

DOI: 10.5846/stxb201306091534

张婧, 李虎, 王立刚, 邱建军. 京郊典型设施蔬菜地土壤 N_2O 排放特征. 生态学报, 2014, 34(14): 4088-4098.

Zhang J, Li H, Wang L G, Qiu J J. Characteristics of nitrous oxide emissions from typical greenhouse vegetable fields in Beijing suburbs. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 4088-4098.

京郊典型设施蔬菜地土壤 N_2O 排放特征

张 婧, 李 虎, 王立刚*, 邱建军

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部面源污染控制重点实验室,
中国农业科学院-美国新罕布什尔大学可持续农业生态系统研究联合实验室, 北京 100081)

摘要: 利用静态暗箱-气相色谱法对北京郊区设施蔬菜地典型种植模式(番茄-白菜-生菜)下土壤 N_2O 排放特征进行了周年(2012年2月22日—2013年2月23日)观测,探讨了不同处理下(即不施氮肥处理(CK)、农民习惯施肥处理(FP)、减氮优化施肥处理(OPT)和减氮优化施肥+硝化抑制剂处理(OPT+DCD)) N_2O 排放特征及土壤温度、土壤湿度、土壤无机氮含量对土壤 N_2O 排放的影响。结果表明:每次施肥+灌溉之后设施蔬菜地会出现明显的 N_2O 排放高峰,持续时间一般为3—5 d。不同处理 N_2O 排放通量变化范围在 $-0.21\sim 14.26\text{ mg N}_2\text{O m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,平均排放通量 $0.03\sim 0.36\text{ mg N}_2\text{O m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 。整个蔬菜生长季各处理 N_2O 排放与土壤孔隙含水率(WFPS)均表现出极显著的正相关关系($P<0.01$);不施氮处理5 cm深度土壤温度与 N_2O 排放通量呈现显著的正相关关系($P<0.05$);各处理 N_2O 排放与土壤表层硝态氮含量具有较一致变化趋势。不同处理下 N_2O 年度排放总量差异显著,依次顺序为FP($20.66\pm 0.91\text{ kg N/hm}^2$)>OPT($12.79\pm 1.33\text{ kg N/hm}^2$)>OPT+DCD($8.03\pm 0.37\text{ kg N/hm}^2$)。与FP处理相比,OPT处理和OPT+DCD处理 N_2O 年排放总量分别减少了38.09%和61.13%。各处理 N_2O 排放系数介于0.36%—0.77%,低于IPCC 1.0%的推荐值。在目前的管理措施下,合理减少施氮量和添加硝化抑制剂是减少设施蔬菜地 N_2O 排放量的有效途径。

关键词: 设施蔬菜地; N_2O 排放; 季节变化; 影响因素

Characteristics of nitrous oxide emissions from typical greenhouse vegetable fields in Beijing suburbs

ZHANG Jing, LI Hu, WANG Ligang*, QIU Jianjun

Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture/CAAS-UNH Joint Laboratory for Sustainable Agro-ecosystem Research/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Nitrous oxide (N_2O) has been recognized as one of the most important trace gases in the atmosphere that causes global warming and stratospheric ozone depletion. Nitrogen (N) fertilizer is considered as the primary source of N_2O emissions from agricultural soils. As a large agricultural country, China consumes the greatest amount of synthetic N fertilizer which accounts for 30% of the world consumptions. Therefore, quantifying N_2O emissions from agricultural soils and seeking suitable mitigation measures have become a relatively hot issue in international global climate change studies. However, the task has proved to be uneasy because N_2O production and emission processes are very complex and are influenced by a number of soil and environmental variables, interacting soil water and N processes, crop uptake and management practices. Especially the N_2O emissions from the greenhouse vegetable systems are more complex because the system obtain relatively higher inputs of fertilizer (e.g., N fertilizer application rate can be as high as $1,500\text{ kg N/hm}^2$), more water irrigation and cultivation disturbance. This paper reported a field experiment with intensive measurements of N_2O

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41201287); 公益性行业(农业)科研专项(201103039); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(302-30, 402-15)

收稿日期: 2013-06-09; **网络出版日期:** 2014-02-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangligang@caas.cn

fluxes from a greenhouse vegetable system with varied management treatments in Fangshan District located in the western suburbs of Beijing, China. N₂O fluxes in conjunction with the main environmental drivers (i.e., soil temperature, soil moisture, soil NO₃⁻-N and soil NH₄⁺-N) were observed from Feb. 2012 to Feb. 2013. Four treatments, i.e., the control treatment (CK), the farmers' practice treatment (FP), the optimized fertilization treatment (OPT), and the OPT treatment with nitrification inhibitor amendment treatment (OPT+DCD), were implemented during the experimental period to test the impacts of fertilization on N₂O fluxes from the agroecosystem. The CK had no fertilizer applied; FP consisted of 2,470 kg N/hm² with 1,270 and 1,200 kg N/hm² from synthetic fertilizer and manure, respectively; the OPT reduced synthetic fertilizer rate to 573 kg N/hm². The field was planted with tomato, cabbage and lettuce rotation during the two experimental years. The results indicated that large amount of N₂O emissions were observed in the spring and summer periods when the soil had relatively high temperatures and moisture. N₂O emission peaks were measured following each event of fertilization or irrigation. The high peaks usually lasted for 3—5 days. During the experimental period, N₂O emission rates ranged from -0.21—14.26 mg N₂O m⁻² h⁻¹ with daily means ranging from 0.03—0.36 mg N₂O m⁻² h⁻¹. The annual cumulative N₂O emissions ranged from 1.69—20.66 kg N hm⁻², based on which the annual emission factor was calculated to be 0.36%—0.77% of the fertilizer N. Compared to the FP treatment, the OPT and OPT + DCD treatments both significantly reduced the annual N₂O emissions by 38.09% and 61.3% ($P < 0.05$), respectively. The N₂O emissions during the tomato, lettuce, cabbage and fallow periods accounted for 60.65%, 26.32%, 10% and 3.3% of annual cumulative emissions, respectively. The fertilizer-induced N₂O emissions varied across the N application rates, the crop growing periods and the management treatments. N₂O fluxes were positively related to the soil water filled pore space (WFPS) when the WFPS values varied between 48.88%—79.88% ($P < 0.05$). There was no consistent correlation between N₂O fluxes and the soil temperature at soil depth of 5 cm. Higher soil available nitrogen, especially nitrate, contributed higher N₂O emissions. In conclusion, alternative management practices such as reduced fertilizer application rate and amendment of DCD could effectively reduce N₂O emissions from the greenhouse vegetable field which usually emitted more N₂O than other croplands in China.

Key Words: Greenhouse vegetable field; nitrous oxide emission; seasonal variation; influencing factors

氧化亚氮(N₂O)作为主要的温室气体之一,已经引起了各国科学家和政府的高度重视。N₂O对温室效应的贡献率虽然仅为5%,但增温效应却是CO₂的296—310倍,2005年其浓度为319μg/L,大约比工业化前的浓度高18%,而且正以每年0.2%—0.3%的速度线性增长^[1]。农业是N₂O的主要排放源,在N₂O源汇收支平衡中起主导作用^[2]。在我国,目前针对农业土壤N₂O排放的研究主要集中在长江中下游的稻田生态系统和华北地区的冬小麦/夏玉米轮作系统等大田作物上^[3-6],而对于菜田土壤N₂O尤其是设施蔬菜地相关研究则较少^[7-10],有研究表明中国农田土壤排放的N₂O约20%来源于蔬菜种植^[11]。与粮食作物和普通露天栽培蔬菜相比,设施蔬菜是人为创造适宜园艺作物生长发育的小气候环境,不受或少受自然环境影响的作物生产方式,是一个受人类调控影响更大的生态系统,不仅具有高温、高

湿、高蒸发等特点,而且受人为因素如耕作、施肥、灌溉等的影响更加直接和强烈,尤其一味的追求高产,较高量氮肥(960—4670 kg hm⁻² a⁻¹)的施用^[12-14],势必造成N₂O排放特征和排放强度在时空尺度上的差异。因此,明确设施蔬菜地土壤N₂O排放过程与特征对相应减排技术措施的提出具有重要的意义。随着人民需求的增加和农业产业结构的调整,大中城市郊区的粮田逐渐转换为设施蔬菜地,而由设施蔬菜种植引起的N₂O排放问题将会越来越突出。目前,已有设施蔬菜地N₂O排放的研究主要集中在单季蔬菜不同肥料及用量方面^[15-16],减氮优化施肥技术和添加硝化抑制剂方法作为提高氮肥利用率、减少温室气体排放的措施在农田上已经得到一定的应用^[5,17],而对设施蔬菜地减氮优化施肥和添加硝化抑制剂措施下N₂O周年排放特征的研究少有报道。为此,本文以北京郊区设施菜地典型种植模式番茄-

白菜-生菜为例,通过对不同处理 N_2O 排放的周年监测,明确该种植模式下 N_2O 排放特征以及与温度、湿度和无机态氮等环境因子之间的关系,为设施蔬菜地 N_2O 减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验点位于北京市西南部房山区窦店镇(39°36'N,115°56'E)。该地区属温带半湿润季风气候区,年平均气温为11.9℃,无霜期202 d,年降雨量635 mm,年日照时数2553.8 h。供试大棚为塑料大棚,长150 m,宽7 m。大棚顶部和下部设有通风口以调节棚内的温湿度,棚膜无色透明,冬、春季棚膜外覆盖苫子(棉布制成,保温性能良好)用于夜间保温。冬、春季节9:00左右开苫,17:00左右放苫,夏季晚上不放苫,晴天适当打开上下通风口与外界交换空气,雨雪天气时封闭通风口防止雨水进入。春茬番茄定植后覆盖黑色地膜以保持水分、提高地温、防止杂草。土壤质地为粉质壤土,中等肥力水平,土壤容重为1.21 g/cm³,0—20 cm土层有机质为3.40%,全氮、全磷和全钾分别为0.19%、0.11%、2.31%,碱解氮、有效磷和速效钾分别为168.07、192.96、703.00 mg/kg,pH值为8.00。

1.2 田间试验设计

本研究观测时间为2012年2月22日至2013年2月23日。种植模式为番茄-白菜-生菜,具体时间见表1。试验采用随机区组设计,设置4个处理,分别为:不施氮肥处理(CK)、农民习惯施肥处理(FP)、减氮优化施肥处理(OPT)、减氮优化施肥+硝化抑制剂处理(OPT+DCD(Cyanoguanidine))。每个处理设置3个重复,小区面积为6 m×10 m=60 m²。各处理施氮量如表2所示,氮肥品种为尿素(N 46.4%)。氮肥和钾肥分基肥和追肥施用,磷肥和有机肥(牛粪)作为基肥在蔬菜种植前一次性施入。试验前测定有机肥中的养分含量,番茄季施入牛粪含水量39.05%、氮含量1.36%;生菜季施入牛粪含水量53.75%、氮含量1.02%。番茄生长季氮肥分5次施入:基肥占总化氮量的20%(2月15日),追肥分4次施入,每次占总化氮量的20%(4月27日、5月12日、5月30日、6月14日);白菜生长季氮肥1次追肥施入(8月25日);生菜生长季氮肥分3次施入:基肥占总化氮量的20%,追肥第1次占总化氮量的40%(12月17日),追肥第2次占总化氮量的40%(1月14日)。硝化抑制剂双氰胺(DCD)的施用;DCD施入量为化肥氮施用量的5%。番茄生

表1 年度蔬菜生长季

Table 1 The planting and harvest time of each vegetable for one-year cycle

观测期 Sampling period	番茄 Tomato	闷棚 Swelter	白菜 Cabbage	生菜 Lettuce	休闲 Fallow
日期 Date	02-22—07-03	07-04—07-27	07-28—10-26	10-27—01-30	01-31—02-23
生育期天数 Days of growth stage	132	24	91	96	23

表2 试验期间各季蔬菜氮肥施用量

Table 2 The rates of N application in different treatments during each vegetable growth stage

处理 Treatments	番茄 Tomato (化肥氮+有机肥氮) (Fertilizer-N and Manure-N)/ (kgN/hm ²)	白菜 Cabbage (化肥氮) (Fertilizer-N)/ (kgN/hm ²)	生菜 Lettuce (化肥氮+有机肥氮) (Fertilizer-N and Manure-N)/ (kgN/hm ²)	共计 Total (化肥氮+有机肥氮) (Fertilizer-N and Manure-N)/ (kgN/hm ²)
不施氮肥处理 Control (CK)	0	0	0	0
农民习惯施肥处理 Farmers' Practice (FP)	750+800	120	400+400	1270+1200
减氮优化施肥处理 Optimized fertilization (OPT)	300+800	48	225+400	573+1200
减氮优化施肥+硝化抑制剂处理 Optimized fertilization with nitrification inhibitor (OPT+DCD)	300+800	48	225+400	573+1200

长季 DCD 分两次施入(基肥 50%,第 2 次追肥 50%);白菜生长季随追肥施入;生菜生长季随基肥施入。钾肥为硫酸钾(K₂O 51%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12%)。施肥灌溉方式同农民习惯,基肥撒施后旋耕入土,番茄追肥为肥料溶于水后随水冲施,白菜和生菜追肥为穴施后大水漫灌。

1.3 取样和测定方法

采用静态暗箱-气相色谱法对N₂O的排放通量进行测定。采样箱箱体由不锈钢材料制成,根据设施蔬菜种植的株行距,顶箱箱体设计为 70 cm×80 cm×60 cm 的长方体,最大限度的保障气体取样的代表性。等到植株生长至超过 60 cm 时,增加中段箱(70 cm×80 cm×60 cm)以保证植株的正常生长和取样的顺利进行。箱体底部边缘粘有密封胶条,确保箱体和底座之间的密封。底座(70 cm×80 cm×25 cm)由不锈钢制成,于定植时将其埋入地下。采样时,将箱体置于底座上,用夹子将箱体和底座夹在一起,确保密封性良好。密封后立即用注射器抽取气体,每隔 6 min 取样 1 次,取样 5 次,并准确记录采样时间和箱内气温(JM624)。观测频率为每周一次到两次,施肥和灌溉后逐日观测一周,施基肥时延长取样时间,直至施氮处理与不施氮处理的N₂O排放通量无差异时为止。每次观测均在 8:00—10:00 之间进行。每次取气样的同时,测定棚内气温(大棚东、西及中部各挂设温度计,取 3 次观察平均值)、土壤 5 cm 深度温度(JM624)及 16 cm 深度土壤体积含水量(TRIME-PICO 64)。气体样品存放于一定体积气体于气袋中,用改进的气相色谱仪(Agilent 7890A)分析N₂O浓度。

气体通量计算公式为:

$$F = \rho H \frac{dc}{dt} \frac{273}{273 + T} \frac{P}{P_0}$$

式中, F 为N₂O的排放通量(mg N₂O m⁻² h⁻¹),正值为排放负值为吸收, ρ 为标准大气压下N₂O的密度(g/L), H 为采样箱气室高度(cm), T 为采样箱内气温(℃), P 为采样时气压(mmHg), P_0 为标准大气压(mmHg), $P/P_0 \approx 1$, dc/dt 为采样箱内N₂O浓度的变化速率(μL L⁻¹ min⁻¹)。

用内插法计算相邻两次监测之间未观测日期的排放通量,然后将观测值和未观测日计算值逐日累加得到N₂O排放总量。

1.4 数据分析

用 Excel 2007 进行数据处理及作图用 SPSS19.0 进行不同处理间的差异显著性检验及N₂O排放通量和各影响因素间的偏相关关系分析,处理间采用 LSD 多重比较方法。

2 结果与分析

设施蔬菜地N₂O周年排放特征

从不同处理N₂O排放通量看,不施肥处理(CK)在整个观测期内除了在番茄定植后的一段时间N₂O排放出现明显的排放高峰外,其余时间N₂O排放波动较小。各施肥处理N₂O排放呈现明显的季节动态变化规律,全生育期N₂O排放通量波动较大,但变化趋势基本一致(图 1)。在施肥(基肥和追肥)+灌溉事件后均观测到N₂O呈现“脉冲式”排放,峰值一般持续时间为 3—5 d,其余时间N₂O排放通量波动较小。在番茄生长季,共出现 5 次明显的N₂O排放高峰,其中在番茄定植初期,N₂O排放峰值就达到了 6.05 mg N₂O m⁻² h⁻¹,且该排放峰持续时间较长(13 d),主要是因为此期间使用了大量的有机肥和化肥作底肥,为土壤微生物活动提供了充足的反应底物,且初春大棚内温度适宜(12℃左右),加之频繁灌溉缓苗,有利于硝化和反硝化过程,因而促进了N₂O排放。但是单独灌溉(4月7日)并没有引起明显的N₂O排放,可能是因为灌溉时进行硝化作用的底物浓度较低所致。随着棚内温度的升高,在番茄生长后期(6月15日),灌溉和施肥的共同作用导致 FP 处理的N₂O排放通量达到了全年的最高值 14.26 mg N₂O m⁻² h⁻¹。在白菜生长季,共观测到两次较为明显的N₂O排放峰,由于低化肥氮的施用,所引起N₂O排放峰值明显低于番茄生长季,分别发生在前期翻耕移栽后和莲座期追肥后,分别达到 1.09 和 2.83 mg N₂O m⁻² h⁻¹,后期的追肥(8月27日)显著促进了N₂O排放。在生菜生长季,随着施肥和灌溉,共观测到 3 次较为明显的N₂O排放峰,分别达到 8.75、1.52 和 1.02 mg N₂O m⁻² h⁻¹。在生菜生长季追肥后的N₂O排放峰值明显低于生菜播种初期施基肥后的排放峰值。休闲期的观测没有发现N₂O排放的波动。另外在观测期内,偶尔观测到N₂O的吸收现象,其他研究也有类似现象出现^[3,18-19]。CK、FP、OPT 和 OPT+DCD 处理N₂O排放通量范围分别为-0.21—0.56、-0.04—14.26、0.01—

8.13 和 $-0.16 \sim 5.32 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。

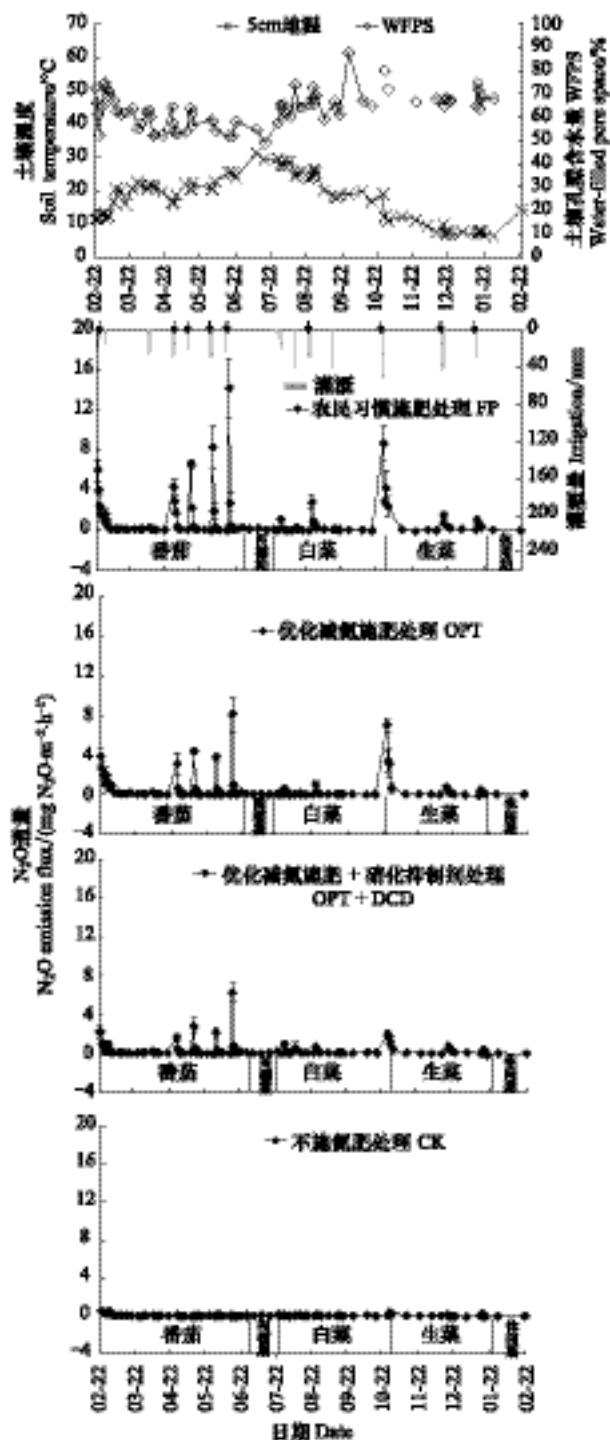


图1 设施蔬菜地 N_2O 排放通量、土壤温度和土壤水分的季节变化规律(箭头为施肥)

Fig. 1 The seasonal variations of N_2O emissions, soil temperature and soil moisture in the tested sites (arrow represents the date of fertilizer application)

CK 不施氮肥处理 Control treatment; FP 农民习惯施肥处理 Farmers' Practice treatment; OPT 减氮优化施肥处理 Optimized fertilization treatment; OPT+DCD 减氮优化施肥+硝化抑制剂处理 Optimized fertilization with nitrification inhibitor treatment

2.2 设施蔬菜地 N_2O 排放的影响因素

(1) 土壤温度 整个观测期土壤温度在 $6.37 \sim 37.11^\circ\text{C}$ 范围内变化。郑循华^[20] 在研究中曾指出硝化作用微生物活动最适宜范围是 $25 \sim 35^\circ\text{C}$; 反硝化微生物所要求的最适宜范围是 $30^\circ\text{C} \sim 67^\circ\text{C}$ 。因此本研究对 $20 \sim 35^\circ\text{C}$ 土壤温度范围内 N_2O 排放通量与5cm深度土壤温度进行偏相关分析, 整个轮作周期内不施氮处理(CK)5cm深度土壤温度与 N_2O 排放通量呈现显著的正相关关系($P < 0.05$), 且不施氮处理农田生态系统 N_2O 排放(F)与地下5cm深度土壤温度(T)呈指数变化关系: $F = 0.009e^{0.043T}$ ($R^2 = 0.09$, $P < 0.05$), 而其他施肥处理5cm深度土壤温度与 N_2O 排放通量之间无明显相关性(表3)。而对施氮处理下番茄、白菜和生菜生长季分别进行分析发现, 在番茄生长季, N_2O 排放通量与5cm深度土壤温度达到了呈现显著负相关关系($P < 0.05$), 可能是由于番茄生长季肥量大, 掩盖了 N_2O 排放对温度的响应。在白菜生长季, 两者之间相关性不显著; 在生菜生长季, N_2O 排放通量与5cm深度土壤温度呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。而对不施氮处理蔬菜生长季 N_2O 排放通量与5cm深度土壤温度的关系均无统计显著性。

(2) 土壤湿度 土壤湿度会影响土壤 N_2O 的产生和向大气中的扩散。土壤孔隙含水率(WFPS)在 $48.88\% \sim 79.88\%$ 范围内变化。由于设施蔬菜地早春番茄种植地膜覆盖的提墒作用、秋冬季棚室温度降低土壤水分蒸发量下降, 加之棚膜覆盖使整个观测期土壤含水量均维持在较高的水平, 灌溉后土壤水分含量略有上升(图1)。通过对各处理 N_2O 排放通量与土壤孔隙含水率进行相关分析发现, 两者之间存在极显著的正相关关系($P < 0.01$)。就农民习惯处理(FP)而言, 高于整个观测期平均值 [$(0.36 \pm 0.02) \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$] 的 N_2O 排放通量中有 77.42% 出现在 WFPS 在 $60\% \sim 75\%$ 的条件下, 其余 22.58% 出现在 WFPS $< 60\%$ 和 WFPS $> 75\%$ 的水分条件下。可以看出, $60\% \sim 75\%$ 的湿度条件有利于 N_2O 的产生和排放。对各处理番茄季、白菜季和生菜季分别进行分析发现, 在番茄季, N_2O 排放通量与 WFPS 呈现显著正相关关系($P < 0.05$); 在白菜季, 两者之间相关性不显著; 在生菜季, N_2O 排放通量与 WFPS 极显著正相关关系($P < 0.01$) (表3)。

表 3 不同处理各个蔬菜生长季N₂O排放通量与土壤温度和湿度的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between N₂O flux and soil temperature and moisture in different treatments during each vegetable growth stage

		处理 Treatments			
	蔬菜生长季 vegetable growth stage	不施氮肥处理 Control (CK)	农民习惯施肥处理 Farmers' Practice (FP)	减氮优化施肥处理 Optimized fertilization (OPT)	减氮优化施肥+ 硝化抑制剂处理 Optimized fertilization with nitrification inhibitor (OPT+DCD)
5 cm 地温	番茄	-0.41 **	-0.36 *	-0.59 **	-0.53 **
5 cm soil temperature	白菜	0.27	0.19	0.28	0.28
	生菜	0.20	0.75 **	0.75 **	0.67 **
土壤孔隙含水率 (WFPS)	全年	0.35 *	0.01	0.00	0.13
	番茄	0.50 *	0.58 *	0.66 **	0.61 **
	白菜	0.04	0.37	0.36	0.28
Water-Filled Pore Space	生菜	0.66 **	0.71 **	0.75 **	0.66 **
	全年	0.46 **	0.49 **	0.48 **	0.41 **

* 和 * * 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著

(3)土壤无机氮 土壤N₂O的排放是由于硝化和反硝化作用引起的。硝化和反硝化作用除了受土壤环境因子影响外,还受底物浓度的制约。本试验土壤表层(20 cm)NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 变化见图 2,整个生长季 NO₃⁻-N 含量要高于 NH₄⁺-N,整个土壤表层(0—20cm)硝态氮的含量范围在 7.77— 269.35mg/kg,铵态氮的含量范围在 0.42—5.36 mg/kg。分析表

明,整个观测期间设施蔬菜地N₂O排放与 NO₃⁻-N 之间的相关系数为 0.049,虽然相关性没有达到显著水平,但是N₂O排放与 NO₃⁻-N 具有比较一致的变化趋势。由于 NO₃⁻-N 是反硝化作用的底物,推测设施蔬菜地N₂O排放主要来自于反硝化过程。本研究中未发现 N₂O 排放与 NH₄⁺-N 含量之间存在直接相关性。可以看出FP处理在番茄生长季和生菜季

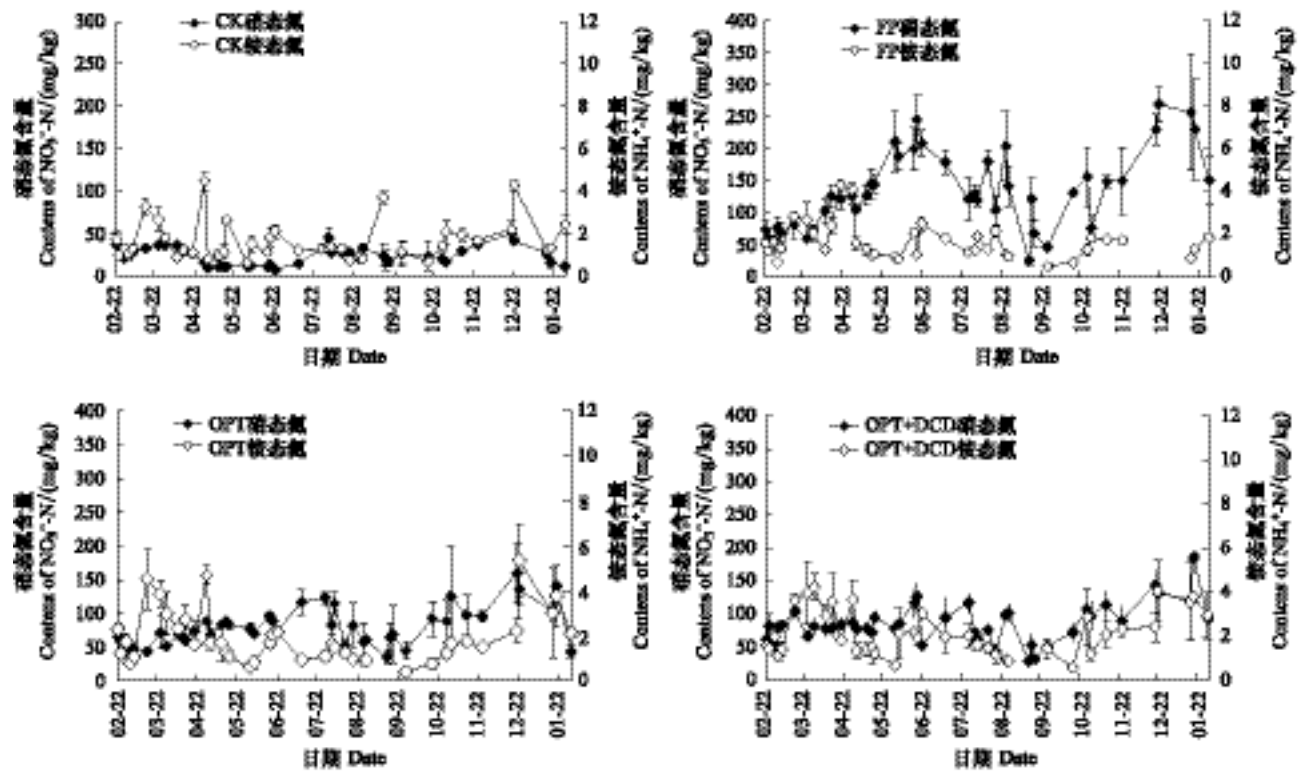


图 2 不同处理表层土壤矿化氮的含量变化

Fig.2 Dynamic changes of the mineral N in 0—20cm soil layer under different treatments

土壤中有明显的硝酸盐积累现象,填闲蔬菜白菜可以减少硝酸盐积累。另外,对于番茄生长季,在2月21日和5月12日施肥时,OPT+DCD处理加入了DCD,从图2可以看出此后的几天内表层土中,OPT+DCD处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量明显高于OPT,可见硝化抑制剂抑制了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 的转化,从而减少反硝化底物 NO_3^- 浓度,减少 N_2O 的排放,这也是两次追肥OPT+DCD处理 N_2O 的排放峰值明显低于OPT处理的原因。

2.3 设施蔬菜地 N_2O 排放总量及排放系数

肥料种类和肥料施用量是影响 N_2O 排放的重要因素^[15,21]。施用氮肥能显著提高 N_2O 的排放,其排放通量随着施氮量的增加而增加^[8]。CK处理 N_2O 年排放总量最低,为 (1.69 ± 0.23) kg N/hm²;FP处理为 (20.66 ± 0.91) kg N/hm²;OPT处理在减少化肥N

60%的情况下, N_2O 年排放总量减少了38.09%;OPT+DCD处理比FP处理减少了61.13%,且达到显著水平($P<0.05$) (表4)。施氮对增加 N_2O 排放总量的影响在不同蔬菜生长期也有所差异,CK处理、FP处理、OPT处理在番茄和白菜生长季差异均达到显著水平,而在生菜生长季FP处理和OPT处理之间 N_2O 排放总量差异不显著($P<0.05$) (图3)。对FP处理不同蔬菜生长季和休闲期 N_2O 排放总量进行分析,番茄生长季 N_2O 排放总量 $((12.53\pm1.52)$ kg N/hm²)占全年 N_2O 排放总量的60.65%,生菜生长季占26.32%,而白菜生长季仅占10%,其余3.03%的排放来自于休闲期。可见,观测期内设施蔬菜地 N_2O 排放量主要来自于番茄和生菜生长期,白菜生长期 N_2O 排放量较少。

表4 不同处理 N_2O 平均排放通量以及周年排放总量

Table 4 The average emission flux and annual cumulative N_2O emissions for each treatment

处理 Treatment	平均排放通量 Average emission fluxes /(mg N_2O m ⁻² h ⁻¹)	排放总量 Total emissions /(kg N/hm ²)	排放系数 Emission factors /%
不施氮肥处理 Control (CK)	0.03±0.00	1.69±0.23d	
农民习惯施肥处理 Farmers' Practice (FP)	0.36±0.02	20.66±0.91a	0.77
减氮优化施肥处理 Optimized fertilization (OPT)	0.23±0.02	12.79±1.33b	0.63
减氮优化施肥+硝化抑制剂处理 Optimized fertilization with nitrification inhibitor (OPT+DCD)	0.14±0.01	8.03±0.37c	0.36

1) N_2O 排放系数:蔬菜生长季内 N_2O -N排放量占投入土壤中氮素的百分比

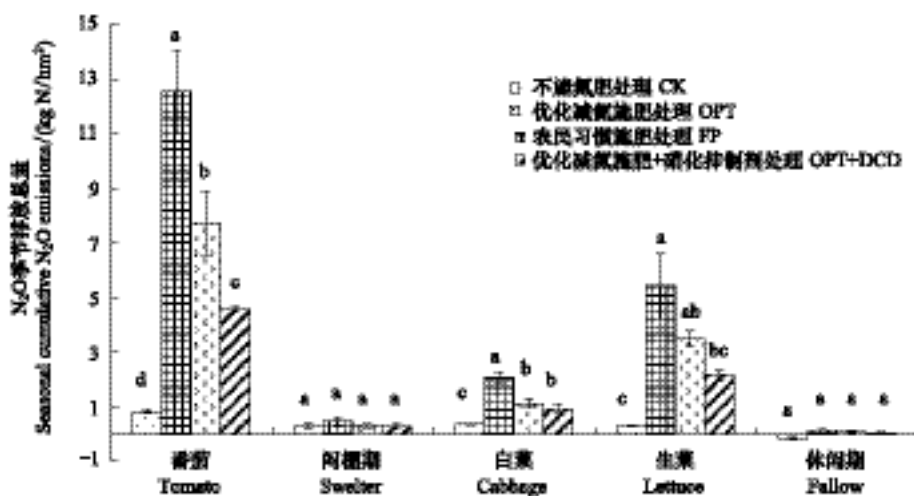


图3 不同施肥方式下不同蔬菜生长季 N_2O 排放总量

Fig.3 The seasonal cumulative N_2O emissions in each treatment

图中不同字母表示同一时期不同处理差异显著($P<0.05$)

IPCC 将同期内由化肥氮施用引起的 N_2O -N 排放量占总施氮量的百分比定义为 N_2O 排放系数,并建

议化肥氮的N₂O-N 排放系数为1%。本研究不同处理之间排放系数介于0.36%—0.77%之间。其中农民习惯施肥处理(FP)在白菜生长季N₂O排放系数为1.44%,高于IPCC 默认的1%,其他处理N₂O排放系数在0.64%—0.77%之间。

3 讨论

(1) 设施蔬菜地N₂O排放特征

本研究对北京郊区典型设施蔬菜地番茄-白菜-生菜一个轮作完整周期内N₂O排放进行了系统观测。相对于粮食作物和露天栽培蔬菜种植系统,设施蔬菜地N₂O排放具有明显的变化特征。其一,设施蔬菜地N₂O平均排放通量较高。从周年观测结果来看,本研究发现农民习惯处理(FP) N₂O平均排放通量为(0.36±0.02) mg N₂O m⁻² h⁻¹,贾俊香^[22]对南京郊区设施蔬菜地高氮肥投入(2341 kg hm⁻² a⁻¹)时N₂O平均排放通量的观测结果高达(1.568±0.10) mg N₂O m⁻² h⁻¹,这些结果远高于于亚军^[23]在成都平原露地蔬菜种植周年观测值(83.8±16.2) μg N₂O m⁻² h⁻¹,这可能与本试验氮肥投入量远高于露天栽培蔬菜(600 kg hm⁻² a⁻¹)有关,表明设施蔬菜地高量频繁的水肥管理措施促进了N₂O的排放。其二,设施蔬菜地N₂O排放呈现峰值短促且峰值高的现象。本研究在整个观测期内N₂O排放高通量均出现在施肥和灌溉同时发生之后的3—5 d,且最高峰值达到14.26 mg N₂O m⁻² h⁻¹,张仲新^[15]在北京郊区设施黄瓜地的研究中排放峰值出现在施肥之后的0—3 d,排放峰值高于邱伟红^[8]在武汉市露天栽培蔬菜种植系统连续2a 观测最高排放通量1.213 mg N₂O m⁻² h⁻¹和1.342 mg N₂O m⁻² h⁻¹;本研究观测结果更是远高于大田作物系统,王立刚^[4]在黄淮海平原地区冬小麦/夏玉米地观测到N₂O排放高峰值433.5 μg N₂O m⁻² h⁻¹和棉花地146.5 μg N₂O m⁻² h⁻¹,张静^[5]在山东小麦地观测到N₂O排放高峰值507.11 μg N₂O m⁻² h⁻¹。可能原因是设施蔬菜地比露天栽培蔬菜和大田作物较好的水热条件,促进了N₂O的排放,同时设施蔬菜地生长期内施肥量较大所致。

(2) 管理措施和环境因子对设施蔬菜地N₂O排放的影响

第一,受设施菜地棚膜的影响,可能促进了N₂O的排放。如张光亚^[24]研究表明设施栽培土壤N₂O排

放通量比露天栽培蔬菜栽培高1.41倍,郑磊^[25]在对紫色土蔬菜地覆膜处理N₂O排放的研究表明覆膜与不覆膜相比全季N₂O排放增加了21%。其次,设施菜地是个相对封闭的环境,降水和风速的影响很小,因此土壤温度是主要影响N₂O排放因素之一。据报道,土温在20—40℃范围内时,N₂O排放量随着温度的升高而增加,主要原因是较高的温度提高了土壤氮素的矿化作用^[19]。本研究中N₂O高排放量集中在水热条件好的春夏季,且N₂O排放量随施氮量的增加而增加;而在秋冬生菜种植季(12月、1月),温度对N₂O排放的影响要大于施氮肥,当土壤温度低于10℃时硝化作用强度降低,导致生菜生长季第2次追肥导致N₂O释放峰值不高。由此可见,气温较高时,施氮量是影响N₂O排放的主导因素;气温较低时,温度则成为限制N₂O排放的主要因素。最后,设施蔬菜地地膜覆盖使春季菜地表层土壤水分改善,土壤水分状况会影响土壤N₂O的产生和向大气中的扩散,局部产生厌氧环境反硝化细菌活性增强^[24],因此土壤含水量成为另一主要影响N₂O排放的因素。有研究表明,小白菜田土壤N₂O排放通量与土壤湿度(介于田间持水量的80%—97%时)呈显著正相关^[8];但是当土壤含水量超过田间持水量时,过高的土壤湿度会阻止N₂O排放的扩散,增加N₂O进一步还原为N₂的几率^[18]。此外,番茄生长季的灌溉(4月7日)对施氮处理的影响大于对不施氮处理的影响,灌溉与施肥同时进行会更有利于N₂O排放,其他研究中也有一致的研究结果^[16]。可见,在设施菜地如果选择合适的施肥时间,尽量避免同时灌溉或者改变灌溉方式,这可能是一种最直接而且简单有效的减排方法。

(3) 设施蔬菜地N₂O排放总量

有研究表明,设施蔬菜地单季施氮处理N₂O积累排放量在1.1—15.9 kg N/hm²之间,N₂O排放系数在0.03—1.2之间^[8,15,18,26,27]。本研究中各处理N₂O排放系数介于0.36%—0.77%,可能由于CK处理即背景N₂O年排放总量为(1.69±0.23) kg N/hm²,高于一般蔬菜地观测到的N₂O背景排放量0.48 kg N/hm²^[8]。本研究中OPT处理在FP处理基础上化肥减少了60%,N₂O排放总量减少了38.09%,但是3季蔬菜产量均没有显著性差异($P>0.05$)(图4),这表明在现行的农民习惯施肥处理下,具有一定的减氮潜力。在不同蔬菜生长季与FP处理相比,OPT处理

N_2O 排放强度均差异显著($P>0.05$) (图 5), 在形成单位蔬菜产量时, 减氮优化施肥处理能够减少 N_2O 排放。同时, 施肥时添加硝化抑制剂也是在保证产量的前提下减少设施蔬菜地 N_2O 排放的一项有效措施。硝化抑制剂通过抑制硝化反应来减少 NO_3^- -N 的积累, 使氮肥长时间保持 NH_4^+ 形式供作物吸收利用, 从而减少硝化过程中 N_2O 的排放^[28]。番茄生长季 OPT+DCD 处理 N_2O 排放总量较 FP 处理减少了 63.45%。对于不同蔬菜生长季而言, 番茄生长季 N_2O 排放总量最多, 而生菜生长季 N_2O 排放强度最大, 因此减排重点不仅在于施肥量较大的番茄生长季, 而且应当对秋冬生菜生长季 N_2O 排放进行调控。设施蔬菜地棚膜与地膜的覆盖使其处于封闭或者半封闭状态, 其中释放的 N_2O 并不能完全排放到大气中, 部分肥料氮可能通过氨气挥发后的大气沉降回地表增加 N_2O 产生的氮源, 也有可能因为地膜覆盖增

加 N_2O 在土壤中的滞留时间最终被还原为 N_2 ^[29]。因此设施蔬菜地生态系统 N_2O 排放及其对全球 N_2O 排放的贡献仍需要进一步的研究。

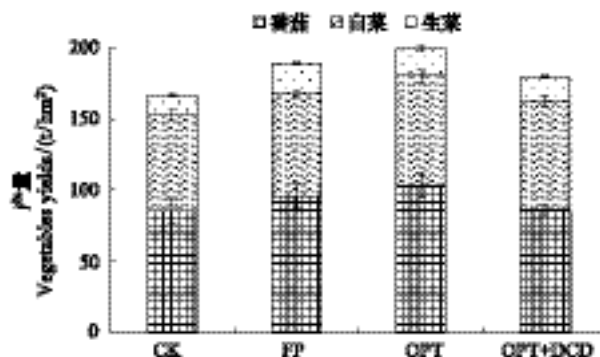


图 4 不同施肥方式下蔬菜产量

Fig.4 Vegetables yields in different treatments

CK 不施氮肥处理 Control treatment; FP 农民习惯施肥处理 Farmers' Practice treatment; OPT 减氮优化施肥处理 Optimized fertilization treatment; OPT+DCD 减氮优化施肥+硝化抑制剂处理 Optimized fertilization with nitrification inhibitor treatment

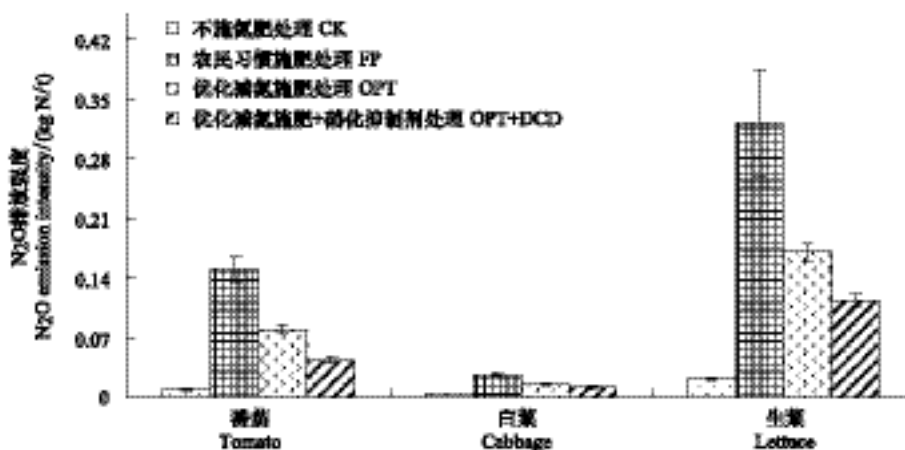


图 5 不同蔬菜生长季 N_2O 排放强度

Fig.5 N_2O emission intensity in different vegetable stages

1) N_2O 排放强度: 是指形成单位经济产量 N_2O 的排放量; 2) 图中不同字母表示同一时期不同处理差异显著($P<0.05$)

4 结论

(1) 整个观测期内设施菜地 N_2O 排放峰出现在施肥+灌溉的事件后, 一般持续 3—5 d。在有机肥和化肥同时施入时, N_2O 排放峰持续时间较长 (13 d)。蔬菜不同生育期对养分的吸收与水肥的供应会影响 N_2O 排放峰值的持续时间, 最终影响 N_2O 年排放总量。

(2) 土壤温度、土壤湿度和土壤无机态氮都会影响 N_2O 排放, 但在蔬菜不同生长季节主要控制因子不

同。整个蔬菜生长季 N_2O 排放与土壤孔隙含水率 (WFPS) 表现出极显著的正相关关系 ($P<0.01$); 不施氮处理 (CK) 5 cm 深度土壤温度与 N_2O 排放通量呈现显著的正相关关系 ($P<0.05$)。各施氮处理土壤温度与春夏番茄生长季 N_2O 排放呈现极显著负相关 ($P<0.01$), 与冬季生菜生长季 N_2O 排放呈现显著正相关 ($P<0.05$), 但与白菜生长季相关性不显著。灌溉与施肥同时进行更有利于 N_2O 的产生和排放。

(3) 从排放总量来看, 不同处理 N_2O 年排放总量介于 1.69—20.66 kg N/hm² 之间, 排放系数介于

0.36%—0.77%之间。与农民习惯处理(FP)相比,减氮优化施肥(OPT)、减氮优化施肥加硝化抑制剂处理(OPT+DCD)均能显著降低设施蔬菜地 N_2O 排放。说明合理减少施氮量和添加硝化抑制剂是降低设施菜地 N_2O 排放量的有效途径。

References:

- [1] IPCC. 2007. Summary for Policymakers//Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, Linden P J, Hanson C E. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press. 7-22.
- [2] Kroeze C, Mosier A, Bouwman L. Closing the global N_2O budget: A retrospective analysis 1500—1994. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(1): 1-8.
- [3] Yao Z S, Zheng X H, Zhou Z X, Xie B H, Mei B L, Gu J X, Wang D Y. Nitrous oxide emission from winter wheat and vegetable fields in the Taihu region: a comparison case study. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(6): 691-701.
- [4] Wang L G, Li H, Qiu J J. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop fields in Huang-Huai-Hai Plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(4): 1248-1254.
- [5] Zhang J, Li H, Wang L G, Qiu J J. Analysis of the characteristics of nitrous oxide emissions from a winter wheat-green onion rotation system and the influencing factors. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8): 1639-1646.
- [6] Zheng J C, Zhang Y F, Chen L G, Wang Z C. Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(19): 6138-6146.
- [7] Qin Y M, Guo Y Q, Gao Z L, Zhang L. A summary of field studies on N_2O measurements in Chinese croplands during 1990—2008. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2608-2613.
- [8] Qiu W H, Liu J S, Hu C X, Zhao C S, Sun X C, Tan Q L. Effects of nitrogen application rates on nitrous oxide emission from a typical intensive vegetable cropping system. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2238-2243.
- [9] Ding H, Wang Y S, Xiang H Y, Li W H. Denitrification loss and N_2O emission from nitrogen fertilizer applied to vegetable field. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(6): 762-766.
- [10] Lu C A, Hu W L, Kong L M, Xia T Y, Duan Z Y. NO and NO_2 emissions from intensive vegetable field of Dianchi watershed. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 900-906.
- [11] Zheng X H, Han S H, Huang Y, Wang Y S, Wang M X. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N_2O emission from Chinese croplands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2), GB2018, doi: 10.1029/2003GB002167.
- [12] Ju X T, Kou C L, Christie P, Dou Z X, Zhang F S. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*, 2007, 145(2): 497-506.
- [13] Du L F, Wu Q, Zhao T K, Liu J P, An Z Z, Liu B C, Zhang D X. Investigation of fertilizer application in different farmlands in suburbs of Beijing. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2009, (3): 75-78.
- [14] Cai W T, Chen F, Cui Y H, Lei J, Huai H J. Effects of different cropping systems on soil inorganic nitrogen accumulation—a case study in Tongzhou District, Beijing. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1260-1265.
- [15] Zhang Z X, Li Y E, Hua L, Wan Y F, Jiang N N. Effects of different fertilizer levels on N_2O flux from protected vegetable land. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(5): 269-275.
- [16] Hao X Y, Gao W, Wang Y J, Jin J Y, Huang S W, Tang J W, Zhang Z Q. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on N_2O emission from greenhouse vegetable soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1073-1085.
- [17] Bai X, Xia Z W, Guo Y L, Zhang Y, Xu H, Wang Z Y. Effects of nitrification inhibitors on N_2O emission from different upland agricultural soils. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2319-2329.
- [18] Chen H Y, Li H, Wang L G, Qiu J J. Characteristics and influencing factors on nitrous oxide emissions from typical greenhouse vegetable fields in Beijing suburbs. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2012, (5): 5-10.
- [19] Chapuis-Lydie L, Wrage N, Metay A, Chotte J L, Bernoux M. Soils, a sink for N_2O ? A review. *Global Change Biology*, 2007, 13(1): 1-17.
- [20] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, Shen R X, Zhang W, Gong Y B. Impacts of temperature on N_2O production and emission. *Environmental Science*, 1997, 18(5): 1-5.
- [21] Xiang H Y, Zhu B, Kuang F H, Li K, Wang Y Y, Zheng X H. Effects of nitrogen fertilizer application on N_2O emission in a purple soil and maize root system. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(3): 413-420.
- [22] Jia J X, Zhang M, Xiong Z Q, Li Y. N_2O emission from an intensively managed greenhouse vegetable field in Nanjing suburb, Jiangsu Province of East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 739-744.
- [23] Yu Y J, Zhu B, Jing G J. N_2O emission from soil-vegetable system and impact factors in Chengdu Plain of Sichuan Basin. *China Environmental Science*, 2008, 28(4): 313-318.
- [24] Zhang G Y, Fang B S, Min H, Chen M C. N_2O fluxes from greenhouse soil and its influence factors. *Journal of Agro-*

- Environment Science, 2004, 23(1): 144-147.
- [25] Zheng L, Jiang C S, Sun L J, Liu C, Ran S D, Huang H, Qiu X K. Effects of plastic film mulching on the environmental factors and nitrous oxide emissions in purple soil of vegetable fields. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(30): 82-87.
- [26] Cao B, He F Y, Xu Q M, Yin B, Cai G X. Denitrification losses and N_2O emissions from nitrogen fertilizer applied to a vegetable field. Pedosphere, 2006, 16(3): 390-397.
- [27] He F F, Jiang R F, Chen Q. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China. Environmental Pollution, 2009, 157(5): 1667-1672.
- [28] Zhang Y, Xu H, Xia Z W, Guo Y L. Effects of nitrification inhibitors DCD and DMPP on cinnamon soil's gross nitrogen mineralization and nitrification rates. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 166-172.
- [29] Cao B, He F Y, Xu Q M, Yin B, Cai G X. Gaseous losses from a fertilizers applied to a tomato field in Nanjing suburbs. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 62-68.
- 参考文献:**
- [3] 姚志生, 郑循华, 周再兴, 谢宝华, 梅宝玲, 顾江新, 王定勇. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N_2O 排放对比观测研究. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 691-701.
- [4] 王立刚, 李虎, 邱建军. 黄淮海平原典型农田土壤 N_2O 的排放特征. 中国农业科学, 2008, 41(4): 1248-1254.
- [5] 张静, 李虎, 王立刚, 邱建军. 冬小麦/大葱轮作体系 N_2O 排放特征及影响因素研究. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1639-1646.
- [6] 郑建初, 张岳芳, 陈留根, 王子臣. 稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响. 生态学报, 2012, 32(19): 6138-6146.
- [7] 秦艳梅, 过燕琴, 高志亮, 张令. 中国农田 N_2O 排放通量原位观测研究的汇总分析. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2608-2613.
- [8] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 赵长盛, 孙学成, 谭启玲. 不同施氮水平对菜地土壤 N_2O 排放的影响. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2238-2243.
- [9] 丁洪, 王跃思, 项虹艳, 李卫华. 菜田氮素反硝化损失与 N_2O 排放的定量评价. 园艺学报, 2004, 31(6): 762-766.
- [10] 卢昌艾, 胡万里, 孔令明, 夏体渊, 段宗颜. 滇池流域集约化菜田 NO 与 NO_2 排放的研究. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 900-906.
- [13] 杜连凤, 吴琼, 赵同科, 刘继培, 安志装, 刘宝存, 张东兴. 北京市郊典型农田施肥研究与分析. 中国土壤与肥料, 2009, (3): 75-78.
- [14] 蔡万涛, 陈阜, 崔永恒, 雷杰, 淮贺举. 不同种植模式对土壤矿质氮累积量的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1260-1265.
- [15] 张仲新, 李玉娥, 华璐, 万云帆, 姜宁宁. 不同施肥量对设施菜地 N_2O 排放通量的影响. 农业工程学报, 2010, 26(5): 269-275.
- [16] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 金继运, 黄绍文, 唐继伟, 张志强. 有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1073-1085.
- [17] 白雪, 夏宗伟, 郭彦玲, 张颖, 徐慧, 王振宇. 硝化抑制剂对不同旱地农田土壤 N_2O 排放的影响. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2319-2329.
- [18] 陈海燕, 李虎, 王立刚, 邱建军. 京郊典型设施蔬菜地 N_2O 排放规律及影响因素研究. 中国土壤与肥料, 2012, (5): 5-10.
- [20] 郑循华, 王明星, 王跃思, 沈壬兴, 张文, 龚晏邦. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响. 环境科学, 1997, 18(5): 1-5.
- [21] 项虹艳, 朱波, 况福虹, 李侃, 王玉英, 郑循华. 氮肥施用对紫色土-玉米根系系统 N_2O 排放的影响. 环境科学学报, 2007, 27(3): 413-420.
- [22] 贾俊香, 张曼, 熊正琴, 李叶. 南京市郊区集约化大棚蔬菜地 N_2O 的排放. 应用生态学报, 2012, 23(3): 739-744.
- [23] 于亚军, 朱波, 荆光军. 成都平原土壤-蔬菜系统 N_2O 排放特征. 中国环境科学, 2008, 28(4): 313-318.
- [24] 张光亚, 方柏山, 闵航, 陈美慈. 设施栽培土壤氧化亚氮排放及其影响因素的研究. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 144-147.
- [25] 郑磊, 江长胜, 孙丽娟, 刘聪, 冉思丹, 黄欢, 邱昕凯. 地膜覆盖对菜园紫色土壤环境因子及 N_2O 排放的影响. 中国农学通报, 2011, 27(30): 82-87.
- [28] 章燕, 徐慧, 夏宗伟, 郭彦玲. 硝化抑制剂 DCD、DMPP 对褐土氮总矿化速率和硝化速率的影响. 应用生态学报, 2012, 23(1): 166-172.
- [29] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 尹斌, 蔡贵信. 南京郊区番茄地中氮肥的气态氮损失. 土壤学报, 2006, 43(1): 62-68.