

董海波, 郑循华, 黄耀, 等. 2009. 大气 CO₂ 浓度升高和秸秆还田对稻麦轮作农田 N₂O 排放的影响 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 1-8.
Dong Haibo, Zheng Xunhua, Huang Yao, et al. 2009. Effects of elevated atmospheric CO₂ on N₂O emission from rice-wheat rotation fields with different wheat straw incorporation rates [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 1-8.

大气 CO₂ 浓度升高和秸秆还田对稻麦 轮作农田 N₂O 排放的影响

董海波^{1, 2} 郑循华² 黄耀^{1, 2} 姚志生² 梅宝玲² 朱建国³

1 南京农业大学资源与环境保护学院, 南京 210095

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008

摘要 随着大气 CO₂ 浓度的逐渐升高, CO₂ 的施肥效应很可能对陆地生态系统的 N₂O 地气交换过程产生一定的影响。在江苏北部的中国稻麦轮作 FACE (Free-Air Carbon Dioxide Enrichment) 实验平台上, 采用静态箱暗箱一色谱法, 研究了一个稻麦轮作周期 (2005 年 6 月中旬至 2006 年 6 月中旬) 3 种小麦秸秆还田水平处理 (全还田、半还田和不还田) 和 CO₂ 浓度升高 200 μmol · mol⁻¹ 对稻麦轮作农田 N₂O 排放的影响。结果表明, 就当地传统农田管理方式下的砂性土壤稻麦轮作农田 N₂O 排放而言, 所采用的观测方法未能检测到显著的秸秆还田效应和大气 CO₂ 浓度升高效应。

关键词 N₂O 排放 秸秆还田 大气 CO₂ 浓度升高 稻麦轮作

文章编号 1006-9585 (2009) 01-0001-08 **中图分类号** X 171.1 **文献标识码** A

Effects of Elevated Atmospheric CO₂ on N₂O Emission from Rice-Wheat Rotation Fields with Different Wheat Straw Incorporation Rates

DONG Haibo^{1, 2}, ZHENG Xunhua², HUANG Yao^{1, 2}, YAO Zhisheng²,
MEI Baoling², and ZHU Jianguo³

1 College of Resource and Environment Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

Abstract The concentration of CO₂ is raising, and its fertilization effect may have effect on the N₂O land exchange process of land ecology system. On the FACE (Free-Air Carbon Dioxide Enrichment) experimental platform of northern Jiangsu Province, China, using the static opaque chamber/gas chromatograph techniques, the authors investigated the effects of elevated atmospheric CO₂ by 200 μmol · mol⁻¹ over the ambient concentration on N₂O emission from rice-wheat rotation fields incorporated with wheat straw at high (AR), moderate (HR) and zero (NR) rates during a rotation cycle (from mid June 2005 to mid June 2006). The results showed that, by using the present method and procedures, significant effects from either elevated CO₂ or increased wheat straw incorporation upon the

收稿日期 2007-05-28 收到, 2008-10-20 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新重要方向项目 KZCX3-SW-440 和国家自然科学基金资助项目 40331014

作者简介 董海波, 男, 1981 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气环境研究。E-mail: woshidhb@yahoo.com.cn

通讯作者 郑循华, E-mail: xunhua.zheng@post.iap.ac.cn

N₂O emission from the investigated sandy loam soils managed under the locally conventional farming practices were not detected.

Key words N₂O emission, straw treatment, elevated CO₂ concentration, rice-wheat rotation

1 引言

N₂O 是大气中一种重要的痕量气体,在大气中发挥着重要作用:一方面,作为一种效应仅次于 CO₂ 和 CH₄ 的含氮温室气体, N₂O 对大气的辐射强迫作用约占总长存留温室气体的 6% (IPCC, 2007); 另一方面, N₂O 在平流层中能光解为 NO, 进而破坏臭氧层 (IPCC, 2001)。中国的 N₂O 排放主要来自于农业活动, 根据对 1994 年中国三大温室气体 (CO₂、CH₄ 和 N₂O) 总排放量 (以 CO₂ 当量计) 的估算, 农业源排放的 N₂O 约占 3 种温室气体总排放的 6.7% (国家发展和改革委员会, 2004)。而在中国农田直接排放的 N₂O 中, 水旱轮作农田约占 33% (Zheng et al., 2004)。因此, 稻麦轮作系统中排放的 N₂O 在我国农田 N₂O 收支估算中占有重要的地位。

由于人类活动的影响, 大气中的 CO₂ 浓度正在逐年增加, 到 2100 年将可能增加到 549~970 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (IPCC, 2002)。大气 CO₂ 浓度升高既能直接导致温室效应增强从而影响全球气候变化, 又能通过 CO₂ 施肥效应影响绿色植物的生长, 进而影响整个生态系统的物质循环过程, 包括生态系统氮循环过程的关键环节——N₂O 地气交换过程 (徐仲均等, 2002b)。

秸秆还田是一种重要的农田有机质管理措施, 对于维护土壤肥力极其重要。还田秸秆可能通过提供矿化氮 (同时具有相反的作用, 即矿化过程中同化无机氮, 减少氮的供应) 和反硝化微生物活动所需的碳源而直接影响 N₂O 的产生与排放。而大气 CO₂ 浓度升高也可能通过改变秸秆产量和组成对农田 N₂O 的产生和排放产生影响。然而, 对于这些问题, 目前还没有明确的科学结论。本文将依托建立在江苏的稻麦轮作农田 FACE (开放式大气 CO₂ 浓度升高) 实验研究平台, 通过田间实验, 研究稻麦轮作农田 N₂O 排放对大气 CO₂ 浓度升高和不同小麦秸秆还田量的响应。

2 材料与方法

2.1 研究地区概况

实验地点位于江苏省江都市小纪镇良种场 (32°35'N, 119°42'E)。当地的典型农作制度为水稻—冬小麦轮作。土壤类型为下位砂姜土, 其基本理化性质: 有机质含量为 18.39 g·kg⁻¹, 全 N 含量为 1.45 g·kg⁻¹, 全 P 含量为 0.63 g·kg⁻¹, 全 K 含量为 14.02 g·kg⁻¹, pH (水) 为 7.9, 粘粒 (粒径 < 0.002 mm) 含量为 13.6%, 砂粒 (粒径为 0.02~2 mm) 含量为 57.8%, 容重为 1.16 g·cm⁻³。实验地点属于亚热带季风气候, 年平均降水量为 918~978 mm, 年平均气温为 15 °C, 年无霜期为 220 d。在当前的农作方式下, 该地区小部分稻麦秸秆直接还田, 大部分被作为燃料或在田间直接燃烧而清除。

2.2 田间处理

田间观测一个完整的水稻—冬小麦轮作周期 (2005 年 6 月 12 日至 2006 年 6 月 5 日)。本文中水稻季是从水稻种植到收获的整个时期, 小麦季包括小麦生长季以及水稻播种前和收割后的休田期。供试的水稻品种为武香粳 14 (*Oryza sativa* L., cv. japonica 99-15), 冬小麦品种为扬麦 4 号 (*Triticum aestivum* Lyang mai-4)。实验设置为两级处理。第一级实验处理为两种大气 CO₂ 浓度水平: 当前大气 CO₂ 浓度 (对照值) 和升高当前大气 CO₂ 浓度 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (以下简称 FACE)。每个浓度处理设置 3 个重复, 随机分布于大约 6 hm² 的均匀农田范围内。每个 FACE 或对照水平均设置为一个大约 140 m² 的小区。FACE 和对照小区的设施结构和技术控制, 可参见刘钢等 (2002) 和韩勇等 (2002)。第二级实验处理为在每个 FACE 和对照小区内设置 3 种小麦秸秆还田水平: 1 954 kg·hm⁻² (相当于所有收获的小麦秸秆都还田, 以下简称 AR, 以纯 C 计, 下同); 977 kg·hm⁻² (相当于收获小麦秸秆的一半还田, 以下简称 HR); 以及小麦秸秆不还田

(NR)。不同秸秆还田水平的处理布置在 1 m² 的微型小区内。还田秸秆均为同源上季小麦秸秆，在水稻插秧前一次性施入土壤。所有 CO₂ 和秸秆处理的氮肥用量均为水稻季 250 kg · hm⁻² (以纯 N 计，下同)，小麦季 225 kg · hm⁻² (秸秆 N 均计在内)。具体施肥量和时间见表 1。水稻于 2005 年 6 月 14 日插秧，同年 10 月 22 日收割；小麦于 2005 年 11 月 6 日播种，2006 年 6 月 5 日收割。耕作与田间水分管理均按当地常规方式实施，水稻季 2005 年 6 月 8 日翻地，10 日开始淹灌，8 月 10~17 日中期烤田，9 月 23 日停止灌水；小麦季不灌溉，播种前于 2005 年 10 月 29 日翻地。

2.3 N₂O 排放测定方法

本研究采用静态箱—气相色谱法 (Wang et al., 2003) 观测 N₂O 通量。每个田间重复的微型小区内设置一个 N₂O 排放通量的长期观测位点，每周在该观测位用静态暗箱采样两次 (间隔 2~3 d)，每次采样均在北京时间 8~11 时进行。N₂O 样品采集后迅速送回实验室，用改进后的带电子捕获检测器的 Agilent 4890D 气相色谱 (Wang et al., 2003) 在 8 h 内进行分析。2005 年 9 月 6 日之前观测采用的气相色谱方法完全与 Wang et al. (2003) 相同，但之后所采用的气相色谱方法设置却略有不同，区别是后者在 N₂O 分析气路中安装了碱石棉过滤装置 (Jirko et al., 2007)，以去除样品中的杂质对 N₂O 信号的影响。在数据分析之前，首先根据气相色谱气路中两种分析方法 (加与不加碱石棉过滤装置) 的对比分析结果，对前一种方法测定的 N₂O 交换通量数据进行校正，这样保证了前后数据的一致性和可比性。以每日一次观测值直接代表当天的平均排放通量 (忽略日变化的影响)，缺测日期的排放通量用相邻两个日期的平均值给出，然后用逐日累加结果作为季节

表 1 氮肥施用时间和用量

Table 1 Schedule and rate for nitrogen fertilizer addition

生长季	日期	施肥方式	施肥量/kg · hm ⁻² (N)
水稻	2005-06-13	基肥	90.0
	2005-06-19	分蘖肥	60.0
	2005-08-01	拔节肥	100.0
小麦	2005-11-04	基肥	112.5
	2006-03-04	分蘖肥	22.5
	2006-04-06	穗肥	90.0

或年的 N₂O 排放总量。更详细的 N₂O 排放通量测定方法描述参见 Zheng et al. (2006) 和徐仲均等 (2002a)。

采用方差分析检验不同处理间的 N₂O 排放总量以及平均排放通量的差异显著性。

3 结果

3.1 水稻季 N₂O 排放

在水稻季 (水稻插秧后 0~130 d)，FACE 条件下 AR、HR 和 NR 3 种小麦秸秆还田水平处理的 N₂O 排放通量平均值分别为 0.10、0.08 和 0.12 mg · m⁻² · h⁻¹ (以 N₂O 计，下同)，变化范围分别为 -0.02~0.94、-0.04~1.00 和 -0.03~1.36 mg · m⁻² · h⁻¹，对照条件下相应小麦秸秆还田处理的 N₂O 排放通量平均值分别为 0.18、0.13 和 0.12 mg · m⁻² · h⁻¹，其变化的范围分别为 -0.04~1.50、-0.02~1.28、-0.10~1.35 mg · m⁻² · h⁻¹。

如图 1 所示，水稻季的 N₂O 排放以爆发式发生为主，排放通量峰值主要出现在施用基肥、分蘖肥 (分别为水稻插秧前 1 天和插秧后第 5 天) 后和由于水分管理不善导致的干湿交替阶段 (水稻插秧后第 16~50 天)，以及中期烤田 (插秧后第 59~66 天) 和后期落干 (插秧后第 116~130 天) 阶段。如在中期烤田阶段，FACE 条件下 AR、HR 和 NR 处理的 N₂O 排放通量分别为 0.06 ± 0.06、0.21 ± 0.05 和 1.22 ± 0.53 mg · m⁻² · h⁻¹，对照条件下相应秸秆还田处理的 N₂O 排放通量分别为 0.05 ± 0.07、0.23 ± 0.16 和 0.67 ± 0.35 mg · m⁻² · h⁻¹。但对于各种秸秆还田水平处理在这些阶段的 N₂O 排放，均未检测出 FACE 和对照间的显著性差异。

在整个水稻季，FACE 条件的 N₂O 排放总量随着小麦秸秆还田量减少而呈递增趋势 (表 2)，AR、HR 和 NR 处理分别为 0.88 ± 0.52、1.02 ± 0.80 和 3.73 ± 1.49 kg · hm⁻² (以 N₂O 计，下同)，而对照条件下的变化趋势却相反，AR、HR 和 NR 分别为 3.28 ± 3.12、3.21 ± 1.65 和 2.75 ± 0.94 kg · hm⁻²。从这些数据可见，就平均而言，各秸秆还田水平的季节排放总量在 FACE 和对照间存在较大差异，但这些差异未达到显著水平。

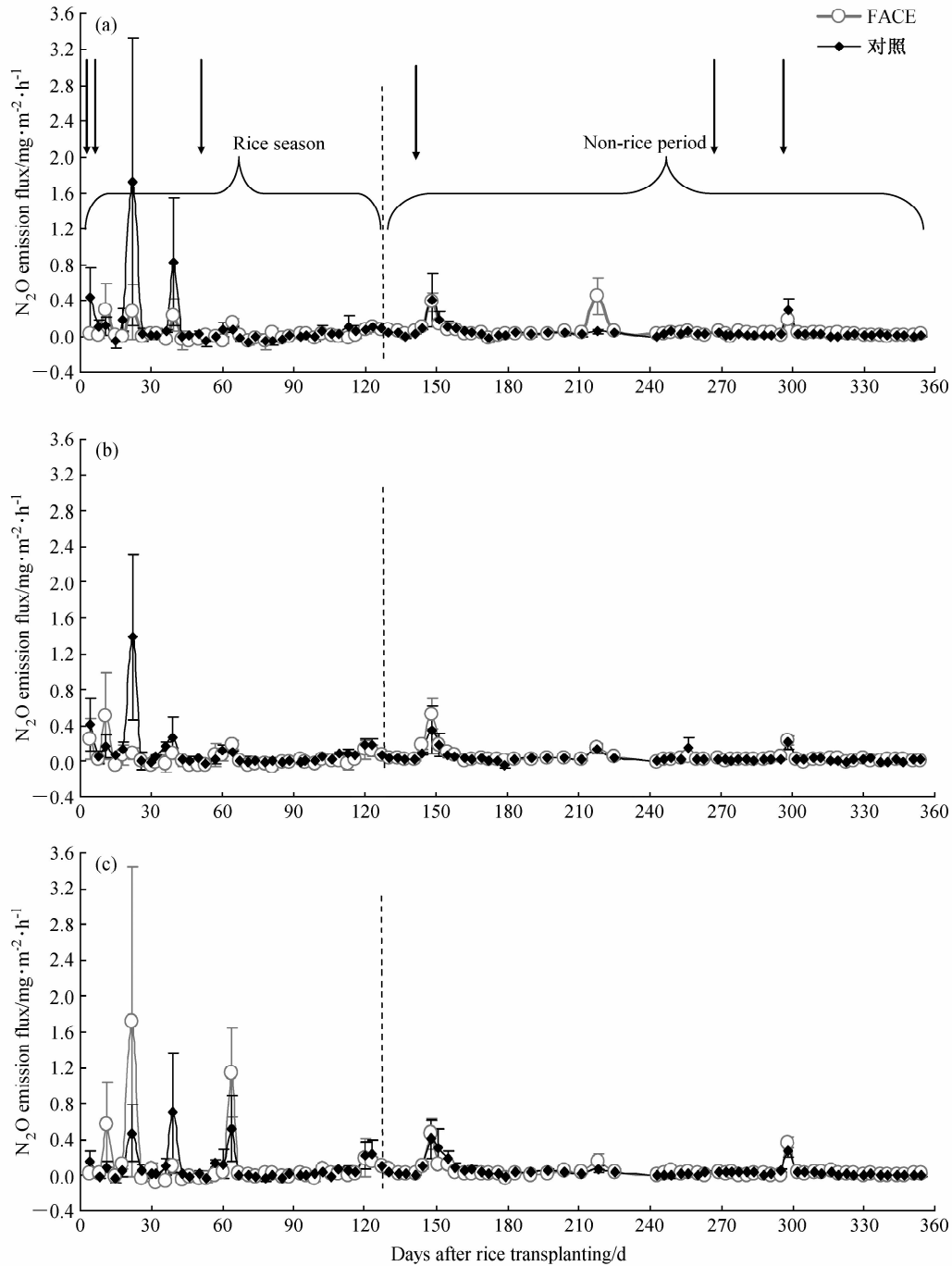


图1 不同小麦秸秆还田水平和不同大气 CO_2 浓度水平条件下的稻麦轮作农田 N_2O 排放：(a) AR；(b) HR；(c) NR。竖线代表标准误差，箭头从左到右依次指示水稻季和小麦季各3次施肥的时间

Fig. 1 Nitrous oxide fluxes from rice-wheat rotation fields with different wheat straw incorporation rates and at different atmospheric CO_2 concentration levels: (a) AR; (b) HR; (c) NR. Vertical bars denote the standard error, and vertical arrows indicate the dates of the three fertilizer applications for either rice or wheat

3.2 小麦季 N_2O 排放

在小麦季，FACE 条件下 AR、HR 和 NR 处理的 N_2O 平均排放通量均为 0.07、0.08 和 0.07

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，变化范围分别为 $-0.08 \sim 1.19$ 、 $-0.03 \sim 1.18$ 和 $-0.02 \sim 1.34 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，对照条件下相应秸秆还田处理的 N_2O 平均排放通

表 2 不同阶段及整个稻麦轮作周期的 N₂O 排放总量Table 2 Total N₂O emissions during the rice-wheat rotation cycle and individual crop seasons

CO ₂ 处理	秸秆处理	水稻季	小麦季	稻麦轮作周期
kg · hm ⁻² (N ₂ O)				
FACE	AR	0.88±0.52	3.51±0.99	4.38±1.33
	HR	1.02±0.80	2.72±0.22	3.73±1.02
	NR	3.73±1.49	2.66±0.27	6.39±1.67
对照	AR	3.28±3.12	2.12±0.64	5.40±3.00
	HR	3.21±1.65	2.78±0.53	5.48±1.86
	NR	2.75±0.94	2.68±0.77	5.43±1.08

量分别为 0.05、0.07 和 0.07 mg · m⁻² · h⁻¹, 变化范围分别为 -0.12~0.52、-0.02~0.88 和 -0.02~0.99 mg · m⁻² · h⁻¹。

在小麦季, N₂O 的峰值排放主要出现在施基肥和穗肥(分别于小麦播种前第 2 天和播种后第 155 天施用)后 2~3 周之内, 以及冻融交替期间(小麦播种后第 68~82 天)。如在施基肥后的 18 d 内, FACE 条件下 AR、HR 和 NR 处理的 N₂O 排放通量各为 0.82±0.16、1.08±0.24 和 0.91±0.30 mg · m⁻² · h⁻¹, 对照条件下相应处理分别为 0.88±0.46、0.79±0.47 和 1.12±0.56 mg · m⁻² · h⁻¹。在冻融交替期间, 以 FACE 条件下 AR 处理的 N₂O 排放通量变化范围较大, 为 0.01~0.70 mg · m⁻² · h⁻¹, 对照条件下的 AR 处理仅为 -0.01~0.10 mg · m⁻² · h⁻¹。但尽管在这些排放比较强的阶段, 对于各种小麦秸秆还田处理的 N₂O 排放, FACE 和对照间的差异均仍未达到统计显著水平。

在整个小麦季, FACE 条件下的 N₂O 排放总量随着秸秆还田量的减少而呈现递减趋势(表 2)。AR、HR 和 NR 处理分别为 3.51±0.99、2.72±0.22 和 2.66±0.27 kg · hm⁻², 这与水稻季的变化趋势相反, 但并未达到统计显著水平。对照条件下 AR、HR 和 NR 处理的 N₂O 排放总量分别为 2.12±0.64、2.78±0.53 和 2.68±0.77 kg · hm⁻²。方差分析结果显示, 对照与 FACE 之间以及不同秸秆还田水平之间的 N₂O 排放总量均未达到显著水平。

3.3 稻麦轮作周期 N₂O 排放

在整个稻麦轮作周期, FACE 条件下 AR、HR 和 NR 处理的 N₂O 排放通量平均值分别为 0.04、0.04 和 0.07 mg · m⁻² · h⁻¹, 通量变化范

围分别为 -0.17~0.90、-0.18~1.49 和 -0.10~5.19 mg · m⁻² · h⁻¹。对照条件下 AR、HR 和 NR 处理的 N₂O 平均排放通量均为 0.07 mg · m⁻² · h⁻¹, 通量变化范围分别为 -0.16~4.94、-0.16~3.18 和 -0.10~2.02 mg · m⁻² · h⁻¹。整个轮作周期内的 N₂O 通量波动很大, 明显排放集中发生在上述几个阶段。这些主要是由施肥和水分管理引起的爆发式排放, 具有数值大(对轮作周期或年排放总量的贡献高达 75%±4%)、时间短(仅发生在占整个稻麦轮作周期 27%的时间里, 且每次爆发式排放仅最多持续 14 d)的特点。

关于整个稻麦轮作周期的 N₂O 排放总量, 对照条件下的 AR、HR 和 NR 处理分别为 5.40±3.00、5.43±1.08 和 5.48±1.86 kg · hm⁻²(表 2), FACE 条件下的相应处理分别为 4.38±1.33、3.73±1.02 和 6.39±1.67 kg · hm⁻²。然而无论 CO₂ 浓度水平之间, 还是秸秆还田水平之间, 稻麦轮作周期 N₂O 的排放总量均未达到统计显著水平。

以上观测结果表明, 就上述土壤条件、稻麦轮作农田管理方式以及所采用的观测研究方法(特别是田间处理空间设置, 观测频率, 水稻季的粗放水分管理)而言, 对于 N₂O 排放, 难以检测到显著的大气 CO₂ 浓度升高效应和秸秆还田效应。

4 讨论

水稻季或小麦季施肥后, 农田会有高峰值的 N₂O 排放(图 1), 这与李香兰等(2006)的研究报道一致。一直以来无机氮肥就被认为是大气中 N₂O 的重要来源, 在农田 N₂O 排放中占有重要的地位(侯爱新等, 1998)。肥料施用量的增加能够促进生物固氮量的增加, 为土壤微生物活动提供大量的氮源, 从而增强土壤硝化和反硝化的作用, 促进了 N₂O 的排放(Bouwman, 1996; 黄耀, 2003)。

在水稻烤田期(图 1), 由于水分排干, 土壤能够直接与空气接触, O₂ 供给状况良好, 在短时间内同时促进了硝化和反硝化过程, 因此导致了 N₂O 的大规模排放(郑循华等, 1997; 黄树辉等, 2004)。也有研究认为水稻季稻田积水较多, 水层存在的情况下阻挡了 N₂O 的排放, 在土壤干湿交

替的情况下出现了排放高峰(颜晓元等, 2000)。小麦季冻融交替期间(图 1), 对照与 FACE 条件下都出现了较高的 N_2O 排放通量峰。其原因可能为: 这一阶段气温逐渐降低, 最低温度接近 0°C , 而后又逐渐上升, 这种冷热交替现象会导致 $\text{N}_2\text{O}/(\text{N}_2 + \text{N}_2\text{O})$ 比的急剧变化, 从而引发 N_2O 的大量排放(Dörsch et al., 2004)。

秸秆还田后, 由于加入的小麦秸秆 C/N 比较高, 而 $\text{N}_2\text{O} - \text{N}/\text{NO}_3 - \text{N}$ 比与 C/N 比呈负相关关系(Huang et al., 2004)。高 C/N 比抑制了秸秆分解, 降低了反硝化反应速率, 从而减少了反硝化过程中的 N_2O 排放(潘志勇等, 2004; 王改玲等, 2006)。也有研究指出, 水稻季还田的小麦秸秆能够减少小麦季的 N_2O 排放量(邹建文等, 2003)。然而, 在本实验中, 并未观测到显著的秸秆还田效应, 其原因很可能是各重复间的空间差异性太大, 从而掩盖了不同 CO_2 浓度水平下秸秆还田处理对农田 N_2O 排放的影响。以水稻季为例, 对照条件下 AR、HR 和 NR 处理的重复间变异系数分别为 91%、136% 和 63%, FACE 条件下相应秸秆还田处理 3 个重复间的变异系数分别为 162%、88% 和 58%, 而此时 FACE 和对照条件下不同秸秆还田处理间的差异仅分别为 86% 和 9%。其他阶段的情形也类似。正是由于处理间的差异小于观测误差(主要表现在空间重复间的差异), 导致了本研究始终没有检测到显著的秸秆还田效应。

大气 CO_2 浓度升高能够促进作物生长, 导致根系分泌物增加, 这有助于微生物获得更多的碳源作为反硝化所需的能量, 从而促进了 N_2O 排放(Ineson et al., 1998)。另外, 在大气 CO_2 浓度升高条件下, 土壤微生物菌群的数量也会增加(韩琳等, 2006), 从而有可能加快土壤反硝化过程, 并促进 N_2O 排放。但本实验中并未观测到大气 CO_2 浓度升高对 N_2O 排放的显著影响。Ambus 等(1999) 和 Ottman 等(2001) 的研究也得到过类似的结果。可能是由于田间水分状况对 N_2O 排放的影响比大气 CO_2 浓度升高更为重要, 从而导致了 FACE 效应被掩盖。当土壤中水分充足(如处于淹水状态)时, 增加大气 CO_2 浓度不会影响 N_2O 的排放(Zheng et al., 2000)。另外, 大气 CO_2 浓度升高是否会影响到生态系统的 N_2O 排放,

取决于该生态系统是受氮限制, 还是受碳限制。如果是受碳限制, 当大气 CO_2 浓度升高促进生态系统碳积累时, 微生物活性将提高, 反硝化作用被增强, 从而促进 N_2O 排放升高, 反之亦然(Hu et al., 2001)。对于本研究的 N_2O 排放, 没有检测到显著大气 CO_2 升高效应的原因, 很可能是由于 FACE 和对照条件下的观测误差(即每个实验处理下各重复间的差异)太大而掩盖了以较小幅度发生的大气 CO_2 浓度升高效应。比如, 就整个稻麦轮作周期而言, FACE 条件下 AR、HR 和 NR 处理各重复间的 N_2O 排放变异系数分别为 44%、50% 和 46%, 对照条件下相应秸秆还田处理各重复间的变异系数分别为 100%、58% 和 33%, 与此同时, 相应秸秆还田水平下 FACE 和对照间的差异分别为 88%、55% 和 37%, 与观测误差相当。特别是在水稻生长季, 由于实验田是砂性土壤, 稻田不易保水, 通常很难使不同空间重复小区间保持相同或接近的水分状况, 因而, 同一处理的 N_2O 排放观测误差(即空间重复间的变异系数)更大, 从而进一步增加了检测大气 CO_2 浓度升高效应或秸秆还田效应的难度。

5 结论

通过对一个完整稻麦轮作周期田间 N_2O 排放状况进行的观测研究发现, 对于当地采用传统农田管理方式的砂性土壤稻麦轮作农田而言, 当前的观测研究方法没有发现 N_2O 排放的大气 CO_2 浓度升高效应和秸秆还田效应。因而, 对于农田 N_2O 排放, 如何从实验方法上提高检测大气 CO_2 浓度升高效应或其他效应的灵敏度, 仍是需要进一步研究和解决的问题。

致谢 感谢中国科学院南京土壤研究所刘刚和中国科学院大气物理研究所刘广仁、王迎红、周再兴、刘春岩等为本研究提供了大力支持和帮助!

参考文献 (References)

- Ambus P, Robertson GP. 1999. Fluxes of CH_4 and N_2O in aspen stands grown under ambient and twice ambient CO_2 [J]. Plant Soil, 209: 1-8.
- Bouwman AF. 1996. Direct emission of nitrous oxide from agricul-

- tural soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46 (1): 53 - 70.
- Dörsch P, Palojärvi A, Mommertz S, et al. 2004. Overwinter greenhouse gas fluxes in two contrasting agricultural habitats [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70 (2): 117 - 133.
- 国家发展和改革委员会. 2004. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报 [R]. 北京: 中国计划出版社, II~III.
- The National Development and the Reform Committee. 2004. The People's Republic of China Initial National Communications on Climate Change [R] (in Chinese). Beijing: China Planning Press, II ~ III.
- 韩琳, 史奕, 李建东, 等. 2006. FACE 环境下不同秸秆与氮肥管理对稻田土壤产甲烷菌的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 25 (2): 322 - 325.
- Han Lin, Shi Yi, Li Jiandong, et al. 2006. Effects of FACE (Free-air Carbon Dioxide Enrichment) under different conditions of rice straw and N fertilization levels on methanogens in paddy-field [J]. *Journal of Agro-Environment Science* (in Chinese), 25 (2): 322 - 325.
- 韩勇, 刘钢, 朱建国, 等. 2002. 稻麦轮作 FACE 系统平台 II. 系统控制和数据分析软件 [J]. *应用生态学报*, 13 (10): 1259 - 1263.
- Han Yong, Liu Gang, Zhu Jianguo, et al. 2002. Rice-wheat rotational FACE platform II. System structure and control [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 13 (10): 1259 - 1263.
- 侯爱新, 陈冠雄. 1998. 不同种类氮肥对土壤释放 N₂O 的影响 [J]. *应用生态学报*, 9 (2): 176 - 180.
- Hou Aixin, Chen Guanxiong. 1998. Effect of different nitrogen fertilizer application on the N₂O emission of soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 9 (2): 176 - 180.
- Hu S, Chapin III F S, Firestone M K, et al. 2001. Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂ [J]. *Nature*, 409: 188 - 191.
- 黄树辉, 吕军, 曾光辉. 2004. 水稻烤田期间 N₂O 排放及其影响因素 [J]. *环境科学学报*, 24 (6): 1084 - 1090.
- Huang Shuhui, Lu Jun, Zeng Guanghui. 2004. Nitrous oxide emissions and impact factors in paddy soil drying [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 24 (6): 1084 - 1090.
- Huang Yao, Zou Jianwen, Zheng Xunhua, et al. 2004. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C : N ratios [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 36: 973 - 981.
- 黄耀. 2003. 地气系统碳氮交换——从实验到模型 [M]. 北京: 气象出版社, 22 - 23.
- Huang Yao. 2003. Carbon and Nitrogen Exchange of Earth-Atmosphere System - From Experiment to Model [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 22 - 23.
- Ineson P, Coward P A, Hartwig U A. 1998. Soil gas fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ beneath *Lolium perenne* under elevated CO₂: The Swiss free air carbon dioxide enrichment experiment [J]. *Plant Soil*, 198 (1): 89 - 95.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report: The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. 2002. Climate Change 2002: Climate Change and Biodiversity [R]. Intergovernmental panel on climate change. Available from the intergovernmental panel on climate change. web site <http://www.ipcc.ch/>.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Intergovernmental panel on climate change. Available from the intergovernmental panel on climate change. web site <http://www.ipcc.ch/>.
- Jirko Holst, Liu Chunyan, Nicolas Brüggemann, et al. 2007. Microbial N turnover and N-oxide (N₂O/NO/NO₂) fluxes in semi-arid grassland of inner mongolia [J]. *Ecosystems*, doi: 10.1007/s10021-007-9043-x.
- 李香兰, 徐华, 曹金留, 等. 2006. 水分管理对水稻生长期 N₂O 排放的影响 [J]. *土壤*, 38 (6): 703 - 707.
- Li Xianglan, Xu Hua, Cao Jinliu, et al. 2006. Effect of water management on N₂O emission in rice-growing season [J]. *Soils* (in Chinese), 38 (6): 703 - 707.
- 刘钢, 韩勇, 朱建国, 等. 2002. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I. 系统结构与控制应用 [J]. *应用生态学报*, 13 (10): 1253 - 1258.
- Liu Gang, Han Yong, Zhu Jianguo, et al. 2002. Rice-wheat rotational FACE platform I. System structure and control [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 13 (10): 1253 - 1258.
- Ottman M J, Kimball B A, Pinter P J, et al. 2001. Elevated CO₂ effects on sorghum growth and yield at high and low soil water content [J]. *New Phytol.*, 150: 261 - 273.
- 潘志勇, 吴文良, 刘光栋, 等. 2004. 不同秸秆还田模式与氮肥施用量对土壤 N₂O 排放的影响 [J]. *土壤肥料*, 5: 6 - 8.
- Pan Zhiyong, Wu Wenliang, Liu Guangdong, et al. 2004. Effect of straw return and nitrogen fertilizer application on the N₂O emission of soil [J]. *Soils and Fertilizers Sciences China* (in Chinese), 5: 6 - 8.
- 王改玲, 郝明德, 陈德立. 2006. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N₂O 排放的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 12 (6): 840 - 844.
- Wang Gailing, Hao Mingde, Chen Deli. 2006. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization on denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (in Chinese), 12 (6): 840 - 844.
- Wang Yuesi, Wang Yinghong. 2003. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20 (5): 842 - 844.
- 徐仲均, 郑循华, 韩圣慧, 等. 2002a. 开放式空气 CO₂ 增高对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 13 (10): 1245 - 1248.
- Xun Zhongjun, Zheng Xunhua, Han Shenghui, et al. 2002a. Effects of elevated atmospheric CO₂ on CH₄ and N₂O e-

- mission from paddy fields [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 13 (10): 1245 - 1248.
- 徐仲均, 郑循华, 王跃思. 2002b. 大气 CO₂ 增加对陆地生态系统微量气体地气交换的影响 [J]. 应用生态学报, 13 (10): 1344 - 1348. Xun Zhongjun, Zheng Xunhua, Wang Yuesi. 2002b. Effects of elevated atmospheric CO₂ on the exchange of trace gases between ecosystems and the atmosphere [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 13 (10): 1344 - 1348.
- 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 等. 2000. 水分状况对水田土壤 N₂O 排放的影响 [J]. 土壤学报, 37 (4): 482 - 489. Yan Xiaoyuan, Shi Shulian, Du Lijuan, et al. 2000. N₂O emission from paddy soil as affected by water regime [J]. Acta Pedologica Sinica (in Chinese), 37 (4): 482 - 489.
- Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. 2000. 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 Sci., 2: 207 - 224.
- Zheng Xunhua, Wang Yuesi, Huang Yao, et al. 2004. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O emission from Chinese croplands [J]. Global Biogeochemical Cycles, 18 (2): GB2018, doi: 10. 1029/2003GB002167.
- Zheng Xunhua, Zhou Zaixing, Wang Yuesi, et al. 2006. Nitrogen-regulated effects of free-air CO₂ enrichment on methane emissions from paddy rice fields [J]. Global Change Biology, 12: 1717 - 1732.
- 郑循华, 王明星. 1997. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响 [J]. 环境科学, 18 (5): 1 - 5. Zheng Xunhua, Wang Mingxing. 1997. Influence of temperature on N₂O emissions from farmland [J]. Chinese Journal of Environment Science (in Chinese), 18 (5): 1 - 5.
- 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 2003. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N₂O 排放的影响 [J]. 中国农业科学, 36 (4): 409 - 413. Zou Jianwen, Huang Yao, Zong Lianggang, et al. 2003. Effects of water regime and straw application in paddy rice season on N₂O emission from following wheat growing season [J]. Agricultural Sciences in China (in Chinese), 36 (4): 409 - 413.