

有机肥施用对稻田甲烷排放的影响及模拟研究

霍莲杰^{1,2,3}, 纪雄辉^{2,3*}, 吴家梅^{1,2,3}, 彭 华^{2,3}, 朱 坚^{1,2,3}

(1.中南大学研究生隆平分院, 长沙 410125; 2.湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 3.农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125)

摘 要:通过 2 年的田间定位试验, 监测了湖南稻田施用不同有机肥(稻草、鸡粪和猪粪)处理对 CH₄ 排放的影响, 并利用 Logistic 模型模拟了 CH₄ 累积排放动态。结果表明:施用有机肥显著增加 CH₄ 排放量, 其中稻草处理 CH₄ 排放量最高, 2 年稻季平均排放总量为 796.96 kg·hm⁻², 比鸡粪处理(405.56 kg·hm⁻²)增加 96.51%($P<0.05$), 两者比猪粪处理分别增加 214.1%($P<0.05$)和 59.8%($P<0.05$), 比单施化肥处理分别增加 249.8%($P<0.05$)和 78.0%($P<0.05$), 而猪粪、化肥和不施肥处理的 CH₄ 累积排放量间均没有显著差异;利用 Logistic 模型能够很好地模拟稻田 CH₄ 累积排放量随时间的变化动态, 其参数 L 能极显著拟合累积排放量且与有机肥中有机碳组分 1 线性相关, 参数 a 表示水稻拔节孕穗期之前的 CH₄ 排放量增减率, 与土壤中有机碳组分 1 含量密切相关。从土壤固碳和减排 CH₄ 方面考虑, 在生产上可尽量减少有机肥中有机碳组分 1 向稻田输入。

关键词:稻田; CH₄ 排放; 有机肥; 有机碳组分; Logistic 模型

中图分类号: S143.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)10-2084-09 doi:10.11654/jaes.2013.10.027

The Effect of Organic Manures Application on Methane Emission and Its Simulation in Paddy Fields

HUO Lian-jie^{1,2,3}, JI Xiong-hui^{2,3}, WU Jia-mei^{1,2,3}, PENG Hua^{2,3}, ZHU Jian^{1,2,3}

(1.Longping Department of Central South University, Changsha 410125, China; 2.Institute of Soil and Fertilizer in Hunan Province, Changsha 410125, China; 3.Key Laboratory of Agri-Environment in Midstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Changsha 410125, China)

Abstract: Field experiment was conducted to study the effect of different organic manures application on CH₄ emissions over rice growing season from paddy fields in Hunan Province in 2010 and 2011, and the Logistic model was used to simulate the dynamic of CH₄ accumulation emission flux. The results were showed that CH₄ emissions were significantly increased by application of organic manures (including rice straw, chicken manure and pig manure). The CH₄ accumulation emission amount was the highest in the rice straw treatment, whose 2-year's mean was 796.96 kg·hm⁻², was increased by 96.51% ($P<0.05$) compared with that in the chicken manure treatment (405.56 kg·hm⁻²); The two treatments increased methane emission by 214.1% ($P<0.05$) and 59.8% ($P<0.05$) respectively than that in the pig manure treatment, and by 249.8% ($P<0.05$) and 78.0% ($P<0.05$) respectively than that in the chemical fertilizer treatment. The CH₄ accumulation emission amount was no significant difference among the treatments of pig manure, chemical fertilizer and no fertilizer; The Logistic model could simulated CH₄ accumulation emission flux dynamic under different fertilization treatments very well, which parameter L had extremely significant correlations with CH₄ accumulation emission flux and organic carbon fraction one in manure. The Logistic model's parameter a means change rate of the CH₄ emission flux before rice jointing-booting stage and was closely related to organic carbon fraction one in soil. Considering soil carbon sequestration and CH₄ emission reduction, the organic carbon fraction one in manures input to paddy field should be minimize as far as possible.

Keywords: paddy field; CH₄ accumulation emission; organic manure; organic carbon fraction; Logistic model

收稿日期: 2013-01-09

基金项目: 国家科技支撑项目: 稻田生态系统固碳减排技术集成与示范(2013BAD11B02); 中南大学学位论文创新资助项目: 影响稻田甲烷排放的还原性有机物化学特征研究(2011ssxt124); 2012 湖南省农科院创新项目(稻田施用有机肥的碳增汇效应及固碳减排调控研究)

作者简介: 霍莲杰(1988—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 研究方向为稻田土壤固碳和甲烷减排方面的研究。E-mail: huolianjie123@126.com

* 通信作者: 纪雄辉 E-mail: jixionghui@sohu.com

CH₄ 是大气中仅次于 CO₂ 的重要温室气体。从 1750 年以来,大气中 CH₄ 的浓度增加了 150%,是所有重要温室气体中增幅最快的^[1]。据 IPCC 第四次评估报告,稻田的年甲烷排放量为 31~112 Tg (1 Tg=10¹² g),占全球总排放的 5%~19%^[2],可见稻田是大气 CH₄ 的重要排放源之一^[3-4]。我国是重要的水稻生产国,水稻产量居世界第一,种植面积约占世界稻田总面积的 22%,仅次于印度,无疑在全球稻田 CH₄ 排放中占有十分重要的地位。因此,我国稻田 CH₄ 的排放量一直是国际社会关注的问题。

我国稻田施肥以有机无机肥配施为主要特征,稻田水分管理以淹水和烤田相结合的传统灌溉为主,在常规水分管理条件下研究有机无机肥配施对稻田 CH₄ 排放的影响具有重要意义。虽然不同有机物料施入稻田对 CH₄ 排放影响结果不尽相同^[5-7],但目前一般认为施用有机肥会使稻田 CH₄ 排放增加^[8-10]。随着人们对 CH₄ 排放机理研究的不断深入,模型模拟方法已逐步成为估计区域乃至全球尺度 CH₄ 排放的重要工具。国外 Bachelet^[11]将统计模型与联合国粮农组织的土壤图相连结,估计中国稻田 CH₄ 排放量;Knox 和 Matthews^[12]利用其自行研发的 MERES 模型估计中国稻田 CH₄ 排放量。国内一些研究者分别利用 DNDC 模型或 CH₄MOD 模型估算我国稻田 CH₄ 排放量^[13-16]。然而这些模型都是结合气温、土壤及田间管理措施对稻田 CH₄ 排放总量的估算,缺少对稻田 CH₄ 排放动态的模拟和有机肥特征的研究。罗基斯谛(Logistic)模型是模拟有限资源条件下某一研究对象增长过程的生态学模型,稻田 CH₄ 排放量受土壤中可转化为 CH₄ 的那部分有机碳的限制,故符合罗基斯谛模型的模拟条件。因此,本文选用生产中常用的 3 种有机肥料(稻草、鸡粪和猪粪)以及化肥,进行为期 2 年的大田试验,研究常规灌溉条件下有机无机肥配施对稻田 CH₄ 排放的影响,并用罗基斯谛模型模拟研究稻田 CH₄ 排放动态,这对认识我国稻田 CH₄ 排放规律,寻

求稻田 CH₄ 减排措施具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地点位于湖南省长沙市干杉社区实验基地(N 28°08'18",E 113°12'0"),海拔 42 m,年平均温度为 17.1 ℃,年降水量 1500 mm,降水多集中在 3 月至 6 月,年积温(≥10 ℃)5300~6500 ℃,为南方典型的水稻生产区。土壤类型为第四纪红壤发育的红黄泥水稻土,其基本理化性质为:土壤 pH 6.0,有机质 33.3 g·kg⁻¹、碱解氮 212 g·kg⁻¹、有效磷 11.1 g·kg⁻¹、速效钾 97 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计和田间管理

试验采用单因素随机区组设计,设置 5 个处理,每个处理重复 3 次。包括不施肥对照处理(无肥处理)、单施化肥处理(化肥处理)、猪粪+化肥处理(猪粪处理)、鸡粪+化肥处理(鸡粪处理)和稻草+化肥处理(稻草处理)。2 年试验保持相同的施肥量,试验各处理的具体施肥情况见表 1。

试验田各个小区长 3.0 m,宽 2.8 m,为了避免相互串水,小区田埂采用薄膜覆盖。在施用有机肥料碳量一致的前提下,施用的氮量相同,氮量不足用尿素调控。猪粪和鸡粪为风干腐熟样品,稻草是风干样品。为了防止一次性大量施用肥料而导致烧苗,有机肥在移栽前半个月左右施用,化肥在移栽前一天施用。施肥时稻草剪成 20 cm 小段,踩入田间约 20 cm 处,其他肥料均匀撒入田间,并与土壤混匀即可。

水稻品种为准两优 608,每年 6 月 1 日播种,10 月 8 日收割。前季作物为水稻,插秧前期田间保持淹水状态,分蘖高峰期和乳熟期分别烤田一次。病虫害防治与当地生产一致。水稻生育期时间见表 2。

1.3 气体采集与分析

采用静态箱-气相色谱法,以手动采样的方式采集稻田 CH₄ 气体。采样箱箱体为圆柱体,由不锈钢材

表 1 不同处理的施肥量(kg·hm⁻²)
Table 1 Fertilizer application rates of different treatments(kg·hm⁻²)

处理	化肥			有机肥			所施肥料养分情况			
	尿素	过磷酸钙	氯化钾	猪粪	鸡粪	稻草	C	N	P	K
不施肥	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
化 肥	587	1125	300	0	0	0	0	270	135	180
猪粪+化肥	130	0	0	16 718	0	0	2850	270	330	229
鸡粪+化肥	145	0	0	0	10 694	0	2850	270	255	356
稻草+化肥	488	1015	78	0	0	7461	2850	270	135	180

表 2 水稻不同生育期时间表
Table 2 Different growth periods schedule of rice

年份	苗期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗期	灌浆成熟期
2010 年	6 月 22—6 月 30 日	7 月 1—7 月 28 日	7 月 29—8 月 23 日	8 月 24—9 月 5 日	9 月 6—10 月 8 日
2011 年	6 月 23—7 月 1 日	7 月 2—7 月 24 日	7 月 25—8 月 20 日	8 月 21—9 月 2 日	9 月 3—10 月 8 日

料制成,直径 55 cm,高 1.2 m。外表依次粘贴一层黑色、纯白色波音片材料,分别用来隔绝光线和避免箱体吸收过多太阳辐射而引起箱内温度升高。采样箱顶部装有通过蓄电池驱动的风扇来搅匀箱内气体。底座底面积 0.25 m²,深度 15 cm,上端有密封水槽,于水稻移栽前将不锈钢底座插入土壤中,使水槽顶端与土壤平齐,底座下有一根 U 型硬塑料管使箱内外连通,以保证底座内的水分状态和大田实际状态一致。测定时向底座水槽加水以保证处于密封状态。每次采样时间固定于上午 8:00—12:00,分别在罩箱后的第 0、10、20、30 min 时抽取 45 mL 箱内气体样品。气体样品采用 Agilent 7890A 气象色谱仪测定。CH₄ 检测器 FID,检测温度为 250 ℃,柱温 55 ℃,标准气体由国家标准物质中心提供。CH₄ 累积排放量的计算采用 Zheng 等^[17]的方法。

1.4 有机肥和土壤中易氧化有机碳含量测定

施入稻田土壤的有机肥和土壤(2011 年)中易氧化有机碳含量采用 Blair 等^[18]提出的 KMnO₄ 氧化法测定。该方法利用有机碳对三种不同浓度(33、167、333 mmol·L⁻¹)KMnO₄ 的氧化敏感性不同,分别用 33、167、333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 溶液氧化,振荡、离心、比色测定有机碳含量。以 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 为例,称取约 15.00 g 新鲜土样于 50 mL 塑料旋盖离心管中,加入 25 mL KMnO₄,常温下振荡 1 h,然后在转速 2000 r·min⁻¹ 下离心 5 min;将上清液用去离子水稀释 250 倍,后在分光光度计 565 nm 下比色测定。每个测定设置 3 个重复。167 和 33 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化有机碳时,称取的新鲜土样分别为 4.00 g 和 2.00 g,其他测定步骤和 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 一致。计算公式为:

$$\rho(C)=\frac{\rho_o(\text{MnO}_4^-)-\rho_i(\text{MnO}_4^-)}{m}\times t_s\times V_o\times a$$

式中: $\rho(C)$ 为土壤样品的易氧化有机碳含量,mg·g⁻¹; $\rho_o(\text{MnO}_4^-)$ 为空白样品在工作曲线上查得显色液中 MnO₄⁻ 含量,mmol·L⁻¹; $\rho_i(\text{MnO}_4^-)$ 为土壤样品在工作曲线上查得显色液中 MnO₄⁻ 含量,mmol·L⁻¹; t_s 为分取倍数; V_o 为显色体积,mL; a 为常数,等于 9 mg·mmol⁻¹; m 为土壤样品的质量,g。

本试验将测得的易氧化有机碳分成 3 种组分:

组分 1:被 33 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的有机碳。

组分 2:167 mmol·L⁻¹ 和 33 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的有机碳之差。

组分 3:333 mmol·L⁻¹ 和 167 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的有机碳之差。

试验所用有机肥的各组分有机碳含量见表 3。

表 3 不同有机肥的易氧化有机碳含量(kg·hm⁻²)
Table 3 Oxidizable organic carbon content of different manure

处理	组分 1	组分 2	组分 3
猪粪	215.6	732.5	433.7
鸡粪	226.3	515.3	477.0
稻草	301.3	328.7	322.4

1.5 模型与统计

Logistic 模型属于增长类型的模型,是渔捞、林业、农业等实践领域中确定最大持续产量的主要模型。可以用来描述某一研究对象的增长过程。其方程式为:

$$Y=L/(1+e^{atbt})$$

式中: t 是自变量, Y 是因变量, a 、 b 、 L 是参数。

当 $t \rightarrow +\infty$ 时, $Y \rightarrow L$,即 $Y(t)$ 是单调增加的, L 是 Y 的增长上线,称为饱和量。

本文以水稻移栽之日起 CH₄ 累积排放量为因变量(Y ,kg·hm⁻²),移栽后的天数为自变量(t,d)($t \geq 0$),用 Logistic 模型模拟 CH₄ 排放量动态。试验数据的方差和回归分析用 DPS 和 SPSS17.0 软件处理,数学模型的模拟采用麦夸特法。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下稻田 CH₄ 的累积排放量

2010—2011 年不同有机肥处理的稻田 CH₄ 排放量(表 4)显示,与不施肥相比,猪粪、鸡粪、稻草 3 种有机肥及化肥的施用均增加稻田土壤 CH₄ 排放量。其中,2 年试验的鸡粪、稻草处理 CH₄ 排放量显著高于无肥处理,而猪粪、化肥处理的 CH₄ 累积排放量与无肥处理均没有显著差异。2010、2011 年试验的稻草处

表 4 不同施肥处理稻田 CH₄ 排放量(kg·hm⁻²)
Table 4 Methane emission fluxes under different fertilizer treatments(kg·hm⁻²)

年份	处理	苗期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗期	灌浆成熟期	累积排放量
2010	无肥	19.8c	106.5c	62.4b	4.7a	6.6a	200.0c
	化肥	18.9c	104.0c	70.4b	7.2a	4.8a	205.2c
	猪粪	33.5c	117.9c	102.7b	5.8a	7.7a	267.6c
	鸡粪	70.9b	199.4b	93.0b	3.7a	4.8a	371.8b
	稻草	182.9a	301.7a	176.9a	3.4a	9.8a	674.7a
2011	无肥	32.6c	138.4c	34.9b	12.7b	13.9b	232.4c
	化肥	37.2c	139.9c	41.6b	18.4b	13.2ab	250.4c
	猪粪	35.0c	148.8c	30.0b	14.4b	11.7ab	239.9c
	鸡粪	135.0b	209.4b	55.2b	22.0ab	17.7ab	439.3b
	稻草	306.4a	459.2a	102.1a	35.1a	16.4a	919.2a

注:数据后不同英文字母表示 LSD 检验差异极显著($P<0.05$)。The different letters a, b... indicates statistically significant difference at $P<0.05$ according to L.S.D MRT analysis.

理 CH₄ 累积排放量均最高,2 年稻季平均排放总量为 797.0 kg·hm⁻², 比鸡粪处理 (405.6 kg·hm⁻²) 增加 96.5% ($P<0.05$), 且两者比猪粪处理分别增加 214.1% ($P<0.05$) 和 59.8% ($P<0.05$), 比化肥处理分别增加 249.8% ($P<0.05$) 和 78.0% ($P<0.05$), 比无肥处理分别增加 266.4% ($P<0.05$) 和 87.5% ($P<0.05$)。2 年试验同一处理间的 CH₄ 累积排放量没有显著差异。

就水稻不同生育期而言,2010 年和 2011 年各处理苗期到拔节孕穗期 CH₄ 排放量分别占整个排放的 94.3%~98.1%、88.6%~94.4%。其中分蘖期 CH₄ 排放量均最大,占整个排放量的 50%左右,然后依次是拔节孕穗期和苗期。抽穗期和灌浆成熟期 CH₄ 排放量在整个排放期所占比例最小。

2.2 Logistic 模型模拟分析

模拟稻田 CH₄ 累积排放动态(表 5)表明,不同处理的稻田 CH₄ 累积排放量随时间变化动态均极显著拟合于 Logistic 模型($P=0.000\ 0$),表明 Logistic 模型模拟稻田 CH₄ 累积排放量是可行的,而且模拟效果极好。

模型中参数 L 表示当季水稻的 CH₄ 最大排放量,2 年试验的 CH₄ 累积排放总量模拟值和实际值都基本一致,两者之间均呈现极好的相关性, R^2 为 0.999 9(2010 年)、0.999 8(2011 年)。

CH₄ 累积排放量较低的无肥、化肥和猪粪处理中,Logistic 方程中的参数 a 值均大于 CH₄ 累积排放量高的鸡粪和稻草处理。对分蘖期比苗期、拔节孕穗期比分蘖期、抽穗期比拔节孕穗期、灌浆成熟期比抽穗期的 CH₄ 排放量增/减幅度分别与 a 值进行相关性分析表明,相关系数分别为 0.879 ($P<0.01$)、0.682 ($P<0.05$)、-0.45 ($P>0.05$)、0.04 ($P>0.05$)。即从苗期到拔节孕穗期这段时期参数 a 值与 CH₄ 排放量增/减幅度密切相关。可见,参数 a 表示水稻生长前期 CH₄ 累积排放量的变化(时间 t 较小时, a 值决定 Y 的变化)。

随着时间的延长,参数 b 值取代 a 值决定了 CH₄ 累积排放量的变化。而 2 年试验不同处理模拟方程中的参数 b 值差异不大,基本在 0.1 左右,说明在同一土壤、作物和相同栽培管理条件下,不同肥料影响 CH₄ 排放的总体趋势是一致的。

2.3 有机碳组分与 CH₄ 排放动态及 Logistic 模型参数 a 、 b 关联性分析

2.3.1 水稻不同生长期的土壤易氧化有机碳含量变化

图 1 显示 2011 年试验水稻不同生长时期的土壤易氧化有机碳变化动态。水稻不同生长时期不同处理的土壤易氧化有机碳含量均表现为:组分 1>组分 2>

表 5 罗基斯谛模型模拟不同施肥处理 CH₄ 累积排放量

Table 5 Methane accumulation emission fluxes of different fertilizer treatments simulated by Logistic model

年份	处理	方程式	R^2	P	模拟值/kg·hm ⁻²
2010	无肥	$Y_{CK}=196.965\ 6/[1+\text{EXP}(2.905\ 0-0.096\ 536\ t)]$	0.995 3	0.000 0	197.0
	化肥	$Y_{MF}=203.363\ 2/[1+\text{EXP}(3.143\ 3-0.100\ 067\ t)]$	0.997 6	0.000 0	203.4
	猪粪	$Y_{PM}=267.667\ 4/[1+\text{EXP}(2.943\ 4-0.090\ 803\ t)]$	0.994 6	0.000 0	267.7
	鸡粪	$Y_{CM}=369.022\ 4/[1+\text{EXP}(2.188\ 1-0.095\ 444\ t)]$	0.985 4	0.000 0	369.0
	稻草	$Y_{RS}=673.331\ 1/[1+\text{EXP}(2.028\ 0-0.087\ 934\ t)]$	0.985 6	0.000 0	673.3
2011	无肥	$Y_{CK}=223.601\ 1/[1+\text{EXP}(2.396\ 2-0.107\ 069\ t)]$	0.984 1	0.000 0	223.6
	化肥	$Y_{MF}=241.322\ 3/[1+\text{EXP}(2.143\ 6-0.094\ 039\ t)]$	0.977 6	0.000 0	241.3
	猪粪	$Y_{PM}=229.319\ 9/[1+\text{EXP}(2.383\ 0-0.116\ 230\ t)]$	0.979 2	0.000 0	229.3
	鸡粪	$Y_{CM}=431.011\ 0/[1+\text{EXP}(1.527\ 0-0.081\ 982\ t)]$	0.987 7	0.000 0	431.0
	稻草	$Y_{RS}=906.625\ 7/[1+\text{EXP}(1.583\ 6-0.095\ 203\ t)]$	0.987 3	0.000 0	906.6

组分 3。同一易氧化有机碳的所有处理的有机碳含量变化趋势基本一致。不同处理之间,施用有机肥的猪粪、鸡粪和稻草处理的组分 1、组分 2 和组分 3 有机碳含量在水稻不同生长时期均高于无肥和化肥处理。不同处理的组分 1 和组分 2 有机碳含量从苗期到分蘖期均呈增加趋势,之后又均下降。组分 3 有机碳含量在整个水稻生长期呈下降趋势。其中,从苗期至灌浆成熟期,组分 1、组分 2 和组分 3 有机碳含量分别下降了 20.23%~27.12%、16.04%~20.46%、42.33%~64.13%。

2.3.2 水稻不同生长期 CH_4 排放量与土壤易氧化有机碳组分关系

土壤易氧化有机碳各组分含量与 CH_4 排放量的相关性分析结果(表 6)显示,有机碳组分 1 与水稻苗期和分蘖期 CH_4 排放量呈极显著相关($P<0.01$),且整个监测时期与 CH_4 排放量总体也呈极显著的相关性($P<0.01$)。而除有机碳组分 2 仅与 CH_4 排放量总体上呈显著相关($P<0.05$)外,组分 2、组分 3 与 CH_4 排放量没有表现出显著的相关性。可见,土壤易氧化有机碳组分 1 与 CH_4 排放量的关系最为密切。

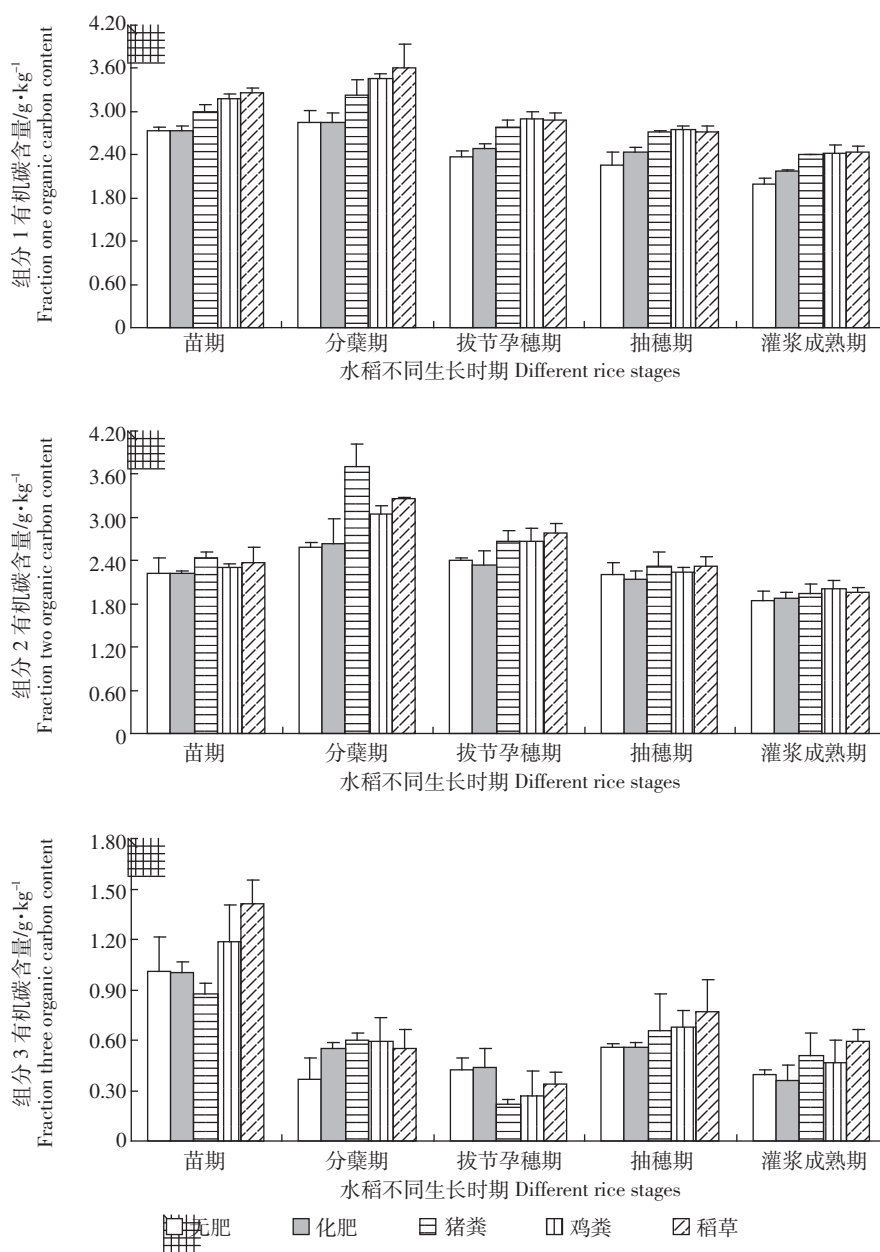


图 1 2011 年稻田土壤易氧化有机碳含量的变化

Figure 1 The content of soil oxidizable organic carbon in different rice stage in 2011 year

表 6 土壤易氧化有机碳组分与不同时期 CH₄ 排放量的相关关系
Table 6 The correlation between soil oxidizable organic carbon and CH₄ accumulation emission fluxes in different rice stage

项目	苗期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗期	灌浆成熟期	整个监测期
组分 1	0.784**	0.676**	0.369	0.329	0.072	0.760**
组分 2	0.453	0.372	0.261	0.476	0.236	0.539*
组分 3	0.368	0.152	0.146	0.027	0.346	0.178

注:**表示极显著水平, $P<0.01$; *表示显著水平, $P<0.05$ 。下同。
**means extremely significant correlations at the 0.01 level(2-tailed);
*means significant correlations at the 0.05 level(2-tailed), the same below.

2.3.3 水稻不同生长期土壤易氧化有机碳组分与 Logistic 模型参数 a、b 的关系

对水稻不同生长期土壤易氧化有机碳组分与 Logistic 模型方程的参数 a 、 b 进行相关性分析(表 7)显示,只有苗期、分蘖期和拔节孕穗期的组分 1 有机碳与参数 a 呈极显著或显著的负相关,组分 2 和组分 3 有机碳与参数 a 没有显著的相关性。参数 b 与组分 1、组分 2 和组分 3 有机碳均没有显著的相关性。由此推知,参数 a 较大的处理,如无肥、化肥和猪粪处理的组分 1 有机碳含量在拔节孕穗期之前均小于参数 a 较小的鸡粪和稻草处理。

表 7 土壤易氧化有机碳组分与罗基斯蒂模型参数 a、b 相关性
Table 7 The correlation between soil oxidizable organic carbon and parameter a and b of Logistic model

项目	参数	苗期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗期	灌浆成熟期
组分 1	a	-0.689**	-0.591*	-0.584 *	-0.513	-0.505
	b	-0.211	-0.127	-0.178	-0.156	-0.042
组分 2	a	0.061	-0.073	-0.394	-0.141	-0.300
	b	-0.238	-0.183	-0.108	-0.070	-0.173
组分 3	a	-0.494	-0.306	0.135	0.263	0.234
	b	0.341	0.060	0.142	0.140	0.044

2.4 有机肥中易氧化有机碳含量与稻田土壤 CH₄ 累计排放量的关系

2.4.1 有机肥中易氧化有机碳与稻田土壤 CH₄ 排放量的关系

对 2011 年稻田 CH₄ 累计排放量与所施有机肥中的易氧化有机碳(组分 1、组分 2、组分 3)进行相关性分析(表 8),结果表明组分 1 有机碳与苗期、分蘖期、拔节孕穗期、抽穗期的 CH₄ 排放量均呈极显著的正相关,且与整个监测期的 CH₄ 累积排放量和组分 1 有机碳呈显著正相关,组分 2 有机碳与苗期、分蘖期、拔节孕穗期、抽穗期的 CH₄ 排放量和整个监测期的 CH₄

表 8 肥料中易氧化有机碳含量与不同时期 CH₄ 排放的相关关系
Table 8 The correlation between fertilizer oxidizable organic carbon and CH₄ accumulation emission fluxes

项目	苗期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗期	灌浆成熟期	整个监测期
组分 1	0.841**	0.903**	0.840**	0.831**	0.250	0.931**
组分 2	-0.861**	-0.816**	-0.740*	-0.757*	-0.550	-0.855**
组分 3	-0.393	-0.489	-0.284	-0.272	-0.075	-0.434

累积排放量呈显著负相关,组分 3 有机碳与 CH₄ 排放量没有显著的相关性。

2.4.2 有机肥料中易氧化有机碳与 CH₄ 累计排放量的回归方程

由表 8 可知,所施有机肥中的组分 1 和组分 2 有机碳与 CH₄ 累计排放量呈显著相关。对有机肥料中组分 1 和组分 2 有机碳与 CH₄ 累计排放量模拟值(L)进行逐步回归分析,最终排除自变量组分 2 有机碳,得到的最优回归方程为:

$$L=4.053X_1-566.116$$

式中: X_1 为组分 1 有机碳含量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; L 为 CH₄ 累积排放量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

该方程的 $F=37.537$, $P<0.01$,说明 L 关于 X_1 的回归方程非常显著,作 L 关于 X_1 的通路分析是有意义的。

组分 1 有机碳对 CH₄ 累积排放量的直接通路系数为 0.918($P<0.01$),可见组分 1 有机碳对 CH₄ 累计排放量的作用主要来自其本身。通过通路分析表明,决定系数 $R^2=0.843$,误差 e 对 Y 的通路系数即剩余因子为 0.396,说明组分 1 有机碳是影响 CH₄ 排放量的主要因素。但由于还有一些影响因素没有考虑到,仍有待继续探讨。

3 讨论

3.1 施用有机肥对 CH₄ 排放的影响

CH₄ 的产生和排放是在严格厌氧条件下产甲烷菌作用的结果,充足的产甲烷基质和适宜的产甲烷菌生长环境是 CH₄ 产生的先决条件^[18]。稻田施用有机肥不仅直接增加了土壤的碳投入,而且改变了土壤中供产甲烷菌利用的碳源和氮源的有效性,同时降低了土壤氧化还原电位(Eh),为产甲烷菌提供了有利的生长条件,从而导致 CH₄ 排放量增加^[18]。本研究连续 2 年试验结果表明,相对于不施肥处理,有机肥(稻草、鸡粪、猪粪)处理均增加了稻田 CH₄ 排放量,这和前人的研究结果基本一致^[19-20]。土壤易氧化有机碳也称活性有机碳,即土壤中有效性较高、易被土壤微生物分

解矿化、对植物养分供应有直接作用的那部分有机碳^[21],是微生物生长的速效基质,其含量高低直接影响土壤微生物的活性,从而影响温室气体的排放。Wang 等^[22]、Aerts 等^[23]、秦晓波等^[24]均指出土壤易氧化有机碳与稻田 CH₄ 排放的关系非常密切。而本试验土壤易氧化有机碳中只有组分 1 有机碳与稻田 CH₄ 排放呈极显著的正相关(土壤组分 2 有机碳与稻田 CH₄ 排放量总体呈显著相关可能是个偶然现象),试验中所施有机肥中的易氧化有机碳也只有组分 1 有机碳与稻田 CH₄ 排放的关系密切,之所以和他们的结论有差异,可能是因为所指的易氧化有机碳的具体组分有所不同。

本试验中 3 种有机肥料是等碳量施入,但呈现稻草处理 CH₄ 累积排放量最大,鸡粪处理次之,猪粪处理最小的结果。3 种有机肥中与 CH₄ 累积排放量密切相关的易氧化有机碳组分 1 含量是稻草>鸡粪>猪粪,土壤中与 CH₄ 排放量密切相关的组分 1 有机碳也是稻草>鸡粪>猪粪。这可能主要是因为 3 种有机肥中组分 1 和组分 2 有机碳含量差异导致 CH₄ 累积排放量不同。但有机肥的施用向土壤中带入了大量的易氧化有机碳,特别是组分 1 有机碳,所以更可能是猪粪、鸡粪和稻草 3 种有机肥中易氧化有机碳的差异导致猪粪、鸡粪和稻草处理的 CH₄ 累积排放量的不同。从表 4 可见,本试验 2011 年稻田 CH₄ 累积排放量高于 2010 年,一方面是因为当地 2011 年 6 月之前的几个月处于干旱状态,6 月之后则一直降雨,致使有机肥的施用推迟到 6 月 17 日,在施有机肥后的第 4 d 开始取气,第一次取气和有机肥的施用时间间隔较短,此时施入的有机肥料还未大量分解,导致前期所采集的气体 CH₄ 排放量较大,致使最终的 CH₄ 累积排放量较高;另一方面,可能是因为土壤中残存的 2010 年施入土壤中的未分解的有机碳所致。

通过组分 1、组分 2 有机碳对 CH₄ 累积排放量的通径分析可知,组分 1、组分 2 有机碳是影响稻田 CH₄ 累积排放量的主要因素,且组分 1 对 CH₄ 累积排放量的作用来自其本身,呈现显著的直接作用。组分 1 和组分 2 有机碳关于 CH₄ 累积排放量的回归方程是成立的,因而通过分析所施肥料中组分 1 和组分 2 有机碳的含量便可估计整个水稻生长季节的 CH₄ 累积排放量。

3.2 有机肥和土壤中易氧化有机碳与 CH₄ 排放

有机肥的施用能够促进稻田 CH₄ 排放,其主要原因可能是所施用的有机肥中某部分有机碳与 CH₄ 排

放密切相关。本试验的有机肥中组分 1 有机碳除与灌浆成熟期 CH₄ 排放量没有显著相关性外,与其他时期 CH₄ 排放量及整个水稻生长季的 CH₄ 累积排放总量均呈极显著的正相关。而有机肥中组分 2 有机碳除与灌浆成熟期 CH₄ 排放量没有显著相关性外,与其他时期 CH₄ 排放量及整个水稻生长季的 CH₄ 累积排放总量均呈显著或极显著的负相关。组分 3 有机碳与 CH₄ 排放量没有显著的相关性。但有机肥施入土壤后,易氧化有机碳与 CH₄ 排放量的关系发生了变化。土壤中只有组分 1 易氧化有机碳与苗期和分蘖期及整个监测时期的 CH₄ 排放量总体呈极显著的相关性,组分 2 和组分 3 有机碳与 CH₄ 排放量均无显著的相关性。

有机肥中组分 1、组分 2 有机碳与 CH₄ 累计排放量的通径分析结果表明,有机肥中组分 1 有机碳是影响稻田 CH₄ 排放量的主要因素和最直接因素,而土壤中也是组分 1 有机碳影响 CH₄ 排放量,且土壤中易氧化有机碳对 CH₄ 排放量影响的分析更能直接、准确地说明易氧化有机碳对 CH₄ 排放量的影响。因此,不同有机肥施入土壤后,与土壤之间相互作用,通过易氧化有机碳组分 1 来影响 CH₄ 排放量,且有机肥的施用向土壤中带入了大量的易氧化有机碳,可见有机肥中组分 1 有机碳的含量对 CH₄ 排放量的影响是相当重要的。有机碳之间的相互转化也是存在的,到底 3 种组分的易氧化有机碳之间如何转化,需要进一步研究。

3.3 Logistic 模型对 CH₄ 累积排放量的模拟

水稻的整个生长季节,CH₄ 排放主要集中在苗期到拔节期,其中分蘖期 CH₄ 排放占全部 CH₄ 排放的 50%左右,这与刘金剑等^[26]的研究结果一致。本研究证实罗基斯基模型能够极好的模拟稻田土壤 CH₄ 累积排放量。结合表 4 可知,从苗期到分蘖期 CH₄ 排放呈现较大斜率的直线增加趋势,在分蘖期增加速率达到最大值,之后增加速度减缓。这可能主要是由于前期土壤中易产生 CH₄ 的组分 1 有机碳含量等较高,为产甲烷菌提供了大量的碳源和能源。从苗期开始气温不断升高,植株迅速生长,分蘖期微生物活性很强,植株生长最为旺盛,具有很强的光合能力,此时又有大量的光合作用产物和根系分泌物,从而致使分蘖期各处理 CH₄ 排放量最大,CH₄ 累积排放量增加速率也最快,分蘖期后因晒田,CH₄ 排放减弱^[25-27],CH₄ 累积排放量增加速率减缓最终稳定于零增加率。另一方面,可能在水稻生长前期,各处理组分 1 有机碳被不断分解产生大量的 CH₄ 排放,至分蘖期有机肥中原有的组

分1有机碳已基本被消耗,但随着组分1有机碳被不断消耗的同时也有可能激发了土壤中某些有机碳的活性,从而致使在分蘖期后仍有少量的 CH_4 排放。因此,笔者觉得有必要研究水稻生长的不同生育期土壤中易氧化有机碳的转化关系,以进一步弄清 CH_4 排放机理。

本试验得出的罗基斯谛方程能够很好地展示各处理 CH_4 累计排放量的变化过程,方程中的参数 a 与水稻拔节孕穗期之前的 CH_4 排放量增减率呈显著正相关,与土壤中组分1有机碳含量呈显著的负相关。结合表4、表5和图1可知,模拟方程中的参数 a 值较大的处理, CH_4 排放增减率也较大,但其土壤中易氧化有机碳组分1含量会较少,如无肥、化肥和猪粪处理。反之,模拟方程中的参数 a 值较小的处理, CH_4 排放增减率也较小,但其土壤中易氧化有机碳组分1含量会较高,如鸡粪和稻草处理。而模拟方程中的参数 b 值差异不大,主要反映 CH_4 排放的总体趋势。

4 结论

(1)稻草、鸡粪和猪粪有机肥处理增加稻田 CH_4 排放,其中稻草处理的 CH_4 累积排放量最高,鸡粪处理次之,猪粪、化肥和无肥处理间没有显著的差异。

(2)Logistic模型能很好地模拟 CH_4 累积排放量动态,模拟方程中,参数 L 能极显著拟合累积排放量,参数 a 表示水稻拔节孕穗期之前的 CH_4 排放量增减率,与土壤中组分1有机碳含量密切相关,参数 b 反映 CH_4 排放的总体趋势。

(3)有机肥中有机碳组分1含量与稻田 CH_4 排放有密切关系,从土壤固碳和减排 CH_4 方面考虑,在生产实践上可先对有机肥进行处理,以尽量减少有机碳组分1向土壤的输入。

参考文献:

- [1] 王平,魏丽,杜筱玲,等. 1990—2000年中国稻田甲烷排放变化模拟[J]. 地球信息系统, 2008, 10(5): 573–577.
WANG Ping, WEI Li, DU Xiao-ling, et al. Simulating changes of methane emission from rice paddies of China, 1990—2000[J]. *Geo-Sciences Information System*, 2008, 10(5): 573–577.
- [2] IPCC, Climate Change 2007. Mitigation of climate change of working groups III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 韩广轩,朱波,江长胜,等. 川中丘陵区稻田甲烷排放及其影响因素[J]. 农村生态环境, 2005, 21(1): 1–6.
HAN Guang-xuan, ZHU Bo, JIANG Chang-sheng, et al. Methane emission from paddy fields and its affecting factors in hills of the central Sichuan Basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2005, 21(1): 1–6.
- [4] 张稳,黄耀,郑循华,等. 稻田甲烷排放模型研究—模型灵敏度分析[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1359–1366.
ZHANG Wen, HUANG Yao, ZHENG Xun-hua, et al. Modeling methane emission from rice paddies: model sensitivity analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1359–1366.
- [5] Cicerone R J, Delwiche C C, Tyler S C, et al. Methane emission from California rice paddies with varied treatments[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, 6: 233–248.
- [6] 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.
- [7] 石生伟,李玉娥,李明德,等. 不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 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 CH_4 and N_2O emission from double rice cropping system under various fertilizer regimes in Hunan Province[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2011, 35(4): 707–720.
- [8] Nugroho S G, Lumbanraja J, Suprpto H, et al. Three-year measurement of methane emission from an Indonesian paddy field[J]. *Plant and Soil*, 1996, 181: 287–293.
- [9] 陈苇,卢婉芳,段彬伍,等. 稻草还田对晚稻稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 170–176.
CHEN Wei, LU Wan-fang, DUAN Bin-wu, et al. Effect of rice straw manure on methane emission in late rice paddy fields[J]. *Acta Pedologica Science*, 2002, 39(2): 170–176.
- [10] 伍芬琳,张海林,李琳,等. 保护性耕作下双季稻田甲烷排放特征及温室效应[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9): 2703–2709.
WU Fen-lin, ZHANG Hai-lin, LI Lin, et al. Characteristics of CH_4 emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9): 2703–2709.
- [11] Bachelet D, Kern J, Tolg M. Balancing the rice carbon budget in China using a spatially-distributed data[J]. *Ecological Modeling*, 1995, 79: 167–177.
- [12] Knox J W, Matthews R B, Wassmann R. Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in Asia III. Databases[J]. *Nutrient Cycling Agroecosystem*, 2000, 58(1–3): 179–199.
- [13] Li C S, Mosier A, Wassmann R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18: GB1043, doi: 10. 1029, 2003GB002045.
- [14] Huang Y, Sass R L, Fisher F M. A semi-empirical model of methane emission from flooded rice paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 247–268.
- [15] 王效科,欧阳志云,苗鸿. DNDC模型在长江三角洲农田生态系统的 CH_4 和 N_2O 排放量估算中的应用[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 15–19.
WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong. Application of

- DNDC Model in estimation of CH_4 and N_2O emission in agricultural ecosystems in Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(3): 15–19.
- [16] 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. DNDC 模型对川中丘陵区稻田 CH_4 、 N_2O 排放的模拟对比分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(6–7): 1003–1010.
- SUN Yuan-yuan, SUN Yong-jian, WANG Rui-ting, et al. Research of tillage-cropping systems on CH_4 and N_2O emission from permanently flooded rice fields in a central Sichuan hilly area of Southwest China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(6–7): 1003–1010.
- [17] Zheng Xun-hua, Wang Ming-xing, Wang Yue-si, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. *Advances Atmospheres Science*, 1998, 15(4): 569–579.
- [18] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1995, 46: 1459–1466.
- [19] 马 静, 徐 华, 蔡祖聪. 施肥对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤, 2010, 42(2): 153–163.
- MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong. Effect of fertilization on methane emissions from rice fields[J]. *Soils*, 2010, 42(2): 153–163.
- [20] Setyanto P, Makarim A K, Fagi A M, et al. Crop management affecting methane emissions from irrigated and rainfed rice in Central Java (Indonesia)[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 85–93.
- [21] 焦 燕, 黄 耀, 宗良纲, 等. 有机肥施用、土壤有效铜和氮素对稻田甲烷排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 563–569.
- JIAO Yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Methane emission from paddy soils as Influenced by application of organic manure, soil available copper and nitrogen[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 563–569.
- [22] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 513–519.
- WANG Qing-kui, WANG Si-long, FENG Zong-wei, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 513–519.
- [23] Wang Z P, Delaue R D. Methane production from anaerobic soil amended with rice straw and nitrogen fertilizer [J]. *Fertilizer Research*, 1992, 33: 115–121.
- [24] Aerts R, Ludwig F. Water-table changes and nutritional status affect trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1997, 29: 1691–1698.
- [25] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 长期施肥对湖南稻田甲烷排放的影响[J]. 中国农业气象, 2006, 27(1): 19–22.
- QIN Xiao-bo, LI Yu-e, LIU Ke-ying, et al. The effect of long-term fertilization treatment on methane emission from rice fields in Hunan[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(1): 19–22.
- [26] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻稻田 CH_4 的排放[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2878–2886.
- LIU Jin-jian, WU Ping-ping, XIE Xiao-li. Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2878–2886.
- [27] 韩广轩, 朱 波, 高美荣, 等. 中国稻田甲烷排放研究进展[J]. 西南农业学报, 2003, 16: 49–54.
- HAN Guang-xuan, ZHU Bo, GAO Mei-rong, et al. Research progress on methane emission from rice field in China[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2003, 16: 49–54.
- [28] 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(7): 7–12.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(7): 7–12.