

肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响

董玉红^{1,2}, 欧阳竹¹, 李运生¹, 张磊^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 禹城综合实验站, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:采用静态箱/气相色谱(GC)法研究了等氮量的肥料施用以及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响。结果表明,肥料施用对农田土壤 CO₂ 排放的季节模式无明显影响,但是影响了 N₂O 的季节模式。有机肥施用促进了小麦季土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放,后作玉米季施用化肥的情况下,有机肥处理的土壤 CO₂ 与对照没有显著的差异,N₂O 排放通量和对照差异显著。虽然是等氮量施入,由于牛粪中有机碳和氮的可降解性要低于猪粪,施入土壤后对土壤中 CO₂ 和 N₂O 排放的影响也要低于猪粪处理。除了受肥料施用的影响外,土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放还受环境因子如土壤温度和土壤水分的影响,相关分析结果表明,土壤 CO₂ 排放与大气温度、地表温度、土壤温度和土壤水分均呈显著正相关关系($P<0.01$)。土壤 N₂O 排放只在对照处理中与土壤水分相关显著($P<0.05$),施肥处理中,肥料效应掩盖了土壤温度和水分效应,使得相关性并不显著。

关键词:有机肥; 土壤; CO₂; N₂O

中图分类号:S152.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)05-0913-06

Influence of Fertilization and Environmental Factors on CO₂ and N₂O Fluxes from Agricultural Soil

DONG Yu-hong^{1,2}, OUYANG Zhu¹, LI Yun-sheng¹, ZHANG Lei^{1,2}

(1. Yucheng Comprehensive Experimental Station, Institute of Geographical Sciences and natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Agricultural management such as fertilizer or manure application has a substantial influence on CO₂ and N₂O emissions and, by understanding this influence, we may devise management strategies to reduce them. A field experiment was conducted at yucheng comprehensive experimental station, the Chinese academy of science during 2003 to 2004, to investigate effects of different fertilizations on CO₂ and N₂O emissions. The treatments included control without fertilizer, swine manure and cattle manure. The fluxes of CO₂ and N₂O were collected and analyzed by static-chamber/gas chromatograph (GC) method. The results showed that during wheat-maize growth season, CO₂ fluxes in all treatments presented a similar seasonal variation tendency with soil temperature, while N₂O fluxes demonstrated different patterns. Organic fertilizer treatment increased CO₂ and N₂O fluxes significantly in wheat growth season, while chemical fertilizer in maize growth season had little effect on CO₂ flux but had significant effect on N₂O fluxes with swine and cattle manure treatments. The different effects of swine manure and cattle manure on gas fluxes were related with their composition and degradability in soil. Swine manure had more CO₂ and N₂O emissions due to its rich in degradable C and N than cattle manure. Except for fertilization, greenhouse gas fluxes were also influenced by environmental factors, such as soil temperature and soil moisture. Correlation analysis showed the significant relationship between CO₂ emissions and temperature and soil water contents were observed. But significant correlation was found only between soil N₂O flux and soil water contents in control treatment. In other treatments, fertilization effect overrides environmental factors. Therefore, no significant relationship was found between soil N₂O fluxes and environmental factors.

Keywords: organic fertilizer; soil; CO₂; N₂O

收稿日期:2005-01-13

基金项目:重大基础研究(973)前期专项研究资助(2003CCB001)

作者简介:董玉红(1973—),女,博士研究生,主要从事农田生态系统碳循环以及农田生态系统管理方面的研究。E-mail:yhongdong@163.com
联系人:欧阳竹

大气中温室气体的增加主要是由于人类活动的结果,其中农业生产的贡献占相当大的比重^[1]。农田土壤温室气体气体排放受土壤理化性状的影响,包括土壤有机碳含量、土壤质地、土壤温度和湿度以及pH值等^[2]。农业管理措施如耕作、施肥以及灌溉等可通过调节土壤的各种理化性状而影响土壤温室气体的排放^[3-4]。各种农业管理措施中,化肥和有机肥料的施用可提高土壤肥力,增加作物产量,但是不合理的施用引起的环境问题也不容忽视,肥料的过量施用导致土壤CO₂、CH₄和N₂O温室气体排放^[5]。关于化肥施用后对温室气体的排放研究已有很多,有机肥施用后对温室气体排放影响的研究也已展开,温室气体排放受多种因素的影响,肥料施用后温室气体排放通量的测定有助于了解温室气体排放量及其排放规律,有助于采取合理的减排措施^[6,7]。

近年来,山东省禹城市养殖业发展迅速,大量的畜禽排泄物被作为有机肥施用到农田,提供作物生长所需要的养分,同时,为了维持粮食的高产,化肥也有相当大的投入。为此,本文采用生产上常用的2种有机肥作为基肥等氮量施用,试图探讨外源碳、氮输入以及环境因子对农田土壤CO₂和N₂O排放的作用。

1 材料与方法

1.1 试验设计

观测地点为中国科学院禹城综合试验站(36°57'N, 116°36'E)。该站位于黄淮海平原的鲁西北黄河冲积平原,属于暖温带半湿润季风气候地区,海拔20 m,主要耕作制度为冬小麦-夏玉米轮作。该地区年均气温为13.2℃,年均降水量538 mm,试验地土壤质地主要是轻壤,前作为棉花,棉花的施肥管理主要以化肥为主,很少施用有机肥,秸秆也没有还田。小麦播种前测定的土壤化学性质为:有机质1.22%、全氮0.082%、全磷(P₂O₅)0.206%、全钾(K₂O)2.291%, pH8.4。

田间试验设3个处理,每个处理3个重复,每个小区面积4 m×3 m,处理随机排列,小区间隔0.50 m,周围设置保护行。施肥量参照常规的施氮量,设置处理分别为:不施肥对照,猪粪、牛粪,猪粪和牛粪按等氮量(285 kg 纯N·hm⁻²)于小麦播种前做基肥施用,整个小麦生长季中不再追肥,玉米生长季中猪粪和牛粪处理于8月13日各追施尿素(207 kg 纯N·hm⁻²)。小麦于2003年11月4日播种,6月20日收获,玉米于6月30日播种,10月7日收获。

1.2 气体采集与分析

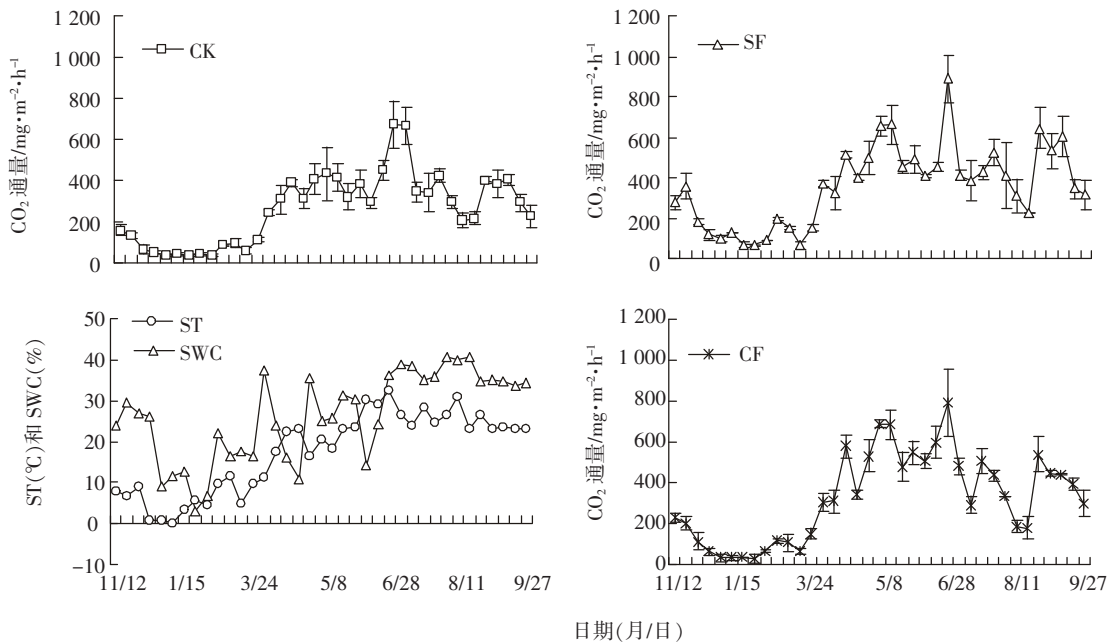
采用静态箱/气相色谱(GC)法测定农田土壤CO₂和N₂O的排放通量,箱体由不锈钢材料制成,规格为50 cm×50 cm×50 cm,播种后将不锈钢底座固定于土壤中,整个生长季节不再移动,采样框内不含作物和杂草,观测时将采样箱放在底座边缘四周的凹槽中,加水密封,扣箱后用100 mL塑料注射器于0、10、20、30 min抽取箱内气体,对采集来的气样使用改进的Agilent4890气相色谱仪同时分析CO₂和N₂O。测定的方法和条件已有详述^[8],该仪器检测的灵敏度和稳定性均很高,能够满足农田生态系统的集中温室气体同步测定的要求。气体排放通量的计算是通过气体浓度随时间的变化,计算单位面积的气体排放通量。每次气体采样的同时测定大气温度、土壤表面温度、地下5 cm土温、土壤含水量。

2 结果与讨论

2.1 CO₂和N₂O排放通量的季节变化动态

小麦-玉米轮作期土壤CO₂排放的时间动态如图1所示,不同处理的季节变化趋势比较一致,具有明显的季节变化规律,在冬前随着温度的降低而降低,春季小麦返青后随着温度的升高而升高,期间的波动与温度的变化大体一致,呈现随温度变化的趋势。这一季节变化趋势在别的研究中也有指出^[9,10]。温度主要是通过影响土壤微生物的代谢而影响土壤CO₂排放。地温较低时土壤微生物代谢缓慢,土壤CO₂排放通量较小;小麦进入返青期,地温逐渐回升,土壤微生物代谢增强,土壤CO₂排放通量开始增大。小麦季CO₂的排放通量变幅在对照、猪粪和牛粪处理中分别为35.8~450.0、65.3~661.4和31.4~687.8 mg·m⁻²·h⁻¹;玉米季CO₂的排放通量变幅在对照、猪粪和牛粪处理中分别为209.5~673.1、224.8~888.9和179.7~790.2 mg·m⁻²·h⁻¹。其他研究中,同一地区冬小麦土壤CO₂排放速率在秸秆还田和不还田土壤中冬季最低值分别为31.23和28.99 mg·m⁻²·h⁻¹,夏季最高值为606.85和549.66 mg·m⁻²·h⁻¹^[11]。夏玉米土壤CO₂排放通量在其他研究中较高,最高达25 g·m⁻²·d⁻¹^[12],与之相比,本研究结果偏小。可能是由于受环境因子的影响较大,2004年夏季降雨较多而且频繁,有时候土壤水分含量一直维持在较高的水平,导致土壤通气性较差,而使得土壤CO₂排放降低。

从图2可以看出,土壤N₂O排放在不同处理间差异很明显,不施肥对照处理的N₂O在整个轮作期



CK:不施肥对照处理,SF:基肥为猪粪的处理,CF:基肥为牛粪的处理

图1 小麦-玉米轮作期农田土壤 CO_2 通量的季节变化以及土壤温度(ST)和土壤水分(SWC)的变化

Figure 1 Temporal trends of CO_2 flux from soil during wheat-maize growing stage and soil temperature and soil water content (CK: control without fertilizer, SF: swine manure treatment, CF: cattle manure treatment)

中一直维持较低的水平,排放通量低于 $134 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,而施肥处理的排放通量随时间变化很大,猪粪处理的土壤 N_2O 的排放通量大部分时间保持在较高的排放水平,变幅也较大,小麦季排放通量的范围为 $26.8\sim 563.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,玉米季排放通量范围为 $23.8\sim 972.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;牛粪处理的土壤 N_2O 排放在小麦生长季中大部分时间维持较低的水平,变幅为 $27.1\sim 232.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,玉米季的一个排放高峰是由于施用化肥的影响,最高幅度达 $1\,237.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

Dong 等^[13]报道同一地区的施肥土壤 N_2O 排放量月平均值最低达 $2.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,最高达 $329.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。丁洪等^[14]的研究表明,玉米季的土壤 N_2O 排放有机肥处理为 $0.001\sim 0.025 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,尿素处理以及尿素和有机肥处理的整个轮作期的通量变幅分别为 $6.5\sim 366.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, $0.001\sim 0.062 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。本研究结果高于这些报道的数据,这可能是由于冬季较高的 N 投入、麦苗长势较弱对 N 的吸收利用较低等原因导致冬季 N_2O 排放量高所造成。

以不同处理和各次独立观测时间对 CO_2 和 N_2O 排放通量差异作两因子方差分析,结果见表 1,有机肥处理间 CO_2 和 N_2O 排放差异显著 ($P<0.001$),说明肥料施用对土壤 CO_2 和 N_2O 排放影响显著。各次独立观测之间, CO_2 和 N_2O 的排放表现出显著的差异 ($P<$

0.001),这是因为在小麦-玉米整个轮作期间,环境因子如土壤温度、土壤水分等变化很大,导致不同观测时间的土壤 CO_2 和 N_2O 的排放差异很大。

2.2 肥料施用对 CO_2 和 N_2O 平均排放通量的影响

通过比较小麦-玉米轮作期内的 CO_2 和 N_2O 的平均排放通量,分析肥料施用对土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量的影响,结果如表 2 所示。施肥处理促进了土壤 CO_2 的排放,在小麦季有机肥处理的土壤 CO_2 和不施肥对照差异显著,但猪粪和牛粪处理间没有差异,表明外源有机物质的投入极大地促进了土壤 CO_2 的排放。玉米季所有处理的土壤 CO_2 排放没有显著的差异,表明在前作施用有机肥的情况下,后作的化肥施用对土壤 CO_2 排放的影响不大,稍有提高。肥料施用也促进了土壤 N_2O 的排放,在小麦季施肥处理的土壤 N_2O 排放和对照的差异显著,且猪粪和牛粪处理间平均 N_2O 排放通量差异也显著,虽然猪粪和牛粪是等氮量施入,小麦季猪粪处理的 N_2O 排放要远远高于牛粪处理,玉米季施肥处理和对照差异明显,但 2 个施肥处理间没有显著差异。

土壤中加入高 C/N 比的有机物质后,与土壤原有的 C 库和 N 库发生着复杂的生物化学和物理化学作用,这些作用会极大地改变土壤中的 C、N 循环,对温室气体的产生与排放也会带来一定的影响^[15]。猪粪和

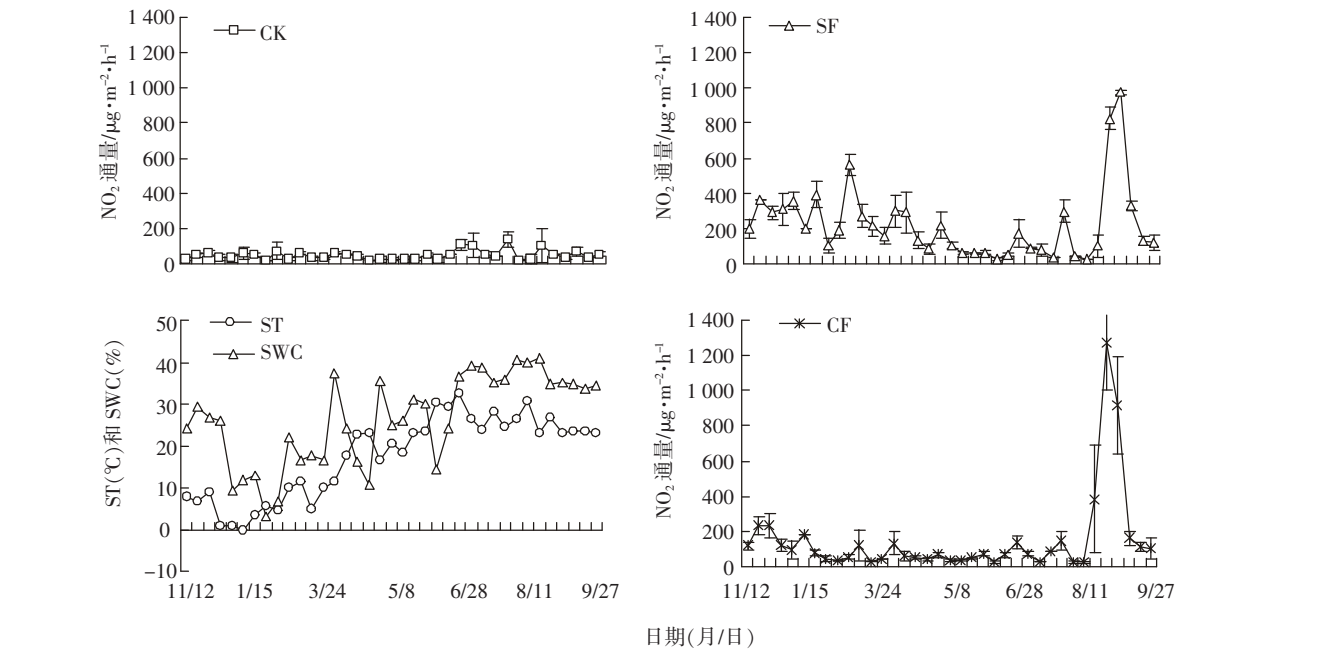


图2 小麦-玉米轮作期农田土壤 N₂O 通量的季节变化以及土壤温度(ST)和土壤水分(SWC)的变化

Figure 2 Temporal trends of N₂O flux from soil during wheat-maize growing stage and soil temperature and soil water content

表1 有机肥施用(OM)和各次独立观测时间(T)对温室气体 CO₂ 和 N₂O 通量影响的方差分析

Table 1 Variance analysis for impacts of organic manure treatments and different observation time on CO₂ and N₂O emissions

气体	方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
CO ₂	OM	472 062.510	2	236 031.255	27.561	0.000
	T	11 099 110.843	36	308 308.635	36.001	0.000
	OM×T	860 625.704	72	11 953.135	1.396	0.038
	误差	1 627 130.086	190	8 563.843		
N ₂ O	OM	1 274 472.492	2	637 236.246	38.206	0.000
	T	4 312 555.458	36	119 793.207	7.182	0.000
	OM×T	3 298 776.580	72	45 816.341	2.747	0.000
	误差	2 651 975.875	159	16 679.094		

牛粪处理增加了土壤 CO₂ 的排放主要是投入有机碳的降解作用,有机肥处理的土壤有机碳含量增加。有机肥的施用虽然促进了土壤 CO₂ 的排放,但也增加了土壤碳的储存,对于农田生态系统来说,碳的截留相当于减少 CO₂ 的排放^[16]。有机肥施用对土壤 N₂O 排放的影响主要是外源 C 和 N 的作用,土壤微生物活动

有其适宜的 C/N 比,肥料投入通过改变 C/N 比而影响了土壤 N₂O 的排放^[17]。

不同种类的有机肥之间,由于牲畜种类和饲料成分的不同,其排泄物构成的有机肥中所含有的成分各不相同,影响了其施用后的农田土壤温室气体的排放。本研究中猪粪和牛粪虽然是等氮量施用,其投入

表2 小麦-玉米轮作期土壤 CO₂ 和 N₂O 的平均排放通量

Table 2 Average CO₂ and N₂O fluxes from soil during wheat-maize growth season

气体	处理	小麦季	玉米季	小麦-玉米轮作期
CO ₂	对照	224.3b	376.0	265.5b
	猪粪	322.7a	463.6	356.9a
	牛粪	305.2a	410.2	329.8a
N ₂ O	对照	42.6c	64.4b	48.5c
	猪粪	206.6a	247.6a	221.9a
	牛粪	86.9b	266.7a	148.8b

表 3 CO₂ 排放速率和土壤大气环境因子的相关性分析
Table 3 Relationship between CO₂ fluxes and environmental factors

气体	处理	大气温度	土壤表面温度	地下 5 cm 土壤温度	土壤水分
CO ₂	CK	0.844**	0.807**	0.809**	0.485**
	S	0.775**	0.754**	0.759**	0.579**
	C	0.798**	0.744**	0.777**	0.514**
N ₂ O	CK	0.234	0.292	0.191	0.356*
	S	-0.223	-0.179	-0.226	0.019
	C	0.129	0.181	0.137	0.239

注:* 0.05 水平显著,**0.01 水平显著。

的有机碳量并不一样，土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放主要受外源碳素供应水平的制约,此外,由于牛粪中有机碳和氮的可降解性要低于猪粪,施入土壤后对土壤中 CO₂ 和 N₂O 排放的影响也要低于猪粪处理。这在其他研究中也有指出，具有较高含量矿物态 C 的有机肥处理会导致较高的 N₂O 的排放^[7]。也有研究指出,N₂O 排放不仅受到外源碳、氮供应水平的影响、受土壤供 N 水平、微生物对有机碳的分解及对 N 的争夺利用、作物对氮素利用等因素制约,而且跟有机肥料的类型和腐熟程度有关^[17]。

2.3 影响土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的环境因素

土壤温度和土壤水分是影响土壤 CO₂ 排放的关键因子。由农田土壤 CO₂ 排放的季节动态与土壤温度、含水量变化的比较可以看出,土壤 CO₂ 排放速率的动态变化与土壤温度的季节变化趋势总体上较为一致,而与土壤水分的季节变化一致性较差,见图 1。相关分析结果表明，土壤 CO₂ 排放速率与大气温度、地表温度、地下 5 cm 土层温度以及土壤水分均具有极显著的相关性关系($P<0.01$),见表 3。

温度对土壤 CO₂ 排放的影响主要是通过影响土壤微生物活性而起作用,土壤温度的作用最大,温度与土壤 CO₂ 排放的显著正相关关系在其它研究中也已经指出^[19,20]。

土壤含水量是影响土壤呼吸的另一重要因子,土壤水分的改变势必影响土壤的通透性、植物根系呼吸以及土壤微生物生命的活动,进而导致土壤呼吸的剧烈变动。有的研究指出,CO₂ 排放通量与土壤水分含量之间无明显的相关性^[14]。本研究中,虽然土壤 CO₂ 排放速率与土壤水分的季节变化一致性较差,但相关性分析却较显著,是由于夏季的大量降雨,使土壤水分波动较大,有时土壤水分含量很高,土壤水分成为土壤 CO₂ 排放的限制因子,土壤水分的作用明显。

土壤温度、土壤水分的季节变化也是影响 N₂O

排放通量季节变化的重要因素。由图 2 可见，土壤 N₂O 排放通量随温度和水分的变化季节变化不明显,但是受施肥处理的影响较大,伴随着施肥生长前期和中后期出现明显的排放峰。相关分析结果如表 3 所示,3 个处理中,土壤 N₂O 排放通量只有不施肥对照处理和土壤水分的相关分析显著($P<0.05$),其他与相应的气温、地表温、地下 5 cm 温度的相关性不显著,且在猪粪处理中呈负相关关系。土壤微生物活性有个温度范围,郑循华^[21]观测到在适宜的土壤湿度范围内,67% 的 N₂O 排放集中在 15 ℃~25 ℃范围内。本研究的施肥处理中,即使在冬季温度很低时,也有较高的 N₂O 的排放，可能是由于土壤中有大量外源氮的输入,且这一时期植物对 N 的利用率较低,造成了大量的 N₂O 的排放。也有研究表明,冻融交替也可引起冬季 N₂O 排放峰的出现^[22]。在不施肥处理中,土壤温度对土壤 N₂O 排放的影响要小于土壤水分的作用，施肥处理中,肥料效应掩盖了土壤水分的作用,相关分析并不显著。

3 结论

肥料施用对农田土壤 CO₂ 排放的季节模式无明显影响,但是影响了 N₂O 的季节模式。肥料施用促进了土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放，猪粪和牛粪处理在小麦季土壤 CO₂ 和 N₂O 排放和不施肥对照差异显著,在后作玉米季施用尿素的情况下,与对照土壤 CO₂ 排放没有显著的差异,和对照 N₂O 排放通量差异显著。表明外源有机物质的投入极大地促进了土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放,而前作施用有机肥情况下,后作的化肥施用对土壤 CO₂ 排放的影响不大，对 N₂O 排放影响较大。

猪粪处理的 CO₂ 和 N₂O 排放要高于牛粪处理，在小麦季二者的 N₂O 排放差异明显,由于是等氮量施入,气体排放主要受外源碳的制约,由于牛粪中有机

碳和氮的可降解性要低于猪粪,施入土壤后对土壤中CO₂和N₂O排放的影响也要低于猪粪处理。

除了受肥料施用的影响外,土壤CO₂和N₂O的排放还受环境因子如土壤温度和土壤水分的影响。在小麦-玉米整个生长季中,土壤CO₂排放通量的季节变化趋势和土壤温度的变化趋势一致,相关分析结果表明,土壤CO₂排放与大气温度、地表温度和土壤湿度均呈显著正相关关系($P<0.01$)。而N₂O排放通量的季节趋势变动较大,伴随着肥料施用有排放高峰的出现,土壤N₂O排放只在对照处理中与土壤水分相关显著($P<0.05$),施肥处理中,肥料效应掩盖了土壤温度和水分效应,使得相关性并不显著。

参考文献:

[1] Sandro F. Overview of the biogenic sources of atmospheric trace compounds due to agricultural activities [J]. *Aerobiologia*, 1996, 12: 129–132.

[2] 李世朋,汪景宽. 温室气体排放与土壤理化性质的关系研究进展 [J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(2): 155–159.

[3] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland [J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, 53: 29–39.

[4] 谢军飞,李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展 [J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 47–52.

[5] 曹志洪. 施肥与大气环境质量——论施肥对环境的影响(1) [J]. 土壤, 2003, 35(4): 265–270.

[6] Thornton F C, Shurpali N J, Bock B R, et al. N₂O and NO emissions from poultry litter and urea applications to bermuda grass [J]. *Atmos Environ*, 1998, 32(9): 1623–1670.

[7] Flessa H, Ruser R, Dörsch P, et al. Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91: 175–

189.

[8] 邹建文,焦燕,王跃思,等. 稻田CO₂、CH₄和N₂O排放通量测定方法研究 [J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 45–48.

[9] 陈素英,胡春胜. 太行山前平原农田生态系统土壤呼吸速率的研究 [J]. 生态农业研究, 1997, 5(2): 42–46.

[10] 张宪洲,刘允芬,钟华平,等. 西藏高原农田生态系统土壤呼吸的日变化和季节变化特征 [J]. 资源科学, 2003, 25(5): 103–107.

[11] 陈述悦,李俊,陆佩玲,等. 华北平原麦田土壤呼吸特征 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1552–1560.

[12] 王立刚,邱建军,李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究 [J]. 土壤肥料, 2002, (6): 13–17.

[13] Dong Y S, Peng G B, Li J. Nitrous Oxide Emissions from North China Plain Agricultural Soils [J]. *Tellus B*, 2001, 51(1): 1–9.

[14] 丁洪,蔡贵信,王跃思,等. 玉米-小麦轮作系统中氮肥反硝化损失与N₂O排放量 [J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 557–560.

[15] 邹国元,张福锁,陈新平,等. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(6): 47–50.

[16] 李玉宁,王关玉,李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环 [J]. 地学前缘(中国地质大学,北京), 2002, 9(2): 351–357.

[17] 邹建文,黄耀,宗良纲,等. 不同种类有机肥施用对稻田CH₄和N₂O排放的综合影响 [J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7–12.

[18] Velthof G L, Kuikman P J, Oenema O. Nitrous oxide emission from animal manures applied to soil under controlled conditions [J]. *Biol Fertil Soils*, 2003, 37:221–230.

[19] Mielnick P C, Dugas W A. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie [J]. *Soil Bio Biochem*, 2000, 32: 221–228.

[20] 戴万宏,王益权,黄耀,等. 农田生态系统土壤CO₂释放研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 1–7.

[21] 郑循华,王明星,王跃思,等. 温度对农田N₂O产生与排放的影响 [J]. 环境科学, 1997, 18(5): 1–5.

[22] Teepe R, Brumme R, Beese F. Nitrous oxide emissions from soil during freezing and thawing periods [J]. *Soil Bio & Biochem*, 2001, 33: 1269–1275.