

不同施氮水平对菜地土壤 N₂O 排放的影响

邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 赵长盛, 孙学成, 谭启玲

(华中农业大学微量元素研究中心, 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要:通过大田试验研究了不同施氮水平对蔬菜地土壤 N₂O 排放的影响。试验设置 5 个氮水平[0(N0)、430(N1)、860(N2)、1 290(N3)、1 640(N4)kgN·hm⁻²], 2 a 试验期间种植的蔬菜有辣椒、萝卜、菠菜和小白菜。结果表明, 施氮显著影响 N₂O 排放通量, 各施氮水平土壤 N₂O 排放通量范围分别为-8~39、0.4~157、12~626、8.5~982、16~1 342 μgN·m⁻²·h⁻¹; 同时, 氮肥施用显著提高了 N₂O 排放总量, 各施氮处理(N0、N1、N2、N3 和 N4)试验期间土壤 N₂O 平均排放总量分别为 0.48、1.35、4.49、7.83、10.57 kgN·hm⁻², 土壤 N₂O 排放系数范围是 0.33%~1.13%, 且施氮水平与土壤 N₂O 排放总量间呈显著的指数函数关系; 不同季节蔬菜地土壤 N₂O 排放总量差异很大, 其中最大的是辣椒, 最小的是菠菜; 此外, 土壤 N₂O 排放通量季节变化除受施氮水平影响外, 还受土壤温度的影响, 排放高峰出现在高温的夏季。

关键词:氧化亚氮; 蔬菜地; 氮肥施用水平; 排放系数

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2238-06

Effects of Nitrogen Application Rates on Nitrous Oxide Emission from a Typical Intensive Vegetable Cropping System

QIU Wei-hong, LIU Jin-shan, HU Cheng-xiao, ZHAO Chang-sheng, SUN Xue-cheng, TAN Qi-ling

(College of Huazhong Agricultural University, Microelement Research Centre of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Field experiment was conducted to study nitrous oxide (N₂O) emission and its relationship with different nitrogen application rates in a continuous vegetable cropping system in Wuhan. Nitrogen was applied at 0 (N0), 430 (N1), 860 (N2), 1 290 (N3) and 1 640 (N4) kgN·hm⁻² to the plots during two experimental years. N₂O emissions were measured for six rotational vegetables [pepper (*Capsicum annuum* L.), radish (*Raphanus sativus* L.), Spinach (*Spinacia oleracea* L.), pepper (*Capsicum annuum* L.), Chinese cabbage (1) (*Brassica Chinensis* L.) and Chinese cabbage (2)]. The results showed that nitrogen application significantly affected the N₂O emission from this vegetable system, N₂O emissions ranged from -8 to 39 μgN·m⁻²·h⁻¹ for N0, from 0.4 to 157 μgN·m⁻²·h⁻¹ for N1, from 12 to 626 μgN·m⁻²·h⁻¹ for N2, from 8.5 to 982 μgN·m⁻²·h⁻¹ for N3, and from 16 to 1 342 μgN·m⁻²·h⁻¹ for N4. Application of nitrogen also significantly increased the total N₂O emission, the average total N₂O emission from five treatments (N0, N1, N2, N3 and N4) was 0.48, 1.35, 4.49, 7.83 and 10.57 kgN·hm⁻², respectively, the emission factor varied from 0.33% to 1.13%. There was an exponential relationship between nitrogen application rates and total N₂O emission. Different seasonal vegetable crops had different total N₂O emission, the largest total N₂O emission was pepper, the lowest was spinach. In addition, soil temperature affected the seasonal variation of N₂O emission, the peak emission of N₂O occurred at summer when soil temperature was high.

Keywords: nitrous oxide; vegetable field; nitrogen fertilizer application rate; emission factor

氧化亚氮(N₂O)是一种温室气体, 它既有产生温室效应的作用, 又可以破坏平流层臭氧。最新研究表明, N₂O 是臭氧层破坏的最重要因子, 并且被认为是

21 世纪最大的影响因子^[1]。大气中 N₂O 浓度 2005 年为 319 nL·L⁻¹, 比工业革命前 270 nL·L⁻¹ 增长了 16%^[2]。而施氮是影响农田生态系统 N₂O 排放最重要的影响因子^[3]。FAO^[4]统计资料显示, 施用于蔬菜地的氮肥量占全国施氮总量的 17%。近年来我国蔬菜生产发展迅速, 播种面积由 1980 年的 316 万 hm² (占农作物总播种面积的 2.2%) 发展到 2008 年的 1 788 万 hm² (占农作物总播种面积的 11.4%)^[5]。有关菜地土壤 N₂O 的排

收稿日期: 2010-05-10

基金项目: 农业部“引进国际先进农业科学技术项目”(948 项目)(2003-Z54, 2008-Z25)

作者简介: 邱炜红(1983—), 女, 博士研究生, 研究方向为氧化亚氮温室气体研究。E-mail: angel12@webmail.hzau.edu.cn

通讯作者: 胡承孝 E-mail: hucx@mail.hzau.edu.cn

放及其变化特征研究较少,尤其是华中亚热带菜地生态系统地区(湖北省武汉市)。本文采用大田试验,研究蔬菜地土壤 N_2O 排放规律和 N_2O 排放通量与不同施氮水平的关系,以揭示施氮水平对蔬菜地土壤 N_2O 排放的影响,从而为蔬菜生产的合理施氮技术提供一点科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验于 2007 年 4 月至 2009 年 4 月在华中农业大学植物营养试验田($30^{\circ}28'5.87''\text{E}$, $114^{\circ}21'8.34''\text{N}$)内进行,小区面积 $2.1\text{ m}\times 7.6\text{ m}=16\text{ m}^2$,试验土壤为黄棕壤。土壤的基本理化性状如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本农化性质

Table 1 The soil basic agro-chemical properties for this study

总碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ Total C	pH 值 (水土比 为 5:1)	总氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Total N	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Available N	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Available K	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Available P
6.8	5.8	1.98	45.6	127.8	7.64

1.2 试验设计

试验处理及作物轮作如表 2 所示。试验共设 5 个氮肥水平,每个处理设置 3 次重复,试验采用随机区组设计。氮肥(尿素, N 46%),分为基肥和追肥施用,磷肥(过磷酸钙, P_2O_5 12%)和钾肥(硫酸钾, K_2O 50%)作为基肥在蔬菜种植前一次性施入。

试验共进行 6 季蔬菜种植:辣椒(*Capsicum annuum* L.)特选二号,20070426—20070729;萝卜(*Raphanus sativus* L.)南畔洲,20070924—20071225;菠菜(*Spinacia oleracea* L.)华菠一号,20080220—20080416;辣椒(*Capsicum annuum* L.)特选二号,

表 2 试验期间各蔬菜地施肥量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 2 The rates of nitrogen fertilizer of the six seasonal

vegetables($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	辣椒 Pepper (2007)	萝卜 Radish (2007)	菠菜 Spinach (2008)	辣椒 Pepper (2008)	小白菜 Cabbage (2008)	小白菜 Cabbage (2009)
N0	0	0	0	0	0	0
N1	100	60	40	100	90	40
N2	200	120	80	200	180	80
N3	300	180	120	300	270	120
N4	360	240	160	360	360	160
P_2O_5	120	40	80	90	90	50
K_2O	200	70	100	200	160	60

20080424—20080804;小白菜(*Brassica Chinensis* L.)上海青,20081025—20090105;小白菜(*Brassica Chinensis* L.)四月慢,20090310—20090430。

1.3 采样方法

采样采用静态箱法,收集装置呈圆柱状(直径为 350 mm,高为 300 mm),所用材料为 0.5 mm 厚的镀锌铁板,顶端装有橡胶塞和三通阀。采样时,每个小区内设置 2 个重复收集装置,收集装置放置在小区的中部,2 个重复收集装置之间相距 2 m。采样容积为 20 mL 医用塑料注射器和 16 mL 真空玻璃瓶。利用三通阀原理采集 N_2O 气体,然后注入玻璃收集瓶,带回实验室进行分析。 N_2O 气体采样频率为春、秋两季每周采样 1 次,夏季每周采样 2 次,冬季每隔 10 d 采样 1 次。施肥后 1~2 周内适当增加采样次数。采气时间一般在上午 8:00—10:00。采样持续时间为 20 min,分别在第 0、10、20 min 时采集气体。先用 100 mL 注射器来回抽取气体 10 次以上,以混匀箱内气体,减少采样误差,然后用 20 mL 注射器采集气样。

1.4 N_2O 排放量的测定及排放通量的计算

排放量的测定: N_2O 气体分析采用改装后的美国 Varian 产 GC3800 气相色谱仪。色谱柱为 $1\text{ m}\times 2\text{ mm}$ (内径)不锈钢柱,内填 80~100 目 Porapak Q 的填充柱,柱温 55°C ,ECD 检测,检测器温度 330°C ,采用十通进样反吹阀和四通切换阀进样,保留时间 4.30 min,载气为高纯氮气($>99.999\%$),流速为 $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

排放通量的计算: N_2O 排放通量指单位时间内单位面积上农田土壤排放或吸收 N_2O 的量。通量的计算公式为:

$$Flux = \rho \times h \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{T}$$

式中: $Flux$ 为排放通量, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; h 为箱内有效空间的高, m; ρ 为标准状况下 N_2O -N 气体的密度,取 $1.25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $\Delta c/\Delta t$ 为箱内气体浓度随时间的变化率, $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$; T 为采气箱内温度, K。

2 结果与分析

2.1 土壤 N_2O 排放通量变化

施用氮肥能显著提高菜地土壤 N_2O 的排放,其排放通量随着施氮量的增加而增加,且不同施氮处理的 N_2O 的排放通量差异较大(图 1)。N1、N2、N3、N4 各施氮水平土壤 N_2O 排放通量范围分别为 $0.4\sim 157$ 、 $12\sim 626$ 、 $8.5\sim 982$ 、 $16\sim 1\,342\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。未施氮处理的土

壤 N₂O 排放通量都较低, 排放通量范围为-8~39 μg·m⁻²·h⁻¹, 平均排放通量为 12 μg·m⁻²·h⁻¹。

此外, 两年试验期间各处理土壤 N₂O 排放通量季节变化趋势一致(图 1), 土壤 N₂O 排放高峰均出现在温度高的夏季, 而在温度较低的冬季土壤 N₂O 排放量较低。N₂O 排放峰最大的是 N4 处理, 两年最高排放通量分别为 1 213 μg·m⁻²·h⁻¹ 和 1 342 μg·m⁻²·h⁻¹, 且显

著高于其他施氮水平, 如 N1 处理下两年最高排放通量分别为 138 μg·m⁻²·h⁻¹ 和 157 μg·m⁻²·h⁻¹。

2.2 土壤 N₂O 排放总量与排放系数

施氮提高了土壤 N₂O 排放总量, 两年试验期间土壤 N₂O 排放总量均随着施氮水平的提高而增加, 且各施氮处理间土壤 N₂O 排放总量差异达显著性水平(表 3)。但同一施氮水平, 在两年试验期间 N₂O 排放总量无显著性差异, 且含量相近(表 3)。N0、N1、N2、N3、N4 各处理的土壤 N₂O 平均排放总量分别为 0.48、1.35、4.49、7.83、10.57 kgN·hm⁻²。

试验期间两年土壤 N₂O 排放系数(即 N₂O 排放总量占施用氮肥的比例, 为一年中各氮肥水平下种植不同种蔬菜的排放系数的平均值)范围分别为 0.36%~1.13%(200704—200804) 和 0.33%~1.11%(200804—200904)(表 3)。

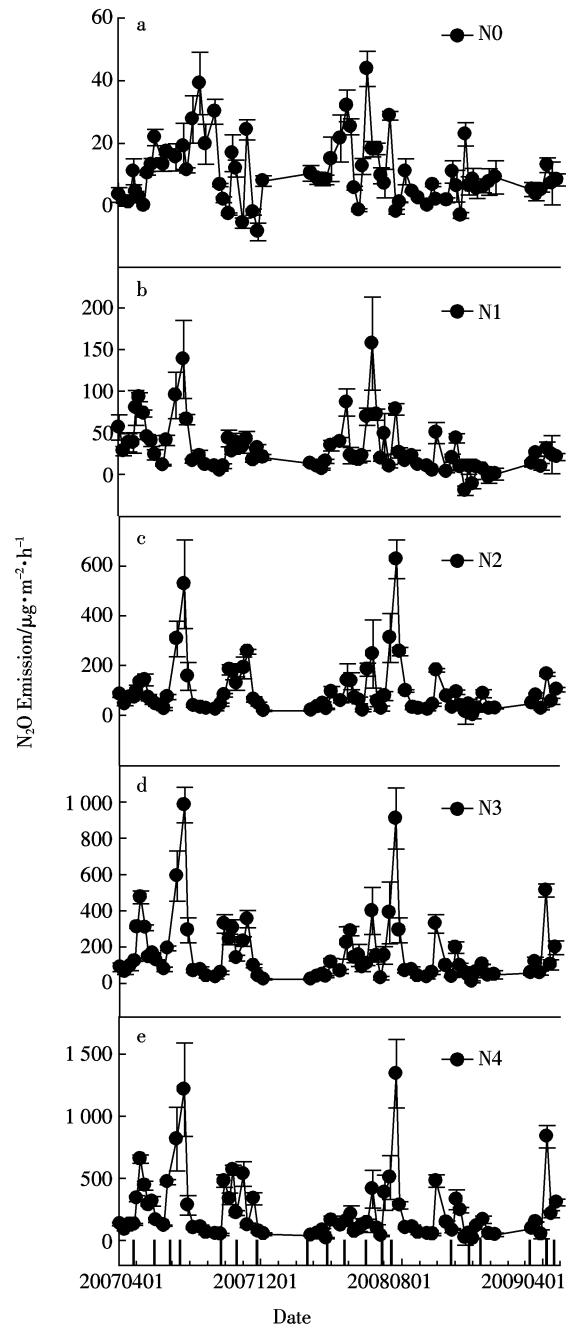


图 1 蔬菜地土壤 N₂O 排放通量季节变化
Figure 1 Seasonal variation of nitrous oxide emission from vegetable field

表 3 土壤 N₂O 排放总量与排放系数

Table 3 The total N ₂ O emission and emission factor			
处理 Treatment	总量 Total N ₂ O-N/ kgN·hm ⁻²	排放系数 Emission Factor/%	
200704—200804	N0	0.48±0.20e	—
	N1	1.38±0.29d	0.36%
	N2	4.05±0.85c	0.78%
	N3	7.70±1.05b	0.98%
	N4	10.84±1.94a	1.13%
200804—200904	N0	0.49±0.13e	—
	N1	1.32±0.38d	0.33%
	N2	4.93±1.03c	0.86%
	N3	7.95±1.55b	1.03%
	N4	10.29±2.19 a	1.11%

注:表中不同字母表示差异显著性($P<0.05$)(采用 SPSS (v15.0) 的 One-way ANOVA 模块进行分析, 多重比较采用 LSD 法)。Different letters in a column indicate significant differences at $P<0.05$ as determined by One-way ANOVA of SPSS(v15.0) followed by LSD test.

2.3 不同蔬菜季的土壤 N₂O 排放

在同一施氮水平时, 种植不同蔬菜的土壤 N₂O 排放总量差异较大(图 2)。如在 N4 水平时, 辣椒(2007 和 2008)N₂O 排放总量分别为 7.7 kg·hm⁻² 和 5.5 kg·hm⁻², 小白菜(2008 和 2009)N₂O 排放总量分别为 2.6 kg·hm⁻² 和 1.9 kg·hm⁻², 而菠菜 N₂O 排放总量仅有 0.22 kg·hm⁻²。一方面, 这与不同季蔬菜生长周期长短和施肥量有关; 另外一方面与环境条件有关, 如 N₂O 排放总量低的菠菜是生长在冬季, 环境温度较低, N₂O 排放就会很小, 而辣椒生长在夏季, 环境温度较高, 会引起 N₂O 的高排放。

另外,无论施氮量高与低,不同蔬菜季 N_2O 排放总量(y)均与施氮量(x)呈显著的指数函数关系,其方程分别如下:

$$\text{辣椒(2007)}: y = 0.634 1e^{0.007 0x}, R^2 = 0.992 5 (P < 0.01)$$

$$\text{萝卜(2007)}: y = 0.363 1e^{0.009 0x}, R^2 = 0.938 6 (P < 0.01)$$

$$\text{菠菜(2008)}: y = 0.045 1e^{0.010 2x}, R^2 = 0.926 8 (P < 0.01)$$

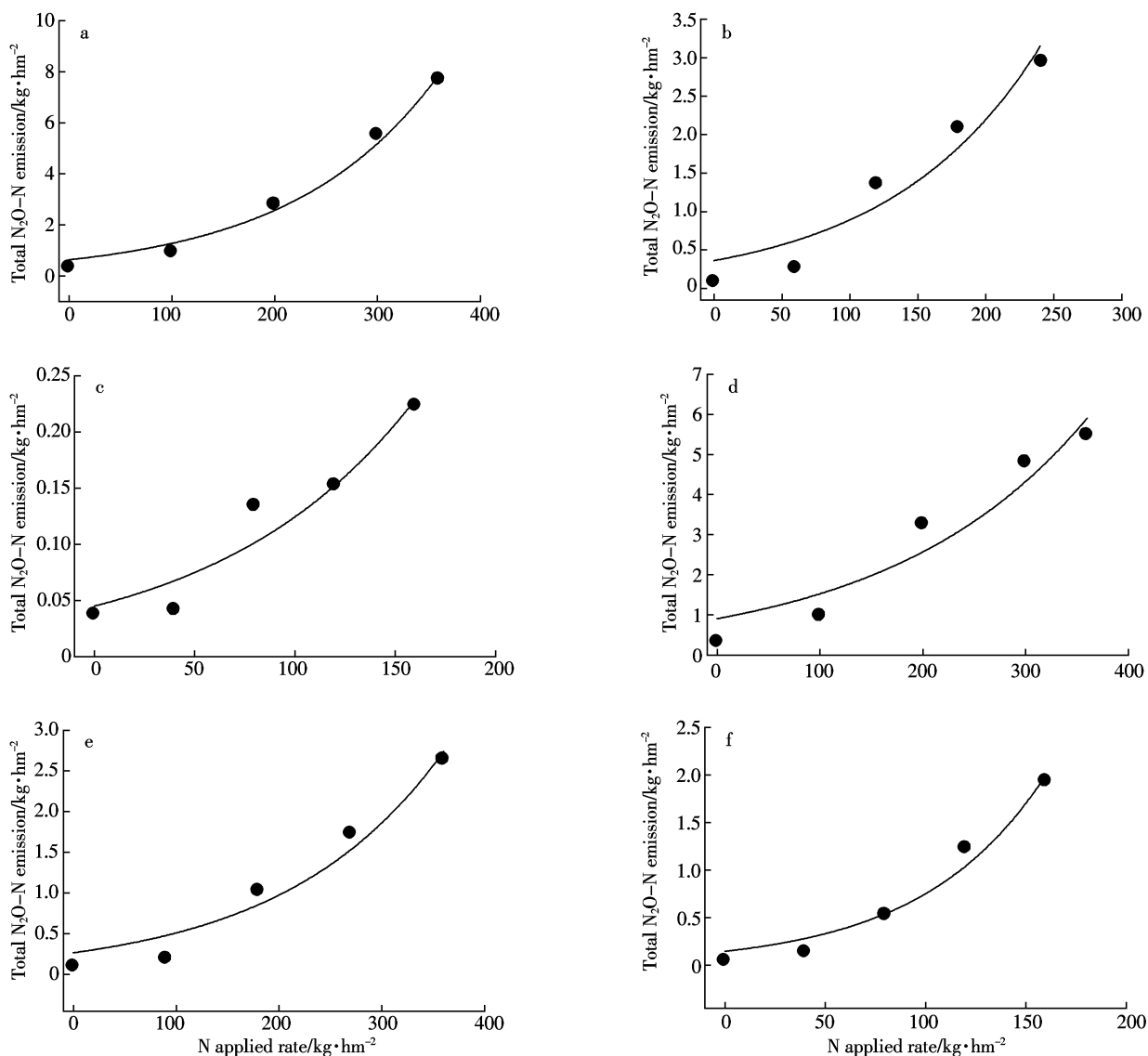
$$\text{辣椒(2008)}: y = 0.908 6e^{0.005 2x}, R^2 = 0.926 0 (P < 0.01)$$

$$\text{小白菜(2008)}: y = 0.269 0e^{0.006 4x}, R^2 = 0.959 3 (P < 0.01)$$

$$\text{小白菜(2009)}: y = 0.147 4e^{0.016 3x}, R^2 = 0.972 2 (P < 0.01)$$

3 讨论

施用氮肥是影响农田土壤 N_2O 排放的一个重要因子^[3,6-7]。本试验研究表明,施氮显著提高了土壤 N_2O 的排放通量和 N_2O 排放总量(图 1 和表 3)。这与其他研究结果一致,如梁东丽等^[8]研究发现, N_2O 排放量随着施肥量增加而上升;郑靖等^[9]也研究发现施用氮肥提高了潮棕壤稻田 N_2O 排放。同时,本试验研究结果还表明,土壤 N_2O 排放总量与施氮量呈显著的指数函数关系(图 2),说明在低施氮水平下,土壤 N_2O 排放总量随着施氮量的增加缓慢上升,而超过一定施氮量



a-2007 辣椒;b-2007 萝卜;c-2008 菠菜;d-2008 辣椒;e-2008 小白菜;f-2009 小白菜

a-2007 pepper;b- 2007 radish;c-2008 spinach;d-2008 pepper;e-2008 cabbage;f-2009 cabbage

图 2 不同季节蔬菜土壤 N_2O 排放总量及其与施氮量的关系

Figure 2 Exponential relationship between N application rate and total N_2O -N emission in six crops

水平,土壤 N₂O 排放则急剧增加,这也证明了氮肥是影响土壤 N₂O 排放的重要因素。

另外,随着施氮量的增加,土壤 N₂O 排放系数也有所增加(表 3)。本试验各处理土壤 N₂O 的排放系数范围为 0.33%~1.13%,其值低于 Eichner^[10]的研究结果,他指出全球因施用氮肥引起的土壤 N₂O 排放占了 2.2%~2.7%。但要高于国内的一些研究结果,如 He 等^[11]研究发现施入菜地土壤的氮肥有 0.27%~0.3%以 N₂O 的形式损失;Xiong 等^[12]研究表明,南京郊区蔬菜地 N₂O 平均排放系数为 0.73%;丁洪和王跃思^[7]在田间条件下研究不同作物系统中氮肥反硝化损失和 N₂O 排放量表明,小麦、玉米和大豆地 N₂O 排放量分别占施氮量的 0.02%、0.69%和 0.14%。

我国是蔬菜消费大国,随着人口的增长和人民生活水平的提高,全国蔬菜播种面积迅速增加,由 1980 年的 316 万 hm²(占农作物总播种面积的 2.2%)发展到 2008 年的 1 788 万 hm²(占农作物总播种面积的 11.4%)^[5]。袁新民等^[13]认为,与其他农作物相比,大多数蔬菜都属高产作物,有需肥量大的特性,且氮肥是蔬菜地高产的重要因子^[14]。FAO^[4]统计资料显示施用于蔬菜地的氮肥量占全国施氮总量的 17%。同时,有调查表明,蔬菜地的施肥量远超出推荐的施肥量,如北京市温室蔬菜系统中,施氮量高达 1 000 kgN·hm⁻²·a⁻¹^[15],山东省惠民县施氮量则高达 2 800 kgN·hm⁻²·a⁻¹^[16],这些施氮量远高于农作物平均施氮水平 180 kg N·hm⁻²·a⁻¹^[17]。这说明,在菜地土壤中残留着大量的氮肥,是产生 N₂O 的主要来源,进而引起土壤 N₂O 的高排放。本试验研究表明,施用氮肥引起土壤 N₂O 年平均排放总量分别为 1.35(N1)、4.49(N2)、7.83(N3)、10.57 kg·hm⁻²(N4),要高于 He 等^[11]研究的山东省典型温室大棚蔬菜系统 N₂O 排放量范围 2.6~8.8 kgN₂O-N·hm⁻²·a⁻¹。按武汉市蔬菜种植面积 17.7 万 hm²^[18]和最高氮水平(N4, <900 kg·hm⁻²·a⁻¹)土壤 N₂O 排放总量计算,武汉市蔬菜系统以 N₂O 损失的氮为 1 870 t·a⁻¹。由此可见,蔬菜系统 N₂O 排放不可忽视,是农田生态系统中的一个重要 N₂O 排放源。此外,本试验 2 a 期间最大施氮量为 1 640 kgN·hm⁻²,远低于实际蔬菜系统施氮量,这说明实际农田蔬菜系统中 N₂O 排放量要大于本试验的研究结果。因此,应进一步加强对城市郊区菜地氮肥施用量的管理与调控,在不降低蔬菜产量的前提下,减少温室气体 N₂O 排放并提高氮肥利用率。

4 结论

(1)不同施氮水平显著影响土壤 N₂O 排放通量和 N₂O 排放总量,试验的两年中,N0、N1、N2、N3、N4 各处理的土壤 N₂O 平均排放总量分别为 0.48、1.35、4.49、7.83、10.57 kg N·hm⁻²,其土壤 N₂O 排放系数范围为 0.35%~1.37%。

(2)土壤 N₂O 排放通量季节变化随温度的变化而变化,在温度最高的夏季排放通量较高,温度低的冬季排放通量则较低,说明温度也是影响土壤 N₂O 排放的重要因子之一。

(3)在同一施氮水平时,不同蔬菜季的土壤 N₂O 排放总量差异较大,生长在夏季和生长期长的蔬菜 N₂O 排放量相对较高。另外,无论施氮量高与低,不同蔬菜季 N₂O 排放总量均与施氮量呈显著的指数函数关系。

参考文献:

- [1] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous Oxide(N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. *Science*, 2009, 326(5949): 123.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Solomon, S, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller. ed. 2007: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] Gregorich E G, Rochette P, VandenBygaart A J, et al. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 83(1): 53-72.
- [4] FAO. FAOSTAT(<http://www.fao.org/corp/statistics/en/>)[M/OL]. 2006.
- [5] 中国统计局.中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2009. China Statistical Bureau. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistical Press, 2009.
- [6] 黄丽华, 沈根祥, 顾海蓉, 等. 肥水管理方式对蔬菜田 N₂O 释放影响的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1319-1324. HUANG Li-hua, SHEN Gen-xiang, GU Hai-rong, et al. Simulation of some impacts of fertilization and water management on nitrous oxide emissions from vegetable field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1319-1324.
- [7] 丁洪, 王跃思. 东北黑土区不同作物系统氮肥反硝化损失与 N₂O 排放量[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 323-326. DING Hong, WANG Yue-si. Denitrification losses of nitrogen fertilizer and N₂O emission from different crop-black soil system in North-east China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2): 323-326.
- [8] 梁东丽. 菜地不同施氮量下 N₂O 逸出量的研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2002, 30(2): 73-77.

- LIANG Dong-li. N_2O losses from vegetable field of applying different amounts of $\text{NO}_3\text{-N}$ [J]. *Journal of Northwest Science Technology University of Agriculture and Forestry*, 2002, 30(2):73-77.
- [9] 郑靖, 王重阳, 王跃思, 等. 氮肥对潮棕壤稻田 N_2O 排放和土壤无机氮素的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, 22(2):139-142.
- ZHENG Jing, WANG Chong-yang, WANG Yue-si, et al. Effects of N fertilization on the N_2O emissions and soil nitrogen in aquic brown soil [J]. *System Science and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2006, 22(2):139-142.
- [10] Eichner M. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: Summary of available data[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1990, 19(2):272.
- [11] He F, Jiang R, Chen Q, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:1666-1672.
- [12] Xiong Z Q, Xie Y X, Xing G X, et al. Measurements of nitrous oxide emissions from vegetable production in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(12):2225-2234.
- [13] 袁新民, 李晓林, 张福瑛. 蔬菜地土壤的硝态氮累积及影响因素[M]//平衡施肥与可持续优质蔬菜生产. 北京: 中国农业大学出版社, 2000:288-292.
- YUAN Xin-min, LI Xiao-lin, ZHANG Fu-suo. Nitrate accumulation in vegetable field and its influencing factors[M]//Balanced fertilization and sustainable high-quality vegetable production, Beijing: China Agricultural University Press, 2000:288-292.
- [14] 李晓林, 张福瑛, 米国华. 平衡施肥与可持续优质蔬菜生产[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000:270-277.
- LI Xiao-lin, ZHANG Fu-suo, MI Guo-hua. Balanced fertilization and sustainable high-quality vegetable production[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2000:270-277.
- [15] Chen Q, Zhang X, Zhang H, et al. Evaluation of current fertilizer practice and soil fertility in vegetable production in the Beijing region[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69(1):51-58.
- [16] Ju X T, Liu X J, Zhang F S, et al. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China[J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2004, 33(6):300-305.
- [17] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2-3):117-127.
- [18] 武汉统计局. 武汉统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- Wuhan Statistical Bureau. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistical Press, 2008.