

沼液施用对潮土氧化亚氮排放通量的影响

彭永红, 陈永根, 宋照亮, 单胜道, 宋哲岳

(浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 通过对潮土养猪沼液施加试验, 采用静态箱-气相色谱法于2010年7月(夏季)、2011年3月(冬末春初)观测了不施沼液、正常施沼液及大量施沼液等3种处理的土壤氧化亚氮(N_2O)排放通量, 研究其排放特征与影响因素。研究表明: ①沼液施用显著提高了氧化亚氮平均排放通量($P < 0.001$), 不同沼液处理(不施沼液、正常施沼液、大量施沼液)排放通量范围分别为 $11.25 \sim 68.47 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $20.13 \sim 244.35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $40.09 \sim 618.43 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ②土壤氧化亚氮排放通量除受沼液施加水平影响外, 还随着土壤温度的提高而增加; ③土壤氧化亚氮排放通量与土壤水分呈极显著相关($P < 0.001$), 与土壤硝态氮质量分数显著相关($P < 0.05$); ④以相同施氮量计, 沼液施加引起的氧化亚氮排放速率远高于尿素或者硫酸等氮肥。图3表1参22

关键词: 环境科学; 沼液; 氧化亚氮; 潮土; 环境影响

中图分类号: S7-0; X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2012)06-0954-06

Nitrous oxide emission from an aquic soil after pig slurry application

PENG Yong-hong, CHEN Yong-gen, SONG Zhao-liang, SHAN Sheng-dao, SONG Zhe-yue

(School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To determine the characteristics of nitrous oxide (N_2O) emissions as well as the relationship between gas emission fluxes and related environmental factors, a pig slurry amendment experiment in an aquic soil was established, and observations of the N_2O emissions based on a closed-chamber, gas chromatography-based system in July 2010 (summer) and March 2011 (winter) were made. A field experimental design was employed with three treatments: no (NOF), normal (NF), and excessive fertilization (EF) and each treatment with three replications. Results showed a highly significant increase ($P < 0.001$) in N_2O emissions from this aquic soil with nitrogen fertilizer application. The N_2O emissions ranged from 11.25 to $68.47 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ for NOF, from 20.13 to $244.35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ for NF, and from 40.09 to $618.43 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ for EF with an exponential relationship between nitrogen application rates and N_2O emissions. In addition, soil temperature increases raised N_2O emissions. Highly significant exponential relationships ($P > 0.001$) between N_2O emissions and soil moisture, and significant exponential relationships ($P < 0.05$) between N_2O emissions and mass fraction of soil nitrate were also found. When applying the same quantity of N, N_2O emissions from the slurry were more than twenty times as much as nitrogen fertilizers such as urea or thiamine. These results indicated that soil temperature, soil moisture and mass fraction of soil nitrate could be important controlling variables for soil N_2O fluxes. [Ch, 3 fig. 1 tab. 22 ref.]

Key words: environmental science; pig slurry; nitrous oxide; aquic soil; environmental impact

大气中二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)等温室气体浓度的增加是导致全球气温升高的主要因素^[1], 它们对温室效应的贡献率近 80%。其中氧化亚氮以 $0.25\% \cdot a^{-1}$ 的速度增长, 它的增温效应

收稿日期: 2011-09-25; 修回日期: 2011-11-23

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Z5080203, Y5080110)

作者简介: 彭永红, 从事环境生态研究。E-mail: pengyonghong809@126.com。通信作者: 单胜道, 教授, 博士, 从事环境科学和循环经济研究。E-mail: shanshd@vip.sina.com

是二氧化碳的 296~310 倍^[2]，且它在大气中具有较长的滞留时间，同时还参与大气中许多光化学反应，破坏大气臭氧层，从而对人类的健康产生威胁^[3-4]。而深入研究氧化亚氮产生途径和排放规律及机制是国内研究的热点问题之一^[4-7]。沼液中富含养分，能被作物迅速吸收利用^[8]。沼液中还含有抗生素、金属、硝酸盐等物质，可能对土壤中有害物质的积累有影响，且沼液的施加也增加了温室气体的排放^[9]，因此，沼液的施加对环境产生一定的影响。据相关研究表明，欧洲将近 75% 氧化亚氮来源于农田土壤和动物饲养^[10-11]。因此，控制好沼液的施加量很重要。陆日东等^[12]研究过不同堆放方式牛粪的温室气体排放规律，而有关沼液对农田土壤氧化亚氮排放通量影响的研究不多见，尤其是亚热带潮土类型的地区。本研究通过静态箱-气相色谱法研究了沼液施用对潮土温室气体氧化亚氮排放的贡献，研究潮土氧化亚氮排放规律和氧化亚氮排放通量与沼液施加水平的关系，以揭示沼液施加水平对潮土氧化亚氮排放的影响，试图找到合理的施肥方式，以期减少沼液资源化利用过程中的大气污染。

1 材料与方 法

1.1 野外实验样地概况与采样时间

试验用地为浙江省余杭区志绿生态园内的试验地，土壤类型为轻壤质潮土，属湿润的亚热带南缘季风气候区，年均水量为 1 391.8 mm，年平均气温为 15.3~16.2 ℃。2010 年 7 月和 2011 年 3 月进行 2 次实验。一次于 2010 年 7 月 3 日 12:50 到 7 月 5 日 00:08，隔 4 h 采气样 1 次，共采样 10 次；一次于 2011 年 3 月 1 日 15:16 到 2011 年 3 月 3 日 14:47，隔 2~3 h 采气样 1 次，白天采集，晚上不采样，共采样 9 次。并且 2 次采样时同步测定 5 cm 深土壤温度、地表温度、大气温度和箱内温度。

1.2 试验设计

试验共设 3 个处理，分别为①大量施沼液，②正常施沼液，③不施沼液，重复 3 次·处理⁻¹，其中大量施沼液为采集气体前施沼液 30 min，共施沼液 168.0 g·m⁻²，正常施肥为采集气体前施沼液 10 min，共施沼液 93.3 g·m⁻²。本研究试验小区面积约为 60 m²。

1.3 土壤样品与沼液的采集与参数分析

采集 0~5 cm 深度的土壤带回实验室，风干、磨碎、过筛后，用常规方法^[13]分析土壤一些化学性状。供试土壤酸碱度为 pH 5.65±0.01，硝态氮为 17.4 mg·kg⁻¹，氨态氮为 2.81 mg·kg⁻¹，总有机碳为 1.65 g·kg⁻¹，水溶性有机碳为 0.0251 g·kg⁻¹，水分为 29.8%。

供试沼液经测试得总氮 268.8 mg·L⁻¹，氨态氮为 215.6 mg·L⁻¹，pH 7.04±0.01。

1.4 氧化亚氮的采集和分析

本研究采用静态暗箱法采集气体。采样箱由底座和顶箱组成。2 种箱体均由聚氯乙烯材料制成。底座的几何尺寸为 50 cm × 50 cm × 20 cm，整个观测期间都固定在采样点上。顶箱长、宽、高均为 50 cm。底座上端均有深 3 cm，宽 5 cm 的密封水槽，实验时往槽里浇水以防止箱子和底座的接触处漏气。顶箱上部有气体样品采集口。采气时将顶箱置于底座上，用 100 mL 注射器采集第 1 次样品，之后间隔 15 min 采样 1 次，罩箱时间为 45 min，采集的气体样品置于 0.5 L 铝箔气袋内。将气袋带到中国科学院南京地理与湖泊研究所测试。

用带十通阀控制的反吹装置电子捕获器的 HP 5890II 型气相色谱仪测定氧化亚氮的浓度。测定条件为：进样口温度 100 ℃，炉温 85 ℃，检测器温度 320 ℃，填充材料为过 80 目的 Porapak Q 柱，载气为氮气，流速为 30 mL·min⁻¹。通过对 4 个气样浓度进行线性回归，得出气体排放速率^[1]。

1.5 数据分析

氧化亚氮排放通量计算方法： $F = \rho \cdot h \cdot dC/dt \cdot 273 / (273 + T)$ ^[7]。其中： F 为氧化亚氮排放通量 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)； ρ 为被测气体标准状态下的密度 (氧化亚氮为 1.97 kg·m⁻³)； h 为采样箱内气室高度 (m)； dC/dt 为采样箱内被测气体的浓度变化率； T 为采样过程中采样箱内的平均温度 (℃)。

2 结果

2.1 氧化亚氮相关参数的数值范围

表 1 为冬末春初和夏季氧化亚氮相关参数的数值范围，包括 5 cm 地度、硝态氮、有机碳、土壤水

分、氨态氮以及土壤 pH 值的最大值、最小值以及平均值。其中, 硝态氮、氨态氮及有机碳的数值基本上随着施沼液量的增加而增加; 土壤水分含量基本为 30%~40%; 土壤 pH 6.0 以下, 呈酸性。

表 1 氧化亚氮相关参数数值范围

Table 1 Range of relevant parameters of N₂O

季节	处理	数值范围	5 cm 地温/℃	硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	氨态氮/(mg·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	水分/%	pH 值
冬末春初	不施沼液	最小值	3.5	10.88	0.67	0.58	28.11	5.26
		最大值	11.0	47.86	11.54	0.69	32.08	5.87
		平均值	7.7	26.10	5.08	0.62	29.78	5.65
	正常施沼液	最小值	3.5	2.18	0.13	0.55	33.38	5.45
		最大值	11.0	95.71	14.63	0.73	38.67	5.92
		平均值	7.7	25.38	6.10	0.64	36.45	5.67
	大量施沼液	最小值	3.5	2.18	1.21	0.57	33.52	5.57
		最大值	11.0	58.73	8.86	0.70	44.74	5.82
		平均值	7.7	22.48	5.12	0.65	37.85	5.70
夏季	不施沼液	最小值	27.2	70.35	0.24	0.47	32.15	5.47
		最大值	30.4	200.37	5.56	0.71	39.70	5.84
		平均值	28.7	134.20	1.32	0.62	35.76	5.67
	正常施沼液	最小值	27.2	142.16	0.32	0.61	29.12	5.45
		最大值	30.4	730.46	7.21	0.81	44.01	5.71
		平均值	28.7	349.63	1.70	0.70	37.61	5.55
	大量施沼液	最小值	27.2	210.22	0.54	0.69	37.95	5.46
		最大值	30.4	756.53	5.31	0.85	45.75	5.84
		平均值	28.7	419.10	1.62	0.76	40.35	5.63

2.2 夏季氧化亚氮通量变化特征

图 1 是 7 月 3-5 日氧化亚氮排放通量变化图。可以看出: 试验开始后, 在施沼液 24 h 内, 土壤氧化亚氮气体释放差异明显; 但之后, 差异不明显。第 1 天 12:00 左右至第 2 天 8:00 左右大量施沼液的氧化亚氮排放通量呈急剧下降趋势, 而正常施沼液和不施沼液的氧化亚氮通量则呈平缓的变化趋势。8:00 左右之后 3 种施沼液处理氧化亚氮的通量变化平缓。经计算: 大量施沼液时, 氧化亚氮平均排放通量为 618.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$; 正常施沼液为 244.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 不施沼液为 68.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。说明土壤为氧化亚氮的源。大量施沼液与正常施沼液和不施沼液皆呈极显著性差异 ($P<0.001$)。

2.3 冬末春初氧化亚氮通量变化特征

图 2 是 3 月 1-3 日氧化亚氮排放通量变化图。从图 2 中可看出: 2011 年 3 月, 可以看出试验开始后第 1 天 17:00 左右之后, 3 种施沼液处理之间土壤氧化亚氮气体释放差异明显。从第 2 天 9:00 开始至 11:00 左右和第 3 天 9:00 左右至 14:00, 大量施沼液处理氧化亚氮排放通量呈明显的上升趋势, 而正常施沼液和不施沼液氧化亚氮通量呈平稳的上升和下降趋势。经计算, 氧化亚氮大量施沼液时平均排放通量为 40.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 正常施沼液为 20.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 不施沼液为 11.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。说明土壤为氧化亚氮的源。3 种处理间的氧化亚氮排放通量呈极显著性差异 ($P<0.001$)。

3 讨论

3.1 各种土壤物理化学性质对氧化亚氮通量的影响

土壤中产生氧化亚氮的途径主要是硝化作用和反硝化作用, 且在多数情况下, 反硝化作用比硝化作用具有更大的氧化亚氮排放作用。反硝化过程是酶促反应过程, 因而受到温度、底物浓度、pH 值和

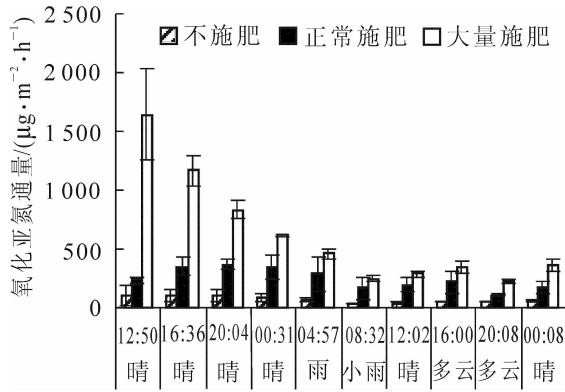


图 1 2010 年 7 月氧化亚氮排放通量变化
Figure 1 Variations of N₂O emission flux in July 2010

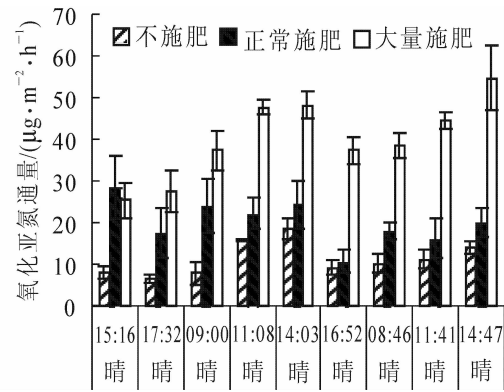


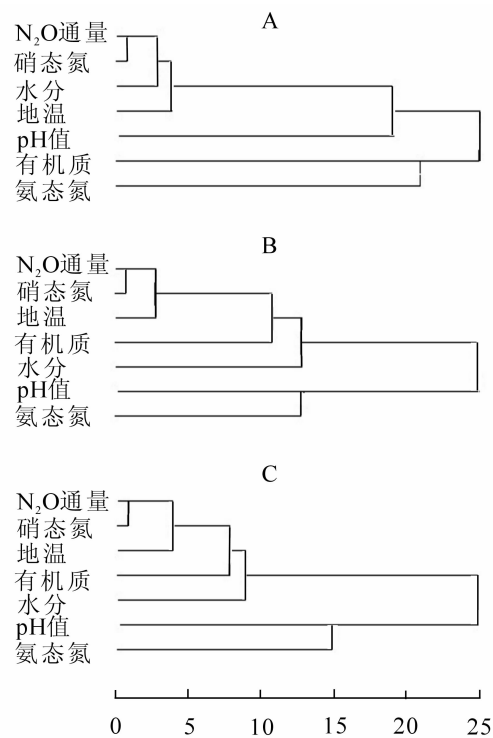
图 2 2011 年 3 月氧化亚氮排放通量变化
Figure 2 Variations of N₂O emission flux in March 2011

水分等的影响^[2]。从图 3 可以粗略地看出，本研究中氧化亚氮的排放通量与硝态氮的质量分数、水分和温度有较大的相关性，与其他因素有较小的相关性。

3.1.1 土壤硝态氮对氧化亚氮通量的影响 氧化亚氮主要是由硝化作用与反硝化作用共同产生的。而硝化与反硝化作用与土壤中底物硝态氮的质量分数相关。经相关性分析得，不施沼液下，氧化亚氮通量与硝态氮质量分数存在极显著的正相关关系(相关系数 $r=0.99$, $P<0.001$)；正常施沼液下，氧化亚氮通量与硝态氮质量分数存在极显著的正相关关系(相关系数 $r=0.951$, $P<0.001$)；大量施沼液下，氧化亚氮通量与硝态氮质量分数存在极显著的相关性(相关系数 $r=0.94$, $P<0.05$)，并且相关研究也表明土壤氧化亚氮产生量在一定范围内随加入 NO_3^- -N 的增大而持续增高^[14]。

3.1.2 土壤温度对氧化亚氮通量的影响 温度对氧化亚氮形成与排放的影响具有明显的昼夜节律和季节变化，硝化、反硝化作用的最适温度为 30 °C 和 25 °C^[2]。随着土壤温度的改变，土壤微生物的活性会发生变化，其参与的相关生物化学反应速率也会随之改变，从而最终影响氧化亚氮产生和排放。经相关性检验得出，不施沼液下，温度与氧化亚氮存在极显著的正相关关系(相关系数 $r=0.768$, $P<0.001$)；正常施沼液下，温度与氧化亚氮存在极显著的正相关关系(相关系数 $r=0.788$, $P<0.001$)；大量施沼液下，温度变化与氧化亚氮通量变化有显著的相关性(相关系数 $r=0.634$, $P<0.05$)。可以看出，3 种施沼液方式都与温度有相关性，但相关系数和显著性并不全部一致，这可能由于其他因素比如土壤水含量、硝态氮等的影响。而一些研究，比如刘晔等^[15]对北京森林生态系统的研究表明，土壤氧化亚氮的排放速率是随土壤温度升高而增加的。郑循华等^[16]发现当土壤湿度比较适宜时，氧化亚氮排放通量与 5 cm 土层深度的日平均温度呈指数关系。这些研究也说明了土壤温度与氧化亚氮排放量存在着一定的关系。

3.1.3 土壤水分对氧化亚氮通量的影响 土壤水分是土壤的重要组成部分，而土壤含水量影响土壤的通气状况和氧化还原状况，并且通过影响 NH_4^+ 和 NO_3^- 在土壤中的分布及其对微生物的有效性，来影响土壤中硝化作用和反硝化作用，从而影响土壤氧化亚氮的排放^[17]。相关性分析表明，氧化亚氮与土壤水分的相关系数 $r=0.523$ ($P<0.001$)。而相关一些研究中也证明了土壤水分与氧化亚氮通量的存在一定的关



A.不施沼液;B.正常施沼液;C.大量施沼液
图 3 氧化亚氮排放通量与各因素之间的聚类分析
Figure 3 Cluster analysis between N₂O emission flux and the factors

系。经相关性检验得出，不施沼液下，温度与氧化亚氮存在极显著的正相关关系(相关系数 $r=0.768$, $P<0.001$)；正常施沼液下，温度与氧化亚氮存在极显著的正相关关系(相关系数 $r=0.788$, $P<0.001$)；大量施沼液下，温度变化与氧化亚氮通量变化有显著的相关性(相关系数 $r=0.634$, $P<0.05$)。可以看出，3 种施沼液方式都与温度有相关性，但相关系数和显著性并不全部一致，这可能由于其他因素比如土壤水含量、硝态氮等的影响。而一些研究，比如刘晔等^[15]对北京森林生态系统的研究表明，土壤氧化亚氮的排放速率是随土壤温度升高而增加的。郑循华等^[16]发现当土壤湿度比较适宜时，氧化亚氮排放通量与 5 cm 土层深度的日平均温度呈指数关系。这些研究也说明了土壤温度与氧化亚氮排放量存在着一定的关系。

系, 比如杜睿等^[18]的研究显示了土壤含水量与草原土壤氧化亚氮排放通量之间存在阶段函数关系。

3.1.4 其他因素对氧化亚氮通量的影响 研究表明, 氧化亚氮通量与 pH 值、氨态氮和有机质关系具有较小的相关性。其中氧化亚氮通量与 pH 值相关系数 $r=-0.155$, 氧化亚氮通量与氨态氮浓度相关系数 $r=-0.271$, 氧化亚氮通量与有机质质量分数相关系数 $r=0.391$ ($P<0.05$), 这与前人白东升等^[19]、侯爱新^[20]、梁东丽^[14]等的研究基本一致。

3.2 不同施肥措施对氧化亚氮通量的影响

有研究表明^[21], 氮肥用量较低时, 氧化亚氮排放量一般占施氮肥总量的 0.1%~0.8%; 较高时则为 0.5%~2.0%。而沼液中氮素的含量很高, 因此不同水平沼液的施加也会引起氧化亚氮排放量的增加。本研究中 2010 年 7 月的 1.0 g 氮的沼液施加释放的氧化亚氮为 1.880~3.270 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 在 2011 年 3 月的 1.0 g 氮的沼液施加释放的氧化亚氮为 0.095~0.170 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ 。其他研究^[22]则表明, 施加尿素或者硫酸的多数研究中, 1.0 g 氮素肥料的施加释放的氧化亚氮在 1.000 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ 以内。因此, 以相同施氮量计, 夏季沼液施加引起的氧化亚氮排放速率高于尿素或者硫酸等氮肥。在大范围利用沼液代替部分氮肥的实践过程中, 需要关注氧化亚氮排放对大气温室效应的影响问题。

4 结论

3 种处理 氧化亚氮排放两两之间差异基本呈极显著 ($P<0.001$), 2 次试验氧化亚氮的排放通量大小依次是: 大量施沼液 > 正常施沼液 > 不施沼液。总体显示, 沼液处理的氧化亚氮排放通量比未被沼液处理的都高, 说明施加沼液有提高氧化亚氮排放通量的作用。

土壤氧化亚氮排放通量季节变化随温度和硝态氮质量分数的变化而变化。在温度最高的 7 月排放通量较高, 温度低的 3 月排放通量则较低, 说明温度也是影响土壤氧化亚氮排放的重要因子之一。土壤氧化亚氮排放通量与土壤水分呈极显著相关 ($P<0.001$)。

以相同施氮量计, 夏季沼液施加引起的氧化亚氮排放速率高于尿素或者硫酸等氮肥。

参考文献:

- [1] 刘惠, 赵平, 孙谷畴, 等. 华南丘陵区冬闲稻田二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的排放特征[J]. 应用生态学报, 2007, **18** (1): 57 - 62.
LIU Hui, ZHAO Ping, SUN Guchou, *et al.* Characteristics of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from winter-fallowed paddy fields in hilly area of South China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18** (1): 57 - 62.
- [2] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭, 等. 农田土壤 N₂O 生成与排放影响因素及 N₂O 总量估算的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, **12** (3): 119 - 123.
ZHANG Yuming, HU Chunsheng, DONG Wenxu, *et al.* The influencing factors of production and emission of N₂O from agricultural soil and estimation of total N₂O emission [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2004, **12** (3): 119 - 123.
- [3] DAMBREVILLE C, MORVAN T, GERMON J C, *et al.* N₂O emission in maize-crops fertilized with pig slurry, matured pig manure or ammonium nitrate in Brittany [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2008, **123** (1/3): 201 - 210.
- [4] 刘杏认, 董云社, 齐玉春, 等. 土壤 N₂O 排放研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, **24** (6): 50 - 58.
LIU Xingren, DONG Yunshe, QI Yuchun, *et al.* Research progresses in nitrous oxide emission from soil [J]. *Prog Geogr*, 2005, **24** (6): 50 - 58.
- [5] 黄树辉, 蒋文伟, 吕军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N₂O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2005, **25** (5): 540 - 543.
HUANG Shuhui, JIANG Wenwei, LÜ Jun, *et al.* Influence of nitrogen and phosphorus fertilizers on N₂O emissions in rice fields [J]. *China Environ Sci*, 2005, **25** (5): 540 - 543.
- [6] VALLEJO A, M.SKIBA U, GARCIA-TORRES L, *et al.* Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts [J]. *Soil Biol & Biochem*, 2006, **38** (9): 2782 - 2793.
- [7] 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.
QIN Xiaobo, LI Yu'e, LIU Keying, *et al.* Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments [J]. *Transactions CSAE*, 2006, **22** (7): 143 - 148.
- [8] 傅俊范, 郭慧卿. 畜菜生态系统中 CO₂ 和沼肥对黄瓜、番茄病害的生态防治研究[J]. 沈阳农业大学学报, 1999, **30**

- (4): 434 – 436.
- FU Junfan, GUO Huiqing. Effects of ecological control of CO₂ and methane fertilizer on cucumber and tomato diseases in a plant and animal ecosystem [J]. *J Shenyang Agric Univ*, 1999, **30** (4): 434 – 436.
- [9] 高红莉. 施用沼肥对青菜产量品质及土壤质量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29** (增刊): 43 – 47.
- GAO Hongli. Effects of biogas fertilizer on output and quality of *Brassica chinensis* L. and soil quality [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2010, **29** (supp): 43 – 47.
- [10] FREIBAUER A. Regionalised inventory of Biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture [J]. *Eur J Agron*, 2003, **19** (2): 135 – 160.
- [11] MEIJIDEA A, DÍEZB J, SÁNCHEZ-MARTÍN L, *et al.* Nitrogen oxide emissions from an irrigated maize crop amended with treated pig slurries and composts in a mediterranean climate [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2007, **121** (4): 383 – 394.
- [12] 陆日东, 李玉娥, 石锋, 等. 不同堆放方式对牛粪温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27** (3): 1235 – 1241.
- LU Ridong, LI Yu'e, SHI Feng, *et al.* Effect of compost on the greenhouse gases emission from dairy manure [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2008, **27** (3): 1235 – 1241.
- [13] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 27 – 51.
- [14] 梁东丽, 同延安, EMTERYD O, 等. 有效碳源和氮源对黄土性土壤 N₂O 溢出量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, **31** (1): 43 – 48.
- LIANG Dongli, TONG Yan'an, EMTERYD O, *et al.* Effects of available carbon and nitrogen concentration on the N₂O flux of the Loessal soil [J]. *J Northwest Sci-Technol Univ Agric For Nat Sci Ed*, 2003, **31** (1): 43 – 48.
- [15] 刘晔, 牟玉静, 钟晋贤, 等. 氧化亚氮在森林和草原中的地-气交换[J]. 环境科学, 1997, **18** (5): 15 – 18.
- LIU Ye, MOU Yujing, ZHONG Jinxian, *et al.* The exchange of nitrous oxide between atmosphere and territory in the forest and grassland [J]. *Environ Sci*, 1997, **18** (5): 15 – 18.
- [16] 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.
- ZHENG Xunhua, WANG Mingxing, WANG Yuesi, *et al.* Impacts of temperature on N₂O production and emission [J]. *Environ Sci*, 1997, **18** (5): 1 – 5.
- [17] 张振贤, 华璐, 尹逊霄, 等. 农田土壤 N₂O 的发生机制及其主要影响因素[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2005, **26** (3): 114 – 120.
- ZHANG Zhenxian, HUA Luo, YIN Xunxiao, *et al.* Nitrous oxide emission from agricultural soil and some influence factors [J]. *J Cap Norm Univ Nat Sci Ed*, 2005, **26** (3): 114 – 120.
- [18] 杜睿. 温度和水分对草甸草原土壤氧化亚氮产生速率的调控[J]. 应用生态学报, 2006, **17** (11): 2170 – 2174.
- DU Rui. Effects of soil moisture and temperature on N₂O production rate of meadow grassland soil [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17** (11): 2170 – 2174.
- [19] 白东升, 杨治平, 王永亮, 等. 不同施肥管理方式下潮褐土区夏玉米 N₂O 排放量研究[J]. 现代农业科学, 2008, **15** (11): 47 – 49.
- BAI Dongsheng, YANG Zhiping, WANG Yongliang, *et al.* Research of different fertilization management on N₂O emission of the summer maize in the meadow-cinnamon soil area [J]. *Mod Agric Sci*, 2008, **15** (11): 47 – 49.
- [20] 侯爱新, 陈冠雄, 吴杰, 等. 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放关系及其生物学机理和一些影响因子[J]. 应用生态学报, 1997, **8** (3): 270 – 274.
- HOU Aixin, CHEN Guanxiong, WU Jie, *et al.* Relationship between CH₄ and N₂O emissions from rice field and its microbiological mechanism and impacting factors [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1997, **8** (3): 270 – 274.
- [21] 齐玉春, 董云社. 土壤氧化亚氮产生、排放及其影响因素[J]. 地理学报, 1999, **54** (6): 534 – 539.
- QI Yuchun, DONG Yunshe. Nitrous oxide emissions from soil and some influence factors [J]. *Acta Geogr Sin*, 1999, **54** (6): 534 – 539.
- [22] 李晓, 颜晓元, 邢光熹, 等. 不同动物排泄物氮的作物利用及对 N₂O 排放的贡献[J]. 土壤, 2008, **40** (4): 548 – 553.
- LI Xiao, YAN Xiaoyuan, XING Guangxi, *et al.* Nitrogen utilization ratio and N₂O emission from different animal manures [J]. *Soils*, 2008, **40** (4): 548 – 553.