

# 稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合排放对控制灌溉的响应

彭世彰<sup>1</sup>, 侯会静<sup>1,2\*</sup>, 徐俊增<sup>1,2</sup>, 杨士红<sup>1,2</sup>, 茆智<sup>3</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098;  
3. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

**摘要:** 为了揭示水稻控制灌溉对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合排放的影响, 该文采用静态暗箱-气相色谱法对控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放进行原位观测, 分析稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合排放对控制灌溉水分调控的动态响应。结果表明, 控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量多低于常规灌溉稻田, 且主要集中在水稻分蘖前期, 峰值出现在土壤脱水后第 1~2 d, 排放总量较常规灌溉稻田减少 81.2%~82.8%; N<sub>2</sub>O 排放通量多高于常规灌溉稻田, 峰值出现在肥后且土壤脱水后 3~4 d, 排放总量较常规灌溉稻田增加了 121.8%~144.3%。控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的综合全球增温潜势较常规灌溉稻田显著减少 ( $p<0.05$ ), 减少幅度为 15.0%~34.8%。控制灌溉显著降低了稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的综合温室效应。

**关键词:** 灌溉, 节水, 温室效应, 排放, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, 稻田

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.13.020

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-13-0121-06

彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合排放对控制灌溉的响应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 121-126.  
Peng Shizhang, Hou Huijing, Xu Junzeng, et al. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions response to controlled irrigation of paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 121-126. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

温室气体引起的全球变暖和臭氧层破坏是当今两大备受关注的全球问题。CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 是仅次于 CO<sub>2</sub> 的最主要的温室气体<sup>[1]</sup>。政府间气候变化专门委员会 IPCC (intergovernmental panel on climate change) (2007) 报告指出, 2005 年大气中 CH<sub>4</sub> 的体积分数达到 1 774 nL/L, 是工业化前的 2 倍多, N<sub>2</sub>O 体积分数增加到 319 nL/L, 比工业化前增加了 18%<sup>[1]</sup>。农田生态系统在全球温室气体排放和气候变暖的研究中占有十分重要的地位<sup>[2]</sup>。1990-2005 年, 农业 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放量增加了 17%<sup>[3]</sup>。稻田是 CH<sub>4</sub> 的主要排放源之一<sup>[4]</sup>, 而随着水稻种植面积不断增加, 稻田 CH<sub>4</sub> 排放量将进一步增大<sup>[5]</sup>。旱地和非饱和水稻土是 N<sub>2</sub>O 的主要排放源之一, 由于氮肥投入量的增加, 农业 N<sub>2</sub>O 的排放量到 2030 年预计将增加 35%~60%<sup>[3]</sup>。中国水稻种植面积约占世界水稻种植总面积的 20%, 占中国耕地总面积的 23%左右<sup>[3]</sup>。由于中国稻田水分管理方式的多样性, 使得中国稻田生态系统温室气体排放备受各国科学家的关注<sup>[6]</sup>。

已有研究表明, 水分管理是影响农田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排

放的最重要因素之一<sup>[7-10]</sup>。自 20 世纪 80 年代以来, 中国各种水稻节水灌溉技术得到了大面积的推广应用<sup>[11]</sup>, 常规淹水灌溉已逐步被取代。水稻控制灌溉的特点是从水稻分蘖期开始, 稻田处于无水层或脱水状态, 土壤水分状况的变化引起土壤理化性质与土壤环境的变化, 势必导致稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放发生变化。而已有对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的研究主要集中在淹水稻田, 短期烤田或设定有无水层对比情况下的稻田<sup>[12-13]</sup>, 而对水稻全生育期水分调控下, 尤其是无水层管理的实际灌溉制度下的稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合排放的研究还很少。因此, 本文通过蒸渗仪试验研究水稻控制灌溉对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 季节综合排放的影响, 评估其综合温室效应, 旨在更加全面地评价控制灌溉的稻田生态效应, 同时为准确估算中国稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量提供地区观测数据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验区位于河海大学国家重点实验室昆山试验研究基地内, 为太湖流域水网地区低洼平原, 属于亚热带南部季风气候区, 土壤类型为潴育型黄泥土, 耕层土壤为重壤土, 0~18 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷和全钾的质量分数分别为 21.88 g/kg、1.03 g/kg、1.35 g/kg 和 20.86 g/kg, pH 值为 7.4。

### 1.2 试验设计

在水稻品种、育秧、移栽密度、施肥、打药等技术措施以及基础地力相同的条件下, 设置 2 种灌水处理: 控制灌溉及常规灌溉, 每个处理设置 3 个重复, 共计 6 个小区, 进行了 2009-2011 年 3 a 试验。试验安排在地

收稿日期: 2011-12-28 修订日期: 2012-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50839002, 50809022)

作者简介: 彭世彰 (1959-), 男, 上海人, 教授, 博导, 中国农业工程学会会员 (E041200314S), 主要从事节水灌溉理论与农田生态效应研究。南京 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 210098。  
Email: szpeng@hhu.edu.cn

\*通信作者: 侯会静 (1984-), 女, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与农田生态效应研究。南京 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 210098。Email: houhuijing@163.com

中排水式蒸渗仪中进行, 蒸渗仪小区面积为  $5 \text{ m}^2$  ( $2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ )。小区中央离田埂  $0.5 \text{ m}$  处预埋方形硬塑料底座 ( $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ), 底座嵌入土壤  $5 \text{ cm}$  深, 作为采样点, 用于放置人工采样静态箱, 并在田间埋设时域反射仪探头监测不同深度的土壤水分。

控制灌溉稻田在返青期持有  $5 \sim 25 \text{ mm}$  薄水层, 此后除施肥、打药、除草等生产性要求外不再建立灌溉水层, 以根层土壤含水率作为灌水的调控指标, 确定灌水时间和灌水定额, 而常规灌溉稻田在水稻分蘖后期晒田, 黄熟期自然落干, 全生育期的其他时间均保持  $3 \sim 5 \text{ cm}$  深的浅水层<sup>[14]</sup>。供试水稻品种为南粳 46, 其中, 2009 年 6 月 23 日水稻移栽, 10 月 31 日收割, 本田生育期为 130 d; 2010 年 6 月 26 日水稻移栽, 10 月 28 日收割, 本田生育期为 124 d; 2011 年 6 月 29 日水稻移栽, 10 月 31 日收割, 本田生育期为 124 d。施肥与农民习惯施肥相同, 先后施加基肥、返青肥、分蘖肥和穗肥, 分别采用复合肥 (N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 质量比为 15:15:15) 和碳酸氢铵 (N 质量分数 17%) 作为基肥和返青肥, 尿素 (N 质量分数 46.2%) 作为分蘖肥和穗肥, 2009—2011 年施入的纯氮量分别为 250.00、302.70 和 328.48 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 田间采样

采用静态箱原位采集气样<sup>[14]</sup>, 箱体用  $5 \text{ mm}$  厚的 PVC 材料制成, 包括中断箱和顶箱 2 部分, 高均为  $60 \text{ cm}$ , 底面积均为  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 。中段箱顶部有密封用水槽, 用于水稻生长后期加层。2009—2011 年气体采样开始时间分别为水稻插秧后第 5、第 2 和第 5 天, 每隔  $3 \sim 4 \text{ d}$  采样 1 次, 施肥后加测, 每  $2 \text{ d}$  采样 1 次, 9 月份以后取样间隔为 1 周左右; 取样时间均为上午  $10:00 \sim 11:00$ 。

### 1.4 气体分析及通量计算

CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 浓度采用安捷伦气相色谱分析仪测定 (Agilent 7890A-0468), 通过对每组 4 个采样时刻 (0、10、20、30 min) 采集的气体浓度与对应的采样时刻进行线性回归分析, 可求得该采样点气体浓度随时间的变化率, 继而根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度、目标气体分子量等参考文献<sup>[15]</sup>方法计算 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量; 对水稻全生育期的稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 季节排放通量进行积分, 即可求得稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放总量<sup>[16-17]</sup>。

### 1.5 全球增温潜力的计算

GWP (global warming potential) 用来表示单位质量的温室气体在某个时间尺度上的累积辐射强迫。计算中, 通常将 CO<sub>2</sub> 作为参考气体 (CO<sub>2</sub> 的 GWP 为 1), CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量通过各自的 GWP 转化为“CO<sub>2</sub> 当量”。对于 100 a 时间尺度的气候变化, CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 气体的 GWP 分别为 25 和 298<sup>[1]</sup>, 其综合温室效应 (GWPs, kg/hm<sup>2</sup>, 以 CO<sub>2</sub> 计) 的计算公式如下:

$$\text{GWPs} = \text{CH}_4 \text{排放量} \times 25 + \text{N}_2\text{O排放量} \times 298 \quad (1)$$

### 1.6 数据分析

采用 Excel 2003 和 DPS 数据处理软件<sup>[18]</sup>对试验数据进行统计分析, 显著性分析采用最小显著性差异 (least significant difference, LSD) 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合排放规律

控制灌溉对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 季节排放通量的影响非常明显, 两者呈现明显的消长关系 (图 1)。控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量在水稻全生育期绝大多数时间内低于常规灌溉稻田, 差异极其显著 ( $p < 0.01$ ), 且主要集中在水稻分蘖前期  $8 \sim 21 \text{ d}$  (移栽后天数), 其他时期的 CH<sub>4</sub> 排放均维持在较低水平; 在水稻分蘖前期出现 1 个较大的峰值, 但峰值显著小于常规灌溉稻田 ( $p < 0.001$ )。与 CH<sub>4</sub> 排放通量的变化规律相反, 控制灌溉稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量在水稻全生育期大部分时间内都要高于常规灌溉稻田, 在水稻分蘖前期、分蘖中期及拔节孕穗前期出现 3 个峰值, 且主峰值显著高于常规灌溉稻田 ( $p < 0.01$ )。

以 2010 年为例, 控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 稻季平均排放通量为  $0.56 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 较常规灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 平均排放通量 ( $2.99 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 减少了 81.3%; 而控制灌溉稻田 N<sub>2</sub>O 稻季平均排放通量为  $248.06 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 是常规灌溉稻田 N<sub>2</sub>O 平均排放通量 ( $93.87 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 的 2.64 倍。控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量的主峰值 ( $5.29 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 出现在水稻分蘖前期 18 d, 较常规灌溉稻田主峰值减小 69.8%, 次峰值 ( $2.31 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 出现在水稻返青期 8 d, 较常规灌溉稻田次峰值减小 77.1%; 控制灌溉稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量的主峰值 ( $2514.17 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 出现在水稻分蘖中期 29 d, 是常规灌溉稻田主峰值的 1.5 倍; 次峰 ( $1217.03 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 出现在水稻拔节孕穗期 55 d, 是常规灌溉稻田次峰值的 3.8 倍; 在分蘖前期 21 d 也有一个较大的峰值 ( $1081.41 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) (图 1)。

进一步分析水稻不同生育阶段稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的阶段排放通量可以发现 (表 1), 稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的阶段排放通量的变化规律与其季节排放通量的变化规律一致。控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 的阶段排放通量显著低于常规灌溉稻田 ( $p < 0.05$ ), 最大阶段排放通量 ( $2.40 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 出现在水稻分蘖前期, 较常规灌溉稻田的最大值减少了 75.1%, 自分蘖后期开始数值极低, 最大值仅为  $0.30 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。控制灌溉稻田的 N<sub>2</sub>O 阶段排放通量多显著高于常规灌溉稻田, 在水稻分蘖中期最大, 为  $731.67 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 是常规灌溉稻田最大值的 1.82 倍, 其次是分蘖前期和拔节孕穗前期, 自乳熟期开始维持在较低的排放水平; 而常规灌溉稻田在水稻分蘖后期晒田期间的 N<sub>2</sub>O 阶段排放通量是控制灌溉稻田同期 N<sub>2</sub>O 阶段排放通量的 10.86 倍, 水分落干的黄熟期 N<sub>2</sub>O 阶段排放通量是控灌稻田的 2.84 倍。

此外, 2009 年常规灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量与 2010 和 2011 年有较大的差异, CH<sub>4</sub> 排放通量普遍高于后 2 a, 而 N<sub>2</sub>O 排放通量普遍低于后 2 a。导致 N<sub>2</sub>O 排放通量差异的主要原因是, 2009 年晒田期间的阴雨天气使得稻田土壤水分状况没有达到 N<sub>2</sub>O 剧烈排放所需的条件, 导致晒田期间 N<sub>2</sub>O 排放通量较小, 而 2010 和 2011 年的晒田导致 N<sub>2</sub>O 剧烈排放且出现主峰值。导致 CH<sub>4</sub> 排放通量差异的主要原因有 2 点: 第一, 2009 年晒田期间相对较高的土壤含

水率使得 CH<sub>4</sub> 排放没能迅速地被抑制，从而导致晒田期间及晒田结束复水后一段时间内的 CH<sub>4</sub> 排放通量明显高于后 2 a；第二，2009 年水稻生长初期（8~35 d）的表层

土温普遍高于后 2 a，导致该阶段 CH<sub>4</sub> 剧烈排放持续的时间长于后 2a。而已有研究也证实淹水稻田的 CH<sub>4</sub> 排放通量与表层土温呈显著正相关关系<sup>[6-7]</sup>。

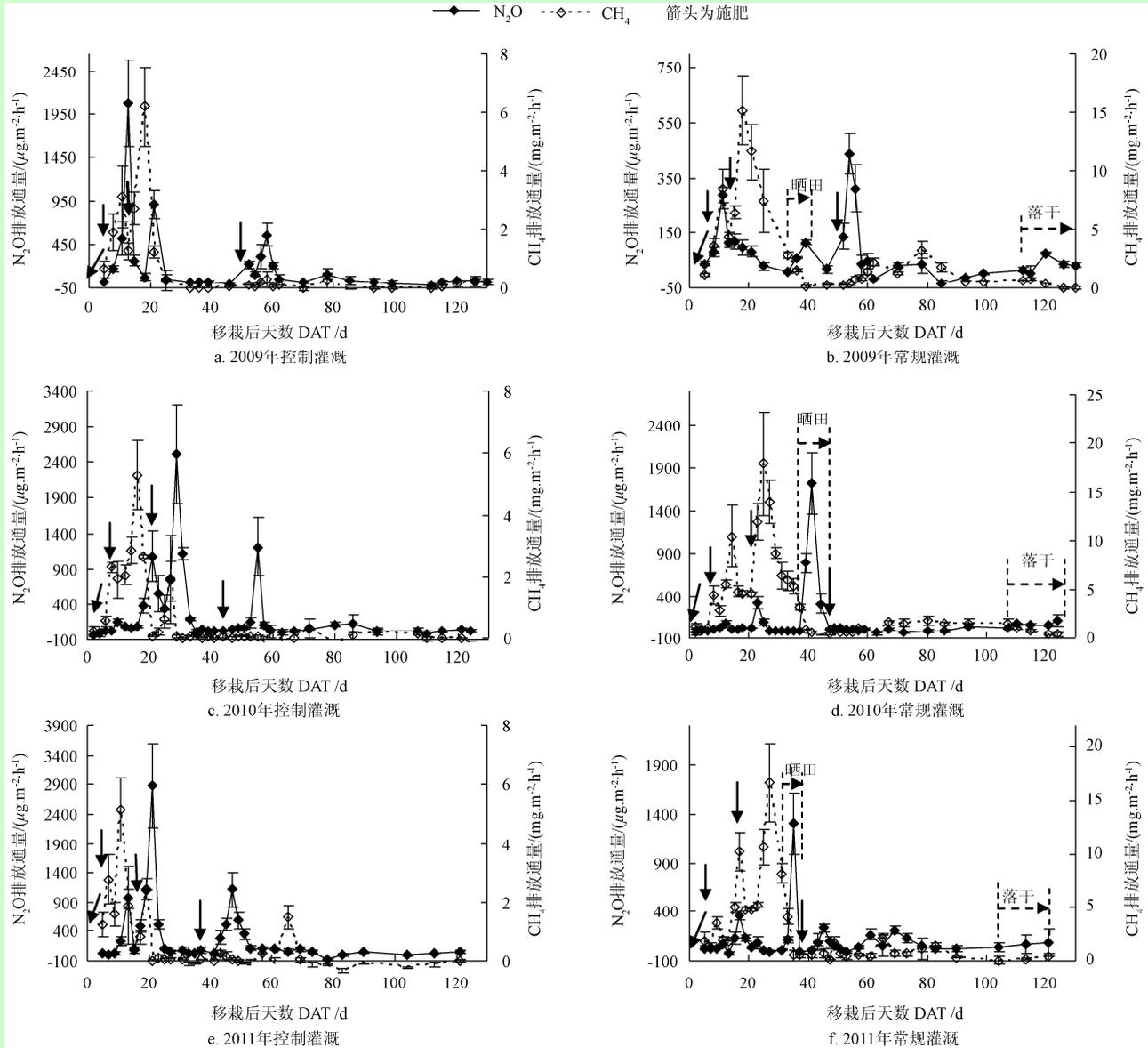


图 1 不同灌溉模式下稻田 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 综合排放规律 (2009 - 2011)

Fig.1 Integrated emission rules of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from paddy fields under different irrigation managements (2009 - 2011)

表 1 水稻不同生育阶段稻田 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 的阶段排放通量

Table 1 CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions flux from paddy fields at different growth stages under different irrigation managements

		返青期	分蘖期			拔节孕穗期		抽开期	乳熟期	黄熟期
			前期	中期	后期	前期	后期			
CH <sub>4</sub> (mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	控制灌溉	1.32 b	2.40 b	0.88 b	0.01 b	0.09 b	-0.01 b	0.30 b	-0.02 b	0.00 b
	常规灌溉	1.94 a	4.83 a	9.65 a	1.31 a	0.61 a	0.87 a	1.55 a	0.98 a	0.27 a
N <sub>2</sub> O(μg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	控制灌溉	34.86 a	499.41 a	731.67 a	37.09 b	312.93 a	94.05 a	78.32 a	21.66 a	19.49 b
	常规灌溉	20.33 b	71.39 b	72.93 b	402.85 a	83.29 b	24.27 b	65.91 a	10.80 b	55.36 a

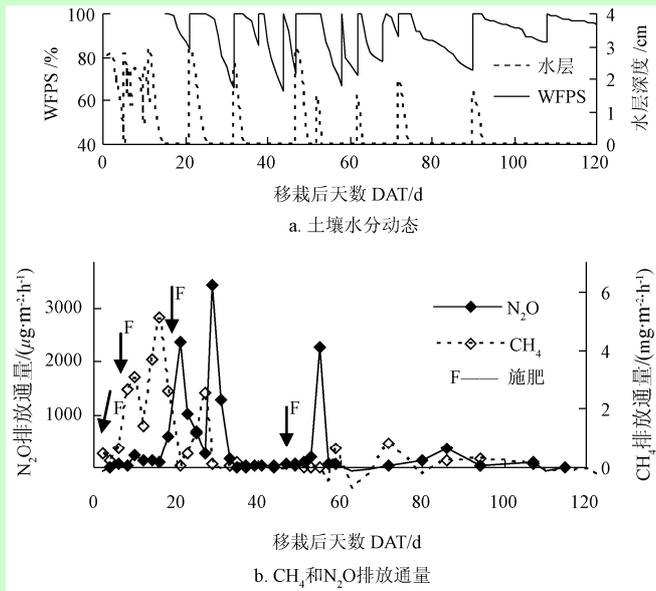
注：表中数据为 2009—2011 年 3a 的平均值；同一列中数值后不同字母表示处理间差异显著 (p<0.05)。下同。

2.2 控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤水分的关系  
控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤水分的关系

系非常密切 (图 2)。控制灌溉稻田土壤脱水后第 1~2 天，CH<sub>4</sub> 排放通量出现峰值，而 N<sub>2</sub>O 排放通量无明显增

大；随着土壤脱水程度的加剧，CH<sub>4</sub> 排放通量迅速减小，而 N<sub>2</sub>O 排放通量迅速增大并在土壤脱水后 3~4 d 出现峰值；当土壤继续脱水，N<sub>2</sub>O 排放通量迅速减小，CH<sub>4</sub> 排放通量继续减小甚至可能出现负值(即吸收大气中的 CH<sub>4</sub>)。控制灌溉稻田土壤复水后 N<sub>2</sub>O 排放通量迅速减小，CH<sub>4</sub> 排放通量有所增大，但幅度较小。

以 2010 年为例，随着控制灌溉稻田土壤首次脱水的开始，土壤充水孔隙率 (water filled pore space, WFPS) 从 15 d 的 100% 下降到 16 d 的 99.8%，CH<sub>4</sub> 排放通量从 14 d 的 3.70 mg/(m<sup>2</sup>·h) 增大到 16 d (土壤首次脱水后第 1 天) 的 5.12 mg/(m<sup>2</sup>·h)，且这一数值是 CH<sub>4</sub> 排放通量的主峰值，N<sub>2</sub>O 排放通量无明显变化；随着土壤脱水程度加剧，WFPS 下降到 21 d 的 84.0%，CH<sub>4</sub> 排放通量从主峰值迅速减小到 21 d 的 0.06 mg/(m<sup>2</sup>·h)，减小了 98.8%，而对应的 N<sub>2</sub>O 排放通量从 16 d 的 103.71 μg/(m<sup>2</sup>·h) 迅速增大到 2 377.37 μg/(m<sup>2</sup>·h)，增大了 2.93 倍；21 d 控制灌溉稻田土壤复水，CH<sub>4</sub> 排放通量明显增大，复水后第 4 天 (25 d)，CH<sub>4</sub> 排放通量迅速增大到 1.19 mg/(m<sup>2</sup>·h)，增大了 18.83 倍，但无法恢复到脱水之前的排放水平，N<sub>2</sub>O 排放通量迅速减小到 25 d 的 697.88 μg/(m<sup>2</sup>·h)，减小 70.6% (图 2)。



注：WFPS 为土壤充水孔隙率。

图 2 控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合排放通量与土壤水分调控的关系 (2010)

Fig.2 Relationship between soil moisture and integrated emission flux of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from paddy fields under controlled irrigation (2010)

2.3 控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量

水稻控制灌溉较常规灌溉显著减少了稻田 CH<sub>4</sub> 排放量 ( $p < 0.001$ )，2009—2011 年控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 排放总量较常规灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 排放总量分别减少 81.2%、82.4% 和 82.8%，平均减少了 82.1% (表 2)。控制灌溉稻田 N<sub>2</sub>O 排放总量显著高于常规灌溉稻田 ( $p < 0.05$ )，2009-2011 年控制灌溉稻田 N<sub>2</sub>O 排放总量分别比常规灌溉稻田增加了 144.3%，129.4% 和 121.8%，平均增加了 130.2% (表 2)。

表 2 不同灌溉模式下稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量

Table 2 Emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from paddy fields under different irrigation managements

年份	CH <sub>4</sub> 排放量/(mg·m <sup>-2</sup> )		N <sub>2</sub> O 排放量/(mg·m <sup>-2</sup> )	
	控制灌溉	常规灌溉	控制灌溉	常规灌溉
2009	1 351.94 b	7 205.95 a	382.64 a	156.61 b
2010	1 167.95 b	6 623.35 a	532.44 a	232.11 b
2011	1 002.21 b	5 832.10 a	538.19 a	242.65 b

2.4 控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合温室效应

水稻控制灌溉显著减少稻田 CH<sub>4</sub> 排放的同时显著增加了 N<sub>2</sub>O 排放，这就需要用 GWP 来评价控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的综合温室效应。由表 3 可以看出，2009-2011 年控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的综合 GWPs 较常规灌溉稻田显著减少 ( $p < 0.05$ )，减少幅度分别为 34.8%，20.0% 和 15.0%，平均减少 23.3%。由此可见，水稻控制灌溉有效地减小了稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的综合温室效应。

表 3 不同灌溉模式下稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的综合温室效应

Table 3 GWPs of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from paddy fields under different irrigation managements (以 CO<sub>2</sub> 计) kg·hm<sup>-2</sup>

处理	2009 年	2010 年	2011 年
控制灌溉	1 478.25 a	1 878.65 a	1 854.35 a
常规灌溉	2 268.20 b	2 347.53 b	2 181.12 b

3 讨论

3.1 控制灌溉对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 季节排放规律的影响

控制灌溉条件下的土壤脱水-复水过程对稻田 CH<sub>4</sub> 季节排放通量的影响非常明显。控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 排放的峰值大多出现在土壤脱水后第 1~2 天，且土壤接近饱和状态时，但是随着土壤持续脱水，CH<sub>4</sub> 排放通量迅速减小，复水后略有增大 (图 2)。可见，控制灌溉稻田水层消失后的微弱脱水状态导致了 CH<sub>4</sub> 短暂的剧烈排放，而土壤持续脱水则导致 CH<sub>4</sub> 排放通量迅速减小。以往的研究较少地捕捉到 CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤水分的关系，仅少数的研究者有类似的发现。例如，Kreye 等<sup>[19]</sup>也发现，稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量在排水期开始时或者在开始后第 2 天达到高峰，之后急剧下降，较低的排放水平维持到水稻收获。导致这种现象的主要原因是田表水层的消失明显改善了 CH<sub>4</sub> 排放的途径，导致淹水期间已经闭蓄在土壤中的 CH<sub>4</sub> 大量释放；但是土壤持续脱水破坏了稻田 CH<sub>4</sub> 产生所需的厌氧环境，显著抑制了稻田 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[4,10]</sup>，这也是控制灌溉显著降低稻田 CH<sub>4</sub> 排放的主要原因。

水和肥是影响稻田 N<sub>2</sub>O 排放的 2 个主要的影响因子。控制灌溉稻田土壤脱水及 N 肥施加加剧了 N<sub>2</sub>O 排放，N<sub>2</sub>O 排放峰值一般出现在施肥后 10 d 左右且土壤脱水到土壤充水孔隙率为 78%~85.1% 时 (图 2)。这与于亚军等<sup>[20]</sup>的研究结果在基肥和追肥后 1 周左右各观测到 1 次 N<sub>2</sub>O 排放峰相似。此外，郑循华等<sup>[21]</sup>研究发现，稻田生态系统 N<sub>2</sub>O 最大排放量一般发生在土壤湿度为 90%~100% 土壤田间持水量 (WHC) 或 84%~86% 的土壤充水孔隙率

之间; Khalil 和 Baggs<sup>[22]</sup>通过室内培养试验发现, 一种棕色粉壤土的最高 N<sub>2</sub>O 排放量出现在 75% 的土壤充水孔隙率; 而 Sey 等<sup>[23]</sup>通过室内培养试验发现砂壤土的最高 N<sub>2</sub>O 排放通量出现在 80% 的土壤充水孔隙率。由此可见, 不同研究者对于土壤 N<sub>2</sub>O 排放最适宜的土壤水分状况的研究结果不尽一致, 但是, 绝大部分研究表明水稻土最高的 N<sub>2</sub>O 排放通量出现在 75%~85% 的土壤充水孔隙率之间, 与本文的研究结果一致。

### 3.2 控制灌溉对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量的影响

已有研究表明, 水稻节水灌溉能够明显减少稻田 CH<sub>4</sub> 的排放量<sup>[4,7,24]</sup>, 但是, 不同的节水灌溉技术对 CH<sub>4</sub> 的减排程度有很大区别。Adhya 等<sup>[25]</sup>研究印度稻田 CH<sub>4</sub> 排放时发现, 与持续淹水稻田相比, 间歇灌溉稻田的 CH<sub>4</sub> 排放量减少了 15%。而 Jain 等<sup>[26]</sup>研究印度北部稻田 CH<sub>4</sub> 排放时发现, 与持续淹水稻田相比, 间歇灌溉稻田的 CH<sub>4</sub> 排放量减少了 22%。Minamikawa 和 Sakai<sup>[27]</sup>通过田间试验发现, 晒田、晒田-间歇灌溉稻田的 CH<sub>4</sub> 排放量分别为淹水稻田 CH<sub>4</sub> 排放量的 64% 和 26%。Jiao 等<sup>[7]</sup>通过田间试验发现间歇灌溉稻田的 CH<sub>4</sub> 排放量比淹水稻田降低了 24.22%。Towprayoon 等<sup>[28]</sup>发现水稻生长期水分落干可以大大降低稻田 CH<sub>4</sub> 排放, 中期排水 1 次和 2 次相对于持续淹水稻田 CH<sub>4</sub> 排放量分别降低了 29% 和 36%。由此可见, 控制灌溉比间歇灌溉等节水灌溉技术能更有效地减少稻田 CH<sub>4</sub> 排放量。

已有研究还发现, 间歇灌溉等水稻节水灌溉技术增加了稻田 N<sub>2</sub>O 排放量<sup>[7]</sup>, 但增加幅度明显低于控制灌溉。例如, Jiao 等<sup>[7]</sup>通过田间试验发现间歇灌溉稻田的 N<sub>2</sub>O 排放量比淹水稻田增加了 23.72%。控制灌溉稻田自水稻分蘖期开始实行田间无水层水分管理, 土壤脱水-复水过程频繁, 土壤干湿交替使得硝化作用和反硝化作用交替进行, 从而促进了 N<sub>2</sub>O 排放。此外, 控制灌溉稻田 N<sub>2</sub>O 排放主要集中在施肥后的土壤脱水阶段, 施肥后首次脱水 1 周内的 N<sub>2</sub>O 排放量占总排放量的 56.1%~69.7%。可见, 控制灌溉稻田的土壤脱水导致稻田 N<sub>2</sub>O 排放总量显著高于常规灌溉稻田。

## 4 结 论

1) 控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 季节排放通量呈现明显的消长关系。在水稻全生育期绝大多数时间内, 控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量低于常规灌溉稻田, 而 N<sub>2</sub>O 排放通量高于常规灌溉稻田。与常规灌溉稻田相比, 控制灌溉稻田的 CH<sub>4</sub> 排放量显著减少 ( $p < 0.001$ ), 减幅为 81.2%~82.8%, 而 N<sub>2</sub>O 排放总量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 增幅为 121.8%~144.3%。

2) 控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 季节排放规律与土壤脱水-复水关系密切。控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量的峰值出现在土壤脱水后第 1~2 天, 随着土壤脱水程度的加剧, CH<sub>4</sub> 排放通量迅速减小, 复水后有所增大, 但幅度较小; 而 N<sub>2</sub>O 排放通量的峰值出现在土壤脱水后第 3~4 天, 当土壤继续脱水, N<sub>2</sub>O 排放通量迅速减小, 复水后继续减小。

3) 控制灌溉有效地降低了稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的综合温室效应。控制灌溉稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 在 100 a 尺度上的综合增温潜势显著降低 ( $p < 0.05$ ), 降幅为 15.0%~34.8%。

### [参 考 文 献]

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Environmental indicators for agriculture vol. 3: Methods and results [M]. Paris: Publications Service, OECD, 2001: 281-283.
- [3] Bruinsma J. World Agricultural Towards 2015/2030: an FAO perspective[M]. Rome: Earthscan press, 2003: 358-360.
- [4] Hadi A, Inubushi K, Yagi K. Effect of water management on greenhouse gas emissions and microbial properties of paddy soils in Japan and Indonesia[J]. Paddy Water Environ, 2010, 8(4): 319-324.
- [5] Cai Zucong, Shan Yuhua, Xu Hua. Effects of nitrogen fertilization on CH<sub>4</sub> emissions from rice fields[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2007, 53(4): 353-361.
- [6] 邹建文. 稻麦轮作生态系统温室气体 (CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O) 排放研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.  
Zou Jianwen. A Study on Greenhouse Gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) Emissions From Rice-Winter Wheat Rotations in Southeast China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [7] Jiao Zhihua, Hou Aixun, Shi Yi, 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(13/14): 1889-1903.
- [8] Liu Shuwei, Qin Yanmei, Zou Jianwen, et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N<sub>2</sub>O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China [J]. Sci Total Environ, 2010, 408(4): 906-913.
- [9] Xiong Zhengqin, Xing Guangxi, Zhu Zhaoliang. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen[J]. Pedosphere, 2007, 17(2): 146-155.
- [10] Zou Jianwen, Huang Yao, Jiang Jingyan, 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 Biogeochem Cy, 2005, 19(2): 1-9.
- [11] 彭世彰, 徐俊增. 水稻控制灌溉理论与技术[M]. 南京: 河海大学出版社, 2011: 8-13.
- [12] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪, 等. 水稻生长后期水分管理对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 332-336.  
Li Xianglan, Xu Hua, Cai Zucong, et al. Effect of water management of late stage of rice growth on methane and nitrous oxide emissions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 332-336. (in Chinese with English abstract)
- [13] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 69-76.  
Xu Hua, Cai Zucong, Li Xiaoping. Effect of soil drying on flux from rice paddy soil[J]. Acta pedologica sinica, 2000, 37(1): 69-76. (in Chinese with English abstract)
- [14] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 节水灌溉对稻田 N<sub>2</sub>O 季节排放特征的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 14-18.  
Peng Shizhang, Hou Huijing, Xu Junzeng, et al. Effects of

- water-saving irrigation on seasonal characteristics of N<sub>2</sub>O emission from paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(8): 14–18. (in Chinese with English abstract)
- [15] Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yaosi, et al. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: a case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China[J]. Chemosphere- Global Change Science, 2000, 2(2): 207–224.
- [16] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 川中丘陵区冬灌田甲烷和氧化亚氮排放研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 539–544.  
Jiang Changsheng, Wang Yuesi, Zheng Xunhua, et al. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from a winter-time flooded paddy field in a hilly area of Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3): 539–544. (in Chinese with English abstract)
- [17] 彭世彰, 李道西, 徐俊增, 等. 节水灌溉模式对稻田 CH<sub>4</sub> 排放规律的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 9–13.  
Peng Shizhang, Li Daoxin, Xu Junzeng, et al. Effect of Water-Saving Irrigation on the Law of CH<sub>4</sub> Emission from Paddy Field. Environ Sci, 2007, 28(1): 9–13. (in Chinese with English abstract)
- [18] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及模型优化[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] Kreye C, Dittert K, Zheng X H, et al. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in North China [J]. Nutr Cycl Agroecosys, 2007, 77: 293–304.
- [20] 于亚军, 朱波, 王小国, 等. 成都平原水稻-油菜轮作系统氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1277–1282.  
Yu Yajun, Zhu Bo, Wang Xiaoguo, et al. N<sub>2</sub>O emission from rice-rapeseed rotation system in chengdu plain of sichun basi[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1277–1282. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N<sub>2</sub>O 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 273–279.  
Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. Impact of soil humidity on N<sub>2</sub>O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(3): 273–279. (in Chinese with English abstract)
- [22] Khalil M I, Baggs E M. CH<sub>4</sub> oxidation and N<sub>2</sub>O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH<sub>4</sub> concentrations[J]. Soil Biol Biochem, 2005, 37(10): 1785–1794.
- [23] Sey B, Manceur A, Whalen J, et al. Small-scale heterogeneity in carbon dioxide, nitrous oxide and methane production from aggregates of a cultivated sandy-loam soil [J]. Soil Biol Biochem, 2008, 40(9): 2468–2473.
- [24] Peng Shizhang, Hou Huijing, Xu Junzeng, et al. Nitrous oxide emissions from paddy fields under different water managements in southeast China[J]. Paddy Water Environ, 2011, 9: 1–9.
- [25] Adhya T K, Bharati K, Mohanty S R, et al. Methane emission from rice fields at Cuttack, India[J]. Nutr Cycl Agroecosys, 2000, 58(1/3): 95–105.
- [26] Jain M C, Kumar S, Wassmann R, et al. Methane emissions from irrigated rice fields in northern India (New Delhi)[J]. Nutr Cycl Agroecosys, 2000, 58(1/3): 75–83.
- [27] Minamikawa K, Sakai N. The effect of water management based on soil redox potential on methane emission from two kinds of paddy soils in Japan[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 107(4): 397–407.
- [28] 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.

## CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions response to controlled irrigation of paddy fields

Peng Shizhang<sup>1</sup>, Hou Huijing<sup>1,2\*</sup>, Xu Junzeng<sup>1,2</sup>, Yang Shihong<sup>1,2</sup>, Mao Zhi<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to study the effects of controlled irrigation on variations of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy fields, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy fields under controlled irrigation were investigated by the method of static chamber/gas chromatography. The results showed that CH<sub>4</sub> emissions from controlled irrigation paddy fields were lower than those from traditional irrigation paddy fields during most of the rice growing season. The high CH<sub>4</sub> emissions from controlled irrigation paddy fields were mainly observed during the former tillering period of rice, and the peaks were observed 1-2 days after soil dehydration. Compared with the traditional irrigation paddy fields, cumulative emission of CH<sub>4</sub> from controlled irrigation paddy fields reduced by 81.2%-82.8%. The N<sub>2</sub>O emissions from controlled irrigation paddy fields were mostly higher than those from traditional irrigation paddy fields, and the peaks were observed 3-4 days after soil dehydration. Compared with the traditional irrigation paddy fields, cumulative emission of N<sub>2</sub>O from controlled irrigation fields increased by 121.8%-144.3%. However, the integrative global warming potential of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O on a 100-year horizon was significantly decreased by 15.0%-34.8% in the controlled irrigation paddy fields ( $p < 0.05$ ). These results suggest that controlled irrigation can significantly mitigate the integrative greenhouse effect caused by CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from paddy fields.

**Key words:** irrigation, water conservation, greenhouse effect, emission, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, paddy fields