植物营养与肥料学报 2011,17(4):942 -948
Plant Nutrition and Fertilizer Science

保护地土壤 N_2O 排放通量特征研究

武其甫[1],武雪萍[1,2*],李银坤[1],吴会军[1,2],闫 鹏[3],张彦才[4],
李若楠[4],王丽英[4],王小彬[1,2],蔡典雄[1,2]
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部植物营养与肥料重点开放实验室,北京 100081;
2 农业部旱作节水农业重点开放实验室,北京 100081;3 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;
4 河北省农林科学院农业资源与环境研究所,河北石家庄 0500514)

摘要:为研究保护地土壤 N_2O 排放通量特征,于 2009 年 8 ~ 12 月,在河北辛集不施氮(N_0)、当地习惯施氮(N_{900})及减量施氮(N_{675})处理下的秋冬季番茄保护地土壤上使用静态箱采集、气相色谱仪检测的方法测定了土壤 N_2O 排放通量。得到以下研究结果:灌溉施肥后,各处理 N_2O 平均排放通量与表层土壤硝态氮含量呈极显著正相关关系。灌溉施肥后 7 d 内是施氮处理土壤 N_2O 主要排放期,其排放量占当季总排放量的 55.9% ~ 59.8%;高峰值一般出现在第 3 ~ 5 d,此时的土壤含水量对硝化、反硝化作用都较适宜。8 ~ 10 月份由于温度较高,N_2O 排放通量明显高于较冷的 11 ~ 12 月。8 ~ 10 月份施氮是影响保护地土壤 N_2O 排放的主导因素,减少施氮量显著降低了 N_2O 排放量;之后温度是主导因素,此时 N_2O 排放量受追施氮量的影响较小。经估算,保护地秋冬季番茄不同施氮处理 N_2O 总排放量的大小顺序为 N_{900}(N 5.304 kg/hm^2) > N_{675}(N 3.616 kg/hm^2) > N_0(N 0.563 kg/hm^2),差异显著,N_{675} 比 N_{900} 处理降低了 31.8% 的 N_2O 排放量;N_{675} 和 N_{900} 处理的 N_2O 排放系数分别为 0.45 和 0.53。

关键词:N_2O;保护地菜地土壤;氮肥;灌溉
中图分类号:S153.6.+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008 -505X(2011)04 -0942 -07

Studies on the fluxes of nitrous oxide from greenhouse vegetable soil

WU Qi-fu[1], WU Xue-ping[1,2*], LI Yin-kun[1], WU Hui-jun[1,2], YAN Peng[3], ZHANG Yan-cai[4],
LI Ruo-nan[4], WANG Li-ying[4], WANG Xiao-bin[1,2], CAI Dian-xiong[1,2]
(*1 Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, CAAS/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, MOA, Beijing 100081, China; 2 Key Laboratory of Dryland Farming and Water-saving Agriculture, MOA, 100081, China; 3 College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4 Institute of Agricultural Resource and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China*)

Abstract: This study was conducted to determine the effect of different N fertilization rates on N_2O emissions from a loamy fluvo-aquic soil in North China Plain in 2009. Fluxes of N_2O were measured on greenhouse cropped with tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) with split application of 675 or 900 kg/ha N from Aug 7th to Dec 25th. An unfertilized plot planted with tomatoes as control was also set up. The results indicated that total emission increased with the N application rate. The mean N_2O emission rate from the differently management plots was closely correlated to the mean soil nitrate content in surface soil after topdressing (R^2 = 0.810). The peak of N_2O emission generally occurred within 3 -5 days after N application, and more than 50 percent of total N_2O emissions occurred over the first 7 days after fertilization. The N emission from the unfertilized treatment was N 0.56 kg/ha. Total N_2O emission from the fertilized crops for the low and the conventional rates of N fertilization were N 3.616 and 5.304 kg/ha, respectively. The high N_2O emissions from greenhouse tomatoes plots were due to high N_2O losses from the fertilized treatments during the summer and early autumn (Aug, Sept and Oct) and high soil nitrate contents after

收稿日期:2010 -11 -11　　**接受日期**:2011 -03 -24
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划,2007CB109305)项目资助。
作者简介:武其甫(1984—),男,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研究生,主要从事温室菜地减施增效研究。E-mail:qifu5@163.com
* 通讯作者 Tel:010 -82108665, E-mail:xpwu@caas.ac.cn

the N application. The reduction of N fertilization resulted in decreased N_2O emissions during the warmly period. However, the emissions during the winter were not affected by the rate of N fertilization. The results show that the N application management in greenhouse had a great influence on the N_2O emissions. It also affected the emissions per unit N fertilizer applied (low and the conventional rates of N fertilization were 0.45 and 0.53).

Key words: N_2O emission; greenhouse vegetable soil; nitrogen fertilizer; irrigation

氧化亚氮(N_2O)既会产生温室效应又会破坏平流层臭氧。据估计,农业活动大约占人类活动造成 N_2O 气体总排放量的 90%[1]。从 1970 ~ 2008 年,中国的化肥用量增加了 25 倍[2],化学氮肥投入的增加又是农田 N_2O 排放增加的重要原因。据农业部环境保护科研监测所测算,1990 年中国农用氮肥 N_2O 排放量的范围值为 0.001 ~ 1.21 Tg N_2O -N (利用高、中、低 3 个方案估算结果的汇总,1 Tg = 10^{12} g),并预测到 2020 年我国农用氮肥 N_2O 排放量将是 1990 年的 3.27 ~ 5.32 倍[3]。中国是蔬菜生产大国,2008 年设施(包括西甜瓜)栽培面积已经达到 335×10^4 公顷[4]。随着农业产业结构的调整,许多粮田逐步改为菜地。蔬菜地施氮量高,将导致 N_2O 排放问题越来越突出[5]。目前,我国蔬菜种植过程中过量施用氮肥十分普遍[6-7],施用量远远超过全国耕地平均水平[6-8]。另外,土壤含水量变化对 N_2O 排放也有重要影响[9]。菜地频繁而大量的灌溉也为 N_2O 排放创造了有利条件。但是,目前有关土壤 N_2O 排放的研究多集中在大田或露天菜地上,少有对保护地土壤 N_2O 排放的研究; 也缺乏长期监测环境因素对其影响的研究。为此,本研究通过设置不同的施氮处理和较高取样频率[10],采用静态箱采集气体,气相色谱法测定,对华北平原典型蔬菜种植系统保护地的 N_2O 排放通量进行监测,并结合监测环境因素,以分析不同施肥模式下保护地土壤 N_2O 排放的基本规律和影响因素,探讨减氮措施对减少 N_2O 排放的效果,为氮肥的合理施用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验在河北省石家庄辛集市(E115°30′、N37°78′)已种植蔬菜 3 年的温室进行。该温室东西走向,后墙、顶部及前部均有通风口,白天适时敞开通风,夜间和有降水时关闭; 前茬作物为黄瓜。供试土壤为壤质潮土,0—20 cm 土壤基本性状为: 有机质含量 15.4 g/kg、全氮 1.55 g/kg、碱解氮 63.5 mg/kg、有效磷(P) 14.2 mg/kg、速效钾(K) 137.2 mg/kg、土壤容重 1.35 g/cm^3、pH 7.6、田间持水量 23.7%。

试验设 3 个处理,分别为: 不施氮对照(N_0); 当地习惯施氮量,即施 N 900 kg/hm^2[11] (N_{900}); 减施氮处理,施 N 675 kg/hm^2 (N_{675}),每处理 3 次重复。小区面积 1.8 m × 6.0 m,试验前用 3 mm 厚,埋深 100 cm 的 PVC 板隔离各小区。小区种植番茄 3 行,行距 60 cm,株距 30 cm。按照当地习惯,灌溉量总共为 207 mm,采用沟灌方式,每行番茄使用一条灌水沟; 各处理磷、钾肥用量相同,分别为过磷酸钙(含 P_2O_5 16%,含水分 12%) 225 kg/hm^2,硫酸钾(含 K_2O 50%) 450 kg/hm^2。磷肥 100%,钾肥 40% 作基肥,剩余分为 4 次随水追施。施氮处理所用氮肥为尿素(含 N 46%),20% 作基肥于 8 月 7 日施入,2 d 后移栽并灌定植水; 剩余尿素根据番茄生长期养分需求和天气状况分 4 次随浇水追施(用量分配比例为 7:7:7:3); 另外在第 1 次追肥后第 22 d (10 月 10 日)各处理灌溉清水 1 次,详细灌溉施肥时间及用量见表 1。

表 1　保护地番茄季灌溉量及施氮量

Table 1　N input rates and irrigation rates in greenhouse tomato experiment

日期 Date	灌溉量 Irrigation (mm)	施氮量 N rate (N kg/hm^2)	
		N_{675}	N_{900}
2009-08-07	0	135	180
2009-08-09	45	0	0
2009-09-18	36	157.5	210
2009-10-10	27	0	0
2009-10-16	36	157.5	210
2009-11-06	36	157.5	210
2009-11-25	27	67.5	90
总量 Total	207	675	900

1.2　采样与测定方法

N_2O 气体采集用静态箱法。取样箱为圆柱形透明有机玻璃罐,另有配套底座可插入土中,露出土面部分有与采样箱匹配的圆形凹槽。考虑到灌

溉沟和沟间垅上 N_2O 排放可能存在差异[12-14]，在每个重复小区灌溉沟内和垅上各选取样点1个，取样前将底座下部嵌入地下5 cm左右，往圆形凹槽灌注蒸馏水，静置约30 min，减少人为活动对测定区域的扰动。取样在10：00左右开始，采气时将采样箱扣在底座凹槽内，检查气密性，确认没有漏气现象后开始计时。迅速分别于0、20、40、60 min用带刻度注射器混匀后采集静态箱内气体于气袋中（大连德霖气体包装有限公司出品Tedlar材料气样袋）。同一小区内灌溉沟和垅上2个样点的气体混合在1个气袋内作为1个重复，每个点各取100 mL气体，并记录取样时的箱内温度以及取样前后的大气气压。每次取样结束后在接近正午时再监测棚外、棚内气温及5 cm深度土壤温度。每次施肥后1、3、5、7、10 d和施肥前1 d固定取样；若2次施肥间隔较长，则在其间增加取样。2次施肥间取样箱底座固定在1个位置，但是为避免影响到水肥的均匀分布，灌溉施肥时会将取样箱连同底座移出试验小区。由于底座嵌入地下5 cm，移出时会不可避免的破坏土表结构，故灌溉施肥结束后重新安装取样箱时会另选1个与之前取样点田间状况相近的点。将试验地抽取的气体样品于实验室使用安捷伦7890 Ⅱ型气相色谱仪分析。测定条件：前置柱和分析柱为不锈钢填充柱，内径为2 mm×1 mm，内填80/100目porapak Q；柱温55℃，ECD检测器温度330℃；用高纯氮气作载气（流速30 mL/min，北京京高气体有限公司），校准用 N_2O 标准气体购自国家标准物质中心。

土壤样品的采集：每次追肥后第3 d在取样箱附近采集表层0—10 cm土样，一部分烘干法测定含水量，剩余土样用2 mol/L氯化钾浸提，Smaretchem全自动智能分析仪（美国产）测定硝态氮、铵态氮含量。常规方法测定土壤其它基本理化性状。

1.3 计算公式

N_2O 通量指单位时间单位面积观测箱内该气体的质量变化，用公式表示为：

$$F = H \times (28/22.4) \times [273/(T + 273)] \times (\Delta c/\Delta t) \times 60 \times 10^3$$

式中：F为 N_2O 排放通量[N，μg/(m²·h)]；H为观测箱高度(m)；28为每mol N_2O 分子中纯N的质量数(g/mol)；22.4为标准规状态下气体摩尔体积(L/mol)；T是取样过程中静态箱内平均温度(℃)；c为仪器测得的 N_2O 气体浓度(10^{-6}mol/mol)；t为闭箱时间(min)；$\Delta c/\Delta t$ 是静态箱内气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率[$\times 10^{-6}$ mol/(mol·min)]。

N_2O 排放系数(%) = [(施氮处理 N_2O 排放量 - 不施氮处理 N_2O 排放量)/施氮量] × 100

N_2O 排放通量用同1个处理3个重复的算数平均值表示（少数取样日因天气原因只取2个重复，如11月8日开始的暴雪导致覆盖大棚的保温被无法拉起，只能在手持光源下采集各处理2个重复的样品，以保证取样时间的一致性），整个番茄生长季的 N_2O 排放总量采用插值法估算。多重比较用最小显著差异法（LSD）进行，Pearson相关性分析，统计软件为SPSS 13.0。

2 结果与分析

2.1 保护地不同施氮量下 N_2O 排放通量的动态变化

每个取样日接近正午时温度动态变化（图1）显示，棚外、棚内气温变幅较大，分别为-2.5～33.0℃和8.2～37.5℃；而5 cm深度土壤温度变化幅度较小（11.3～27.5℃），这有利于番茄根系的健康生长。从整个生长季来看，温度变化基本可划分为2个阶段：11月份之前（以11月7日为分界线）棚外、棚内气温及5 cm深度土壤温度均相对较高，分别为17.9～33.0℃、21.3～37.5℃和16.6～27.5℃，平均值分别为24.8℃、30.8℃和22.2℃；之后相对较低，分别为-2.5～13.9℃、8.2～28.5℃和11.3～17.8℃，平均值分别为3.6℃、14.7℃和13.7℃。

番茄全生长期各处理 N_2O 排放通量波动较大，但变化趋势基本一致。N_0、N_{675} 和 N_{900} 处理的 N_2O 排放通量变化范围分别为1.4～53.5、12.7～580.5和15.7～849.5 μg/(m²·h)。图1中5个向下箭头为5次施肥时间，从中看出，N_0 处理的 N_2O 排放通量始终处于较低水平，每次灌溉后排放量都略有提高，但上升幅度很小。施氮处理施用基肥（8月7日）到灌溉定植水（8月9日）之间 N_2O 排放通量变化不大，移栽灌定植水后及4次灌溉追肥后 N_2O 排放通量均呈现迅速上升趋势，且排放通量变化曲线为单峰型。排放主要集中在灌溉施肥后7 d内，峰值一般出现在第3～5 d（只有第3次灌溉追肥后最高值在第1 d出现），10 d后施氮处理排放通量降低到接近不施氮处理水平。处理 N_{675} 和 N_{900} 在5次施用氮肥后7 d内（共35 d）的排放量分别占整个番茄季（141 d）总排放量的56.5%和60.5%。与温度时间变化趋势类似，8～10月份 N_2O 排放通量较高，N_{900} 处理3次通量峰值

为 833.6、753.9 和 849.5 μg/(m² · h); 而进入 11 月份之后的 2 次峰值仅为 417.8 和 397.2 μg/(m² · h)。8 ～ 10 月份 N_{675} 处理的峰值明显低于 N_{900} 处理,3 次峰值差值分别为 435.8、426.5 和 269.0 μg/(m² · h); 但 11 月份之后处理间峰值差别很小,分别为 77.8 和 76.6 μg/(m² · h)。

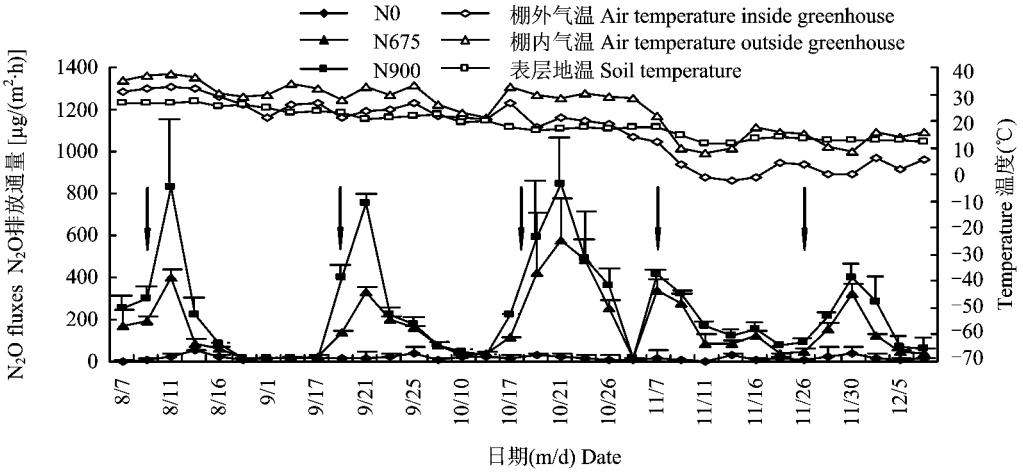

图 1　保护地全生长期不同施氮处理 N_2O 排放通量及棚内外气温和土温动态变化

Fig. 1　Variation of N_2O fluxes during consecutive growing seasons for different N treatments, and air temperature inside and outside greenhouse and soil temperature

[注(Note): 箭头表示施肥日期 Arrows indicate the date of fertilization]

2.2　保护地表层土壤无机氮含量及土壤含水量与 N_2O 排放的关系

表层土壤连年耕作,根茬残留多,富含有机物和无机氮,N_2O 的释放主要集中在表层 10 cm 土壤[15],故本试验采集各处理表层 10 cm 土壤测定无机氮含量并研究其对 N_2O 排放的影响。表 2 看出,施氮处理土壤硝态氮含量范围为 191.1 ～ 502.5 mg/kg,远远高于不施氮处理(17.6 ～ 41.9 mg/kg),且前 2 次追肥后施氮处理都比后 2 次追肥高; 而且 N_{675} 比 N_{900} 处理低 12.6% ～ 29.4%。各处理土壤 N_2O 通量平均值与当日所取表层土壤硝态氮含量之间有极显著正相关关系(R^2 = 0.810)。施氮处理土壤铵态氮含量始终比硝态氮含量低,范围仅为 15.0 ～ 57.1 mg/kg,与 N_2O 通量之间也没有显著相关性。表 2 还看出,灌溉施肥后第 3 d,土壤重量含水量基本都处于 21.5%(田间持水量的 90.7%)左右,只有最后 1 次升高大约 1 个百分点; 且同一次灌溉施肥后不同施氮量处理间的含水量差异不大。

表 2　保护地 4 次追施氮肥后各施氮处理表层土壤硝态氮和铵态氮含量及含水量

Table 2　Comparison of soil nitrate and ammonium nitrogen content and moisture content in surface soil for different N treatments in greenhouse at four times after N-application to soil

项目 Item	处理 Treatment	追肥次数 Topdressing times			
		1st	2nd	3rd	4th
NO_3^- -N	N_0	41.9 b	26.9 b	24.3 c	17.6 b
(mg/kg)	N_{675}	439.4 a	250.3 a	191.1 b	207.4 a
	N_{900}	502.5 a	331.6 a	270.6 a	237.3 a
NH_4^+ -N	N_0	11.4 c	7.8 b	15.3 b	13.6 a
(mg/kg)	N_{675}	39.8 b	24.8 a	16.8 a	18.0 a
	N_{900}	57.1 a	21.8 a	17.1 a	15.0 a
土壤重量含水量	N_0	21.7	20.8	21.0	22.4
Water content of soil by weight	N_{675}	21.1	21.9	21.3	22.3
(%)	N_{900}	21.8	21.4	21.0	22.5

注(Note): 数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters among treatment mean significant at 5% level.

2.3 保护地不同施氮量下 N_2O 总排放量

N_0 处理的 N_2O 排放背景值较低，N_{675} 和 N_{900} 处理分别是 N_0 的 9.4 和 6.4 倍。经 LSD 统计检验，3 个处理间 N_2O 总排放量差异达显著水平。整个番茄生长季，N_{675} 比 N_{900} 处理的 N_2O 排放量降低了 31.8%；处理 N_{675} 和 N_{900} 的 N_2O 排放量占当季施用氮肥量的比例，即 N_2O 排放系数分别为 0.45 和 0.53（表 3）。

表 3 保护地各处理土壤 N_2O 排放总量和氮肥 N_2O 排放系数

Table 3 Cumulative N_2O emission and N_2O emission factor under different N treatments

处理 Treatment	N_2O 损失量 Cumulative N_2O emission ($N\ kg/hm^2$)	氮肥 N_2O 排放系数 N_2O emission factor of total applied N (%)
N_0	0.563 c	—
N_{675}	3.616 b	0.45
N_{900}	5.304 a	0.53

注(Note)：数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters among treatment mean significant at 5% level.

3 讨论

3.1 环境因素对保护地土壤 N_2O 排放的影响

影响土壤 N_2O 排放的环境因素包括气温、降水及风速等。然而，保护地大棚内是个相对封闭的环境，所以降水和风速的影响很小，气温的变化才是主要影响因素。据报道，当土温在 20～40℃ 范围内时，N_2O 排放量随着温度的升高而增加[16]，主要原因是较高的温度提高了土壤氮素的矿化作用[17]。本研究保护地土壤在气温较高的时期（8～10 月）N_2O 排放量大，习惯与减量施氮处理间差异显著；气温较低时（11 月、12 月），不但表层土壤硝态氮含量低于气温较高的时期，2 个施氮处理排放量也锐减，且 2 处理之间的差异也明显变小。这与土壤温度低于 15℃ 时硝化作用强度降低有关。由此可见，本研究条件下，气温较高时，施氮量是影响 N_2O 排放的主导因素，随着施氮量的增加会导致 N_2O 排放量的增加；气温较低时，温度变成了影响 N_2O 排放强度的决定因素，其对 N_2O 排放的影响远远大于施氮肥，此时增加氮肥投入并没有显著提高 N_2O 排放量，这与 Ruser 等[13]，梁国庆等[18]试验结果完全一致。另外，11 月 8 日开始的一股强冷空气使当地气温下降超过 10℃（图 1），并带来持续 3 d 的降雪，1 周后温度才有所回升，这次剧烈降温是第 3 次灌溉施肥后第 3～5 d 没有明显 N_2O 排放高峰出现的原因。

3.2 施用氮肥和灌溉对保护地土壤 N_2O 排放的影响

农业生产中，氮肥过量施用是引起 N_2O 释放增加的主要原因[18-21]。本试验中，表层土壤硝态氮含量随施氮量增加而增加，且与 N_2O 排放通量呈极显著正相关关系；由于土壤样品是在施肥后第 3 d 取的，显然施肥量不同是硝态氮含量差异的直接原因。N_{675} 和 N_{900} 的 N_2O 总排放量均远远高于不施氮肥处理，而 N_{675} 比 N_{900} 处理显著降低了 N_2O 排放量，这与其他地区蔬菜地的研究结果类似[10, 19, 22-27]。可见，合理减少施氮量是降低温室菜地 N_2O 排放量的有效途径。

土壤水分状况会影响土壤 N_2O 的产生和向大气中的扩散。通常水分增加会降低土壤通气性，减弱硝化过程，促进反硝化过程。故当土壤水分含量对硝化和反硝化作用都有促进时，会导致大量的 N_2O 生成与排放。有研究表明，小白菜田土壤 N_2O 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[5]；但是当土壤含水量超过田间持水量时，已产生的 N_2O 进一步向土体外扩散会受到限制，增加它在土壤中滞留时间，以至最后被进一步还原[9]。本试验所用灌溉量为当地农户习惯灌溉量，灌水量相对较高，灌溉当日土壤表面都会出现渍水现象，到第 3 d 时土壤含水量基本接近田间最大持水量的 90%（表 2），含水量较适合硝化和反硝化作用，而观测到的 N_2O 排放峰值也大多在此期间。在 10 月 10 日（第 1 次追肥后第 22 d）为各处理灌溉清水 1 次之后 N_2O 排放通量没有出现明显波动，说明灌溉与施肥同期更有利于 N_2O 的产生和排放[13]。

学界普遍认为，土壤干湿交替会引起 N_2O 的爆发式释放[28]。本试验温室棚内温度高，土表水分蒸发强，2 次灌溉间隔为 19～41 d，每次灌溉施肥前土壤含水量均较低，此时硝化和反硝化细菌的活性及土壤中 C、N 基质的迁移会受一定的影响，N_2O 释放通量随之会降低[19]。湿度较低的土壤如能得到灌溉，就会迅速激活土壤微生物的活性[14]，进而促进 N_2O 排放。但本研究结果表明，灌溉只促进了施氮处理 N_2O 的排放，而对不施氮处理的影响较小（图

1)。可见,只有灌溉与施氮相结合时,施氮导致 N_2O 排放增加的效果才会明显表现出来。所以,在炎热的季节实行少量多次灌溉,可以减少土壤湿度剧烈变化导致的 N_2O 释放激增。有研究表明,地表滴灌技术可以减少 70% 的甜瓜大田 N_2O 排放量[14],原因是滴灌避免土表大面积渍水,显著降低了反硝化作用。温室蔬菜种植中如果使用滴灌技术有望大大降低 N_2O 排放量。

目前已发表保护地菜地 N_2O 排放研究成果[10,22,27]显示,保护地菜地各自种植季内施氮处理 N_2O 排放量范围为 1.1 ~ 15.9 kg/hm^2,平均值 5.6 kg/hm^2; N_2O 排放系数范围为 0.028 ~ 1.2,平均值为 0.46[10,23,28],排放量和系数均值与本研究所得结果较为接近。但比卢燕宇等人[29]修正的我国农田排放系数(1.56)低,其原因是频繁且大量的灌溉将更多的氮素带到了土壤深层,或者导致更多的 N_2O 气体溶解于土壤溶液[30]。溶解性 N_2O 的量相当于通过土表直接排放 N_2O 的 50.3% ~ 67.3%[31],且在特定条件下会重新释放进入大气。1994 年我国农田氮素径流和淋溶产生的 N_2O 量为 88.93 Gg/a (1 Gg = 10^9 g),约是农田 N_2O 直接排放量的 1/3[32]。保护地菜地灌溉量大,溶解性 N_2O 的量应该是很可观的,减少灌溉量可以减少这部分损失。

4　结论

1) 保护地表层土壤硝态氮含量与 N_2O 排放通量呈极显著正相关关系。减施氮 25% 比当地习惯施氮量降低了 31.8% 的 N_2O 总排放量,说明合理减少施氮量是降低温室菜地 N_2O 排放量的有效途径。

2) 保护地土壤 N_2O 排放的主要时期是灌溉施肥后 7 d 内,排放高峰值一般出现在第 3 ~ 5 d。高峰时土壤含水量为田间持水量的 90% 左右,是反硝化和硝化作用都适宜的湿度。保护地内温度较高,蒸发强烈,N_2O 排放量容易出现干湿交替导致的爆发式激增。因此,在炎热的季节宜实行少量多次灌溉,以减少土壤湿度剧烈变化导致的 N_2O 释放激增。

3) 不同施氮处理 N_2O 排放通量时间变化趋势一致,表现为 8 ~ 10 月份 N_2O 排放通量较高,11、12 月份较低,主要是由当地气温的变化导致的。8 ~ 10 月份施氮量是影响 N_2O 排放量的主导因素,之后温度是主导因素。

4) 本研究 2 个施氮处理 N_2O 排放系数为 0.45 和 0.53,比大田的排放系数(1.56)低,主要原因是蔬菜保护地栽培生产中灌溉量大,会将更多的氮素带到土壤深层,或者导致更多的 N_2O 气体溶解于土壤溶液。

参 考 文 献:

[1] Duxbury J M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases [M]. Fert. Res., 1994, 38: 151-163.

[2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1970-2008.
National Bureau of Statistics. China statistical year book [J]. Beijing: China Statistics Press, 1970-2008.

[3] 85-913-04-05 攻关课题组. 我国农用氮肥氧化亚氮排放量变化趋势预测(1990-2020 年)[J]. 农业环境保护,1994,13(6): 259-261.
85-913-04-05 program AEPI. Forecasting of the amount N_2O emission from farming N fertilizer in China [J]. Agro-Environ. Prot., 1994, 13(6): 259-261.

[4] 张志斌. 发展设施蔬菜低碳生产技术的探讨[J]. 中国蔬菜, 2010,(9): 4-6.
Zhang Z B. Discussion of develop low carbon production technology for greenhouse[J]. China Veget., 2010, (9): 4-6.

[5] 姚志生,郑循华,周再兴,等. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N_2O 排放对比观测研究[J]. 气候与环境研究,2006,11(6): 691-701.
Yao Z S, Zheng X H, Zhou Z X *et al*. Nitrous oxide emission from winter wheat and vegetable fields in the Taihu region: A comparison case study [J]. Clim. Environ. Res., 2006, 11(6): 691-701.

[6] Chen Q, Zhang X S, Zhang H Y *et al*. Evaluation of current fertilizer practice and soil fertility in vegetable production in the Beijing region [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2004, 69: 51-58.

[7] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, Christie P. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. Environ. Poll., 2006, 143 (1): 117-125.

[8] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2002, 63: 117-127.

[9] 黄国宏,陈冠雄,韩冰,Oswald V C. 土壤含水量与 N_2O 产生途径研究[J]. 应用生态学报,1999,10(1): 53-56.
Huang G H, Chen G X, Han B, Oswald V C. Relationships between soil water content and N_2O production [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 1999, 10(1): 53-56.

[10] He F F, Jiang R F, Chen Q *et al*. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China [J]. Environ. Poll., 2009, 157: 1667-1672.

[11] 张彦才,李巧云,翟彩霞,等. 河北省大棚蔬菜施肥状况分析与评价[J]. 河北农业科学,2005,9(3): 61-67.
Zhang Y C, Li Q Y, Zhai C X *et al*. The condition and appraisal

of the vegetable apply fertilizer in greenhouse in Hebei province [J]. J. Hebei Agric. Sci., 2005, 9(3): 61-67.

[12] Smith K A, McTaggart I P, Dobbie K E, Conen F. Emissions of N_2O from Scottish agricultural soils, as a function of fertilizer N [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 1998, 52: 123-130.

[13] Ruser R, Flessa H, Schilling R *et al*. Effect of crop-specific field management and N fertilization on N_2O emissions from a fine-loamy soil [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2001, 59: 177-191.

[14] Laura S M, Arce A, Benito A *et al*. Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop [J]. Soil Biol. Biochem. 2008, 40: 1698-1706.

[15] Quemada M, abrera M L. Temperature and moisture effects on C and N mineralization from surface applied clover residue [J]. Plant Soil, 1997, 189: 127-137.

[16] Granli T, Bockman O C. Nitrogen oxide from agriculture [J]. Norwegian J. Agric. Sci., Supple. 1994, 12: 66-71.

[17] 张光亚,方柏山,闵航,等. 设施栽培土壤氧化亚氮排放及其影响因子的研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(1): 144-147.
Zhang G Y, Fang B S, Min H *et al*. N_2O fluxes from greenhouse soil and its influence factors [J]. J. Agro-Environ. Sci., 2004, 23(1): 144-147.

[18] 梁国庆,周卫,夏文建,等. 优化施氮下稻-麦轮作体系土壤N_2O排放研究[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2): 304-311.
Liang G Q, Zhou W, Xia W J *et al*. Effect of optimized nitrogen application on N_2O emission from paddy field under wheat-rice rotation system [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 304-311.

[19] 梁东丽,同延安,Ove Emteryd,马林英. 菜地不同施氮量下N_2O逸出量的研究[J]. 西北农林科技大学学报,2002,30(2): 73-77.
Liang D L, Tong Y A, Ove Emteryd, Ma L Y. N_2O losses from vegetable field of applying different amounts of NO_3^--N [J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For., 2002, 30(2): 73-77.

[20] Rodney T V, Jeffrey S, Carl R. Agricultural management effects on nitrous oxide gas emissions [R]. Proceedings of the Lamberton and Outreach Center Soil and Water Management Field Day, Lamberton Minnesota. August 13, 2008.

[21] 董玉红,欧阳竹,李鹏,张磊. 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 Y H, Ouyang Z, Li P, Zhang L. Influence of long-term fertilization on greenhouse gas fluxes from agricultural soil [J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38(1): 97-100.

[22] 张仲新,李玉娥,华珞,等. 不同施肥量对设施菜地N_2O排放通量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(5): 269-275.
Zhang Z X, Li Y E, Hua L *et al*. Effects of different fertilizer levels on N_2O flux from protected vegetable land [J]. Tran. CSAE, 2010, 26(5): 269-275.

[23] 曹兵,贺云发,徐秋明,等. 南京郊区番茄地中氮肥的气态氮损失[J]. 土壤学报,2006,43(1): 62-68.
Cao B, He Y F, Xu Q M *et al*. Gaseous losses from N fertilizers applied to a tomato field in Nanjing suburbs [J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(1): 62-68.

[24] 丁洪,王跃思,项虹艳,等. 菜田氮素反硝化损失与N_2O排放的定量评价[J]. 园艺学报,2004,34(6): 762-766.
Ding H, Wang Y S, Xiang H Y *et al*. Denitrification loss and N_2O emission from nitrogen fertilizer applied to vegetable field [J]. Acta Horticul. Sin., 2004, 34(6): 762-766.

[25] 丁洪,张玉树,王跃思,等. 辣椒地土壤氮素反硝化损失与N_2O排放研究[J]. 长江蔬菜,2010,(8): 86-89.
Ding H, Zhang Y S, Wang Y S *et al*. Denitrification loss and N_2O emission from nitrogen fertilizer applied to capsicums field [J]. J. Changjiang Veget., 2010, (8): 86-89.

[26] 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 Y J, Zhu B, Jing G J *et al*. N_2O emission from soil-vegetable system and impact factors in Chengdu Plain of Sichuan Basin [J]. China Environ. Sci., 2008, 28(4): 313-318.

[27] 卢昌艾,孔令明,胡万里,等. 滇池流域集约化西芹地的N_2O排放[J]. 农业环境科学学报,2008,27(5): 1870-1875.
Lu C A, Kong L M, Hu W L *et al*. N_2O emission from intensive celery field of Dianchi Watershed [J]. J. Agro-Environ. Sci., 2008, 27(5): 1870-1875.

[28] 徐文彬,刘广深,刘维屏. 降雨和土壤湿度对贵州旱田土壤N_2O释放的影响[J]. 应用生态学报,2002,13(1): 67-70.
Xu W B, Liu G S, Liu W P. Effects of precipitation and soil moisture on N_2O emissions from upland soils in Guizhou [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2002, 13(1): 67-70.

[29] 卢燕宇,黄耀,郑循华. 农田氧化亚氮排放系数的研究[J]. 应用生态学报,2005,16(7): 1299-1302.
Lu Y Y, Huang Y, Zheng X H. N_2O emission factor for agricultural soils [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(7): 1299-1302.

[30] 刘子锐,徐星凯,黄耀,等. 温带森林土壤溶液溶解性N_2O和CO_2含量特征及其影响机制[J]. 气候与环境研究,2009,14(6): 587-595.
Liu Z R, Xu X K, Huang Y *et al*. Dissolved N_2O and CO_2 concentrations in soil solution under temperate old-growth forest and their associated mechanisms [J]. Clim. Environ. Res., 2009, 14(6): 587-595.

[31] Kazunorimina M, Seiichi N, Takuji S *et al*. Annual emissions of dissolved CO_2, CH_4, and N_2O in the subsurface drainage from three cropping systems [J]. Global Change Biol., 2010, 16: 796-809.

[32] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[R]. 北京, 2004.
National Development and Reform Commission. The People's Republic of China initial national communication on climate change [R]. Beijing, 2004.