植物营养与肥料学报 2012,18(5):1073-1085
Plant Nutrition and Fertilizer Science

有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响

郝小雨[1],高 伟[2],王玉军[1],金继运[1],黄绍文[1*],唐继伟[1],张志强[1]
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;2 天津市农业资源与环境研究所,天津 300192)

摘要:采用静态箱—气相色谱法研究了有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响。结果表明:1)设施芹菜和番茄施基肥后 5～7 d(灌溉后 1～3 d)出现土壤 N_2O 排放通量峰值,追肥后(施肥与灌溉同步)1 d 出现土壤 N_2O 排放通量峰值;芹菜季和番茄季施用基肥后 20 d 内 N_2O 排放量分别占当季总排放量的 40%～65% 左右,是土壤 N_2O 主要排放期。2)施用基肥后至定植灌水前各处理土壤 N_2O 排放量逐渐降低,灌水后 N_2O 排放通量迅速上升。各处理土壤 N_2O 排放通量与土壤含水量之间呈显著相关,相关系数在 0.43～0.72 之间。3)土壤 N_2O 排放主要发生在番茄季,番茄生育期各处理土壤 N_2O 总排放量是芹菜生育期的 3.1 倍;各处理土壤 N_2O 排放通量与 5 cm 土层温度之间总体上呈显著相关,相关系数在 0.40～0.58 之间。4)设施菜田大幅减施化肥的有机无机肥配合施用模式可显著降低土壤 N_2O 排放量和肥料损失率,芹菜季和番茄季土壤 N_2O 排放量较习惯施肥处理分别降低 66.3% 和 85.1%,肥料损失率分别降低 45.2% 和 74.9%。5)等氮量投入时,施用秸秆较施用猪粪可有效降低土壤 N_2O 排放,芹菜季和番茄季分别降低 43.4% 和 74.2%。

关键词:有机无机肥料配合施用;设施菜田;N_2O 排放
中图分类号:S153.6;S344.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)05-1073-13

Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on N_2O emission from greenhouse vegetable soil

HAO Xiao-yu[1], GAO Wei[2], WANG Yu-jun[1], JIN Ji-yun[1], HUANG Shao-wen[1*], TANG Ji-wei[1], ZHANG Zhi-qiang[1]
(*1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Tianjin Institute of Agriculture Resources and Environment, Tianjin 300192, China*)

Abstract: The application of organic manure and chemical fertilizers is identified as significant sources of greenhouse gases in vegetable production. Less information is available on the effect of different fertilization patterns on nitrous oxide (N_2O) fluxes from greenhouse vegetable soils. This study was conducted to determine the effect of combined application of organic manure and chemical fertilizers on N_2O emission using the static chamber-gas chromatograph method under celery-tomato rotation system in Tianjin from September 2010 to June 2011. The field experiment consisted of six treatments of 1 (no N), 2 (4/4 CN + 0/4 PN, all nitrogen in chemical fertilizer, CN donotes N in chemical fertilizer and PN donotes N in pig manure), 3 (3/4 CN + 1/4 PN), 4 (2/4 CN + 2/4 PN), 5 (2/4 CN + 2/4 SN, SN denotes nitrogen in straw), and 6 (CF, conventional fertilization). Equal NPK was designed for treatments 2, 3, 4, and 5. Rates of P_2O_5 and K_2O application were respectively equal for each of treatments 1, 2, 3, 4 and 5. The results showed that: 1) the peak of N_2O emission flux occurred within 5-7 days after basal fertilization (1-3 days after irrigation), whereas within 1 day after fertilizer top-dressing (fertilization and irrigation were carried out simultaneously) during the celery and tomato growth period. 40%-65% of total N_2O emissions during celery or tomato growth period were from over the first 20 days after basal fertilization. 2) The

收稿日期:2012-02-08　　**接受日期**:2012-05-31
基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-25-C-11);IPNI 项目资助。
作者简介:郝小雨(1981—),男,河北张家口人,博士研究生,主要从事农田养分循环研究。E-mail:xiaoyuhao1981@sina.com
*通讯作者 Tel:010-82108662,E-mail:swhuang@caas.ac.cn

N_2O emission fluxes gradually decreased after basal fertilization, then rapidly increased after irrigation. Significant correlations between the N_2O emission fluxes for all treatments and soil moistures were observed, with correlation coefficients ranging from 0.43 to 0.72. 3) Distinct total N_2O emission during tomato growth period was found, with the total amounts for all treatments being 3.1 times as high as that of the celery growth period. Significant correlations between the N_2O emission fluxes for different treatments and soil temperatures in 5 cm layer during the celery and tomato growth period were generally observed, with correlation coefficients ranging from 0.40 to 0.58. 4) Compared with the conventional fertilization with much higher rates of N fertilizer, the combined application patterns of organic manure and chemical fertilizers significantly decreased the total N_2O emissions by 66.3% and 85.1% as well as loss ratio of N fertilizer by 45.2% and 74.9% during the celery and tomato growth period, respectively. 5) Straw application compared with pig manure application with the same N rate respectively decreased the N_2O emission by 43.4% and 74.2% during the growth period of celery and tomato under this experimental condition.

Key words: combined application of organic manure and chemical fertilizers; greenhouse vegetable field; N_2O emission

氧化亚氮(N_2O)是一种重要的温室气体,其增温效应是 CO_2 的 296 ~ 310 倍[1]。此外,N_2O 能在大气中滞留较长时间,并参与大气中许多光化学反应,最终破坏大气臭氧层[2]。大气 N_2O 浓度的增加主要来源于农业[3],其贡献率占到人类活动产生的 N_2O 总量的 2/3 以上[4]。据计算,从 1980 年到 2007 年中国农田 N_2O 排放年均增长 7.6%,2007 年 N_2O-N 排放量达到 288.4 Gg(1 Gg = 1000 t)[5],氮肥在农田中的大量投入是大气中 N_2O 浓度增长的最主要因素[6]。目前,针对施肥对土壤 N_2O 排放的影响国内外已进行了大量的研究,多集中在主要粮食作物上,如小麦、玉米、水稻等,而对于菜田尤其是设施菜田相关研究较少。设施蔬菜生长快、生长期短、复种指数高、生物产出量大,菜农为追求高产不惜大量施用肥料,因此,设施蔬菜生产中过量施用氮肥的现象十分严重。Ju 等[7]在山东省惠民县设施蔬菜产区的调查显示,氮肥(N)年均施入量为 4670 kg/hm^2,是对照农田的 7.0 倍,超过蔬菜需求量数倍。余海英等[8]对山东寿光温室肥料投入情况的调查结果表明,氮肥(N)每年平均投入量为 4088 kg/hm^2,而盈余量达到 3214 kg/hm^2。长期的高肥投入,导致土壤氮素大量累积。黄绍文等[9]对全国主要菜区的土壤肥力调查表明,全国主要菜区温室和大棚土壤硝态氮含量居于高含量水平(≥150 mg/kg)的土样数分别占其总土样数的 33.0% 和 30.7%。对天津市设施菜田调查结果表明,土壤硝态氮含量是相邻农田的 4 ~ 10 倍[10]。土壤高氮含量为 N_2O 的生成和排放创造了有利条件。此外,设施菜田作为一个特殊的生态系统,不仅受自然因素如气温、光照、土壤条件的影响,而且人为因素如耕作、施肥、灌溉等的影响更加直接和强烈,导致 N_2O 排放存在巨大的时空变异。因此,明确设施菜田 N_2O 排放规律以及提出相应的节能减排措施是亟需研究的问题。目前,有机无机肥料配合施用是设施菜田较为常见的施肥方式,有机无机肥料配施可协调养分平衡供应,满足作物整个生育期对养分的需求,同时也可以减少化肥的用量。已有设施菜田 N_2O 排放的研究集中在肥料用量上[11-14],且对单季作物研究的较多,而综合考虑有机无机肥料配合施用与水分的协同作用对设施菜田 N_2O 周年排放的研究鲜见报道。为此,本研究从平衡施肥及合理灌溉的角度,在大幅减施肥料的基础上,采用密闭箱—气相色谱法,研究了不同有机无机肥配合施用模式下芹菜 - 番茄轮作模式下 N_2O 季节排放特征和影响因素,并对减量施氮和部分有机替代减少设施菜田 N_2O 排放的效果进行探讨,以寻求经济效益显著、可操作性强和环境友好的施肥模式,为实现设施蔬菜生产的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本定位试验点位于天津市西青区辛口镇第六埠村,试验区域属暖温带半湿润大陆气候,全年平均温度 11.6 ℃,全年日照总量 2810.4 h,全年无霜期 203 d,自然降水总量 586 mm。供试日光温室棚龄为 9 年,该温室东西走向,长 80 m,宽 6.5 m(含 0.5 m 通道),前部有通风口,白天适时敞开通风,夜间或降雨时关闭。供试土壤类型为中壤质潮土,地下

水埋深为 90 cm。试验从 2009 年 10 月开始,种植制度为芹菜 - 番茄轮作,试验开始前 0—20 cm 土壤基本性质为: 有机质含量 25.4 g/kg,硝态氮 186.2 mg/kg,速效磷 144.6 mg/kg,速效钾 404.0 mg/kg。供试芹菜(*Apium graveolens* L.)品种为文图拉,番茄(*Lycopersicon esculentum* L.)品种为朝研 299。

1.2　试验设计

定位试验共设 6 个处理,分别为: 1)不施氮对照(CK); 2)全部施用化肥处理(4/4 CN + 0/4 PN, CN - 化肥氮 Nitrogen in chemical fertilizer; PN - 猪粪氮 Nitrogen in pig manure); 3)3/4 化肥氮 + 1/4 猪粪氮(3/4 CN + 1/4 PN); 4)2/4 化肥氮 + 2/4 猪粪氮(2/4 CN + 2/4 PN; 5)2/4 化肥氮 + 2/4 秸秆氮(2/4 CN + 2/4 SN, SN - 秸秆氮 Nitrogen in straw); 6)农民习惯施肥处理(Conventional fertilization, CF)。除不施氮和农民习惯施肥处理外,其余处理为等氮等磷等钾,具体施肥量见表 1。每个处理 3 次重复,随机排列。试验小区面积为 14.4 m^2(宽 2.4 m × 长 6 m),芹菜株、行距分别为 0.20 m 和 0.15 m,种植密度为 330570 株/hm^2。番茄株、行距分别为 0.3 m 和 0.6 m,种植密度为 25000 株/hm^2。小区间埋设 PVC 板,深度 105 cm,其中 100 cm 在地下,5 cm 地上; PVC 板厚度 4 mm,防止小区之间养分和水分的横向迁移。

定位试验种植的第一茬作物为芹菜,种植时间为 2009 年 10 月～2010 年 2 月; 第二茬作物为番茄,种植时间为 2010 年 3 月～2010 年 6 月,番茄收获后,耕层(0—20 cm)土壤硝态氮含量、速效磷含量和速效钾含量见表 2。本研究为定位试验的第三茬(芹菜,2010 年 10 月～2011 年 2 月)和第四茬(番茄,2011 年 3 月～2011 年 6 月)。

表 1　试验设计

Table 1　The experimental treatments

处理 Treatment	养分用量 Nutrient application rates (kg/hm^2)					
	化肥中养分 Nutrient in chemical fertilizer			有机肥中养分 Nutrient in organic manure		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
	芹菜/番茄 Celery/Tomato	芹菜/番茄 Celery/Tomato	芹菜/番茄 Celery/Tomato	芹菜/番茄 Celery/Tomato	芹菜/番茄 Celery/Tomato	芹菜/番茄 Celery/Tomato
CK	0/0	300/225	600/600	0/0	0/0	0/0
4/4 CN + 0/4 PN	450/450	300/225	600/600	0/0	0/0	0/0
3/4 CN + 1/4 PN	337.5/337.5	231.5/149.5	524.0/539.8	112.5/112.5	68.5/75.5	76.0/60.2
2/4 CN + 2/4 PN	225/225	162.9/74.0	448.0/479.5	225/225	137.1/151.0	152.0/120.5
2/4 CN + 2/4 SN	225/225	220.5/165.7	239.3/204.4	225/225	79.5/59.3	360.7/395.6
CF	450/450	600/300	300/450	450/450	274.0/302.0	304.0/241.0

表 2　第二茬番茄收获后土壤耕层(0—20 cm)养分含量及芹菜季和番茄季生育期总灌水量

Table 2　Nutrient contents of soil surface layer (0–20 cm) after second harvest of tomato season and total irrigation amounts during growth period of celery and tomato

处理 Treatment	养分含量 Nutrient contents(mg/kg)			灌溉量 Irrigation amounts(m^3/hm^2)	
	硝态氮 NO_3^--N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	芹菜季 Celery season	番茄季 Tomato season
CK	34.5	126.3	365.0	3334	3889
4/4 CN + 0/4 PN	48.9	125.1	328.7	3334	3889
3/4 CN + 1/4 PN	46.5	128.4	341.7	3334	3889
2/4 CN + 2/4 PN	44.1	133.3	326.7	3334	3889
2/4 CN + 2/4 SN	56.2	133.2	368.3	3334	3889
CF	63.7	144.0	363.0	4167	4861

芹菜季所用化肥除部分基施外,其余分3次进行追施。处理1～5根据作物需肥规律进行施肥,即20%的N、70%的P_2O_5和20%的K_2O基施,其余部分的N和K_2O分3次追施,其中N追施的量分别为35%、35%和10%,K_2O追施量分别为10%、35%和35%,剩余的P_2O_5在第一次追施时全部施入;处理6为习惯施肥,即20%的N和100%的P_2O_5基施,其余部分的N和全部K_2O平均分3次追施。

基肥于2010年9月30日施入,10月5日定植、浇水。追肥分别在芹菜5～6叶(2010年11月11日)、8～9叶(2010年12月1)和11～12叶(2011年1月4日)期进行。所施用的有机肥为商品有机肥(主要成分为猪粪)和秸秆(每1000 kg玉米秸秆加2 kg生物菌剂和少量水,腐熟5～7 d),全部基施。处理3、4、6施用猪粪,施用量分别为7450、14900和29800 kg/hm^2;处理5施用秸秆,施用量为58222 kg/hm^2。试验所施用的化肥为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P_2O_5 12%)、磷酸二铵(含N 18%,含P_2O_5 46%)、氯化钾(含K_2O 60%)、磷酸二氢钾(含P_2O_5 52%,含K_2O 34%)。猪粪N、P_2O_5、K_2O养分含量分别为1.51%、0.92%、1.02%(湿基),有机质含量为21.8%,水分含量30%;秸秆N、P_2O_5、K_2O养分含量分别为1.10%、0.39%、1.77%(干基),水分含量65%。

番茄季所用化肥除部分基施外,其余分4次进行追施。处理1～5依据作物需肥规律进行施肥,即20%的N、70%的P_2O_5、20%的K_2O基施,其余部分的N和K_2O分4次追施,其中N的追施量分别为30%、30%、10%和10%,K_2O追施量分别为10%、30%、30%和10%,剩余的P_2O_5分别在第一次追肥和第二次追肥时各施入15%;处理6为习惯施肥,即20%的N和80%的P_2O_5基施,其余部分的N、P_2O_5和K_2O分4次追施,其中N追施量各为20%,P_2O_5的量各为5%,K_2O的量各为25%。基肥于2011年2月27日施入,3月3日定植、浇水。追肥时期分别在番茄开花期(2011年4月26日)、第一穗果膨大期(2011年5月10日)、第二穗果膨大期(2011年5月24)和第三穗果膨大期(2011年6月2日)进行。有机肥全部基施,处理3、4、6猪粪施用量分别为7258、14516和29032 kg/hm^2,处理5秸秆施用量为70644 kg/hm^2。施用化肥种类同芹菜季。猪粪N、P_2O_5、K_2O养分含量分别为1.55%、1.04%、0.83%(湿基),有机质含量为17.4%,水分含量33%;秸秆N、P_2O_5、K_2O养分含量分别为0.91%、0.24%、1.60%(干基),水分含量65%。番茄定植前小区用地膜覆盖(地膜厚为0.01 mm),覆膜后四周用土压实,番茄生长期内于膜下进行追肥和灌水。

基施方式为肥料撒施后旋耕入土,追施方式为肥料溶于水后随水冲施。处理1～5是依据田间持水量进行灌溉,当田间持水量低于60%时进行灌溉;处理6采用习惯灌溉方式,即定期采用大水漫灌的方式。为保证灌水量的准确,每个小区均安装有单独的PVC进水管,并用水表记录灌水量。芹菜和番茄生育期各处理总灌水量见表2。

1.3 测定项目及方法

N_2O的测定采用密闭箱—气相色谱法(图1)。采样装置由取样箱和底座两部分组成,材质为PVC管。取样箱为圆柱体,外径20 cm,高35 cm,顶部密封,底部开口可以罩在底座上。底座为四周有水槽的圆柱体,取样前将底座下部嵌入土体5 cm左右,每个试验处理小区内分别固定一个底座,取样时箱体置于密封槽中,在密封槽中加入水,防止箱内气体外溢。取样箱顶部装一小风扇,电压12 V,用于搅拌空气和避免箱内出现气体浓度差。取样箱侧壁距顶端15 cm处有一直径13 mm小孔,用橡胶塞塞紧,保证密封不漏气。取样时用带有三通阀的注射器,针头通过橡胶塞插到箱子中,分别在0、10、20和30 min抽取经过搅拌的气样35 mL于真空瓶(英国Labco顶空进样瓶)中。采样时间的选取原则是选择接近每天平均气温的时段,芹菜季采样时间为上午9:00～11:00,番茄季为上午7:30～9:30。每次施肥后第1、3、5、8和11 d及施肥前1 d取气样,施基肥时延长取样时间,直至施氮处理与不施氮处理的N_2O排放通量无差异时为止。施肥后底座固定在同一位置,为避免影响到水肥的均匀分布,在下次施肥前将其移出,施肥后再选择另一位置安装,以防因破坏土壤结构引起的测定误差。由于番茄季地表覆盖地膜,故收集气体前需选定一取样点,将取样点的薄膜按底座大小揭开,安装底座并按上述步骤收集N_2O。为避免地表覆膜和不覆膜引起的测定误差,每次收集结束后,将薄膜重新覆盖到原处(薄膜破损时,使用备用薄膜以使土壤保持覆膜状态),直至下一次测定。每次收集前,将薄膜揭开3～5 min,以去除因长期覆盖积累在薄膜和土壤表面之间的N_2O。N_2O样品分析采用HP7890A气相色谱仪,分析柱为Porpak. Q填充柱,柱箱温度为70℃,载气

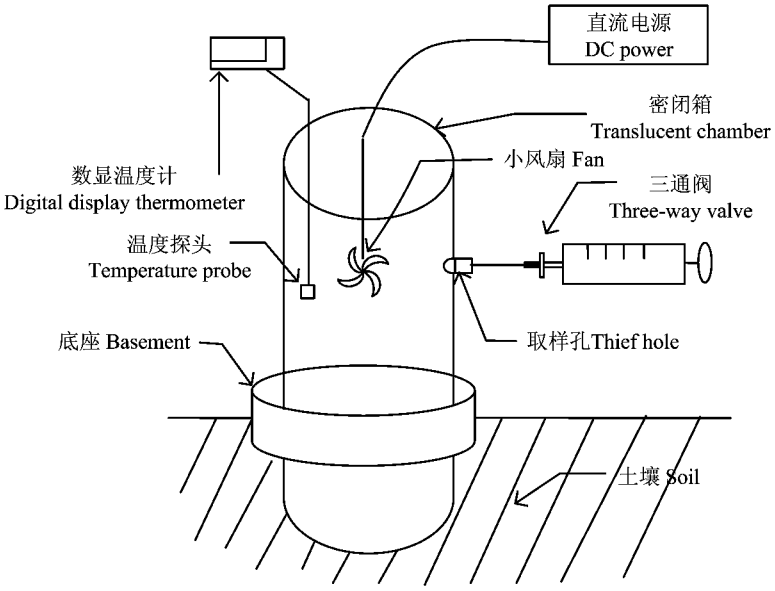

图 1　密闭箱装置示意图

Fig. 1　The sketch picture of closed chamber

为 N_2,流速为 25 L/min,检测器为电子捕获检测器 ECD,工作温度 330℃。气相色谱仪在每次测试时使用国家标准计量中心的标准气体进行标定,N_2O 测定的相对误差控制在 2% 以内。

N_2O 排放通量的计算公式为:

$$F = \rho \times H \times (\Delta c/\Delta t) \times 273/(273+T)$$

式中:F 为 N_2O 排放通量[μg/(m^2·h)];ρ 为 N_2O 标准状态下的密度(1.964 kg/m^3);H 为取样箱高度(m);Δc/Δt 为单位时间静态箱内的 N_2O 气体浓度变化率[mL/(m^3·h)];T 为测定时箱体内的平均温度(℃)。

采样同时记录取样箱内外温度,并测定 5 cm 土层土壤温度和含水量,大气平均温度采用当地气象数据。采样箱内外温度采用 TPM-10 数字温度计(上海精创电器制造有限公司)测定,土壤温度采用 WET-2 传感器(DELTA-T DEVICES,英国)测定,土壤含水量利用 TDR 延迟反射仪测定(TRIME-EZ,德国 IMKO 公司)。

土壤有机质测定采用重铬酸钾-浓硫酸氧化(外加热法),硫酸亚铁溶液滴定法;土壤硝态氮采用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提—双波长紫外分光光度法测定;土壤速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液浸提—钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用 1 mol/L醋酸铵溶液浸提—原子吸收分光光度计测定。

本研究中蔬菜生育期土壤 N_2O 排放量是将各阶段 N_2O 排放量进行累加,而各阶段 N_2O 排放量的计算是在期间测定的 N_2O 排放量的基础上,由相邻两个测定日期 N_2O 排放量的平均值与该相邻两个日期间隔天数的乘积来估算未测定日期的 N_2O 排放量[15]。N_2O 排放通量用同一处理 3 个重复的平均值表示。对芹菜季和番茄季不同施肥处理间土壤 N_2O 排放总量进行方差分析,用最小显著差异法(LSD)做多重比较;对蔬菜主要生育期 N_2O 排放通量与同时期土壤水分和土壤温度进行相关性分析。采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS13.0 软件进行数据分析。

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

2　结果与分析

2.1　芹菜季和番茄季土壤 N_2O 排放通量和动态变化

由图 2 可知,芹菜季施用基肥(9 月 30 日)至定植灌水(10 月 5 日)前,各处理土壤 N_2O 排放通量逐渐降低;定植灌水后 N_2O 排放通量迅速上升,施基肥后第 7 d(灌水后第 2 d,10 月 7 日)出现排放峰,在 111.1～1403.5 μg/(m^2·h)之间,其后一段时间 N_2O 排放通量逐步降低,至施基肥后 20 d(灌水后 15 d,10 月 20 日)接近 CK 处理水平。3 次追肥(追肥与灌水同步)后土壤 N_2O 排放峰均出现在追肥后第 1 d,在 9.6～159.2 μg/(m^2·h)之间,至

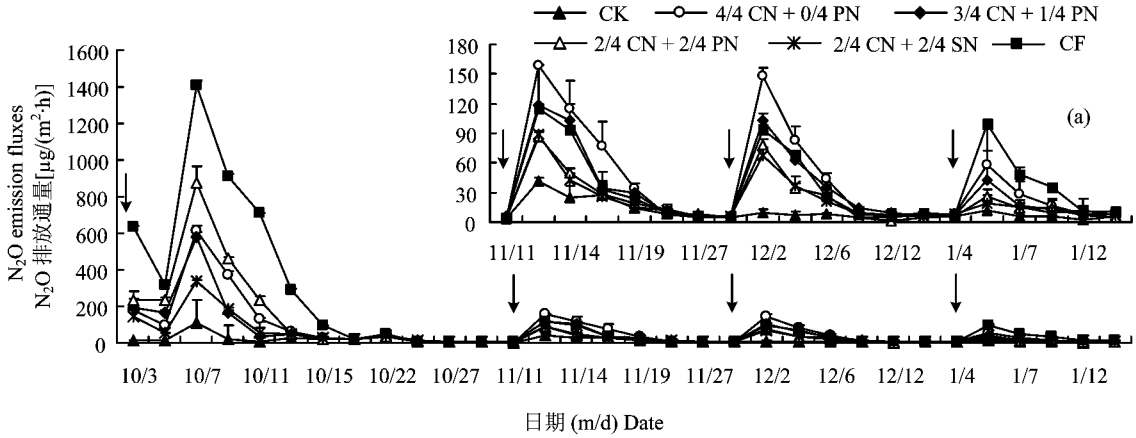

图2 芹菜季土壤 N_2O 排放通量动态变化

Fig. 2 Changes of N_2O emission flux during celery growth period

(Note): 箭头表示施肥日期,图(a)为3次追肥后土壤 N_2O 排放趋势 Arrows indicate the date of fertilization. Figure (a) indicates changes in N_2O emission flux after fertilizer top-dressing for three times]

追肥后第11 d接近CK处理水平。

图3表明,番茄季施用基肥(2月27日)至定植灌水(3月3日)前,各处理土壤 N_2O 排放通量逐渐降低;定植灌水后 N_2O 排放通量迅速上升,各处理施基肥后第5～7 d(灌水后第1～3 d,3月4～7日)出现排放峰,在186.4～14095.1 μg/(m^2·h)之间,其后一段时间各处理土壤 N_2O 排放通量逐步降低,至施基肥后20 d(灌水后16 d,3月19日)接近CK水平。4次追肥(追肥与灌水同步)N_2O 排放峰均出现在追肥后第1 d,在29.0～344.4 μg/(m^2·h)之间,至追肥后第11 d接近CK水平。

施基肥后13 d内和追肥后8 d内各处理土壤 N_2O 均具有较高的排放通量。其中,芹菜季和番茄季施基肥后13 d内各处理土壤 N_2O 平均排放通量分别在32.9～833.9和89.0～6085.9 μg/(m^2·h)之间,平均分别为304.4和1539.6 μg/(m^2·h);芹菜季和番茄季追肥后8 d内各处理土壤 N_2O 平均排放通量分别在13.5～60.8和27.9～125.8 μg/(m^2·h)之间,平均分别为37.8和74.5 μg/(m^2·h)。土壤 N_2O 排放主要集中在施用基肥后,芹菜季和番茄季施基肥后13 d内各处理土壤 N_2O 排放通量平均值为追肥后8 d内各处理平均值的8.1和20.7倍。

施氮量显著影响土壤 N_2O 排放,施氮量较大

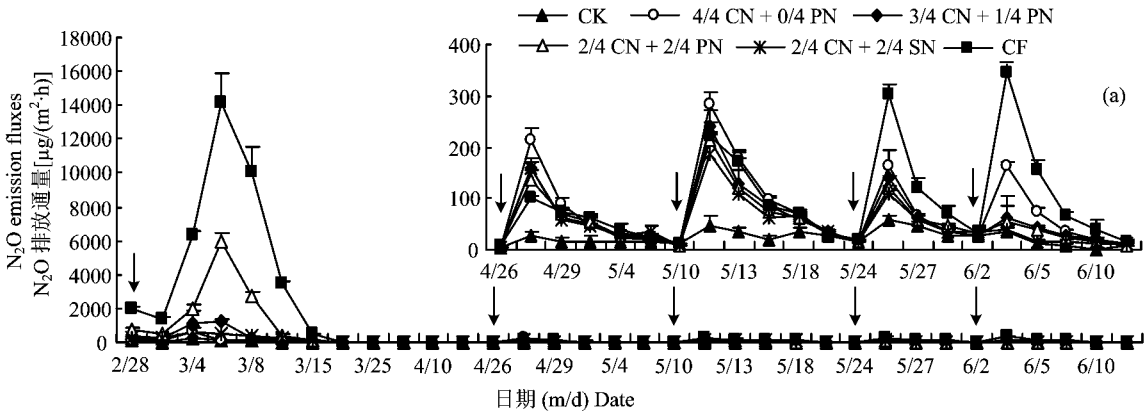

图3 番茄季土壤 N_2O 排放通量动态变化

Fig. 3 Changes of N_2O emission flux during tomato growth period

注(Note): 箭头表示施肥日期,图(a)为4次追肥后土壤 N_2O 排放趋势 Arrows indicate the date of fertilization. Figure (a) indicates changes in N_2O emission flux after four times top-dressing.]

时,土壤 N_2O 排放通量也随之增加。芹菜季 CF 处理基肥和第三次追肥时的氮肥投入量较大,此时 CF 处理土壤 N_2O 排放峰值均为最高(图 2),达 1403.5 和 99.1 μg/(m^2·h),分别是其它处理的 1.6 ~ 12.6 和 1.7 ~ 8.7 倍;番茄季也有此趋势(图 3),CF 处理基肥、第 3 次和第 4 次追肥后土壤 N_2O 排放峰值分别为 14095.1、303.3 和 344.4 μg/(m^2·h),分别是其它处理的 2.3 ~ 75.6、1.8 ~ 5.1 和 2.1 ~ 9.7 倍。此外,芹菜季和番茄季第 1 次和第 2 次追肥后 4/4 CN + 0/4 PN 处理施肥量最高,其土壤 N_2O 排放峰值显著高于其它处理,其中芹菜季第 1 次和第 2 次追肥后 4/4 CN + 0/4 PN 处理土壤 N_2O 排放峰值分别为 159.2 和 147.6 μg/(m^2·h),分别是其它处理的 1.3 ~ 3.8 和 1.4 ~ 15.4 倍;番茄季第 1 次和第 2 次追肥后 4/4 CN + 0/4 PN 处理土壤 N_2O 排放峰值分别为 214.5 和 283.4 μg/(m^2·h),分别是其它处理的 1.4 ~ 7.4 和 1.2 ~ 6.1 倍。

2.2 有机无机肥料配合施用条件下土壤 N_2O 排放量

由表 3 可以看出,施用基肥后 20 d 内是土壤 N_2O 主要排放期,芹菜季和番茄季施基肥后 20 d 内各处理土壤 N_2O 排放量占当季该处理总排放量的 40% ~ 65% 左右,这与施基肥时的施肥方法和气温较高有关。芹菜季和番茄季各处理基肥(部分化学肥料和全部有机肥)撒施后旋耕,剩余肥料溶于水后分 3 次和 4 次追施,此时肥料极易随水淋溶至土壤下层,从而减少了产生 N_2O 排放的底物。此外,芹菜季施基肥后 20 d 内的土壤平均温度为 19.2℃,显著高于 3 次追肥后 11 d 内的平均温度(第 1、第 2 和第 3 次分别为 13.2℃、9.5℃ 和 6.5℃),施基肥后较高的土壤温度为 N_2O 的生成排放创造了有利的条件;番茄季施基肥后 20 d 内的土壤平均温度为 21.4℃,较适宜 N_2O 的生成排放。

表 3　有机无机肥料配合施用条件下土壤 N_2O 排放量

Table 3　N_2O emission in the celery-tomato rotation systems under the combined application patterns of organic manure and chemical fertilizers

作物 Crop	处理 Treatment	施基肥后 20 d N_2O 排放量 E20 (kg/hm^2)	每次追肥后 11 d N_2O 排放量(kg/hm^3) N_2O emission over the first 11 days after fertilizer top-dressing for each time				生育期 N_2O 总排放量 Eg (kg/hm^2)	N_2O 排放系数 Ef (%)
			T1	T2	T3	T4		
芹菜 Celery	CK	0.21 (42.2)	0.06 (12.7)	0.02 (3.4)	0.01 (2.9)		0.49 d	
	4/4 CN + 0/4 PN	0.68 (39.2)	0.20 (11.4)	0.13 (7.5)	0.05 (3.2)		1.73 b	0.18
	3/4 CN + 1/4 PN	0.81 (45.4)	0.14 (8.1)	0.10 (5.6)	0.04 (2.1)		1.79 b	0.18
	2/4 CN + 2/4 PN	1.01 (51.8)	0.09 (4.7)	0.06 (3.1)	0.03 (1.6)		1.96 b	0.21
	2/4 CN + 2/4 SN	0.50 (45.3)	0.08 (7.6)	0.06 (5.7)	0.03 (2.6)		1.11 c	0.09
	CF	2.68 (54.7)	0.14 (2.8)	0.09 (1.9)	0.09 (1.9)		4.89 a	0.31
番茄 Tomato	CK	0.33 (38.5)	0.06 (7.0)	0.08 (9.8)	0.07 (8.8)	0.03 (3.2)	0.86 e	
	4/4 CN + 0/4 PN	0.64 (35.4)	0.18 (7.7)	0.31 (13.1)	0.13 (5.4)	0.13 (5.7)	2.35 d	0.21
	3/4 CN + 1/4 PN	1.83 (50.3)	0.16 (4.3)	0.26 (7.1)	0.11 (3.1)	0.09 (2.4)	3.64 c	0.39
	2/4 CN + 2/4 PN	5.98 (61.4)	0.15 (1.5)	0.23 (2.4)	0.11 (1.1)	0.08 (0.8)	9.75 b	1.26
	2/4 CN + 2/4 SN	1.14 (45.4)	0.16 (6.2)	0.22 (8.7)	0.11 (4.2)	0.07 (2.7)	2.52 d	0.24
	CF	19.72 (64.2)	0.16 (0.5)	0.28 (0.9)	0.22 (0.7)	0.27 (0.9)	30.72 a	2.11

注(Note):E20—N_2O emission over the first 20 days after basal fertilization; Eg—Total N_2O emission during growth period; Ef—N_2O emission factor of total applied N. T1—第 1 次 The first time; T2—第 2 次 The second time; T3—第 3 次 The third time; T4—第 4 次 The fourth time. 括号内数值表示 N_2O 排放量占总排放量的百分比 The number in parentheses indicated the percentage of N_2O emission for basal fertilization or fertilizer top-dressing/total N_2O emission during growth period (%). 数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters within a column are significant at the 5% level.

土壤 N_2O 排放主要发生在番茄季,番茄季较高的温度适宜土壤微生物活动,有利于硝化和反硝化过程的进行,促进了 N_2O 的生成排放。番茄生育期各处理土壤 N_2O 总排放量在 0.86 ~ 30.72 kg/hm^2 之间,是芹菜生育期的 1.4 ~ 6.3 倍,平均为 3.1 倍。

大幅减施肥料的有机无机肥配合施用模式可显著降低土壤 N_2O 排放量,芹菜季和番茄季 4 个处理 N_2O 排放量分别在 1.11 ~ 1.96 和 2.35 ~ 9.75 kg/hm^{2}之间,平均分别为 1.65 和 4.57 kg/hm^2,较 CF 处理的分别降低了 66.3% 和 85.1%。减施氮肥的有机无机配合施用模式直接减少了生成 N_2O 的底物数量,进而能有效降低土壤 N_2O 的排放。

4 个有机无机肥配合施用模式处理间,芹菜季和番茄季 2/4 CN + 2/4 PN 处理土壤 N_2O 排放量均为最高,分别为 1.96 和 9.75 kg/hm^2,分别是其它 3 个处理的 1.1 ~ 1.8 和 2.7 ~ 4.1 倍。在相同有机肥 N 用量条件下,施用秸秆较施用有机肥可有效降低土壤 N_2O 排放,芹菜季和番茄季 2/4 CN + 2/4 SN 处理土壤 N_2O 排放量较 2/4 CN + 2/4 PN 处理的分别降低了 43.4% 和 74.2%。

大幅减施肥料的有机无机肥配合施用模式可显著降低因土壤 N_2O 排放造成的氮损失,其中芹菜季和番茄季 4 个处理的氮肥损失率分别在 0.09% ~ 0.21% 和 0.21% ~ 1.26% 之间,平均分别为 0.17% 和 0.53%,较 CF 处理的分别降低了 45.2% 和 74.9%。

2.3 土壤含水量和土壤温度与 N_2O 排放的关系

图 4 显示,芹菜季从定植到收获期间棚外、棚内和 5 cm 土层温度总体上均呈由高到低而后趋于平缓的变化趋势,表现出明显的季节性特征,其中 9 月 30 日~11 月 7 日棚外、棚内和 5 cm 土层温度相对较高,平均值分别为 13.1℃、20.7℃ 和 18.7℃;11 月 7 日后温度相对较低,平均值分别为 -1.6℃、10.1℃ 和 8.4℃。芹菜整个生育期棚外、棚内和 5 cm 土层温度分别在 -8.6 ~ 20.3℃、5.4 ~ 25.3℃ 和 4.1 ~ 23.6℃之间,平均值分别为 2.4℃、13.0℃ 和 11.2℃。

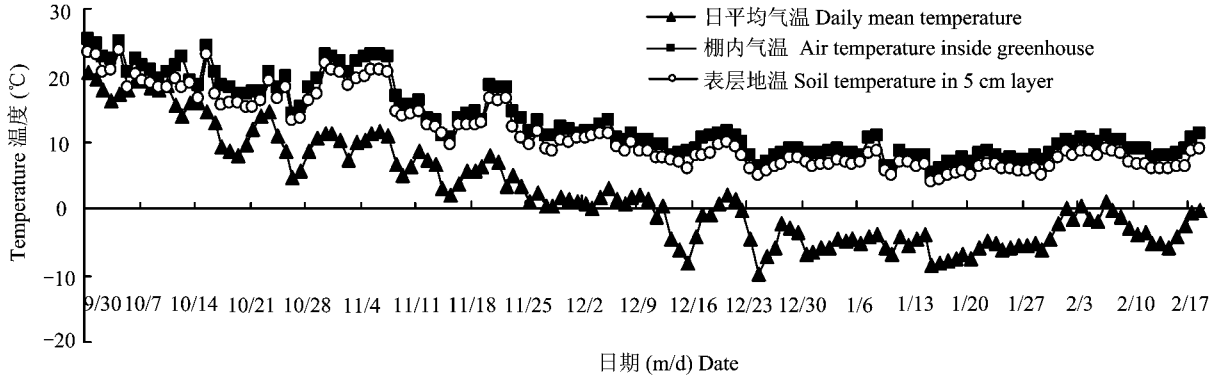

图 4 芹菜季大气、棚内和土壤的温度动态变化

Fig. 4 Variation of outside, inside and soil temperatures of greenhouse during celery growth period

番茄季从定植到收获期间棚外气温总体上呈逐渐升高的趋势,变幅为 -1.4 ~ 29.8℃,平均为 16.8℃;棚内和 5 cm 土层温度大体上均呈波动(前期较低、中期稳定、后期较高)的变化趋势,变幅分别为 18.4 ~ 38.2℃ 和 15.4 ~ 27.9℃,平均分别为 27.0℃ 和 23.5℃(图 5)。

经相关性分析,芹菜季各处理 5 cm 土层温度与土壤 N_2O 排放通量之间呈显著或极显著相关,相关系数在 0.40 ~ 0.58 之间;番茄季 CK、4/4 CN + 0/4 PN、3/4 CN + 1/4 PN 和 2/4 CN + 2/4 SN 处理 5 cm 土层温度与土壤 N_2O 排放通量之间呈显著相关,相关系数在 0.40 ~ 0.49 之间(表 4)。番茄季 2/4 CN + 2/4 PN 和 CF 处理 5 cm 土壤温度与土壤 N_2O 排放通量之间无相关性,这可能是由于施肥与灌溉等因素的综合作用掩盖了温度的效应[16-17]。

芹菜季和番茄季 CF 处理(习惯灌溉)较其它处理(优化灌溉)灌溉量增加 25%(表 2),土壤含水量相对较高,土壤较为湿润(图 6)。芹菜和番茄生育期 CF 处理分别灌溉 10 次和 9 次,土壤含水量分别在 18.5% ~ 31.8% 和 16.4% ~ 30.8% 之间,平均为 27.1% 和 27.2%;其它处理分别灌溉 7 次,土壤含水量在 19.0% ~ 31.2% 和 16.2% ~ 31.0% 之间,平均为 23.1% 和 23.3%,较 CF 处理的土壤相对干燥。

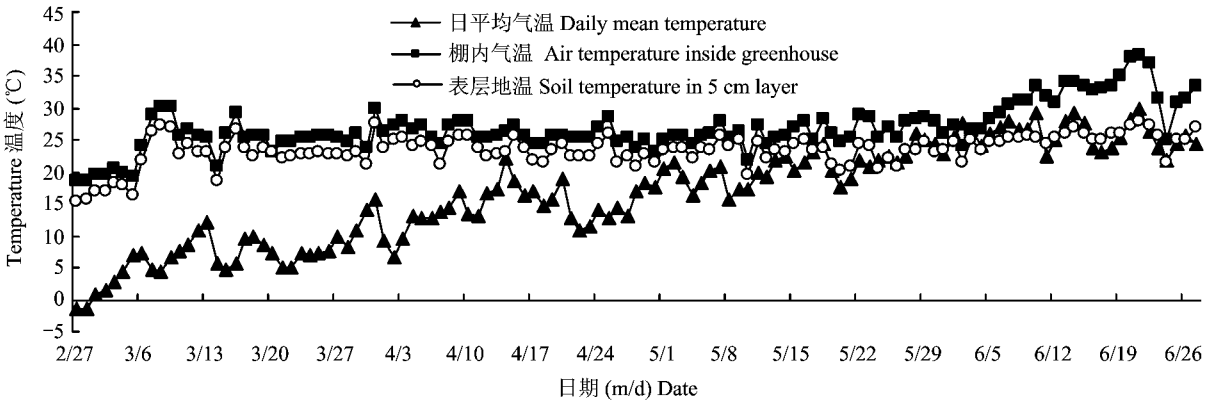

图 5　番茄季大气、棚内和土壤的温度动态变化

Fig. 5　Variation of outside, inside and soil temperatures of greenhouse during tomato growth period

表 4　环境因素与设施菜田土壤 N_2O 排放通量的相关性(r)

Table 4　Correlation coefficients between environment factors and soil N_2O emission in greenhouse vegetable field

作物 Crop	处理 Treatment	土壤含水量 Soil moisture	土壤温度 Soil temperature
芹菜 Celery	CK	0.58*	0.50*
	4/4 CN + 0/4 PN	0.46*	0.47*
	3/4 CN + 1/4 PN	0.44*	0.40*
	2/4 CN + 2/4 PN	0.47*	0.49*
	2/4 CN + 2/4 SN	0.52*	0.49*
	CF	0.72**	0.58**
番茄 Tomato	CK	0.51**	0.40*
	4/4 CN + 0/4 PN	0.55**	0.48**
	3/4 CN + 1/4 PN	0.60**	0.49*
	2/4 CN + 2/4 PN	0.59**	0.19
	2/4 CN + 2/4 SN	0.43*	0.44*
	CF	0.69**	0.13

注(Note)：* 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著 Indicate significance at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively. 芹菜季 Celery season, $n=24$；番茄季 Tomato season, $n=26$.

经相关性分析，芹菜季和番茄季各处理 5 cm 土层土壤含水量与土壤 N_2O 排放通量之间呈显著或极显著相关，相关系数分别在 0.44 ～ 0.72 和 0.43 ～ 0.69 之间(表 4)。

3　讨论

3.1　有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响

土壤微生物参与下的硝化与反硝化过程是生成 N_2O 的主要途径[18]，土壤 N_2O 的生成与排放受反应底物碳和氮的双重影响。有研究指出，当有机肥料等碳量施用时，N_2O 的排放主要受外源氮供应水平的制约；而当有机肥料等氮量施用时，N_2O 排放主要受外源碳供应水平的制约[19]。可见，有机肥替代化肥不仅提供了微生物活动所需能量，而且改变了氮素输入形态，通过影响土壤 C/N 比来影响微生物活动，进而影响硝化、反硝化反应产物 N_2O 的生成与排放。目前，对于施用有机肥影响土壤 N_2O 排放的报道较多，但结论不一。董玉红等[20]的研究表明，在等氮量的情况下，化肥配合有机肥施用的土壤 N_2O 排放通量大于单纯的化肥处理，秸秆还田降低了土壤 N_2O 的排放。另有研究表明，等氮条件下，

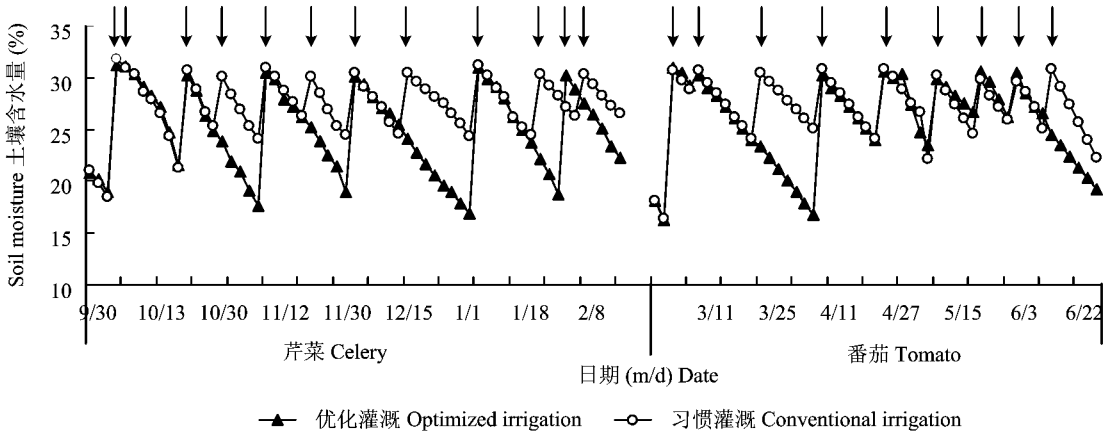

图6 芹菜季和番茄季土壤含水量动态变化

Fig. 6 Variation of soil moisture during celery and tomato growth period

[注(Note): 箭头表示灌水日期 Arrows indicate the date of irrigation.]

施用化肥、有机肥(秸秆和饼肥进行堆肥)和1/2化肥 + 1/2有机肥处理间 N_2O 排放通量的差异不显著[21]。还有研究指出,等氮量施肥条件下,施用猪粪相比于施用化肥能减少农田 N_2O 的排放[22]。李晓等[23]的研究结果表明,在施氮量相同的情况下,N_2O 排放总量在旱作小米生长季以人粪处理最高,尿素、鸡粪和猪粪处理接近,牛粪处理最低;水稻生长季 N_2O 排放量以尿素处理为最高,其次为人粪、鸡粪处理和猪粪处理,牛粪处理最低,与不施氮处理接近。可见,因试验地区的环境因素、土壤类型、耕作制度及肥料投入比例和类型等因素的不同,有机肥对土壤 N_2O 排放的影响也不同。本试验中,在等氮量的情况下,4个有机无机肥配合施用模式处理间,芹菜季和番茄季2/4 CN + 2/4 PN 处理土壤 N_2O 排放量均为最高,分别为1.96和9.75 kg/hm^2,分别是其它3个处理的1.1~1.8和2.7~4.1倍;在相同有机肥氮用量下,施用秸秆较施用有机肥可有效降低土壤 N_2O 排放,芹菜季和番茄季2/4 CN + 2/4 SN 处理土壤 N_2O 排放量较2/4 CN + 2/4 PN 处理分别降低了43.4%和74.2%,这与猪粪和秸秆化学组成的不同有关。设施菜田施入猪粪后,大量的外源碳进入到土体中,并且猪粪分解相对较快,氮素供应较强,能量和养分供应充足时有利于微生物的活动而促进硝化、反硝化反应的进行,导致土壤 N_2O 排放量增加。由于秸秆的C/N比较宽,微生物在分解秸秆的过程中要利用土壤中的氮素来构成自身的体细胞,因此微生物对氮素的争夺利用导致 N_2O 排放量的下降[24]。综上,从节约成本及节能减排方面来看,设施菜田施用秸秆是行之有效的途径。

氮肥施用是影响土壤 N_2O 排放的主要因素,施用氮肥能显著促进土壤 N_2O 的排放[25-26]。本研究表明,芹菜季和番茄季大幅减施肥料的4个有机无机肥配合施用模式处理土壤 N_2O 排放量分别在1.11~1.96 kg/hm^{2}和2.35~9.75 kg/hm^{2}之间,平均为1.65和4.57 kg/hm^2,较CF处理的分别降低了66.3%和85.1%。此外,有机肥全部基施增加了氮的投入量,表现为基施后土壤排放量几乎占芹菜和番茄生育期全部排放量的50%(表3)。可见,施氮显著增加了土壤 N_2O 的排放,而大幅减施肥料的有机无机肥配合施用模式可显著降低土壤 N_2O 的排放。研究证明,N_2O 排放主要发生在施氮之后。梁国庆等[27]的研究结果表明,小麦季和水稻季每次施氮后均会产生 N_2O 排放通量高峰。成都平原水稻-油菜轮作系统 N_2O 排放的监测表明,在氮肥基施和追施后1周左右各观测到1次 N_2O 排放峰[28]。Weitz 等[29]指出,N_2O 排放主要发生在施肥后的第1周,以后逐渐降低至土壤背景值。本研究亦显示,不论芹菜季还是番茄季,施氮后土壤 N_2O 排放均出现上升趋势,在施肥(结合灌水)后7 d内出现排放峰(图2和图3)。

研究表明,肥料的施用方式亦会影响土壤 N_2O 的排放。李鑫等[30]的研究指出,肥料撒施后灌水处理的土壤 N_2O 累积净排放量显著大于撒施后翻耕

和条施后覆土处理。还有研究指出，麦秸均匀混施、埋施覆土和条带状覆盖比不施秸秆处理可以显著降低稻田土壤 N_2O 排放量[31]。本试验中，施肥方式中基肥为撒施后旋耕入土，追肥为肥料溶于水后随水冲施，番茄季 4/4 CN + 0/4 PN 处理 20% 的氮肥基施后 20 d 内土壤 N_2O 排放量为 0.64 kg/hm^2，剩余氮肥按 30%、30%、10% 和 10% 的比例分 4 次追施后 11 d 内土壤 N_2O 排放量分别为 0.18、0.31、0.13 和 0.13 kg/hm^2，在第 1 次和第 2 次追氮量高于基施氮 15% 的情况下，这两次土壤 N_2O 排放量仍显著低于基施后的排放量，表明施肥方式可影响土壤 N_2O 的排放。旋耕可改善土体通气状况，更有利于土壤 N_2O 的排放，而肥料溶于水后随水冲施，养分易随水下渗至土壤深层，减少了土壤表层 N_2O 的生成排放。

3.2　土壤水分对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响

土壤水分通过影响硝化与反硝化过程而影响农田 N_2O 的生成速率，并通过影响 N_2O 在土壤中的扩散与还原速率而影响农田 N_2O 的排放[32]。通常，土壤含水量较低的情况下 N_2O 的产生主要来自于硝化过程，土壤含水量较高时 N_2O 主要通过反硝化过程产生，但当土壤含水量既能促进硝化又能促进反硝化过程时，N_2O 生成与排放量会达到最大值。本试验中，土壤含水量在灌溉后随着时间的推移逐步下降，这种由湿变干的过程有利于 N_2O 的产生与排放。芹菜季和番茄季施用基肥至定植灌水前，各处理土壤 N_2O 排放量逐渐降低，定植灌水后 N_2O 排放通量迅速上升，灌水后 2 ～ 3 d 出现排放峰；追肥与灌水同时进行，在灌水后第 1 d 出现排放峰（图 2 和图 3）。此外，有研究指出，土壤干湿交替会引起土壤 N_2O 的爆发式排放[33]，原因是土壤湿度较低时，土壤积累了一定的碳、氮基质，当土壤湿度急剧上升时，累积的碳、氮基质经由反硝化作用产生 N_2O 释放出来，出现 N_2O 的爆发释放[34]。本试验温室内温度较高，土表水分蒸发较快，每次灌水前土壤含水量较低，但不论芹菜季抑或番茄季，灌溉对施氮处理 N_2O 排放的影响较大，而对不施氮处理的影响较小（图 2 和图 3）。可见，灌溉与施肥同时进行时，更有利于土壤 N_2O 的排放，这与他人研究结果基本一致[14,35]。设施条件下土壤由湿变干过程中 N_2O 排放量高于土壤由干变湿过程中的排放量，避免土壤含水量的急剧变化是种植过程中必须重视的环节，而少量多次灌溉是降低土壤 N_2O 排放的有效方法。此外，有研究表明，种植前地表用地膜覆盖，可增强耕层的保水能力，进而促进土壤 N_2O 的排放[36-37]，对于设施条件下地表覆膜与未覆膜 N_2O 排放的差异需做进一步研究。

3.3　温度对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响

本试验中，土壤 N_2O 排放存在明显的季节性变化规律，其中春季、夏季和秋季土壤 N_2O 排放量较高，冬季相对较低。温度变化是季节变化最明显的特征，因此，温度是影响土壤 N_2O 排放的直接原因，而更深层次的原因是，温度通过影响土壤微生物的活性进而影响着土壤 N_2O 的生成与排放。有研究表明，硝化微生物活动的适宜温度为 15 ～ 35℃，反硝化微生物适宜温度为 5 ～ 75℃[38]。本试验中，芹菜季棚内气温和 5 cm 土层温度分别在 5.4 ～ 25.3℃和 4.1 ～ 23.6℃之间，平均值分别为 13.0℃和 11.2℃（图 4）；番茄季棚内气温和 5 cm 土层温度分别在 18.4 ～ 38.2℃和 15.4 ～ 27.9℃之间，平均值分别为 27.0℃和 23.5℃（图 5）。可见，芹菜季和番茄季均有利于土壤反硝化微生物的活动，而番茄季则更有利于土壤硝化微生物的活动，综合比较下，番茄季土壤温度更有利于土壤 N_2O 的生成排放。本试验中，番茄生育期各处理土壤 N_2O 总排放量在 0.86 ～ 30.72 kg/hm^2 之间，是芹菜生育期的 1.4 ～ 6.3 倍，平均为 3.1 倍。此外，芹菜季从 12 月至收获前，棚内气温和土壤温度均处于较低的状态（图 4），土壤 N_2O 排放量相对较低（表 3），这与他人研究的结果基本一致[14,27,39]。有研究指出，小麦田覆膜后能显著提高 0 ～ 5 cm 耕层土壤温度，而且覆膜使大多数小麦生育期土壤 N_2O 排放通量高于常规耕作，土壤 N_2O 增排的最大影响因子是耕层 5 cm 处土壤温度的变化[40]。可见，地表覆膜能通过改变温度而影响土壤 N_2O 排放。设施栽培中，地表覆膜对于土壤温度变化以及 N_2O 排放的影响程度还有待进一步研究。

参 考 文 献：

[1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N_2O): the dominant dzone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science, 2009, 326(5949): 123-125.

[3] IPCC. Climate change 2007: synthesis report [R]. Cambridge:

Cambridge University Press, 2007.

[4] Pattey E, Edwards G C, Desjardins R L *et al*. Tools for quantifying N_2O emissions from agro-ecosystems[J]. Agric. for. Meteorol., 2007, 142: 103-119.

[5] 张强，巨晓棠，张福锁. 应用修正的IPCC2006方法对中国农田N_2O排放量重新估算[J]. 中国生态农业学报，2010，18(1)：7-13.
Zhang Q, Ju X T, Zhang F S. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2010, 18(1): 7-13.

[6] Meijide A, Diez J A, Sánchez-Martín L *et al*. Nitrogen oxide emissions from an irrigated maize crop amended with treated pig slurries and composts in a Mediterranean climate[J]. Agric. Ecosys. Environ., 2007, 121: 383-394.

[7] Ju X T, Kou C L, Christie P *et al*. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environ. Poll., 2007, 145: 497-506.

[8] 余海英，李廷轩，张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学，2010，43(3)：514-522.
Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(3): 514-522.

[9] 黄绍文，王玉军，金继运，等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(4)：906-918.
Huang S W, Wang Y J, Jin J Y *et al*. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(4): 906-918.

[10] 高伟，朱静华，高宝岩，等. 天津市设施蔬菜不同种植年限土壤及地下水养分特征[J]. 华北农学报，2010，25(2)：206-211.
Gao W, Zhu J H, Gao B Y *et al*. Characteristic of soil and groundwater nutrient in different age greenhouse vegetable cultivation in Tianjin[J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2010, 25(2): 206-211.

[11] 张光亚，陈美慈，闵航，等. 设施栽培土壤氧化亚氮释放及硝化、反硝化细菌数量的研究[J]. 植物营养与肥料学报，2002，8(2)：239-243.
Zhang G Y, Chen M C, Min H *et al*. Research of N_2O flux from greenhouse and nitrifier and denitrifier numbers[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(2): 239-243.

[12] 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: 1666-1672.

[13] 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]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2010, 26(5): 269-275.

[14] 武其甫，武雪萍，李银坤，等. 保护地土壤N_2O排放通量特征研究[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(4)：942-948.
Wu Q F, Wu X P, Li Y K *et al*. Studies on the fluxes of nitrous oxide from greenhouse vegetable soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(4): 942-948.

[15] 曹兵，贺发云，徐秋明，等. 南京郊区番茄地中氮肥的效应与去向[J]. 应用生态学报，2006，17(10)：1839-1844.
Cao B, He F Y, Xu Q M *et al*. Use efficiency and fate of fertilizer N in tomato field of Nanjing suburb[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(10): 1839-1844.

[16] 周鹏，李玉娥，刘利民，等. 施肥处理和环境因素对华北平原春玉米田N_2O排放的影响—以山西晋中为例[J]. 中国农业气象，2011，32(2)：179-184.
Zhou P, Li Y E, Liu L M *et al*. Effects of fertilization and environment factors on N_2O emission in spring corn field in north China plain-a case study of Jinzhong in Shanxi province[J]. Chin. J. Agrometeorol., 2011, 32(2): 179-184.

[17] 刘运通，万运帆，林而达，等. 施肥与灌溉对春玉米土壤N_2O排放通量的影响[J]. 农业环境科学学报，2008，27(3)：997-1002.
Liu Y T, Wan Y F, Lin E D *et al*. N_2O flux variations from spring maize soil under fertilization and irrigation[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2008, 27(3): 997-1002.

[18] Eghball B, Power J F, Gilley J E *et al*. Nutrient, carbon, and mass loss during composting of beef cattle feedlot manure[J]. J. Environ. Qual., 1997, 26: 189-193.

[19] Chadwick D R, Pain B F, Brookman S K. Nitrous oxide and methane emissions following application of animal manures to grassland[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 277-287.

[20] 董玉红，欧阳竹，李运生，等. 不同施肥方式对农田土壤CO_2和N_2O排放的影响[J]. 中国土壤与肥料，2007，(4)：34-39.
Dong Y H, Ouyang Z, Li Y S *et al*. Influence of different fertilization on CO_2 and N_2O fluxes from agricultural soil[J]. China Soils Fert., 2007, (4): 34-39

[21] 孟磊，蔡祖聪，丁维新. 长期施肥对华北典型潮土N分配和N_2O排放的影响[J]. 生态学报，2008，28(12)：6197-6203.
Meng L, Cai Z C, Ding W X. Effects of long-term fertilization on N distribution and N_2O emission in fluvoaquci soil in North China[J]. Acta Ecol. Sin., 2008, 28(12): 6197-6203.

[22] Vallejo A, Skiba U M, García T L *et al*. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts[J]. Soil Biol. Biochem., 2006, 38(9): 2782-2793.

[23] 李晓，颜晓元，邢光熹，等. 不同动物排泄物氮的作物利用及对N_2O排放的贡献[J]. 土壤，2008，40(4)：548-553.
Li X, Yan X Y, Xing G X *et al*. Nitrogen utilization ratio and N_2O emission from different animal manures[J]. Soils, 2008,

40(4)：548-553.

[24] 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.
Zou J W, Huang Y, Zong L G *et al*. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy[J]. Environ. Sci., 2003, 24(4): 7-12.

[25] 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[J]. 中国农业科学，2008，41(4)：1248-1254.
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[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(4): 1248-1254.

[26] Lin S, Iqbal J, Hu R G *et al*. N_2O emissions from different land uses in mid-subtropical China[J]. Agric. Ecosys. Environ., 2010, 136: 40-48.

[27] 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)：304-211.
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): 304-211.

[28] 于亚军，朱波，王小国，等. 成都平原水稻-油菜轮作系统氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报，2008，19(6)：1277-1282.
Yu Y J, Zhu B, Wang X G *et al*. N_2O emission from rice-rapeseed rotation system in Chengdu Plain of Sichuan Basin[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(6): 1277-1282.

[29] Weitza A M, Linderb E, Frolking S *et al*. N_2O emissions from humid tropical agricultural soils: effects of soil moisture, texture and nitrogen availability[J]. Soil Biol. Biochem., 2001, 33: 1077-1093.

[30] 李鑫，巨晓棠，张丽娟，等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报，2008，19(1)：99-104.
Li X, Ju X T, Zhang L J *et al*. Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(1): 99-104.

[31] Ma J, Ma E D, Xu H *et al*. Wheat straw management affects CH_4 and N_2O emissions from rice fields [J]. Soil Biol. Biochem., 2009, 41: 1022-1028.

[32] 张玉铭，胡春胜，张佳宝，等. 农田土壤主要温室气体(CO_2、CH_4、N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报，2011，19(4)：966-975.
Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B *et al*. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2, CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2011, 19(4): 966-975.

[33] Garciaamontiel D C, Steudler P A, Piccolo M *et al*. Nitrogen oxide emissions following wetting of dry soils in forest and pastures in Rondônia, Brazil[J]. Biogeochemistry, 2003, 64: 319-336.

[34] 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 B. 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.

[35] 刘运通，万运帆，林而达，等. 施肥与灌溉对春玉米土壤 N_2O 排放通量的影响[J]. 农业环境科学学报，2008，27(3)：997-1002.
Liu Y T, Wan Y F, Lin E D *et al*. N_2O flux variations from spring maize soil under fertilization and irrigation[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2008, 27(3): 997-1002.

[36] 朱咏莉，吴金水，韩建刚. 地膜覆盖对土壤中 N_2O 释放的影响[J]. 农业工程学报，2004，20(3)：222-225.
Zhu Y L, Wu J S, Han J G. Effects of clear plastic film mulching on soil N_2O discharge flux[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2004, 20(3): 222-225.

[37] Christine K, Klaus D, Zheng X H *et al*. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2007, 77: 293-304.

[38] 郑循华，王明星，王跃思，等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J]. 环境科学，1997，18(5)：1-5.
Zheng X H, Wang M X, Wang Y S *et al*. Impacts of temperature on N_2O production and emission[J]. Chin. J. Environ. Sci., 1997, 18(5): 1-5.

[39] 邱炜红，刘金山，胡承孝，等. 不同施氮水平对菜地土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报，2010，29(11)：2238-2243.
Qiu W H, Liu J S, Hu C X *et al*. Effects of nitrogen application rates on nitrous oxide emission from a typical intensive vegetable cropping system[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2010, 29(11): 2238-2243.

[40] 白红英，孙华，李世清，等. 地膜的水热效应与麦田土壤 N_2O 排放[J]. 农业环境科学学报，2009，28(10)：2111-2118.
Bai H Y, Sun H, Li S Q *et al*. Effects of film mulching on soil water and temperature and N_2O emissions in wheat fields[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2009, 28(10): 2111-2118.