

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.

水氮耦合对设施土壤温室气体排放的影响

杜世宇, 薛 飞, 吴汉卿, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙, 虞 娜*

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

摘 要:为探究水氮耦合对设施土壤温室气体排放的影响,基于连续5年的设施番茄水氮调控定位试验,比较分析了水氮耦合对土壤 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 排放通量和累积排放量的影响,并估算了温室气体的全球增温潜势(*GWP*)和温室气体排放强度(*GHGI*)的差异。田间小区试验设置不同灌水下限(W_1 : 25 kPa、 W_2 : 35 kPa、 W_3 : 45 kPa)和施氮量(N_1 : 75 kg N·hm⁻²、 N_2 : 300 kg N·hm⁻²、 N_3 : 525 kg N·hm⁻²)组合共9个处理。结果表明:设施土壤 N_2O 和 CO_2 排放通量受灌水施肥时期的影响,施肥后 N_2O 排放通量呈增加趋势,高灌水量(低灌水下限25 kPa)促进 N_2O 和 CO_2 排放。 CH_4 的排放通量表现为中等和强变异的特点。除水氮交互对 CO_2 累积排放总量和施氮量对 CH_4 累积排放总量影响不显著外,灌水下限、施氮量和水氮交互作用对 N_2O 、 CO_2 、 CH_4 累积排放总量、*GWP*、*GHGI*和番茄产量的影响显著或极显著。随氮肥用量的增加, N_2O 累积排放总量增加。 N_2O 和 CO_2 累积排放总量与*GWP*之间均达到极显著正相关,且各处理 N_2O 对*GWP*平均贡献率为5.25%, CO_2 为94.59%。适当减少氮肥用量和增加灌水下限能够有效地降低温室气体排放和减缓全球变暖。 W_2N_1 处理是本研究中减缓温室气体排放并提高番茄产量的最佳水氮管理措施。

关键词:水氮耦合;设施土壤;温室气体;全球增温潜势

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)02-0476-09 doi:10.11654/jaes.2018-0408

Interactive effect of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions from greenhouse soil

DU Shi-yu, XUE Fei, WU Han-qing, ZOU Hong-tao, ZHANG Yu-ling, ZHANG Yu-long, YU Na*

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

Abstract: This study conducted an experiment on greenhouse grown tomatoes to explore the interactive effect of irrigation and nitrogen application on the level of greenhouse gas emissions released from greenhouse soil, and to determine the impact of this effect on emission flux and total cumulative emission of greenhouse gases (N_2O , CO_2 and CH_4). Furthermore, this study examined differences in global warming potential (*GWP*) and greenhouse gas intensity (*GHGI*) between the gases over a five-year experimental period. Nine treatments, comprised of a combination of three irrigation lower limits (W_1 : 25 kPa, W_2 : 35 kPa, W_3 : 45 kPa) and three N application rates (N_1 : 75 kg N·hm⁻², N_2 : 300 kg N·hm⁻², N_3 : 525 kg N·hm⁻²), were utilized in the experiment. Results showed that the effects of irrigation and fertilization time influenced the emission fluxes of N_2O and CO_2 . N_2O emission flux increased after fertilization, and the high irrigation rate (irrigation lower limit 25 kPa) raised the emission fluxes of both N_2O and CO_2 . The variability coefficients of CH_4 emission flux were in the middle to strong range. Except for the interactive effect of irrigation and nitrogen on the total cumulative emission of CO_2 , and the effect of nitrogen fertilization on the total cumulative emission of CH_4 , irrigation and nitrogen fertilizer rates and their interactions had a very significant effect on tomato yield, *GWP*, *GHGI*, and the total cumulative emission of N_2O , CO_2 , and CH_4 . Additionally, as nitrogen fertilizer rates increased, the to-

收稿日期:2018-03-28 录用日期:2018-07-20

作者简介:杜世宇(1993—),男,辽宁大连人,硕士研究生,主要从事农业节水研究。E-mail:shiyu_Du@163.com

*通信作者:虞 娜 E-mail:sauoilyn@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41401322);国家重点研发计划项目(2016YFD0300807);国家科技支撑计划项目(2015BAD23B01);农业农村部东北耕地保育重点实验室开放基金项目(2015NYBKFT-01)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41401322); The National Key R&D Program of China(2016YFD0300807); The National Science Technology Support Program of China(2015BAD23B01); The Key Laboratory of Arable Land Conservation Foundation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China(2015NYBKFT-01)

tal cumulative emission of N_2O also increased. The total cumulative emission of N_2O and CO_2 had a significant, positive correlation with *GWP*; the average contribution rate of N_2O to *GWP* was 5.25% compared with a *GWP* of 94.59% for CO_2 . Ultimately, reducing the nitrogen fertilizer rate and increasing the irrigation lower limit could effectively reduce greenhouse gas emissions and ameliorate global warming. In this study, W_2N_1 treatment provided the optimal regulation of irrigation and nitrogen fertilization needed to increase tomato yield and mitigate greenhouse gas emissions.

Keywords: interactive effect of irrigation and nitrogen application; greenhouse soil; greenhouse gas emissions; global warming potential

水分和氮素是设施农业生产可调控的因子。为获得蔬菜高产,连年过量氮肥投入,不合理灌水现象较为普遍^[1]。施入土壤的氮素除了被作物吸收和残留在土壤中外,还会随灌溉水淋溶和以气态形式损失^[2]。全球气候变暖是人类面临的主要环境问题,由于温室气体可以引起平流层臭氧损耗^[3],作为主要的温室气体, N_2O 、 CO_2 和 CH_4 在不同生态系统下的排放特征和全球增温潜势越来越引起重视。

土壤水和施氮量是影响 N_2O 排放的重要因素,决定了土壤氮素转化的方向。滴灌和渗灌比沟灌能够显著降低 N_2O 排放量,漫灌改为地下滴灌可减少70% N_2O 排放^[4],且滴灌施肥相比传统灌水施肥能够显著减少 N_2O 排放量^[5-6]。间歇灌溉能够显著降低双季稻田全球增温潜势和温室气体排放强度^[7]。调亏灌溉有助于减少土壤 CO_2 排放^[8]。有机肥和氮肥的施用会导致菜地土壤 N_2O 排放增加^[9]。滴灌条件下,硝化抑制剂和猪粪配用能最大减少 N_2O 的排放^[10]。Zhang等^[11]3年的田间试验表明,随氮肥用量的增加,土壤 N_2O 排放增加,氮肥用量超过作物可吸收量时会大幅增加 N_2O 的排放。硝酸铵钙肥换成尿素类肥料能够有效减少土壤 N_2O 排放,最高可减排70%^[12]。增加秸秆还田比例能够有效减少农田 CO_2 排放^[13],无机肥料和农家肥的长期施用也会导致 CO_2 排放量升高^[14],而添加氮肥会导致 CH_4 排放的增加^[15]。灌水量和施氮量的增加会导致土壤 CO_2 排放升高^[16-17]。加气条件下,亏缺灌溉配合低量氮肥可以有效降低土壤 N_2O 排放^[18]。间歇淹水灌溉和低氮管理措施能够有效降低稻田土壤的全球增温潜势(*GWP*)^[19]。

目前,已有的设施蔬菜土壤温室气体排放的研究主要集中在单一施肥种类和施用量以及灌溉方式、灌溉量的影响,对水氮耦合下设施土壤 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 排放的研究还比较有限。因此,本研究基于连续5年的温室水氮田间定位试验,研究水氮耦合对设施土壤温室气体排放特征的影响,探明不同水氮处理土壤温室气体排放通量、累积排放量特征及全球增温潜势和温室气体排放强度的差异,以为设施土壤科学合理

水氮管理及减少温室气体排放提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

沈阳农业大学设施水氮定位试验始建于2012年,每年在4—8月采用相同的试验方案进行,其余时间试验地处于覆盖休耕。本研究开展时间为2017年,供试土壤为棕壤,供试作物为番茄。2012年试验开始前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(碳酸氢钠浸提) $25.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量(醋酸铵浸提) $90.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤pH 7.1。

试验共设9个处理,分别为 W_1N_1 、 W_1N_2 、 W_1N_3 、 W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_2N_3 、 W_3N_1 、 W_3N_2 、 W_3N_3 。考虑蔬菜水分能量管理经验和当地肥料用量,设灌水下限 W_1 (低)、 W_2 (中)和 W_3 (高)分别为25、35 kPa和45 kPa,灌溉上限为田间持水量($0.3489 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)。氮肥尿素用量 N_1 (低)、 N_2 (中)和 N_3 (高)分别为75、300 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和525 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验小区在始建前,用埋深60 cm的塑料布做防渗透隔离处理,防止小区间水分、养分的运移,小区面积 2.5 m^2 ,各处理4次重复。

除氮肥以外,其他肥料分别为有机肥(膨化鸡粪 $26400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、过磷酸钙($220 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$)和硫酸钾($300 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2}$),各处理用量一致。定植前,各小区统一施用有机肥和过磷酸钙作基肥。氮、钾肥分3次等量施入(番茄定植前、第一穗果和第二穗果膨大期)。番茄从移栽到收获历时98 d,2次追肥时间分别为定植后第48 d和第65 d。番茄栽植行距平均55 cm,株距30 cm。每个小区种植番茄16株,留四穗打顶。

灌溉采用膜下滴灌,即定植后将滴灌带置于距离作物5 cm左右,然后覆盖地膜。番茄定植后相继浇灌定植水和缓苗水后,进行水分处理。各小区埋设张力计和TDR探头指示土壤水吸力变化,确定灌溉时间和灌溉量。灌水下限土壤含水量由设计土壤吸力值算出,即当20 cm土层张力计读数(早8:00—8:30)

达到灌水下限土壤吸力值时,依据该观测值,使用水分特征曲线计算土壤体积含水量。曲线方程式为:

$$\theta = 0.520 \left[1 + (6382.43h)^{11.501} \right]^{-0.0094} \quad (r=0.995, P<0.01)$$

式中: h 为土壤水吸力,kPa; θ 为土壤体积含水量, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。然后再以下式计算各小区单次灌溉量:

$$Q = (Q - Q_i) \times H \times R \times S$$

式中: Q 为一次灌水水量, $\text{m}^3 \cdot \text{小区}^{-1}$; Q_i 和 Q_i 分别为灌水上限和下限土壤含水量, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; 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, m^2 。本试验各处理生育期总灌水量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)分别为 W_1N_1 (2 235.3)、 W_1N_2 (2 208.5)、 W_1N_3 (2 399.2)、 W_2N_1 (2 045.9)、 W_2N_2 (2 150.6)、 W_2N_3 (1 991.9)、 W_3N_1 (1 649.8)、 W_3N_2 (1 618.5)、 W_3N_3 (1 805.5)。定植时各处理灌溉量相同,定植后第14 d开始第一次灌溉,各处理平均灌溉间隔时间(d)为 W_1N_1 (3.9)、 W_1N_2 (4.2)、 W_1N_3 (3.8)、 W_2N_1 (4.5)、 W_2N_2 (4.5)、 W_2N_3 (5.1)、 W_3N_1 (6.9)、 W_3N_2 (6.9)、 W_3N_3 (6.3)。

1.2 温室气体样品的采集与测定

温室气体采集于2017年定位试验定植的第2 d开始,每隔6 d采集1次气体样品,到拉秧结束当天采集最后一次,共采样14次。气体采用静态箱法采集,静态箱底座(40 cm×40 cm×10 cm)于定植后埋入两株作物间且灌水湿润部位,埋入深度为5 cm,底座外带水槽。箱体体积为40 cm×40 cm×40 cm,气体采集时,箱体罩于底座上,水槽加水密封。箱体上部安装温度计,用于测定箱内温度,采用气泵连接气袋进行采气。当同时需要气体采集和灌水时,先进行灌水,后进行采集气体。随机从各处理的重复小区中选择3个位点作为固定位置采气。采样时间在上午8:00—11:00,分别在密闭后0、10、20 min各采集一次,同时记录箱内温度,每次抽取40 mL气体于气袋中,带回实验室进行测定。 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 采用Agilent 7890B气相色谱仪同时测定,其中 CO_2 和 CH_4 用氢火焰离子化检测器(FID)测定, N_2O 用电子捕获检测器(ECD)测定。

1.3 数据分析

静态箱内所测气体的排放通量根据以下公式(1)计算:

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

式中: F 是测定气体的排放通量, N_2O 、 CO_2 、 CH_4 单位分别为 $\mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\text{mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\mu\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 是标准状态下测定气体的密度, $\text{N}_2\text{O-N}$ 为 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、

$\text{CO}_2\text{-C}$ 和 $\text{CH}_4\text{-C}$ 为 $0.536 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; h 是密闭箱净高度,m; dc/dt 是采样箱内气体浓度变化率, $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; T 为采样过程中箱内平均空气温度, $^{\circ}\text{C}$; k 为时间转换因子, $60 \text{ min} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由于箱内气体压强几乎不变,对 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 的影响可以忽略,因此计算时并没有考虑压强的影响。

温室气体生长季的累积排放量采用公式(2)计算:

$$CF = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times f \quad (2)$$

式中: CF 为测定气体的累积排放量, N_2O 单位为 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 CO_2 和 CH_4 单位为 $\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$; F 为第 i 次测定气体排放通量,单位同上;24为每小时排放量换算为每天排放量的转换系数; $(t_{i+1} - t_i)$ 为连续两次测定的间隔天数; n 为观测的总次数; f 为单位换算系数, N_2O 和 CH_4 为 10^{-5} 、 CO_2 为 10^{-2} 。

温室气体的全球增温潜势(Global Warming Potential, GWP)采用公式(3)计算:

$$GWP = CF_{\text{N}_2\text{O}} \times \frac{44}{28} \times 265 + CF_{\text{CH}_4} \times \frac{16}{12} \times 28 + CF_{\text{CO}_2} \times \frac{44}{12} \quad (3)$$

式中: GWP 是全球增温潜势($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{hm}^{-2}$), $CF_{\text{N}_2\text{O}}$ 、 CF_{CO_2} 和 CF_{CH_4} 分别是作物生育期 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 的累积排放总量,同式(2)。44/28是从 $\text{N}_2\text{O-N}$ 转化为 N_2O 的系数;16/12是从 $\text{CH}_4\text{-C}$ 转化为 CH_4 的系数;44/12是从 $\text{CO}_2\text{-C}$ 转化为 CO_2 的系数。100年时间尺度上 N_2O 的 GWP 为 CO_2 的265倍, CH_4 的 GWP 为 CO_2 的28倍^[20]。

温室气体排放强度(Greenhouse gas intensity, $GHGI$)采用公式(4)计算:

$$GHGI = GWP/Y \quad (4)$$

式中:温室气体排放强度是单位产量的全球增温潜势, $\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$; Y 为作物产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

采用Excel 2010进行试验数据整理和计算,SPSS 21.0进行随机区组双因素方差分析及相关性分析,多重比较采用Duncan新复极差法,Origin 9.0进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理 N_2O 排放的变化

如图1所示,在番茄整个生长季, N_2O 排放通量的图1a~图1c的峰值表现与各处理施氮时期具有较好的一致性,表现在基肥施用后10 d、第一次追肥和第二次追肥左右有峰值出现,以低灌水下限 W_1 水平的

峰值更陡峭。各灌水下限,施氮量对 N_2O 排放通量的影响均表现为随施氮量增加排放通量增加的趋势,以 W_1 下各施氮量分异更为明显,变化范围较大($-1.7\sim 354.6 \mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$),其次为 W_3 ,变化范围为 $3.2\sim 142.9 \mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。 W_2 排放通量范围在整个生长季变异最小为 $-9.4\sim 95.4 \mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。不同水氮处理土壤 N_2O 的累积排放量动态表现为定植初期排放增加明显,随后变化平缓,在追肥期排放又有不同幅度增加,随后增加幅度略有降低,以 N_3 水平变化较明显, W_1N_3 处理变化显著。相同灌水下限,随氮肥量增加,累积排放量增加。相同施氮量, N_2 和 N_3 水平,低灌水下限 25 kPa 均表现为累积排放量最大。

2.2 不同水氮处理 CO_2 排放的变化

如图2所示, CO_2 排放通量与 N_2O 表现出类似的

规律,分别在定植水后的第一次灌水(定植14 d)、第一次追肥和第二次追肥后出现峰值。第一次灌水后峰值为负峰,即表现为 CO_2 的吸收。整个生长季, CO_2 排放通量以 N_1 水平变化范围最大为 $-63.7\sim 224.8 \text{ mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,其次为 N_3 水平,变化范围在 $-77.0\sim 150.8 \text{ mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间, N_2 水平排放通量变化范围在整个生长季变异最小为 $-76.5\sim 125.6 \text{ mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。不同施氮量下 CO_2 累积排放通量的动态变化均表现为 $W_1>W_3>W_2$ 处理,在作物生长初期 W_1 和 W_3 差异不显著,生长中期后, W_1 和 W_3 累积排放量差异增大,以 N_1 和 N_3 处理中的 W_1 与其余灌水下限分异明显。

2.3 不同水氮处理 CH_4 排放的变化

如图3所示,不同水氮处理 CH_4 的排放通量变异剧烈,除 W_3N_2 处理为中等变异($1>\text{CV}>0.1$),其余各处

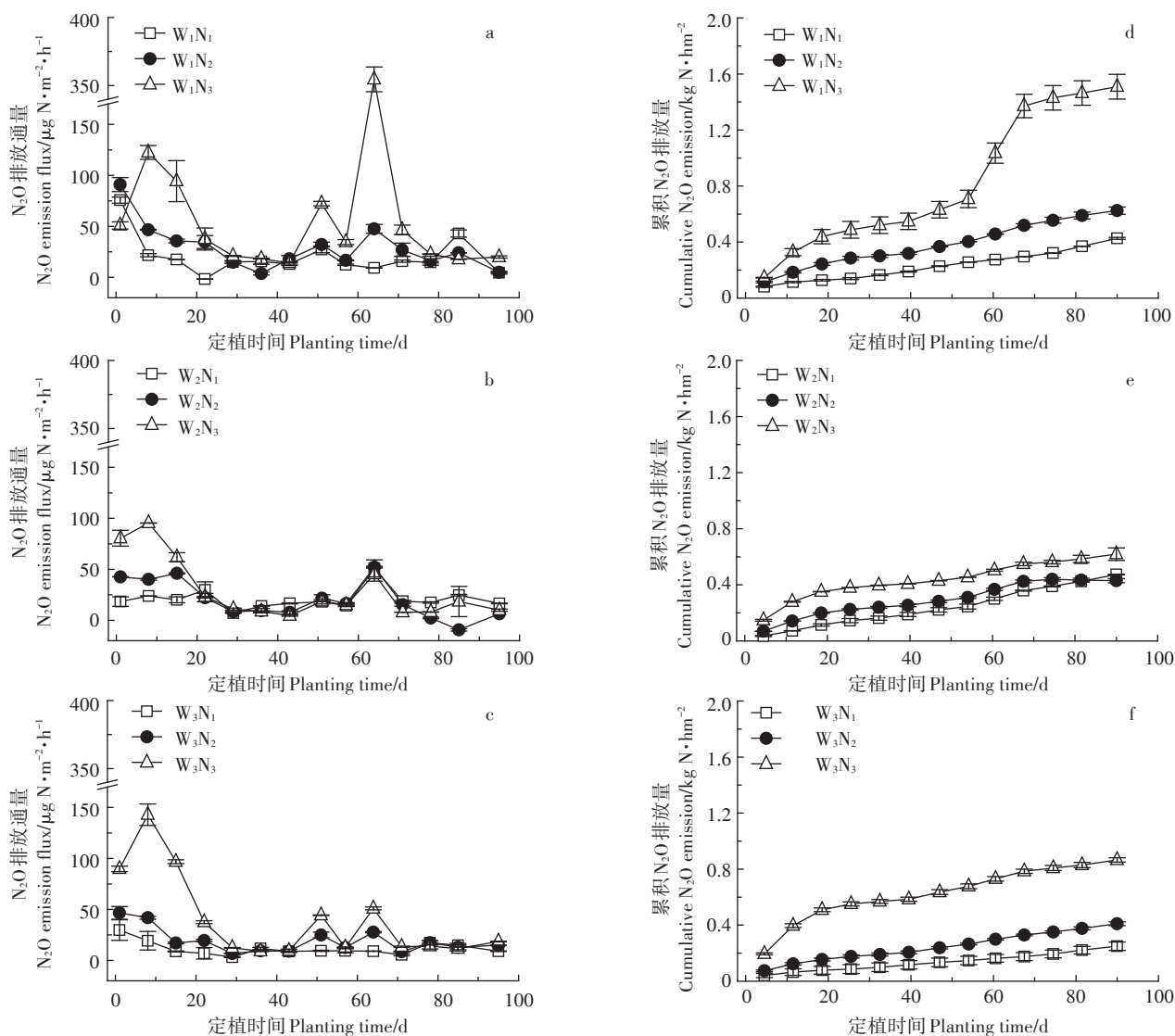
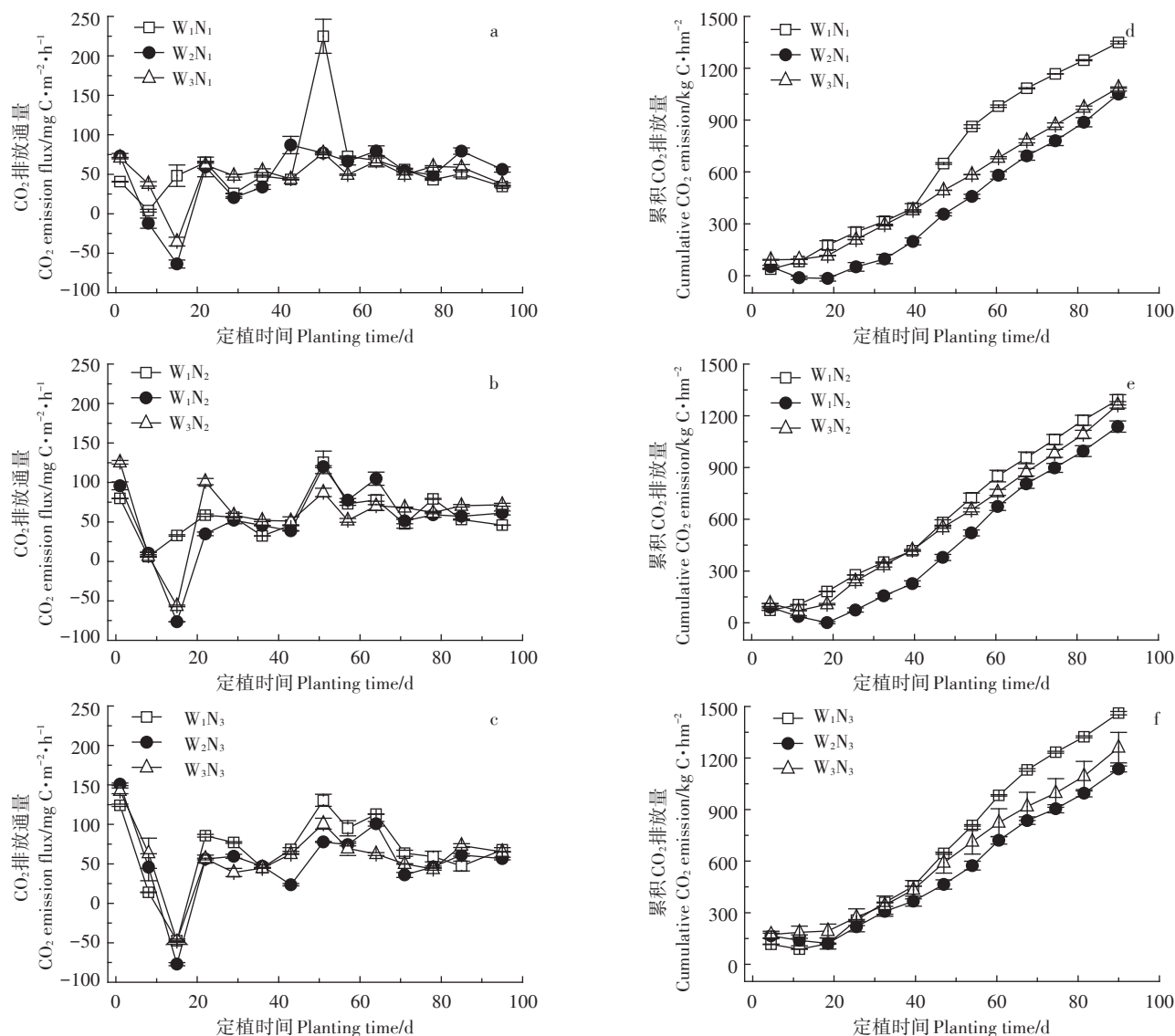


图1 不同水氮处理 N_2O 排放通量及累积排放量动态变化

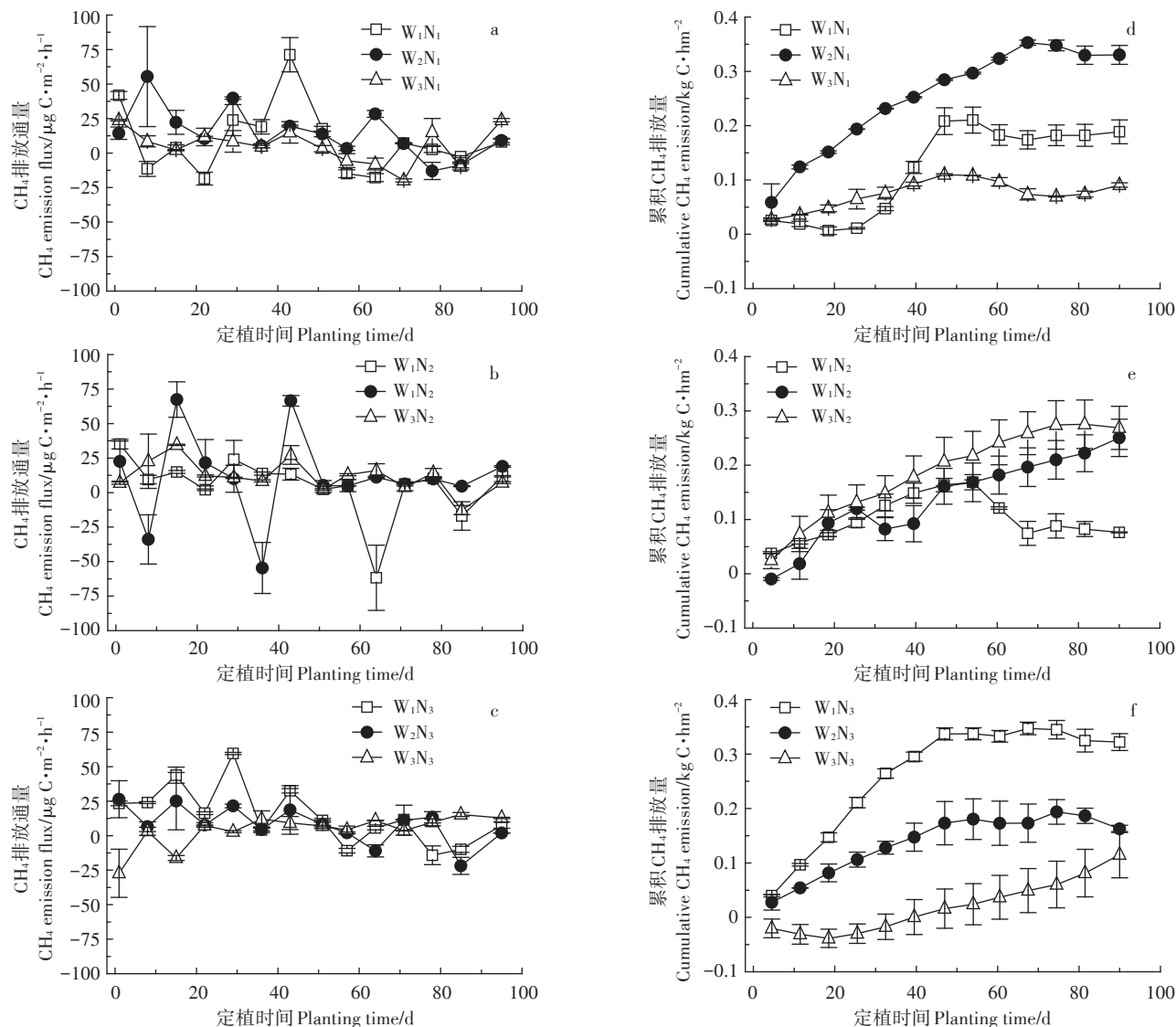
Figure 1 Dynamic changes of N_2O emission flux and N_2O cumulative emission under different irrigation and nitrogen treatments

图2 不同水氮处理CO₂排放通量及累积排放量动态变化Figure 2 Dynamic changes of CO₂ emission flux and CO₂ cumulative emission under different irrigation and nitrogen treatments

理排放通量均为强变异($CV>1$),以N₂施氮量下各处理变异最大,其次为N₁各处理,N₃各处理差异相对较小。CH₄累积排放量在各施氮量下,不同灌水下限表现为不同的变化规律,N₁下W₂水平累积排放量一直最高,而N₃下为W₁水平,2个施氮水平的累积排放量的动态变化曲线相似。N₁下,番茄生长初期W₃的累积排放量高于W₁,随后均表现为W₁高于W₃。而N₃水平下,累积排放量动态始终表现为W₁>W₂>W₃,且W₁和W₂表现为随生育期延续,排放量增加,到生育后期趋于平缓。而W₃表现为先缓慢降低后持续增加的特点。N₂水平下W₃的累积CH₄排放量最大,而在N₁和N₃水平下W₃的累积排放量均低于其余灌水下限。

2.4 不同水氮处理温室气体累积排放总量、产量与GWP分析

如表1所示,灌水下限对温室气体(N₂O、CO₂和CH₄)累积排放总量的影响极显著,施氮量对N₂O和CO₂累积排放总量的影响极显著,灌水下限和施氮量的交互作用均极显著影响N₂O和CH₄的累积排放总量。进一步采用因素离差平方和占总变异比例分析水氮及交互对N₂O累积排放总量的影响效应大小,表现为施氮量>水氮交互>灌水下限。对CO₂累积排放总量的影响表现为灌水下限>施氮量。对CH₄累积排放总量的影响表现为水氮交互>灌水下限。进一步分析单一效应各水平对温室气体累积排放总量的影

图3 不同水氮处理CH₄排放通量及累积排放量动态变化Figure 3 Dynamic changes of CH₄ emission flux and CH₄ cumulative emission under different irrigation and nitrogen treatments

响, N₂O、CO₂累积排放总量均表现 W₁>W₃>W₂, W₁极显著的高于其余2个灌水下限, W₂和W₃之间的N₂O累积排放总量差异不显著, CO₂累积排放总量表现为不同灌水下限差异极显著。CH₄累积排放总量表现为W₂的累积排放总量最大, 显著高于W₁和W₃水平, W₁和W₃差异不显著。不同施氮量单一效应分析表明, 随施氮量增加, N₂O、CO₂累积排放总量增加, 各施氮量间N₂O累积排放总量差异均为极显著, 而对CO₂累积排放总量的影响表现为N₁和N₂、N₃的分别达到显著($P<0.05$)和极显著差异($P<0.01$)。水氮耦合效应使W₁N₃处理的N₂O的累积排放总量最大, 而W₂N₁处理累积排放总量最小。各水氮处理CO₂累积排放总量受水氮单一效应影响, W₁N₃处理显著或极显著的高于其他处理, 累积排放总量最高; W₂N₁处理的累

积排放总量最小, 并与W₂N₂、W₂N₃和W₃N₁处理差异不显著。水氮耦合效应使得CH₄累积排放总量最高为W₂N₁处理, 最低为W₁N₂处理。

对不同水氮处理下GWP的统计分析可知, 灌水下限和施氮量极显著的影响GWP, 而水氮交互效应显著影响GWP的大小。进一步比较灌水下限单因素效应对GWP影响大小为: W₁>W₃>W₂, W₁极显著高于W₂和W₃, 后2者之间达显著差异。施氮量单因素效应对GWP的影响表现随施氮量增加GWP增大, N₁和N₂差异显著, N₃与其余2个施氮量之间均达极显著差异($P<0.01$)。W₁N₃处理GWP最大, 极显著高于其余处理, 而W₂N₁处理的GWP最小。除施氮量对产量的影响不显著外, 灌水下限和水氮交互极显著影响番茄产量。灌水下限对番茄产量的单因素效应表现出与

表1 不同水氮处理温室气体(N₂O、CO₂和CH₄)累积排放总量、全球增温潜势及温室气体排放强度
Table 1 Total cumulative emissions of N₂O, CO₂ and CH₄, GWP and GHGI with different irrigation and nitrogen treatments

处理 Treatments	N ₂ O 累积排放总量 Total cumulative emission of N ₂ O /kg N·hm ⁻²	CO ₂ 累积排放总量 Total cumulative emission of CO ₂ /kg C·hm ⁻²	CH ₄ 累积排放总量 Total cumulative emission of CH ₄ /kg C·hm ⁻²	全球增温潜势 GWP /kg CO _{2-eq} ·hm ⁻²	番茄产量 Tomato yield /×10 ³ kg·hm ⁻²	温室气体排放 强度 GHGI /kg CO _{2-eq} ·kg ⁻¹
W ₁ N ₁	0.427±0.007dDE	1 348.6±7.5a	0.189±0.022bcBC	5 129.9±25.4bB	49.01±0.88bcC	0.105±0.001 4bcB
W ₁ N ₂	0.625±0.026cC	1 292.8±30.1a	0.076±0.001eC	5 003.1±121.2bBC	38.94±0.80dE	0.129±0.000 5aA
W ₁ N ₃	1.509±0.089aA	1 461.2±9.7a	0.322±0.015aA	5 998.2±73.2aA	59.94±2.66aA	0.100±0.005 7bcB
W ₂ N ₁	0.474±0.002dCD	1 050.1±18.2a	0.330±0.017aA	4 060.2±66.9dD	59.48±0.60aA	0.068±0.001 8dC
W ₂ N ₂	0.430±0.015dDE	1 137.6±32.7a	0.250±0.034abAB	4 359.7±124.9cdCD	57.84±0.76aAB	0.075±0.003 2dC
W ₂ N ₃	0.619±0.045cC	1 136.6±17.2a	0.163±0.007cdBC	4 431.6±44.2cdCD	39.89±0.03dE	0.111±0.001 2bB
W ₃ N ₁	0.250±0.030 eE	1 087.2±4.3a	0.091±0.004deC	4 093.8±3.7dD	42.84±0.14dDE	0.096±0.000 4cB
W ₃ N ₂	0.410±0.014dDE	1 263.7±18.8a	0.269±0.040abAB	4 814.3±64.5bcBC	48.04±0.62cCD	0.100±0.002 6bcB
W ₃ N ₃	0.865±0.016bB	1 260.7±88.7a	0.115±0.042cdeC	4 987.2±317.3bBC	52.43±3.15bBC	0.096±0.011 8cB
单因素效应 Single factor effect						
W ₁	0.854±0.212aA	1 367.5±32.4aA	0.196±0.045bAB	5 377.1±201.2aA	49.30±3.91bAB	0.111±0.006 0aA
W ₂	0.508±0.038bB	1 108.1±21.2cC	0.248±0.032aA	4 283.8±81.5cB	52.40±3.98aA	0.085±0.008 5cC
W ₃	0.509±0.117bB	1 203.8±43.7bB	0.158±0.038bB	4 631.8±192.2bB	47.77±1.94bB	0.097±0.003 3bB
N ₁	0.384±0.044cC	1 162.0±59.6bB	0.203±0.045a	4 428.0±222.8cB	50.44±3.08a	0.090±0.007 0bB
N ₂	0.488±0.044bB	1 231.4±32.6aAB	0.199±0.041a	4 725.7±129.9bB	48.27±3.47a	0.101±0.009 9aA
N ₃	0.998±0.170aA	1 286.2±64.2aA	0.200±0.041a	5 139.0±302.2aA	50.75±3.85a	0.102±0.004 4aA
F 检验 F test(P)						
W	0.000**	0.000**	0.006**	0.000**	0.005**	0.000**
N	0.000**	0.006**	0.970	0.001**	0.073	0.011**
W×N	0.000**	0.053	0.000**	0.028*	0.000**	0.001**

注:平均值±标准误,同一列不同小、大写字母表示处理间差异显著或极显著(P<0.05和P<0.01)。

Note: Mean ± standard error, different lowercase and uppercase letters in the same column indicate the significant differences at the 0.05 and 0.01 probability level.

对GWP相反的变化特征。灌水下限、施氮量及二者交互效应均极显著影响GHGI,单因素效应对GHGI影响与对GWP表现出一致的变化关系,但二者交互效应对其影响未表现出一致变化。W₁N₂处理GHGI最大,且与其他各处理之间差异极显著。

进一步对不同处理GWP、GHGI与温室气体累积排放总量进行相关分析,N₂O累积排放总量、CO₂累积排放总量与GWP间均达到极显著正相关($r_{N_2O}=0.818^{**}$, $r_{CO_2}=0.983^{**}$, $n=9$),且N₂O累积排放总量和CO₂累积排放总量之间达到显著正相关($r=0.697^{*}$)。而CH₄累积排放总量与GWP相关未达到显著水平。GHGI仅与产量之间达到显著负相关($r=0.772^{*}$)。GWP的构成中,本研究各处理平均贡献率N₂O为5.25%,CO₂为94.59%,W₁N₃处理N₂O对GWP的贡献率高达10.5%。

3 讨论

3.1 不同水氮处理对温室气体排放的影响

土壤含水量是影响N₂O排放的重要因素。已有

研究指出,无氮处理,增加灌溉量能显著增加土壤的N₂O排放量,但在中等和高量施氮处理下,灌溉量对N₂O排放量影响并不显著^[21],这与本研究在低氮量下的研究结果较为一致。相同灌水下限下,增加施氮量能够显著增加N₂O排放量,特别是在追肥后N₂O排放量大幅增加,说明氮肥的施用是导致土壤N₂O排放增加的主要原因^[9]。番茄定植第64 d, W₁N₃处理的土壤N₂O排放明显高于其他时段和处理,高达354.5 mg N·m⁻²·h⁻¹,这可能是由于该处理经常处于较高土壤水分状况有关,该处理为低灌水下限25 kPa,具有灌溉频率高,生育期总灌溉量大的特点。同时,高氮肥用量,其施氮量可能超过作物可吸收范围,导致土壤N₂O排放通量的剧增^[11],使得累积排放量均最高,这与以往研究结果相一致^[22-23]。而相同施氮量的其他灌水处理,增加幅度有限。这可能与施氮和灌水均促进N₂O排放^[18],本研究的施氮量效应大于灌水下限的影响有关。

土壤CO₂排放通量在开始灌水(定植后第14 d)后出现第一次峰值,且累计排放总量受灌水下限的影

响更大,即灌水促进土壤 CO_2 排放。这与以往结果一致^[24-25],研究表明, CO_2 排放累积量与土壤含水率存在显著正相关关系。两次追肥后,土壤 CO_2 排放均出现峰值,这说明氮肥的施用会增加土壤 CO_2 的排放,土壤 CO_2 排放累积量最高的处理是 W_1N_3 ,灌水配合氮肥施用促进了微生物活动,导致土壤 CO_2 排放的增加^[16,26-27]。裸土条件的研究表明,施加氮肥会抑制土壤微生物活动,降低土壤 CO_2 的排放^[28],但本试验在地膜覆盖下未出现 CO_2 排放减少的结果。

目前土壤 CH_4 排放的研究多数集中在水田土壤,对设施土壤 CH_4 排放的研究较少。本研究中, CH_4 的排放通量在整个生长季表现为低值或负值,波动很大,这与旱地条件 CH_4 在土壤中被氧化成 CO_2 ,土壤可能成为大气或土壤内源 CH_4 吸收的汇有关,与已有研究结果相同^[29]。有研究发现^[24],稻田淹水缺氧条件会为甲烷菌提供合适的厌氧环境,导致 CH_4 排放量增加,而本试验在设施内实施,可能缺乏甲烷菌厌氧的条件, CH_4 排放变异较大未见规律变化,这与有的旱地研究结果一致^[30]。

3.2 不同水氮处理对全球增温潜势的影响

土壤 N_2O 的产生和释放一方面受土壤水分、温度、pH等环境条件影响,另一方面还受硝化和反硝化过程的微生物群落结构和活性制约。本研究表明,不同灌水下限和施氮量对GWP影响显著,灌水量和施氮量的增加,可以提高土壤含水率及硝化与反硝化反应的底物量,促进微生物活动进而增加 N_2O 的排放^[31]。研究表明^[32],在好氧条件下,GWP主要由土壤释放的 CO_2 和 N_2O 构成, CH_4 的排放量很低,可忽略不计,这与本研究结果相似。本研究 CH_4 对GWP平均贡献率仅为0.16%,这与设施滴灌条件下土壤以好氧环境为主密不可分。本研究结果表明,低灌水下限25 kPa和高施氮量能够显著促进土壤 N_2O 和 CO_2 排放,进而增加土壤GWP。土壤 N_2O 和 CO_2 累积排放总量与GWP的关系也表明,二者与GWP均具有极显著正相关关系,为此控制设施环境水氮投入对降低GWP具有显著作用。本研究 N_2O 对GWP的贡献比例虽然较低,平均仅为5.25%,但其排放总量与GWP具有显著的正相关关系,说明 N_2O 在温室气体减排中的作用不容忽视。由于产量的变化幅度大于GWP的变幅,导致水氮交互效应下GWP和GHGI的变化不一致,这也表明番茄产量对灌水下限和施氮量的响应比GWP敏感。本研究灌水和氮肥供应充足的 W_1N_3 处理的产量最高,但其GWP也最高。GHGI常被认为是平衡温

室效应和经济效益的综合指标, W_2N_1 处理的GWP和GHGI最小,且产量较高,表明适当提高灌水下限并减少氮素供应能够显著减缓温室气体排放和降低暖化能力,并获得较高的经济效益。

4 结论

(1)设施番茄定位试验条件下,土壤 N_2O 和 CO_2 的排放通量受灌水施氮时间的影响,增加灌溉量和施氮量均促进 N_2O 和 CO_2 排放,低灌水下限(25 kPa)和高施氮量($525 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)组合的 N_2O 、 CO_2 累积排放总量最高。灌水下限和施氮量对 CH_4 排放通量的影响未有一致规律,但其累积排放总量受灌水下限和水氮交互影响极显著。

(2)灌水下限和施氮量及水氮互作显著影响全球增温潜势和温室气体排放强度,低灌水下限25 kPa(频繁灌水)和高氮肥施用组合的设施土壤全球增温潜势最大。全球增温潜势与 N_2O 和 CO_2 累积排放总量之间均呈极显著正相关($P<0.01$)。灌水下限35 kPa,施氮量 $75 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是本研究中协调设施蔬菜经济和环境效益最佳的水氮管理措施。

参考文献:

- [1] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 503-517.
WANG Jing-guo, LIN Shan, LI Bao-guo. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture[J]. *Agricultural Science in China*, 2016, 49(3): 503-517.
- [2] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
JU Xiao-tang, GU Bao-jing. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 783-795.
- [3] Benjamin trost, Annette prochnow, Katrin drastig, et al. Irrigation, soil organic carbon and N_2O emissions: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(4): 733-749.
- [4] Sánchez-Martín L, Arce A, Benito A, et al. Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1698-1706.
- [5] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N_2O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st Century[J]. *Science*, 2009, 326: 123-125.
- [6] Han B, Ye X H, 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 and Sediments*, 2017, 17: 2457-2468.
- [7] 成臣, 杨秀霞, 汪建军, 等. 秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 186-195.
CHENG Chen, YANG Xiu-xia, WANG Jian-jun, et al. Effect of different irrigation methods on rice yield and greenhouse gas emissions un-

- der crop residue in - corporation in double rice - cropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):186-195.
- [8] Zornoza R, Rosales R M, Acosta J A, et al. Efficient irrigation management can contribute to reduce soil CO₂ emissions in agriculture[J]. *Geoderma*, 2016, 263:70-77.
- [9] 易琼, 黄旭, 张木, 等. 氮肥施用水平及种类对生菜产量及菜地 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10):2019-2025.
- YI Qiong, HUANG Xu, ZHANG Mu, et al. Effects of nitrogen application rate and sources on yield of lettuce and nitrous oxide emission in vegetable soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10):2019-2025.
- [10] Guillermo Guardia, Max T Cangani, Alberto sanz-cobena. Management of pig manure to mitigate NO and yield-scaled N₂O emissions in an irrigated Mediterranean crop[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 238:55-56.
- [11] Zhang H H, He P J, Shao L M. N₂O emissions from municipal solid waste landfills with selected infertile cover soils and leachate subsurface irrigation[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156(3):959-965.
- [12] Harty M A, Forrester P J, Watson C J. Reducing nitrous oxide emissions by changing N fertiliser use from calcium ammonium nitrate (CAN) to urea based formulations[J]. *The Science of the Total Environment*, 2016, 563-564:576-586.
- [13] 李长生, 肖向明, S Froking, 等. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5):493-503.
- LI Chang-sheng, XIAO Xiang-ming, S Froking, et al. Greenhouse gas emissions from Chinese farms[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(5):493-503.
- [14] Dhadli H S, Brar B S. Effect of long-term differential application of inorganic fertilizers and manure on soil CO₂ emissions[J]. *Plant Soil and Environment*, 2016, 62:195-201.
- [15] Yang G, Chen H, Wu N, et al. Effects of soil warming, rainfall reduction and water table level on CH₄ emissions from the Zoige peatland in China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78:83-89.
- [16] Jia X X, Shao M A, Wei X R. Soil CO₂ efflux in response to the addition of water and fertilizer in temperate semiarid grassland in northern China[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373:125-41.
- [17] Tausz M, Norton R M, Tausz-Posch S, et al. Can additional N fertiliser ameliorate the elevated CO₂ induced depression in grain and tissue N concentrations of wheat on a high soil N background?[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2017, 203:574-583.
- [18] 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 Ya-dan, ZHANG Qian, CUI Bing-jing, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil N₂O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16):127-134.
- [19] Ku HH, Hayashi K, Agbisit R, et al. Evaluation of fertilizer and water management effect on rice performance and greenhouse gas intensity in different seasonal weather of tropical climate[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601-602:1254-1262.
- [20] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [21] McDaniel M D, Simpson R R, Malone B P, et al. Quantifying and predicting spatio-temporal variability of soil CH₄ and N₂O fluxes from a seemingly homogeneous Australian agricultural field[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 240:182-193.
- [22] Trost B, Prochnow A, Baumecker M, et al. Effects of nitrogen fertilization and irrigation on N₂O emissions from a sandy soil in Germany[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61:569-580.
- [23] Wu X R, Zhang A. Comparison of three models for simulating N₂O emissions from paddy fields under water-saving irrigation[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 98:500-509.
- [24] 李海防, 夏汉平, 熊燕梅, 等. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(6):1781-1788.
- LI Hai-fang, XIA Han-ping, XIONG Yan-mei, et al. Research progress on influence factors of soil greenhouse gas production and emission[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6):1781-1788.
- [25] Ghosh U, Thapa R, Desutter T, et al. Saline-Sodic soils: Potential sources of nitrous oxide and carbon dioxide emissions?[J]. *Pedosphere*, 2017, 27:65-75.
- [26] 刘祥超, 王凤新, 顾小小. 水、热对土壤 CO₂ 排放影响的研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2):290-295.
- LIU Xiang-chao, WANG Feng-xin, GU Xiao-xiao. Study on the influence of water and temperature on soil CO₂ emission[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(2):290-295.
- [27] Tausz M, Norton R M, Tausz-Posch S, et al. Can additional N fertiliser ameliorate the elevated CO₂-induced depression in grain and tissue N concentrations of wheat on a high soil N background?[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2017, 203:574-583.
- [28] Iqbal J, Hu R G, Lin S, et al. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 131:292-302.
- [29] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4):966-975.
- ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4):966-975.
- [30] Ana L S V, Mauricio R C, Brigitte J F, et al. Greenhouse gas emission responses to sugarcane straw removal[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2018, 113:15-21.
- [31] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11):2362-2367.
- LI Cheng-fang, KOU Zhi-kui, ZHANG Zhi-sheng, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2362-2367.
- [32] 刘志伟, 朱孟涛, 郭文杰, 等. 秸秆直接还田与炭化还田下土壤有机碳稳定性和温室气体排放潜力的对比研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6):1371-1378.
- LIU Zhi-wei, ZHU Meng-tao, GUO Wen-jie, et al. Comparison of soil organic carbon stability and greenhouse gas emissions potential under straw or straw-derived biochar amendment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6):1371-1378.