 2010, 42(2): 153-163
- [31] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的综合影响. *环境科学*, 2003, 24(4): 7-12. Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH₄ and N₂O emission from rice paddy (In Chinese). *Environment Science*, 2003, 24(4): 7-12

Methane emission from rice paddy in Taihu Lake region under different cultivation patterns

Ma Yuchun Sun Liying Kong Xianwang Huang Taiqing Xiong Zhengqin[†]

Abstract Methane fluxes from rice fields in the Taihu Lake Region were studied using static-chamber/gas chromatography. In-situ observation was carried out in paddy fields different in treatment or cultivation pattern, separately, i.e. Treatments NN (no N control), FP (farmer's practice), YE (10% ~ 15% higher in yield and 20% ~ 30% higher in N use efficiency), HY (30% ~ 40% higher in yield), HE (30% ~ 50% higher in N use efficiency), and IE (currently integrated management for the same as FP in yield and 20% ~ 30% higher in NUE). It was found that distinctive seasonal variation existed of methane emission from rice fields. Methane fluxes increased after transplanting peaking at the vegetative growth stage early or late depending on treatments and then declined rapidly after mid-season drainage. The cumulative methane emission observed during the period from transplanting to the heading stage accounted for 93% ~ 98% of the seasonal total. Methane fluxes differed among different treatments. Treatment HY with organic manure emitted as high as 258.8 kg hm⁻², obviously higher than Treatments NN, FP, YE, and IE without organic manure. However, CH₄ emission per unit grain yield did not differ much among treatments, averaging CO₂ 0.60 kg kg⁻¹, which indicates that cultivation patterns with higher rice production would not substantially enhance CH₄ emission. Treatment YE was the lowest in CH₄ emission per unit grain yield, being CO₂ 0.49 kg kg⁻¹, thus deserving wide extension due to increased grain yield, improved N use efficiency and decreased global warming potential simultaneously.

Key words Cultivation pattern; CH₄ flux; N use efficiency; Grain yield; Global warming potential