

# 猪粪沼液施用对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放及温室效应的影响

孙国峰 郑建初 陈留根 何加骏 张岳芳

(江苏省农业科学院 农业资源与环境研究所/循环农业研究中心,南京 210014)

**摘要** 为解决规模养殖废弃物超排引起环境污染严重且资源大量浪费的问题,采用静态箱-气相色谱法,研究猪粪、沼液替代化肥条件下稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放特征,并运用全球增温潜势(GWP)的方法对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的温室效应进行估算。研究表明:与常规施肥相比,尽管猪粪替代化肥措施均显著( $P < 0.05$ )降低稻田 N<sub>2</sub>O 排放,但以 100%或 50%猪粪替代化肥处理仍显著( $P < 0.05$ )增加了稻田 GWP 及单位产量的 GWP,分别提高了 385.5%、218.2%和 422.4%、228.4%,主要是由于猪粪替代化肥处理不仅改变了 CH<sub>4</sub> 排放规律,还显著增加了( $P < 0.05$ )稻田 CH<sub>4</sub> 排放。而采用 100%或 50%沼液替代化肥措施减少了稻田 GWP 及单位产量的 GWP,分别降低了 27.8%、15.4%和 29.5%、18.8%,主要是由于沼液替代化肥处理显著降低了( $P < 0.05$ )稻田 N<sub>2</sub>O 排放。就综合温室效应而言,采用沼液替代化肥能够有效降低养殖排泄物稻田施用产生的温室效应。

**关键词** 猪粪; 沼液; 化肥; 稻田; 温室气体

中图分类号 S 141.2; S 511.6

文章编号 1007-4333(2012)05-0124-08

文献标志码 A

## Effects of pig manure and biogas slurry application on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and their greenhouse effects on paddy field

SUN Guo-feng, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, HE Jia-jun, ZHANG Yue-fang

(Institute of Agricultural Resources and Environments/Circular Agriculture Research Center,

Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract** In order to treat waste superovulation by the large-scale cultivation in Jiangsu Province, which may cause serious environmental pollution and a massive waste of nutrient resource, emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from the paddy fields were measured in situ by using the method of static chambers and gas chromatographic techniques, and the greenhouse effect of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O was assessed by using global warming potential (GWP). The field experiment results clearly demonstrated that the GWP and GWP per unit yield were significantly increased by 385.5% and 422.4% under pig manure (100% PM) treatment, and by 218.2% and 228.4% under half pig manure and half chemical fertilizer (50% PM) treatment compared to chemical fertilizer (NPK) treatment, respectively. This can be explained that the value of CH<sub>4</sub> emission from 100% PM and 50% PM treatments was significantly greater than that from NPK treatment, although the emissions of N<sub>2</sub>O from the paddy fields were significantly lower for 100% PM and 50% PM than that for NPK treatment. While, compared with NPK treatment, the values of GWP and GWP per unit yield were decreased by 27.8% and 29.5% under biogas slurry (100% PS) treatment, and by 15.4% and 18.8% under half biogas slurry and half chemical fertilizer (50% PS) treatment, respectively. Mainly for the reason that lower N<sub>2</sub>O emissions were obtained under 100% PS and 50% PS treatments compared with NPK treatment. As far as GWP, lower greenhouse effects are obtained in 100% PS and 50% PS treatments, while the breeding waste is reused in paddy fields in the rice-wheat rotation system.

**Key words** pig manure; biogas slurry; chemical fertilizer; paddy fields; greenhouse gas

收稿日期: 2012-04-05

基金项目: 国家十二科技支撑计划(2012BAD14B12)

第一作者: 孙国峰, 助理研究员, 博士, 主要从事农业生态与农牧结合研究, E-mail: sgf515@163.com

通讯作者: 郑建初, 研究员, 主要从事农业生态研究, E-mail: zjc@jaas.ac.cn

甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)是2种重要的温室气体,其单位分子质量在100年的时间内全球增温潜势分别是CO<sub>2</sub>的25倍和298倍,对温室效应的贡献约为14.3%和7.9%<sup>[1]</sup>,并分别以每年0.6%和0.2%~0.3%的速率增长<sup>[2]</sup>。稻田是重要的CH<sub>4</sub>排放源,年排放量约为31~112 Tg,占全球总排放量的5%~19%<sup>[1]</sup>;同时也是N<sub>2</sub>O的重要排放源,特别是烤田期N<sub>2</sub>O排放尤为显著<sup>[3-4]</sup>。除了气候条件和土壤特性外,农业管理措施如施肥、水分管理方式、种植制度和耕作方式等<sup>[4-6]</sup>,也是影响农田土壤温室气体排放的重要因素。据报道,化学氮肥的施用每年产生N<sub>2</sub>O约1.5×10<sup>6</sup> t,占人类活动向大气输入N<sub>2</sub>O-N量的44%和每年向大气输入N<sub>2</sub>O-N总量的13%<sup>[7]</sup>。

随着我国畜禽规模化养殖程度的快速发展,畜禽粪便的集中排放量已高达每年3.2×10<sup>9</sup> t<sup>[8]</sup>,成为农业面源污染的重要来源之一。为此,以畜禽粪便为原料的沼气工程的数量也不断增加,每年沼液排放量高达1.3亿t<sup>[9]</sup>。猪粪、沼液含有丰富的营养物质,将其作为肥料施用是畜禽粪便处理的主要途径<sup>[10]</sup>,这不仅有利于养殖废弃物资源化利用,还可大量节省化肥和减少由于生产化肥而造成的CO<sub>2</sub>排放,对促进农牧系统低碳技术发展意义重大。关于施用有机肥对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响,已有较多报道,有研究表明<sup>[3,6,11-12]</sup>,施用有机肥会向稻田提供更多的CH<sub>4</sub>前体,进而增加土壤中CH<sub>4</sub>的产生与排放,且不同有机肥种类、用量及腐熟程度也可导致不同的CH<sub>4</sub>排放。施用有机肥对稻田N<sub>2</sub>O排放的影响尚不明确<sup>[13-14]</sup>。一方面,有机肥中的氮是产生N<sub>2</sub>O的重要来源之一<sup>[1]</sup>;另一方面,施用的有机肥分解过程中会同化土壤速效氮并促进N<sub>2</sub>O转化为N<sub>2</sub>的反硝化过程,从而减少N<sub>2</sub>O排

放<sup>[15]</sup>。关于猪粪、沼液施用对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响报道较少,很少考虑等氮量条件下猪粪、沼液替代化肥施用后水旱轮作稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的综合温室效应。本研究以麦茬稻田为研究对象,采用静态箱-气相色谱法,研究猪粪、沼液替代化肥下稻季CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放特征及其全球增温潜势,旨在为农牧结合循环低碳农业技术推广应用提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验于2011年6月—10月在江苏省农业科学院六合实验基地(32°29′N,118°36′E,海拔18 m)进行。该区属北亚热带季风湿润气候区,气候温和、四季分明,年平均温度15.3℃,年平均降雨量970 mm,年日照时数2 200 h,年平均无霜期215 d,该区主要为小麦-水稻两熟制。

试验田土壤类型属黄棕壤发育的马肝土,耕层土壤质地为重壤土。试验前耕层(0~20 cm)土壤容重1.48 g/cm<sup>3</sup>,有机质12.1 g/kg,全氮0.91 g/kg,全磷0.55 g/kg,速效钾105.6 mg/kg,pH 6.4 (V(水):m(土)=2.5:1)

### 1.2 试验设计

采用随机区组设计,根据猪粪、沼液替代化肥2个因素,设置等量氮条件下1)常规施肥(NPK);2)50%猪粪+50%化肥(50%PM);3)100%猪粪(100%PM);4)50%沼液+50%化肥(50%PS);5)100%沼液(100%PS)5个处理,具体操作方式见表1。每个处理3次重复,小区面积4 m×5 m,小区间田埂宽为0.5 m。稻季施纯氮300 kg/hm<sup>2</sup>,磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O)均为150 kg/hm<sup>2</sup>,以常规施肥为对照,各处理均施用等量氮。根据测定的猪粪(含N

表1 试验处理、氮肥来源及其施用方法

Table 1 Treatments codes, sources of nitrogen and methods of operation during the rice season

处 理	氮肥来源	施用方法
NPK	100%尿素	按基肥: 蘖肥: 穗肥比例为4:2:4,分3次撒施纯N 300 kg/hm <sup>2</sup> 。
50%PM	50%猪粪,50%尿素	施氮量同NPK,其中:50%猪粪作基肥;10%尿素作蘖肥;40%尿素作穗肥。
100%PM	100%猪粪	施氮量同NPK,其中:猪粪按基肥:穗肥比例为6:4,分2次撒施。
50%PS	50%沼液,50%尿素	施氮量同NPK,其中:40%沼液作基肥;10%沼液+10%尿素作蘖肥;40%尿素作穗肥。
100%PS	100%沼液	施氮量同NPK,其中:按基肥: 蘖肥: 穗肥比例为4:2:4,分3次撒施。

1.66%、 $P_2O_5$  2.66%、 $K_2O$  1.35%)和沼液(平均含N 0.34%、 $P_2O_5$  0.03%、 $K_2O$  0.14%)养分含量,按氮含量计算100%猪粪处理猪粪施用量为18.05 t/hm<sup>2</sup>(干重)和100%沼液处理沼液施用量为882.40 t/hm<sup>2</sup>,磷钾肥不足时分别用过磷酸钙(12%)和氯化钾(60%)补齐。氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥比例4:2:4施用,磷肥于耕作前作基肥1次撒施,钾肥作基肥和穗肥施用2次,每次50%。

供试水稻材料为大面积生产上的主推品种南粳44,采用常规早育秧,5月18日落谷,6月21日人工插秧移栽(移栽规格为行距26.6 cm,株距13.3 cm,每穴2~3株),10月25日收获,生长期126 d。水稻生长期水分管理采用前期浅水(6月21日—7月30日)、中期烤田(7月31日—8月12日)、后期浅水-间歇灌溉(8月13日—10月10日)的管理模式。采集气体时水层深度及地表温度详见图1。其他田间管理措施同一般高产大田。

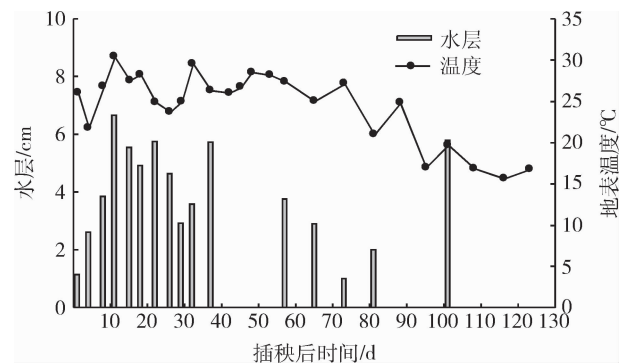


图1 稻田水层与地表温度的变化

Fig. 1 Water layer and soil surface temperature during the rice season

### 1.3 气体采集与分析

采用静态箱-气相色谱法测定。静态箱底横截面积为0.5 m<sup>2</sup>×0.5 m<sup>2</sup>,采样箱由PVC材质制成,箱体高度随水稻高度而增加(拔节前0.5 m、拔节后1.1 m),采样箱外部包有海绵和铝箔纸,防止太阳照射导致箱内温度变化过大。采气样前将采样箱垂直安放在底座5 cm深的凹槽内并加水密封,打开采样箱内顶部风扇以充分混匀箱内气体,连续观测30 min,每间隔10 min抽取观测箱内气体样品,用于分析CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O浓度。采样时间在上午8:00~11:00,每周采集1次样品,施肥后加测2次。CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O气体浓度由经改装的Agilent 7890A气相色谱测定,CH<sub>4</sub>检测器为FID,检测温度300℃,柱温60

℃,载气为99.999%高纯氮气,流速30 mL/min;N<sub>2</sub>O检测器为ECD,检测温度300℃,柱温60℃,载气为99.999%高纯氩甲烷气(95%氩气+5%甲烷),流速40 mL/min。

### 1.4 数据分析与处理

气体排放通量计算公式为

$$F = \rho \times h \times \frac{d_c}{d_t} \times \frac{273}{273 + \theta} \quad (1)$$

式中: $F$ 为气体排放通量,mg/(m<sup>2</sup>·h); $\rho$ 为标准状态下气体的密度,kg/m<sup>3</sup>;  $h$ 为采样箱的净高度,m; $d_c/d_t$ 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率,h<sup>-1</sup>;273为气态方程常数; $\theta$ 为采样过程中采样箱内的平均温度,℃。

气体累积排放量计算公式为

$$E_c = \sum_{i=1}^n \left( \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中: $E_c$ 为气体累积排放量,g/hm<sup>2</sup>;  $F$ 为气体排放通量,mg/(m<sup>2</sup>·h); $t_{i+1}-t_i$ 为第*i*和*i+1*次采样的时间间隔,d; $n$ 为观测期间总测定次数。

采用SPSS10.0软件进行数据分析与处理,处理间多重比较用LSD法。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻田CH<sub>4</sub>排放特征

稻田CH<sub>4</sub>排放主要集中于水稻分蘖期(移栽后40 d内),后期CH<sub>4</sub>排放较少(图2)。各处理在插秧几天后CH<sub>4</sub>排放就快速增加,至烤田前5 d左右出现CH<sub>4</sub>排放最高峰,其排放峰值呈现为100%PM>50%PM>50%PS>NPK>100%PS的规律。主要是由于施用的猪粪中含有丰富的有机物质,提供了大量的CH<sub>4</sub>前体,进而在连续淹水极端厌氧条件下增加了土壤中CH<sub>4</sub>产生与排放。烤田开始后,常规施肥、50%沼液和100%沼液替代化肥处理CH<sub>4</sub>排放持续偏低(图2(a))。而覆水后100%猪粪和50%猪粪替代化肥处理再次出现CH<sub>4</sub>排放小高峰,其排放峰值也呈现为100%PM>50%PM>NPK的规律(图2(b))。主要是由于施用穗肥使100%猪粪处理增加了总氮量的40%猪粪,也使50%猪粪替代化肥处理补充了总氮量的40%尿素,促使基施猪粪中尚未分解完全的有机物质继续分解,进而增加了CH<sub>4</sub>排放。可见,50%沼液和100%沼液替代化肥处理CH<sub>4</sub>排放规律与常规施肥处理一致,呈明显的单峰型;而50%猪粪和100%猪

粪替代化肥处理改变了 CH<sub>4</sub> 排放规律,呈偏双峰型。

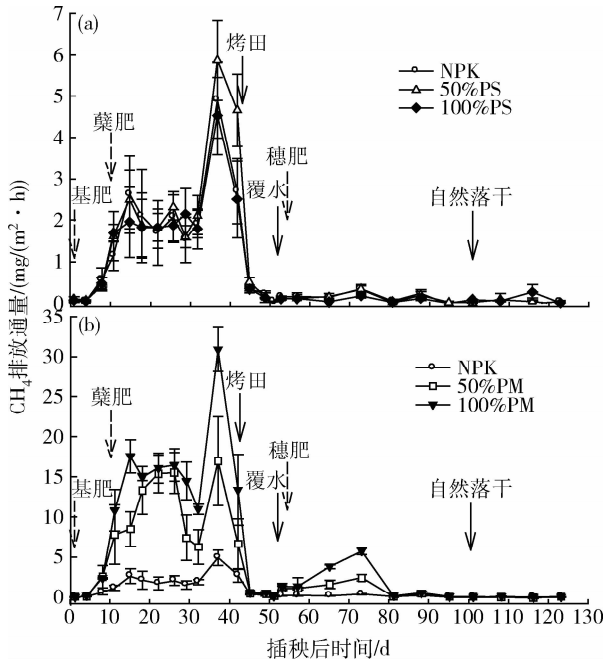


图2 稻季沼液(a)和猪粪(b)替代化肥处理 CH<sub>4</sub> 排放通量的变化特征

Fig. 2 Variation of CH<sub>4</sub> emission under chemical fertilizers substitution by biogas slurry (a) and pig manure (b) treatments during the rice season

具体来看,常规施肥处理 CH<sub>4</sub> 排放通量为 -0.05~4.91 mg/(m<sup>2</sup>·h),均值为 0.74 mg/(m<sup>2</sup>·h);50%猪粪替代化肥处理 CH<sub>4</sub> 排放通量为 -0.10~16.95 mg/(m<sup>2</sup>·h),均值为 3.45 mg/(m<sup>2</sup>·h);100%猪粪替代化肥处理 CH<sub>4</sub> 排放通量为 -0.01~30.91 mg/(m<sup>2</sup>·h),均值为 5.36 mg/(m<sup>2</sup>·h);50%沼液替代化肥处理 CH<sub>4</sub> 排放通量为 -0.02~5.87 mg/(m<sup>2</sup>·h),均值为 0.86 mg/(m<sup>2</sup>·h);100%沼液处理 CH<sub>4</sub> 排放通量为 -0.02~4.52 mg/(m<sup>2</sup>·h),均值为 0.71 mg/(m<sup>2</sup>·h)。可见,稻田 CH<sub>4</sub> 平均排放通量以 100%猪粪处理最高,50%猪粪替代化肥处理次之,均显著( $P < 0.05$ )高于常规施肥处理;而 100%沼液、50%沼液替代化肥与常规施肥处理间差异不显著。

### 2.2 稻田 N<sub>2</sub>O 排放特征

稻田 N<sub>2</sub>O 排放主要集中于水稻烤田期,以及干湿交替和落干期,前期 N<sub>2</sub>O 排放较少(图 3)。常规施肥处理 N<sub>2</sub>O 排放呈明显的双峰型,分别发生在烤田期和穗肥施用后间歇灌溉初期,主要是由于基肥

和穗肥施用后土壤氮素含量较高,干湿交替的水分管理措施(图 1)激发了 N<sub>2</sub>O 的产生与排放。50%沼液和 100%沼液替代化肥处理在烤田期也出现一个较小的 N<sub>2</sub>O 排放峰,伴随水稻生长后期干湿交替的水分管理,N<sub>2</sub>O 排放又呈增加趋势(图 3(a));而 50%猪粪和 100%猪粪替代化肥处理未发现明显的排放峰(图 3(b)),分析是由于猪粪分解过程中微生物吸收同化无机氮,使土壤无机氮含量下降,减少了 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[14]</sup>。

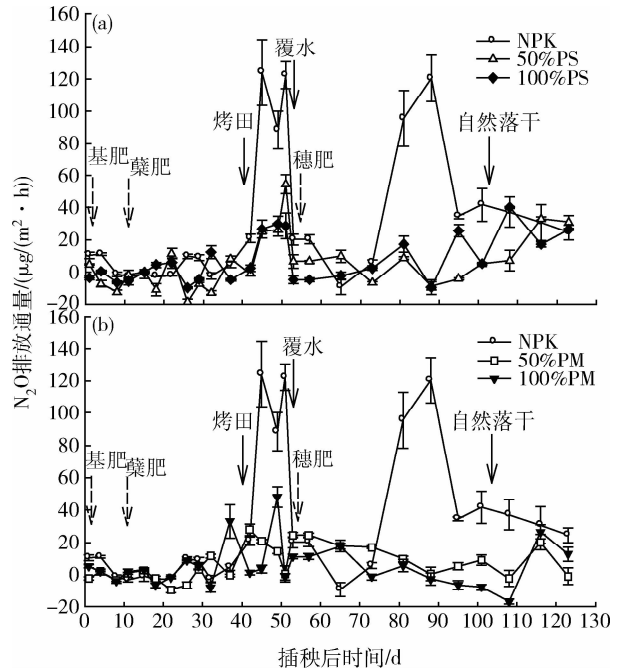


图3 稻季沼液(a)和猪粪(b)替代化肥处理 N<sub>2</sub>O 排放通量的变化特征

Fig. 3 Variation of N<sub>2</sub>O emission under chemical fertilizers substitution by biogas slurry (a) and pig manure (b) treatments during the rice season

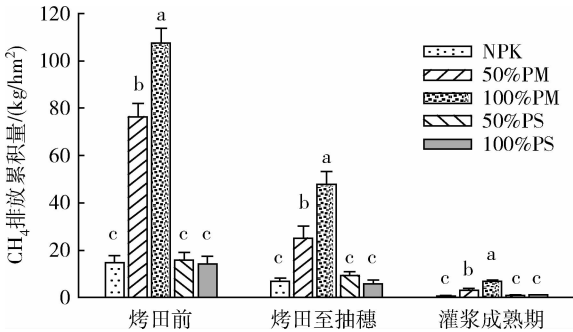
具体来看,常规施肥处理 N<sub>2</sub>O 排放通量为 -9.20~124.05 µg/(m<sup>2</sup>·h),均值为 31.78 µg/(m<sup>2</sup>·h);50%猪粪替代化肥处理 N<sub>2</sub>O 排放通量为 -9.26~27.81 µg/(m<sup>2</sup>·h),均值为 8.09 µg/(m<sup>2</sup>·h);100%猪粪替代化肥处理 N<sub>2</sub>O 排放通量为 -16.84~48.08 µg/(m<sup>2</sup>·h),均值为 5.19 µg/(m<sup>2</sup>·h);50%沼液替代化肥处理 N<sub>2</sub>O 排放通量为 -18.52~54.48 µg/(m<sup>2</sup>·h),均值为 6.62 µg/(m<sup>2</sup>·h);100%沼液处理 N<sub>2</sub>O 排放通量为 -9.66~39.92 µg/(m<sup>2</sup>·h),均值为 8.26 µg/(m<sup>2</sup>·h)。可见,猪粪、沼液替代化肥处理较常规施肥处理均显著

( $P < 0.05$ )降低稻田  $N_2O$  排放通量,其中,100%猪粪替代化肥处理  $N_2O$  平均排放通量最低。

### 2.3 水稻不同时期 $CH_4$ 、 $N_2O$ 排放累积量

为了进一步分析比较猪粪、沼液替代化肥后稻田  $CH_4$ 、 $N_2O$  排放的差异,根据稻田水分管理方式及水稻生育时期,将水稻全生育期(大田生长期)分为烤田前、烤田至抽穗和灌浆成熟期3个阶段。

如图4所示,不同时期各处理  $CH_4$  排放累积量均表现为烤田前 > 烤田至抽穗 > 灌浆成熟期,说明稻田  $CH_4$  排放量主要集中在烤田前,约占水稻生育期内  $CH_4$  排放总量的60%以上,其中50%猪粪替代化肥处理最高,为73.07%,50%沼液替代化肥处理最低,为60.01%。这主要是受水分管理控制的原因,连续淹水(图1)形成  $CH_4$  产生所需的极端厌氧条件。各时期稻田  $CH_4$  排放累积量呈现相同的规律,即烤田前、烤田至抽穗和灌浆成熟期3个时期  $CH_4$  排放累积量均以100%猪粪处理最高,50%猪粪替代化肥处理次之,均显著( $P < 0.05$ )高于常规施肥处理,分别增加了92.64、40.90、6.14和61.64、18.06、2.48  $kg/hm^2$ ,这主要与猪粪施用提供了大量的  $CH_4$  前体有关;而100%沼液、50%沼液替代化肥处理与常规施肥处理间差异均不显著。



不同小写字母分别表示不同处理间的差异达显著水平( $P < 0.05$ )。下同。

图4 不同时期  $CH_4$  排放累积量

Fig. 4 Accumulation of  $CH_4$  emission at different growth stages under different treatments during the rice season

如图5所示,50%沼液、100%沼液替代化肥和常规施肥处理各时期  $N_2O$  排放累积量呈烤田前 < 烤田至抽穗 < 灌浆成熟期的规律;而50%猪粪、100%猪粪替代化肥处理  $N_2O$  排放累积量表现为烤田前 < 灌浆成熟期 < 烤田至抽穗的规律。具体来看,各处理烤田前几乎无  $N_2O$  排放,主要是由于稻

田自移栽至烤田前采用连续浅水灌溉,基本处于淹水状态的缘故。与常规施肥处理相比,50%猪粪、100%猪粪、50%沼液和100%沼液替代化肥处理均显著( $P < 0.05$ )降低了烤田至抽穗和灌浆成熟期  $N_2O$  排放累积量,分别减少了122.44、165.69、184.24、235.94和570.63、638.39、512.22、449.07  $g/hm^2$ ,其中,在烤田至抽穗阶段,100%沼液替代化肥处理  $N_2O$  排放累积量显著( $P < 0.05$ )低于50%猪粪替代化肥处理;在灌浆成熟期,100%猪粪处理显著( $P < 0.05$ )低于50%沼液和100%沼液替代化肥处理,可能与水稻生长后期100%猪粪处理土壤无机氮含量较低有关。

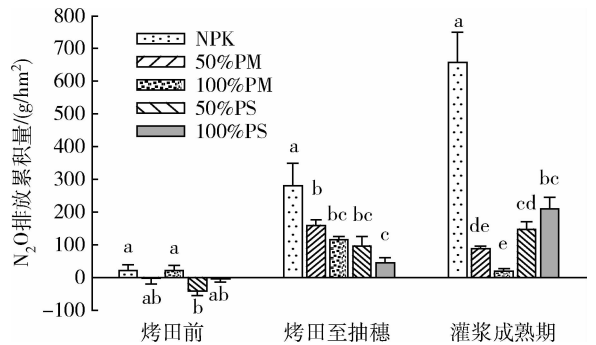


图5 不同时期  $N_2O$  排放累积量

Fig. 5 Accumulation of  $N_2O$  emission at different growth stages under different treatments during the rice season

### 2.4 稻季 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放总量及其全球增温潜势

由表2可知,50%猪粪、100%猪粪替代化肥处理较常规施肥处理均显著( $P < 0.05$ )提高了稻田  $CH_4$  排放总量,分别增加了82.18和139.68  $kg/hm^2$ ,而50%沼液、100%沼液替代化肥处理与常规施肥处理间  $CH_4$  排放差异不显著。同时,50%猪粪、100%猪粪和50%沼液、100%沼液替代化肥处理较常规施肥处理均显著( $P < 0.05$ )降低了稻田  $N_2O$  排放总量,分别减少了716.55、804.16和760.88、711.48  $g/hm^2$ 。在全球增温潜势(GWP)方面,50%猪粪、100%猪粪替代化肥处理显著( $P < 0.05$ )高于常规施肥处理,50%沼液、100%沼液替代化肥处理较常规施肥处理均降低了稻田 GWP,但处理间差异不显著。主要是由于猪粪替代化肥处理显著( $P < 0.05$ )提高了稻田排放  $CH_4$  产生的 GWP,尽管猪粪、沼液替代化肥处理显著( $P < 0.05$ )降低了稻田排放  $N_2O$  产生的 GWP。可见,稻田以排放  $CH_4$

表2 不同处理排放 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势Table 2 Effects of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions under different treatments on global warming potential (GWP)

处理	CH <sub>4</sub> 排放总量/ N <sub>2</sub> O 排放总量/		100 年的全球增温潜势(GWP)			水稻产量/ (kg/hm <sup>2</sup> )	单位产量的 GWP (CO <sub>2</sub> )/(kg/t)
	(kg/hm <sup>2</sup> )	(g/hm <sup>2</sup> )	CH <sub>4</sub> (CO <sub>2</sub> )/ (kg/hm <sup>2</sup> )	N <sub>2</sub> O (CO <sub>2</sub> )/ (kg/hm <sup>2</sup> )	总计 (CO <sub>2</sub> )/ (kg/hm <sup>2</sup> )		
NPK	22.29 c	961.12 a	557.28 c	286.42 a	843.70 c	9 905.0 a	85.18 c
50%PM	104.47 b	244.57 b	2 611.82 b	72.88 b	2 684.71 b	9 596.5 a	279.76 b
100%PM	161.97 a	156.96 b	4 049.48 a	46.77 b	4 096.25 a	9 204.6 b	445.02 a
50%PS	26.16 c	200.24 b	653.97 c	59.67 b	713.64 c	10 321.8 a	69.14 c
100%PS	21.39 c	249.64 b	534.69 c	74.39 b	609.08 c	10 146.7 a	60.03 c

注:不同小写字母分别表示不同处理间的差异达显著水平( $P < 0.05$ )。

产生的 GWP 为主。单位产量的 GWP 呈现为 100%PM>50%PM>NPK>50%PS>100%PS 的规律,其中,100%猪粪和 50%猪粪替代化肥处理显著( $P < 0.05$ )高于其他处理,分析主要与各处理排放 CH<sub>4</sub> 产生的 GWP 有关。

### 3 讨论

1)稻田作为 CH<sub>4</sub> 的重要排放源,其 CH<sub>4</sub> 排放主要集中在烤田前的淹水阶段<sup>[11-13]</sup>。有机物料的施用也是影响稻田 CH<sub>4</sub> 排放的一个重要因素。常规施肥条件下,施用有机肥会促进 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[12,16]</sup>。本研究中等氮量猪粪替代化肥较常规施肥处理显著( $P < 0.05$ )增加了烤田前 CH<sub>4</sub> 排放,这与前人<sup>[17]</sup>研究结果相似。主要是由于施用的猪粪中含有大量有机物质,提供了大量的 CH<sub>4</sub> 前体,进而增加稻田土壤中 CH<sub>4</sub> 产生与排放<sup>[3,12]</sup>。穗肥施用后,猪粪替代化肥处理再次出现 CH<sub>4</sub> 排放小高峰,即整个水稻生育期呈偏双峰型,这与刘晓雨等<sup>[16]</sup>在太湖地区稻油轮作模式下稻田 CH<sub>4</sub> 排放规律相似,主要受淹水-烤田-淹水-间歇灌溉的水分管理方式的影响。其中,100%猪粪处理烤田覆水后 CH<sub>4</sub> 排放峰值仅为烤田前最高峰值的 18.4%,尽管穗肥施用了总氮量的 40%猪粪。主要是由于烤田期间产 CH<sub>4</sub> 菌活性受损,同时,水稻生长后期的生理活动减弱,使 CH<sub>4</sub> 的传输能力下降,导致 CH<sub>4</sub> 排放较少。

2)与稻田 CH<sub>4</sub> 排放相反,稻田反复干湿交替会较大的促进 N<sub>2</sub>O 的产生与排放<sup>[5]</sup>。常规施肥稻田 N<sub>2</sub>O 排放高峰主要出现在烤田期及穗肥施用后间歇灌溉期,这与前人研究结果相似<sup>[14]</sup>。增施有机肥对稻田 N<sub>2</sub>O 排放的影响尚不明确<sup>[12-14]</sup>。本研究中

等氮量猪粪替代化肥处理未出现明显的 N<sub>2</sub>O 排放峰值,较常规施肥处理显著( $P < 0.05$ )降低了水稻整个生育期 N<sub>2</sub>O 排放总量。主要是由于猪粪分解过程中微生物吸收同化无机氮,使土壤无机氮含量下降(如 50%猪粪和 100%猪粪替代化肥较常规施肥处理均显著( $P < 0.01$ )降低了烤田期土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量,分别降低了 54.8%和 58.3%,同时还降低了土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量,未达到 5%显著水平);同时,还为反硝化细菌提供能量,促使 N<sub>2</sub>O 进一步还原为 N<sub>2</sub>,进而减少了 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[15,18]</sup>。由此可见,等氮量猪粪替代化肥施用后,CH<sub>4</sub> 是稻田排放的主要温室气体,而 N<sub>2</sub>O 对整个水稻生育期的温室效应贡献很少,仅占 1.14%~2.71%,采用水分管理方式转变能够有效降低稻田排放 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 产生的 GWP。

3)就综合温室效应而言,一方面,猪粪替代化肥措施能够减少由于生产化肥而造成的碳排放,West 等<sup>[19]</sup>指出每生产 1 t 纯 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 的碳排放分别为 0.814、0.110 和 0.075 t C。另一方面,猪粪施用还能够有效提高土壤有机碳含量,促进水稳性团粒结构的形成,可以加快土壤有机碳积累速率,增强土壤固碳效应<sup>[20]</sup>。另外,将规模养殖废弃物作为肥料进行农田回用是畜禽粪便处理的主要途径,这既可避免直接排放引起水体富营养化的环境污染问题,还可减少规模养殖场引起的污水环境直接和间接温室气体排放<sup>[21]</sup>。因而,养殖废弃物替代化肥措施对促进农牧系统循环低碳技术发展意义重大。

4)本研究中 50%沼液和 100%沼液替代化肥处理并未影响稻田 CH<sub>4</sub> 季节性排放规律,呈明显的单峰型,且 CH<sub>4</sub> 排放总量与常规施肥处理间差异也不显著。主要是经过长时间的厌氧发酵,沼液中易分

解有机物质含量较低,不易引起稻田  $\text{CH}_4$  的大量排放。已有研究表明,有机物料转化  $\text{CH}_4$  的能力与自身腐熟程度关系密切相关,如正确使用已充分发酵的有机肥(如沼渣、菌渣)能较大程度的降低稻田  $\text{CH}_4$  排放量<sup>[22-23]</sup>。与此同时,等氮量沼液替代化肥较常规施肥处理显著( $P < 0.05$ )降低了水稻整个生育期  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量,进而降低了稻田综合温室效应。这与李松林<sup>[24]</sup> 研究结果相似,可能与沼液中速效养分含量较高有关,其中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量占总氮量的 70% 以上<sup>[9]</sup>。而黄红英等<sup>[25]</sup> 研究认为,100% 沼液替代化肥较常规施肥处理( $240 \text{ kg}/\text{hm}^2$ )增加了稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量。分析可能与土壤性质、沼液养分含量及施用量与时期、水分管理方式等因素有关<sup>[21]</sup>。因而,采用腐熟完全的有机肥(如沼液)替代化肥也是减少规模养殖排泄物稻田回用产生的综合温室效应的重要途径之一。

#### 4 结 论

稻田  $\text{CH}_4$  排放主要发生在烤田前, $\text{N}_2\text{O}$  排放主要发生在烤田期和穗肥施用后间歇灌溉期。与常规施肥相比,采用猪粪替代化肥措施不仅改变了稻田  $\text{CH}_4$  排放规律,呈偏双峰型,且显著( $P < 0.05$ )增加了  $\text{CH}_4$  排放通量;而采用沼液替代化肥措施并未影响稻田  $\text{CH}_4$  排放规律,呈单峰型,且  $\text{CH}_4$  排放通量差异也不显著。与此同时,猪粪、沼液替代化肥措施较常规施肥均显著( $P < 0.05$ )降低了稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放。

稻田以排放  $\text{CH}_4$  产生的 GWP 为主。与常规施肥相比,猪粪替代化肥处理显著( $P < 0.05$ )增加了 GWP 及单位产量的 GWP,主要是由于猪粪替代化肥处理显著( $P < 0.05$ )增加了  $\text{CH}_4$  排放产生的 GWP。而沼液替代化肥处理 GWP 及单位产量的 GWP 略有降低,但差异不显著。可见,本试验条件下猪粪替代化肥措施显著增加了稻田  $\text{CH}_4$  排放所形成的温室效应,而沼液替代化肥措施未增加稻田综合温室效应。然而,本研究仅仅探讨了田块尺度猪粪和沼液替代氮肥对 GWP 的影响,下一步将从整个生命周期(LCA)的角度来研究上述替代措施对整个系统的 GWP 的影响。

#### 参 考 文 献

[1] IPCC. Climate change 2007: Changes in atmospheric

constituents and in radiative forcing [R/OL]. (2007-11-17) [2009-12-28]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>.

- [2] Simpson L J, Edward G C, Thurtell G W. Variations in methane and nitrous oxide mixing ratios at the southern boundary of a Canadian boreal forest [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 1141-1150
- [3] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7-12
- [4] 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 等. 麦秸还田与土壤耕作对稻季  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2334-2338
- [5] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, et al. Quantifying direct  $\text{N}_2\text{O}$  emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 8030-8042
- [6] 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 等. 中国稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放及减排整合分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2923-2936
- [7] 邹建文, 黄耀. 农业管理措施对  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 农村生态环境, 2002, 18(1): 46-49
- [8] 姚丽贤, 李国良, 党志. 集约化养殖禽畜中主要化学物质调查[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1989-1992
- [9] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 等. 江苏大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. 农业工程学报, 2010, 27(1): 291-296
- [10] 贺国强, 邓志平, 刘展志, 等. 菌剂、沼液及其复配配玉米经济性状和产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(4): 24-29
- [11] Wassmann R, Buendia L V, Lantier R S, et al. Mechanisms of crop management impact on methane emissions from rice fields in Los Baños, Philippines [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 58: 107-119
- [12] 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[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143-148
- [13] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Mitigation options for methane, nitrous oxide and nitric oxide emissions from agricultural ecosystems [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17: 83-92
- [14] Pathak H, Bhatia A, Prasad S, et al. Emission of nitrous oxide from rice-wheat systems of Indo-Gangetic plains of India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2002, 77: 163-178
- [15] Azam F, Muller C, Benckiser G, et al. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide-role of oxidizable carbon and applied nitrogen [J]. Biology Fertility of Soils, 2002, 35: 54-61
- [16] 刘晓雨, 李志鹏, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1783-1790
- [17] 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
- [18] 邹国元, 张福锁. 根际反硝化作用与  $\text{N}_2\text{O}$  释放[J]. 中国农业大学

学学报, 2002, 7(1): 77-82

[19] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States [J]. *Agric Ecos Environ*, 2002, 91: 217-232

[20] Pan G X, Zhou P, Li Z P, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China [J]. *Agric Ecos Environ*, 2009, 131: 274-280

[21] Chadwick D, Sommer S, Thorman R, et al. Manure management: Implications for greenhouse gas emissions [J].

*Animal Feed Science and Technology*, 2011, 166 & 167: 514-531

[22] Li Jing, Wang Mingxing, Chen Dezhang. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy [J]. *J Geophys Res*, 1998, 22(2): 183-192

[23] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的全年观测研究 [J]. *大气科学*, 2011, 35(4): 707-720

[24] 李松林. 大量施灌沼液稻田氮素动态特征及其对环境的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 50-51

[25] 黄红英, 曹金留, 靳红梅, 等. 猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2353-2361

责任编辑: 苏燕

## 欢迎订阅 2013 年《中国农业科学》中、英文版

《中国农业科学》中、英文版由农业部主管、中国农业科学院主办。主要刊登农牧业基础科学和应用基础科学研究论文、综述、简报等。设有作物遗传育种·种质资源·分子遗传学; 耕作栽培·生理生化·农业信息技术; 植物保护; 土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境; 园艺; 贮藏·保鲜·加工; 畜牧·资源昆虫; 兽医; 农业经济与管理等栏目。读者对象是国内外农业科研院(所)、农业大专院校的科研、教学及管理人员。

《中国农业科学》中文版为半月刊, 影响因子、总被引频次连续多年居全国农业科技期刊最前列或前列位次。为北京大学图书馆 1992—2011 年连续 6 次遴选的核心期刊, 位居《中文核心期刊要目总览》“农业综合类核心期刊表”的首位。1999 年起连续 10 年获“国家自然科学基金重点学术期刊专项基金”资助; 1999 年获“首届国家期刊奖”, 2003、2005 年获“第二、三届国家期刊奖提名奖”; 2002—2011 年先后 9 次被中信所授予“百种中国杰出学术期刊”称号; 2009 年获中国期刊协会/中国出版科学研究院“新中国 60 年有影响力的期刊”称号; 2010 年荣获“第二届中国出版政府奖期刊提名奖”。

《中国农业科学》中文版大 16 开, 每月 1、16 日出版, 国内外公开发行。每期 224 页, 定价 49.50 元, 全年定价 1188.00 元。国内统一刊号: CN11-1328/S, 国际标准刊号: ISSN 0578-1752, 邮发代号: 2-138, 国外代号: BM43。

《中国农业科学》英文版 (*Agricultural Sciences in China*), 2002 年创刊, 月刊, 2012 年更名为《农业科学学报》(*Journal of Integrative Agriculture*, JIA)。2006 年 1 月起与国际著名出版集团 Elsevier 合作, 全文数据在 ScienceDirect 平台面向世界发行。2009 年被 SCI 收录, 2012 年 JCR 影响因子为 0.449。

JIA 大 16 开, 每月 20 日出版, 国内外公开发行。每期 160 页, 国内订价 80.00 元, 全年 960.00 元。国内统一刊号: CN 10-1039/S, 国际标准刊号: ISSN 2095-3119, 邮发代号: 2-851, 国外代号: 1591M。

《中国农业科学》中、英文版均可通过全国各地邮局订阅, 也可向编辑部直接订购。

邮编: 100081; 地址: 北京 中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部

电话: 010-82109808, 82106280, 82106281, 82106282; 传真: 010-82106247

网址: www.ChinaAgriSci.com; E-mail: zgnykx@mail.caas.net.cn

联系人: 林鉴非