doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.028

水肥气一体化灌溉对温室辣椒地土壤 N₂O 排放的影响

雷宏军1 刘 欢1 刘 鑫1 潘红卫1 陈德立2

(1. 华北水利水电大学水利学院,郑州 450046; 2. 墨尔本大学兽医与农业科学学院,维多利亚 3010)

摘要:采用水肥气一体化灌溉可改善土壤的通气状况,影响土壤碳氮循环过程,进而影响土壤 N₂O的排放。为明确施氮、增氧和灌水对温室辣椒地土壤 N₂O 排放的影响,设置了施氮量(300、225 kg/hm²)、溶氧量(40、5 mg/L)和 灌水量(1.0W、0.6W,W为充分灌溉时的灌水量)3因素2水平试验,采用静态箱-气相色谱法监测 N₂O 排放通量, 系统研究了水肥气一体化灌溉对温室辣椒地土壤 N₂O 排放的影响,并通过结构方程模型分析各影响因子对 N₂O 排放的定量贡献。结果表明,增氧处理、施氮量和灌水量的增加可增加温室辣椒地土壤 N₂O 的排放通量峰值、排放 总量和单产排放量。试验中增氧条件下 N₂O 排放总量较对照增加了 31.90%;充分灌溉较非充分灌溉增加了 43.22%;常量施氮较减量施氮增加了 33.01%。增氧处理和灌水量的增加可提高温室辣椒的氮素利用效率,而施 氮量的增加降低了温室辣椒的氮素利用效率。综合考虑作物产量、氮素利用效率和单产 N₂O 排放量,减量施氮非 充分灌溉增氧处理是推荐的水肥气管理方案。通过结构方程模型的路径分析,土壤温度、充水孔隙度和 NO₃⁻N 含 量可分别解释 N₂O 排放的 42%、60%和 58%,是影响水肥气一体化灌溉的主要影响因子。 关键词:辣椒;水肥气一体化灌溉; N₂O 排放;增氧;结构方程模型;影响因子

中图分类号: S275; X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)03-0262-09

Effects of Oxyfertigation on Soil N₂O Emission under Greenhouse Pepper Cropping System

LEI Hongjun¹ LIU Huan¹ LIU Xin¹ PAN Hongwei¹ CHEN Deli²

School of Water Conservancy, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450046, China
 Faculty of Veterinary and Agricultural Sciences, University of Melbourne, Victoria 3010, Australia)

Abstract: Oxyfertigation delivers water, fertilizer and gas coupled mixture to crop root zone via subsurface drip irrigation system. This new technique changes the oxygen concentration and water distribution in soil and thus affecting the nitrogen cycling process, including nitrification and denitrification, and then affecting soil nitrous oxide (N₂O) emissions. However, the influences of oxyfertigation on soil N₂O emissions from greenhouse vegetable fields and its main influencing factors were both little known. To understand the influence of aeration, nitrogen application and irrigation on pepper soil N2O emission in greenhouse, totally eight combinations were tested, including two types of nitrogen application rates (300 kg/hm² and 225 kg/hm²), two types of aeration levels (40 mg/L and 5 mg/L), and two types of irrigation amount (1.0W and 0.6W, W was full irrigation amount). Soil N₂O emission flux was monitored via using static chamber-gas chromatograph technique. Soil temperature, water-filled pore space (WFPS), dissolved oxygen (DO), NO_3^- -N and NH_4^+ -N content were also measured. Quantitative contribution of influential factors to N₂O emission under oxyfertigation was analyzed by structural equation model (SEM). Results showed that aeration, the increase of nitrogen rate and water amount resulted in an increase of soil N_2O emission peak, cumulative N_2O emission and yield-scaled N_2O emission under oxyfertigation. Compared with control, the cumulative N2O emission of aeration condition was averagely increased by 31.90%. The cumulative N,O emission under full irrigation was averagely increased by 43.22% compared with deficit irrigation. Similarly cumulative N₂O emission under

收稿日期: 2019-01-04 修回日期: 2019-01-23

基金项目:国家自然科学基金项目(U1504512、51779093)、河南省科技创新人才计划项目(174100510021)、华北水利水电大学研究生创新 项目(YK2017-02)和中原科技创新领军人才项目(194200510008)

作者简介: 雷宏军(1975-), 男, 教授,博士生导师, 主要从事灌溉理论与节水技术研究, E-mail: hj_lei2002@163. com

conventional nitrogen rate was averagely increased by 33.01% compared with the 75% conventional nitrogen rate treatment. Aeration and the increase of water amount resulted in an increase of crop nitrogen use efficiency. However, the increase of nitrogen rate caused a decrease of crop nitrogen use efficiency. Considering crop yield, nitrogen use efficiency and yield-scaled N₂O emission, the treatment of 75% conventional nitrogen rate aerated deficit irrigation was an optimal combination under oxyfertigation. The path coefficients of soil temperature, WFPS and NO₃⁻-N content were 42%, 60% and 58%, respectively. And soil temperature, WFPS and NO₃⁻-N content were identified as main influential factors. The research result provided a reference for the selection of water, gas and nitrogen coupling management and demonstrated the great significance in knowledge of soil N₂O emission under oxyfertigation.

Key words: pepper; oxyfertigation; nitrous oxide emission; aeration; structural equation model; influential factors

0 引言

氧化亚氮(Nitrous oxide, N,O)是目前最重要的 温室气体之一,是大气臭氧层破坏的主要参与 者^[1]。灌溉农田是 N₂O 排放的主要来源之一,氮肥 的广泛使用和投入的增加造成 N2O 排放的急剧增 加^[2]。目前农田 N₂O 的排放量占全球 N₂O 排放总 量的 39% ~ 52% [3]。据估计,到 2030 年,每年农田 N,O 排放量将达到 7.60 × 10⁶ t^[2]。我国是蔬菜生 产和消费大国,其种植面积占农作物总面积的 25.60%, 其中设施菜地占蔬菜种植面积的 18.00%^[4]。设施菜地具有施肥量大、复种指数高和 灌溉频繁等特点,但氮肥当季利用率低于10%,导 致 N₂O 大量排放^[5-6],约 12% 的人为 N₂O 排放来源 于蔬菜种植^[4]。水肥气一体化灌溉(Oxyfertigation) 是水肥一体化灌溉的升级,不仅显著提高作物的水 肥利用效率,还可为土壤提供充足的有效氧,促进作 物的生长,实现作物的增产提质^[7-8]。

施肥对 N₂O 排放的影响很大程度上依赖于土 壤水分^[9]。滴灌通过影响土壤水分动态和微生物 氮循环过程影响 N₂O 的产生和排放^[10]。目前,国 内外部分研究者关于水气一体化灌溉对 N₂O 排放 的影响进行了积极的探索。陈慧等^[11]研究了单次 曝气对温室番茄地 N₂O 排放的影响,结果表明曝气 增加了番茄生育期的 N₂O 排放总量。HOU 等^[12]研 究了单次曝气对温室番茄地综合温室效应的影响, 结果表明曝气灌溉不会显著增加土壤 CO₂ 和 N₂O 的综合温室效应。杜娅丹等^[13]研究了灌溉后机械 通气对温室芹菜地 N₂O 排放的影响,结果表明 N₂O 排放总量随灌水量和施氮量的增加而增加。然而, 目前关于水肥气一体化灌溉对设施菜地 N₂O 排放 的影响研究较少。

相关分析和回归分析是辨识土壤 N₂O 排放与 各影响因子间关联关系的常用分析方法。杜娅丹 等^[13]通过对加气灌溉下 N₂O 排放与各影响因子的 回归分析,得到土壤温度、水分和 NO3-N 含量与 N,O 排放通量呈指数函数关系。HAN 等^[14]分析了 不同灌水量下 N₂O 排放与各影响因子间的相关关 系,结果表明土壤水分和 NH₄-N 含量与 N,O 排放 通量显著相关。然而,影响土壤 N,O 排放的因素往 往是多种因子的相互叠加。各影响因子间相互影 响,对 N,O 排放的影响可分为直接效应和间接效 应。结构方程模型(Structural equation model, SEM) 可通过路径构建来明确各因变量对目标变量的直接 和间接影响,适合分析相互关联变量对目标变量的 关联关系^[15]。YAN 等^[16]利用 SEM 分析了 N,O 排 放与各影响因子间的关系,结果表明放牧和气象因 子是 N,O 排放的主要影响因子。ZHE 等^[17]利用 SEM 对我国东北玉米地 N₂O 排放和土壤理化因子 进行了分析,结果表明土壤水分、NH⁴-N和可溶性 有机碳可分别解释 N₂O 排放的 32%、36% 和 16%。

为明确施氮、增氧和灌水对温室辣椒地土壤 N₂O 排放的影响,本文系统研究不同水肥气组合方 案对温室辣椒地土壤 N₂O 排放的影响,优化水肥气 组合方案,并通过 SEM 分析各影响因子对土壤 N₂O 排放的综合贡献,以期明确水肥气一体化灌溉下温 室辣椒地土壤 N₂O 排放的影响机制,并为水肥气管 理模式的优化提供支持。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于2018 年3月20日—6月30日在华北水 利水电大学龙子湖校区农业高效用水实验室温室大 棚(34°46′56″N,113°47′21″E)开展。试验地的年 平均气温为14.4℃,年日照时数为2400h。辣椒生 育期温室气温和湿度动态如图1所示。

1.2 试验材料与试验设计

试验中供试辣椒的品种为康大 301 (郑州郑研





种苗科技有限公司)。种植桶为圆柱形,直径30 cm, 高 40 cm,采用全埋式布设,以模拟田间作物生长的 光照 和 温度。供试 土壤 为 黏质 壤土,其中砂粒 (0.02~2 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和 黏粒 (0~0.002 mm)的质量分数分别为42.87%、 35.26%和21.87%,土壤容重1.20g/cm³,土壤碱解 氮质量比38.87 mg/kg,速效钾质量比3.42 mg/kg, 速效磷质量比9.98 mg/kg,有机质质量比21.54 g/kg, pH值7.50。采用地下滴灌进行灌溉,滴头型号为 Netafim(以色列奈特菲姆灌溉公司),额定流量 2.2 L/h,滴头埋深10 cm。

设计了施氮、增氧和灌水3因素2水平试验,共 计8个处理,每个处理8次重复,采用完全随机布 设。试验设计如表1所示。

おりて田	· # 北 昌 / m m	施氮量/	溶氧量/
	准小里/ ㎜	$(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	(mg•L ⁻¹)
N1 W1 A	1.0W	300	40
N1 W1 C	1.0W	300	5
N1 W2 A	0.6W	300	40
N1W2C	0.6W	300	5
N2 W1 A	1.0W	225	40
N2W1C	1.0W	225	5
N2 W2 A	0.6W	225	40
N2W2C	0.6W	225	5

表 1 水肥气一体化灌溉试验设计 Tab. 1 Experimental design of oxyfertigation

注:W为充分灌溉时的灌水量。N1为常量施氮,N2为减量施氮;W1为充分灌溉,W2为非充分灌溉;A为增氧滴灌,C为常规滴 灌。

1.3 试验管理

采用海蓝科技微纳米气泡机(50 Hz,宜兴市海 蓝科技有限公司)利用变压吸附分离原理制备纯 氧,通过外置的储水罐进行循环,可制备超高溶解氧 微纳米气泡水。于循环装置出水口安装供水干管, 接入压力表和水表。待灌溉水溶氧量达到40 mg/L 时(约5 min)开始灌溉。滴灌带首部供水压力控制 为0.10 MPa。 充分灌溉的灌水量计算式[13]为

$$W = E_p K_c \tag{1}$$

式中 W——充分灌溉时的灌水量,mm *E_p*——2次灌溉间蒸发皿的蒸发量,mm *K_e*——蒸发皿系数

每日 08:00 定时监测 Φ 601 标准蒸发皿读数。 表 2 为辣椒生育期内灌水量。

表 2 辣椒生育期内灌水量

Tab. 2 Irrigation amount during pepper growing season

準 流 口 田	移栽后	灌水量/mm	
催佩口别	时间/d	W1	W2
2018 - 04 - 10	21	33.6	20.1
2018 - 04 - 19	30	40.3	24.2
2018 - 04 - 29	40	26.9	16.1
2018 - 05 - 03	44	30.3	18.2
2018 - 05 - 10	51	28.2	16.9
2018 - 05 - 16	57	34.9	20.9
2018 - 05 - 23	62	39.0	23.4
2018 - 05 - 29	70	34.3	20.6
2018 - 06 - 07	79	33.0	19.7
2018 - 06 - 13	85	32.2	19.4
2018 - 06 - 18	90	29.0	17.3
2018 - 06 - 23	95	29.6	17.8
2018 - 06 - 28	100	30.9	18.5

肥料采用水肥气一体化灌溉的方式施入。供试的氮、磷和钾肥分别为 NH₄ NO₃、P₂O₅和 K₂O,于移栽后 21、30、40、51、62、70、85 d 进行施氮,施氮比例为 2:3:2:2:3:2:1。温室辣椒的施肥方案如表 3 所示。

表 3 温室辣椒的施肥方案 Tab.3 Fertilization scheme of pepper in greenhouse

移栽后	N∕(kg•	hm ⁻²)	$P(P_2O_5)/$	$K(K_20)/$
时间/d	N1	N2	(kg • hm ⁻²)	$(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
21	40	30	12.14	21.43
30	60	45	12.14	21.43
40	40	30	12.14	21.43
51	40	30	12.14	21.43
62	60	45	12.14	21.43
70	40	30	12.14	21.43
85	20	15	12.14	21.43
合计	300	225	84.98	150.01

1.4 指标测定及计算

试验中采用静态箱原位采集气样,静态箱为圆 柱形,直径 10 cm,高度 15 cm,于静态箱顶部打孔, 装入软管和三通阀,并用胶密封。由于静态箱的尺 寸较小,气体较易混匀,故不需通过静态箱顶部装入 风扇使气体扰动混匀。通过预试验,采用该装置采 集气体,N₂O 浓度测量值随时间的回归系数可达 0.85 以上。每个处理随机选取 3 个盆栽进行静态 箱底座的埋设,用于气样的采集。通过预试验,以 NH₄NO₃为供试氮肥进行水肥气一体化灌溉时,N₂O 排放峰值出现在施肥灌溉后1d,且变化过程较为平 缓,故试验中于施肥灌溉后1d进行气样的采集。 采用带三通阀的注射器于0、10、20、30 min 分别抽 取静态箱气体,其中2mL用于三通阀和针头的润 洗,10mL注入抽成真空的容积12mL的气瓶中^[18]。 待气样采集完成后,注入20mL的N₂,放入4℃冰箱 中保存,14d内进行测试。

利用气相色谱仪(GC - 2010 PLUS 型,(岛津) 有限公司)测定气体样品中 N₂O 的浓度。N₂O 排放 通量的计算式^[11]为

$$F = \rho h \, \frac{273}{273 + T} \frac{P}{P_0} \frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中 F——N₂O 排放通量, $\mu g/(m^2 \cdot h)$

T——采集 N₂O 时静态箱内温度,℃

P——采集 N₂O 时静态箱内压强,kPa

c----测定的气体浓度,mg/L

N2O 排放总量的计算式^[14]为

$$E_{t} = 0.001 \sum_{i=1}^{n} (t_{i+1} - t_{i}) \frac{F_{i+1} - F_{i}}{2}$$
(3)

式中 E_i ——研究时段 N₂O 排放总量, mg/m²

$$F_{i+1}$$
 — 第 *i* +1 次 N₂O 排放通量, µg/(m²·h)
 F_i — 第 *i* 次 N₂O 排放通量, µg/(m²·h)
 t_{i+1} — 第 *i* +1 次采气时的时间, h

t_i——第*i*次采气时的时间,h

氮素利用效率为作物产量和施氮量的比值,计 算式^[13]为

$$NUE = \frac{Y}{F_{\rm N}} \times 100\% \tag{4}$$

式中 NUE-----氮素利用效率,%

Y——作物产量,kg/hm²

 $F_{\rm N}$ ——温室辣椒施氮量,kg/hm²

单产 N₂O 排放量为土壤 N₂O 排放总量与作物 产量的比值,计算式^[13]为

$$E_u = \frac{E_u}{Y} \tag{5}$$

式中 E_u——单产 N₂O 排放量, mg/kg

采气的同时,通过温度计测定箱内温度;通过埋 于静态箱底座附近的地温计测定 10 cm 土层的温 度;采用预埋于径向 5 cm 处的土壤水分探头,通过 便携式土壤水分测量仪(TRIME – PICO TDR,德国 IMKO 公司) 监测 0~10 cm 土层的体积含水率,计 算土壤的充水孔隙度;采用水平埋设于土深 10 cm 处的 溶解氧探针,相连便携式溶解氧测定仪 (PyroScience GmbH, Aachen,德国)测定土壤溶解 氧含量。土壤充水孔隙度(Water-filled pore space, WFPS)的计算式为

$$\rho_{\rm WFPS} = \frac{\theta_v}{1 - \frac{\gamma}{\rho_s}} \times 100\% \tag{6}$$

式中 ρ_{WFPS} —土壤充水孔隙度,%

 θ_v ——土壤体积含水率, cm³/cm³

γ----土壤容重,g/cm³

ρ_s——土粒密度,取2.65 g/cm³

另外,采气的同时采用土钻采集静态箱周围 0~10 cm 土层的新鲜土壤,充分混匀后,保存于 4℃ 冰箱 中待测。取 5.00 g 待测土样,加入 25 mL 2 mol/L的 KCl 浸提,过滤后用紫外分光光度计测定 土壤 NO_3^{-} -N和 NH_4^{+} -N含量^[13]。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2013 软件进行数据统计及分析;采用 SPSS 22 统计软件进行显著性分析。使用 R 统计软件 Amos Graphics CLI 结构方程模型分析 N₂O 通量与土壤理化因子之间的关系。

2 结果与分析

2.1 水肥气一体化灌溉对温室辣椒地土壤 N₂O 排 放的影响

图 2 为水肥气一体化灌溉下温室辣椒地土壤 N₂O 排放通量。水肥气一体化灌溉下温室辣椒地土 壤 N₂O 排放通量峰值出现在辣椒移栽后 31、63 d, 而试验中其余监测时间呈较低水平。增氧、灌水量 和施氮量的增加可显著增加温室辣椒地土壤 N₂O 排放通量峰值。移栽后 31 d 时,增氧处理的 N₂O 排 放通量峰值较对照平均增加了 34.94%, W1 处理的 N₂O 排放通量峰值较 W2 平均增加了 64.60%, N1 水平的 N₂O 排放通量峰值较 N2 平均增加了 31.35% (P < 0.05);移栽 63 d 时,增氧处理的 N₂O 排放通量峰值较对照平均增加了 34.75%, W1 处理 的 N₂O 排放通量峰值较 W2 平均增加了 37.09%, N1 水平的 N₂O 排放通量峰值较 N2 平均增加了 23.12% (P < 0.05)。

表 4 为水肥气一体化灌溉下辣椒产量及 N₂O 排放量。增氧处理、灌水量和施氮量的增加可增加 温室辣椒地土壤 N₂O 排放总量。N1 水平下,处理 W1A 和 W2A 的 N₂O 排放总量较对照增加了 40.00% 和 34.48% (*P* < 0.05); N2 水平下,处理 W1A的 N₂O 排放总量较对照增加 21.21%,故增氧 条件下 N₂O 排放总量较对照平均增加 31.90%。N1 水平下,处理 W1A 和 W1C 的 N₂O 排放总量较 W2 相应处理分别增加了 43.59% 和 37.93% (*P* < 0.05);N2 水平下,处理 W1A 和 W1C 的 N₂O 排放 总量较 W2 相应处理分别增加了 53.85% 和 37.50% (P < 0.05),故充分灌溉下 N₂O 排放总量较 非充分灌溉平均增加了 43.22%。N1 水平下 W1A、 W1C、W2A 和 W2C 的 N₂O 排放总量较 N2 水平下 各相应处理分别增加了 40.00%、21.21%、50.00% 和 20.83% (P < 0.05),故常量施氮的 N₂O 排放总 量较减量施氮平均增加了 33.01%。



Fig. 2 Soil N2O emission flux in greenhouse pepper production system under oxyfertigation

衣 → 小 加 、 一 仲 化 准 风 下 殊 愀 / 里 及 № 20 併 /	₹4	衣	衣	4	水肥		·14-1Ł	准陇	ト釈椒	广重	及Ⅰ	$N_2 U$	排加	く重
--	----	---	---	---	----	--	--------	----	-----	----	----	---------	----	----

Tab. 4	Crop yield and	soil N ₂ O emissio	n in greenhouse	pepper production	system under	oxyfertigation
--------	----------------	-------------------------------	-----------------	-------------------	--------------	----------------

处理	N ₂ O 排放总量/(kg·hm ⁻²)	产量/(t・hm ⁻²)	氮素利用效率/%	单产 N ₂ 0 排放量/(mg·kg ⁻¹)
N1 W1 A	$(0.56 \pm 0.05)^{a}$	$(98.94 \pm 7.62)^{a}$	$(329.81 \pm 21.92)^{b}$	$(5.66 \pm 0.08)^{a}$
N1 W1 C	$(0.40 \pm 0.02)^{b}$	$(86.72 \pm 5.97)^{\rm b}$	$(289.08 \pm 24.83)^{\circ}$	$(4.61 \pm 0.35)^{\circ}$
N1W2A	$(0.39 \pm 0.02)^{b}$	$(73.12 \pm 5.84)^{\circ}$	$(243.72 \pm 20.36)^{e}$	$(5.33 \pm 0.51)^{b}$
N1W2C	$(0.29 \pm 0.01)^{\circ}$	$(66.43 \pm 3.36)^{d}$	$(221.42 \pm 18.14)^{\rm f}$	$(4.37 \pm 0.27)^{d}$
N2 W1 A	$(0.40 \pm 0.03)^{b}$	$(83.19 \pm 3.01)^{\rm b}$	$(369.73 \pm 24.03)^{a}$	$(4.81 \pm 0.58)^{\circ}$
N2 W1 C	$(0.33 \pm 0.03)^{\circ}$	$(79.13 \pm 5.84)^{\rm b}$	$(358.25 \pm 28.11)^{a}$	$(4.17 \pm 0.28)^{d}$
N2W2A	$(0.26 \pm 0.03)^{cd}$	$(64.50 \pm 1.61)^{d}$	$(282.88 \pm 16.23)^{\circ}$	$(4.03 \pm 0.44)^{de}$
N2W2C	$(0.24 \pm 0.02)^{d}$	$(59.79 \pm 9.69)^{e}$	$(265.73 \pm 38.77)^{d}$	$(4.01 \pm 0.20)^{e}$

注:同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

增氧处理和灌水量的增加可显著提高辣椒的氮 素利用效率,而施氮量的增加降低了辣椒的氮素利 用效率。N1 水平下,处理 W1A 和 W2A 的氮素利用 效率较对照提高 14.09% 和 10.07%; N2 水平下, W2A 的氮素利用效率较对照提高 6.45% (*P* < 0.05)。N1 水平下,处理 W1A 和 W1C 的氮素利用 效率较 W2 相应处理分别提高 35.32% 和 30.56%; N2 水平下,处理 W1A 和 W1C 的氮素利用效率较 W2 相应处理分别提高 30.70% 和 34.82% (*P* < 0.05)。N1 水平下,处理 W1A 众W1C、W2A 和 W2C 的氮素利用效率较 N2 相应处理分别降低 10.80%、 19.31%、13.84% 和 16.67% (*P* <0.05)。

增氧处理、灌水量和施氮量的增加可增加单产 N₂O 排放量。N1 水平下,处理 W1A 和 W2A 的单产 N₂O 排放量较对照增加了 22.78% 和 21.97%;N2 水平下,处理 W1A 的单产 N₂O 排放量较对照增加 了 15.35% (*P* < 0.05),而处理 W2A 的单产 N₂O 排 放量较对照无显著性差异(*P* > 0.05)。N1 水平下, 处理 W1A 和 W1C 的单产 N₂O 排放量较 W2 相应处 理分别增加了 6.19% 和 5.49%; N2 水平下,处理 W1A 和 W1C 的单产 N₂O 排放量较 W2 相应处理分 别增加了 19.35% 和 3.99% (P < 0.05)。N1 水平 下,处理 W1A、W1C、W2A 和 W2C 的单产 N₂O 排放 量较 N2 相应处理分别增加了 17.67%、10.55%、 32.26% 和 8.98% (P < 0.05)。

单产 N₂O 排放量是反映作物产量和 N₂O 排放 潜力的综合指标。处理 N2W2A 和 N2W2C 的单产 N₂O 排放量均较小,且差异不显著(P>0.05),而处 理 N2W2A 的产量和氮素利用效率较 N2W2C 显著 提高了 7.88% 和 6.45% (P<0.05)。综合考虑温 室辣椒产量、氮素利用效率和单产 N₂O 排放量,减 量施氮非充分灌溉增氧处理(N2W2A)是试验中推 荐的水肥气一体化灌溉方案。

2.2 水肥气一体化灌溉对各影响因子的影响

2.2.1 物理因子

图 3 为 N₂O 排放的物理影响因子动态变化曲 线。增氧处理、灌水量和施氮量的增加对土壤温度 无显著影响(图 3a、3b)。灌水量的增加可显著提高 土壤的 WFPS,而增氧和施氮对 WFPS 无显著影响 (图 3c、3d)。N1 水平下,处理 W1A 和 W1C 的平均 WFPS 较 W2 相应处理增加了 16.23% 和 13.61% (*P* < 0.05);N2 水平下,处理 W1A 和 W1C 的平均 WFPS 较 W2 相应处理增加了 20.30% 和 19.32% (*P* < 0.05)。 增氧处理可显著提高土壤溶解氧含量,而灌水 和施氮处理对土壤溶解氧含量无显著影响(图 3e、 3f)。N1 水平下,处理 W1A 和 W2A 的土壤溶解氧 含量较对照分别提高了 10.68% 和 13.80% (P < 0.05);N2 水平下,处理 W1A 和 W2A 的土壤溶解氧含 量较对照分别增加了 15.05% 和 16.06% (P < 0.05)。





2.2.2 化学因子

图 4 为土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量动态变化曲 线。N1 水平的土壤 NO₃⁻-N 含量显著高于 N2 (图 4a、4b)。N1 水平下处理 W1A、W1C、W2A 和 W2C 的 NO₃⁻-N 含量分别高于 N2 相应处理 40.28%、39.79%、21.81%和 19.57%(*P* < 0.05)。 增氧处理的土壤 NO₃⁻-N 含量高于对照。N1 水平下 处理 W1A 和 W2A 的 NO₃⁻-N 含量分别高于对照 14.63%和 34.52%(*P* < 0.05); N2 水平下处理 W1A 和 W2A 的土壤 NO₃⁻-N 含量分别高于对照 14.22%和32.04%(P<0.05)。非充分灌溉处理下土 壤 NO₃⁻-N含量显著高于充分灌溉(P<0.05)。

整个生育期内土壤 NH⁴₄-N 含量均呈较低水 平。N1 水平下,土壤 NH⁴₄-N 质量比均值在 3.11 ~ 4.36 mg/kg; N2 水平下,土壤 NH⁴₄-N 质量比均值在 2.88 ~4.22 mg/kg(图 4c、4d)。

水肥气一体化灌溉下 N₂O 排放的结构方程模型

水肥气一体化灌溉下土壤 N₂O 排放的结构方 程模型如图 5 所示。





Fig. 5 SEM of soil N, O emission under oxyfertigation

水肥气一体化灌溉下土壤温度对 N_2O 排放通 量的直接效应为 0.34(路径系数),且土壤温度通过 $NO_3^- - N$ 含量和 $NH_4^+ - N$ 含量的间接效应分别为 0.10 和 - 0.02,故土壤温度对 N_2O 排放的总解释度为 42%。充水孔隙度对 N_2O 排放通量的直接效应为 0.25,且充水孔隙度通过 $NO_3^- - N$ 含量和 $NH_4^+ - N$ 含 量的间接效应分别为 0.35 和 0,故充水孔隙度对 N_2O 排放的总解释度为 60%。溶解氧含量对 N_2O 排放通量的直接效应为 0.10,且通过 $NO_3^- - N$ 含量 和 $NH_4^+ - N$ 含量的间接效应分别为 0.10 和 0.02,故 溶解氧含量对 N_2O 排放的总解释度为 58%, $NH_4^+ - N$ 含量对 N_2O 排放的总解释度为 58%, $NH_4^+ - N$ 含量对 N_2O 排放的总解释度为 58%, $NH_4^+ - N$ 含量对 N_2O 排放的总解释度为 8%。土壤温度、充 水孔隙度和 $NO_3^- - N$ 含量是水肥气一体化灌溉下土 壤 N_2O 排放的主要影响因子。

3 讨论

3.1 水肥气一体化灌溉对温室辣椒地土壤 N₂O 排 放的影响

高频率的滴灌和施肥使得根区土壤水分和营养 保持良好状态,影响着土壤碳氮循环和硝化反硝化 过程,进而影响着土壤 N₂O 的排放^[19-20]。增氧灌 溉可有效增加土壤有效氧含量,促进土壤的硝化作 用^[12],并提供良好的气体排放通道,促进 N₂O 的排 放^[21]。本文采用纯氧曝气装置制得的超高溶解氧 微纳米气泡水进行灌溉,提高了土壤氧气含量,增氧 处理的 N₂O 排放总量较对照增加了 31.90%,与 HOU 等^[12]和杜娅丹等^[13]研究结果相似。有研究表 明减量施氮可有效降低土壤硝化、反硝化底物含 量^[22],且 N₂O 排放量随着施氮量的减少而显著减 少^[13],故在相同的增氧和灌水条件下,减量施氮的 土壤 N₂O 排放显著低于常量施氮。土壤干湿变化 可通过土壤理化特性的改变增加土壤碳氮的可利用 性,造成土壤 N,O 排放增加^[23]。灌溉是造成温室 作物土壤干湿变化最主要的因素。灌水量的增加会激发土壤微生物的繁殖潜力,促进 N₂O 的排放^[24],故本文中相同增氧和施氮水平下充分灌溉的 N₂O 排放量较非充分灌溉显著增加。

作物生育期内土壤 N₂O 排放通量峰值与土壤 温度、灌溉和施肥措施紧密相连^[12-13,20]。施氮量的 增加导致硝化、反硝化反应底物有所增加,促进土壤 N₂O 的排放^[25]。本文于辣椒移栽后的 30、62 d 进行 灌溉施氮,且灌水量和施氮量较生育期内其他灌水 量和施氮量有所增加。施氮量的增加为辣椒根系土 壤提供了充足的硝化、反硝化反应底物,灌水量的增 加充分激活了土壤微生物的繁殖潜力,导致 N₂O 排 放有所增加,故辣椒生育期内出现了 2 次 N₂O 排 通量峰值。试验中水肥气一体化灌溉下温室辣椒生 育期 N₂O 排放总量较常规的施入基肥再追肥的施 肥方式^[25]实现了减排,与王艳丽等^[20]研究结果相 似。这主要是肥料随水少量多次的协调施入作物根 区,保证了土壤氮素尽可能多地被作物吸收利用,从 而降低了土壤氮素以 N₂O 形式排放的直接损失。

3.2 水肥气一体化灌溉下土壤 N₂O 排放与各影响 因子间的关系

影响土壤 N_2O 排放的因素主要有温度、水分、 氧气、pH 值、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、有 机 质 和 微生 物 等^[26]。土壤温度通过影响微生物活性而影响生物 化学反应速率,进而影响 N_2O 的排放。硝化微生物 活动的最适温度为 15~35 $\mathbb{C}^{[27]}$ 。试验中监测的土 壤温度均在 25.0~28.3 \mathbb{C} ,适宜土壤硝化微生物生 存繁殖,有利于土壤进行硝化反应,土壤温度对土壤 N_2O 排放的总解释度为 42%。

土壤水分主要通过影响土壤的有效氧含量、氮 素迁移转化和微生物活性等影响 N₂O 排放^[28]。当 土壤含水率在充水孔隙度的 35% ~60% 时, N₂O 排 放主要来源于硝化反应,当含水率超过充水孔隙度 的 70% 时,土壤 N₂O 排放主要来源于反硝化反 应^[29]。本文中 N1 水平下监测的土壤充水孔隙度均 值为 40.84% ~47.11%; N2 水平下监测的土壤充 水孔隙度均值为 38.46% ~47.30%,表明 N₂O 产生 主要来源于硝化反应,充水孔隙度可解释水肥气一 体化灌溉下 N₂O 排放的 60%。

氧气被认为是控制反硝化作用及土壤 N₂O、NO 和 N₂ 产生的最重要因素。当存在一定量的氧气时, 微生物会优先选择氧气而不是 NO₃⁻ 作为电子受 体^[30]。同时,氧气是硝化过程的反应底物之一,土 壤氧气含量减少时硝化速率降低。水肥气一体化灌 溉显著增加了根区土壤氧气含量,然而通过结构方 土壤氮素的损失主要包括硝化、反硝化过程产 生 N₂O 的直接损失和 NO₃⁻-N 随灌溉水淋失的间接 损失^[10,18]。RIYA 等^[31]研究了土壤 NO₃⁻-N 含量和 N₂O 排放之间的关系,结果表明当 NO₃⁻-N 含量较低 时,土壤 N₂O 产生缓慢;当 NO₃⁻-N 含量高于一定浓 度时,土壤 N₂O 产生剧烈。灌溉会造成土壤 NO₃⁻-N 向下淋失,并且 NO₃⁻-N 淋失量随着水量的增加而增 加,故本文中相同施氮水平下非充分灌溉的土壤 NO₃⁻-N 浓度的增加而显著增加,且土壤 NO₃⁻-N 浓度可解释土壤 N₂O 排放的 52%^[18]。通过结构方 程模型的路径分析,本文中土壤 NO₃⁻-N 含量与 N₂O 排放紧密相关,可解释水肥气一体化灌溉条件下 N₂O 排放的 58%。 水肥气一体化灌溉改变了土壤的有效氧含量, 影响着土壤硝化反硝化微生物的数量和活性。土壤 微生物数量和活性对明确水肥气一体化灌溉下 N₂O 排放机制有重要意义,然而本文并未涉及,有待进一 步研究。

4 结论

(1) 增氧处理、施氮量和灌水量的增加可增加 水肥气一体化灌溉下温室辣椒地土壤 N₂O 排放通 量峰值、N₂O 排放总量和单产 N₂O 排放量。增氧处 理和灌水量的增加可显著提高辣椒的氮素利用效 率, 而施氮量的增加降低了辣椒的氮素利用效率。

(2)综合考虑作物产量、氮素利用效率和单产 N₂O排放量,减量施氮非充分灌溉增氧处理是推荐 的水肥气一体化灌溉组合方案。

(3)通过结构方程模型的路径分析,土壤温度、 充水孔隙度和 NO₃⁻-N 含量对 N₂O 排放的总解释度 分别为 42%、60% 和 58%,是影响水肥气一体化灌 溉下温室辣椒地土壤 N₂O 排放的主要影响因子。

参考文献

- DELGADO J A, MOSIER A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(5):1105 1111.
- [2] SYAKIL A A, KROEZE C. The global nitrous oxide budget revisited [J]. Greenhouse Gas Measurement & Management, 2011, 1(1):17-26.
- BOUWMAN A F, BOUMANS L J M, BATJES N H. Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(4):28 1 28 9.
- [4] 江雨倩,李虎,王艳丽,等. 滴灌施肥对设施菜地 N₂O 排放的影响及减排贡献[J]. 农业环境科学学报,2016,35(8): 1616-1624.

JIANG Yuqian, LI Hu, WANG Yanli, et al. Effects of fertigation on N_2O emissions and their mitigation in greenhouse vegetable fields [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(8):1616 - 1624. (in Chinese)

- [5] 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.
 CHEN Hao, LI Bo, XIONG Zhengqin. Effects of N reduction and nitrification inhibitor on N₂O emissions in intensive vegetable field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4):938-947. (in Chinese)
- [6] CHANG J, WU X, LIU A, et al. Assessment of net ecosystem services of plastic greenhouse vegetable cultivation in China[J]. Ecological Economics, 2011, 70(4):740-748.
- [7] ABUARAB M, MOSTAFA E, IBRAHIM M. Effect of air injection under subsurface drip irrigation on yield and water use efficiency of corn in a sandy clay loam soil[J]. Journal of Advanced Research, 2013, 4(6):493-499.
- [8] 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等.加气灌溉对番茄植株生长、产量和果实品质的影响[J/OL].农业机械学报,2017,48(8):199-211. ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Impacts of oxygation on plant growth, yield and fruit quality of tomato[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 199-211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170823&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.023. (in Chinese)
- [9] TIAN D, ZHANG Y, MU Y, et al. The effect of drip irrigation and drip fertigation on N₂O and NO emissions, water saving and grain yields in a maize field in the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575:1034 - 1040.
- [10] XU J, WEI Q, YANG S, et al. Diurnal pattern of nitrous oxide emissions from soils under different vertical moisture distribution conditions[J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2016, 76(1):84-92.
- [11] 陈慧,侯会静,蔡焕杰,等. 加气灌溉温室番茄地土壤 N₂O 排放特征[J]. 农业工程学报, 2016,32(3):111-117. CHEN Hui, HOU Huijing, CAI Huanjie, et al. Soil N₂O emission characteristics of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(3):111-117. (in Chinese)
- [12] HOU H, CHEN H, CAI H, et al. CO2 and N2O emissions from Lou soils of greenhouse tomato fields under aerated irrigation

[J]. Atmospheric Environment, 2016, 132:69-76.

[13] 杜娅丹,张倩,崔冰晶,等. 加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N₂O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 127-134.

DU Yadan, ZHANG Qian, CUI Bingjing, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil N_2O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation [J]. Transactions of the CSAE,2017,33(16):127 - 134. (in Chinese)

- [14] HAN B, YE X, LI W, et al. The effects of different irrigation regimes on nitrous oxide emissions and influencing factors in greenhouse tomato fields[J]. Journal of Soils & Sediments, 2017, 17(10):1-12.
- [15] DAVID L S. An introduction to structural equation modelling[J]. Canadian Journal of Psychiatry, 2006, 51(5):317-324.
- [16] YAN R, TANG H, XIN X, et al. Grazing intensity and driving factors affect soil nitrous oxide fluxes during the growing seasons in the Hulunber meadow steppe of China[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(5):054004.
- [17] ZHE C, YANG S, ZHANG A, et al. Nitrous oxide emissions following seasonal freeze-thaw events from arable soils in Northeast China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(1): 231-246.
- [18] WANG L, SHENG R, YANG H, et al. Stimulatory effect of exogenous nitrate on soil denitrifiers and denitrifying activities in submerged paddy soil[J]. Geoderma, 2017, 286:64 - 72.
- [19] 张鑫,蔡焕杰,邵光成,等. 膜下滴灌的生态环境效应研究[J]. 灌溉排水学报, 2002, 21(2):1-4. ZHANG Xin, CAI Huanjie, SHAO Guangcheng, et al. Effects of drip irrigation under mulch film on environment factors on vegetable field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2002, 21(2):1-4. (in Chinese)
- [20] 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.
 WANG Yanli, LI Hu, SUN Yuan, et al. N₂O emissions from a vegetable field with fertigation management and under greenhouse conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7):2005 2014. (in Chinese)
- [21] 雷宏军,胡世国,潘红卫,等.加氧灌溉与土壤通气性研究进展[J].土壤学报,2017,54(2):297-308.
 LEI Hongjun, HU Shiguo, PAN Hongwei, et al. Advancement in research on soil aeration and oxygation[J]. Acta Pedologica Sinica,2017,54(2):297-308. (in Chinese)
- [22] 李银坤,武雪萍,郭文忠,等. 不同氮水平下黄瓜-番茄日光温室栽培土壤 N₂O 排放特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23):260-267.

LI Yinkun, WU Xueping, GUO Wenzhong, et al. Characteristics of greenhouse soil N_2O emissions in cucumber-tomato rotation system under different nitrogen conditions [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23):260 - 267. (in Chinese)

- [23] WŁODARCZYK T, SZARLIP P, KOZIEŁ W, et al. Effect of long storage and soil type on the actual denitrification and denitrification capacity to N₂O formation[J]. International Agrophysics, 2014, 28(3):371-381.
- [24] SINGH B K, BARDGETT R D, SMITH P, et al. Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options [J]. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8(11):779-790.
- [25] 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.

QIU Weihong, LIU Jinshan, HU Chengxiao, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrous oxide emission from a typical intensive vegetable cropping system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(11):2238-2243. (in Chinese)

- [26] TAKEDA H, TAKAHASHI N, HATANO R, et al. Active N₂O emission from bacterial microbiota of Andisol farmland and characterization of some N₂O emitters[J]. Journal of Basic Microbiology, 2012, 52(4):477-486.
- [27] 郑循华,王明星,王跃思,等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997,18(5):1-5. ZHENG Xunhua, WANG Mingxing, WANG Yuesi, et al. Impacts of temperature on N₂O production[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1997, 18(5):1-5. (in Chinese)
- [28] 焦燕,黄耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(4):457-466. JIAO Yan, HUANG Yao. Influence of soil properties on N₂O emissions from farmland [J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(4): 457-466. (in Chinese)
- [29] CASE S D C, MCNAMARA N P, REAY D S, et al. The effect of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from a sandy loam soil—the role of soil aeration[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 51(3):125-134.
- [30] LUDWIG J, MEIXNER F X, VOGEL B, et al. Soil-air exchange of nitric oxide: an overview of processes, environmental factors, and modeling studies[J]. Biogeochemistry, 2001, 52(3):225-257.
- [31] RIYA S, MIN J, ZHOU S, et al. Short-term responses of nitrous oxide emissions and concentration profiles to fertilization and irrigation in greenhouse vegetable cultivation[J]. Pedosphere, 2012, 22(6):764 775.