

沼液施用对土壤温室气体排放的影响

陈永根, 彭永红, 宋哲岳, 单胜道

(浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 采用静态箱-气相色谱法, 于2010年7月(夏季)、2011年3月(冬季)进行了不同沼液施用量对土壤二氧化碳(CO₂), 甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)气体排放影响的研究。试验期间, 沼液施用设为大量施沼液(夏季为28.36 g·m⁻², 冬季为1.94 g·m⁻²), 正常施沼液(夏季为9.45 g·m⁻², 冬季为0.65 g·m⁻²)和不施沼液等3个水平。结果表明: ①夏季或冬季, 处理对土壤二氧化碳排放影响均不显著。②夏季沼液施用8 h内, 处理间对土壤甲烷排放具极显著差异($P < 0.001$), 其中大量施沼液时通量最大为3.98 mg·m⁻²·h⁻¹; 正常施沼液时通量最大为1.25 mg·m⁻²·h⁻¹, 8 h后处理间无显著差异($P > 0.05$)。冬季在大量施沼液时, 初期土壤甲烷排放通量明显高于正常施沼液及不施沼液, 最大为0.28 mg·m⁻²·h⁻¹; 随后处理间土壤甲烷排放通量无显著差异。③夏季沼液施用20 h内, 处理间对土壤氧化亚氮排放具极显著差异($P < 0.001$), 最大值达1 641 μg·m⁻²·h⁻¹; 处理间呈显著差异($P < 0.05$), 大量施沼液、正常施沼液和不施沼液时土壤氧化亚氮排放通量分别为224~349, 70~137, 33~57 μg·m⁻²·h⁻¹; 冬季则处理间土壤氧化亚氮排放无显著差异。图3参19

关键词: 土壤学; 沼液施用; 温室气体; 排放通量; 静态箱-气相色谱法

中图分类号: S153.6; X823 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2013)01-0032-06

Biogas slurry application with greenhouse gas emissions in agricultural soils

CHEN Yonggen, PENG Yonghong, SONG Zheyue, SHAN Shengdao

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

Abstract: To determine the effects of biogas slurry application on greenhouse gas emissions (GGE), including CO₂, CH₄, and N₂O, in agricultural soil, a closed-chamber, gas chromatography-based system were used in July 2010 (summer) and March 2011 (winter). Three treatments with 3 replications were carried out: no (ck), normal (9.45 g·m⁻² in summer, and 0.65 g·m⁻² in winter), and heavy (28.36 g·m⁻² in summer, and 1.94 g·m⁻² in winter) biogas slurry applications. Two-way ANOVA analysis was used to test the significance. Results showed (1) no significant differences in CO₂ emissions among treatments. (2) For CH₄ emissions in summer within the first 8 h of biogas slurry application, the heavy application treatment was significantly greater ($P < 0.001$) than the other two treatments with a maximum emission flux of 3.98 mg·m⁻²·h⁻¹ in the heavy, 1.25 mg·m⁻²·h⁻¹ in the normal, and 0.28 mg·m⁻²·h⁻¹ in ck; however, after 8 h there were no significant differences. (3) N₂O emissions in summer within the first 20 h after biogas slurry application, revealed significant differences ($P < 0.001$) with a maximum emission flux of 1 641 μg·m⁻²·h⁻¹ in the heavy application treatment; after 20 h, significant differences ($P < 0.05$) between the treatments continued with the N₂O emission fluxes of 224~349 μg·m⁻²·h⁻¹ for heavy, 70~137 μg·m⁻²·h⁻¹ for normal, and 33.81~57.06 μg·m⁻²·h⁻¹ for ck. No significant differences in N₂O emissions were found between the treatments in winter. These results could provide helpful information for environmental risk assessments with biogas slurry application, especially with effects on GGE. [Ch, 3 fig. 19 ref.]

收稿日期: 2012-03-13; 修回日期: 2012-04-16

基金项目: 浙江省自然科学基金重点资助项目(Z5080203); 浙江省自然科学基金资助项目(Y5080110)

作者简介: 陈永根, 讲师, 博士研究生, 从事农业生态环境保护研究。E-mail: weyne@163.com

Key words: soil science; biogas engineering; biogas slurry; greenhouse gas; emission flux; closed-chamber and gas chromatography-based method

大气中温室气体浓度的不断增加而导致的气候变暖是当今全球性的环境问题, 其中大气中二氧化碳(CO₂), 甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是最重要的温室气体, 对温室效应的贡献率近80%^[1]。人类社会生产生活引起的温室气体排放是全球变暖的主要原因, 而农田土壤则是温室气体的重要排放源^[2]。据Hansen等^[3]估算, 大气中每年约有5%~20%的二氧化碳, 15%~30%的甲烷, 80%~90%的氧化亚氮来源于土壤。在生态农业实用模式中, 大多数是以“沼”为纽带联结形成的高效生产模式。其中, 沼液是沼气工程处理农牧业废弃物后产生的尚未达国家排放标准的废水。由于大量沼液未经后续处理直接排放, 成为中国水体环境的主要污染源之一, 因此沼液的有效处理成为水环境保护中亟待解决的关键问题。目前, 大多数沼液利用途径即是灌溉, 它具有处理量大、成本低、对氮磷去除效果好等优点, 是目前被认为最易实施且有效的沼液处理方法^[4]。目前, 已有很多学者系统研究了不同栽植条件下土壤主要温室气体(二氧化碳、甲烷和氧化亚氮)的排放规律, 如宋文质等^[5]对农田土壤温室气体排放的研究, 王跃思等^[6]对草地温室气体排放和吸收的影响研究等。近年来, 李鑫等^[7]、刘运通等^[8]、刘平丽等^[9]也开展了施肥条件下土壤氧化亚氮的排放情况进行了研究。目前, 政府大力推广沼液的施用, 但是针对沼液施用下土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮排放的全面研究则鲜有报道。因此, 本研究在浙江余杭区志绿生态产业园, 分别于2010年7月和2011年3月开展了沼液施用下土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的排放特征研究, 以期为准评估沼液施用的环境风险, 特别对大气温室气体排放影响提供一定依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

2010年7月3-4日(夏季)、2011年3月1-3日(冬季)分别在浙江省余杭区志绿生态园(30.27°N, 119.90°E)进行了沼液施用下土壤主要温室气体(二氧化碳、甲烷和氧化亚氮)排放的试验研究。其中, 夏季为7月3日12:00开始至7月4日20:00结束; 冬季则仅监测白天(晚上太冷未开展试验)。供试土壤为潮土, 基本农化性状如下: 酸碱度为pH 5.60, 全氮1.2 g·kg⁻¹, 碱解氮78.5 mg·kg⁻¹。供试沼液为杭州余杭志绿生态园猪场沼气工程。夏季沼液的酸碱度为pH 6.90, 全氮0.57 g·kg⁻¹, 铵态氮468 mg·kg⁻¹; 冬季沼液的酸碱度为pH 7.04, 全氮0.039 g·kg⁻¹, 铵态氮298 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

田间小区试验的沼液施用设3个处理, 通过喷灌时间控制其处理水平, 大量施沼液、正常施沼液和不施沼液的喷灌时间分别为30, 10和0 min(喷灌速度约为20 m³·h⁻¹, 扬程为8 m)。试验处理的沼液施用为1次施用量。其详细处理如下: ①大量施用沼液(夏季, 28.36 g·m⁻²; 冬季, 1.94 g·m⁻²); ②正常施用沼液(夏季, 9.45 g·m⁻²; 冬季, 0.65 g·m⁻²); ③不施沼液。喷灌结束0.5 h后再进行采样工作。设置3个重复·处理⁻¹。样地在夏季试验前, 栽植青菜 *Brassica campestris* var. *chinensis*; 而冬季试验前, 为抛荒地。另外, 在沼液喷灌之前, 清除采样区域内的所有植物, 以便消除植物对温室气体排放的影响。

1.3 采样、测试方法和统计分析

温室气体采用密闭式静态箱法收集。在每个小区(2 m × 2 m)内安装温室气体收集装置。试验开始后, 用长50 cm × 宽50 cm × 高50 cm的底部开口的箱体罩住装置底座, 并用水密封形成1个密闭性气体空间, 然后从箱体顶端的取样口用100 mL注射器取气体样品。采样时隔15 min采集1次, 共采集4次, 取样200 mL·次⁻¹, 注入铝箔气袋内。气体样品送至中国科学院太湖湖泊生态系统研究站分析。具体方法及计算见文献[10-12]。

数据用Excel软件进行整理, 并采用SAS软件进行分析, 采用Two-way ANOVA进行差异显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 沼液施用下土壤二氧化碳排放特征及分析

2010年夏季(7月3-4日)、2011年冬季(3月1-3日)试验情况如图1所示。夏季时, 大量施沼液、

正常施沼液及不施沼液的土壤二氧化碳排放通量分别为 214~369, 169~416 和 84~199 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。冬季时, 大量施沼液、正常施沼液及不施沼液的土壤二氧化碳排放通量分别为 57~234, 103~254 和 123~222 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。试验期间, 夏季地下 5 cm 处温度变化幅度为 27.2~30.4 $^{\circ}\text{C}$, 箱内温度变化幅度为 28.0~35.0 $^{\circ}\text{C}$; 而冬季地下 5 cm 处温度变化幅度为 3.5~11.0 $^{\circ}\text{C}$, 箱内温度变化幅度为 5.0~17.0 $^{\circ}\text{C}$ 。试验结果表明: 夏季土壤二氧化碳排放通量明显大于冬季, 这与夏季温度较高有关。Jabro 等^[13]认为土壤中二氧化碳的释放与温度呈指数关系, 其 $R^2=0.59$; 若按照影响因素分, 温度几乎决定了二氧化碳总释放量的 59%。但是, 试验期间夏季土壤二氧化碳排放通量日变化不明显, 这可能与夏季温度变化幅度较小有关; 而冬季温度变化范围相对较大, 二氧化碳排放通量在 11:00~14:00 点达到高值, 随后慢慢下降。

沼液施用可以直接引起土壤含水量变化, 其中大量施沼液处理下, 垄沟内已出现积水现象。土壤水分一般通过影响土壤通气状况来影响分解土壤有机质的微生物种类、数量及其活性, 进而影响有机质的分解速率以及温室气体的生成速率和扩散速率^[14]。但是, 显著性检验表明: 不施沼液、正常施沼液及大量施沼液的处理之间, 夏季或冬季土壤二氧化碳排放差异均不显著。这可能与本试验采样时间相对较短 (2~3 d), 水分变化未能有效改变微生物种群, 导致不同处理间土壤二氧化碳通量差异不显著。

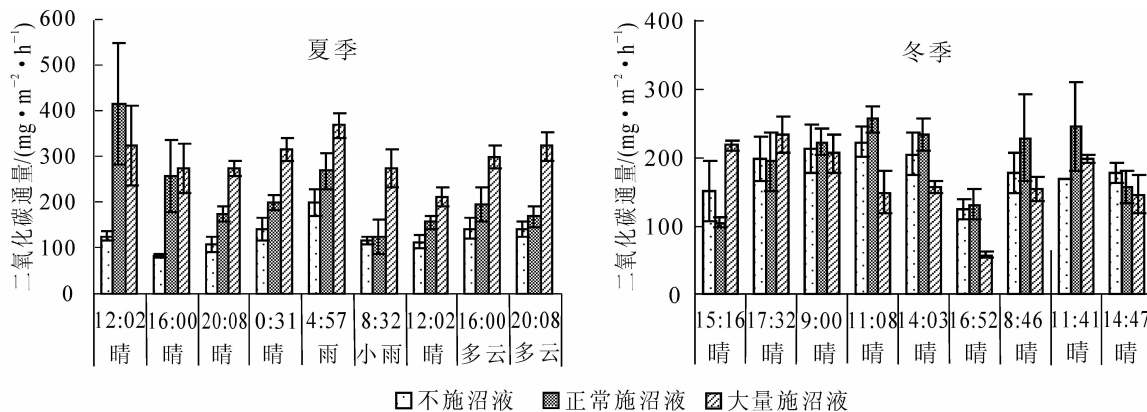


图 1 沼液施用下土壤二氧化碳排放特征

Figure 1 Characteristics of CO₂ emission of the biogas slurry application in agriculture soil

2.2 沼液施用下土壤甲烷排放特征及分析

试验表明: 夏季在施用沼液 8 h 小时内, 大量施沼液、正常施沼液及不施沼液的土壤甲烷排放通量间的差异极显著 ($P<0.001$), 随后不同处理间的土壤甲烷排放通量无显著差异, 降至 0.32 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 1)。其中, 大量施沼液时, 初时刻土壤甲烷排放通量达到 3.98 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 然后急速下降, 至 8 h 之后采样时达到 0.32 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 在正常施沼液时, 初时刻土壤甲烷排放通量达到 1.25 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 8 h 之后则为 0.69 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。冬季在大量施沼液的土壤甲烷排放通量明显大于正常施沼液及不施沼液, 其差异达极显著性水平 ($P<0.001$), 其初时刻土壤甲烷排放通量达到 0.28 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (正常施沼液及不施沼液时

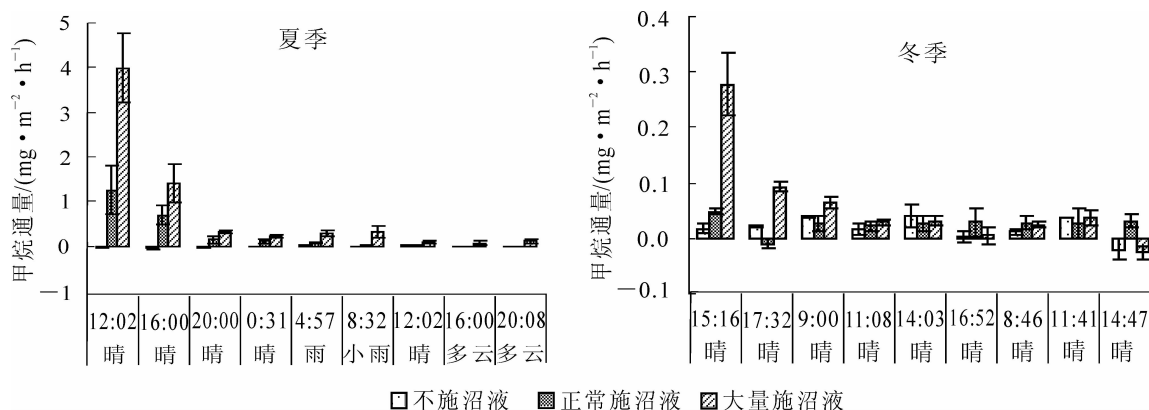


图 2 沼液施用下土壤甲烷排放特征

Figure 2 Characteristics of CH₄ emission of the biogas slurry application in agriculture soil

的通量分别为 0.05 和 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); 而正常施沼液及不施沼液的土壤甲烷排放通量的差异不显著; 随后, 3 个处理间土壤甲烷排放通量的差异不显著 (图 2)。期间, 个别监测点土壤甲烷排放通量小于 0, 即为汇。这与旱地土壤有关。如对北美荒漠地区的少数测量资料估算, 全球大约有 $30 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ 的甲烷在土壤中氧化^[15], 成为大气甲烷的汇。

一般而言, 生态系统中甲烷产生必需有厌氧环境, 目前认为水稻田是大气甲烷的主要来源。在施用沼液处理下, 促进了土壤厌氧环境的形成, 因此, 在不同处理下, 土壤甲烷排放通量间呈极显著差异。但是, 随着水分的下渗、挥发等原因, 处理间土壤含水量逐渐接近, 导致了土壤甲烷排放通量差异不显著。另外, 土壤甲烷排放通量也与产甲烷菌活性有密切关系。在一定温度范围内, 产甲烷菌的代谢能力随温度的升高而升高^[16], 因此, 夏季土壤甲烷排放通量明显高于冬季。

2.3 沼液施用下土壤氧化亚氮排放特征及分析

图 3 可见: 在夏季大量施沼液时, 土壤氧化亚氮排放随时间逐步下降, 变化范围为 $1\ 641\sim\ 248 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 在开始的 20 h 内, 大量施沼液与正常施沼液、不施沼液间呈极显著差异 ($P<0.001$); 然后, 3 个不同处理之间, 土壤氧化亚氮排放呈显著性差异 ($P<0.05$), 土壤氧化亚氮排放通量范围分别为 $224\sim\ 349, 70\sim\ 137, 34\sim\ 57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。试验表明: 沼液中氮肥可促进土壤氧化亚氮排放, 这与刘平丽等^[9], Jantalia 等^[17], Almaraz 等^[18]的研究结果一致。但是, 冬季不同处理间土壤氧化亚氮排放均无显著差异, 通量范围分别 $214\sim\ 369, 126\sim\ 416$ 和 $84\sim\ 199 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。夏季土壤氧化亚氮排放通量明显大于冬季, 这是由于氧化亚氮形成是反硝化过程, 与细菌或厌氧条件下真菌以及有关酶活性等密切相关^[14,19]; 其他条件不变时, 温度高能有效促进氧化亚氮形成。冬季处理间无显著差异, 可能与试验期间温度较低有关。

试验期间, 大量施沼液与正常施沼液、不施沼液处理间, 土壤含水量范围分别为 $33.5\%\sim\ 44.7\%$, $33.4\%\sim\ 38.7\%$ 和 $28.1\%\sim\ 32.1\%$ 。特别是, 大量施用沼液的样地, 施沼液后垄沟内出现积水现象, 但随着土壤的下渗作用, 不同处理间土壤水分含量的差异逐渐减少。土壤含水量的增加可引起土壤厌氧条件的形成, 从而导致夏季处理间刚开始时呈极显著差异, 随后呈显著性差异。Jantalia 等^[17], Almaraz 等^[18]研究也表明, 土壤水分可以促进土壤氧化亚氮排放通量。

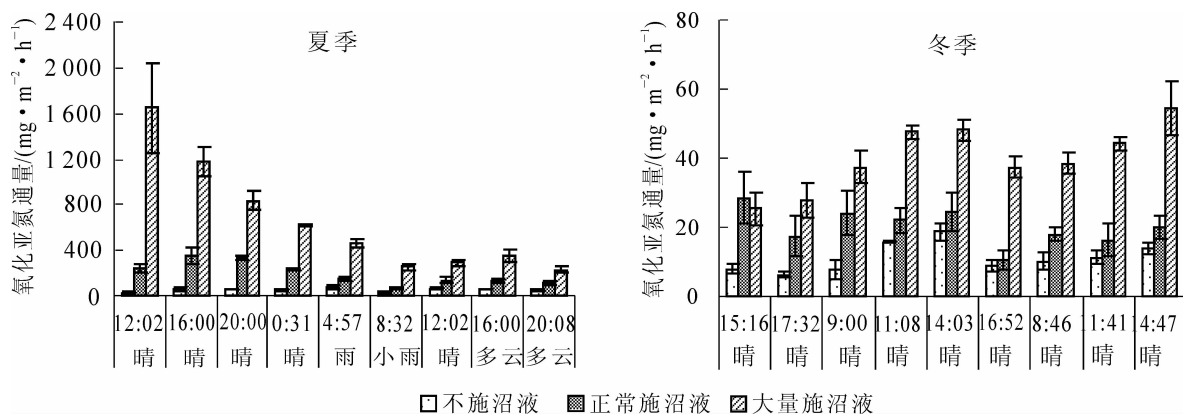


图 3 沼液施用下土壤氧化亚氮排放特征

Figure 3 Characteristics of N_2O emission of the biogas slurry application in agriculture soil

3 结论

农田土壤是温室气体重要排放源, 评估沼液施用对温室气体排放的影响, 对于准确评估沼液施用的环境风险具有重要意义。本试验设置了大量施沼液、正常施沼液及不施沼液等处理, 研究了土壤温室气体(二氧化碳、甲烷和氧化亚氮)排放特征。研究结果表明: ①夏季或冬季, 不施沼液、正常施沼液及大量施沼液处理对土壤二氧化碳排放影响差异均不显著, 即在试验的沼液施用量下, 沼液施用不会促进土壤二氧化碳排放。②夏季在沼液施用 8 h 之内, 不同处理对土壤甲烷排放通量具有极显著差异 ($P<0.001$), 之后则与不施沼液之间差异不显著。冬季在大量施沼液时, 初期土壤甲烷排放通量明显高于正常施沼液及不施沼液处理; 随后不同处理之间无显著差异。这说明在试验用量条件下, 沼液施用初期会促进土壤

甲烷排放。③夏季在沼液施用 20 h 内, 处理间土壤氧化亚氮排放呈极显著差异($P < 0.001$); 然后, 不同处理间则呈显著性差异($P < 0.05$)。冬季在整个试验期间, 处理之间土壤氧化亚氮排放均无显著差异。这说明在夏季沼液施用初期会促进土壤氧化亚氮排放, 而冬季则无显著影响。

本试验研究为沼液施用对土壤温室气体排放影响的初步结果, 但是, 影响农田生态系统温室气体源(排放)或汇(吸收)强度的因素众多^[14], 这些因素导致了研究土壤温室气体排放的复杂性, 需要相对较长的监测过程。因此, 下一步应重点在开展长时间的监测研究, 如在不同的气候因子下, 结合不同的农业生产水平和结构、土壤条件等开展不同土地利用方式或作物种植情况下, 沼液对土壤温室气体排放规律研究, 为土壤温室气体收支预测提供科学依据。

致谢: 感谢浙江农林大学庄伟、徐斌斌、刘一浩、丁钊伟、李爽、潘岳等在野外采样中提供的帮助; 感谢中国科学院太湖湖泊生态系统研究所杨龙元研究员提供气体样品分析帮助; 感谢留美博士陆琴女士对英文摘要的修改。

参考文献:

- [1] KIEHL J T, TRENBERTH K E. Earth's annual global mean energy budget [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1997, **78** (2): 197 - 208.
- [2] MELILLO J M, STEUDLER P A, ABER J D, *et al.* Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, **298** (5601): 2173 - 2176.
- [3] HANSEN J E, LACIS A A. Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative roles in global climate change [J]. *Nature*, 1990, **346** (6286): 713 - 719.
- [4] 邓良伟. 规模化畜禽养殖废水处理技术现状探析[J]. 中国生态农业学报, 2006, **14** (2): 23 - 26.
DENG Liangwei. Review on treatment technology of intensive livestock wastewater [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2006, **14** (2): 23 - 26.
- [5] 宋文质, 王少彬, 苏维瀚, 等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO₂, CH₄ 和 N₂O 排放研究[J]. 环境科学, 1996, **17** (1): 85 - 88.
SONG Wenzhi, WANG Shaobin, SU Weihuan, *et al.* Agricultural activity and emissions of greenhouse gases in China region [J]. *Environ Sci*, 1996, **17** (1): 85 - 88.
- [6] 王跃思, 纪宝明, 黄耀, 等. 农垦与放牧对内蒙古草原 N₂O, CO₂ 排放和 CH₄ 吸收的影响[J]. 环境科学, 2001, **22** (6): 7 - 13.
WANG Yuesi, JI Baoming, HUANG Yao, *et al.* Effects of grazing and cultivating on emission of nitrous oxide, carbon dioxide and uptake of methane from grasslands [J]. *Environ Sci*, 2001, **22** (6): 7 - 13.
- [7] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (1): 99 - 104.
LI Xin, JU Xiaotang, ZHANG Lijuan, *et al.* Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (1): 99 - 104.
- [8] 刘运通, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同氮磷肥施用对春玉米农田 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30** (7): 1468 - 1475.
LIU Yuntong, LI Yu'e, WAN Yunfan, *et al.* Nitrous oxide emissions from spring-maize field under the application of different nitrogen and phosphorus fertilizers [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2011, **30** (7): 1468 - 1475.
- [9] 刘平丽, 张啸林, 熊正琴, 等. 不同水旱轮作体系稻田土壤剖面 N₂O 的分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, **22** (9): 2363 - 2369.
LIU Pingli, ZHANG Xiaolin, XIONG Zhengqin, *et al.* Distribution characteristics of soil profile nitrous oxide concentration in paddy fields with different rice-upland crop rotation systems [J]. *Chin Appl Ecol*, 2011, **22** (9): 2363 - 2369.
- [10] 郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (2): 290 - 298.
ZHENG Zemei, YU Guirui, SUN Xiaomin, *et al.* Comparison of eddy covariance and static chamber/gas chro-

- matogram methods in measuring ecosystem respiration [J]. *Chin Appl Ecol*, 2008, **19** (2): 290 – 298.
- [11] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO₂, CH₄ 和 N₂O 排放[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4** (10): 84 – 90.
- WANG Yuesi, LIU Guangren, WANG Yinghong, *et al.* Simultaneous measurement of CO₂, CH₄ and N₂O emission from terrestrial ecosystem with one improved gas chromatography [J]. *Tech Equip Environ Poll Control*, 2003, **4** (10): 84 – 90.
- [12] 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.
- ZOU Jianwen, JIAO Yan, WANG Yuesi, *et al.* GC-based technique for determination of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from paddy fields [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 2002, **25** (4): 45 – 48.
- [13] JABRO J D, SINJU U, STEVENS W B, *et al.* Carbon dioxide flux as affected by tillage and irrigation in soil converted from perennial forages to annual crops [J]. *J Environ Manage*, 2008, **88** (4): 1478 – 1484.
- [14] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO₂, CH₄, N₂O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19** (4): 966 – 975.
- ZHANG Yuming, HU Chunsheng, ZHANG Jiabao, *et al.* Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2011, **19** (4): 966 – 975.
- [15] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [16] 孙树臣, 翟胜, 王巨媛, 等. 土壤 CH₄ 产生机理及其排放的影响因素[J]. 贵州农业科学, 2011, **39** (1): 135 – 138.
- SUN Shuchen, ZHAI Sheng, WANG Juyuan, *et al.* Generation mechanism and impact factors on CH₄ emission[J]. *Guizhou Agric Sci*, 2011, **39** (1): 135 – 138.
- [17] JANTALIA C P, SANTO H P, URQUIAGA S, *et al.* Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil [J]. *Nutr Cycl Agroecos*, 2008, **82** (2): 161 – 173.
- [18] ALMARAZ J J, MABOOD F, ZHOU X M, *et al.* Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in corn grown under two tillage systems in southwestern Quebec [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2009, **73** (1): 113 – 119.
- [19] 张军科, 郝庆菊, 江长胜. 免耕方式下土壤温室气体排放及影响因素的研究进展[J]. 土壤通报, 2011, **42** (1): 236 – 241.
- ZHANG Junke, HAO Qingju, JIANG Changsheng. The emission and influencing factors of greenhouse gases in soil under the no-tillage cultivation: a review [J]. *Chin J Soil Sci*, 2011, **42** (1): 236 – 241.