

减量施氮与秸秆添加对设施菜田 N₂O 的减排效应^①

赵 营¹, 罗健航¹, 李贵兵², 刘晓彤¹, 张学军^{1*}

(1 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2 贺兰县农牧局, 宁夏贺兰 750200)

摘 要: 采用静态箱-气相色谱法, 在宁夏灌区设施菜田研究了不施肥(CK)、单施有机肥(M)、常规施肥(CON)、减量优化化肥(OPT)、优化化肥+调节土壤碳氮比(OPT + C/N) 5 种施肥方式对春茬黄瓜和夏休闲期土壤 N₂O 排放通量、累积排放量和排放系数的影响。结果表明: 各施肥处理土壤 N₂O 排放通量高峰一般出现在黄瓜滴灌施肥或夏休闲期漫灌后第 1 天或第 3 天。春茬黄瓜基肥、追肥和夏休闲期, OPT、OPT + C/N 处理土壤 N₂O 排放通量较 CON 处理分别降低了 3.6%~47.2%、5.9%~49.9% 和 14.7%~46.6%。春茬黄瓜季和夏休闲期各施肥处理的 N₂O 累积排放量分别为 2.05~9.98 kg/hm² 和 3.55~7.23 kg/hm², OPT、OPT + C/N 处理较 CON 处理分别降低了 26.2%~34.3% 和 29.6%~33.7%。春茬黄瓜当季肥料的 N₂O 排放系数为 0.43%~0.71%, 而春茬黄瓜-夏休闲期总排放系数为 0.54%~1.04%。N₂O 总排放量与施氮量呈显著正相关($R^2 = 0.778$); N₂O 排放通量与 5 cm 表层地温呈显著或极显著相关($R^2 = 0.47 \sim 0.68$), 与 0~20 cm 土壤含水量呈极显著相关($R^2 = 0.63 \sim 0.88$)。因此, 相对于农民常规施氮方式, 减施 50% 化肥氮量或减氮配合添加 7.5 t/hm² 的小麦秸秆来调节土壤碳氮比都能达到设施菜田土壤 N₂O 的减排目标。

关键词: 宁夏灌区; 减量施氮; 秸秆添加; 设施菜田; 春茬黄瓜; 裸地夏休闲; N₂O 排放

中图分类号: S532; S14-31 **文献标识码:** A

氧化亚氮(N₂O)作为温室气体之一, 其排放被认为是臭氧层破坏的最重要因子^[1]。农田土壤对温室气体起着源和汇的作用^[2], 农业源 N₂O 排放的贡献率占到人类活动产生的 N₂O 总量的 2/3 以上^[3]。张强等^[4]研究发现, 2007 年我国农田化学氮肥投入、有机物质投入和作物秸秆投入对 N₂O 直接排放的贡献率分别为 77.64%、15.57% 和 6.46%。集约化菜田具有肥料投入大、复种指数高和农事操作频繁等特点, 其施肥量通常是粮田等农田系统的 3 倍~4 倍^[5], 而我国设施菜地占蔬菜种植面积的 18%^[6]。设施菜田 N₂O 年排放量可达 N 15.9 kg/hm²^[7], 是粮田的 5 倍^[8], 设施菜田也是农业生产系统中重要的 N₂O 排放源。研究表明, 设施菜田大量的氮肥投入造成土壤 C/N 比值快速下降^[9], 长期添加小麦秸秆并深施有利于降低 N₂O 排放, 同时通过秸秆反应堆可以提高设施菜田土壤 C/N 比^[10]。减氮和添加秸秆管理能使设施菜田土壤形成自身的反硝化菌群结构, 并降低 NO 和 N₂O 排放风险^[11]。但姜宁宁等^[12]在饱和田间持水量 75%、温度 25℃ 的条件下, 通过室内培养试验研究设施菜

地土壤在不同氮肥供应和秸秆添加情况下 N₂O 排放特征发现, 添加秸秆后各处理 N₂O 排放明显增加, 比未施秸秆处理增加 1 倍多。秸秆添加对宁夏灌区设施菜田土壤 N₂O 是否具有减排作用还未得到试验证实。

宁夏灌区(或称宁夏引黄灌区)的农业生产集约化程度高、化肥等农业要素投入大, 设施蔬菜的氮肥年投入量高达 N 1 600 kg/hm² 以上^[13], 加之相对粗放的管理方式, 由此带来的农业面源污染较为严重^[14]。引黄淤灌是宁夏灌区农田典型的灌溉方式, 由此产生了独特的土壤类型——灌淤土^[15], 其占该区域耕地面积的 80%。宁夏灌区设施菜田的氮肥投入是粮田的 2 倍~3 倍, 0~150 cm 土壤剖面 NO₃-N 累积量为粮田的 1.5 倍~3.4 倍, 且主要累积在 0~5 cm 和 5~20 cm 土层^[16], 增加了土壤氮素气体损失的风险。宁夏灌区设施菜田在夏休闲期(6 月中旬至 7 月中下旬), 普遍存在引黄河水大水漫灌洗盐的管理方式, 由此造成氮素淋失加剧, 通过减量施氮和添加作物秸秆等方式调节土壤 C/N 比可有效地降低设施菜田土壤氮素淋失^[17]。在宁夏灌区特有的土壤条件和水肥管理条件

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361062, 41401319)资助。

* 通讯作者(zhxjun2002@163.com)

作者简介: 赵营(1979—), 男, 河南项城人, 博士, 副研究员, 主要从事农田养分循环与环境研究。E-mail: tony029@126.com

下,减量施氮和秸秆添加对设施菜田 N_2O 排放特征的影响研究还比较缺乏,尤其是夏休闲期引黄漫灌条件下的 N_2O 减排效应如何还不清楚。因此,笔者利用宁夏灌区设施菜田定位施肥试验基地(始于 2007 年全国种植业源污染监测宁夏重点监测点),采用静态箱-气相色谱方法,研究了春茬黄瓜和夏休闲期减量施氮与秸秆添加对土壤 N_2O 排放通量、累积排放量和排放率的影响,分析了 N_2O 排放的关键影响因素,以为宁夏灌区设施菜田 N_2O 减排措施的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年 3—7 月在宁夏银川掌政镇杨家寨五队设施菜田地下淋溶监测基地进行。该基地始于 2007 年 12 月,为全国种植业源污染物流失系数测算项目宁夏重点监测基地(106°21'27" E, 38°26'51" N)。该地属于半干旱平原区,海拔 1 069 m,主要气候特点是干旱少雨,年降雨量 200 mm 左右,年均蒸发量 1 100~1 600 mm,年均气温 8~9℃。试验地土壤类型为灌淤土,属于高肥力田块,0~20 cm 土壤理化性质为:土壤容重 1.37 g/cm³, pH 8.27,有机质 30.1 g/kg,全氮 1.96 g/kg,速效氮(硝态氮+铵态氮) 31.5 mg/kg,有效磷 151.8 mg/kg,速效钾 260.9 mg/kg。试验地为日光温室种植黄瓜。

1.2 试验设计

试验设 5 个施肥处理为:对照(CK),不施任何肥料肥;单施有机肥(M),不施用化肥,施用有机肥用量为 18 t/hm²;常规施肥(CON),有机肥用量同 M 处理,化肥用量根据当地农户调查平均数据结果,春茬黄瓜氮、磷、钾化肥总用量分别为 N 600 kg/hm²、P₂O₅ 300 kg/hm²、K₂O 450 kg/hm²;优化化肥(OPT),有机肥用量同 M 处理,在 CON 处理基础上氮、磷、钾化肥分别减量 50%、60% 和 20%,总用量分别为 N 300 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 360 kg/hm²;

优化化肥+调节土壤碳氮比(OPT+C/N),在 OPT 处理基础上,通过施用 7.5 t/hm² 秸秆调节土壤碳氮比。每个处理 3 次重复,各小区面积为 23.4 m² (6 m × 3.9 m),随机区组排列。有机肥为风干鸡粪(干基:N 18.6 g/kg),秸秆为小麦秆(有机碳和全氮含量分别为 475.6 g/kg 和 17.6 g/kg, C/N > 27);氮肥为含 N 质量分数 46% 的普通尿素,磷肥为含 P₂O₅ 质量分数 46% 的重过磷酸钙,钾肥为含 K₂O 质量分数 50% 的硫酸钾。全部磷肥、有机肥、秸秆用作基肥,氮、钾肥基

追比为 3:7,基肥方式为撒施,追肥采用膜下滴灌。CON 和 OPT 处理基追肥运筹见表 1。

表 1 常规施肥(CON)和优化化肥(OPT)处理基追肥运筹(kg/hm²)

Table 1 Base and topdressing fertilizers in treatments of conventional fertilization (CON) and optimal fertilization (OPT)

日期	基/追肥	N		K ₂ O	
		CON	OPT	CON	OPT
2016-03-04	基肥	180	90	135	108
2016-04-15	追肥 1	120	60	90	72
2016-05-11	追肥 2	180	90	135	108
2016-05-28	追肥 3	120	60	90	72
	合计	600	300	450	360

春茬黄瓜(品种为德尔 99)种植前,2016 年 3 月 3 日整地施肥,采用棚内机械翻耕 20~30 cm。小区耕翻土壤之后起垄(垄宽 130 cm,高 30 cm,垄间距 50 cm),垄上铺设滴灌设备(不同施肥处理设置专用滴灌施肥控制阀门),覆膜后移栽黄瓜。于 3 月 4 日移栽定植,定植密度为 4.7 万株/hm²,定植完全部滴灌清水一次,滴灌量 20 mm。黄瓜生育期间膜下滴灌追肥 3 次(表 1)。6 月 11 日黄瓜地上部全部收获。春茬黄瓜收获后,立刻机械翻耕,并平整土地,同时揭开棚膜,进入夏季裸地休闲至 7 月中旬。6 月 14 日引黄河水进行大水漫灌洗盐一次,灌水量为 132 mm。其他管理按当地习惯进行。

1.3 样品采集与测定

利用静态箱-气相色谱法采集测定不同施肥处理下土壤 N_2O 排放浓度。静态箱圆筒形尺寸为 320 mm × 600 mm(图 1),静态密闭箱装置底座安装在畦上,嵌入土体 5 cm 左右。每个小区安装一个固定底座,不取气体样时,底座中间土壤覆上地膜。取样时,揭开地膜 3~5 min 后将箱体置于密封槽中,且槽中加入水密封隔绝。密闭箱顶部装一小风扇(电压 12 V),用于搅拌混合均匀箱内气体。取样箱顶端有一直径 10 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针管注射器,将针头通过橡胶塞插到取样箱中,来回抽动 3 次以上,以保证取样气体均匀。取 50 ml 箱内气体,立刻注入气袋中,带回实验室用气象色谱法测定 N_2O 浓度,测定方法参考文献[18]。

在春茬黄瓜生育期内基、追肥后,以及设施菜田夏休闲期间大水漫灌泡田后分别进行原位动态 N_2O 排放监测,气体采集时间在上午 9:00—11:00。春茬黄瓜生育期间,基追肥后第 1、3、5、7、11 天各监测 1 次(基肥后加测到第 15 天前,直至各施肥处理 N_2O 排放通量无差异时为止);夏休闲期大水漫

灌后于第 1、3、5、7、11 天各采集 1 次气体。每次取样时,用 50 ml 注射器连续采集不同施肥处理 0、10、20、30 min 的 4 个样品。每次采气时记录采样箱内温度。每次采集气体样品前后,采用 AR5 气象要素自动观测系统(北京雨根科技有限公司)测定表层土壤温度(5 cm)、湿度和气温等,日均气温、温室气体和表层土壤温度变化动态如图 2 所示。

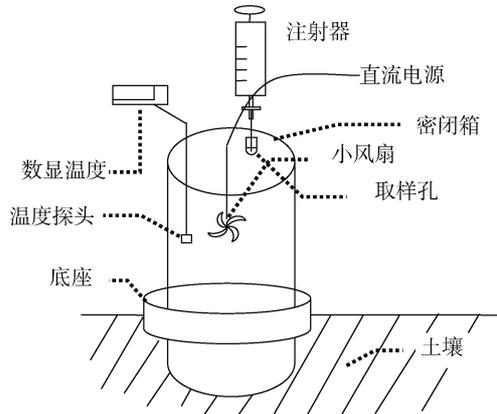


图 1 静态密闭箱装置示意图
Fig. 1 Diagram of the closed box device

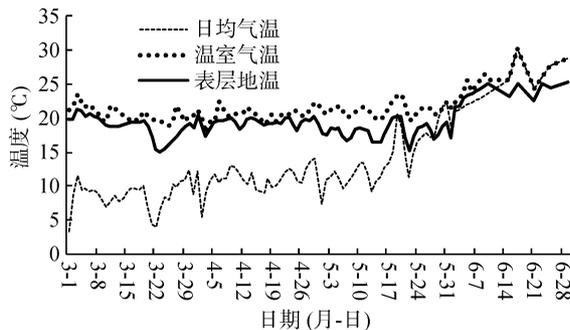


图 2 2016 年春茬黄瓜-夏休闲监测期温室气温、表层地温和日均气温变化动态(6 月 11 日起休闲期揭开棚膜)

Fig. 2 Air temperature, topsoil temperature in greenhouse and daily average atmosphere temperature during monitoring period of spring cucumber and summer fallow in 2016 (Greenhouse film was uncovered from Jun. 11 during the summer fallow)

1.4 数据处理

N₂O 排放通量:

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

式中: F 为 N₂O 排放通量($\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$); ρ 为 N₂O 标准状态下的密度($1.964 \text{ kg}/\text{m}^3$); H 为取样箱高度(m); $\Delta c/\Delta t$ 为单位时间静态箱内的 N₂O 气体浓度变化率($\text{ml}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$); T 为测定时箱体内的平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

排放系数(%) = (施氮处理 N₂O 排放量 - 不施氮处理 N₂O 排放量) / 施氮量 $\times 100$

文中土壤 N₂O 排放量为各监测阶段 N₂O 排放量的累加,各监测阶段 N₂O 排放量是在该时期测定的

N₂O 排放通量的基础上,由相邻两个测定日期的 N₂O 排放通量平均值与间隔天数的乘积来估算未测定日期的 N₂O 排放量^[18]。每个施肥处理的 N₂O 排放通量为 3 个重复的平均值。

文中所有数据均采用 Excel 2007 和 DPS7.05 软件进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 春茬黄瓜-夏休闲期土壤 N₂O 排放通量动态变化

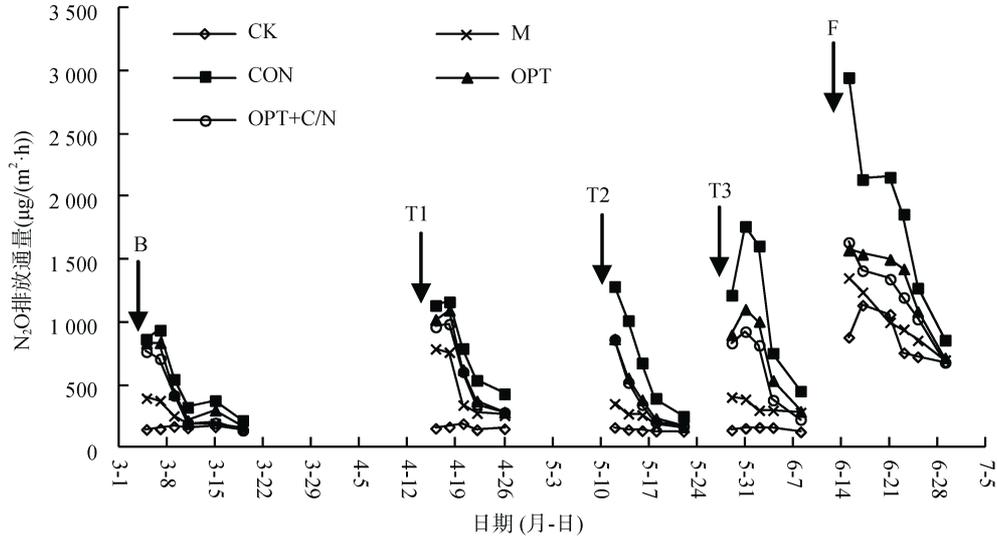
由图 3 可看出,从春茬黄瓜季到夏休闲期,随着气温的不断升高(图 2),除 CK 处理外,不同施肥处理下土壤 N₂O 排放通量呈增加的趋势,且排放高峰一般在施肥或灌水后第 1 天或第 3 天。春茬黄瓜的同一监测时期内,CON 处理的土壤 N₂O 排放通量都最高,基肥、追肥后排放通量峰值分别达 936.8、1 162.4 ~ 1 763.0 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。OPT 处理在基肥、追肥后排放通量峰值分别为 837.4、866.8 ~ 1 102.0 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,OPT + C/N 处理峰值分别为 765.2、863.1 ~ 986.1 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。在夏休闲期大水漫灌和裸地晒田条件下,尽管没有施入任何氮肥,但休闲期不同施肥处理下土壤 N₂O 排放通量较春茬黄瓜季各时期明显提高,尤其是 CON 处理,休闲期土壤 N₂O 排放通量高达 857.9 ~ 2 947.5 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,大水漫灌后第 1 天就达排放峰值;OPT 和 OPT + C/N 处理的排放通量分别为 716.3 ~ 1 573.1 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 680.2 ~ 1 635.2 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;即使夏休闲期 CK 处理下,土壤 N₂O 排放通量也达到 680.7 ~ 1 135.4 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。各个时期,M 处理下土壤 N₂O 排放通量主要在第一次追肥和夏休闲期,其他时期通量差异不大。春茬黄瓜基肥、追肥和夏休闲期,OPT 处理 N₂O 排放通量较 CON 处理分别降低了 3.6% ~ 33.1%、5.9% ~ 45.2% 和 14.7% ~ 46.6%;OPT + C/N 处理分别降低了 11.5% ~ 47.2%、15.1% ~ 49.9%、19.3% ~ 44.5%。由此可见,相对于 CON 处理,减量施氮和秸秆添加调节土壤碳氮比处理(OPT 和 OPT + C/N)都能降低不同时期土壤 N₂O 排放通量,在夏休闲期和春茬黄瓜追肥时减排效果更明显。

2.2 减量施氮和秸秆添加条件下土壤 N₂O 排放量

表 2 为春茬黄瓜基追肥后减量施氮和秸秆添加条件下土壤 N₂O 排放量及生育期内排放系数。从表 2 可以看出,黄瓜基肥后 20 d,不同施肥处理下土壤 N₂O 排放量为 0.74 ~ 2.24 kg/hm^2 ,占黄瓜季总排放量的 22.5% ~ 36.3%。3 次追肥后 11 d 不同施肥处理下 N₂O 排放量分别为 0.46 ~ 2.35、0.41 ~ 2.14、0.43 ~

3.25 kg/hm², 分别占当季总排放量的 22.5%~33.4%、16.9%~21.4%、21.1%~32.6%。第二次追肥量是第一、第三次追肥的 2 倍, 但由于黄瓜处于盛果期, 对水分养分需求较高, 该时期 N₂O 排放量反而不高, 而且 OPT、OPT+C/N 处理相对于 CON 处理, 都能显著降低 N₂O 的排放量, 其他黄瓜生育时期也具有减排作用, 但均未达显著水平。整个春茬黄瓜生育期

内, 不同施肥处理下土壤 N₂O 排放量累积达 2.05~9.98 kg/hm², CON 处理最高; 与 CON 处理相比, OPT、OPT+C/N 处理下 N₂O 排放量分别降低了 26.2% 和 34.3%, 其中 OPT+C/N 处理降低显著。施肥处理 N₂O 排放系数为 0.43%~0.71%, 处理间差异不显著, 但 OPT、OPT+C/N 处理较 CON 处理的排放系数可分别降低 0.06 和 0.23 个百分点。



(图中箭头 B、T1、T2、T3、F 分别表示 3 月 4 日基肥、4 月 15 日追肥、5 月 11 日追肥、5 月 28 日追肥和 6 月 14 日夏休闲期大水漫灌)

图 3 2016 年春茬黄瓜-夏休闲期土壤 N₂O 排放通量动态变化

Fig. 3 Soil N₂O emission fluxes during spring cucumber-summer fallow period in 2016

表 2 春茬黄瓜减量施氮和秸秆添加条件下土壤 N₂O 排放量及排放系数

Table 2 Ratios and amounts of N₂O emission under reduction of N and addition of crop residues in spring cucumber season

处理	黄瓜季施肥后 N ₂ O 排放量(kg/hm ²)				黄瓜季 N ₂ O 排放量 (kg/hm ²)	黄瓜季 N ₂ O 排放系数(%)
	基肥后 20 d 排放量	追肥后 11 d 排放量				
		第 1 次	第 2 次	第 3 次		
CK	0.74 ± 0.15 b	0.46 ± 0.02 c	0.41 ± 0.04 c	0.43 ± 0.14 b	2.05 ± 0.26 d	-
M	1.14 ± 0.23 ab	1.42 ± 0.27 b	0.72 ± 0.37 bc	0.97 ± 0.26 b	4.25 ± 0.52 cd	0.43 ± 0.14 a
CON	2.24 ± 0.28 a	2.35 ± 0.52 a	2.14 ± 0.47 a	3.25 ± 2.09 a	9.98 ± 3.00 a	0.71 ± 0.26 a
OPT	1.90 ± 1.26 a	1.96 ± 0.41 ab	1.32 ± 0.71 b	2.18 ± 0.59 ab	7.37 ± 0.74 ab	0.65 ± 0.11 a
OPT + C/N	1.62 ± 0.18 ab	1.84 ± 0.23 ab	1.27 ± 0.45 b	1.82 ± 0.67 ab	6.56 ± 1.17 bc	0.48 ± 0.13 a

注: 表中数据为平均值 ± 标准差; 同列数据不同小写字母表示处理间差异在 P<0.05 水平显著; 下同。

表 3 春茬黄瓜-夏休闲期减量施氮和秸秆添加条件下土壤 N₂O 总排放量及排放系数

Table 3 Total ratios and amounts of N₂O emission under reduction of N and addition of crop residues in spring cucumber-summer fallow period

处理	夏休闲漫灌后 20 d N ₂ O 排放量(kg/hm ²)	黄瓜季+夏休闲 N ₂ O 总排放量 (kg/hm ²)	黄瓜季+夏休闲 N ₂ O 总排放系数(%)
CK	3.55 ± 0.56 c	5.61 ± 0.77 c	-
M	4.13 ± 0.07 bc	8.38 ± 0.57 c	0.54 ± 0.26 b
CON	7.23 ± 1.04 a	17.21 ± 2.50 a	1.04 ± 0.18 a
OPT	5.09 ± 0.70 b	12.46 ± 1.44 b	0.84 ± 0.26 ab
OPT + C/N	4.79 ± 0.55 bc	11.35 ± 1.30 b	0.61 ± 0.09 b

由表 3 数据可知, 在设施菜田裸地夏休闲期, 一次大水漫灌 20 d 后, 不同施肥处理的土壤 N₂O 排放量高达 3.55~7.23 kg/hm², OPT、OPT + C/N 处理较 CON 处理分别显著地降低了 29.6% 和 33.7%。春茬黄瓜和夏休闲期各施肥处理的 N₂O 总排放量为 5.61~17.21 kg/hm², 总排放系数为 0.54%~1.04%, 均是 CON 处理最高, 单施有机肥 M 处理的 N₂O 排放也不容忽视; 与 CON 处理相比, OPT、OPT + C/N 处理 N₂O 总排放量分别显著地降低了 27.6% 和 34.1%, 总排放系数减少了 0.20 和 0.43 个百分点。因此, 减

量施氮和秸秆添加调节土壤碳氮比都能达到设施菜田减排 N₂O 的目的，二者的综合措施效果更佳。

2.3 设施菜田土壤 N₂O 排放的影响因子

2.3.1 施氮量 图 4 显示了春茬黄瓜季施氮量与春茬黄瓜-夏休闲期 N₂O 总排放量的相互关系，可以看出，二者呈显著线性正相关($R^2 = 0.778$)。这表明，随着设施蔬菜施氮量的增加，土壤 N₂O 排放的风险也显著提高，合理地减量施氮是实现 N₂O 减排的直接手段，在减施氮肥的基础上再配合外源碳的添加(如秸秆添加等)，以增加土壤残留氮素的生物固定，其减排效应更明显。

2.3.2 土壤水分和温度 通过分别拟合春茬黄瓜-夏休闲期设施菜田表层地温(5 cm)、土壤水分(0~20 cm)与不同施肥处理下土壤 N₂O 排放通量的关系(表 4)，发现表层地温与各施肥处理下 N₂O 排放通量呈显著或极显著相关，相关系数 R^2 在 0.47~0.68；土壤水分与 N₂O 排放通量均呈极显著相关，相关系数 R^2 在 0.63~0.88。这说明，土壤水分和地温也是影响土壤 N₂O 排放的关键因子，而灌溉和气温是影响土壤水分和地温的直接因素，这也进一步解释了夏季休闲期一次大水漫灌造成较高 N₂O 排放的原因。因此，合理地控制灌溉量、灌溉频次和温室气温也能调控土壤 N₂O 的排放。

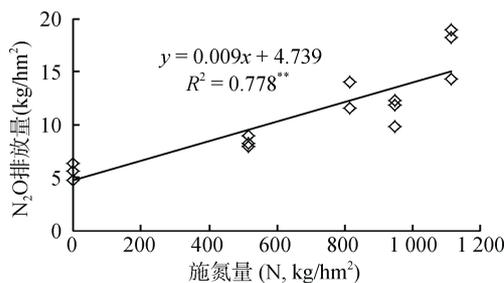


图 4 施氮量与土壤 N₂O 排放量的相关关系

Fig. 4 Correlation between N application rate and soil N₂O emission amount

表 4 设施菜田表层地温(5 cm)、土壤水分(0~20 cm)与土壤 N₂O 排放通量的相关性

Table 4 Correlation coefficients between topsoil temperature (5 cm), soil water content (0~20 cm) and soil N₂O emission flux in greenhouse vegetable field

处理	表层地温(°C)	土壤水分(%)
CK	0.68**	0.88**
M	0.56**	0.79**
CON	0.52**	0.65**
OPT	0.50**	0.63**
OPT + C/N	0.47*	0.67**

注：*和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著相关。

3 讨论

3.1 施氮对 N₂O 排放的影响

氮肥用量、种类、施肥方式及施肥时间都会影响土壤 N₂O 排放^[19]，肥料氮转化为 N₂O 的平均排放系数为 0.9%^[20]。氮素在集约化菜田上的转化过程对土壤 N₂O 排放总量的贡献大小不同，自养硝化作用、异养硝化作用和反硝化作用对 N₂O 排放的贡献分别为 0.3%~31.4%、25.4%~54.4% 和 22.5%~57.7%^[21]。氮素的施用显著影响 N₂O 排放通量，土壤 N₂O 排放量一般随着氮肥用量增加而增大，露地蔬菜施氮量 0~1 640 kg/hm² 范围，土壤 N₂O 排放系数范围为 0.33%~1.13%，且施氮水平与土壤 N₂O 排放总量呈显著的指数函数关系^[22]。本研究通过减量施氮(OPT)能降低春茬黄瓜季和夏休闲期各个时期的土壤 N₂O 排放通量，与 CON 处理相比，OPT 处理下 N₂O 排放量也分别降低了 26.2%和 29.6%；与邱炜红等^[22]结果不同的是，本试验中施氮量与春茬黄瓜-夏休闲期 N₂O 总排放量呈显著线性正相关($R^2 = 0.778$)，而这与山东寿光设施菜田土壤 N₂O 排放与氮肥施用量显著正相关的研究结果一致^[23]。在山东寿光秋冬茬设施番茄上，减少近 60% 化肥氮的优化施氮处理相对于农民习惯施肥处理可降低 34.1% 的 N₂O 排放总量，同时增产 2.2%^[24]。在南方设施菜田，相对于当地农民习惯施氮，减施 40% 的化肥氮，可降低 33% 的 N₂O 累积排放量，而不会影响蔬菜产量^[25]。本试验中 OPT 处理相对于 CON 处理减施 50% 的化肥氮，N₂O 排放总量降低了 26.2%~29.6%(表 2 和表 3)，设施蔬菜产量可提高 1.5%~7.2%^[17]。也有研究表明，在京郊设施番茄种植体系，与习惯施肥处理相比，施用控释肥处理明显降低 N₂O 的排放，平均减排 38.1%~47.0%^[26]；在集约化菜地，减氮或常规施氮的基础上添加硝化抑制剂也能降低菜地 N₂O 排放总量和排放系数^[27]。因此，合理减量优化氮肥是降低农田 N₂O 排放的必要措施。

3.2 有机物料添加对 N₂O 排放的影响

有机肥等外源物料和氮肥对土壤 N₂O 排放影响的差异主要归因于有机物料添加对土壤反硝化程度影响的不同^[19]。设施菜田长期传统施肥措施改变了土壤反硝化菌的结构和功能，增加土壤自身的 NO 产生能力并减弱了 N₂O 还原 N₂ 的能力，减氮和添加秸秆措施调节了土壤氮素转化过程，从而降低 N₂O 排放量^[11]。在温室菜田长期添加秸秆处理显著提高 0~20 cm 土层土壤反硝化量，显著降低追肥灌溉后表层土壤 N₂O 的排放峰值和土壤底层 50 cm 处 N₂O 浓度

峰值^[9];设施菜田中添加小麦秸秆并深施有利于降低 N₂O 排放。添加外源有机碳的种类也对 N₂O 排放影响不同,以玉米秸秆作为碳源时,水、碳、氮 3 因子对黄绵土 N₂O 累积排放量的影响大小均表现为有机碳>水分>氮素;以黑炭作为碳源时,水、碳、氮 3 因子对黄绵土 N₂O 累积排放量的影响为有机碳>氮素>水分^[28]。罗天相等^[29]通过田间试验研究了秸秆不同施用方式下接种蚯蚓对水稻旱作土壤 N₂O 排放通量的影响,发现在秸秆表施的情况下,接种蚯蚓处理显著提高了 N₂O 排放量,在秸秆混施的情况下,接种蚯蚓处理对 N₂O 排放量影响不大,接种蚯蚓对 N₂O 排放的贡献主要是促进秸秆混入土壤,从而加快了秸秆分解和 N₂O 排放。研究表明^[30-31],菜田种植中有机无机物料配合有利于降低土壤 N₂O 排放和肥料损失,在等氮量投入时,施用秸秆较施用猪粪等有机肥可有效降低土壤 N₂O 排放,且有机无机肥料以 1:1 配施是合适的稳产减排措施。在紫色土旱作农田冬小麦-夏玉米轮作系统,施用猪厩肥能显著增加 N₂O 排放量,而秸秆还田在保证作物产量的同时显著地降低了 N₂O 排放量(猪厩肥和秸秆占总施氮量的 40%)^[32]。在本试验条件下,春茬黄瓜季和夏休闲期,与 CON 处理相比,OPT + C/N 处理 N₂O 排放量分别显著降低了 34.3%、33.7%,这也进一步证实了减量优化施氮基础上秸秆添加更有利于土壤 N₂O 减排。

3.3 环境因子对 N₂O 排放的影响

除施肥外,土壤水热状况、土壤质地、pH 等环境因子也强烈地影响着 N₂O 排放^[19]。土壤温度直接影响微生物代谢活动和 N₂O 产生过程。一般认为,土壤反硝化作用的适宜温度范围为 30 ~ 67℃^[33],也有人认为设施菜地在 20 ~ 30℃时最利于氮素气态损失,温度继续增加,N₂O 排放量有所下降^[34]。因此,在一定温度范围内,土壤微生物的活性及 N₂O 的排放速率通常随土壤温度升高而提高。土壤 N₂O 排放通量的季节变化除受施氮水平影响外,还受土壤温度的影响,排放高峰多出现在高温的夏季^[22],这也解释了本试验中夏休闲期各施肥处理 N₂O 排放量高达 3.55 ~ 7.23 kg/hm²的原因。土壤水分含量高低影响着土壤通气性、氧化还原电位、土壤有效氮分布及其对微生物的有效性等,从而影响土壤反硝化等微生物过程以及 N₂O 排放。一般来说,灌溉或降水导致土壤水分的增加会造成土壤通气性变差,促进了土壤的反硝化作用并减弱硝化作用^[35]。华北地区的菜地生产中,水分条件显著影响 N₂O 排放,不同水分处理对土壤硝化、反硝化作用的影响主要体现在蔬菜的施肥

前期,后期均以反硝化为主^[36]。滴灌施肥等水肥一体化技术能有效地降低设施菜田土壤 N₂O 排放峰值和持续时间^[37],设施蔬菜合理改变施肥体系是减少 N₂O 排放的前提,水肥优化是设施菜地减少 N₂O 排放的重要技术措施。有研究认为^[31],不同配比有机无机肥料处理下菜地 N₂O 排放通量与 10 cm 土层土壤温度呈显著正相关,而土壤水分含量的变化对 N₂O 排放通量无显著影响。在河套灌区盐化潮土玉米地上,土壤温度和空气温度与土壤 N₂O 的排放呈显著正相关;但玉米生育期土壤含水率在 15.1% ~ 20.3%范围内,与土壤 N₂O 的排放呈正相关^[38]。郝小雨等^[30]在华北平原设施菜地上的研究认为各有机无机肥处理土壤 N₂O 排放通量与 5 cm 土层温度总体上呈显著相关($R^2 = 0.40 \sim 0.58$),与土壤含水量呈显著相关($R^2 = 0.43 \sim 0.72$),这与本研究各施肥处理下 N₂O 排放通量与表层地温(0 ~ 5 cm)呈显著或极显著相关($R^2 = 0.47 \sim 0.68$),与土壤水分(0 ~ 20 cm)呈极显著相关($R^2 = 0.63 \sim 0.88$)的结果十分一致。

4 结论

相对于农民常规施氮处理,减量施氮或减氮基础上添加秸秆能分别降低春茬黄瓜-夏休闲期设施菜田的 N₂O 排放通量、累积排放量和排放系数,尤其是在夏休闲期大水漫灌时,其 N₂O 减排量都达显著水平。施氮量、土壤水分和表层地温是影响土壤 N₂O 排放的重要因子,分别与 N₂O 总排放量、排放通量呈显著或极显著正相关。因此,在宁夏灌区设施菜田,相对于农民常规施氮,减施 50% 化肥氮量或在此基础上通过添加 7.5 t/hm² 的小麦秸秆来调节土壤碳氮比都能达到土壤 N₂O 的减排效果,且二者的综合措施更佳。

致谢:感谢黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所的郝小雨博士对本文气体取样方法和数据处理提供的帮助。

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] 贺京,李涵茂,方丽,等. 秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(20): 246-250
- [3] Pattey E, Edwards G C, Desjardins R L, et al. Tools for quantifying N₂O emissions from agro-ecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142: 103-119

- [4] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N₂O 排放量重新估算[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 7-13
- [5] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143(1): 117-125
- [6] 郭世荣, 孙锦, 束胜, 等. 我国设施园艺概况及发展趋势[J]. 中国蔬菜, 2012(18): 1-4
- [7] 张仲新, 李玉娥, 华珞, 等. 不同施氮量对设施菜地 N₂O 排放通量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 269-275
- [8] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2/3): 501-511
- [9] 宋贺, 王成雨, 陈清, 等. 长期秸秆还田对设施菜田土壤反硝化特征和 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(6): 628-634
- [10] 张雪艳, 田蕾, 王冠, 等. 秸秆反应堆与生物菌剂对番茄土壤碳氮比与酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2015(4): 165-169
- [11] 宋贺, 王敬国, 陈清, 等. 设施菜田不同碳氮管理对反硝化菌结构和功能的影响[J]. 微生物学通报, 2014, 41(11): 2283-2292
- [12] 姜宁宁, 李玉娥, 华珞, 等. 不同氮源及秸秆添加对菜地土壤 N₂O 排放影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 219-223
- [13] 张学军, 陈晓群, 王黎民, 等. 宁夏大棚蔬菜生产现状及施肥中存在的问题和对策[J]. 宁夏农林科技, 2004(2): 44-47
- [14] 杨淑静, 张爱平, 杨正礼, 等. 宁夏灌区农业非点源污染负荷估算方法初探[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3947-3955
- [15] 王吉智. 宁夏引黄灌区的灌淤土[J]. 土壤学报, 1984, 21(4): 434-437
- [16] 柯英, 郭鑫年, 冀宏杰, 等. 宁夏灌区不同类型农田土壤氮素累积与迁移特征[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(1): 23-31
- [17] Zhao Y, Luo J H, Chen X Q, et al. Greenhouse tomato-cucumber yield and soil N leaching as affected by reducing N rate and adding manure: A case study in the Yellow River Irrigation Region China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94: 221-235
- [18] 郝小雨. 设施菜田养分平衡特征与优化调控研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012
- [19] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 农田土壤 N₂O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制[J]. 土壤, 2012, 44(6): 881-887
- [20] Yamulki S, Harrison R M, Goulding K W T, et al. N₂O, NO and NO₂ fluxes from a grassland: Effect of soil pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(8): 1199-1208
- [21] Zhu T B, Zhang J B, Cai Z C. The contribution of nitrogen transformation processes to total N₂O emissions from soils used for intensive vegetable cultivation[J]. *Plant and Soil*, 2011, 343(1-2): 313-327
- [22] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 不同施氮水平对菜地土壤 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2238-2243
- [23] 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]. *Environment Pollution*, 2009, 157: 1666-1672
- [24] Xu Y, Liu Z H, Wei J L, et al. Emission Characteristics of soil nitrous oxide from typical greenhouse vegetable fields in North China[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(3): 438-442
- [25] Min J, Shi W, Xing G, et al. Nitrous oxide emissions from vegetables grown in a polytunnel treated with high rates of applied nitrogen fertilizers in Southern China[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28: 70-77
- [26] 杨俊刚, 张鹏飞, 倪小会, 等. 施用控释肥对设施番茄 NO₃-N 淋洗、N₂O 排放及产量与品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1849-1857
- [27] 陈浩, 李博, 熊正琴. 减氮及硝化抑制剂对菜地氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 938-947
- [28] 刘娇, 袁瑞娜, 赵英, 等. 玉米秸秆及其黑炭添加对黄绵土 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1659-1668
- [29] 罗天相, 胡锋, 李辉信, 等. 接种蚯蚓对施加秸秆的旱作稻田 N₂O 排放的影响[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1003-1008
- [30] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N₂O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1073-1085
- [31] 毕智超, 张浩轩, 房歌, 等. 不同配比有机无机肥料对菜地 N₂O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 154-161
- [32] 刘韵, 柳文丽, 朱波. 施肥方式对冬小麦—夏玉米轮作土壤 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 735-745
- [33] Granli T, Bockman O C. Nitrous oxide from agriculture[J]. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*, 1994, 12(Supplement): 1-128
- [34] 何闪闪, 王雷, 李阿南, 等. 设施菜地 N₂O 释放特征及其土壤环境影响因素[J]. 能源环境保护, 2015, 29(6): 40-43
- [35] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(1): 1-7
- [36] 丁军军, 张薇, 李玉中, 等. 不同灌溉量对华北平原菜地 N₂O 排放及其来源的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2269-2276
- [37] 王艳丽, 李虎, 孙媛, 等. 水肥一体化条件下设施菜地的 N₂O 排放[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 2005-2014
- [38] 武岩, 红梅, 林立龙, 等. 不同施肥措施对河套灌区盐化潮土氮挥发及氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤, 2017, 49(4): 745-752

Reduction of N Fertilizer and Addition of Crop Residues Can Reduce N₂O Emission in Greenhouse Field

ZHAO Ying¹, LUO Jianhang¹, LI Guibing², LIU Xiaotong¹, ZHANG Xuejun^{1*}

(1 *Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China*; 2 *Agriculture and Animal Husbandry Bureau of Helan County, Helan, Ningxia 750200, China*)

Abstract: Using the static chamber-gas chromatograph method, a field experiment was conducted to investigate the effects of no any fertilizers (CK), single application of manure (M), conventional fertilization (CON), optimum fertilization by reduction of chemical fertilizers (OPT), and basis of OPT + regulation soil C/N ratio by addition of crop residues (OPT + C/N) on soil N₂O emission flux, ratios and amounts of N₂O emission during spring cucumber season and summer fallow in the Yellow River irrigation region of Ningxia. The results indicated that peaks of soil N₂O emission flux under different fertilization were generally happened in the first or third days after drip fertigation in the cucumber season and flood irrigation in the summer fallow. After base fertilization, topdressing of spring cucumber and during summer fallow, soil N₂O emission flux in treatments OPT and OPT + C/N were decreased by 3.6% – 47.2%, 5.9% – 49.9%, and 14.7% – 46.6% compared to treatment CON, respectively. Accumulation amounts of N₂O emission under different fertilization in spring cucumber season and summer fallow were ranged from 2.05 ~ 9.98 and 3.55 ~ 7.23 kg/hm², respectively; compared to treatment CON, those in treatments OPT and OPT + C/N were decreased by 26.2% – 34.3% and 29.6% – 33.7%, respectively. Ratios of N₂O emission from application fertilizers in spring cucumber were ranged within 0.43% – 0.71%, and the total ratios of N₂O emission were ranged within 0.54% - 1.04% during spring cucumber-summer fallow. Significant linear positive correlation was found between N application rate and total amount of N₂O emission ($R^2 = 0.778$); Soil N₂O emission fluxes under different fertilization treatments were significantly or extremely significantly positively correlated with 5 cm of topsoil temperature ($R^2 = 0.47 - 0.68$), and extremely significantly positively correlated with 0 – 20 cm of soil moisture ($R^2 = 0.63 - 0.88$). Therefore, compared to the conventional application of N fertilizer by the local farmers, both reducing synthetic N fertilizer by 50% or reducing N fertilizer combined with adding 7.5 t/hm² wheat residues to regulate soil C/N ratio could obtain the goal of reducing N₂O emission in the greenhouse field.

Key words: Yellow River irrigation region of Ningxia; Reduction of synthetic N; Addition of wheat residues; Greenhouse field; Spring cucumber; Bare land in summer fallow; N₂O emission