

水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

引用本文:

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 等. 水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1366–1376.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

不同遮阴处理下施肥对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

王坤, 娄运生, 邢钰媛, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464–472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

厢作免耕下生态种养对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

陈璐, 陈灿, 黄璜, 任勃, 王忍, 梁玉刚, 周晶

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1354–1365 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0015>

苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价

孙婷, 王孟兰, 王柏淳, 李运东, 王慎强

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1115–1123 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0472>

作物-鱼共作对淡水养殖系统 N_2O 排放的影响

鲍婷, 王梦杰, 吴俊男, 刘耀斌, 李凤博, 冯金飞, 方福平

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1344–1353 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1367>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 等. 水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1366–1376.

LÜ Jin-dong, ZHANG Li-yuan, YU Na, et al. Interactive effects of irrigation and nitrogen on N_2O and NO emissions from greenhouse soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(6): 1366–1376.



开放科学 OSID

水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜*, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

(沈阳农业大学土地与环境学院, 农业部东北耕地保育重点实验室, 发改委土肥资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866)

摘要:为实现设施生产水氮高效利用及 N_2O 和 NO 减排, 基于连续 7 a 的设施水氮定位试验, 采用密闭静态箱法, 分别对番茄生长季的 N_2O 和 NO 排放进行田间原位同步观测。通过灌水下限(土壤水吸力 W_1 、 W_2 和 W_3 分别为 25、35 kPa 和 45 kPa)和施氮量(N_1 、 N_2 和 N_3 分别为 75、300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 525 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)两因素三水平随机区组设计, 研究了水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放特征的影响。结果表明, N_2O 和 NO 排放峰值出现在施肥和灌溉后, 峰值期的排放通量表现为 N_2O 高于 NO , 但 NO 峰值持续时间较长。水分、施氮量和水氮交互作用对设施土壤 N_2O 、 NO 总累积排放量均有极显著影响, 水氮耦合效应使 W_1N_1 处理的 NO 总累积排放量、 W_2N_1 处理的 N_2O 和 $\text{N}_2\text{O}+\text{NO}$ 总累积排放量最低, 且均与其他处理差异显著。水分、施氮量和水氮交互效应对番茄产量影响效力表现为灌水下限>施氮量>水氮交互。与 W_1N_1 、 W_1N_2 、 W_1N_3 相比, W_2N_1 处理的番茄产量分别显著增加 48.92%、50.69% 和 17.82%。水氮耦合效应使 W_2N_1 处理单产 N_2O 和 NO 累积排放量最低($P<0.01$), 分别比其他处理降低 40.00%~78.57% 和 21.43%~60.71%。冗余分析表明, N_2O 和 NO 排放通量与铵态氮含量、硝态氮含量、*amoA*-AOA 和 *nirK* 基因丰度均呈显著正相关关系。综合设施蔬菜经济和环境效应, 配施有机肥条件下, 灌水下限 35 kPa 和施氮量 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的水氮管理更有助于设施土壤 N_2O 和 NO 减排及产量保证。

关键词: 水氮耦合; 设施土壤; N_2O 排放; NO 排放; 番茄产量; 功能基因

中图分类号: S154.1; S641.2; S626 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)06-1366-11 doi:10.11654/jaes.2020-1217

Interactive effects of irrigation and nitrogen on N_2O and NO emissions from greenhouse soil

LÜ Jin-dong, ZHANG Li-yuan, YU Na*, ZOU Hong-tao, ZHANG Yu-ling, ZHANG Yu-long

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation (Northeast China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China)

Abstract: To optimize irrigation and nitrogen fertilization, and reduce N_2O and NO emissions in greenhouses, a tomato field experiment was conducted over seven consecutive years to observe the synchronous emissions of N_2O and NO using the closed, static box method. The effects of the lower limits of irrigation (W_1 : 25 kPa, W_2 : 35 kPa, W_3 : 45 kPa), and nitrogen application rate (N_1 : 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_2 : 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_3 : 525 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) on N_2O and NO emissions were studied by using two factors and three levels in a randomized blocks design. The peak periods of N_2O and NO emissions occurred after fertilization and irrigation. The N_2O emission was higher than that of NO during peak periods, but the duration of the peak of NO emission was longer. Irrigation, nitrogen fertilization, and their interaction had a significant effect on the total cumulative ($\text{N}_2\text{O}+\text{NO}$) emission. The interaction of irrigation and nitrogen resulted in the lowest, total cumulative emission of NO in the W_1N_1 treatment, and the lowest total cumulative emission of N_2O and ($\text{N}_2\text{O}+\text{NO}$) in the W_2N_1 treatment, which were

收稿日期: 2020-10-23 录用日期: 2021-02-01

作者简介: 吕金东(1996—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 从事农业节水研究。E-mail: lvjindong163@163.com

*通信作者: 虞娜 E-mail: sausoilyn@syau.edu.cn

基金项目: 辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10200018); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300807); 国家自然科学基金项目(41401322)

Project supported: The National Key R&D Program of Liaoning Province (2020JH2 / 10200018); National Key R&D Program of China (2016YFD0300807); The National Natural Science Foundation of China(41401322)

significantly different from the other treatments. The effect of the irrigation lower limit on the yield of tomatoes was greater than the effect of nitrogen fertilization, which was greater than the interaction of irrigation and nitrogen. Compared with W_1N_1 , W_1N_2 and W_1N_3 , the tomato yield in the W_2N_1 treatment increased significantly by 48.92%, 50.69% and 17.82%, respectively. The interaction of irrigation and nitrogen resulted in the lowest yield-scaled N_2O and NO in the W_2N_1 treatment ($P<0.01$), which were 40.00%~78.57% and 21.43%~60.71% lower than in other treatments, respectively. According to a redundancy analysis, N_2O and NO emission fluxes were significantly positively correlated with ammonium nitrogen content, nitrate nitrogen content, *amoA*-AOA, and *nirK* gene abundance. Considering the economic and environmental effects of greenhouse vegetables, when combined with organic fertilizer, a lower irrigation limit of 35 kPa, and a nitrogen application rate of $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ were conducive to a reduction in N_2O and NO emission, with yield assurance.

Keywords: interaction of irrigation and nitrogen fertilization; greenhouse soil; N_2O emission; NO emission; tomato yield; functional genes

作为大气中活跃的痕量气体, N_2O 是《京都议定书》规定的长生命周期温室气体之一,其百年增温潜势约为 CO_2 的298倍^[1],NO被IPCC认定为间接温室气体^[2],因此二者对气候和环境变化具有重要影响。农田土壤是 N_2O 和NO的重要排放来源,而设施土壤排放量远高于粮田土壤,其排放特征不容忽视^[3-4]。

农田水分管理和施氮量是影响 N_2O 和NO排放的重要因素^[5]。微生物主导的土壤氮循环过程极易受水分和施氮量的影响而发生改变,尤其设施土壤特殊的水热条件以及过量的水氮投入下,经常导致土壤 N_2O 和NO同时产生^[6]。在设施土壤滴灌模式下,土壤长期处于厌氧或干湿频繁交替状态均会加快硝化反硝化速率,显著增加 N_2O 和NO排放^[7]。土壤硝化和反硝化以及硝酸盐异化还原成铵等过程都会产生 N_2O 和NO排放^[8],如图1所示。集约化菜地由于长期施用氮肥且随施氮量增加,无机氮含量升高,产生 N_2O 和NO排放^[9-11]。研究表明,增加灌水或施氮量超过 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,在提高温室蔬菜产量的同时也增加了 N_2O 和NO排放量^[12]。合理的设施滴灌施肥且减氮1/3可在保证产量的前提下,显著降低33%温室 $\text{N}_2\text{O}+\text{NO}$ 年排放量^[13-14]。前期试验结果表明,灌水下限(35 kPa)配合施氮量($75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)可保证番茄产量的同时减少

N_2O 排放^[15]。

水分和氮素是影响设施蔬菜水氮高效利用最重要的调控因素,有效的灌溉施肥制度能够提高土壤供氮能力和减少氮素损失^[16]。合理的水氮调控措施对设施土壤 N_2O 和NO减排及蔬菜产量提高具有重要意义。目前关于设施水氮调控下, N_2O 和NO排放的同步观测研究较少, N_2O 和NO的消长特征尚不清楚。本研究基于连续7 a的设施水氮定位试验,研究水氮耦合对设施土壤 N_2O 和NO排放特征的影响,旨在为制定设施土壤 N_2O 和NO减排及水氮资源高效利用的管理措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于沈阳农业大学设施生产试验基地内($41^\circ 49' \text{N}$, $123^\circ 34' \text{E}$),属于温带半湿润大陆性气候,供试土壤为棕壤,作物为番茄。设施水氮定位试验于2012年开始,每年4—8月以相同的试验方案开展田间试验,休耕期为每年9月到次年3月,以减少番茄连作障碍的影响及北方冷棚蔬菜越冬困难问题。2012年试验地布设前,0~20 cm土壤有机质含量 $10.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $57.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $25.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $90.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤pH 7.1。

1.2 试验设计

试验采用灌水下限和施氮量两因素三水平随机区组设计,灌水下限土壤水吸力分别为25(W_1)、35 kPa(W_2)和45 kPa(W_3),氮素水平分别为75(N_1)、300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2)和525 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_3)(当地习惯施氮量为300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。组合共9个处理,重复4次。小区面积 2.5 m^2 ,行距平均55 cm,株距30 cm,留4穗打顶。试验小区在建设伊始,为防止水分、养分的运移,用埋深60 cm的塑料布对各小区进行防渗隔离处理。

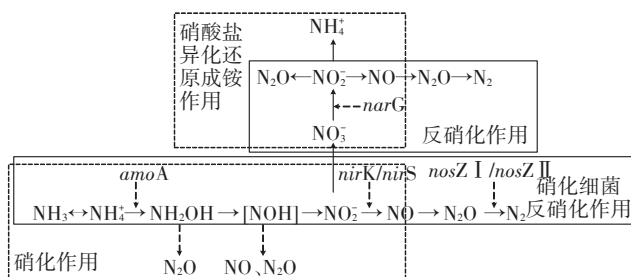


图1 N_2O 和NO在土壤氮循环中的产生与转化^[8,17]

Figure 1 Production and transformation of N_2O and NO in soil nitrogen cycle^[8,17]

各小区统一施用有机肥(膨化鸡粪 26 400 kg·hm⁻²)和过磷酸钙(220 kg·hm⁻²,以 P₂O₅计)作基肥,氮肥(尿素)和硫酸钾(300 kg·hm⁻²,以 K₂O计)在番茄定植前和果实膨大期等比例施入。番茄从移栽到收获历时 101 d,2次追肥时间分别为定植后第 48 d和第 71 d。采用膜下滴灌进行灌溉,即在定植后先将滴灌带置于距番茄 5 cm左右,然后进行地膜覆盖。各小区埋设张力计和 TDR 探头指示土壤水吸力和含水率变化,确定灌溉始点和灌溉量。番茄定植后相继浇灌定植和缓苗水后,进行水分处理。灌水下限土壤含水率由设计土壤水吸力值计算,即当 20 cm 土层张力计读数(早 8:00—8:30)达到灌水下限土壤水吸力值时,依该观测值,使用土壤水分特征曲线计算土壤体积含水率,其方程为:

$$\theta = 0.520 5 [1 + (6 382.43 h)^{11.501}]^{-0.009 4}$$

$$(r = 0.995, P < 0.01)$$

式中: h 为土壤水吸力,kPa; θ 为土壤体积含水率,cm³·cm⁻³。

各小区单次灌溉量计算公式:

$$Q = (Q_t - Q_b) \times H \times R \times S$$

式中: Q 为单个小区一次灌水水量,m³; Q_t 和 Q_b 分别为灌水上限和下限土壤含水率,m³·m⁻³; H 为计划湿润层厚度,m,取 $H=0.3$ m; R 为土壤湿润比,取 $R=0.5$; S 为小区面积,m²。灌溉上限为田间持水量(0.348 9 cm³·cm⁻³)。定植采用一致的水分管理,14 d后按照试验设计进行灌溉处理,各水氮处理总灌水量(m³·hm⁻²)及平均灌溉周期(d)如表 1 所示。

1.3 指标测定及计算

1.3.1 N₂O 和 NO 排放通量

采用静态箱法,使用气泵进行待测气体的采集。试验前,静态箱底座边缘 5 cm 置于灌水湿润部位(无作物种植及地膜覆盖),底座和箱体体积分别为 40 cm×40 cm×10 cm 和 40 cm×40 cm×40 cm。采气时箱体放置在底座上,外侧水封。气体样品采样时间为 2019 年番茄生长季,从定植第 2 d 开始,固定在上午 8:00—11:00 进行,平均每周采集一次,追肥后第 2 d 增加采样一次,直至番茄成熟收获后采集最后一次。

每个处理随机选择 3 个固定位置,分别在密闭后 0、10、30 min 各采集一次,同时记录箱内温度,每次同时抽取 40 mL 和 1 000 mL 气体于不同气袋内,带回实验室分别用于 N₂O 和 NO 的测定。

利用气相色谱仪-电子捕获检测器(Agilent 7890B-ECD, USA)和 NO-NO₂-NO_x 分析仪(Thermo Fisher 42i, USA)分别测定气体样品的 N₂O 和 NO 浓度。气体排放通量的计算公式为:

$$F = \rho \times h \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \times k \quad (1)$$

式中: F 为 N₂O 或 NO 的排放通量(以 N 计),μg·m⁻²·h⁻¹; ρ 为标准状态下气体密度,NO-N 为 0.625 kg·m⁻³,N₂O-N 为 1.25 kg·m⁻³; h 为静态箱净高度,m; dc/dt 为静态箱内气体浓度变化率,μL·L⁻¹·min⁻¹; T 为采样过程中箱内平均空气温度,℃; k 为时间转换系数,60 min·h⁻¹。由于箱内气体压强恒定,可以忽略对 N₂O 和 NO 的影响,在计算时未考虑压强。

1.3.2 单位产量 N₂O、NO 排放量

单位产量 N₂O、NO 排放量的计算公式为:

$$Y - S_{(N_2O, NO)} = \frac{CF \times 1000}{Y_{\text{yield}}} \quad (2)$$

式中: $Y - S_{(N_2O, NO)}$ 为单位产量 N₂O、NO 排放量(Yield-scaled N₂O, NO intensity),g·kg⁻¹;CF 为气体累积排放量(以 N 计),kg·hm⁻²;Y_{yield}为番茄产量,t·hm⁻²。

1.3.3 土壤无机氮的测定

土壤样品采样时间从定植第 2 d 开始收集,以后每次气体采集的同时(除第 2 次外),采用 S 形五点采样法采集箱内表层土壤样品,采样深度为 0~10 cm,-20℃保存备用。

称取新鲜土样,水土比为 5:1,采用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 浸提-AA3 自动分析仪法测定铵态氮和硝态氮含量。

1.3.4 土壤氮循环功能基因丰度

在第一和第二次追肥后,采集各处理表层土壤样品,存于-80℃冰箱中,用于功能基因分析。采用 Fast DNA[®] Spin Kit for Soil 试剂盒(MP Bio)提取土壤 DNA,称取 1.0 g 土壤,按照试剂盒内说明书的方法操

表 1 水氮各处理总灌水量及平均灌溉周期

Table 1 Total irrigation amount and average irrigation period of irrigation and nitrogen treatments

指标 Items	W ₁ N ₁	W ₁ N ₂	W ₁ N ₃	W ₂ N ₁	W ₂ N ₂	W ₂ N ₃	W ₃ N ₁	W ₃ N ₂	W ₃ N ₃
总灌水量 Total irrigation amount/(m ³ ·hm ⁻²)	2 867.6	2 957.2	3 101.2	2 622.2	2 543.8	2 644.8	2 354.0	2 274.0	2 270.6
平均灌溉周期 Average irrigation period/d	3.4	3.3	3.1	4.4	4.6	4.4	5.3	5.6	5.6

作提取样品DNA,各功能基因定量PCR过程在实时荧光Gene 9600定量PCR仪完成。定量PCR所用的反应体系均为15 μ L,包含7.5 μ L的SYBR[®] Premix EX Taq[™] (Takara)、各0.05 μ L上下游引物、7.2 μ L灭菌双蒸水(ddH₂O)和0.2 μ L DNA模板。定量PCR所用的扩增引物见表2。

表2 功能基因及PCR扩增引物

Table 2 Functional genes and amplification primer of PCR

基因 Genes	引物名称 Primer name	引物序列 Primer sequences	参考文献 References
<i>amoA</i> -AOA	<i>amoA</i> 19F	ATGGTCTGGCTWAGACG	[18]
	CrenamoA61 6r48x	GCCATCCABCKRTANGTCCA	
<i>amoA</i> -AOB	<i>amoA</i> 1F	GGGGTTTCTACTGCTGCT	
	<i>amoA</i> 2R	CCCCTCKGSAAGCCTTCTTC	
<i>nirK</i>	<i>nirK</i> 876C	ATYGGCGVCAYGGCGA	
	<i>nirK</i> 1040	GCCTCGATCAGRTRTGG	
<i>nirS</i>	<i>NirS</i> 3aF	GTSAACTGSAAGGARACSGG	
	<i>NirS</i> 3cd	GASTTCGGRTGSGTCTTGA	
<i>nosZ</i> I	<i>nosZ</i> I -2F	CGCRACGGCAASAAGGTSMSSGT	
	<i>nosZ</i> I -2R	CAKRTGCAKSGCCTGGCAGAA	
<i>narG</i>	<i>narG</i> -F	GACAAGNNNTACTGGTGCT	[19]
	<i>narG</i> -R	GAANCCCCANACNCCNGC	

1.4 试验数据处理

采用Excel 2010进行数据整理和计算,DPS 7.05进行随机区组双因素方差分析及相关分析,多重比较采用Duncan法,方差分析各因子离差平方和占总离差平方和比例分析各因子的影响效应,Canoco 5.0进行冗余分析(RDA),Origin 9.0进行绘图。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对设施土壤 N_2O 和NO排放的影响

图2为水氮耦合下土壤 N_2O 和NO排放的动态变化。由图2可知,水氮耦合下的 N_2O 排放通量变化规律基本一致(图2a~图2c),在番茄生长季内,各处理在基肥和两次追肥后出现排放峰,两次追肥后 N_2O 排放峰值远小于基肥,其余观测时间呈较低水平。定植第48 d时,除 W_2N_3 、 W_3N_2 和 W_3N_3 处理,其他水氮处理在第一次追肥前峰值出现负峰,表现为 N_2O 的吸收。生育期内, N_2O 通量均表现为强变异特征($CV>1$),尤以 N_1 变异最大。相同灌水下限,同期的排放峰随施氮量增加而增加;而相同施氮量下,同期的排放峰随灌水下限变化各异。施氮量对NO累积排放的影响总体表现为 $N_3>N_2>N_1$ 。NO排放通量的变化与 N_2O 相

似,如图2d~图2f所示,水氮耦合下NO排放通量也表现在基肥和追肥后出现排放峰,基肥后峰值远大于追肥后,为追肥的3~11倍。此外,各水氮处理NO通量排放峰持续时间较长,在基肥施入后20 d内均有较高的排放峰。各水氮处理NO排放受施氮量影响更为明显,同一灌水下限, N_3 水平的NO排放通量普遍高于其余N水平。

2.2 水氮耦合对设施土壤铵态氮和硝态氮含量的影响

图3为水氮耦合下土壤铵态氮和硝态氮含量的动态变化。由图3a~图3c可知,各水氮处理铵态氮含量呈波动变化。不同时期铵态氮含量随施氮量的增加而增加,均表现为 N_3 变化最大。相同灌水下限,定植后20 d内, W_1 水平各水氮处理铵态氮含量保持缓慢下降的趋势。 W_2 和 W_3 水平各水氮处理,除 N_1 处理外,均表现为先升高后下降的趋势,并有峰值出现。尤其在追肥后铵态氮含量出现峰值,表现为先升高后降低的趋势。

由图3d~图3f可知,各水氮处理硝态氮含量呈波动变化,随灌水下限增加,硝态氮含量的变异有增大的趋势。各水氮处理的硝态氮含量在第一次追肥后均出现上升趋势,并在第二次追肥后出现最大峰值,直到番茄收获又出现峰值。整个生育期内,相同灌水下限, W_2 水平硝态氮含量变化规律表现为 $N_3>N_2>N_1$, W_1 和 W_3 水平硝态氮含量变化规律不一致。

2.3 水氮耦合对设施土壤硝化和反硝化基因丰度的影响

表3为水氮耦合对两次追肥后土壤硝化和反硝化基因的影响。双因素方差分析结果表明,水分单一效应对第一次追肥后 $amoA$ -AOA、 $nirS$ 和 $nosZ$ I基因影响达极显著水平($P<0.01$),对第二次追肥后的所有功能基因均达极显著差异($P<0.01$)。而施氮量单一效应对第一次追肥后的 $amoA$ -AOA和 $nirS$ 达极显著差异($P<0.01$), $nosZ$ I基因达显著差异($P<0.05$)。施氮量单一效应对第二次追肥后的 $amoA$ -AOA、 $amoA$ -AOB和 $nirS$ 达极显著差异($P<0.01$)。

水氮耦合效应对两次追肥后的土壤 $amoA$ -AOA和 $nosZ$ I基因影响达极显著水平($P<0.01$)。第一次追肥后,与其他处理相比, W_1N_2 处理的 $nosZ$ I基因丰度最低,除 W_1N_3 和 W_2N_3 处理外,与其余处理均达显著差异。水氮耦合对第一和第二次追肥后 $nirS$ 基因的影响分别达极显著($P<0.01$)和显著水平($P<0.05$),均以 W_3N_2 处理最高。水氮耦合效应仅对第一次追肥后的 $amoA$ -AOB、 $nirK$ 和 $narG$ 基因影响达到显著水平

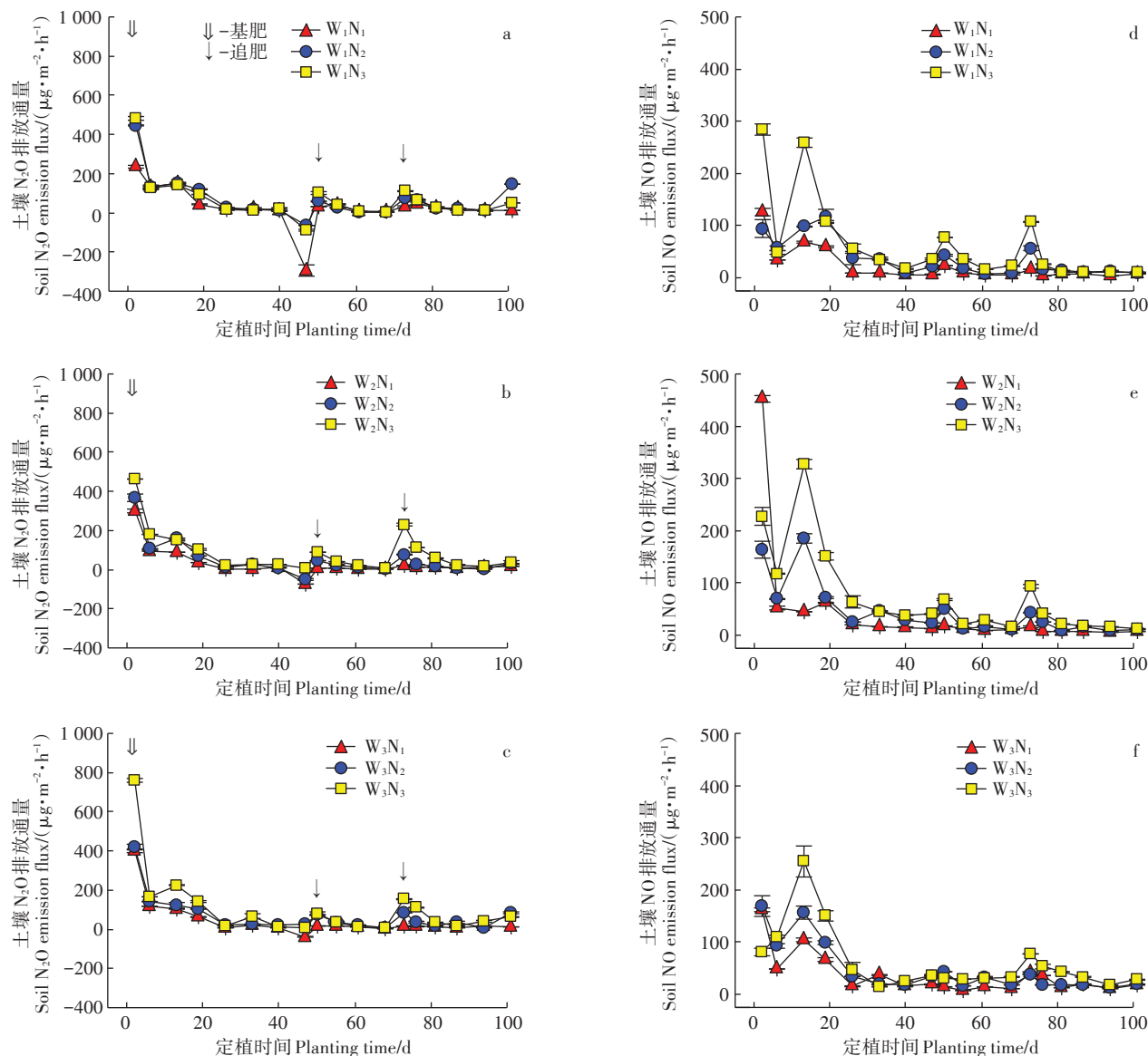


图2 水氮耦合下土壤 N_2O 和 NO 排放通量(以 N 计)动态变化

Figure 2 Dynamic changes of soil N_2O , NO emission fluxes (calculated by N) under coupling of irrigation and nitrogen

($P < 0.05$)。第一次追肥后的 *nirK* 和 *narG* 基因丰度均以 W_2N_2 处理最高。与其他处理相比, W_2N_1 处理在第一次追肥后降低 *nirK* 基因丰度达 0.51%~6.37%, 除 W_1N_2 处理外, 与其他处理均达显著差异。 W_1N_2 处理的 *narG* 基因丰度最低, 仅与 W_1N_1 和 W_2N_2 处理有显著差异。

2.4 水氮耦合对番茄产量和单位产量 N_2O 、 NO 排放量的影响

图4是水氮耦合下对番茄产量和单位产量 N_2O 、 NO 累积排放量的差异显著性分析。由图4a可知, 水分、施氮量及水氮交互均极显著地影响番茄产量, 影响效力表现为灌水下限 > 施氮量 > 水氮交互。灌水下

限对产量的单一效应表现为灌水下限 W_2 下, 不同施氮量间差异不显著; W_2 和 W_3 之间产量差异不显著, 但显著大于 W_1 。施氮量对产量的单一效应表现为随施氮量增加产量增加, 灌水下限 W_1 和 W_3 下, N_3 水平显著高于 N_2 和 N_1 , 而 N_2 和 N_1 差异不显著。水氮耦合效应使得番茄产量最高为 W_3N_3 处理, 其次为 W_2N_1 处理。 W_2N_1 处理使番茄产量显著增加, 与 W_1N_1 、 W_1N_2 、 W_1N_3 相比分别增加 48.92%、50.69% 和 17.82%。

单位产量 N_2O 、 NO 排放量可以用来反映作物产量与环境状况之间的关系。由图4b可知, 水分、施氮量及水氮交互作用对单位产量 N_2O 、 NO 及 $(\text{N}_2\text{O} + \text{NO})$ 累积排放量均有显著影响, 对单位产量 N_2O 累积排放

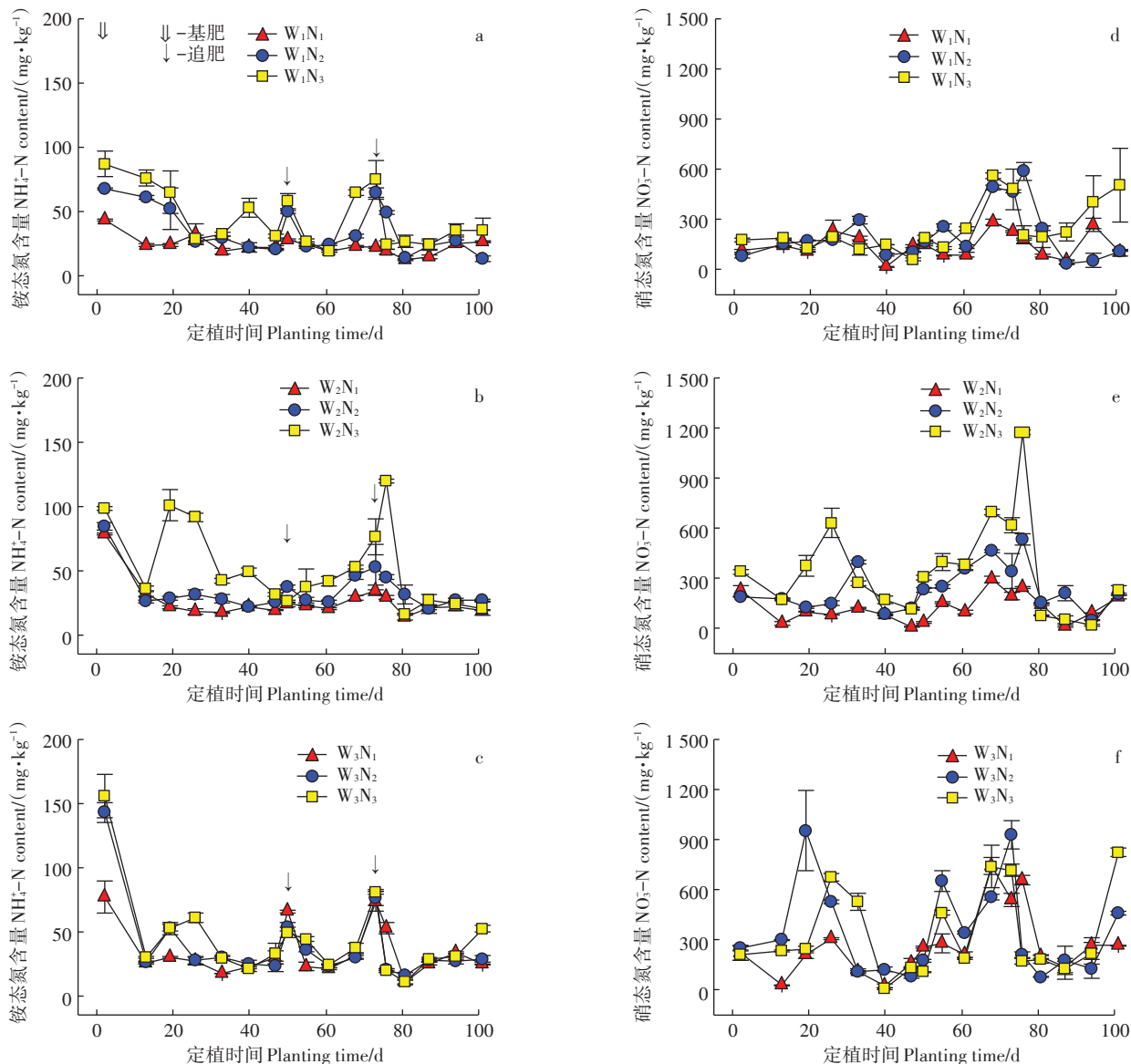


图3 水氮耦合下铵态氮和硝态氮动态变化

Figure 3 Dynamic changes of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen under coupling of irrigation and nitrogen

量效力大小表现为灌水下限>水氮交互>施氮量,对单位产量 NO 表现为施氮量>水氮交互>灌水下限,而对单位产量 $(\text{N}_2\text{O}+\text{NO})$ 累积排放量表现为施氮量>灌水下限>水氮交互。灌水下限单一效应表明,单位产量 N_2O 排放量表现为 $W_1>W_3>W_2$,差异显著;单位产量 NO 和 $(\text{N}_2\text{O}+\text{NO})$ 排放量均表现为 W_1 显著高于 W_2 和 W_3 ,后二者差异不显著。施氮量单一效应表明,单位产量 NO 排放量表现为 $N_3>N_2>N_1$,差异显著;单位产量 N_2O 和 $(\text{N}_2\text{O}+\text{NO})$ 排放量均表现为 N_3 和 N_2 差异不显著,显著高于 N_1 。水氮耦合使得 W_1N_2 处理的单产 N_2O 和 $(\text{N}_2\text{O}+\text{NO})$ 排放量最高,与其他处理差异显著。单位产量 NO 排放量最高为 W_2N_3 、 W_1N_2 和 W_1N_3 ,而3

个处理间差异不显著。 W_2N_1 处理的单位产量 N_2O 、 NO 及 $(\text{N}_2\text{O}+\text{NO})$ 排放量均最低,与其他处理差异显著。

2.5 水氮耦合下 N_2O 和 NO 排放量与无机氮含量及功能基因丰度的关系

图5为土壤 N_2O 和 NO 排放通量与无机氮含量及功能基因丰度的冗余分析(RDA),第一、二轴解释率分别为53.4%和1.7%,即总解释率达55.1%,以第一轴为主导轴。蒙特卡洛检验表明,第一轴($F=51.5$, $P=0.002$)和所有轴的总和($F=6.9$, $P=0.02$)差异显著。蒙特卡洛检验排序进一步表明,影响气体排放的影响程度由大到小排序为 $amoA$ -AOA、铵态氮、硝态氮和 $nirK$ 。 $amoA$ -AOA、铵态氮和硝态氮均与 N_2O 和 NO

表3 水氮耦合对硝化和反硝化基因丰度的影响[lg(copies·g⁻¹ 土)]

Table 3 Interactive effects of irrigation and nitrogen on gene abundance of nitrification and denitrification[lg(copies·g⁻¹ soil)]

时间Time	处理Treatments	amoA-AOA	amoA-AOB	nirK	nirS	nosZ I	narG
第一次追肥后 After 1 st topdressing	W ₁ N ₁	3.90±0.07a	4.88±0.12a	6.23±0.06ab	6.14±0.15ab	5.74±0.09a	5.20±0.09a
	W ₁ N ₂	1.56±0.12b	1.30±0.34abc	5.91±0.19b	4.07±0.12c	4.46±0.17c	4.59±0.20c
	W ₁ N ₃	0.59±0.06c	-0.41±1.10c	6.09±0.05ab	2.38±0.09d	4.79±0.33bc	4.85±0.24abc
	W ₂ N ₁	1.47±0.25b	0.79±0.44bc	5.88±0.02b	5.65±0.35b	5.19±0.13ab	4.75±0.07abc
	W ₂ N ₂	1.44±0.19b	2.42±0.32abc	6.28±0.11a	5.70±0.13b	5.64±0.16a	5.23±0.14a
	W ₂ N ₃	1.35±0.06b	0.90±2.41bc	6.14±0.04ab	2.55±0.11d	4.72±0.05bc	4.69±0.11bc
	W ₃ N ₁	1.24±0.08b	-0.26±1.25c	6.08±0.08ab	4.25±0.26c	5.53±0.01a	5.04±0.11abc
	W ₃ N ₂	1.27±0.18b	4.08±0.31ab	6.22±0.07ab	6.37±0.12a	5.65±0.20a	5.13±0.12ab
	W ₃ N ₃	1.42±0.15b	2.28±1.50abc	6.13±0.15ab	3.83±0.26c	5.74±0.14a	5.06±0.10abc
	W	**	ns	ns	**	**	ns
	N	**	ns	ns	**	*	ns
	W×N	**	*	*	**	**	*
第二次追肥后 After 2 nd topdressing	W ₁ N ₁	1.69±0.03bc	2.45±0.34c	6.09±0.02b	5.20±0.21d	5.52±0.07d	4.89±0.05d
	W ₁ N ₂	1.88±0.12bc	4.28±0.43b	6.10±0.15b	5.76±0.20c	5.82±0.09c	4.85±0.12d
	W ₁ N ₃	2.11±0.00b	2.22±0.25c	6.33±0.02ab	4.77±0.10e	5.81±0.01c	4.97±0.08cd
	W ₂ N ₁	1.09±0.23c	3.02±0.04c	6.25±0.07ab	5.68±0.04c	6.22±0.06a	5.23±0.03bc
	W ₂ N ₂	3.18±0.32a	5.46±0.24a	6.50±0.08a	6.21±0.15ab	5.85±0.03c	5.48±0.07ab
	W ₂ N ₃	2.04±0.48b	4.00±0.33b	6.36±0.11ab	6.19±0.01ab	6.08±0.01ab	5.34±0.14ab
	W ₃ N ₁	1.33±0.06bc	3.93±0.02b	6.43±0.03a	5.70±0.17c	5.88±0.09bc	5.51±0.02ab
	W ₃ N ₂	1.55±0.25bc	5.51±0.36a	6.47±0.08a	6.36±0.00a	6.17±0.05a	5.60±0.14a
	W ₃ N ₃	1.31±0.15bc	4.78±0.10ab	6.34±0.10ab	5.87±0.05bc	5.81±0.15c	5.35±0.14ab
	W	**	**	**	**	**	**
	N	**	**	ns	**	ns	ns
	W×N	**	ns	ns	*	**	ns

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。*表示差异显著($P<0.05$);**表示差异极显著($P<0.01$);ns表示差异不显著。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ level. * and ** indicate 0.05 level significances($P<0.05$) and 0.01 level significances($P<0.01$), respectively; ns indicates no significant difference.

排放通量之间存在极显著正相关关系($F=23.7, P<0.01$; $F=21.6, P<0.01$; $F=16.8, P<0.01$), 分别解释土壤 N₂O 和 NO 排放差异的 31.3%、29.4% 和 24.4%。nirK 基因与 N₂O 和 NO 排放通量之间存在显著正相关关系($F=5.1, P<0.05$), 对土壤 N₂O 和 NO 排放差异的解释率为 8.9%。

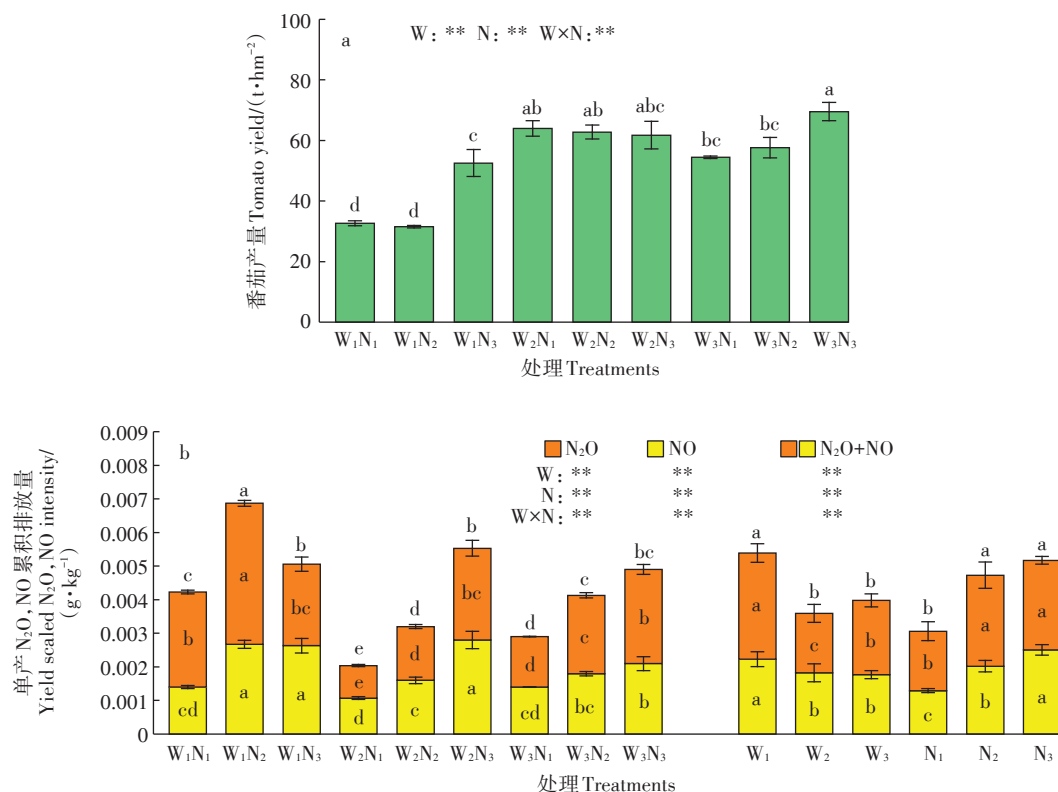
3 讨论

3.1 水氮耦合下设施土壤 N₂O 和 NO 排放与番茄产量及单产(N₂O+NO)累积排放量

温室作物产量除了受光照条件和温度等环境因素影响外,更依赖灌溉和施肥等人为调控因子^[20]。水氮耦合下土壤水分和养分对产量影响差异显著,合理的水氮耦合可显著提高产量^[21]。本研究中,灌水下限对产量的单一效应表现为 W₂ 和 W₃ 水平产量显著大于 W₁, 灌水量过高,可能使灌溉水向下运移的同时增

加了养分的淋溶损失,降低番茄产量^[21]。相同灌水下限 W₂ 水平各水氮处理的番茄产量无显著差异, W₁ 和 W₃ 水平各水氮处理表现为 N₃ 水平产量显著大于 N₁ 和 N₂, 且 N₁、N₂ 之间没有差异。本研究中,水氮耦合效应使 W₃N₃ 的番茄产量最高,这可能是由于灌水下限 W₃ 水平下,相比其他处理土壤较为干旱,增施氮肥能够补偿一定水分胁迫对作物生长的抑制,进而促进干物质积累,获得较高产量。

在环境和粮食安全的背景下,探寻稳定或提高蔬菜产量的水肥管理至关重要,因此单位产量气体排放量常作为评估作物生产环境成本的一个重要指标^[22]。在本研究中, W₂N₁ 和 W₃N₁ 处理的单位产量 N₂O、NO 及 (N₂O+NO) 排放量均较低。有研究表明,合理运用滴灌施肥技术降低单次灌水量,通过提高水肥利用率可显著提高玉米产量,减少单位产量 N₂O 和 NO 排放^[23]。总体上, W₁N₂ 处理的单位产量 N₂O 和 (N₂O+



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。*表示差异显著($P<0.05$);**表示差异极显著($P<0.01$);ns表示差异不显著
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ level. * and ** indicated 0.05 level significances ($P<0.05$) and 0.01 level significances ($P<0.01$), respectively; ns indicates no significant difference

图4 水氮耦合对番茄产量和单位产量 N₂O、NO 累积排放量(以 N 计)的影响

Figure 4 Interactive effects of irrigation and nitrogen on tomato yield and yield-scaled N₂O, NO emissions(calculated by N)

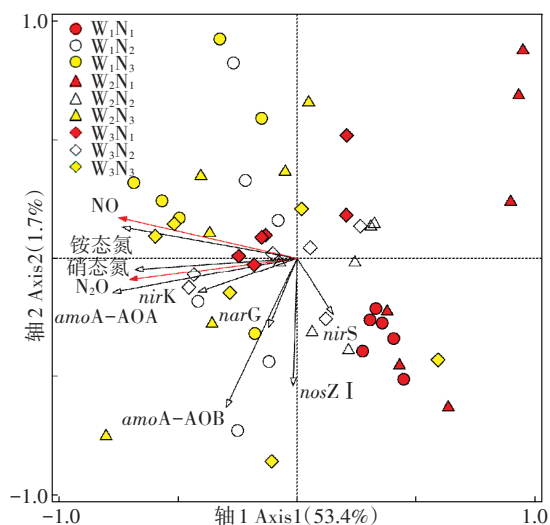


图5 N₂O 和 NO 排放量与土壤无机氮含量、硝化和反硝化功能基因的 RDA 分析

Figure 5 RDA analysis of N₂O and NO emissions and soil inorganic nitrogen content, nitrification and denitrification genes

NO)排放量显著高于其他处理,这可能与灌水下限 W₁水平灌水量较高,氧气不充足,易通过反硝化作用产生 N₂O 和 NO 排放有关。与其他处理相比, W₂N₁ 处理在保证番茄产量的同时,使单位产量 N₂O、NO 及 (N₂O+NO)排放量均最低,是本试验中平衡环境和作物产量的最佳处理。尽管 N₁施氮量(75 kg·hm⁻²)远低于设施栽培普遍施氮量,但由于试验地连续多年施氮且同时配施有机肥,一定程度实现有机肥替代氮肥,减少土壤酸化引发硝化反硝化过程产生 N₂O 和 NO 排放,在保证设施蔬菜养分需求的同时既能培肥土壤又能实现污染减排。

3.2 水氮耦合下设施土壤 N₂O 和 NO 排放及其影响因素

RDA 分析结果表明(图 5), N₂O 和 NO 排放通量与 amoA-AOA、铵态氮和硝态氮之间呈极显著正相关,这是由于土壤 N₂O 和 NO 排放受 amoA-AOA、铵态氮和硝态氮的作用较大,随着氮肥施入及水分作用均会增加硝化作用底物,硝化作用占据主导位置。土壤中高的 amoA-AOA 和 amoA-AOB 基因丰度可能会有效

地将铵态氮转化为硝态氮,而硝态氮作为反硝化过程的底物,有利于土壤发生反硝化作用,未被及时吸收利用的氮素通过硝化或反硝化过程以气态氮(N_2O+NO)形式损失^[23-25]。在本试验中,相同灌水下限水平下, N_2O 和 NO 排放随施氮量的增加表现为 $N_3>N_2>N_1$,这与氮肥溶解后被作物吸收的同时可为硝化或反硝化作用提供大量底物有关,在此过程中引起大量的 N_2O 和 NO 排放^[26-28]。相同施氮量下,不同灌水下限 N_2O 排放表现为 $W_3(45\text{ kPa})>W_1(25\text{ kPa})>W_2(35\text{ kPa})$,这可能与土壤氧气的相对含量显著影响 N_2O 排放有关^[29]。有研究表明,当WFPS超过70%时,由于土壤局部厌氧,土壤发生反硝化过程^[30];当WFPS超过80%时加快反硝化过程中 N_2O 和 NO 的产生,此时 N_2O 与含水量呈负相关,这与本研究中第47 d时 N_2O 出现负排放峰的结果一致,可能原因是气体采集前1 d进行了灌溉,土壤中较高的含水量抑制了 N_2O 向外扩散,使 N_2O 在土壤中的滞留时间延长^[31]。本研究中,灌水下限45 kPa下,氧气充足时可能加快硝化细菌反硝化过程中 N_2O 排放^[32-33]。有研究表明,在低pH、高氧含量和大量可利用性有机碳条件下,异养微生物利用有机氮或者无机氮(NH_4^+)通过氨氧化过程产生 N_2O ,同时硝化产物还可以进一步发生反硝化作用,从而产生大量的 N_2O 和 NO ,因此,除土壤自养硝化过程,特定环境下异养硝化-反硝化过程可能是灌水下限45 kPa下高排放通量的重要原因^[29,34]。而灌水下限25 kPa时反硝化作用强烈,厌氧环境下施入氮肥可显著提高反硝化底物的有效性,加速氮素分解过程中 N_2O 排放;相关分析结果表明,*nirK*基因丰度与 N_2O 和 NO 排放通量呈正相关,土壤中存在的亚硝酸还原酶(*nirK*基因编码)将硝态氮或亚硝态氮转化为 N_2 的过程中可能产生大量的 N_2O ^[35]。总体上, N_2O 和(N_2O+NO)总累积排放量表现为 W_2N_1 处理最低,这可能是由于中水低肥条件对于氮素转化过程具有一定的调控作用,在氮肥溶解过程中促进作物对氮素吸收,显著降低底物氮含量,而土壤中氧气含量在此条件下保持相对平衡,从而抑制了硝化、反硝化以及异养反硝化过程,降低 N_2O 和 NO 的产生。此外,本研究中,除 W_1N_3 处理,其余各处理 NO/N_2O 均小于1(数据未列出), N_2O 和 NO 的产生可能以反硝化作用为主。本研究中,反硝化菌功能基因(*nirS*、*nirK*、*nosZ I*和*narG*)的丰度比硝化菌功能基因(*amoA-AOA*和*amoA-AOB*)丰度略高,也进一步表明 N_2O 和 NO 可能以反硝化产生为主。

前期试验中,相同施氮量下,不同灌水下限 N_2O 排放表现为 $W_1>W_3>W_2$,与本试验结果相反($W_3>W_1>W_2$)。与前期研究结果相比,本试验总灌水量显著增加,在相同灌水下限条件下,灌水次数增多,土壤干湿交替频率升高,土壤含氧量的变化为异养硝化、自养硝化以及反硝化过程提供了适宜的环境条件^[29]。有研究表明,pH和 N_2O 排放呈负相关关系,低土壤pH值下易增加与反硝化有关的气体的产生^[36],这与本研究结果一致。与试验地之前结果(2017年)对比发现,本研究(2019年)土壤累积 N_2O 排放量比之前增加1.5~1.9倍^[15]。这与本研究连续定位施肥导致土壤酸化,土壤pH值降低有关(本研究pH值在5.8~6.6)。尤其施肥量大且灌水频繁更易使土壤pH降低,引发硝化反硝化强度增加,造成 N_2O 和 NO 的产生^[17]。

4 结论

(1)水氮耦合条件下,*amoA-AOA*、铵态氮含量、硝态氮含量和*nirK*基因丰度是影响 N_2O 和 NO 排放的主要影响因素,均与 N_2O 和 NO 排放通量之间存在极显著正相关关系,其影响作用依次降低。 N_2O 和(N_2O+NO)总累积排放量表现为 W_2N_1 处理最低, NO 总累积排放量表现为 W_1N_1 处理最低。

(2) N_2O 、 NO 和(N_2O+NO)总累积排放量及单产 NO 和(N_2O+NO)累积排放量均表现为施氮量单一影响效力最大,而番茄产量及单产 N_2O 累积排放量表现为灌水下限单一影响效力最大。本研究中 W_3N_3 处理产量最高,但过高氮肥投入显著增加了 N_2O 和 NO 排放。除差异不显著处理,处理 W_2N_1 显著增加番茄产量14.86%~50.69%,且单产 N_2O 和 NO 排放量分别降低40.00%~78.57%和21.43%~60.71%。

(3)综合番茄产量及 N_2O 、 NO 减排效果,长期设施生产中,配施有机肥作为基肥,灌水下限35 kPa、施氮量 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 组合是实现设施生产经济及环境双赢的水氮管理模式。

参考文献:

- [1] Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, et al. EDGAR v4. 3. 2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970—2012[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(3):959-1002.
- [2] Zhou X H, Zhao Y, Yang H Y, et al. Transformation of organic nitrogen fractions with different molecular weights during different organic wastes composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 262:221-228.
- [3] Deng J, Zhou Z X, Zheng X H, et al. Modeling impacts of fertilization alternatives on nitrous oxide and nitric oxide emissions from conven-

- tional vegetable fields in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81:642-650.
- [4] Diao T T, Xie L Y, Guo L P, et al. Measurements of N_2O emissions from different vegetable fields on the North China Plain[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 72:70-76.
- [5] Liu S W, Lin F, Wu S, et al. A meta-analysis of fertilizer-induced soil NO and combined NO + N_2O emissions[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(6):2520-2532.
- [6] Liu Q H, Qin Y M, Zou J W, et al. Annual nitrous oxide emissions from open-air and greenhouse vegetable cropping systems in China[J]. *Plant and Soil*, 2013, 370(1/2):223-233.
- [7] 周爽, 王广帅, 高阳, 等. 滴灌对农田 N_2O 排放影响的研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2020(1):8-12. ZHOU Shuang, WANG Guang-shuai, GAO Yang, et al. The effects of drip irrigation on soil N_2O emissions from farmland: A review[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(1):8-12.
- [8] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 土壤 N_2O 和NO产生机制研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(5):712-718. CAI Yan-jiang, DING Wei-xin, XIANG Jian. Mechanisms of nitrous oxide and nitric oxide production in soils: A review[J]. *Soils*, 2012, 44(5):712-718.
- [9] Kuang W N, Gao X P, Gui D W, et al. Effects of fertilizer and irrigation management on nitrous oxide emission from cotton fields in an extremely arid region of northwestern China[J]. *Field Crops Research*, 2018, 229:17-26.
- [10] Abalos D, Sanchez-Martin L, Garcia-Torres L, et al. Management of irrigation frequency and nitrogen fertilization to mitigate GHG and NO emissions from drip-fertigated crops[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490:880-888.
- [11] Beeckman F, Motte H, Beeckman T. Nitrification in agricultural soils: Impact, actors and mitigation[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2018, 50:166-173.
- [12] 杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 等. 加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16):127-134. DU Ya-dan, ZHANG Qian, CUI Bing-jing, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16):127-134.
- [13] 谢海宽, 江雨倩, 李虎, 等. 北京设施菜地 N_2O 和NO排放特征及滴灌优化施肥的减排效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4):591-600. XIE Hai-kuan, JIANG Yu-qian, LI Hu, et al. N_2O and NO emissions from greenhouse vegetable fields and the mitigation efficacy of the optimized fertigation in Beijing[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4):591-600.
- [14] Yao Z S, Yan G X, Wang R, et al. Drip irrigation or reduced N-fertilizer rate can mitigate the high annual N_2O +NO fluxes from Chinese intensive greenhouse vegetable systems[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 212:183-193.
- [15] 杜世宇, 薛飞, 吴汉卿, 等. 水氮耦合对设施土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2):476-484. DU Shi-yu, XUE Fei, WU Han-qing, et al. Interactive effect of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions from greenhouse soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2):476-484.
- [16] Wu H Q, Du S Y, Zhang Y L, et al. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse soil organic nitrogen fractions and soil-soluble nitrogen pools[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 216:415-424.
- [17] 张亚捷, 牛海山. 农田土壤氧化亚氮产生机制和相关模型研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5):554-562. ZHANG Ya-jie, NIU Hai-shan. Research development on generation mechanism and related models of N_2O emissions from agricultural soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(5):554-562.
- [18] Fan C H, Duan P P, Zhang X, et al. Mechanisms underlying the mitigation of both N_2O and NO emissions with field-aged biochar in an Anthrosol[J]. *Geoderma*, 2020, 364:114178.
- [19] Bru D, Sarr A, Philippot L. Relative abundances of proteobacterial membrane-bound and periplasmic nitrate reductases in selected environments[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(18):5971-5974.
- [20] 商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 等. 水肥气耦合对温室番茄地土壤 N_2O 排放及番茄产量的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(6):2924-2935. SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, et al. Effect of water-fertilizer-gas coupling on soil N_2O emission and yield in greenhouse tomato[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6):2924-2935.
- [21] 张新燕, 王浩翔, 牛文全. 不同水氮供应模式对设施番茄生长及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11):55-60. ZHANG Xin-yan, WANG Hao-xiang, NIU Wen-quan. The effects of different water-nitrogen couplings on growth and yield of greenhouse tomato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(11):55-60.
- [22] Van Groenigen J W, Velthof G L, Oenema O, et al. Towards an agronomic assessment of N_2O emissions: A case study for arable crops[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61:903-913.
- [23] Tian D, Zhang Y Y, Mu Y J, et al. The effect of drip irrigation and drip fertigation on N_2O 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.
- [24] Zhao H, Li X Y, Jiang Y. Response of nitrogen losses to excessive nitrogen fertilizer application in intensive greenhouse vegetable production[J]. *Sustainability*, 2019, 11(6):1513.
- [25] McDaniel M D, Simpson Robert R, Malone B P, et al. Quantifying and predicting spatio-temporal variability of soil CH_4 and N_2O fluxes from a seemingly homogeneous Australian agricultural field[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 240:182-193.
- [26] Zhou S, Sun H F, Bi J G, et al. Effect of water-saving irrigation on the N_2O dynamics and the contribution of exogenous and endogenous nitrogen to N_2O production in paddy soil using ^{15}N tracing[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 200:104610.
- [27] 雷宏军, 杨宏光, 刘欢, 等. 水肥气耦合滴灌番茄地土壤 N_2O 排放特征及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11):95-104. LEI Hong-jun, YANG Hong-guang, LIU Huan, et al. Characteristics and influencing factors of N_2O emission from greenhouse tomato field soil under water-fertilizer-air coupling drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(11):95-

- 104.
- [28] Zhang Y J, Lin F, Jin Y G, et al. Response of nitric and nitrous oxide fluxes to N fertilizer application in greenhouse vegetable cropping systems in southeast China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:20700.
- [29] 陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 等. 设施菜田土壤 N_2O 产生对 O_2 的响应[J]. 环境科学, 2018, 39(8):3826-3834. CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, et al. Nitrous oxide production in response to oxygen in a solar greenhouse vegetable soil[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8):3826-3834.
- [30] Yao Z S, Liu C Y, Dong H B, et al. Annual nitric and nitrous oxide fluxes from Chinese subtropical plastic greenhouse and conventional vegetable cultivations[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 196:1-9.
- [31] 黄树辉, 吕军. 农田土壤 N_2O 排放研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(4):516-522. HUANG Shu-hui, LÜ Jun. Research progress in nitrous oxide emissions from agricultural soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4):516-522.
- [32] Liu R, Yang Y, Wang Y S, et al. Alternate partial root-zone drip irrigation with nitrogen fertigation promoted tomato growth, water and fertilizer-nitrogen use efficiency[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 233:106049.
- [33] 邓焕广, 张智博, 张菊, 等. 多重干湿交替对城市河岸带土壤氮转化及 N_2O 排放的影响研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(3):640-645. DENG Huan-guang, ZHANG Zhi-bo, ZHANG Ju, et al. Effect of repetitive alternation of drying and wetting on nitrogen transformation and N_2O emission in surface soil of urban riparian zones[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(3):640-645.
- [34] 王—明, 彭光浩. 异养硝化微生物的分子生物学研究进展[J]. 土壤, 2003, 35(5):378-386. WANG Yi-ming, PENG Guang-hao. Advance in molecular biology of heterotrophic nitrifier[J]. *Soils*, 2003, 35(5):378-386.
- [35] Duan P P, Zhou J, Feng L, et al. Pathways and controls of N_2O production in greenhouse vegetable production soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(3):285-297.
- [36] Hallin S, Philippot L, Löffler F E, et al. Genomics and ecology of novel N_2O -reducing microorganisms[J]. *Trends in Microbiology*, 2018, 26(1):43-55.