

稻田不同种类有机肥施用对后季麦田 N_2O 排放的影响

邹建文¹, 黄耀^{1, 2*}, 宗良纲², 郑循华¹, 王跃思¹

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 以稻麦轮作系统为对象, 研究水稻生长季基肥施用不同有机物料对后季麦田 N_2O 排放及年轮作系统 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响. 结果表明: 与施用化肥(化肥处理)相比, 施用菜饼加化肥(菜饼处理)对后季麦田 N_2O 排放量无影响; 施用小麦秸秆加化肥(小麦秸秆处理)导致后季麦田的 N_2O 排放量减少 15%; 施用牛厩肥加化肥(牛厩肥处理)和猪厩肥加化肥(猪厩肥处理)分别增加 29% 和 16%. 就稻麦年轮作生长季总体而言, 菜饼、牛厩肥和猪厩肥处理稻麦生长季 N_2O 排放总量较化肥处理分别增加 6%、17% 和 7%, 然而, 小麦秸秆处理 N_2O 排放总量减少 16%. 20a 或 500a 时间尺度上各处理稻田 CH_4 排放和该轮作周期水稻和小麦生长季 N_2O 排放的总 GWP 值由大到小的顺序分别为: 菜饼处理 > 小麦秸秆处理 > 牛厩肥处理 > 猪厩肥处理 > 化肥处理或菜饼处理 > 牛厩肥处理 > 猪厩肥处理 > 小麦秸秆处理 > 化肥处理. 单位产量的 GWP 以作物残体处理最高, 农家肥其次, 化肥处理最低. 因此, 稻田基施不同种类有机物料都相应地增加稻麦轮作系统 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应.

关键词: 稻麦轮作生态系统; 有机肥; 全球增温潜势; CH_4 ; N_2O

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)07-1264-05

Effect of Organic Material Incorporation in Rice Season on N_2O Emissions from Following Winter Wheat Growing Season

ZOU Jian-wen¹, HUANG Yao^{1, 2}, ZONG Liang-gang², ZHENG Xun-hua¹, WANG Yue-si¹

(1. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In a field experiment, five fertilizer treatments including chemical fertilizer (CF), rapeseed cake+ chemical fertilizer (RC+ CF), wheat straw+ chemical fertilizer (WS+ CF), cow manure+ chemical fertilizer (CM+ CF), and pig manure+ chemical fertilizer (PM+ CF), were dedicated to examine the effect of organic materials incorporation in the rice season on N_2O emissions from the following winter wheat season and to assess the climatic impacts from CH_4 and N_2O emissions in a rice-wheat rotation. Organic material was incorporated at the same rate ($225 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) for organic treatments at the depth of 10 cm in the soil as the basal fertilizer just before rice transplanting. An identical synthetic nitrogen fertilizer was adopted for all treatments. Results show that the seasonal amount of N_2O emissions from the following wheat season differed with organic material applied in rice season. No pronounced difference in N_2O emissions was found between the CF and RC+ CF treatments. In contrast with the CF treatment, however, N_2O emission was decreased by 15% for the WS+ CF treatment, but increased by 29% and 16% for the CM+ CF and PM+ CF treatments, respectively. Over the entire annual rotation cycle, N_2O amount was increased by 17% for the CM+ CF treatment, 7% for the PM+ CF treatment, and 6% for the RC+ CF treatment, but decreased by 16% for the WS+ CF treatment in comparison with the CF treatment. Based on total emissions of CH_4 in rice season and N_2O over the entire rotation cycle, the estimation of combined Global Warming Potentials (GWPs) for CH_4 and N_2O shows that over a 20 years horizon or a 500 years horizon, the value of annual total GWPs was ranked in the order of RC+ CF > WS+ CF > CM+ CF > PM+ CF > CF or RC+ CF > CM+ CF > PM+ CF > WS+ CF > CF. The highest, middle and the lowest value of the GWPs per unit crop grain yield occurred for the crop residue, farmyard manure and pure synthetic fertilizer treatments, respectively. Compared to the chemical fertilizer treatment, accordingly, organic material combined with chemical fertilizer application in rice season increased climatic impacts from CH_4 and N_2O emissions in a rice-winter wheat rotation system.

Key words: rice-wheat rotation system; organic material; global warming potential; CH_4 ; N_2O

稻麦轮作生态系统是我国华东地区典型的农业种植方式之一. 稻田肥料管理通常以有机-无机配施为特征, 作物残体还田和农家肥基施是培肥地力和提高作物产量的一项重要农业措施. 虽然国内外学

收稿日期: 2005-07-26; 修订日期: 2005-11-18

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家自然科学基金项目 (40425010)

作者简介: 邹建文(1971~), 男, 博士, 主要研究方向为农田温室气体与全球变化.

* 通讯联系人, E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

者对我国稻麦轮作生态系统 CH_4 和 N_2O 排放做了大量研究^[1~4], 但是其中有关稻田有机物料施用对 CH_4 和 N_2O 排放影响的研究主要侧重于水稻生长季^[5, 6], 对后季麦田 N_2O 排放的影响以及对稻麦年轮作生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响则鲜有报道。然而, 笔者以往的研究表明, 在淹水-烤田-淹水的水分管理方式下, 水稻生长季小麦秸秆填埋显著减少后季麦田 N_2O 排放^[7]。因此, 了解稻田有机、无机肥配施对稻麦轮作生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响, 对认识我国稻麦轮作系统 CH_4 和 N_2O 排放规律、评估该系统的综合温室效应以及寻求温室气体减排措施具有重要意义。

本试验采用静态暗箱-气相色谱法田间原位同步测定水稻-冬小麦年轮作生态系统作物生长季的 CH_4 和 N_2O 排放通量, 选用碳氮比相差较大的作物残体(小麦秸秆和菜饼)和未经堆腐的农家肥(牛廐肥和猪廐肥)干物料, 以探讨有机物料施用对稻麦年轮作生态系统水稻生长季 CH_4 和 N_2O 及后季麦田 N_2O 排放的综合影响。有关该轮作周期水稻生长季 CH_4 和 N_2O 排放的研究结果见参考文献[8], 本文主要报道水稻生长季有机肥施用对后季麦田 N_2O 排放的影响, 以及评估水稻生长季 CH_4 和年轮作系统 N_2O 排放的综合温室效应。

1 材料与方法

试验于 2001~2002 年在南京市江宁区秣陵镇稻麦年轮作试验田中进行 ($31^\circ 52' \text{N}$, $118^\circ 50' \text{E}$)。水稻生长季田间设置 5 个肥料施用处理, 分别为常规化肥(化肥处理, CF)、菜饼加常规化肥(菜饼处理, RC+CF)、小麦秸秆加常规化肥(秸秆处理, WS+CF)、牛廐肥加常规化肥(牛廐肥处理, CM+CF)和猪廐肥加常规化肥(猪廐肥处理, PM+CF)。各处理重复 2 次。常规化肥处理中前茬小麦秸秆约留 10 cm 残桩。猪廐肥和牛廐肥为未经堆腐的干物料。有机肥处理中风干的物料于水稻栽插前等施用量 ($2.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 填埋于土壤耕作层 10 cm 处作基肥施用。各有机肥料的碳、全氮含量分别为: 小麦秸秆 50.5%、0.8%; 菜饼 51.8%、6.5%。牛廐肥(干基) 34.9%、1.3%; 猪廐肥(干基) 43.6%、2.2%。它们的碳氮比依次为: 63.8、27 和 20。小麦生长季基肥为专用复合肥 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N: P_2O_5 : K_2O = 8%: 8%: 9%), 追肥于 2002-02-28 小麦返青期施用尿素 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 冬小麦全生育期总施 N 量为 211

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各肥料处理的化肥施用方式、施用量相同。其它田管措施如病虫害防治与当地大面积生产相一致。水稻全生育期为 118 d, 冬小麦全生育期为 200 d。试验田概况、水稻生长季的田管措施及温室气体样品采集与分析方法见参考文献[8]。

2 结果与讨论

2.1 麦田 N_2O 排放的季节变化

有机肥施用对水稻生长季 CH_4 和 N_2O 排放的影响见参考文献[8]。冬小麦生长季各肥料处理未观测到明显的 CH_4 排放或吸收。从图 1 可以看出, 虽然不同处理间 N_2O 排放通量变化幅度有所差异, 水稻生长季基肥施用不同的有机物料并不改变后季麦田 N_2O 排放的季节动态。各处理间 N_2O 的季节变化模式基本相同, 这种季节变化模式主要受温度、土壤湿度及肥料施用的共同驱动^[7]。如在冬小麦越冬期, 较低的气温导致 N_2O 排放通量较低。小麦返青后, 随着气温升高和返青肥的施用, 各处理 N_2O 排放通量显著增加, 在小麦生长的中后期, 土壤湿度的变化导致 N_2O 排放通量明显的波动(图 1)。本生长季降水较常年偏多, 过多的降水导致了土壤湿度测定值在 90% 土壤含水空隙率(water filled pore space, WFPS)以上的频度高达 70.8% (资料未列出), 也就是说, 生长季内大部分时间田间处于较湿状态, 土壤湿度的变化导致 N_2O 排放通量的季节波动。

2.2 不同肥料施用处理 N_2O 排放量比较

除了有机肥施用显著影响水稻生长季的 CH_4 和 N_2O 排放总量外^[8], 不同肥料处理间冬小麦生长季的 N_2O 排放总量亦存在较大差异(表 1)。本轮作周期水稻生长季的各肥料处理间以菜饼处理 N_2O 排放量最大, 然而, 菜饼处理与常规化肥处理间后季麦田 N_2O 排放无差异(表 1)。因此, 菜饼对年轮作系统 CH_4 和 N_2O 排放的影响主要发生在水稻生长季, 特别是在水稻生长前期, 随着作物生长其影响作用逐步减弱, 对后季麦田 N_2O 排放无影响。这是因为菜饼的氮含量较高, 且碳氮比小, 在土壤中分解速度快, 菜饼施用初期产生 N_2O 的氮源积累多, 随着分解时间的延长和作物对 N 素的利用, N 源积累量逐步下降, 因此, 菜饼施用对稻麦轮作系统 CH_4 和 N_2O 排放的影响只发生在水稻生长季。

小麦秸秆施用处理水稻生长季 N_2O 排放总量较化肥处理减少 18%^[8], 且这种效应一直持续到冬小麦生长季, 与常规化肥处理相比, 水稻移栽时小麦秸秆填埋导致后季麦田 N_2O 排放总量亦下降 15%

(表 1). 这与作者在 2000~ 2001 年稻麦轮作周期的研究结果相一致, 在 2000 年水稻生长季淹水-烤田-淹水 (F-D-F) 的水分管理方式下, 水稻移栽时小麦秸秆填埋 225 或 450 g·m⁻² 减少后季麦田 N₂O 排放 17% 左右^[7]. 高碳氮比秸秆填埋导致稻田 N₂O 排放下降的结果在以往研究中也多有报道^[9, 10]. 本研究中稻田小麦秸秆填埋导致后季麦田 N₂O 排放

量下降的原因可能是由于小麦生长季填埋的小麦秸秆分解导致土壤好氧层, 特别是根区 O₂ 的消耗, 加强反硝化作用使得 N₂O 进一步转化成 N₂; 小麦秸秆的 C/N 比较大 (C/N= 63), 秸秆填埋于土壤中耕作层 10cm 处, 在土壤中呈斑块状分布, 伴随着高碳氮比的小麦秸秆分解过程中的化肥 N 的微生物固定作用使得产生 N₂O 的有效 N 源减少.

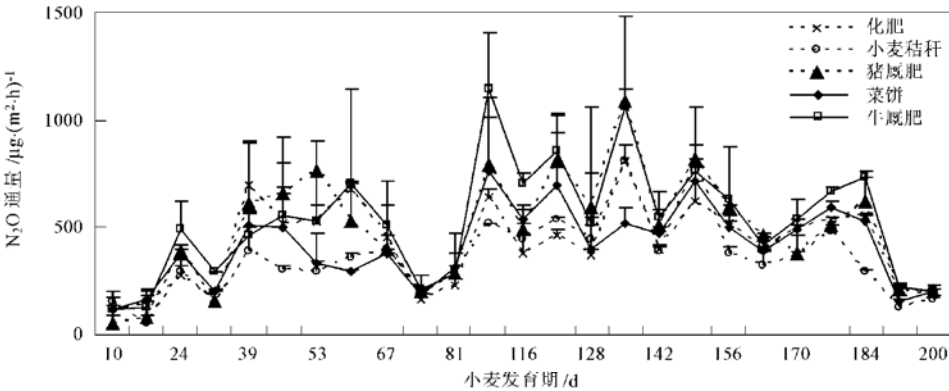


图 1 不同有机肥施用处理麦田 N₂O 排放(平均通量+ 标准差)的季节变化

Fig. 1 Seasonal pattern of N₂O emissions (Mean+ SD) from winter wheat farmlands

表 1 稻麦轮作生态系统不同处理 CH₄ 和 N₂O 季节排放总量(平均数 ± 标准差)

Table 1 Seasonal amounts (Mean ± SD) of CH₄ and N₂O emissions from rice and wheat seasons

处理	CH ₄ / kg·hm ⁻²	N ₂ O/ kg·hm ⁻²				
		水稻生长季 ¹⁾			小麦生长季	水稻+ 小麦生长季
		烤田期	烤田后	全生育期		
化肥	39.0 ± 4.1	2.79 ± 0.75	3.71 ± 0.05	6.50 ± 0.07	19.89 ± 1.0	26.39 ± 0.53
菜饼	137.4 ± 3.6	3.77 ± 1.28	4.17 ± 0.37	7.94 ± 1.65	19.92 ± 1.9	27.86 ± 3.53
小麦秸秆	136.4 ± 3.7	2.16 ± 0.00	3.19 ± 0.04	5.35 ± 0.04	16.95 ± 0.2	22.30 ± 0.21
牛廐肥	56.6 ± 11.5	1.98 ± 0.06	3.14 ± 0.06	5.12 ± 0.12	25.69 ± 1.1	30.81 ± 0.94
猪廐肥	37.3 ± 6.5	1.81 ± 0.49	3.50 ± 0.07	5.31 ± 0.56	23.05 ± 4.9	28.36 ± 5.42

1) 水稻生长季 CH₄ 和 N₂O 排放资料部分引自文献[8], 烤田前淹水阶段无明显 N₂O 排放, 因此 N₂O 排放总量: 全生育期= 烤田期+ 烤田后

水稻生长季牛廐肥和猪廐肥 2 处理的 N₂O 季节排放总量较化肥处理分别减少了 21% 和 18% (表 1). 其原因可能是未经堆腐的牛廐肥和猪廐肥, 施入土壤中需要经过养分的有效化过程, 即矿质化过程. 在此过程中微生物首先对有机碳进行分解, 然后才能产生碱解氮和铵态氮等速效氮^[11]. 在有机碳的分解过程中微生物需要固定土壤中的氮素, 因而会引起 N₂O 排放量的减少. 本试验表现为水稻生长前期主要进行养分的有效化过程, 导致烤田期 N₂O 排放量下降幅度较大, 分别下降了 29% 和 35%, 以后随着有机物料的逐步分解, 可利用的 N 源渐渐积累, 下降幅度降低, 分别为 15% 和 6%. 当养分的有效化过程完成后, 反而会增加土壤中的有效 N, 因而导致产生 N₂O 的有效 N 源累积, 从而增

加 N₂O 排放. 这在本试验的冬小麦生长季得到了证实. 牛廐肥和猪廐肥施用处理与常规化肥处理相比, 冬小麦生长季 N₂O 排放总量分别增加了 29% 和 16% (表 1). 从上述分析可以看出, 农家有机肥料的腐熟程度影响其在土壤中的分解动态, 从而进一步影响 N₂O 排放. 因此, 农家廐肥的腐熟程度也可能是影响 N₂O 排放的一个重要因素.

就全年轮作周期而言, 菜饼施用处理较常规化肥施用增加 6%, 然而, 小麦秸秆显著减少 N₂O 排放, 全轮作周期内稻麦生长季共减少 N₂O 排放 16%. 农家廐肥施用处理减少了水稻生长季 N₂O 排放, 却增加了小麦生长季 N₂O 排放, 与常规化肥施用处理相比, 牛廐肥和猪廐肥处理全年轮作周期内稻麦生长季 N₂O 排放总量分别增加了 17% 和 7%.

IPCC^[12]假定化肥 N 的 N_2O 排放系数缺省值 (1.25%) 同样适用于估算农田有机肥施用引起的 N_2O 排放。然而,许多观测资料表明 IPCC 指南中单独计算作物残体施用引起的 N_2O 排放量可能导致 N_2O 人为排放源的过高估算^[13]。本研究表明在等量填埋有机物料的同一种施用方式下,有机肥类型、有机肥碳氮比影响有机肥在土壤中的分解动态,从而导致其对稻麦轮作生态系统 N_2O 排放的影响不同。低 C/N 比的菜饼增加水稻生长季的 N_2O 排放,对后季麦田 N_2O 排放无影响;高 C/N 比的小麦秸秆减少水稻和后季麦田 N_2O 排放;未经堆腐的有机廐肥减少稻田 N_2O 排放,却增加后季麦田 N_2O 排放。此外,许多研究发现有机肥料的颗粒大小和粉碎程度、不同施用方式都会引起 N_2O 排放量的巨大差异^[14~16]。在 2002~2003 年稻麦轮作周期的研究表明,水稻和小麦生长季作物残体和化肥同时于土壤表层混施,在土表均匀分布,增加了水稻和小麦生长季的 N_2O 排放^[17]。培养试验表明作物残体 N 的 N_2O 转化系数(类似于大田的 N_2O 排放系数)与

作物残体的 C/N 比有关^[18]。因此,采用 IPCC 的 N_2O 排放系数缺省值估算有机肥料 N 的 N_2O 排放量,可能导致估计结果偏高,而且,同一 N_2O 排放系数值用来估算不同类型、不同施用方式、以及不同 C/N 比的有机肥施用引起的 N_2O 排放量会扩大其不确定性范围。

2.3 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应比较

全球增温潜势 (Global Warming Potential, GWP) 作为一种简单的基于辐射特性的相对指标常被用来估计不同温室气体对气候系统的潜在效应。在 GWP 估算中, CO_2 看作参考气体, CH_4 和 N_2O 排放量的增减通过 GWP 值转换成 CO_2 等当量。最近,净 GWP 估算被广泛用于全面理解农业系统对辐射强迫的气候效应^[19~21]。在 20a 时间尺度上,单位质量 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势分别为 CO_2 的 62 倍和 275 倍;500a 时间尺度其 GWP 则分别为 CO_2 的 7 倍和 156 倍^[22]。 CO_2 若以 $1\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的 GWP 为 1,可求得各肥料处理排放 CH_4 和 N_2O 的综合 GWP 值 (表 2)。

表 2 有机肥施用对稻麦轮作生长季 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响

Table 2 Effect of organic manure incorporation on the integrated GWPs of CH_4 and N_2O

处理	水稻生长季 ¹⁾		小麦生长季		水稻+ 小麦生长季		单位产量的 GWP ²⁾	
	20a	500a	20a	500a	20a	500a	20a	500a
化肥	4 207	1 287	5 470	3 103	9 677	4 390	0.65	0.29
菜饼	10 704	2 201	5 478	3 108	16 195	5 309	1.10	0.36
小麦秸秆	9 931	1 790	4 661	2 644	14 592	4 434	1.13	0.34
牛廐肥	4 913	1 195	7 065	4 008	11 978	5 203	0.78	0.34
猪廐肥	3 773	1 090	6 339	3 596	10 112	4 686	0.66	0.30

1) 水稻生长季资料引自参考文献[8]; 2) 单位产量的 GWP 是指全轮作周期某一处理的 CH_4 和 N_2O 综合 GWP 与经济产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的比值

从表 2 中可以看出,水稻生长季菜饼和秸秆处理的 GWP 较化肥处理在 20a 时间尺度上分别增加了 151% 和 136%;500a 分别增加了 71% 和 39%。牛廐肥处理在 2 个时间尺度上较化肥处理略有增加,各有机物料处理中以猪廐肥处理 GWP 最低,在 20a 和 500a 时间尺度上较化肥处理分别减少了 10% 和 15%^[8]。就同一处理而言,在 500a 时间尺度上稻田 N_2O 排放的 GWP 占 N_2O 和 CH_4 排放总 GWP 的比例分别为:化肥处理 44%,菜饼处理 36%,秸秆处理 32%,牛粪处理 40%,猪粪 43%。因此,稻田 N_2O 排放亦不容忽视^[8]。就全年轮作周期作物生长季而言,无论 20a 还是 500a 时间尺度上,菜饼施用处理 GWP 值最高,与化肥处理相比,菜饼施用导致了 GWP 增加 67% (20a) 或 21% (500a);牛廐肥施用增加了 24% (20a) 和 19% (500a);在

20a 时间尺度上小麦秸秆施用导致 GWP 增加了 51%,而 500a 时间尺度上略有增加 (表 2)。无论在 20a 还是 500a 时间尺度上,猪廐肥施用对 GWP 的影响很小,仅增加了 4% 和 7%。从表 1 可以看出,猪廐肥处理较化肥处理水稻生长季烤田期的 N_2O 下降幅度最大 (下降 35%),且对 CH_4 排放无显著影响 (表 1),导致其在有机物料处理中的 GWP 值最低。这可能跟猪廐肥在土壤中的分解动态有关^[8]。一方面微生物在分解有机碳的过程中需要固定土壤中的氮素,因而会引起 N_2O 排放量的减少。另一方面,虽然猪廐肥施用向土壤输入有机碳,但由于猪廐肥为未经堆腐的干物料,碳大部分以大分子复杂有机物存在,水稻生长季前期分解的中间产物和小分子有机物较少,因而可利用的产 CH_4 前体较少,而稻田中后期烤田使得土壤环境又限制了部分

中间产物和小分子化合物向 CH_4 转化, 因此猪厩肥施用并没有增加稻田 CH_4 排放. 若以农田“单位产量的 GWP”指标反映环境效益与生产效益的协调统一性, 综合评价各种农业管理措施包括有机肥料施用对稻麦轮作生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的影响, 结果表明: 在 20 时间尺度上, 各处理“单位产量的 GWP”由大至小的顺序为: 小麦秸秆 > 菜饼 > 牛厩肥 > 猪厩肥 > 常规化肥; 在 500a 时间尺度上, 菜饼 > 小麦秸秆 > 牛厩肥 > 猪厩肥 > 常规化肥(表 2). 综合稻麦轮作系统的作物生产效应和温室效应, 有机物料作基肥施用都会不同程度增加稻麦轮作系统 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应, 大量作物残体还田会导致该农田系统温室效应的显著增加.

3 结论

稻麦轮作生态系统田间试验结果表明, 水稻生长季基施有机物料对稻田 CH_4 和全轮作周期 N_2O 排放的季节变化趋势无明显影响, 但影响其排放量. 在水稻生长季, 与化肥处理相比, 菜饼处理的 CH_4 和 N_2O 季节排放总量最高, 猪厩肥处理最低, 秸秆处理和牛厩肥处理增加 CH_4 排放量但减少 N_2O 排放量. 菜饼施用对后季麦田 N_2O 排放无影响, 而小麦秸秆处理显著减少后季麦田 N_2O 排放; 猪厩肥和牛厩肥则显著增加后季麦田 N_2O 排放. 就全轮作周期而言, 菜饼、猪厩肥和牛厩肥施用增加 N_2O 排放, 而小麦秸秆减少 N_2O 排放. CH_4 和 N_2O 排放综合温室效应分析结果表明, 与常规化肥处理相比, 有机物料施用都不同程度地增加了全年作物生长季总 GWP. “单位产量的 GWP”以作物残体处理最高, 农家肥其次, 化肥处理最低. 从全轮作周期来看, 有机物料作基肥施用都会不同程度增加稻麦轮作系统 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应.

参考文献:

- [1] Khalil M A K. Emission of trace gases from Chinese rice fields and biogas generation: CH_4 , N_2O , CO_2 , chlorocarbons, and hydrocarbons[J]. *Chemosphere*, 1990, **20**: 207~213.
- [2] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, *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.
- [3] Xing G X, Zhu Z L. Preliminary studies on N_2O emissions fluxes from upland soils and paddy soils in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, **49**: 17~22.
- [4] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放 [J]. *大气科学*, 1997, **21** (2): 231~237.
- [5] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Characters of greenhouse gas (CH_4 , N_2O , NO) emissions from croplands of southeast China [J]. *World Resource Review*, 1999, **11** (2): 229~246.
- [6] 陈苇, 卢婉芳, 段彬伍, 等. 猪粪与沼渣对双季稻田甲烷排放的影响 [J]. *生态学报*, 2001, **21** (2): 265~270.
- [7] 邹建文, 黄耀, 蒋静艳, 等. 水稻生长季水分管理和秸秆施用对后季麦田 N_2O 排放的影响 [J]. *中国农业科学*, 2003, **36** (4): 409~414.
- [8] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响 [J]. *环境科学*, 2003, **24** (4): 7~12.
- [9] Aulakh M S, Khera T S, Doran J W, *et al.* Denitrification, N_2O and CO_2 fluxes in rice-wheat cropping system as affected by crop residues, fertilizer N and legume green manure [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, **34**: 375~389.
- [10] Bronson K F, Neue H-U, Singh U, *et al.* Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: II. Fallow period emissions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61** (3): 988~993.
- [11] 胡霁堂. 植物营养学 (下册) [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995. 170~172.
- [12] IPCC. Chapter 4: Agriculture [A]. In IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories [C]. Tokyo: IGES, 2000.
- [13] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16** (4): 1058~1070.
- [14] Angers A, Recous S. Decomposition of wheat and rye residue as affected by particle size [J]. *Plant and Soil*, 1997, **189**: 197~203.
- [15] Chadwick D R, Pain B F, Brookman S K. Nitrous Oxide and Methane Emissions following Application of Animal Manures to Grassland [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**: 277~287.
- [16] Mosier A, Kroeze C, Nevison C, *et al.* Closing the global atmospheric N_2O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, **52**: 225~248.
- [17] Zou J W, Huang Y, Lu Y Y, *et al.* Direct emission factor for N_2O emissions from a rice-winter wheat rotation system [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 4755~4765.
- [18] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, *et al.* Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, **36**: 973~981.
- [19] Frolking S, Li C S, Braswell R, *et al.* Short- and long-term greenhouse gas and radiative forcing impacts of changing water management in Asia rice paddies [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 1180~1196.
- [20] Six J, Ogle S M, Breidt F J, *et al.* The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 155~160.
- [21] Yu K W, Chen G X, Patrick W H Jr. Reduction of global warming potential contribution from a rice field by irrigation, organic matter, and fertilizer management [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**: GB3018, doi: 10.1029/2004GB002251.
- [22] IPCC. Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases [A]. In Climate change 2001: the Scientific Basis [C]. New York: Cambridge University Press, 2001. 248~253.