

长期不同施肥下我国旱地红壤 N_2O 释放特征及其对土壤性质的响应

李梦雅, 徐明岗, 王伯仁, 包耀贤, 李桂花, 孙楠

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081; 祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南 祁阳 426182)

摘要: 为评价长期不同施肥下红壤 N_2O 释放特征及其与土壤性质的关系, 以湖南祁阳撂荒地(CK₀)、不施肥对照(CK)、单施氮磷钾化肥(NPK)、施有机肥(M)、有机肥配施化肥(NPKM)和秸秆配施化肥(NPKS)6个处理的红壤为研究对象, 进行为期30 d的培养, 测定其 N_2O 释放量、有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量及其 pH 值。结果表明: 6个处理的 N_2O 释放量差异显著($P<0.05$), 大小排序为 $\text{NPK}>\text{NPKS}>\text{M}\approx\text{NPKM}>\text{CK}>\text{CK}_0$ 。施用有机态氮与等量无机态氮相比, 前者 N_2O 释放量较低。 N_2O 释放量与土壤性质的关系较为复杂, 其与铵态氮、硝态氮和碱解氮呈极显著正相关($P<0.01$), 而与 C/N、pH 值呈极显著负相关($P<0.01$)。多元回归和通径分析进一步显示, 全氮、C/N、碱解氮、硝态氮和 pH 值与 N_2O 的释放量直接相关。本研究表明长期施肥及其土壤性质显著影响红壤 N_2O 释放量。

关键词: N_2O 释放; 红壤; 长期施肥; 土壤性质

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)12-2645-06

Effect of Long-term Fertilizations on N_2O Emission and Its Relationship with Soil Properties in Red Soil of Southern China

LI Meng-ya, XU Ming-gang, WANG Bo-ren, BAO Yao-xian, LI Gui-hua, SUN Nan

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilization, Beijing 100081, China; National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang 426182, Hunan, China)

Abstract: To investigate N_2O emission under different fertilization and its relationship with soil properties, measurement of N_2O emission was conducted in red soil at a long-term experiment station in Qiyang county of Hunan Province, Southern China. Soil samples were collected from fallow land (CK₀), control (no fertilization, CK), inorganic nitrogen-phosphorus-potassium fertilization (NPK), manure application (M), NPK plus manure application (NPKM), NPK plus straw return (NPKS). Subsamples were incubated for 30 days to determine N_2O emission. Soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus, available potassium, NH_4^+-N , NO_3^--N and pH were measured. This study shows that the amount of N_2O emission is significantly different ($P<0.05$) among six treatments with the following order as $\text{NPK}>\text{NPKS}>\text{M}\approx\text{NPKM}>\text{CK}>\text{CK}_0$. The amount of N_2O emission is much smaller under the organic nitrogen fertilization than that the same amount of inorganic nitrogen fertilization. The relationship between soil properties and the amount of N_2O emission is complex. The amount of N_2O emission has significant positive correlations ($P<0.01$) with the available nitrogen, NH_4^+-N and NO_3^--N . However, the amount of N_2O emission has a significantly negative correlation with C/N ratio and pH value ($P<0.01$). A further analysis of regression and pathway show that total nitrogen, C/N ratio, available nitrogen, NO_3^--N and pH value is significantly correlated with the amount of N_2O emission. This study indicates that fertilization management and soil properties have significant influences on N_2O emission in red soil.

Keywords: N_2O emission; red soil; long-term fertilization; soil property.

收稿日期: 2009-09-15

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2009-8); 国家“十一五”重点科技支撑计划项目(2006BAD05B09, 2006BAD02A14)

作者简介: 李梦雅(1984—), 女, 硕士, 主要从事长期施肥与土壤温室气体排放的研究。E-mail: mengyali820@gmail.com

通讯作者: 徐明岗 E-mail: mgxu@caas.ac.cn

1750 年以来,人类活动导致全球温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)浓度明显增加,N₂O 浓度值已从工业化前时代的约 270 μL·L⁻¹ 增至 2005 年的 319 μL·L⁻¹,远远超出了根据冰芯记录测定的工业化前几千年的浓度值^[1]。大气中 N₂O 主要来自农业土壤。据研究,土壤直接和间接 N₂O-N 排放量每年达到 2.1 Tg^[2]。

土壤中的硝化作用和反硝化作用是 N₂O 产生的主要过程。长期施肥对硝化和反硝化过程均有显著影响,其中施用氮肥是影响 N₂O 排放的最重要因素之一。董玉红等^[3]研究发现施用氮肥的处理(NP、NK 和 NPK)土壤 N₂O 排放量均明显高于不含氮肥的处理,Li 等^[4]研究表明田间持水量高于 50%时,施用氮肥使 N₂O 排放量成倍增加。Phillips 等^[5]使用微气象法测定草场 N₂O-N 日排放量为 4~170 g·hm⁻²·d⁻¹,也认为氮素供应充足是提高 N₂O 释放量的必要条件之一。

长期不同施肥处理可导致土壤养分状况、pH 值等发生较大变异^[6-7],进而影响到参与硝化和反硝化过程的微生物的数量和活性。岳进等^[8]研究表明 N₂O 的排放不仅依赖于硝化反硝化功能菌群的形成,而且受硝化产物 N₂O/NO₃⁻ 比率和反硝化产物 N₂O/N₂ 比率影响。可见,研究长期施肥下 N₂O 的释放与土壤性质的相关性对于农田土壤 N₂O 减排理论意义重大。

IPCC 第四次评估报告^[1]也把改进氮肥施用技术作为减少 N₂O 排放、减缓气候变暖的关键政策和措施。我国农田生态系统有关 N₂O 研究多集中于直接排放上,而对长期施肥下土壤性质的变化影响 N₂O 释放量的研究较少,缺乏定量指标体系来指导田间施肥管理以减少土壤 N₂O 的排放。本研究通过测量不同施肥处理红壤 N₂O 的释放量以及全氮、铵态氮、硝态氮、碱解氮、有机质、速效磷、速效钾含量,分析 N₂O 释放特征及其与它们的关系,进而探讨长期施肥对 N₂O 排放的影响机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究设在湖南省祁阳县(东经 111°52'32",北纬 26°45'12")的国家红壤肥力与肥料效益长期试验基地,高程约 120 m;年均温 18℃,年均降雨量 1 250 mm,无霜期约 300 d;土壤为第四纪红土母质发育的耕性红壤。

1.2 试验设置

选取撂荒草地(CKo)、不施肥对照(CK)、施化肥(NPK)、施有机肥(猪粪,M)、有机肥配施化肥(NPKM)

和秸秆配施化肥(NPKS)6 个典型处理。田间小区面积为 196 m²,随机排列,2 次重复。除 CKo 外各处理均为小麦-玉米轮作,一年二熟。每年施肥量为纯氮 300 kg·hm⁻²,N:P₂O₅:K₂O = 1:0.4:0.4。施用有机肥(猪粪)处理只考虑其中的氮。NPKM 处理有机氮:无机氮为 7:3,NPKS 处理为每季作物秸秆的 1/2 还田,不考虑其养分。

2007 年 8 月,玉米收获后采集上述 6 个处理耕层(0~20 cm)新鲜土样,按田间容重 1.2 g·cm⁻³,土壤含水量为 200 g·kg⁻¹(约为田间持水量的 75%),将混合均匀的土样放置在直径 5 cm、高 15 cm 的塑料管中,将培养土柱的塑料管放入可密封的 PVC 管(长 30 cm)中,在 20℃恒温人工气候箱中培养 30 d,期间每 3~4 d 称重 1 次,加去离子水保持土壤含水量一致。培养过程收集气体时闭合 PVC 管 2 h 后抽取气样;3 次重复。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤 N₂O 释放量测定

PVC 管闭合 2 h 后用注射器抽取气体样品,培养前 10 d 每天定时取样;第 10~30 d 隔 3~4 d 取样(方法同上)。所取气体样品均在 24 h 内用气相色谱(GC-ECD)测定 N₂O 浓度。

$$\text{由 } F = \frac{(Q_t - Q_0) \times V \times M_o \times 273 \times 1\,000}{22.4 \times m \times t \times 293} \text{ 计算 } N_2O \text{ 产生}$$

速率,式中 F 为 N₂O 产生速率(μg·kg⁻¹·h⁻¹), V 为培养容器中气体体积(L), m 为土样重(kg), Q_t 和 Q_0 分别为室温下气相色谱法检测的培养后和培养前的气体中 N₂O 的浓度(N₂O/Air, 10⁻⁶ mol·mol⁻¹), t 为培养时间(PVC 管的闭合时间), M_o 为 N₂O 摩尔质量(g·mol⁻¹)。

1.3.2 土壤性质测定

土壤总有机质用重铬酸钾容量法;全氮用半微量凯氏法;碱解氮用碱解扩散法;速效磷用 Olsen 法;速效钾用 1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提火焰光度法;pH 值用电位法(1:5);铵态氮、硝态氮用 2 mol·L⁻¹ 氯化钾浸提,流动分析仪(FOSS;FIAstar 5000)测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 进行数据整理、绘图和分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥土壤 N₂O 释放特征

土壤 N₂O 释放速率在培养初期较高,在第 2~3 d 达到顶峰后渐渐回落,10 d 后趋于稳定(图 1)。培养

30 d 后, N_2O 累积释放量 NPK 处理最高 $[(3.09 \pm 0.12) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$, NPKS $[(2.61 \pm 0.19) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 次之, 两者均显著高于施用有机肥的 M $[(1.49 \pm 0.08) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 和 NPKM $[(1.32 \pm 0.09) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 。CK $[(0.81 \pm 0.04) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 和 CKo $[(0.59 \pm 0.04) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 处理 N_2O 累积释放量最小。大小排序为: $\text{NPK} > \text{NPKS} > \text{M} \approx \text{NPKM} > \text{CK} > \text{CKo}$ 。

单施化肥(NPK)的 N_2O 累积释放量显著高于其他处理(图 1), 表明施用化肥对土壤 N_2O 释放量具有显著影响。化肥配合秸秆(NPKS)处理 N_2O 累积释放量显著低于单施化肥处理, 王改玲等^[9]研究也证实秸秆还田可降低反硝化反应速率及反硝化释放的 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 比例, 从而降低 N_2O 的排放。

施用有机肥的 NPKM 和 M 处理相对于对照处理, N_2O 累积释放量较高, 但均显著低于单施化肥处理(图 1), 说明长期施用有机态氮肥与施用等氮量化肥处理相比, N_2O 释放量较低。化肥配合有机肥处理与化肥配合秸秆处理相比, 其 N_2O 累积释放量显著较低。这可能与化肥配合有机肥处理的有机肥投入量较

高(有机态氮占全氮投入的 70%)、施入尿素量较低(占全氮投入的 30%), 而 NPKS 处理施入尿素量较大(与单施化肥处理相等), 每季作物秸秆的 1/2 还田, 投入的有机态物质较少有关。

2.2 N_2O 释放量与土壤性质的关系

土壤硝化和反硝化过程因长期不同施肥处理导致土壤理化性质发生变异而有所改变, 势必影响农田 N_2O 的释放。表 1 显示, 本研究中全氮和有机质含量发生显著变化, 二者含量 NPKM 和 M 处理最高, NPK 和 NPKS 处理次之, CK 处理最低。撂荒草地(CKo)虽无肥料投入, 但因其地上生物量和根系分泌物的回归而导致全氮和有机质含量显著高于 CK 处理。长期不同施肥红壤样品的速效态磷、钾、pH 值也有了显著性变化(表 1), 施用有机肥处理速效磷、速效钾含量均高于单施用化肥和化肥配合秸秆还田处理, 与 N_2O 释放量的变化趋势差异较大, 其相关系数均未达到显著水平。

不同施肥处理全氮、有机质与 N_2O 释放量的相关

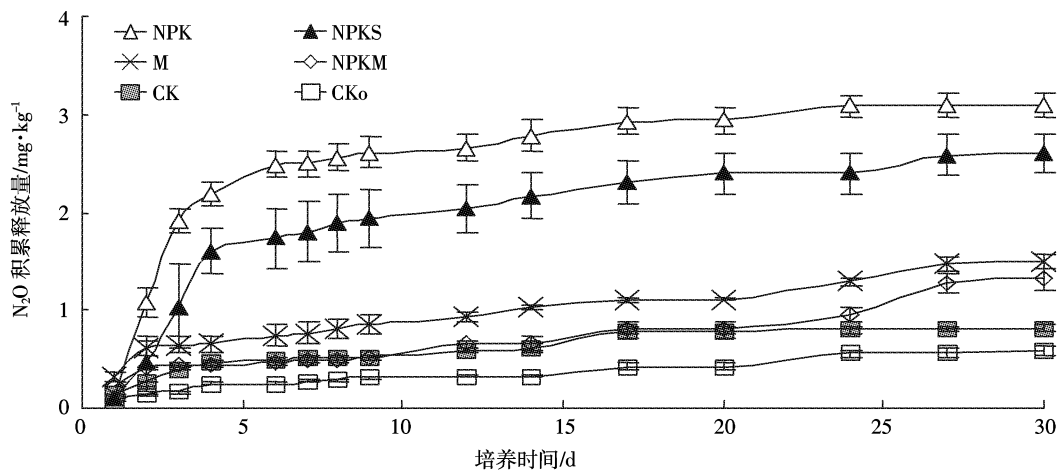


图 1 培养期土壤 N_2O 的累积释放量

Figure 1 Accumulative emission of N_2O in soil during incubation

表 1 不同施肥处理土壤性质(mean±SE)及其与 N_2O 累积释放量的相关性

Table 1 Soil properties and their correlations with accumulative amount of N_2O emission under different fertilizations

处 理	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碳氮比 C/N	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^--\text{N}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH(1:5)
1990 年基值	1.07	13.62	—	—	—	79.0	13.9	104.0	5.7
CKo	1.10±0.02	27.12±0.53	14.26	1.19±0.84	5.18±0.03	62.6±1.1	10.4 ±0.3	71.9±0.0	5.30±0.01
CK	0.82±0.02	13.59±0.45	9.58	4.29±0.62	4.49±0.95	52.8±1.1	2.4±0.1	37.3±0.0	5.55±0.03
NPK	1.12±0.03	16.82±0.49	8.68	32.60±0.20	62.44±0.26	159.2±1.1	51.2±2.1	121.4±2.9	4.10±0.04
M	1.56±0.03	26.86±0.78	9.99	17.10±0.11	5.51±0.10	104.9±2.1	180.1±3.1	183.2±2.5	6.65±0.02
NPKM	1.56±0.02	27.16±0.47	10.09	20.83±0.04	2.64±0.26	81.9±1.6	147.2±1.0	190.6±4.9	5.66±0.00
NPKS	1.07±0.02	14.45±0.32	7.85	36.15±0.03	67.70±0.07	173.2±0.5	26.2±0.2	176.6±2.2	4.15±0.00
相关系数	0.005	-0.460	-0.728**	0.907**	0.929**	0.945**	0.060	0.440	-0.686**

注: $n=18$; ** $P<0.01$; * $P<0.05$ 。

性均未达到显著水平(表 1)。但这在实际中并不意味着红壤全氮和有机质与 N₂O 释放量无关,其碳氮比与 N₂O 累积释放量的相关系数为-0.728,达到了极显著水平。另外,有机质与 N₂O 释放量虽然没达到显著水平,但较大的负相关系数也说明施入有机质对 N₂O 的释放具有抑制作用。红壤样品的铵态氮、硝态氮、碱解氮含量均与 N₂O 积累释放量呈极显著正相关(表 1)。

长期施用氮肥(尿素)能显著增加交换性氢、铝离子,加重红壤酸化^[9],本研究中单施用化肥和化肥配合秸秆还田这两个处理 pH 值最低,分别为 4.10 和 4.15。pH 值与 N₂O 释放量的相关系数为-0.686,呈极显著负相关。

2.3 N₂O 释放量对土壤性质的综合响应

为进一步说明究竟哪些土壤性质与 N₂O 的积累释放量关系更加紧密,采用多元逐步回归分析法,建立最优回归方程,从而找出与 N₂O 的释放量关系最密切的指标。结果显示,与红壤 N₂O 释放量最直接相关的土壤因子是全氮、碳氮比、碱解氮、硝态氮和 pH 值。回归方程如下:

$$Y=23.761-0.534X_1+11.386X_2-3.616X_3-1.423X_4+0.070X_5 \quad F=87.352^{**} \quad R^2=0.973$$

式中, Y 为 N₂O 累积释放量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; X_1 为硝态氮, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; X_2 为全氮, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; X_3 为 pH 值; X_4 为碳氮比; X_5 为碱解氮, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

X_1-X_5 与 Y 的偏相关系数均为极显著 ($P=0.000$),分别为:硝态氮-0.811、全氮 0.820、pH 值-0.829、碳氮比-0.828、碱解氮 0.855。表明全氮、碱解氮与 N₂O 的积累释放量呈正相关,碳氮比、pH 值、硝态氮与 N₂O 的积累释放量呈负相关。

多元回归分析只考察变量间的简单相关性,实际上变量间的关联性往往是一个复杂的传递过程。为此,本文利用通径分析,引入直接和间接通径系数,深入研究变量间的因果关系。结果显示(表 2),各作用因子与 N₂O 的积累释放量的直接通径均较大,说明其

直接影响 N₂O 的释放量。其中,全氮含量与 N₂O 的积累释放量的直接通径系数较大,但受其他因子间接通径系数的影响,两者的简单相关系数较小而未达到显著水平。

硝态氮与 N₂O 积累释放量的直接通径系数为-7.562,与其偏相关系数(-0.811)相符合,这可能是因为硝化作用是将 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- ,然后 NO_2^- 再氧化成 NO_3^- ,期间生成 N₂O,而 NO_3^- 含量较高会影响硝化作用中向 NO_3^- 的转化,而本研究中反硝化作用影响较小,所以硝态氮与 N₂O 积累释放量的直接通径系数为负,但受其他因子的间接影响,二者呈简单正相关,因而与上文结果并不一致。

多元回归方程的剩余通径系数 $P_{ye}=0.160$,其值较小,说明其他因素对 N₂O 释放量的影响较小。可见,全氮、碳氮比、碱解氮、硝态氮和 pH 值等土壤因子能解释 84.0%的 N₂O 观测变异量。

3 讨论

长期施用化学氮肥对红壤 N₂O 的排放影响很明显,单施化肥处理的 N₂O 释放量显著高于其他处理,这说明长期施用化肥对红壤 N₂O 的释放量具有重要影响。于亚军等^[11]研究也发现施用氮肥引起的 N₂O 排放量占施氮量的 0.38%。这可能是因为尿素通过脲酶分解成 NH_4^+ 直接参与硝化反应,李勇先等^[12]研究也发现尿素态氮肥施入土壤后,随着水解产物 NH_4^+ 的积累, N₂O 的释放也迅速增加;项虹艳等^[13]研究表明施用尿素(酰胺态氮)处理的 N₂O 排放总量较大。这些与本研究的结果是一致的。

本研究中有机态氮的施入对红壤 N₂O 排放也有一定的影响,施用等量氮的两个有机肥处理土壤 N₂O 释放量显著高于不施肥对照处理,张振贤等^[14]研究也表明施用垃圾堆肥使农田土壤 N₂O 通量增加,是对照的 1.9 倍。然而,本研究施用等量有机态氮的处理,其 N₂O 释放量显著低于施用尿素的处理。Gregorich 等^[15]

表 2 N₂O 累积释放量与土壤性质的通径分析

Table 2 Results of path analysis of N₂O emission and correlations with soil properties

作用因子	与 N ₂ O 的相关系数	直接通径系数	P 值	间接通径系数				
				硝态氮	全氮	pH	碳氮比	碱解氮
硝态氮	0.930	-7.562	0.000	—	0.638	2.096	2.454	3.303
全氮	0.005	3.336	0.000	-1.447	—	-1.863	-0.139	0.118
pH	-0.687	-3.494	0.000	4.536	1.778	—	-1.157	-2.350
碳氮比	-0.729	-3.133	0.000	5.924	0.148	-1.291	—	-2.376
碱解氮	0.946	3.498	0.000	-7.140	0.112	2.348	2.128	—

研究也发现施固体有机肥的处理 N_2O 释放量 ($0.99 \text{ kg } \text{N}_2\text{O}-\text{N } \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 显著低于施用化肥的处理 ($2.82 \text{ kg } \text{N}_2\text{O}-\text{N } \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

有机肥之所以能减少土壤 N_2O 排放,可能是因为土壤有机质的大量分解会消耗土壤中的氧气,从而抑制硝化作用,减少了硝酸根的产生量,同时由于土壤中氧气的损耗,能使 N_2O 气体被作为代替氧气的电子受体而被还原成为 N_2 ,从而减少了 N_2O 的排放^[16-17]。也有研究认为土壤施有机肥与施化学氮肥相比,在增加含碳量的同时,N 储量也显著增加,从而降低农田土壤 N_2O 的排放^[18]。

本研究中全氮、碳氮比、碱解氮、硝态氮和 pH 值等土壤因子能解释 84.0%左右的 N_2O 观测变异量,铵态氮和硝态氮含量均与 N_2O 累积释放量呈极显著相关。Jones 等^[19]研究也发现当水分不是限制因素时,土壤中的铵态氮、硝态氮含量与 N_2O 的释放呈显著相关。

本研究中单施化肥和化肥配合秸秆还田两个处理 pH 值较低,其 N_2O 释放量较高。这可能是由于参与硝化和反硝化过程的微生物需要存活于一定的酸碱度条件,一般认为,硝化与反硝化作用最适土壤 pH 值为 7~9,活动范围在 3.5~11.2 之间^[20]。Brumme 等^[21]研究发现,在酸性森林土壤中, N_2O 的释放随 pH 上升而明显减少,李勇先等^[12]研究也表明在较高 pH 的稻田土壤中, NO_2^- 的累积并未导致 N_2O 释放的同步增加,Daumt 等^[22]监测发现当土壤 pH 值为中性时, N_2 是反硝化的主要产物;当 pH 值降低时,有利于 N_2O 的释放。

4 结论

长期施肥对红壤 N_2O 排放具有显著的影响。长期施用化学氮肥处理 N_2O 释放量最高,等量有机态氮的施入对 N_2O 排放也有一定的影响,但其影响显著低于施用尿素。土壤铵态氮、硝态氮、碱解氮含量均与 N_2O 积累释放量呈极显著正相关,而碳氮比、pH 值与 N_2O 释放量呈极显著负相关。多元回归分析和通径分析结果显示,全氮、碳氮比、碱解氮、硝态氮和 pH 值等土壤因子与红壤 N_2O 的释放量最直接相关,能解释 84.0%左右的 N_2O 观测变异量。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007[R]. Cambridge: Cambridge University Press. 2007, 1-3.
- [2] Moiser A, Kroeze C, Nevison C, et al. Closing the global N_2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle -OECD/IPCC/IES phase II development of IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory methodology[J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 1998, 52:225-248.
- [3] 董玉红, 欧阳竹, 李 鹏, 等. 长期定位施肥对农田土壤温室气体排放的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 97-100.
DONG Yu-hong, OUYANG Zhu, LI Peng, et al. Influence of long-term fertilization on greenhouse gas fluxes from agricultural soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 97-100.
- [4] Li Z A, Zou B, Xia H P, et al. Effect of fertilizer and water content on N_2O emission from three plantation soils in south China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(6):970-976.
- [5] Phillips F A, Leuning R, Baigent R. Nitrous oxide flux measurements from an intensively managed irrigated pasture using micrometeorological techniques[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(1):92-105.
- [6] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 97-100.
WANG Bo-ren, XU Ming-gang, WEN Shi-lin. Effect of long time fertilizers application on soil characteristics and crop growth in red soil upland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 97-100.
- [7] 徐明岗, 于 荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5):723-729.
XU Ming-gang, YU Rong, WANG Bo-ren. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):723-729.
- [8] 岳 进, 黄国宏, 梁 巍, 等. 不同水分管理下稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放与微生物菌群的关系[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12):2273-2277.
YUE Jin, HUANG Guo-hong, LIANG Wei, et al. Relationship between CH_4 and N_2O emissions and related microorganism populations in paddy soils under different water management regimes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12):2273-2277.
- [9] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6):840-844.
WANG Gai-ling, HAO Ming-de, CHEN De-li. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization on denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6):840-844.
- [10] Zhang H M, Wang B R, Xu M G. Effects of inorganic fertilizer inputs on grain yields and soil properties in a long-term wheat-corn cropping system in South China[J]. *Science and Plant Analysis*, 2008, 39: 1583-1599.
- [11] 于亚军, 朱 波, 荆光军. 成都平原土壤-蔬菜系统 N_2O 排放特征[J]. 中国环境科学, 2008, 28(4): 313-318.
YU Ya-jun, ZHU Bo, JING Guang-jun. N_2O emission from soil-vegetable system and impact factors in Chengdu plain of Sichuan basin [J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(4): 313-318.
- [12] 李勇先, 田光明. 不同水分管理模式下水稻土氮素形态转化与 N_2O

- 释放的关系[J]. 生态环境, 2003, 12(2):157-159.
- LI Yong-xian, TIAN Guang-ming. Relationship of N-form translation and N₂O emission in paddy soils under different water regime [J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2):157-159.
- [13] 项虹艳, 朱 波, 况福虹, 等. 氮肥施用对紫色土-玉米根系系统 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(3):413-420.
- XIANG Hong-yan, ZHU Bo, KUANG Fu-hong, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on N₂O emission in a purple soil and maize root system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(3): 413-420.
- [14] 张振贤, 华 璐, 尹逊霄, 等. 垃圾堆肥及其复合肥对农田土壤 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5):1371-1374.
- ZHANG Zhen-xian, HUA Luo, YIN Xun-xiao, et al. Influence of urban waste compost and compound fertilizer on emission of nitrous oxide from agricultural soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1371-1374.
- [15] Gregorich E G, Rochette P, Vanden Bygaart A J, et al. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(1):262-263.
- [16] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄. 豆科绿肥和化肥氮对双季稻田氧化亚氮排放贡献的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 704-710.
- XIONG Zheng-qin, XING Guang-xi, HETIAN Zhihuong. Nitrous oxide emissions from paddy soils as affected by incorporation of leguminous green manure and fertilization during double-cropping rice-growing season[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 704-710.
- [17] 田光明, 何云峰. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 294-298.
- TIAN Guang-ming, HE Yun-feng. Effect of water and fertilization management on emission of CH₄ and N₂O in paddy soil[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(3): 294-298.
- [18] 孟 磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对华北典型潮土 N 分配和 N₂O 排放的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6198-6203.
- MENG Lei, CAI Zu-cong, DING Wei-xin. Effects of long-term fertilization on N distribution and N₂O emission in fluvoaquic soil in North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6197-6203.
- [19] Jones S K, Rees R M, Skiba U M. Influence of organic and mineral N fertilizer on N₂O fluxes from a temperate grassland[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121: 74-83.
- [20] 黄 耀, 焦 燕, 宗良纲. 土壤理化特性对麦田 N₂O 排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5):598-602.
- HUANG Yao, JIAO Yan, ZONG Liang-gang. N₂O emission from wheat cultivated soils as influenced by soil physico-chemical properties[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5):598-602.
- [21] Brumme R, Beese F. Effects of liming and nitrogen fertilization on emissions of CO₂ and N₂O from a temperate forest[J]. *Geophys Res*, 1992, 97: 12851-12858.
- [22] Daum N, 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.