

沼液替代化肥对麦季 CH_4 、 N_2O 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

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.江苏省农业科学院循环农业研究中心, 南京 210014)

摘要:采用遮光密闭箱和气相色谱法,研究了化肥、化肥+稻草、50%沼液+50%化肥、100%沼液4个处理下麦季 CH_4 和 N_2O 的排放特征,并运用全球增温潜势(GWP)对麦季 CH_4 和 N_2O 排放的温室效应进行了估算。研究结果表明,与化肥处理相比,化肥+稻草处理显著($P<0.05$)提高了麦季 CH_4 和 N_2O 排放通量,使其所产生的 GWP 及单位产量的 GWP 显著($P<0.05$)增加,分别提高了 57.90%和 52.00%;而 100%沼液、50%沼液替代化肥处理减少了麦季 GWP 及单位产量的 GWP,分别降低了 25.39%、10.88%和 24.16%、10.97%,主要是由于沼液处理降低了麦季 N_2O 排放总量。可见,稻麦轮作条件下沼液替代化肥措施会降低稻茬麦季的综合温室效应。

关键词:沼液;化肥;小麦;温室气体

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)08-1654-08

Effects of Chemical Fertilizers Substitution by Biogas Slurry on CH_4 and N_2O Emissions and Their Greenhouse Effects in Wheat Field

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

(1.Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Emissions of CH_4 and N_2O from the wheat fields were measured in situ using the method of static chambers and gas chromatographic techniques, and the greenhouse effect of CH_4 and N_2O were assessed by using global warming potential(GWP). The field experiments results clearly demonstrated that the emissions of CH_4 and N_2O from the wheat fields were significantly greater for chemical fertilizer with straw treatment than that for chemical fertilizer treatment. Moreover, the GWP and GWP per yield were significantly increased with chemical fertilizer with straw treatment compared to chemical fertilizer treatment by 57.90% and 52.00%, respectively. While, compared with chemical fertilizer treatment, the values of GWP and GWP per yield were decreased by 25.39% and 24.16% under biogas slurry treatment, and by 10.88% and 10.97% under half biogas slurry with half chemical fertilizer treatment, respectively. This could be explained that lower N_2O emissions were obtained under biogas slurry and half biogas slurry with half chemical fertilizer treatments contrasted to chemical fertilizer treatment. In addition, lower greenhouse effects of CH_4 and N_2O emissions were obtained in biogas slurry and half biogas slurry with half chemical fertilizer treatments in contrast to chemical fertilizer and chemical fertilizer with straw treatments during wheat season in the rice-wheat rotation system.

Keywords: biogas slurry; chemical fertilizer; wheat; greenhouse gas

甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是两种重要的温室气体,其单位分子量在 100 a 时间尺度上全球增温潜势分别是 CO_2 的 25 倍和 298 倍,对温室效应的贡献

分别约为 14.3%和 7.9%(IPCC, 2007),并分别以每年 0.6%和 0.2%~0.3%的速率增长^[1]。农田是土壤生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的重要来源。除了气候条件和土壤特性外,农业管理措施如施肥(包括施肥量、施肥方式、氮肥的种类和颗粒大小)、水分管理方式、种植制度和耕作方式等^[2-5],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_2O 约 1.5×10^6 t,占人类活动向大气输入 N_2O -N 量的

收稿日期:2012-01-06

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金(CX(11)2073)

作者简介:孙国峰(1982—),男,博士,主要从事农业生态与农牧结合方面研究。E-mail:sgf515@163.com

* 通讯作者:郑建初 E-mail:zjc@jaas.ac.cn

44%和每年向大气输入 N₂O-N 总量的 13%^[6]。随着经济发达区畜禽养殖规模化程度的迅速提高,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^[7]。沼液含有丰富的营养物质,将其作为液态有机肥进行农田回用是沼液处理的主要途径^[8],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 CO₂ 排放,对促进农牧系统低碳技术发展具有重要意义。已有研究表明,利用沼液浸种能够提高小麦的发芽势和出苗率,有利于苗齐苗壮,促进根系发育^[9];沼液浇灌会使小麦植株干物质质量增加,光合速率和籽粒产量提高^[10-12];猪沼液和牛沼液对农作物病原真菌具有潜在的植物病害防治作用^[13]。就温室气体排放而言,国外对沼液前处理及施用方式已有较多报道^[14-16],而国内关于沼液替代化肥对麦季温室气体排放及温室效应方面的报道较少。

本研究以长江下游稻麦两熟典型农田为研究对象,采用静态箱-气相色谱法,研究沼液替代化肥下麦季 CH₄ 和 N₂O 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 2010 年 11 月至 2011 年 6 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 2200 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)土壤的容重 1.48 g·cm⁻³,有机质 12.1 g·kg⁻¹,全氮 0.91 g·kg⁻¹,全磷

0.55 g·kg⁻¹,速效钾 105.6 mg·kg⁻¹,pH 值 6.4(水土比 2.5:1)。

1.2 试验设计

采用随机区组设计,设置 4 个处理:①化肥(NPK);②化肥+稻草(NPKS,施用化肥量同化肥处理,水稻秸秆粉碎均匀还田量为 8250 kg·hm⁻²);③50%沼液+50%化肥(50%PS,10%沼液+50%尿素作基肥,40%沼液分返青期、拔节前 2 次作穗肥撒施);④100%沼液(PS,分 4 次施用,出苗前施用 40%,越冬前、返青期、拔节前分别施用 20%)。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 0.5 m。常规施肥与秸秆还田处理的麦季施肥量均为 225 kg·hm⁻²,磷、钾分别为 112.5 kg P₂O₅·hm⁻²、112.5 kg K₂O·hm⁻²。以化肥处理为参照,沼液替代化肥处理均施用等量氮。根据测定的沼液养分含量(平均含 N 0.34‰、P₂O₅ 0.03‰、K₂O 0.14‰),计算 100%沼液处理的沼液施用量为 661.8 t·hm⁻²,用塑料桶均匀撒施在麦田,磷钾肥不足时分别用过磷酸钙(12%)和氯化钾(60%)补齐。氮肥按基肥与穗肥比例 6:4 施用,磷、钾肥于耕作前作基肥一次撒施。

选用当地主推品种宁麦 16 为供试材料,采用人工条播,行距为 0.25 m,播种量为 150 kg·hm⁻²。麦季日降雨量与日平均气温详见图 1。试验小区内病虫害及杂草防治均按当地一般农田管理方式进行。

1.3 气体采集与分析

采用静态箱式/气相色谱法测定。静态箱底横截面积为 0.5 m×0.5 m,采样箱由 PVC 材质制成,箱体高度随小麦高度而增加(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,采样箱内顶部设置风扇以充分混匀箱内气体,连续观测 30 min,每间隔 10

表 1 麦季各处理田间水肥管理情况
Table 1 Field water and fertilizer management situation under different treatments during the wheat season

日期	NPK	NPKS	50%PS	PS
2010-11-05	撒施 60%尿素及磷钾肥,人工条播	施肥同 NPK,稻草粉碎还田 8250 kg·hm ⁻² ,人工条播	撒施 50%尿素及磷钾肥,人工条播	撒施磷钾肥,人工条播
2010-11-11	—	—	—	撒施 40%沼液
2010-11-13	灌溉	灌溉	灌溉	灌溉
2011-01-10	—	—	撒施 10%沼液	撒施 20%沼液
2011-02-25	—	—	撒施 20%沼液	撒施 20%沼液
2011-03-17	沟施 40%尿素	沟施 40%尿素	撒施 20%沼液	撒施 20%沼液
2011-06-02	收获	收获	收获	收获

min 抽取观测箱内气体样品,用于分析 CH_4 、 N_2O 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_4 和 N_2O 气体浓度由经改装的 Agilent 7890A 气相色谱测定, CH_4 检测器为 FID,检测温度 300 $^{\circ}\text{C}$,柱温 60 $^{\circ}\text{C}$,载气为 99.999%高纯氮气,流速 30 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$; N_2O 检测器为 ECD,检测温度 300 $^{\circ}\text{C}$,柱温 60 $^{\circ}\text{C}$,载气为 99.999%高纯氦甲烷气(95%氦气+5%甲烷),流速 40 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.4 数据分析与处理

气体排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \times h \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中: F 为气体排放通量, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; ρ 为标准状态下气体的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; h 是采样箱的净高度, m ; $\frac{dc}{dt}$ 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率, h^{-1} ; 273 为气态方程常数; T 为采样过程中采样箱内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

气体累积排放量计算公式为:

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

式中: E_c 为气体累积排放量, $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$; F 为气体排放通量, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; $t_{i+1} - t_i$ 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 Office 2003 和 SPSS10.0 软件进行数据处理及作图,处理间多重比较用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量与温度

2010—2011 年各处理麦季耕层土壤含水量伴随

灌溉及降雨出现多个峰值,其中第一个峰值是由灌溉引起的,其他峰值均由降雨引起的(图 2);各处理麦季土壤 5 cm 深处温度伴随着气温变化整体呈现先降低后增加的趋势(图 3)。在整个小麦生长季,化肥、化肥+稻草、50%沼液替代化肥和 100%沼液处理耕层平均含水量分别为 0.207、0.211、0.210 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 0.222 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (其中沼液施用带入的水分对小麦苗期耕层土壤含水量具有一定的影响),越冬期间(1 月 10 日至 1 月 21 日)差异较为显著,而其他时期差异不大,特别是拔节后几乎无差异(图 2)。土壤 5 cm 深处平均温度分别为 8.05、7.98、8.02 $^{\circ}\text{C}$ 和 7.85 $^{\circ}\text{C}$,均无显著性差异。

2.2 麦季 CH_4 排放通量的变化特征

麦季 CH_4 排放通量随时间的变化如图 4 所示。化肥处理 CH_4 排放通量为 $-15.25 \sim 43.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,其平均排放通量为 $6.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;化肥+稻草处理 CH_4 排放通量为 $-19.52 \sim 50.36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,其平均排放通量为 $10.26 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;50%沼液替代化肥处理 CH_4 排放通量为 $-14.18 \sim 56.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,其平均排放通量为 $14.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;100%沼液处理 CH_4 排放通量为 $-13.17 \sim 63.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,其平均排放通量为 $18.79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。可见,麦季 CH_4 平均排放通量以化肥处理最低,化肥+稻草处理次之,沼液替代化肥处理最高,且处理间差异达到 5%显著水平。

不同处理 CH_4 排放的季节变化趋势基本相同,苗期 CH_4 排放与吸收过程相互交替,拔节后 CH_4 排放呈现随着温度升高而增加的趋势。伴随着温度的回升与沼液的施用,100%沼液和 50%沼液替代化肥处理分别在小麦返青期、拔节期出现 2 次 CH_4 排放高峰,其 CH_4 排放通量均呈现 100%沼液 > 50%沼液替代化肥 > 化肥+稻草 > 化肥处理的规律。其中,100%沼液处理

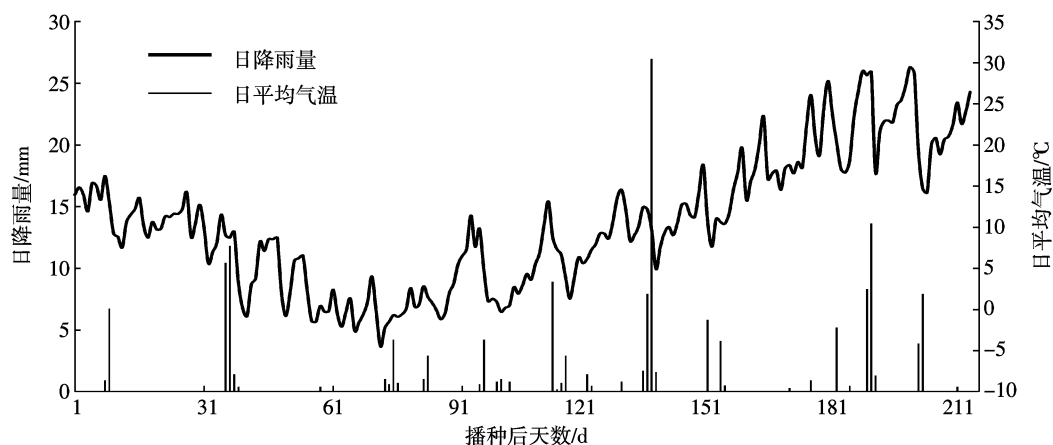


图 1 麦季日降雨量及日平均气温的变化

Figure 1 Daily rainfall and average air temperature during the wheat season

CH₄ 排放通量显著 ($P<0.05$) 高于化肥处理, 这与 Sistani 等^[16]在玉米田上研究结果一致。

2.3 麦季 N₂O 排放通量的变化特征

麦季 N₂O 排放通量随时间的变化如图 5 所示。化肥处理 N₂O 排放通量为 $-13.09\sim 85.39\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 其平均排放通量为 $24.25\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 化肥+稻草处理 N₂O 排放通量为 $-11.14\sim 203.81\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 其平均排放通量为 $38.24\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 50%沼液替代化肥处理 N₂O 排放通量为 $-19.10\sim 114.10\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 其平均排放通量为 $20.82\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 100%沼液处理 N₂O 排放通量为 $-19.42\sim 125.00\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 其平均排放通量为 $16.90\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。可见, 化肥+稻草处理麦季 N₂O 平均排放通量最高, 显著 ($P<0.05$) 高于其他处理; 沼液替代化肥较化肥处理降低了麦季 N₂O 平均排放通量, 但未达到 5% 显著水平。

不同处理 N₂O 排放的季节变化趋势基本相同,

在小麦播种后的第 11、46、77 d 观测到 N₂O 排放高峰, 这些排放高峰均出现在灌溉或降雨后, 主要是由于施肥后土壤氮素含量较高, 干湿交替激发了 N₂O 的产生与排放^[17-18]。各排放高峰的 N₂O 排放通量均以化肥+稻草处理最高。第 1 次排放高峰时的 N₂O 排放通量以化肥最低, 其 N₂O 排放通量显著 ($P<0.05$) 低于化肥+稻草处理; 而第 2、3 次排放高峰时的 N₂O 排放通量均以 100% 沼液处理最低, 但各处理间差异未达到 5% 显著水平。

2.4 麦季各生育时期 CH₄、N₂O 排放累积量

麦季 CH₄ 排放累积量如图 6 所示, 化肥、化肥+稻草、50%沼液替代化肥和 100%沼液处理 CH₄ 排放累积量均表现为苗期<拔节期<灌浆成熟期, 分析主要是由于土壤温度升高促进了 CH₄ 排放。从小麦各生育时期 CH₄ 排放累积量来看, 苗期、拔节期和灌浆成熟期均以沼液处理最高, 其中返青期、拔节前期沼液替

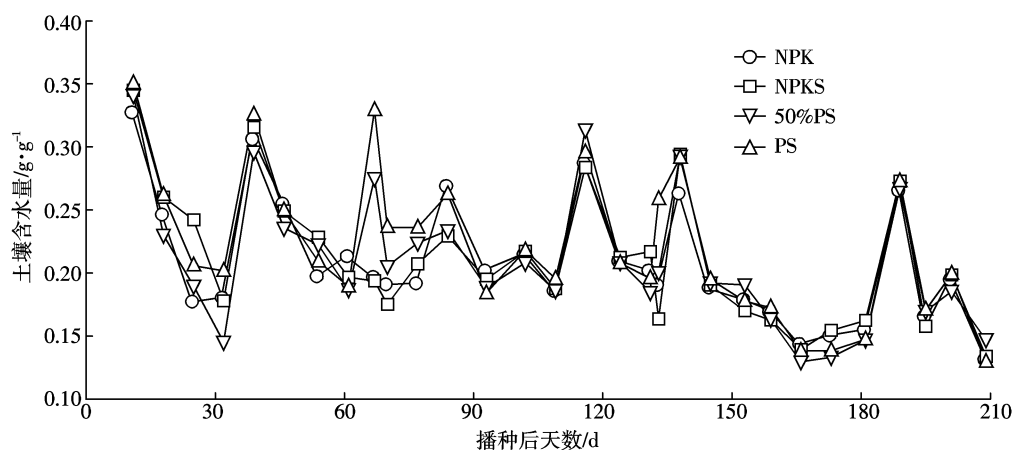


图2 麦季不同处理耕层土壤含水量变化

Figure 2 Seasonal variation of soil moisture in the arable soil layer during the wheat growing season

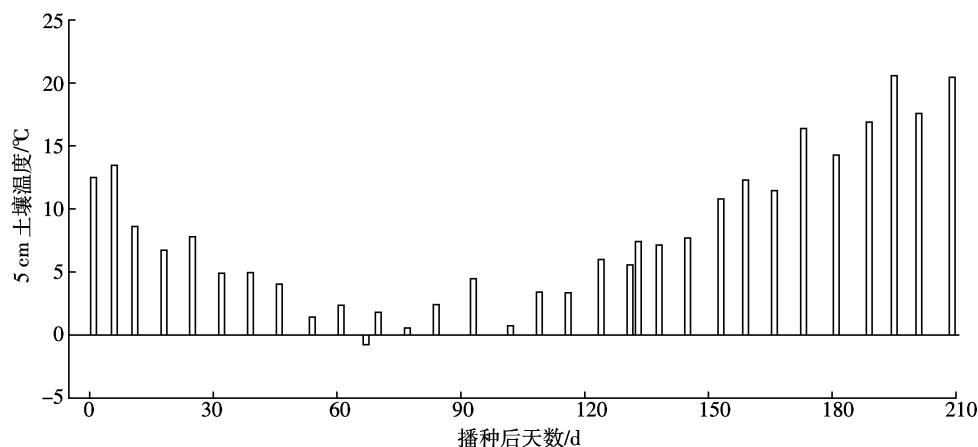


图3 麦季 5 cm 土壤温度变化情况

Figure 3 Seasonal variation of soil temperature at 5 cm depth during the wheat growing season

代化肥与化肥处理间差异较大(图 4)。主要是由于返青期、拔节前分别撒施 20%沼液,一方面沼液施用带入大量水分,且连续浇灌易破坏表层土壤孔隙的连续性,造成土壤相对厌氧环境;另一方面沼液中含有部分可溶性有机碳及厌氧微生物,增强了土壤微生物活性,进而增加了 CH_4 排放。与化肥相比,100%沼液、50%沼液替代化肥和化肥+稻草处理均显著($P<0.05$)提高了苗期 CH_4 排放累积量,分别增加了 326.15、254.54 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 155.57 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$;100%沼液处理还显著($P<0.05$)提高了拔节期 CH_4 排放累积量,增加了 251.91 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,而灌浆成熟期各处理间差异不显著。

麦季苗期各处理 N_2O 排放累积量均占整个生长季排放总量的 85%以上(图 7),分析是由于苗期小麦生长速度慢,对 N 素的利用率低,气态 N 的损失较大的缘故^[18]。麦季苗期 N_2O 排放累积量以化肥+稻草处理最高,为 1 682.2 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著($P<0.05$)高于其他各

处理;拔节期各处理 N_2O 排放累积量差异不显著;而在灌浆成熟期,沼液处理 N_2O 排放累积量为负值,即表现为 N_2O 吸收现象,其中 50%沼液替代化肥较化肥+稻草处理显著($P<0.05$)降低了 N_2O 排放累积量,减少了 233.5 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.5 麦季 CH_4 和 N_2O 排放总量及其全球增温潜势

由表 2 可以看出,100%沼液、50%沼液替代化肥处理较化肥与化肥+稻草处理均显著($P<0.05$)提高了麦季 CH_4 排放总量,分别增加了 636.65、438.06 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 428.10、229.51 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,但减少了麦季 N_2O 排放总量。其中 100%沼液、50%沼液替代化肥处理较化肥+稻草处理显著($P<0.05$)降低了麦季 N_2O 排放总量,分别减少了 1 070.36、873.54 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,而与化肥处理间差异不显著。就排放 CH_4 和 N_2O 产生的全球增温潜势(GWP)而言,麦季以排放 N_2O 产生的 GWP 为主,各处理排放 N_2O 产生的 GWP 均占 95%以上。化肥+稻

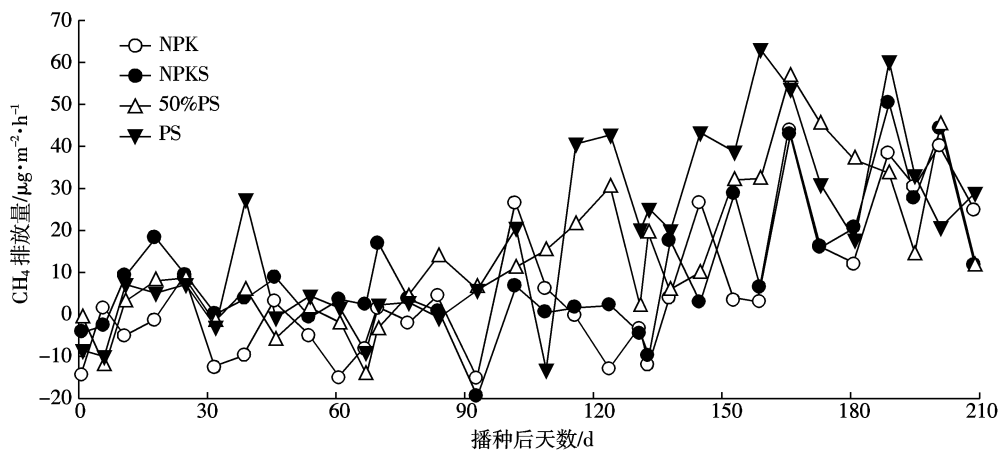


图 4 不同处理麦季 CH_4 排放通量的变化特征

Figure 4 The variation of CH_4 emission under different treatments in wheat season

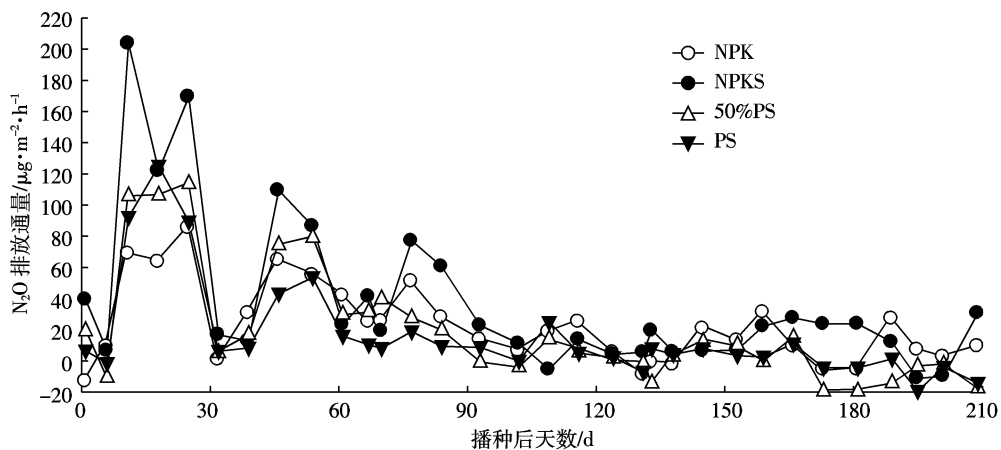


图 5 不同处理麦季 N_2O 排放通量的变化特征

Figure 5 The variation of N_2O emission under different treatments in wheat season

表 2 不同处理排放 CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势

处理	CH ₄ 排放总量/ g·hm ⁻²	N ₂ O 排放总量/ g·hm ⁻²	100 a 的全球增温潜势(GWP)			产量/ kg·hm ⁻²	单位产量的 GWP/ kg CO ₂ ·t ⁻¹
			CH ₄ /kg CO ₂ ·hm ⁻²	N ₂ O/kg CO ₂ ·hm ⁻²	总计/kg CO ₂ ·hm ⁻²		
NPK	305.91 c	1 216.35 b	7.65 c	362.47 b	370.12 b	7 720.5 a	47.94 b
NPKS	514.46 b	1 918.00 a	12.86 b	571.56 a	584.43 a	8 020.7 a	72.87 a
50%PS	743.97 a	1 044.46 b	18.60 a	311.25 b	329.85 b	7 728.9 a	42.68 b
PS	942.56 a	847.64 b	23.56 a	252.60 b	276.16 b	7 595.5 a	36.36 b

注:不同小写字母分别表示不同处理间的差异达显著($P<0.05$)水平。
Note:Different small letters meant significant difference among different treatments at 0.05 levels.

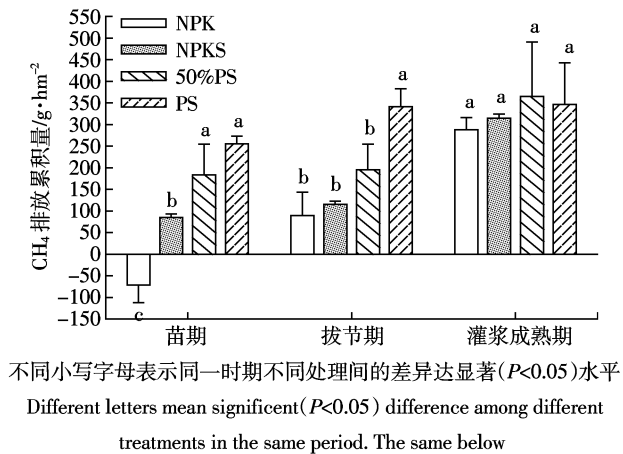


图 6 麦季各生育时期 CH₄ 排放累积量
Figure 6 The CH₄ emission accumulation of different growth stages under different treatments in wheat season

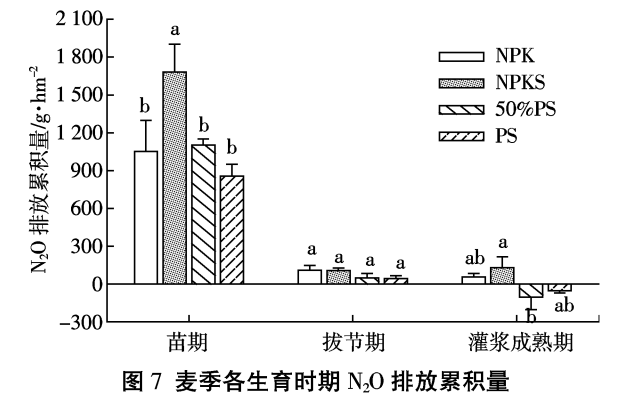


图 7 麦季各生育时期 N₂O 排放累积量
Figure 7 The N₂O emission accumulation of different growth stages under different treatments in wheat season

草处理显著($P<0.05$) 高于其他处理, 主要是由于化肥+稻草处理显著($P<0.05$)提高了麦季排放 N₂O 产生的 GWP, 尽管沼液替代化肥处理显著($P<0.05$)提高了麦季排放 CH₄ 产生的 GWP。单位产量的 GWP 呈现为化肥+稻草>化肥>50%沼液替代化肥>100%沼液处理, 其中化肥+稻草处理显著($P<0.05$)高于其他处理, 分析主要与各处理排放 N₂O 产生的 GWP 有关。

3 讨论

麦田 N₂O 排放高峰主要出现在苗期灌溉或降雨之后, 这与人研究结果相似^[17-18]。主要是由于施肥后土壤氮素含量较高, 干湿交替激发了 N₂O 的产生与排放 (图 2), 苗期 N₂O 排放峰值随着时间的推移而降低, 分析可能是由于土壤温度的逐渐降低 (图 3), 影响了土壤微生物的活性强度, 从而影响硝化与反硝化反应的速率。已有研究认为, 硝化作用微生物活动的最适宜范围是 25~35 ℃, 反硝化作用微生物所要求的适宜温度是 5~75 ℃。当土壤温度低于 5 ℃时, 将会抑制硝化和反硝化作用的发生^[19]。徐新萍等^[20]对黄绵土研究指出, 温度低于 30 ℃时, 土壤 N₂O 排放随着温度的上升而增加。此外, 本研究中施入拔节孕穗肥后 N₂O 排放量不大, 这与黄红英等^[21]在黄泥土上研究的结果不同, 分析可能是由于氮肥施用量仅为总氮量的 40%, 且土壤干燥, 不利于硝化反硝化过程中微生物作用产生 N₂O。

关于沼液前处理及施用方式对农田 N₂O 排放的报道较多^[14-16]。已有研究结果表明, 施用厌氧发酵完全的沼液能够有效降低农田 N₂O 排放量^[22], 采用静态池去除沼液中悬浮物对农田 N₂O 排放影响不显著^[23], 而沼液施用方式对农田 N₂O 排放的影响报道不一^[15-16]。本研究中采用地表撒施厌氧发酵完全的沼液替代化肥, 较化肥处理降低了麦季 N₂O 排放量。这可能是由于沼液替代化肥处理麦季耕层土壤硝态氮含量较低, 减少了硝化反硝化反应底物, 进而降低了 N₂O 排放量。如图 8 所示, 随着沼液替代化肥比例增加, 麦季各生育时期的土壤硝态氮含量均呈降低趋势, 即化肥>50%沼液替代化肥>100%沼液处理, 麦季土壤硝态氮含量均值分别为 53.38、39.50、33.79 mg·kg⁻¹, 其中 100%沼液处理土壤硝态氮含量在越冬期(1 月 5 日)、返青期(2 月 22 日)和收获期(6 月 2 日)显著($P<$

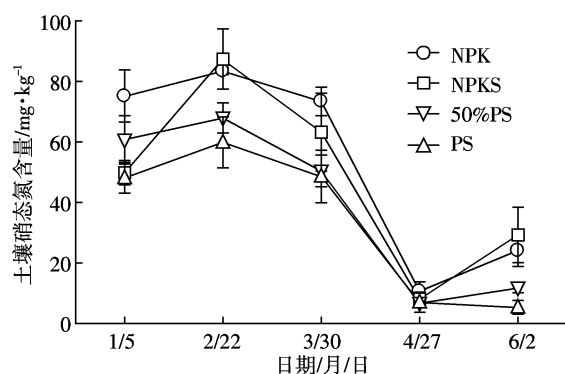


图 8 麦季耕层土壤硝态氮含量的变化特征

Figure 8 The variation of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ contents in the arable soil layer during the winter wheat season

0.05) 低于化肥处理。

农田 N_2O 排放量占施氮量的比例不仅是编制农业温室气体排放清单中计算某一地区在一定施氮水平下 N_2O 排放总量的重要参数, 还是预测氮肥利用率的参数之一。本研究中, 在麦季施氮量 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下, N_2O 排放量占施氮量的比例以 100% 沼液处理最低, 为 0.24%; 以化肥+稻草处理最高, 为 0.54%。这与曾江海等^[24]在小麦-玉米轮作田为 0.54% 和周鹏等^[25]在华北春玉米田为 0.45%~0.55% 的研究结果相近, 也与 Xing^[26]总结的 0.57% 相近, 但低于 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南所推荐的 1%。由此推测, 按 IPCC 推荐的排放因子来计算可能会高估中国旱地 N_2O 排放量, 具体的适宜排放因子仍有待大量试验验证。

4 结论

麦季 CH_4 和 N_2O 排放具有明显的季节性变化特征, CH_4 排放通量在拔节后随温度升高而增加, N_2O 排放主要发生在苗期灌溉降水之后。与化肥处理相比, 沼液替代化肥处理增加了麦季 CH_4 排放, 其中苗期、拔节期达到 5% 显著水平, 但其麦季 N_2O 排放有所降低, 未达到 5% 显著水平; 化肥+稻草处理增加了麦季 CH_4 和 N_2O 排放, 其中苗期达到 5% 显著水平。

麦季 GWP 以 N_2O 为主, 各处理均占 95% 以上。与化肥相比, 化肥+稻草处理显著 ($P < 0.05$) 增加了 CH_4 和 N_2O 排放总量、GWP 及单位产量的 GWP; 沼液替代化肥处理降低了 GWP 和单位产量的 GWP, 主要是由于沼液处理降低了 N_2O 排放产生的 GWP, 尽管沼液处理显著 ($P < 0.05$) 增加了 CH_4 排放产生的 GWP。可见, 稻麦轮作条件下, 沼液替代化肥措施较

化肥处理降低了麦季综合温室效应, 而化肥+稻草措施提高了麦季 CH_4 和 N_2O 排放所形成的温室效应。然而, 由于本研究仅为沼液替代化肥措施的初期效应, 其长期效应仍需要进一步研究。

参考文献:

- [1] Simpson L J, Edwards 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.
- [2] Melillo J M, Steudler P A, Aber D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate systems[J]. *Science*, 2002, 298: 2173-2176.
- [3] 李 晶, 王明星, 王跃思, 等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. *大气科学*, 2003, 27(3): 740-749.
LI Jing, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(3): 740-749.
- [4] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 的源/汇强度及温室效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 966-975.
ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966-975.
- [5] Yao Z S, Zheng X H, Xie B H, et al. Tillage and crop residue management significantly affects N-trace gas emissions during the non-rice season of a subtropical rice-wheat rotation[J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41: 2131-2140.
- [6] 邹建文, 黄 耀. 农业管理措施对 N_2O 排放的影响[J]. *农村生态环境*, 2002, 18(1): 46-49.
ZOU Jian-wen, HUANG Yao. Effect of agricultural management practices on N_2O emission of farmlands[J]. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18(1): 46-49.
- [7] Lu J, Zhu L, Hu G, et al. Integrating animal manure-based bioenergy production with invasive species control: A case study at Tongren Pig Farm in China[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(6): 821-827.
- [8] 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.
JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 27(1): 291-296.
- [9] 邱 凌, 杨保平, 张正茂, 等. 沼液浸种对旱地小麦苗期发育的影响[J]. *中国沼气*, 1999, 17(1): 42-44.
QIU Ling, YANG Bao-ping, ZHANG Zheng-mao, et al. Effects of soaking of wheat seed by biogas slurry on wheat growth in dryland[J]. *China Biogas*, 1999, 17(1): 42-44.
- [10] Matis T, Lithourgidis A S, Gagianas A A. Effects of injected liquid cattle manure on growth and yield of winter wheat and soil characteristics[J]. *Agron J*, 2003, 95: 592-596.
- [11] Garg R N, Pathak H, Das D K, et al. Use of flyash and biogas slurry for

- improving wheat yield and physical properties of soil[J]. *Environ Mon-itoring Assessment*, 2005, 107: 1-9.
- [12] 冯伟, 管涛, 王永华, 等. 沼液与尿素配施对冬小麦光合特性及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(8): 1401-1408.
- FENG Wei, GUAN Tao, WANG Yong-hua, et al. Effects of biogas slurry combined with urea on photosynthetic characteristics and grain yield of winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(8): 1401-1408.
- [13] 陶秀萍, 董红敏, 尚斌, 等. 新鲜猪沼液和牛沼液对农作物病原真菌抑制作用的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1443-1449.
- TAO Xiu-ping, DONG Hong-min, SHANG Bin, et al. Comparison of Inhibiting effects between fresh effluents of anaerobically digested pig-gery waste and anaerobically digested dairy waste on plant pathogenic fungi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1443-1449.
- [14] 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.
- [15] Vallejo A, García-Torres L, Díez J A, et al. Comparison of N losses (NO_3 , N_2O , NO) from surface applied, injected or amended (DCD) pig slurry of an irrigated soil in a Mediterranean climate[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272: 313-325.
- [16] Sistani K R, Warren J G, Lovanh N, et al. Greenhouse gas emissions from swine effluent applied to soil by different methods[J]. *Soil Sci Am J*, 2010, 74: 429-435.
- [17] 马静, 徐华, 蔡祖聪, 等. 稻季施肥管理措施对后续麦季 N_2O 排放的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6): 672-676.
- MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong, et al. Effect of fertilizer application in rice-growing season on N_2O emissions from following wheat-growing season[J]. *Soils*, 2006, 38(6): 672-676.
- [18] 梁东丽, 同延安, Emteryd O, 等. 灌溉和降水对旱地土壤 N_2O 气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 298-302.
- LIANG Dong-li, TONG Yan-an, Emteryd O, et al. Effect of irrigation and rainfall on the N_2O losses in dryland[J]. *Plant Nutrition and Fertil-izen Science*, 2002, 8(3): 298-302.
- [19] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5): 1-5.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impacts of temperature on N_2O production and emission [J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5): 1-5.
- [20] 雒新萍, 白红英, 路莉, 等. 黄绵土 N_2O 排放的温度效应及其动力学特征[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1226-1233.
- LUO Xin-ping, BAI Hong-ying, LU Li, et al. The effect of temperature and moisture on N_2O flux kinetics from loessial soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1226-1233.
- [21] 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.
- HUANG Hong-ying, CAO Jin-liu, JIN Hong-mei, et al. Influence of application of digested pig slurry on nitrous oxide emission under rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2353-2361.
- [22] Petersen S O. Nitrous oxide emissions from manure and inorganic fertilizers applied to spring barley[J]. *J Environ Qual*, 1999, 28: 1610-1618.
- [23] Bhandral R, Bittman S, Kowalenko G, et al. Enhancing soil infiltration reduces gaseous emissions and improves N uptake from applied dairy slurry[J]. *J Environ Qual*, 2009, 38: 1372-1382.
- [24] 曾江海, 王智平, 张铭玉, 等. 小麦-玉米轮作期土壤排放 N_2O 通量及总量估算[J]. 环境科学, 1995, 16(1): 32-35, 67-68.
- ZENG Jiang-hai, WANG Zhi-ping, ZHANG Ming-yu, et al. Flux of N_2O emission from the fields in wheat and maize rotation system[J]. *En-vironmental Science*, 1995, 16(1): 32-35, 67-68.
- [25] 周鹏, 李玉娥, 刘利民, 等. 施肥处理和环境因素对华北平原春玉米田 N_2O 排放的影响: 以山西晋中为例[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 179-184.
- ZHOU Peng, LI Yu-e, LIU Li-min, et al. Effects of fertilization and environment factors on N_2O emission in spring corn field in north China plain: A case study of Jinzhong in Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(2): 179-184.
- [26] Xing G X. N_2O emission from cropland in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52: 249-254.