doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.030

# 温室气体排放与番茄产量对水肥气耦合的响应机制研究

孙亚楠<sup>1,2</sup> 段琳博<sup>1,2</sup> 钟华昱<sup>3</sup> 蔡焕杰<sup>1,2</sup> 王晓云<sup>1,2</sup> 赵政鑫<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;

3. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要:为探求温室番茄节水减排优产的灌溉模式,以番茄(金鹏 8 号)为研究对象,设置 11 和 12(对应作物-皿系数  $k_{\varphi}$ 为 0.8 和 1.0)2 个灌水水平,F1 和 F2(对应施氮量 180 kg/hm<sup>2</sup> 和 240 kg/hm<sup>2</sup>)2 个施氮水平,A1、A2 和 CK(1 倍 和 2 倍文丘里加气量,不加气 CK 作为对照处理)3 个加气水平,采用 3 因素完全随机设计,共 10 个处理,每个处理 重复 3 次,采用静态暗箱-气相色谱法对番茄全生育期温室气体排放进行监测分析,探究土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>排放与 番茄产量的变化规律;分析灌水水平、施氮水平和加气水平对温室番茄产量和温室气体排放的影响,综合全球净增 温潜势(Net global warming potential, NGWP)和温室气体排放强度(Greenhouse gas intensity, GHGI),提出以节水减 排高产为目标的温室番茄水肥气一体化滴灌管理模式。结果表明:灌溉水平和施氮水平增大均会增加土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 排放通量,12 处理较 11 处理平均增加 24.8% (P < 0.05)与 14.8% (P > 0.05),F2 处理比 F1 处理平均增加 8.6% (P > 0.05)与 34.9% (P < 0.05)和 20.9% (62.9% (P < 0.05)。番茄全生育期内土壤 CH<sub>4</sub>排放通量呈 现土壤为 CH<sub>4</sub>的汇,灌水水平增大会增加土壤 CH<sub>4</sub>排放通量,而施氮水平增加则会减小 CH<sub>4</sub>排放通量,12 处理比 11 处理平均增加 27.8% (P < 0.05),F2 处理比 F1 处理平均减少 25.5% (P < 0.05);加气、施氮和灌水会显著增加番茄产量(P < 0.05)。综合考虑经济因素和生态因素,A1F211 处理效益最佳,即加气水平 A1、施氮水平 F2、灌水水平 11 的组合策略可以兼顾节水优产减排要求,为西北地区温室番茄较优灌溉模式。

关键词:温室气体;番茄产量;加气灌溉;水肥气耦合;全球净增温潜势 中图分类号:S626;S641.2 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2024)05-0312-11 OSID:

## Response Mechanism of Soil Greenhouse Gas Emission and Yield of Greenhouse Tomato to Water-fertilizer-air Coupling

SUN Ya'nan<sup>1,2</sup> DUAN Linbo<sup>1,2</sup> ZHONG Huayu<sup>3</sup> CAI Huanjie<sup>1,2</sup> WANG Xiaoyun<sup>1,2</sup> ZHAO Zhengxin<sup>1,2</sup> (1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to seek the irrigation mode of greenhouse tomato land water conservation, emission reduction and superior yield, taking tomato (Jinpeng 8) as the research object, the experiment set I1 and I2 (corresponding to the crop – dish coefficient  $k_{cp}$  0.8 and 1.0) two irrigation levels, F1 and F2 (corresponding to the application of nitrogen 180 kg/hm<sup>2</sup> and 240 kg/hm<sup>2</sup>) two nitrogen application levels with A1, A2 and CK (1 time and 2 times Venturi aeration, respectively, without aeration CK was used as control treatment) as three aeration levels, a three-factor completely randomized design with ten treatments, each treatment repeated three times, was used to monitor and analyze the greenhouse gas emissions during the whole life cycle of tomato by static dark box – gas chromatography, and to investigate the changing patterns of soil CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions and tomato yield. The effects of irrigation level, nitrogen application level and gas addition level on the yield and greenhouse gas emission of

基金项目:国家自然科学基金项目(52179046、51309192)

收稿日期: 2023-10-17 修回日期: 2024-01-09

作者简介: 孙亚楠(1994—),女,博士生,主要从事农业资源高效利用研究, E-mail: sj-syn-2020@ nwsuaf. edu. cn

通信作者:蔡焕杰(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业资源高效利用研究, E-mail: caihj@ nwsuaf. edu. cn

313

greenhouse tomato were analyzed, and the net global warming potential (NGWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) were synthesized, so as to put forward the greenhouse tomato water-fertilizer-airintegrated drip irrigation management mode with the goal of water conservation, emission reduction and high yield. The results showed that increasing irrigation level and nitrogen application level both increased soil CO, and N, O emission fluxes, with an average increase of 24.8% (P < 0.05) versus 14.8% (P > 0.05) in the I2 treatment compared with that in the I1 treatment, and an average increase of 8.6% (P > 0.05) versus 34.9% (P < 0.05) in the F2 treatment compared with that in the F1 treatment. Aerated irrigation had a significant effect on soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emission fluxes, which increased by an average of 5.5% and 10.0% (P>0.05) in A1, 20.9% and 62.9% (P<0.05) in A2 treatments, respectively, as compared with that in CK treatment. Soil  $CH_4$  emission fluxes during the whole tomato reproductive period did not have a significant pattern of change, showing the soil as a sink for CH4, increasing irrigation level would increase soil CH4 emission fluxes, while increasing nitrogen application level would reduce CH4 emission fluxes, I2 treatment increased by 27.8% on average compared with I1 (P < 0.05), and F2 treatment decreased by 25.5% on average compared with F1 (P < 0.05). Aerating, the fertilization and irrigation significantly increased tomato yield (P < 0.05). Considering the economic and ecological factors, the benefits of A1F2I1 treatment were the best, the combination strategy of aerating level A1, applying nitrogen level F2, and irrigating level I1 can take into account the requirements of water conservation and superior yield reduction, and provide a reference for the better irrigation mode of greenhouse tomato in Northwest China.

Key words: greenhouse gas; tomato yield; aerated irrigation; water-fertilizer-air coupling; net global warming potential

#### 0 引言

温室气体排放增加导致辐射强迫增强和全球变 暖,影响极端天气事件,如极端温度、强降水和干旱 频率增加等,对人类生产生活产生巨大威胁[1],大 气中二氧化碳 (CO,)、氧化亚氮 (N,O) 和甲烷 (CH<sub>4</sub>)是主要的温室气体,其对气候和生态系统产 生的影响受到密切关注。农田生态系统是温室气体 排放的主要来源,对全球气候变化产生重大影响, 2019 年农业 CO, 排放量达到 1.70×10<sup>11</sup> t, 占全球人 类活动所产生 CO,的 31%,农业 N,O 和 CH4 排放量 占全球人为活动产生量的 78% 和 53% [1]。近年来 随着需求增加,设施农业发展迅速,已经成为现代农 业的重要组成部分[2],设施菜地具有高肥高水的特 点,造成了大量温室气体排放<sup>[3]</sup>,给环境造成了巨 大压力,因此,研究设施菜地温室气体排放规律,提 出合理的增产减排措施,对于缓解温室效应具有重 要意义。

番茄是重要的蔬菜作物,具有丰富的营养价值, 其种植面积逐年增加<sup>[4]</sup>。截止到 2020 年,在中国种 植面积超过 1.10×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>。番茄广泛在温室中种 植,为了提升产量,施肥量远大于作物所需量,相关 研究表明,施肥会增加土壤微生物活性,刺激微生物 对土壤有机质的矿化分解,促进土壤呼吸<sup>[5]</sup>,增加 CO<sub>2</sub>排放,同时,还会增加土壤氮源,为土壤硝化和 反硝化反应提供反应底物,促进 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[6]</sup>,在旱 地施肥会促进土壤对 CH<sub>4</sub>的吸收<sup>[7]</sup>,不合理施肥会 造成温室气体大量排放,加剧了温室效应。因此,在 保证产量的同时,采取合理的施肥量来减少温室气 体排放至关重要。近年来,已在多种农田土壤研究 中发现,加气灌溉可以显著缓解作物根区缺氧状 况<sup>[8]</sup>,改善土壤通气情况,促进作物生长,提高作物 产量<sup>[9]</sup>,但也会提高农田土壤温室气体排放量,引 起一系列环境问题<sup>[10]</sup>。目前已有较多关于灌水量 对番茄产量和温室气体排放影响的研究,结果表明 灌水量增加虽会增加番茄产量,但也会提高土壤 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放量<sup>[11]</sup>。

目前研究大多集中于水、肥、气单因子对土壤温 室气体排放、产量等的影响,或者集中于水肥气耦合 对某一温室气体(CO,或N,O)的影响,如商子惠 等[12]和段琳博等[13]的研究中,仅考虑了水肥气耦 合对产量和 N<sub>2</sub>O 排放的影响,但并没有考虑 CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>。当前,关于水肥气耦合对温室气体和产量的 综合评价较少,在提高作物产量、节水和减缓温室气 体排放方面的研究仍不充分。综合考虑加气灌溉的 经济和环境效益,对选择最优灌溉模式和合理的农 田管理措施具有重要意义。因此,在段琳博等<sup>[13]</sup>的 研究基础上,本试验通过设置灌水水平、施肥水平和 加气水平3个因素,研究水肥气耦合对温室气体排 放的影响,探明不同水肥气处理对温室气体排放、番 茄产量、全球净增温潜势(Net global warming potential, NGWP)和温室气体排放强度(Greenhouse gas intensity, GHGI)的差异,提出优产节水减排的 较佳灌溉模式,为温室番茄增产减排提供理论依据。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 试验区概况

试验在西北农林科技大学日光温室(34°20'N, 108°04'E)进行。试验所处地理位置属半湿润易旱 区,年均日照时数2163.8h,无霜期210d。土壤类 型为壤土,属于棕壤土,1m土层内平均土壤干容重 为1.35g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为23.8%(质量含水 率)。番茄移植前测得深度0~20cm土壤有机质、 全氮、全磷、全钾质量比分别为9.51、1.86、1.40、 20.22g/kg,pH值为7.65。

#### 1.2 试验设计

试验以温室番茄为供试作物(品种为"金鹏8号"),为 2021 年春夏茬,番茄于3月28日移植(3叶1心至4叶1心),7月9日收获,全生育期共105d,生育期划分为苗期(0~30d)、开花坐果期(31~51d)、果实膨大期(52~77d)、成熟期(78~105d)。

试验设置 I1 和I2(对应作物-皿系数 k<sub>o</sub>为0.8 和 1.0)2 个灌水水平,F1 和 F2(对应施氮量 180 kg/hm<sup>2</sup> 和 240 kg/hm<sup>2</sup>)2 种施氮水平,A1、A2 和 CK(1 倍和 2 倍文丘里加气量,不加气 CK 作为对照处理)3 种 加气水平。试验为完全随机区组设计,包括 10 个处 理组合(表 1),每个处理重复3次,共 30 个小区。 四穗时打顶,除水肥气外,对每种处理均采用相同的 田间管理常规措施,如作物品种、播种和收获时间以 及磷肥和钾肥施用量。

18	ib. I Design o	a experimental treath	ients
处理	$k_{cp}$	施氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	加气量
A1F1I1	0.8	180	1 倍气
A1F2I1	0.8	240	1 倍气
A1F1I2	1.0	180	1 倍气
A1F2I2	1.0	240	1 倍气
A2F1I1	0.8	180	2 倍气
A2F2I1	0.8	240	2 倍气
A2F1I2	1.0	180	2 倍气
A2F2I2	1.0	240	2 倍气
CKF112	1.0	180	不加气
CKF2I2	1.0	240	不加气

表 1 试验处理设计 ab 1 Design of experimental treatme

灌水定额由安置在温室内的 E601 型蒸发皿的 蒸发量确定,按两次灌水间隔内蒸发量进行灌水,灌 溉间隔为3~6d,每次灌水在当天08:00。小区灌 水定额计算式为<sup>[14]</sup>

$$W = k_{cp} E_{pan} A N \tag{1}$$

式中 W----灌水定额,L

Epan——两次灌水时间间隔内蒸发量,mm

A——单个滴头控制面积,取0.14 m<sup>2</sup> (0.35 m× 0.4 m)<sup>[15]</sup>

N----小区滴头数量,取11个

利用 Mazzei 287 型文丘里计(Mazzei Injector Company, LLC,美国)作为加气设备进行加气。灌水时通过水泵形成加压灌溉水,文丘里设备将空气吸入到管道中,同时调节灌水总管道末端调节阀,A1 加气处理进口压力为 0.1 MPa,出口压力为 0.02 MPa,A2 加气处理进口压力为 0.1 MPa,出口压力为 0.01 MPa,由排气法得到 A1 进气量约占灌溉水量的 17%,A2 占 34%<sup>[16]</sup>。

灌溉用水由与水泵相连的桶提供,本试验全生 育期总蒸发量为 213.10 mm, I1 和 I2 处理的单个小 区灌溉定额为 262.66 L 和 328.10 L(表 2)。

#### 表 2 番茄全生育期灌水定额 Tab. 2 Irrigation amount of tomato during whole growth period

<b>漢</b> 水 时间	移植后	两次灌水期间	灌水定额/L	
准小时问	时间/d	蒸发量/mm	$k_{cp} = 0.8$	$k_{cp} = 1.0$
2021年4月15日	20	9.4	11. 59	14.47
2021年4月19日	24	9.3	11.46	14.32
2021年4月22日	27	2.3	2.83	3.54
2021年4月28日	33	5.0	6.16	7.70
2021年5月1日	36	11.4	14.05	17.55
2021年5月5日	40	9.4	11. 59	14.47
2021年5月10日	36	18.5	22.80	28.48
2021年5月14日	49	13.0	16.02	20.02
2021年5月19日	54	10.9	13.43	16.78
2021年5月24日	59	10.6	13.07	16.32
2021年5月29日	64	14.7	18.12	22.63
2021年6月2日	68	13.2	16.27	20.32
2021年6月6日	72	12.3	15.16	18.94
2021年6月11日	77	13.7	16.89	21.09
2021年6月16日	82	10.0	12.33	15.40
2021年6月22日	88	14.6	18.00	22.48
2021年6月28日	94	12.4	15.28	19.09
2021年6月29日	95	1.7	2.10	2.62
2021年7月4日	100	11.5	14.17	17.71
2021年7月8日	104	9.2	11.34	14.16
总计		213.1	262.66	328.10

供试氮肥为尿素(含 N 质量分数大于等于 46%),钾肥为硫酸钾(含 K 质量分数大于等于 52%)240 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥为过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>质量分 数大于等于 16%)150 kg/hm<sup>2</sup>,菌肥(羊板球) 5312.5 kg/hm<sup>2</sup>,其中磷钾肥和菌肥全部基施,30% 氮肥作为基肥,剩余氮肥通过施肥泵将水溶肥通过 滴灌管输送到植株根部,追肥时间分别在移植后 27、54、68、95 d,施肥比例为1:2:2:2。

#### 1.3 测量指标

1.3.1 土壤含水率和土壤温度

每次取气同时用土钻在小区的首、中、尾端2棵 植株间3点取土,深度为0~20 cm,使其充分混合作 为该小区的土样,土壤含水率采用干燥法(105℃, 12 h)测量。

土壤充水孔隙度(WFPS)计算公式为

$$WFPS = \theta \frac{r}{1 - \frac{r}{\rho_s}}$$
(2)

式中 6-----土壤质量含水率,%

r-----土壤容重,取1.35 g/cm3

ρ<sub>s</sub>——土壤密度,取2.65 g/cm<sup>3</sup>

用曲管式地温计(河北省武强红星仪表厂)测 定土壤10 cm 处温度。

1.3.2 温室气体采样和测量

采用"静态暗箱-气相色谱法"测定番茄全生育 期土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>排放通量,箱体用 2 mm 钢板 制成,底面积为 25 cm × 25 cm,高度为 40 cm。箱体 外表面用海绵与锡箔纸包裹。番茄移植当天在小区 中央 2 棵幼苗之间预埋方形底座,底座嵌入土壤 5 cm,作为采样点,直到番茄收获。底座上端由大约 深 3 cm 的凹槽构成,用以放置静态箱箱体,取样时 注水密封。生育期采样间隔 3 ~ 6 d,追肥后进行加 测。气体取样时间分别为 10:00、10:10、10:20 和 10:30,利用带有三通阀的 50 mL 注射器进行 4 次气 体采集,每次取气 30 mL,并在当天进行浓度分析。 气体采样的同时用安插在箱体顶部的电子温度计 (TA288 型)测量箱内温度,用以计算气体排放通 量。去除奇异点,保证 4 个样品浓度测量值与时间 的线性回归决定系数  $R^2 \ge 0.90$ 。

 $CO_2$ 、 $N_2O$  和  $CH_4$ 浓度采用安捷伦气相色谱仪 (Agilent Technologies 7890A GC System,美国)测定, 气体排放通量计算式为

$$F = \rho_g h \frac{273}{273 + T} \frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中 F——温室气体排放通量,CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>单位为 mg/(m<sup>2</sup>·h),N<sub>2</sub>O 单位为 µg/(m<sup>2</sup>·h)

$$ho_g$$
——标准状态下气体密度,g/cm<sup>3</sup>

dc/dt——温室气体浓度变化率, CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub> 单位为 mg/(m<sup>3</sup>·h), N<sub>2</sub>O 单位为 μg/(m<sup>3</sup>·h) h----箱体高度,m

T——箱内温度,℃

番茄全生育期内土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>累积排 放量计算式为

$$R = 24 \sum_{i=1}^{n} \frac{D(F_i + F_{i+1})}{2}$$
(4)

式中 R-----土壤 CO2、N2O 和 CH4累积排放量,kg/hm<sup>2</sup>

D——相邻两次测定间隔时间,d

n——温室气体总测定次数

1.3.3 番茄产量

番茄成熟后,每小区选取长势均匀的5株进行 测产,取均值作为该小区产量,并换算为总产量 (t/hm<sup>2</sup>)。

1.3.4 农田全球净增温潜势与温室气体排放强度

NGWP 和 GHGI 是评价温室气体对气候变化影响相对能力的常用指标,结合  $N_2O$  和  $CH_4$ 引起的增温效应,以 100 年影响尺度为计,单位质量  $N_2O$  和  $CH_4$ 的增温效应分别为  $CO_2$ 的 273 倍和 27.9 倍<sup>[1]</sup>,本次试验持续时间短,土壤有机碳的变化忽略不 计<sup>[17]</sup>。

全球净增温潜势(kg/hm<sup>2</sup>)计算式为<sup>[18]</sup>

$$NGWP = 273R_1 + 27.9R_2 \tag{5}$$

式中  $R_1$ —— $N_2O$  累积排放量, kg/hm<sup>2</sup>

 $R_2$ ——CH<sub>4</sub>累积排放量,kg/hm<sup>2</sup>

温室气体排放强度(kg/t)计算式为

$$GHGI = \frac{NGWP}{Y} \tag{6}$$

式中 Y----番茄产量,t/hm<sup>2</sup>

1.3.5 土壤硝态氮含量

取气时用土钻在小区 0~20 cm 取样,采用 2 mol/L KCI 浸提,连续流动分析仪(Auto Analyzer 3AA3,德国,精度 0.001AUFS)测定土壤硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量。土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量计算公式为

$$M = \frac{1\ 000\ CV}{m} \tag{7}$$

式中 M-----待测样品 NO3-N 质量比, mg/kg

C-----待测样品 NO3-N 质量浓度, mg/L

V——待测样品提取液体积,取0.05 L

m——待测土壤样品质量,取5.00g

#### 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2016 对试验数据进行整理和初步分析,采用 SPSS 26.0 对试验数据进行显著性分析和 方差分析,不同处理间采用最小显著性差异法 (Least-significant difference, LSD)进行检验,显著性 水平为 P < 0.05;对土壤温室气体排放通量与土壤

内变化。土壤 CO,排放通量在番茄不同生育期内表

现出明显差异,番茄苗期 CO<sub>2</sub>排放通量低,开花坐果 期 CO<sub>2</sub>排放通量随移植后时间的增加逐渐增大,在

果实膨大期达到最大,CO<sub>2</sub>排放最为旺盛,主峰值出现在移植后 69~70 d处,以2倍气高肥充分灌溉处

理(A2F2I2)最高,为1480.26 mg/(m<sup>2</sup>·h),比1倍

气和对照处理分别增加 30.1% 和 38.0%, 在成熟

期土壤 CO, 排放通量逐渐降低, 最后维持在较低

环境因子进行皮尔逊线性相关分析;用 Origin Pro 2021 绘图。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 土壤温室气体排放特征

2.1.1 土壤 CO<sub>2</sub>排放特征

如图 1a、1b 所示,各处理土壤 CO<sub>2</sub>排放通量的 变化规律相似,呈倒"V"形,整个生育期内,各处理 土壤 CO<sub>2</sub>排放通量在 227,94~1480,26 mg/(m<sup>2</sup>·h)

水平。 土壤 CO<sub>2</sub>排放通量在 227.94~1 480.26 mg/(m<sup>2</sup>·h) 1600 苗期 开花坐果期 果实膨大期 成熟期 1600 苗期 开花坐果期 果实膨大期 成熟期 1400 1400 上壤C0,排放通量/ 壤CO。排放通量/ A 1 F 211  $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$ 1200 1200 (mg•m<sup>-2</sup>•h<sup>-1</sup>) A 2E211 A2E111 1000 1000 A1F2Ľ 800 800 CKF2L 600 600 400 400 200 200 15 25 35 45 55 65 75 85 95 105 15 25 35 45 55 65 75 85 95 105 移植后时间/d 移植后时间/d (b) (a) 苗期 成熟期 开花坐果期 果实膨大期 开花坐果期 果实膨大期 苗期 300 300 成熟期 追肥 追肥 A1F211 土壤N,O排放通量/ 250 Ψ. 250 壤N<sub>2</sub>O排放通过 (µg•m<sup>-2</sup>•h<sup>-1</sup>) A2F111 A2F2I1 200 (µg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-</sup> 200 A1F2I2 A1F1 CKF112 CKF2I2 150 150 100 100 50 50 0 15 35 45 75 85 95 105 15 25 75 95 105 55 65 35 45 55 65 85 移植后时间/d 移植后时间/d (c) (d) 0.06 0.06 开花坐果期 果实膨大期 苗期 开花坐果期 果实膨大期 成熟期 苗期 成熟期 0.04 0.04 上壤CH\_排放通量/ Ì 0.02 0.02  $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$ 壤CH。排放通1  $m^{-2} \cdot h^{-1}$ ſ -0.02-0.02 -0.04 -0.04 · gm -0.06 -0.06 -0.08 -0.08 ▲A1F1I2
 ◆CKF1I2 ▲A2F1I1 ◆A1F2I2
 ◆CKF2I2 A2F2I1 -0.10 +A2F1I2 ★A2F2I2 -0.10-0.12-0.1215 15 25 35 45 55 65 75 85 95 105 25 35 45 55 65 75 85 95 105 移植后时间/d 移植后时间/d (e) (f)

图 1 水肥气耦合下土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>排放通量变化曲线



处理间对比发现,在施氮水平和加气水平一致的条件下,灌水量增加,CO<sub>2</sub>排放通量增加,充分灌溉处理(I2)CO<sub>2</sub>排放通量高于亏缺灌溉(I1)处理, 具有显著性差异(P<0.05),I2处理CO<sub>2</sub>排放通量 比I1处理平均高24.8%。在相同灌水水平和加气 水平下,施氮量增加会增加土壤CO<sub>2</sub>排放通量,高肥 处理(F2)土壤CO<sub>2</sub>排放通量比低肥处理(F1)平均 高8.6%(P>0.05)。在相同灌水水平和施肥水平 下,加气处理与对照处理(CK)相比,加气处理会增 加土壤CO<sub>2</sub>排放,1倍气处理(A1)CO<sub>2</sub>排放通量没 有显著变化(P>0.05),平均增加5.5%,2倍气处 理(A2)会显著增加CO<sub>2</sub>排放(P<0.05),A2F1I2和 A2F2I2相对于CK处理的CO<sub>2</sub>排放通量分别增加 19.0%和22.8%(*P*<0.05)。

2.1.2 土壤 N<sub>2</sub>O 排放特征

如图 1c、1d 所示,不同加气灌溉模式下温室番 茄土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量随移植后时间增加呈波动性 变化,总体呈现先增加后减小的趋势。番茄全生育 期内,N<sub>2</sub>O 排放通量在 14.94~279.60 µg/(m<sup>2</sup>·h) 内变化,番茄土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量表现出明显的生育 期特征,苗期 N<sub>2</sub>O 排放通量较低,可能是受此时土 壤温度较低的影响。随移植后时间的增加,番茄植 株逐渐生长壮大,N<sub>2</sub>O 排放通量呈增长趋势,在果实 膨大期达到顶峰,成熟期又降低到较低水平。在移 植后 27、54、68、95 d 进行追肥,追肥后 N<sub>2</sub>O 排放通 量显著增加,出现明显峰值,施氮对峰值的影响较

317

大,主峰值出现在移植后 69~70 d,各处理 N<sub>2</sub>O 排 放通量主峰值在 49.86~279.60 μg/(m<sup>2</sup>·h)内变 化,其中 A2F2I2 处理峰值最大,为 279.60 μg/(m<sup>2</sup>·h), 比 A2F1I2 处理增加 49.9%,F2 处理的峰值 N<sub>2</sub>O 排 放通量比 F1 处理平均增大 34.3%。

相同施氮水平和加气水平下,灌水水平增加会 导致 N<sub>2</sub>O 排放通量增加,I2 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量比 II 处理平均增加 14.8% (*P*>0.05)。在灌水水平和加 气水平一致的条件下,施氮量增加,N<sub>2</sub>O 排放通量显 著增加(*P*<0.05),F2 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量比 F1 处 理平均增加 34.9%。在相同灌水水平和施氮水平 下,加气处理与 CK 处理相比,A1 处理与其无显著 性差异(*P*>0.05),平均增加 10.0%,A2 处理显著 增加 了 N<sub>2</sub>O 排放通量比 CK 的各相应处理分别 增加 67.8%和 58.0%。

#### 2.1.3 土壤 CH<sub>4</sub> 排放特征

如图 1e、1f 所示,不同处理间的土壤 CH<sub>4</sub> 排放 通量呈现波动性变化,变化趋势基本一致,在生育期 的大多数时间,CH<sub>4</sub> 排放通量为负值,表现为土壤是 CH<sub>4</sub>的汇。整个生育期内,CH<sub>4</sub> 排放通量在  $-0.084 \sim$ 0.018 mg/(m<sup>2</sup>·h)内变化,出现了较为明显的排放/ 吸收特征,移植后 66~69 d,表现为汇的峰值,最大 峰值处理为 A1F2I1,为 -0.075 mg/(m<sup>2</sup>·h),其余时 期均在 -0.02 mg/(m<sup>2</sup>·h)水平上下波动。在相同 施氮水平和加气水平下,随着灌水水平的增加,CH<sub>4</sub> 排放通量变大, I2 处理排放通量比 I1 处理增加 27.8%。在灌水水平和加气水平一致条件下, 施氮 水平的变化使 CH<sub>4</sub> 排放通量出现显著性差异(*P* < 0.05), F2 处理比 F1 处理排放通量降低 25.5%。 加气灌溉会降低 CH<sub>4</sub> 的排放, 促进土壤对 CH<sub>4</sub> 的 吸收。

#### 2.2 土壤环境因子变化趋势

番茄全生育期内,各处理 WFPS 变化趋势一致, 整体呈现前期波动性变化,后逐渐降低的趋势。如 图 2a、2b 所示,在移植后至 70 d,因为地膜覆盖的保 墒作用,WFPS 维持在较高水平:70~78 d, WFPS 逐 渐急剧下降,原因包括:①在此期间,这一阶段的气 温急剧上升,蒸发较大,造成 WFPS 降低。②此时番 茄处于果实膨大期后期,可能是因为番茄需水量较 大,造成 WFPS 降低: WFPS 后期维持在一个较低的 水平。加气灌溉会减小 WFPS,相较于 CK 处理,A1 处理降低 1.72% (P > 0.05), A2 处理降低 3.33% (P>0.05); 灌水水平降低会降低 WFPS, 11 处理 WFPS 比 I2 处理减少 1.66% (P>0.05)。各处理的 土壤温度变化趋势一致,整体呈现逐渐上升的趋势, 与大气温度变化一致,变化范围为16.6~31.9℃。 根据图 2e、2f 可知,番茄各处理 NO,-N 含量变化趋 势相同,在移植后27、54、68、95 d进行追肥,追肥后 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量急剧增加,出现峰值,在移植后 28 d 出现第1个峰值,最大处理为 A2F2I2,比 A2F1I2 处 理高42.8%,之后随移植后时间增加NO<sub>2</sub>-N含量 逐渐减少,直至追肥后,分别在55、69、96 d出现峰



Fig. 2 Variation characteristics of WFPS, soil temperature and NO3-N content under coupling of water-fertilizer-air

值,随后硝态氮含量持续降低,最后维持在较低水 平;F1 处理硝态氮质量比在 95.72~379.02 mg/kg 内变化,F2 处理在 125.15~507.9 mg/kg 内变化, F2 处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著大于 F1 处理(P<0.05), 增幅为 30.88%;灌水水平和加气水平的变化没有 引起 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的明显变化(P>0.05)。

## 水肥气耦合对番茄产量和温室气体排放及全 球净增温潜势的影响

与充分灌溉相比,亏缺灌溉会降低番茄产量,如 表 3 所示,在相同施氮水平和加气条件下,II 与 I2 均表现出显著性差异(P < 0.05),灌水量增加,产量 也随之增加,A1F1I2、A1F2I2、A2F1I2 和 A2F2I2 处 理比 I1 水平下各相应处理的产量分别增加 16.2%、 18.9%、19.5%和 19.4%。施氮量的变化也会造成 产量的显著变化,由表 3 可知,相同灌水水平和加气 条件下,F2 处理产量显著高于 F1 处理(P < 0.05), A1F2I1、A1F2I2、A2F2I1、A2F2I2和 CKF2I1比 F1 处理下的各相应处理分别增加 11.9%、14.4%、 11.1%、11.0%和 11.4%。加气处理产量显著高于 对照处理(P < 0.05),A1F2I2和 A1F112比 CK 各相 应处理的产量分别高 18.6%和 15.4%,A2F2I2和 A2F112比 CK 各相应处理的产量分别高 23.5%和 23.9%,A2处理较 A1处理产量略有提高,平均增长 5.8%,并不显著(P > 0.05)。

表 3 不同处理土壤  $CO_2$ 、 $N_2O$ 、 $CH_4$ 累积排放量对 NGWP、番茄产量和 GHGI 的影响

Tab. 3	Effects of soil CO <sub>2</sub>	, N <sub>2</sub> O and CH <sub>4</sub>	emissions on NGWP,	tomato yield and	GHGI under different treatments
--------	---------------------------------	--	--------------------	------------------	---------------------------------

处理		土壤温室	土壤温室气体累积排放量/(kg·hm <sup>-2</sup> )			产量/	
		CO2	N <sub>2</sub> O	$CH_4$	$(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	$(t \cdot hm^{-2})$	GHGI/(kg•t <sup>-1</sup> )
A1F	'1 I I	$1.01 \times 10^{4}$ g	0. 98 <sup>h</sup>	-0.54°	253. 41 <sup>h</sup>	40. 08 <sup>e</sup>	6. 32 <sup>e</sup>
A1F	211	$1.08 \times 10^{4}$ g	1.28 <sup>f</sup>	$-0.82^{de}$	328. 32 <sup>f</sup>	44. 85 <sup>cd</sup>	7. 35 <sup>ed</sup>
A1F	112	1. 38 $\times 10^{4}$ de	1.11 <sup>g</sup>	– 0. 38 <sup>b</sup>	293. 13 <sup>g</sup>	46. 59°	6. 30 <sup>e</sup>
A1F	212	$1.47 \times 10^{4}$ c	1. 51 <sup>d</sup>	-0.54°	396. 79 <sup> d</sup>	53. 30 <sup>a</sup>	7. 45 <sup>cd</sup>
A2F	`1II	$1.~33\times10^{4}~{}^{\rm ef}$	1.43 <sup>e</sup>	$-0.70^{d}$	370. 64 <sup>e</sup>	41.86 <sup>de</sup>	8.86 <sup>b</sup>
A2F	211	$1.45 \times 10^{4}$ c	1.95 <sup>b</sup>	– 0. 90 <sup>e</sup>	507. 23 <sup>b</sup>	46. 52°	10. 92 <sup>a</sup>
A2F	112	$1.\ 55\times10^{4}\ {\rm b}$	1.75°	– 0. 55°	463. 31°	50. 03 <sup>b</sup>	9. 27 <sup>b</sup>
A2F	212	$1.71 \times 10^{4}$ a	2. 24 <sup>a</sup>	$-0.71^{d}$	591. 57ª	55. 52ª	10. 65 <sup>a</sup>
CKF	F1 I2	$1.30 \times 10^{4}$ f	1.01 <sup>h</sup>	-0. 19 <sup>a</sup>	269. 59 <sup>h</sup>	40. 37 <sup>e</sup>	6. 68 <sup>de</sup>
CKF	212	1. $40 \times 10^4$ <sup>cd</sup>	1.34 <sup>f</sup>	– 0. 33 <sup>b</sup>	356. 90 <sup>e</sup>	44. 96 <sup>d</sup>	<b>7.</b> 96°
	灌水 W	348. 75 **	269. 68 **	53. 79 **	266. 70 **	113. 48 **	0.10
	施氮 F	49. 48 **	877.44 **	59. 79 **	669. 99 **	53. 55 **	73. 55 **
F	加气 A	178. 20 **	1247. 53 **	52. 86 **	980. 92 **	48.87 **	162. 39 **
	$W \times F$	0.92	1.02	1.99	1.37	0.85	0.60
	$W \times A$	16. 62 **	19. 72 **	0.65	15. 53 **	0.54	0.01
	$\mathbf{F} \times \mathbf{A}$	1.97	18. 18 **	0.37	15. 80 **	0.43	1.60
	$W\times F\times A$	0.09	4. 77 *	0. 47	4. 51 *	0.13	1.26

注:同列数字后不同小写字母表示不同处理差异显著。\*、\*\*分别表示在P<0.05、P<0.01水平显著,下同。

番茄生长季中,施氮量增加全球净增温潜势 (NGWP)随之增加(表3),F1和F2处理间 NGWP具有显著性差异(P<0.05),与F1处理 相比,F2处理NGWP平均增加32.2%。灌水量 增加,NGWP也随之增大,I1处理和I2处理 NGWP具有显著性差异(P<0.05),与I1处理相 比,I2处理NGWP平均增加19.5%。加气处理 对NGWP具有显著影响(P<0.05),A1处理和 A2处理NGWP较CK处理分别增加10.1%和 68.4%,A2F2I2处理NGWP达到最大,为 591.57kg/hm<sup>2</sup>。灌水量增加,温室气体排放强度 (GHGI)均有所增加(表3),I1处理和I2处理均 无显著性差异(P>0.05)。施氮量增加对GHGI 具有显著性影响(P<0.05),F2处理较F1处理 GHGI平均增加18.5%。加气处理与CK处理间 GHGI 具有显著性差异(P<0.05),与 CK 处理相比,A2 处理 GHGI 增加 36.0% (P<0.05),而 A1 处理降低 6.1% (P<0.05),表明与 CK 处理相比,A1 处理使 NGWP 增大,但是产量增加的幅度更大,导致 GHGI 降低,A1 处理在保证增产的前提下,降低了 GHGI。

灌水、施氮和加气对土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>累积排 放量、NGWP 和番茄产量有极显著影响(P<0.01), 水气耦合作用对土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 累积排放量和 NGWP 产生极显著影响(P<0.01);肥气耦合对土 壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量和 NGWP 产生极显著影响(P< 0.01),水肥气耦合作用对土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量和 NGWP 产生显著影响(P<0.05)。各交互作用对产 量和 GHGI 均无显著影响。对产量的影响由小到大 依次为灌水、施氮、加气。

#### 3 讨论

#### 3.1 水肥气耦合对土壤 CO<sub>2</sub>排放的影响

土壤湿度和土壤温度是影响土壤 CO,排放的主 要因素。在番茄生育期的不同阶段,CO,排放通量 呈现显著差异,由图 1a、1b 可知,在苗期(移植后 0~30 d)土壤 CO,排放通量较低,因为移植栽苗时 灌水量大,地面较湿,无法进行气体采样,基施肥所 产生的大量温室气体已经排出,而且此时的土壤温 度处于最低状态(图2),因此生育初期测得的 CO, 排放通量低;之后随着土壤温度的升高,微生物活性 增强,促进了土壤微生物的呼吸,同时番茄根系逐渐 壮大,根系呼吸增强,CO,排放通量逐渐增大;在果 实膨大期(52~77d),番茄根系生长茂盛,根系自养 呼吸达到顶峰,同时此时的土壤温度较高(图2),给 微生物提供了适宜的环境,土壤微生物呼吸达到较 高水平,且此阶段的 WFPS 处于下降阶段,为 CO,排 放提供了有利条件,因此出现了 CO<sub>2</sub>排放主峰值;成 熟期(78~105 d)CO,排放通量逐渐降低,此时番茄 根系生长趋于稳定,土壤温度逐渐升高,土壤 CO,排 放通量呈下降趋势。番茄土壤 CO,排放在不同的生 育阶段有明显差异,与番茄生长状态一致,这与土壤 微生物呼吸和根系呼吸有关,有相关研究表明,土壤 微生物呼吸和作物根系呼吸在番茄的不同生育阶段 呈先上升后下降趋势<sup>[19]</sup>,与本试验中 CO<sub>2</sub>排放通量 的变化趋势一致。

土壤 CO,的排放,主要来自作物根系自养呼吸 和土壤生物的异氧呼吸<sup>[20]</sup>,不同的田间管理措施使 土壤环境发生变化,对作物根系和土壤生物活性造 成影响,从而影响土壤 CO2的排放。土壤水分会促 进或抑制根系生长来影响微生物呼吸和 CO<sub>2</sub>扩散, 改变土壤透气性来影响土壤 CO2的产生与排放<sup>[21]</sup>。 在本试验中,灌水量的增加会促进土壤 CO<sub>2</sub>排放,与 陈慧等[11]研究结果一致,主要是因为灌水量的增加 提高了土壤微生物活性,加快了土壤中有机碳的矿 化分解速率<sup>[22]</sup>。加气灌溉使土壤 CO,排放量升高, 加气灌溉改善了根际土壤的环境状况<sup>[23]</sup>,促进根系 呼吸和土壤微生物呼吸,提高土壤通气性,使得 CO, 排放增大。本试验中, F2 处理比 F1 处理 CO<sub>2</sub> 排放 量大,但并不显著(P>0.05),这是因为施肥的差异 变化可能会对土壤微生物呼吸产生影响<sup>[24]</sup>,满足微 生物繁殖、增强活性和加速呼吸的需要[25-26],同时 施肥也会促进作物生长,使作物的自养呼吸变 强<sup>[27]</sup>,最终促进土壤 CO,排放。灌水、施氮和加气 单因子对 CO2 累积排放量均有显著性影响 (P <

0.01),但只有水气耦合对土壤 CO<sub>2</sub>累积排放量产生显著性影响,其他耦合对其无显著影响,可能是因为施肥对 CO<sub>2</sub>排放显著性影响,导致灌水和加气与施氮耦合后,降低了对 CO<sub>2</sub>排放的影响。

#### 3.2 水肥气耦合对土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响

土壤 N,O 排放主要是由好氧条件下的硝化过 程和厌氧条件下的反硝化过程产生的,影响土壤 N<sub>2</sub>O排放的主要因素有施氮量、土壤湿度和土壤温 度等<sup>[28-31]</sup>。追肥为土壤提供了充足的氮源,引起反 硝化反应底物 NO<sub>3</sub>-N 升高,从而导致 N<sub>2</sub>O 排放通 量升高,整个生育期中,移植后28、55、69、96 d出现 N<sub>2</sub>O排放峰值,均是前1d追肥引起的;移植后37d 出现峰值,是因为在27d追肥后,虽然土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量较高,但此时的土壤温度很低(图2),最 高为 21.3℃, 土壤微生物活性低, 导致此时土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量较低,因此土壤中存积了大量的 NO,<sup>-</sup>-N,之后随着土壤温度升高,土壤微生物将 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 作用为 N<sub>2</sub>O, 出现峰值。有研究表明, N<sub>2</sub>O 排放的最佳温度为25~40℃<sup>[32]</sup>,本试验结果与其相 符合。本试验发现,土壤 CO2排放通量与土壤 N2O 排放通量表现出强相关性[33],相关系数达到 0.764 (P<0.01),可能是因为土壤呼吸消耗氧气,加速土 壤反硝化厌氧环境的发展,进而提高土壤 N<sub>2</sub>O 的产 生与排放<sup>[13,34]</sup>,有相关研究表明反硝化过程更有利 于产生 N<sub>2</sub>O<sup>[35]</sup>,同理,灌水量增加会提高 WFPS,促 进厌氧环境形成,提高 N2O 排放量,表现为 I2 大于 I1。施氮差异性变化会直接影响 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量,影响 N,O 排放,表现为 F2 大于 F1,土壤 N,O 排放通量与 WFPS 和 NO<sub>3</sub>-N 含量均呈显著线性正相关关系 (表4)(P < 0.01),相关系数分别为 0.305 和 0.552,但若剔除37d之前土壤温度较低的数据,土 壤 N2O 排放通量与 WFPS 和 NO3-N 含量会呈现极 显著的指数正相关关系,与文献[36-37]结果相 同,可见,在一些情况下,土壤温度(湿度)对 N<sub>2</sub>O 排 放的影响作用会被其他环境因子的影响效果所掩 盖。加气灌溉会增加土壤通气性,促进硝化反应,促 进 N<sub>2</sub>O 排放。灌水、施氮和加气单因子对 N<sub>2</sub>O 排放 具有极显著性影响(表3)(P<0.01),除水肥耦合

### 表 4 土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH₄排放通量与土壤环境因子 线性相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient of soil CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission fluxes with soil environmental factors

参数	WFPS	温度	NO3 <sup>-</sup> -N 含量
CO <sub>2</sub> 排放通量	0.094	0. 349 **	
N <sub>2</sub> O 排放通量	0. 305 **	0. 196 **	0. 552 **
CH4排放通量	0. 183 **	-0.094	

外,其他耦合作用对 N<sub>2</sub>O 排放具有显著性影响,土 壤温度、土壤湿度和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量是影响土壤 N<sub>2</sub>O 排放的主要因素,而且水肥气三因子相互耦合作用 对土壤 N<sub>2</sub>O 排放影响效果明显(表 3)。

#### 3.3 水肥气耦合对土壤 CH<sub>4</sub>排放的影响

土壤 CH₄排放主要是在厌氧环境下,微生物代 谢产生的有机酸、CO,、H,等物质在产甲烷菌的作用 下产生 CH<sub>4</sub>,主要发生在湿度较高、通气性较差的土 壤中。在陆地生态系统中,土壤既产生 CH<sub>4</sub>,又吸收 CH4。土壤 CH4是产甲烷菌和甲烷氧化菌共同作用 产生的,大量研究证明旱地农田土壤是 CH<sub>4</sub>的 汇<sup>[38]</sup>.CH,排放和吸收受到灌水、施肥和土壤理化 性质等影响。本试验结果表明,灌水对土壤中 CH4 排放产生极显著影响,生育期大部分时期均表现出 土壤是 CH<sub>4</sub> 的汇, 土壤 CH<sub>4</sub> 排放通量与 WFPS 呈正 相关(表4),随灌水量的增加排放量变大,土壤 CH4 排放通量与 WFPS 呈线性正相关关系, 与陈慧等<sup>[11]</sup> 的研究结果一致,这种排放量的增大是因为在厌氧 环境下,产甲烷菌将土壤中的含碳有机物分解生成 CH₄<sup>[39]</sup>。加气灌溉会显著减少土壤 CH₄排放,增加 土壤对 CH4 的吸收,因为加气灌溉改善了土壤的通 气状况,甲烷氧化菌将 CH₄氧化,进而减少 CH₄排 放。施氮会影响土壤理化性质,进而影响 CH<sub>4</sub>排放。 胡玉麟等<sup>[40]</sup>的研究结果表明,施氮处理相较于对照 (不施氮肥)处理,CH₄的排放显著降低,本试验结果 也表明,施肥对土壤中 CH₄的排放具有极显著影响, 随着施肥量增加土壤中 CH<sub>4</sub>排放量减少。这可能是 由于施肥量增加,增加了甲烷氧化菌活性,促进了作 物根际  $CH_4$ 氧化,降低  $CH_4$ 排放<sup>[41]</sup>。

### 3.4 水肥气耦合对番茄产量和全球净增温潜势的 影响

诸多研究证实加气处理会显著增加番茄产量 (P<0.05)<sup>[8,11,15-16]</sup>,原因如下:根作为最初感知和 响应低氧的器官,受到土壤缺氧的严重损害<sup>[42]</sup>,对 植物生长产生负面影响,根的缺氧代谢会促进有毒 物质形成,包括有机酸、乙醛、过量硫化物和醇类物 质<sup>[43]</sup>,这些物质会抑制根系功能和植物生长,加气 灌溉改善了根区通气状况,缓解了低氧造成的危害, 有利于作物生长,增加产量。本试验中,施氮量和灌 水量增加均会增加产量,与文献[8-9]研究结果—致。

加气灌溉会促进 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放,促进土壤对 CH<sub>4</sub>的吸收,引起 NGWP 增加,由小到大依次为 A2、

A1、CK(表3),但 GHGI 由大到小依次为 A2、CK、 A1,说明加气灌溉同时引起产量和 NGWP 的增加, 但是加气处理所引起的产量增加幅度大于 NGWP 的增加幅度,符合增产减排理念。因此,从生态角度 考虑,减少农田温室气体的排放,应从节水角度出 发,或者合理使用氮肥,防止过量氮肥导致温室气体 排放增加,加剧温室效应。综合考虑,A1F2I1 处理 与 CKF2I2 处理比较,在保证产量的同时,A1F2I1 处 理的灌溉用水、NGWP 和 GHGI 均小于 CKF2I2 处 理,因此推荐 A1F2I1 处理为温室番茄节水优产减 排的较优灌溉模式。

#### 4 结论

(1)土壤 CO<sub>2</sub>排放通量在全生育期内呈现先升 高后下降趋势,呈倒"V"形;灌水水平和施氮水平的 增加均会增加土壤 CO<sub>2</sub>排放通量,12 处理 CO<sub>2</sub>排放 通量较 I1 处理平均增加 24.8% (*P* < 0.05),F2 处 理比 F1 处理平均增加 8.6% (*P* > 0.05);加气灌溉 对土壤 CO<sub>2</sub>排放通量有明显影响,与 CK 处理相比, A1 处理和 A2 处理分别平均增加 5.5% 和 20.9%。

(2) 土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量在全生育期内呈现先升 高后下降趋势,灌水水平和施氮水平的增加均会增 加土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量; I2 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量比 I1 处理平均增加 14.8% (*P* > 0.05), F2 处理比 F1 处 理平均增加 34.9% (*P* < 0.05); 加气灌溉对土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量有显著影响, 与 CK 处理相比, A1 处 理和 A2 处理分别增加 10.0% (*P* > 0.05)和 62.9% (*P* < 0.05)。

(3)温室气体排放在番茄全生育期内呈波动性 变化,土壤 CH<sub>4</sub>排放通量无明显变化规律,呈现土壤 为 CH<sub>4</sub>的汇,灌水水平增加会促进土壤 CH<sub>4</sub>排放,施 氮水平增加会降低土壤 CH<sub>4</sub>排放。I2 处理 CH<sub>4</sub>排放 通量比 I1 处理平均增加 27.8% (*P* < 0.05), F2 处 理比 F1 处理平均降低 25.5% (*P* < 0.05)。</p>

(4)加气灌溉会显著增加番茄产量(P<0.05), 施氮水平和灌水水平增加也会显著提高番茄产量 (P<0.05)。本试验结果表明,从经济效益和环境 效益综合考虑,A1F2I1 处理在保证产量的同时, NGWP、GHGI和灌水水平均低于对照处理,因此推 荐施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup>、加气量为1倍气,k<sub>op</sub>为0.8的 亏缺灌溉处理为西北地区温室番茄节水优产减排的 较佳灌溉模式。

#### 参考文献

<sup>[1]</sup> 齐智娟,李骜,张忠学,等.水土保持耕作对黑土玉米氮素利用与温室气体排放影响[J].农业机械学报,2023, 54(9):365-373.

gas emissions of maize in black soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 365 – 373. (in Chinese)

[2] 初江, 徐丽波, 姜丽娟, 等, 设施农业的发展分析[J], 农业机械学报, 2004, 35(3), 191-192.

CHU Jiang, XU Libo, JIANG Lijuan, et al. Analysis of the development of facility agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3): 191 – 192. (in Chinese)

- [3] 张仲新, 李玉娥, 华珞, 等. 不同施肥量对设施菜地 N,O 排放通量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 269-275. ZHANG Zhongxin, LI Yu'e, HUA Luo, et al. Effects of different fertilizer levels on N<sub>2</sub>O flux from protected vegetable land [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 269 – 275. (in Chinese)
- [4] 刘建航,何鉴恒,陈海华,等.基于改进 YOLO v4 和 ICNet 的番茄串检测模型[J].农业机械学报,2023,54(10):216-224,254.

LIU Jianhang, HE Jianheng, CHEN Haihua, et al. Development of detection model for tomato clusters based on improved YOLO v4 and ICNet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 216-224,254. (in Chinese)

- 刘丽君,朱启林,曹明,等.施氮量对海南燥红壤和砖红壤N,0/CO,排放的影响[J].中国农业气象,2022,43(9):692-703. [5] LIU Lijun, ZHU Qilin, CAO Ming, et al. Effects of nitrogen application rate on N, O and CO, emission of dry red soil and latosol in Hainan[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(9): 692-703. (in Chinese)
- 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N,0产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 792-800. [6] ZHU Yongguan, WANG Xiaohui, YANG Xiaoru, et al. Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil

and mitigation strategies [J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 792-800. (in Chinese)

[7] 李晓莎,岳善超,李世清,等.覆膜和氮肥用量对雨养春玉米农田甲烷吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究,2017, 35(4): 1-9, 53.

LI Xiaosha, YUE Shanchao, LI Shiqing, et al. Effect of film mulching and nitrogen fertilizer on CH<sub>4</sub> absorption of rainfed spring maize farmland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(4): 1-9, 53. (in Chinese)

- [8] 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等. 基于温室番茄产量和果实品质对加气灌溉处理的综合评价[J]. 中国农业科学, 2020, 53(11): 2241 - 2252.ZHU Yan, CAI Hanjie, SONG Libing, et al. Comprehensive evaluation of different oxygation treatments based on fruit yield and quality of greenhouse tomato[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(11): 2241-2252. (in Chinese)
- DU Y D, NIU W Q, GU X B, et al. Crop yield and water use efficiency under aerated irrigation: a Meta-analysis [J]. [9] Agricultural Water Management, 2018, 210: 158-164.
- WOLFE A H, PATZ J A. Reactive nitrogen and human health: acute and long-term implications [J]. AMBIO, 2002, 31(2): [10] 120 - 125.
- [11] 陈慧, 商子惠, 王云霏, 等. 灌水量对温室番茄土壤 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>排放的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3126 - 3136. CHEN Hui, SHANG Zihui, WANG Yunfei, et al. Effects of irrigation amounts on soil CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions in greenhouse tomato field [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 3126-3136. (in Chinese)
- 商子惠,蔡焕杰,陈慧,等.水肥气耦合对温室番茄地土壤N,O排放及番茄产量的影响[J].环境科学,2020,41(6): [12] 2924 - 2935.SHANG Zihui, CAI Huanjie, CHEN Hui, et al. Effect of water-fertilizer-gas coupling on soil N<sub>2</sub>O emission and yield in

greenhouse tomato [J]. Environmental Science, 2020, 41(6); 2924 – 2935. (in Chinese)

段琳博,蔡焕杰,孙亚楠,等. 基于产量和 N<sub>2</sub>O 排放的温室番茄灌溉模式[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): [13] 202 - 213.

DUAN Linbo, CAI Huanjie, SUN Ya'nan, et al. Greenhouse tomato yield and N<sub>2</sub>O emissions based on irrigation model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(1); 202 – 213. (in Chinese)

- [14] 赵伟霞, 蔡焕杰, 单志杰, 等. 无压灌溉日光温室番茄高产指标[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 16-21. ZHAO Weixia, CAI Huanjie, SHAN Zhijie, et al. High yield indicators of greenhouse tomato under non-pressure irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3):16 – 21. (in Chinese)
- [15] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 199 – 211. (in Chinese)

[16] 朱艳,蔡焕杰,侯会静,等.加气灌溉对番茄根区土壤环境和产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 157 - 162.ZHU Yan, CAI Huanjie, HOU Huijing, et al. Effects of aerated irrigation on root-zoon environment and yield of tomato [J].

Journal of Northwest A&F University (Nature Science Edition), 2016, 44(5):157-162. (in Chinese)

- [17] 王晓云, 蔡焕杰, 李亮, 等. 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2413 – 2425. WANG Xiaoyun, CAI Huanjie, LI Liang, et al. Effects of water deficit on greenhouse gas emission in wheat field in different periods[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2413 – 2425. (in Chinese)
- [18] ZHANG A, CHENG G, HUSSAIN Q, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar application on net global warming potential in the Loess Plateau of China [J]. Field Crops Research, 2017, 205: 45-54.
- 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等. 加气灌溉改善温室番茄根区土壤通气性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 163 172. [19]

ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Oxygation improving soil aeration around tomato root zone in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 163 - 172. (in Chinese)

- [20] BOND-LAMBERTY B, WANG C K, GOWER S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration[J]. Global Change Biology, 2004, 10: 1756 - 1766.
- [21] 骆亦其. 土壤呼吸与环境[M]. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [22] TRUJILLO-TAPIA N, CRUZ M C, VCLSQUEZ-MURRIETA M S, et al. Inorganic N dynamics and NO production from tannery effluents irrigated soil under different water regimes and fertilizer application rates: a laboratory study[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 38: 279 – 288.
- [23] CHEN H, HOU H J, HU H W, et al. Aeration of different irrigation levels affects net global warming potential and carbon footprint for greenhouse tomato systems [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 242: 10-19.
- [24] JÍLKOVÁ V, STRAKOVÁ P, FROUZ J. Foliage C:N ratio, stage of organic matter decomposition and interaction with soil affect microbial respiration and its response to C and N addition more than C:N changes during decomposition[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 152: 103568.
- [25] LI J, SANG C P, YANG J Y, et al. Stoichiometric imbalance and microbial community regulate microbial elements use efficiencies under nitrogen addition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 156: 108207.
- [26] ZHU Z K, FANG Y Y, LIANG Y Q, et al. Stoichiometric regulation of priming effects and soil carbon balance by microbial life strategies[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2022, 169: 108669.
- [27] 胡智林,张春,贾志宽.半干旱区不同施肥量对旱作冬小麦田土壤呼吸的影响[J].干旱地区农业研究,2021, 39(6):215-223.

HU Zhilin, ZHANG Chun, JIA Zhikuan. Effects of different fertilizer application rates on soil respiration of dryland winter wheat fields in semi-arid area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(6): 215-223. (in Chinese)

- [28] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田 N<sub>2</sub>O 排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 598-602.
   HUANG Yao, JIAO Yan, ZONG Lianggang, et al. N<sub>2</sub>O emission from wheat cultivated soils as influenced by soil physicochemical properties[J]. ACTA Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(5): 598-602. (in Chinese)
- [29] GAO B, JU X T, SU F, et al. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study [J]. Science of the Total Environment, 2014, 472: 112 124.
- [30] KOSTYANOVSKY K I, HUGGINS D R, STOCKLE C O, et al. Emissions of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> following short-term water and N fertilization events in wheat-based cropping systems[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2019, 7(63): 1 10.
- [31] SCHAUFLER G, KITZLER B, SCHINDLBACHER A, et al. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature [J]. European Journal of Soil Science, 2010, 61: 683 696.
- [32] GRANLI T, BOCKMAN O C. Nitrous oxide from agriculture[J]. Norwegian Journal of Agricultural Sciences, 1994, 12: 1–128.
- [33] LI L J, HAN X Z, YOU M Y, et al. Nitrous oxide emissions from Mollisols as affected by long-term applications of organic amendments and chemical fertilizers[J]. Science of the Total Environment, 2013, 452: 302-308.
- [34] WEIER K L, DORAN J W, POWER J F, et al. Denitrification and the dinitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 66 72.
- [35] KOOL D M, DOLFING J, WRAGE N, et al. Nitrifier denitrification as a distinct and significant source of nitrous oxide from soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43: 174 – 178.
- [36] 杜娅丹,张倩,崔冰晶,等.加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N<sub>2</sub>O 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<sub>2</sub>O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 127 134. (in Chinese)
- [37] 胡正华,周迎平,崔海羚,等. 昼夜增温对大豆田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 2961 2967.
   HU Zhenghua, ZHOU Yingping, CUI Hailing, et al. Effects of diurnal warming on soil N<sub>2</sub>O emission in soybean field[J].
   Environmental Science, 2013, 34(8): 2961 2967. (in Chinese)
- [38] DALAL R C, ALLEN D E, LIVESLEY S J, et al. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review[J]. Plant and Soil, 2008, 309: 43 - 76.
- [39] 刘晶晶,张阿凤,冯浩,等.不同灌溉量对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J].应用生态学报,2017, 28(1):169-179.

LIU Jingjing, ZHANG Afeng, FENG Hao, et al. Influences of different irrigation amounts on carbon sequestration in wheat – maize rotation system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 169 – 179. (in Chinese)

- [40] 胡玉麟,汤水荣,陶凯,等.优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放的影响[J].环境科学,2019,40(11):5182-5190.
   HU Yulin, TANG Shuirong, TAO Kai, et al. Effects of optimizing fertilization on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions in a paddy cowpea
- rotation system in the tropical region of China[J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 5182 5190. (in Chinese)
   [41] LINQUIST B A, ADVIENTO-BORBE M A, PITTELKOW C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas
- emissions from rice systems: a quantitative review and analysis[J]. Field Crops Research, 2012, 135: 10 21.
- [42] JAISWAL A, SRIVASTAVA J P. Changes in reactive oxygen scavenging systems and protein profiles in maize roots in response to nitric oxide under waterlogging stress[J]. Indian Journal of Biochemistry and Biophysics, 2018, 55(1): 26-33.
- [43] XU C M, CHEN L P, CHEN S, et al. Effects of rhizosphere oxygen concentration on root physiological characteristics and anatomical structure at the tillering stage of rice[J]. Annals of Applied Biology, 2020, 177: 61 73.