

氮肥水平对不同土壤 N_2O 排放的影响

焦燕¹, 黄耀^{2,3}, 宗良纲², 周权锁², Ronald L. Sass⁴

(1. 内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095; 3. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 4. Department of Ecology and Evolutionary Biology, Rice University, Houston, TX 77005-1892, USA)

摘要: 鉴于 N_2O 排放量占施用氮肥量的比例即 N_2O 排放系数还有很大不确定性, 室外盆栽试验于 2002~2003 年选取 3 个供试土壤, 各土壤设置对照和低、中、高氮肥水平, 全年施尿素量 (以 N 计) 分别为 334、670 和 1 004 kg/hm^2 . 结果表明, 水稻生长季, 各个土壤的 N_2O 累积排放量与其对照相比的增加量在低、中、高氮肥水平间无明显差异; 而小麦生长季, 随氮肥施用量增加, 各个土壤的 N_2O 累积排放量与其对照相比的增加量在 3 种氮肥水平之间的差异显著. 整个稻麦轮作系统, 随氮肥用量的增加明显促进麦田 N_2O 的排放. 无论水稻或小麦生长季, 对照 3 个土壤的 N_2O 累积排放量并无显著差异, F 土壤 (江苏溧水)、G 土壤 (江苏涟水) 和 H 土壤 (江苏农科院) 的 N_2O 累积排放量, 在水稻生长季分别为 168、127 和 146 mg/m^2 ; 小麦生长季, 分别为 134、124 和 168 mg/m^2 . 在施氮肥后, 3 个土壤的 N_2O 排放量出现差异, 如在中氮水平下, 小麦生长季, F 土壤、G 土壤和 H 土壤 N_2O 累积排放量分别为 976、744 和 626 mg/m^2 . 稻麦轮作生长季内, 在低氮与中氮 2 个水平下, 不同土壤间 N_2O 排放系数存在显著差异. 以 1 个稻麦轮作周期为时间尺度, F 土壤、G 土壤和 H 土壤总的 N_2O 排放系数分别为 $1.1\% \pm 0.23\%$ 、 $0.75\% \pm 0.17\%$ 和 $1.01\% \pm 0.11\%$, 表明不同土壤对 N_2O 排放系数的影响不同.

关键词: N_2O 排放; 氮肥; 稻麦轮作; 盆栽试验

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2094-05

Impact of Different Levels of Nitrogen Fertilizer on N_2O Emission from Different Soils

JIAO Yan¹, HUANG Yao^{2,3}, ZONG Liang-gang², ZHOU Quan-suo², Ronald L. Sass⁴

(1. College of Chemistry and Environmental Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Department of Ecology and Evolutionary Biology, Rice University, Houston, TX 77005-1892, USA)

Abstract: To investigate the effect of different urea incorporation amount in different soils on N_2O emission, a pot experiment was carried in 2002-2003. Four treatments were designed as the control (without urea incorporation); low N fertilizer level (334 kg/hm^2); middle N fertilizer level (670 kg/hm^2); high N fertilizer level (1 004 kg/hm^2). In rice growing season, compared to control, the increment of N_2O emission accumulation flux of each soil has no obviously differences among three N fertilizer levels. Contrarily, in wheat-planted soils, there are remarkably differences among three N fertilizer levels. Without urea incorporation, there are no differences among N_2O accumulation emission flux of three soils. During the rice growing season, N_2O accumulation emission flux of F soil (jiangsu province, lishui), G soil (jiangsu province, lianshui) and H soil (jiangsu province, agriculture academy) are 168, 127 and 146 mg/m^2 , respectively. N_2O accumulation emission flux of F soil, G soil and H soil is 134, 124 and 168 mg/m^2 , respectively, during wheat growing season. Incorporation of urea into different soils yielded different influence on N_2O emission. For example, at middle-N fertilizer, N_2O accumulation emission flux from F soil, G soil and H soil is 976, 744 and 626 mg/m^2 , respectively. During rice-wheat rotation period, significance differences exists among N_2O emission factors of three soils, with the value of $(1.1 \pm 0.23)\%$, $(0.75 \pm 0.17\%)$ and $(1.01 \pm 0.11)\%$. Furthermore, under the high N fertilizer level, N_2O emission factors of three soils had no significantly difference ($p = 0.3$); while, the N_2O emission factors existed difference among three soils under the low and middle N fertilizer level ($F = 6.25$, $p = 0.01$).

Key words: N_2O emission; N fertilizer; rice-wheat rotation period; pot experiment

N_2O 对大气环境的影响主要表现在温室效应和臭氧层破坏 2 个方面. 一般认为, 农田土壤 N_2O 的排放约占人为排放源的 45%^[1]. 近十余年来, 国内外大量研究集中在化肥施用^[2~4]、温度^[5,6]、土壤 pH

收稿日期: 2007-08-08; 修订日期: 2007-09-18

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (G199011850); 美国航天航空总署 TECO/NASA 项目

作者简介: 焦燕 (1977~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为农田温室气体与全球变化, E-mail: jiaoyan@imnu.edu.cn

值^[7,8]和水分条件^[9,10]等对农田土壤 N₂O 排放的影响. 关于施氮肥对农田 N₂O 排放的影响已有不同程度地研究但还有很大不确定性. 诸如氮肥施用增加 N₂O 排放, 来源于农田氮肥的 N₂O 直接排放量目前还有很大不确定性. IPCC 定义 N₂O 排放系数为每输入 1 个单位的 N 量转化为 N₂O-N 的量^[11], 已有研究表明 N₂O 排放量占施用氮肥量的 0.001% ~ 6.8%^[12,13]. 研究者在所使用的估算方法中, 对不同农业生态系统、不同气候条件、不同土壤、不同管理措施都是同样处理的, 方法比较粗放, 从而使计算结果有很大不确定性^[14].

鉴于此, 本研究在同一农业管理措施和基本相同的气候条件下, 通过盆栽试验试图确定不同土壤

对 N₂O 排放系数的影响, 以期为准确估算 N₂O 排放量提供依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤与测定项目

3 个供试土壤分别于 2001 年采自江苏溧水县柘塘镇乌山新村、江苏涟水洪泽县高涧镇王庄村及江苏农业科学院试验农场境内的水稻土耕作层. 土壤样品代码分别为 F、G 和 H, 土壤类型分别是黄砂土、黄潮土和河淤土. 土壤质地、pH 值、有机碳、全氮、硝态氮、铵态氮见参考文献[15]. 从表 1 为测定结果看出 3 个土壤有机碳, 全氮含量等存在明显差异, 供试土壤具有一定的代表性.

表 1 供试土壤理化特性
Table 1 Physical-chemical properties of air-dried soil sample

土壤代码	采样地	粘粒 < 0.002 mm/ %	砂粒 > 0.02 mm/ %	总有机碳 /mg·kg ⁻¹	总氮 /mg·kg ⁻¹	C/N	pH	氨态氮 /mg·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹
F	江苏溧水	30.3	21.9	1.28	0.14	9.14	5.90	13.70	7.23
G	江苏涟水	23.0	31.1	0.93	0.11	8.45	5.20	11.95	1.43
H	江苏农科院	24.2	30.8	0.75	0.09	8.33	6.00	11.91	5.37

1.2 盆栽试验与农业管理

室外盆栽试验于 2002 年在南京农业大学实施. 盆钵用紫砂泥烧制而成, 钵高和内圆直径均为 20 cm 左右, 盆钵上口有 1.5 cm 深的凹型槽用以在采样时注水与采样箱密封. 每盆装供试土壤 4 kg (风干土) 左右. 为使盆钵土壤的温度与大田土壤温度一致并减小盆钵间的温度差异, 盆钵的 4/5 高度埋入土壤. 试验选取 3 个土壤, 各供试土壤设对照和低、中、高 3 个不同氮肥水平, 各处理 3 个重复. 整个稻麦生长季设置的低、中、高氮肥水平的施尿素量 (以 N 计) 为 334、670 和 1 004 kg/hm².

水稻管理, 供试水稻品种为粳稻 9516, 移栽期为 2002-06-21, 每盆移栽 8 株. 水分管理为常规农业管理措施, 2002-07-20 ~ 2002-07-23 进行烤田, 全个生育期施肥 3 次, 基肥于移栽前施入, 所施用尿素量分别为 0 g/盆钵 (对照)、0.64 g/盆钵 (低氮水平)、1.28 g/盆钵 (中氮水平)、1.93 g/盆钵 (高氮水平), 每盆施 KH₂PO₄ 0.76 g、K₂SO₄ 0.89 g, N:P₂O₅:K₂O 为 0.15:0.10:0.15, 另 2 次追肥分别在 2002-07-20 和 2002-08-24, 施肥量为移栽前施入基肥量的 1/2.

小麦管理, 基于稻麦轮作体系, 小麦在水稻收获后于 2002-11-10 播种, 大约 10 d 后出苗, 2003-05-25 收获. 基肥于播种前施入, 所施用尿素量分别为 0

g/盆钵 (对照)、0.64 g/盆钵 (低氮水平)、1.28 g/盆钵 (中氮水平)、1.93 g/盆钵 (高氮水平), 每盆施 KH₂PO₄ 0.76 g、K₂SO₄ 0.89 g, N:P₂O₅:K₂O 为 0.15:0.10:0.15, 另 2 次追肥分别在 2003-01-07 和 2003-03-09, 施肥量为播种前基肥量的 25%.

1.3 采样与分析

气体样品采集采用封闭箱法, 采样箱为圆筒型, 用 PVC 材料制成, 高 1 m, 箱体直径与盆钵凹型槽直径一致. 采样箱外侧先包有一层约 5 cm 厚的海绵, 然后覆盖一层铝箔以减小采样期间由于太阳辐射引起的箱内温度变化.

气体样品用带有开关的针筒采集, 采样时间为 08:30 ~ 11:00, 每周 1 次. 各盆钵每次采样 3 个, 时间间隔为 10 min, 样品量为 50 mL. 样品的 N₂O 混合比用气相色谱仪 (HP4890) 检测. 通过对每组 3 个样品的 N₂O 混合比与相对应的采样间隔时间 (0、10、20 min) 进行直线回归, 可求得该盆钵土壤的 N₂O 排放速率.

2 结果与讨论

2.1 稻麦轮作系统 N₂O 排放通量的季节变化

由图 1 发现, 对照 3 个土壤的 N₂O 排放在整个

轮作期内都没有明显的排放高峰,低、中、高氮水平下3种土壤 N_2O 季节变化模式相同,整个水稻生育期出现2个明显的排放峰,分别出现在移栽30 d后的烤田期和60 d施肥后.在小麦生长季排放峰主要出现在小麦生长的苗期.氮肥水平不影响 N_2O 季节变化模式,但影响 N_2O 排放通量的相对大小,整个稻麦轮作期高氮水平下,3个土壤的 N_2O 排放通量均比低氮和中氮水平 N_2O 排放通量高.F土壤(江苏溧水)、G土壤(江苏涟水)和H土壤(江苏农科院)在高氮水平下的 N_2O 排放峰值分别是低氮水平下的2.6倍、2.0倍和2.3倍.

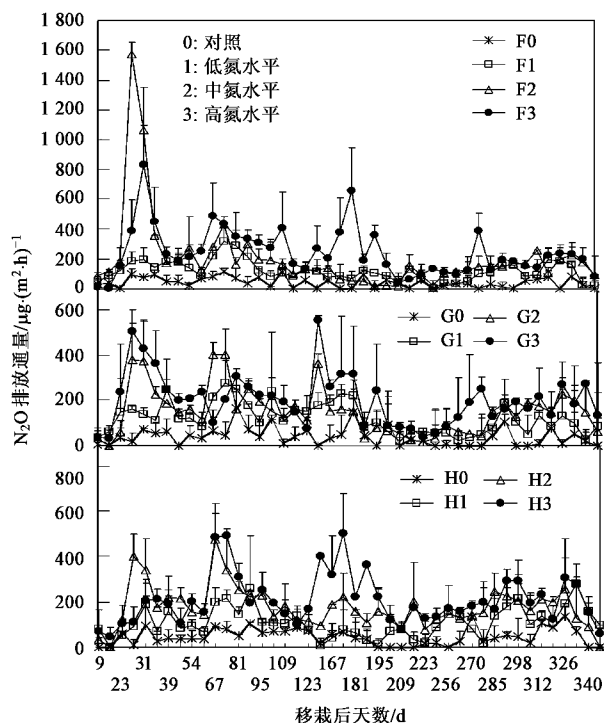


图1 N_2O 季节变化模式

Fig.1 Seasonal pattern of N_2O emissions from different soils

2.2 N_2O 累积排放量

方差分析表明稻麦轮作生长季内,不同土壤之间,及不同氮肥水平之间和土壤和肥料的交互作用间 N_2O 累积排放量均存在显著差异(p 为 0.003、0.000、0.05).由表2和表3发现,水稻生长季,各个土壤的 N_2O 累积排放量与其对照相比的增加量在低、中、高氮肥水平间无明显差异;小麦生长季,各个土壤的 N_2O 累积排放量与其对照相比的增加量在3种氮肥水平之间的差异显著.水稻生长季,在低、中、高氮肥水平下,F土壤(江苏溧水)的 N_2O 累积排放量分别比其对照增加1.8倍、2.7倍、1.7倍;G土壤

(江苏涟水)的 N_2O 累积排放量分别比其对照增加3.9倍、3.1倍、3.1倍;H土壤(江苏农科院)的 N_2O 累积排放量分别比其对照增加3.5倍、3.5倍、3.3倍.小麦生长季,F和H土壤在低、中、高氮肥水平下的 N_2O 累积排放量分别比其对照增加2.3倍、6.3倍和7.6倍;G土壤的 N_2O 累积排放量分别比其对照增加3.6倍、5.0倍和6.2倍;H土壤的 N_2O 累积排放量分别比其对照增加1.2倍、2.7倍和6.6倍.由此也说明,对于稻麦轮作系统,随氮肥用量的增加明显促进小麦生长季的 N_2O 的排放.水稻生长季,随着氮肥用量的增加,并没有显著增加土壤 N_2O 累积排放量,可能是在水田厌氧状态下,土壤中的 NO_2^- 等过量累积又会对硝化反硝化微生物造成毒害,使 N_2O 排放量减少,具体机制还有待进一步深入研究.

更进一步分析表2和表3,稻麦2个生长季,对照3个土壤的 N_2O 累积排放量数值上并无显著差异.水稻生长季,F土壤(江苏溧水)、G土壤(江苏涟水)和H土壤(江苏农科院)的 N_2O 累积排放量分别为168、127和146 mg/m^2 ;小麦生长季,分别为134、124和168 mg/m^2 .在低、中、高氮水平下,3个土壤的 N_2O 累积排放量出现差异,如在中氮水平下,小麦生长季,F土壤、G土壤和H土壤 N_2O 累积排放量分别为976、744和626 mg/m^2 .丁洪等^[16]对华北平原潮土上玉米、大豆、花生和棉花4种夏季典型作物系统间的 N_2O 排放通量进行了比较研究,结果表明,不施氮肥时不同作物系统的 N_2O 排放量差异较小.由此说明,在不施氮肥的条件下,不同土壤之间 N_2O 排放差异并不显著;而只有在施用氮肥后,如在低、中、高氮水平下,土壤之间 N_2O 排放才出现差异,也表明有效的控制氮源可减少土壤 N_2O 的排放.出现上述现象的可能原因是作物生长需要大量的氮,在无外源氮施入的情况下,土壤中的有效氮被植物利用后,使硝化或者反硝化作用失去了有效氮源,从而减少 N_2O 的产生机会.此时,氮源成为 N_2O 排放的主要限制因子,土壤特性等因素对 N_2O 排放的贡献相对较小,致使中间产物 N_2O 排放量在土壤之间无明显差异.土壤中存在多余的有效氮是土壤 N_2O 产生的前提条件之一^[17].在施用氮肥后,氮源不成为限制因素,土壤因素等对 N_2O 排放的贡献显示出来,使得在低、中、高氮水平下不同土壤 N_2O 排放出现差异.

表 2 不同水平氮肥对稻田 N₂O 累积排放量的影响

Table 2 Effect of different level N fertilizer on the seasonal amount of N₂O emissions

肥料水平	土壤					
	F		G		H	
	累积排放量/mg•m ⁻²	排放系数/%	累积排放量/mg•m ⁻²	排放系数/%	累积排放量/mg•m ⁻²	排放系数/%
对照	168 ± 5		127 ± 74		146 ± 10	
低氮	478 ± 117	0.59 ± 0.22	470 ± 151	0.66 ± 0.29	400 ± 125	0.37 ± 0.22
中氮	830 ± 42	1.27 ± 0.07	518 ± 43	0.75 ± 0.22	592 ± 130	0.57 ± 0.25
高氮	758 ± 21	1.13 ± 0.03	577 ± 75	0.86 ± 0.13	621 ± 113	0.72 ± 0.21

表 3 不同氮肥施用量对麦田 N₂O 累积排放量的影响

Table 3 Effect of different level N fertilizer on the seasonal amount of N₂O emissions

肥料水平	土壤					
	F		G		H	
	累积排放量/mg•m ⁻²	排放系数/%	累积排放量/mg•m ⁻²	排放系数/%	累积排放/mg•m ⁻²	排放系数/%
对照	134 ± 14		124 ± 15		168 ± 62	
低氮	438 ± 62	0.58 ± 0.13	572 ± 109	0.86 ± 0.18	363 ± 65	0.25 ± 0.23
中氮	976 ± 41	1.61 ± 0.11	744 ± 158	1.18 ± 0.32	626 ± 121	0.67 ± 0.15
高氮	1 122 ± 208	1.89 ± 0.42	898 ± 486	1.48 ± 0.91	1 279 ± 332	1.63 ± 0.60

2.3 稻麦轮作系统 N₂O 排放系数

图 2 为整个稻麦轮作系统 3 个土壤在低、中、高氮肥水平下的 N₂O 排放系数.由图 2 和方差分析表明在整个稻麦轮作期内,高氮水平下,3 个土壤的 N₂O 排放系数并无显著差异($p = 0.3$);其值分别 1.0%、0.8%和 1%;但在低氮与中氮 2 个水平的不同土壤间 N₂O 排放系数在 0.01 水平下显著($F = 6.25, p = 0.01$),在低氮水平下,排放系数 1.2%、1.5%和 0.9%;中氮水平下,其值分别为 1.4%、1.0%和 0.9%.同时在这 2 个肥料水平下,土壤与肥料的交互作用决定的 N₂O 排放系数也存在显著差异($F = 4.57, p = 0.03$).可能原因在于高氮水平下,施入的化肥量是决定 N₂O 排放系数的主要因素,而在低氮和中氮水平下由土壤及氮肥共同作用决定

N₂O 排放,土壤特性差异会造成化肥氮转化为 N₂O 的量出现差异.

以 1 个稻麦轮作周期为时间尺度,将表 2 和表 3 中各氮肥水平稻田与麦田 N₂O 排放总量的总和与相应的氮肥施加量总和应用 SYSTAT 统计分析软件做线性回归,可得到如下方程:

$$y_F = 0.011(\pm 0.002\ 3)x + 0.006\ 7(\pm 0.004\ 6) \quad (1)$$
$$(p = 0.04)$$

$$y_G = 0.007\ 5(\pm 0.001\ 7)x + 0.007\ 8(\pm 0.003\ 4) \quad (2)$$
$$(p = 0.05)$$

$$y_H = 0.010\ 1(\pm 0.001\ 1)x + 0.004\ 3(\pm 0.002\ 2) \quad (3)$$
$$(p = 0.01)$$

式中, y_F 、 y_G 、 y_H 、分别代表 3 个土壤 N₂O 排放量, x 为尿素施用量.括号内的数值为相应系数的平均误差.由上述方程可得到 F、G、H 3 个土壤增加单位量的化肥氮转化为N₂O-N量即总的 N₂O 排放系数分别为(1.1 ± 0.23)%、(0.75 ± 0.17)%和(1.01 ± 0.11)%.表明不同土壤对 N₂O 排放系数的影响不同.可能原因在于土壤性质的差异如 NO₃⁻-N含量等的不同.本研究还发现NO₃⁻-N含量背景值低的土壤,则加入的氮肥转化为 N₂O-N 的比例低.土壤原有硝态氮含量与所加入的化肥氮的转化系数可用如图 3 所示的方程描述.当然,由于数据点太少,两者之间的这种关系还有待进一步验证.

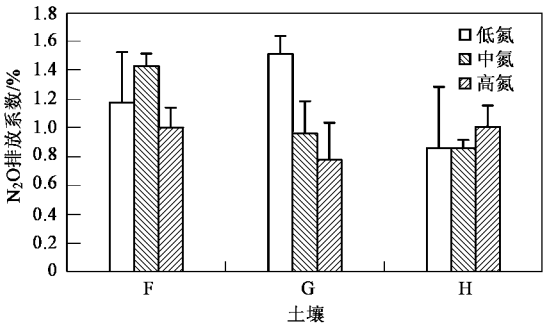


图 2 不同土壤不同氮肥水平下的 N₂O 排放系数

Fig.2 N₂O emission factor of different N fertilizer level

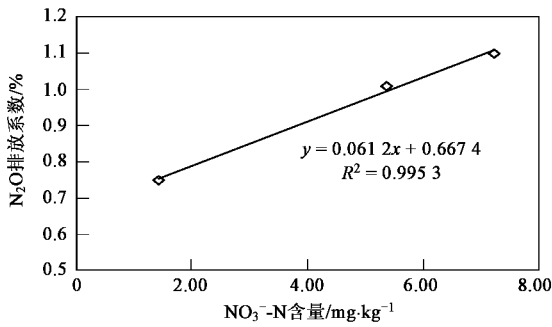


图 3 N₂O 排放系数与土壤硝态氮含量的关系

Fig.3 Correlation of N₂O emission factor and soil NO₃⁻-N content

3 结论

(1)不同土壤之间,及不同氮肥水平之间和土壤和肥料的交互作用间 N₂O 累积排放量均存在显著差异.水稻生长季,各个土壤的 N₂O 累积排放量与其对照相比的增加量在低、中、高氮肥水平间无明显差异;小麦生长季,各个土壤的 N₂O 累积排放量与其对照相比的增加量在 3 种氮肥水平之间的差异显著.随氮肥用量的增加明显促进麦田 N₂O 的排放.在不施氮肥的条件下,不同土壤之间 N₂O 排放差异并不显著;而只有在施用氮肥后,在低、中、高氮水平下,土壤之间 N₂O 排放才出现差异,表明有效的控制氮源可减少土壤 N₂O 的排放.

(2)在高氮水平下,无论水稻生长季或小麦生长季,3 个土壤的 N₂O 排放系数并无明显差异,而在低氮与中氮 2 个水平的不同土壤间 N₂O 排放系数存在显著差异.以 1 个稻麦轮作周期为时间尺度,3 个土壤总的 N₂O 排放系数存在显著差异,不同土壤对 N₂O 排放系数的影响不同.

参考文献:

[1] Mosier A R, Kroeze C. Contribution of agro ecosystems to the global atmospheric N₂O budget [A]. In: Proceedings of International Workshop on Reducing N₂O Emission from Agroecosystems [C]. Banff: Canada, 1999.

[2] Bouwman A F. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1996, **46**: 53-70.

[3] 李楠,陈冠雄.植物释放 N₂O 速率及施肥的影响[J].应用生态学报, 1993, **4**(3): 295-298.

[4] Xing G X, Zhu Z L. Preliminary studies on N₂O emissions fluxes from upland soils and paddy soils in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, **49**: 17-22.

[5] Goodroad L L, Keeney D R. Nitrous oxide production in aerobic soils under varying pH, temperature and water content [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1984, **16**: 39-43.

[6] Zheng X, Wang M, Wang Y, *et al*. Characters of greenhouse gas (CH₄, N₂O, NO) emissions from croplands of southeast China [J]. World Resource Review, 1999, **11**: 229-245.

[7] Daum D, Schenk M K. Influence of nutrient solution pH on N₂O and N₂ emissions from a soilless culture system [J]. Plant and Soil, 1998, **203**: 279-287.

[8] Nagele W, Conrad R. Influence of soil pH on the nitrate-reducing microbial populations and their potential to reduce nitrate to NO and N₂O [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1990, **74**: 49-58.

[9] 郑循华,王明星,王跃思,等.稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N₂O 产生与排放的影响[J].应用生态学报, 1996, **7**(3): 273-279.

[10] Dobbie K E, McTaggart I P, Smith K A. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: Variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, **104**(D21): 26891-26899.

[11] IPCC. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories [C]. Tokyo: IGES, 2000. 4.53-4.83.

[12] Bouwman A F. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere [A]. In: Bouwman A F, ed. Soils and the Greenhouse Effect [C]. Chichester: John Wiley & Sons, 1990. 61-127.

[13] Eichner M J. Nitrous oxide emissions from fertilised soils: summary of available data [J]. Journal of Environmental Quality, 1990, **19** (2): 272-280.

[14] Mosier A, Kroeze C. A new approach to estimate emissions of nitrous oxide from agriculture and its implications for the global N₂O budget [J]. IGBP Newsletter, 1998, **34**: 8-13.

[15] 中国土壤学会农业化学专业委员会编.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1983.

[16] 丁洪,蔡贵信,王跃思,等.华北平原不同作物-潮土系统中 N₂O 排放量的测定[J].农业环境保护, 2001, **20** (1): 7-9.

[17] Maag M, Vinther F P. Effect of temperature and water on gaseous emission from soils treated with animals larry [J]. Soil Sci Soc Amer J, 1999, **63**(4): 858-865.