

培养实验研究长期不同施肥制度下中层黑土氧化亚氮的排放特征

蔡延江^{1,2}, 王连峰^{1,2}, 温丽燕², 解宏图¹, 张旭东¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 辽宁 沈阳 110014; 2. 大连交通大学环境与化学工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要:在水分含量为 80%WHC 条件下,培养实验研究吉林省公主岭市国家黑土肥力与肥料效益长期定位监测基地土壤氧化亚氮(N_2O)的排放特征,以考查不同施肥制度下黑土氧化亚氮排放差异。培养 6 d 的结果表明,土壤 N_2O 排放量随有机肥施入量的增加而增加,MOCK(耕作但不施任何肥)、M1CK(耕作并施中量有机肥)和 M2CK(耕作并施高量有机肥)处理 N_2O-N 排放量分别为 5.64、23.3 和 213 $\mu g \cdot kg^{-1}$ 。化肥配施降低 N_2O 排放量,MON(耕作并施氮肥)、MONP(耕作并配施氮磷肥)和 MONPK(耕作并配施氮磷钾肥)处理 N_2O-N 排放量分别为 85.0、9.71 和 7.29 $\mu g \cdot kg^{-1}$ 。氮肥与有机肥配施使 N_2O 的排放量显著增加,M2N(耕作并配施高量有机肥和氮肥)的 N_2O-N 排放量高达 316 $\mu g \cdot kg^{-1}$ 。氮磷肥和氮磷钾肥配施对土壤 N_2O 的排放影响因有机肥施用量的不同而异。氮磷钾肥与高量有机肥配施显著减少 N_2O-N 排放,其排放量仅为 117 $\mu g \cdot kg^{-1}$ 。培养结束后,土壤硝态氮含量明显减少,反硝化作用是土壤 N_2O 产生的主要过程。

关键词:氧化亚氮;黑土;长期不同施肥制度

中图分类号:S152.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)02-0617-05

Nitrous Oxide Emission from Long-term Fertilized Black Soil by Laboratory Incubation

CAI Yan-jiang^{1,2}, WANG Lian-feng^{1,2}, WEN Li-yan², XIE Hong-tu¹, ZHANG Xu-dong¹

(1. Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110014, China;

2. College of Environmental and Chemistry Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: A 6-day laboratory incubation with soil water content of 80% water holding capacity was conducted to study nitrous oxide (N_2O) emission from a different long-term fertilization experiment zone in Gongzhuling city, Jilin province. The results showed that N_2O emission increased with the increase of the organic manure application, and cumulative N_2O-N emission of cultivation with no fertilizer (MOCK), cultivation with moderate amount of organic manure (M1CK) and cultivation with high amount of organic manure (M2CK) was 5.64, 23.3 and 213 $\mu g \cdot kg^{-1}$, respectively. N_2O emission decreased as the combined chemical fertilizer applied, and cumulative N_2O-N emission of cultivation with nitrogen fertilizer application (MON), cultivation with combined nitrogen-phosphorus fertilizer application (MONP) and cultivation with combined nitrogen-phosphorus-potassium fertilizer application (MONPK) was 85.0, 9.71 and 7.29 $\mu g \cdot kg^{-1}$, respectively. Combined N fertilizer and organic manure significantly increased N_2O emission, and cumulative N_2O-N emission of cultivation with nitrogen and high amount of organic manure fertilization (M2N) was up to 316 $\mu g \cdot kg^{-1}$. Effect of combined N-P and combined N-P-K on N_2O emission was different from the application amount of organic manure. Combined N-P-K and high amount of organic manure fertilization (M2NPK) decreased N_2O-N emission significantly, and the cumulative N_2O-N emission was up to 117 $\mu g \cdot kg^{-1}$. The amount of soil NO_3^- was significantly decreased after the 6-day incubation, denitrification was the main process of N_2O production.

Keywords: nitrous oxide; black soil; different long-term fertilization

黑土具有良好的物理、化学和生物学性质,土壤肥力高。由于黑土的掠夺式利用,导致黑土严重退化,

其最突出的表现之一是对土壤中氮素养分调控能力的减退,最终导致氮肥利用率下降,从而造成氮素的大量损失,并由此带来严重的环境污染问题。为了提高作物产量,每年都向土壤中施入大量的化肥和有机肥,施入土壤中的化肥氮,约有 1.25%是以 N_2O 形态释放的^[1]。 N_2O 是大气中一种痕量温室气体,它在大气中的存留时间可长达 120 年, N_2O 的红外吸收能力大

收稿日期:2007-04-18

基金项目:国家自然科学基金(40601045);中国博士后科学基金(20060400978);辽宁省博士科研启动基金((20051059)

作者简介:蔡延江(1983—),男,江苏泗阳人,硕士研究生,从事土壤氮素迁移转化机理研究。E-mail: caiyanjiang2001@163.com

通讯作者:王连峰 E-mail: wanglfdt@yahoo.com.cn

约是 CO_2 的 200 倍,百年尺度上的增温潜能(Global Warming Potential ,GWP)是 CO_2 的 296 倍。 N_2O 一旦进入平流层,就会经过一系列光化学反应生成 NO_x ,最终导致平流层臭氧的破坏和消耗。土壤是氧化亚氮的主要排放源,土壤中硝化作用、反硝化作用、硝态氮异化还原成铵作用以及化学反硝化作用都能产生 N_2O ,全球有近 60% 的 N_2O 是由土壤排放的^[2]。

不同的施肥处理对土壤 N_2O 的排放产生着不同的影响,而且不同肥料之间的交互作用也不同。国内已有众多学者对化肥和有机肥单施或配施的影响进行了研究^[3-6],但是关于长期施肥制度对黑土 N_2O 排放影响方面的研究尚未见报道。本试验以吉林省公主岭市黑土地地区的长期定位监测试验基地土壤为研究对象,研究长期不同施肥制度对黑土 N_2O 排放的影响。由于磷肥、钾肥的施入会对土壤 N_2O 的排放产生一定的影响,所以本试验还在不同有机肥的水平上分析了氮磷肥配施、氮磷钾肥配施对 N_2O 排放的影响。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自吉林省公主岭市“国家黑土肥力与肥料效益长期定位监测基地”试验地,土壤为中层黑土(湿润匀腐土),土壤质地为粘壤土。年平均气温 $5\sim 6\text{ }^\circ\text{C}$,年降水量 $500\sim 650\text{ mm}$,作物生长期降水量约占全年降水量的 80% 以上。雨热同季,无霜期为 $120\sim 140\text{ d}$,有效积温 $2\ 600\sim 3\ 000\text{ }^\circ\text{C}$,为单季雨养农区。土壤理化性状列于表 1。

1.2 田间试验处理

试验采用裂区设计,设有不同的施肥处理和休闲处理(即每年除草但不耕作不施肥),主区为有机肥,设 3 个水平:M0 为不施有机肥、M1 为施用中量(每年 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)有机肥,M2 为施用高量(每年 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)有机肥,有机肥为猪粪肥。裂区为 CK、N、NP、NPK 化肥,N 肥(尿素)用量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 纯 N;P 肥(三料磷肥)用量为 $32.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 纯 P;K 肥(K_2SO_4)用量为 $62.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 纯 K。有机肥于春播前撒施地表;氮肥 1/3 做底肥,2/3 做追肥;磷肥、钾肥

全部做底肥,播种时一次施入,种植作物为玉米。

选用试验处理:Fallow(休闲处理);M0CK(耕作但不施任何肥)、M1CK(耕作并施中量有机肥)、M2CK(耕作并施高量有机肥);M0N(耕作并施氮肥)、M1N(耕作并配施中量有机肥和氮肥)、M2N(耕作并配施高量有机肥和氮肥);M0NP(耕作并配施氮磷肥)、M1NP(耕作并配施中量有机肥和氮磷肥)、M2NP(耕作并配施高量有机肥和氮磷肥);M0NPK(耕作并配施氮磷钾肥)、M1NPK(耕作并配施中量有机肥和氮磷钾肥)、M2NPK(耕作并配施高量有机肥和氮磷钾肥)。在每个处理小区中分别采集 $0\sim 20\text{ cm}$ 混合土样(每个混合土样至少 5 点)供培养试验使用。

1.3 室内培养实验

称取 25.000 g 供试土样置于 150 mL 的培养瓶中,用移液管向瓶内均匀滴加相应数量的蒸馏水,使土壤含水量达到 $80\%\text{WHC}$ (Water holding capacity)。随即用硅橡胶塞塞住瓶口,瓶塞周围用 704 胶密封。硅橡胶塞的中间有一小孔,内插玻璃管,管外再套一段硅橡胶软管,以合适的硅橡胶塞塞住软管通气口,作为气体取样口。在培养瓶第一次密封后的 24、48、72、96、120 和 144 h 分别采气测定。每次抽取气样后,将培养瓶塞打开,待瓶内气体散完后再将其密封。将培养瓶置于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的培养箱中培育。

1.4 N_2O 测定

Agilent 4890D 气相色谱仪,电子捕获检测器(ECD),检测器温度为 $330\text{ }^\circ\text{C}$,柱温 $55\text{ }^\circ\text{C}$,转化器温度 $375\text{ }^\circ\text{C}$,载气为高纯氮气,标准气体由国家标准物质研究中心提供。

1.5 氨态氮和硝态氮提取测定

培养结束后,向培养瓶中加入 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KCl}$ 溶液振荡、过滤, MgO -代氏合金蒸馏法测定滤液中氨态氮和硝态氮的含量。

1.6 数据表达分析

文中数据以 3 个重复的平均值及其标准误差表示,方差分析检验处理间差异的显著性。累积排放量由 6 次测量值与测量间隔时间乘积后加和获得。

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Properties of tested soil

有机碳	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾	机械组成/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	$/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				$/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$2\sim 0.02/\text{mm}$	$0.02\sim 0.002/\text{mm}$	$<0.002/\text{mm}$
20.2	1.65	1.25	20.6	111	5.04	127	389	354	258

2 结果与讨论

2.1 土壤 N_2O 排放通量变化

图 1a-c 为长期施用不同数量的有机肥 M0、M1、M2 系列下各处理土样 N_2O 排放通量。长期施肥对耕层土壤的理化性质产生较大的影响,从而影响土壤 N_2O 的排放。由图可见,各处理土样在培育的前两天释放了大量的 N_2O 。除了 Fallow 以外,其他处理土样 N_2O 的排放峰值都出现在培育后的 24 h, Fallow 在 48 h 出现了排放高峰(Figure 1a)。Fallow 处理土样排放曲线随培育时间的变化较平缓,因为 Fallow 处理可以保持较为稳定的有机质含量和有效氮供应量。各处理土样在排放达峰值以后,即随着培育时间的延续而下降,并逐渐趋于零排放。培育后 24 h 各处理排放通量的大小顺序为,不施有机肥 M0 系列: $M0N > M0NP > M0NPK > M0CK > Fallow$ (Figure 1a); 施中量有机肥 M1 系列: $M1NP > M1NPK > M1N > M1CK$ (Figure 1b); 施高量有机肥 M2 系列: $M2N > M2NP > M2CK > M2NPK$ (Figure 1c)。培育后 48 h 各处理排放通量的大小顺序为, M0 系列: $M0N > Fallow > M0NP > M0CK > M0NPK$ (Figure 1a); M1 系列: $M1NPK > M1NP > M1N > M1CK$ (Figure 1b); M2 系列: $M2N > M2NPK > M2CK > M2NP$ (Figure 1c)。

从有机肥水平上来看,随着有机肥施入量的增加, N_2O 的排放通量也在增加, M0CK、M1CK 和 M2CK 处理在培育后 24 h 期间的 N_2O 排放通量分别为 0.14、0.65 和 7.55 $\mu g N \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$,说明土壤有机物含量影响 N_2O 的排放^[7]。当有机肥施入土壤后,大量异养微生物从易分解有机碳中获取碳源和能源,生物需氧量会急剧增大而导致氧气供应量不足,形成厌氧微域环境,从而更有利于反硝化作用的进行^[9]。土壤微生物活动适宜的 C/N 比为 (25~30):1,如果 C/N 比大于 (25~30):1,有机质分解慢,微生物活性弱, N_2O 排放受到抑制。猪粪肥的 C/N 比较小,氮肥处理所施加的氮量并不会使土壤的 C/N 比超出微生物活动适宜的 C/N 比范围。Yang 等^[8]研究也发现,低 C/N 比的猪粪肥加入土壤时会显著增加 N_2O 的排放。土壤微生物量会随着有机肥施入量的增加而增加,同时土壤的反硝化能力也在增强,进而使 N_2O 的排放通量随着有机肥施入量的增加而增大。

在不同有机肥水平下,化肥处理土壤 N_2O 的排放通量比未施化肥和休闲处理都高。这是因为有机肥和化肥配施能使土壤氮素的供应容量和供应强度显著增加^[9],为土壤的反硝化过程提供了丰富的底物。

Maljanen 等^[10]研究发现,氮肥的施用将会导致 N_2O 排放量在短期内显著的增加。甚至有的研究指出,氮肥的施用是农田矿质土壤 N_2O 排放的主要限制因素^[6]。据 EIA 的研究调查表明,美国农业土壤排放的 N_2O 有 78% 来源于氮肥的施用^[11]。

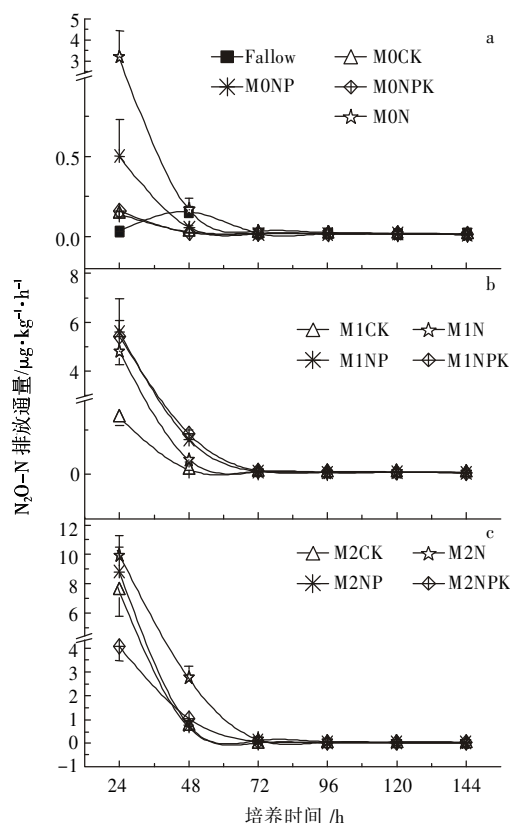


图 1 未施有机肥(a)、施中量有机肥(b)和施高量有机肥(c)时土壤 N_2O 排放通量

Figure 1 N_2O flux from soil with 0 (a), moderate (b) and high (c) amount of organic manure application

2.2 土壤 N_2O 累积排放量变化

表 2 为各处理土样 144 h 培育过程中 N_2O 的累积排放量。未施有机肥时 4 个处理土样的 N_2O 累积排放量顺序为: $M0CK < M0NPK < M0NP < M0N$ 。可以看出氮肥对 N_2O 排放的影响最大,施用氮肥可以为土壤提供充足的氮源,土壤中的硝化作用和反硝化作用增强,导致 N_2O 的排放量很大。有研究指出,氮磷配合施用能增加土壤微生物量氮含量,减少土壤 $NO_3^- - N$ 的含量^[12],所以氮磷肥配施处理的 N_2O 排放量比氮肥处理的小。由于氮、磷、钾之间存在着一定的交互效应,氮磷钾肥的配合施用可使生物吸收氮能力增强和微生物固氮能力提高,导致氮磷钾肥配施处理所释放的 N_2O 比氮肥和氮磷肥处理小。与 M0CK 相比,化学肥料配施 (M0NP, M0NPK) 未显著增加 N_2O 排放量。

未施有机肥时,各处理土壤的有机质来源主要是作物根茬等残留物,有机质分解能提供硝化或反硝化作用所需的能量,其含量和 C/N 比是影响 N_2O 排放的两个方面。M0CK 处理土壤的有机碳含量最小,而且土壤全氮含量处于较低的水平, N_2O 排放也很少。

由表 2 可知,在施中量有机肥的基础上,增施化肥显著增加土壤 N_2O 排放量,但是在单施氮肥和氮肥与磷钾肥配施之间, N_2O 排放量没有显著差异。只是从均值上看,氮肥与磷钾肥配施比单施氮肥排放更多的 N_2O 。由于 M1CK 处理有外源有机质的输入,为土壤微生物提供更多的能源物质,所以排放的 N_2O 量要比 M0CK 的大。因氮源的限制,M1CK 处理 N_2O 的排放通量不如 M1N 的处理高。在中量有机肥的基础上,氮磷肥和氮磷钾肥配施能比 M0 系列下相同的化肥处理产生更多的有机质,由于有了一定的氮源作保证,从而使氮磷和氮磷钾处理在培育后的 24 h 达到了 N_2O 排放的峰值,且略大于氮肥处理。这可能与氮肥处理土壤的 C/N 比过小有关,碳源处于相对不足的状态,使异养细菌的活动受到了限制,从而使 N_2O 的排放减少。

施高量有机肥时各处理的 N_2O 累积排放量顺序为 $M2NPK < M2CK < M2NP < M2N$ 。由图 1 可知,氮肥处理土壤 N_2O 的排放通量最大。这是因为 M2N 处理的有机质非常丰富,生物生长对氮的吸收相对于氮磷和氮磷钾配施处理要少,所以氮源十分充足,产生大量的 N_2O 。M2NPK 处理可以为生物生长提供更为充足的养分,由于有机肥和 N、P、K 之间的相互促进作用,使生物对 N、P、K 的吸收都特别的大,从而使土壤有效氮的含量减少,已有研究表明,有机肥配施 NPK 处理土壤的 C/N 比要高于氮磷肥、氮肥、无肥和有机肥处理^[9]。一般情况下, N_2O 的排放通量会随着 C/N 比的增大而减小^[13],故 M2NPK 处理的 N_2O 排放量要小于 M2N 和 M2NP 处理。M2CK 处理的土壤有机质含量比较高,有机质分解产生的碳含量也较高,土壤碳含量高的地方往往土壤全氮的含量也较高,土壤氮矿

化能力较强^[9]。这可能是 M2CK 处理 N_2O 的排放通量大于 M2NPK 处理的原因。

施用有机肥不仅能刺激土壤中微生物的生长繁殖,促进土壤有机质的转化,增强土壤的硝化和反硝化能力,还可以促进土壤产生 N_2O 。有研究表明,即使在通气不良时,硝化过程中产生的 N_2O 也会有所增加^[14]。由表 2 可以看出, $M2CK > M0N > M1CK > M0NP > M0NPK$,说明高量有机肥处理的 N_2O 排放要高于化肥处理,这与前人的研究结果相同^[3,6],有机碳能提高土壤的反硝化潜力^[15],与施用有机肥相比,施化肥的土壤反硝化潜力较弱, N_2O 排放量相对较低。但是相对于中量有机肥来说,氮肥比有机肥更能促进 N_2O 的排放^[4]。由于有机肥和化肥的施入都可以促进 N_2O 排放,有学者认为, N_2O 的主要来源不是土壤而是矿质肥料和有机肥料^[6]。

2.3 土壤硝态氮和氨态氮含量变化与 N_2O 排放的关系

硝化作用和反硝化作用是土壤 N_2O 产生的主要过程,而氨态氮和硝态氮是硝化作用和反硝化作用的底物,其含量的变化可以指示土壤中 N_2O 产生途径。在不同有机肥处理系列,培养结束后,土壤硝态氮的含量变化顺序为:氮肥单施 > 氮磷肥配施 > 氮磷钾肥配施(图 2)。化肥配施、化肥与有机肥配施都使土壤的硝态氮含量显著降低。一方面说明在培养条件下,土壤主要进行反硝化作用消耗硝态氮产生 N_2O ,另一方面表明化学肥料配合施用,或有机肥与化肥配合施用使得肥料间的协同作用增强,加速了土壤生物对肥料养分的利用,减少养分的损失。从土壤 N_2O 排放量的变化也可印证这一点,氮磷肥配施、氮磷钾肥配施比氮肥单施都减少了 N_2O 排放(图 2a,c)。就处理 M1N 和 M2N 而言,由于外施等量的氨态氮肥(尿素),培养结束后土壤氨态氮含量未有明显差异,但后者的 N_2O 排放量显著高于前者,这表明有机肥的大量施用,导致 N_2O 排放量的显著增高,主要因为高量的有机肥为土壤微生物进行反硝化作用提供了充足的碳源和能源,加之氮肥施用提供了氮源,故 N_2O 排

表 2 各处理土壤在 144 h 培育过程中 N_2O 的累积排放量

Table 2 Cumulative N_2O emission from each treatment during 144 h incubation

处理	N_2O -N 的累积排放量/ $\mu g \cdot kg^{-1}$		
	未施有机肥 M0	施中量有机肥 M1	施高量有机肥 M2
CK	5.64 ± 0.29 a	23.3 ± 5.13 a	213 ± 38.4 b
N	85.1 ± 19.5 b	123 ± 9.15 b	316 ± 21.5 c
NP	9.71 ± 2.26 a	147 ± 21.9 b	226 ± 35.0 bc
NPK	7.29 ± 1.36 a	142 ± 18.1 b	117 ± 7.82 a

注:平均值±标准误差,同一列中含有相同小写字母的数据表示差异不显著($n=3$, $P=0.05$)。

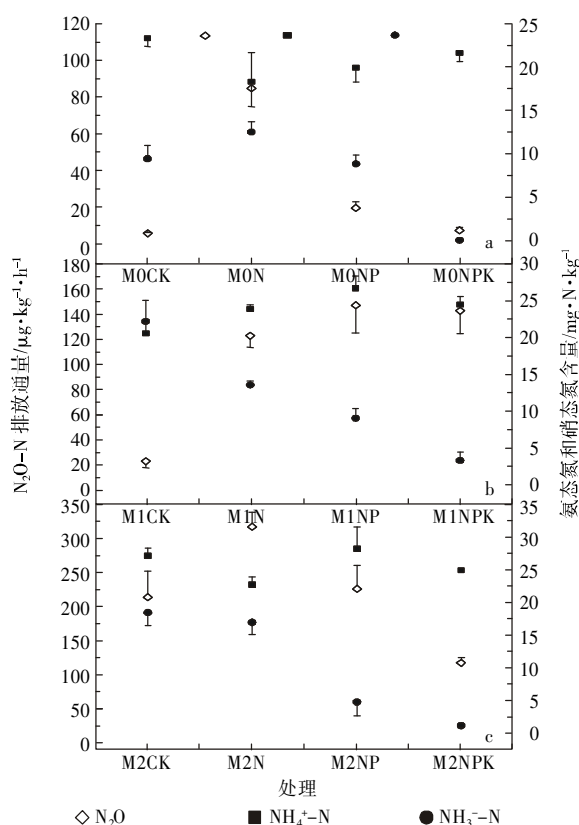


图 2 未施有机肥(a)、施中量有机肥(b)和施高量有机肥(c)时土壤 N_2O 排放量与氨态氮、硝态氮含量的变化

Figure 2 Relationship between N_2O and ammonium, nitrate in soil with 0 (a), moderate (b) and high (c) amount of organic manure application

放量显著增高。这说明 N_2O 排放不仅受到外源碳、氮供应水平的影响,还受到土壤供氮水平,微生物对有机碳的分解及对氮的利用等因素制约^[16]。

3 小结

长期施用有机肥,能刺激土壤中微生物的生长繁殖,促进土壤有机质的转化,增加土壤 N_2O 的排放, N_2O 的排放量随着有机肥施入量的增加而大幅度增大。长期施用氮肥对 N_2O 排放的影响最大,氮肥的施用导致 N_2O 排放量在短期内显著增加。

在中量有机肥的水平下,氮磷和氮磷钾配施处理土壤的 N_2O 排放量都较施入氮肥处理大。在未施有机肥和高量有机肥的基础上,氮磷和氮磷钾配施处理土壤的 N_2O 排放量都较施入氮肥处理小。

化肥配施、化肥与有机肥配施都使土壤的硝态氮含量显著降低,反硝化作用是土壤 N_2O 产生的主要途径。化学肥料配合施用,或有机肥与化肥配合施用能使肥料间的协同作用增强,加速土壤生物对肥料养

分的利用,减少养分的损失。氮磷钾肥与高量有机肥配施能显著减少温室气体氧化亚氮的排放。适当调整施入土壤的有机肥、氮肥、磷肥和钾肥的比例,不仅可以使土壤的肥料结构更加合理,从而保证植物生长所必需的养分,还可有效地减少温室气体氧化亚氮的排放。

参考文献:

- [1] Mosier A, Kroeze C, Nevison C, et al. Closing the global N_2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle—OECD/IPCC/IEA phase II development of IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory methodology[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 1998, 52: 225–248.
- [2] IPCC—Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2001 The Scientific Basis [M]. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Cambridge University Press, Cambridge. 2001. 7–244.
- [3] 曾江海,王智平,张玉铭,等. 小麦—玉米轮作期土壤排放 N_2O 通量及总量估算[J]. 环境科学, 1995, 16 (1): 32–35, 67.
- [4] 熊正琴,邢光熹,鹤田治雄,等. 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): 703–710.
- [5] 李琳,胡立峰,陈阜,等. 长期不同施肥类型对稻田甲烷和氧化亚氮排放速率的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (增刊): 707–710.
- [6] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N_2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37: 2037–2045.
- [7] Wang L F, Cai Z C, Yang L F, et al. Effect of disturbance and glucose addition on nitrous oxide and carbon dioxide emissions from a paddy soil [J]. *Soil Till Res*, 2005, 82: 185–194.
- [8] Yang X M, Drury C F, Reynolds W D, et al. Interactive effects of composts and liquid pig manure with added nitrate on soil carbon dioxide and nitrous oxide emissions from soil under aerobic and anaerobic conditions [J]. *Can J Soil Sci*, 2003, 83: 343–352.
- [9] 隋跃宇,张兴义,焦晓光,等. 长期不同施肥制度对农田黑土有机质和氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19 (6): 190–192, 200.
- [10] Maljanen M, Liikanen A, Silvola J, et al. Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use [J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, 35: 689–700.
- [11] EIA – Energy Information Administration. Emissions of greenhouse gas in the United States 2005 [M]. DOE/EIA – 0573 (2005). Washington. DC. 2006. 48.
- [12] 王继红,刘景双,于君宝,等. 氮磷肥对黑土玉米农田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (1): 35–38.
- [13] Bremner J M, Blackmer A M. Terrestrial nitrification as a source of atmospheric nitrous oxide. In: Delwiche, C.C.(Ed.), Denitrification, Nitrification and Atmospheric Nitrous Oxide[A]. Wiley New York, 1981. 151–170.
- [14] Anderson I C, Levine J S. Relative rates of nitric oxide and nitrous oxide production by nitrifiers, denitrifiers, and nitrate respirers [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1986, 51: 938–945.
- [15] Garcia-Montiel D C, Melilo J M, Steudler P A, et al. Carbon limitations to nitrous oxide emissions in a humid tropical forest of the Brazilian Amazon [J]. *Biol Fertil Soi*, 2003, 38: 267–272.
- [16] 邹建文,黄耀,宗良纲,等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响 [J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7–12.