

灌溉方式对设施黄瓜氮素气态损失及氮循环功能基因的影响

万博^{1,2}, 吴林亿^{1,2}, 周其文², 杜君³, 魏义长¹, 王丽丽²

(1.华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046; 2.农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3.河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002)

摘要: [目的] 探究不同灌溉处理对设施黄瓜生态系统氮素气态损失及氮循环功能基因的影响, 为不同灌溉方式下设施农田系统氮素气态损失研究的进一步开展提供数据支撑, 为中国设施菜地生产系统的灌溉方案制定提供理论基础。[方法] 选择设施黄瓜为研究对象开展了田间试验, 试验设计为传统灌溉(100%IWD)、节水 25%灌溉(75%IWD)和节水 50%灌溉(50%IWD)。通过野外原位监测试验, 利用静态箱—气相色谱法和通气吸收法分别对设施黄瓜土壤 N₂O 排放和氨挥发进行了连续观测记录, 采用高通量 qPCR 基因芯片技术, 测定氮循环功能基因。[结果] ①各灌溉处理中, N₂O 累计排放量为 100%IWD>75%IWD($p<0.05$), 100%IWD>50%IWD($p<0.05$)。②NH₃ 累积挥发量为 75%IWD>50%IWD>100%IWD($p<0.05$)。③土壤中氮循环功能基因丰度整体发生了显著改变(PERMANOVA $F=241.82$, $p=0.001$)。④黄瓜产量 100%IWD>75%IWD>50%IWD($p<0.05$)。[结论] 50%灌溉显著增加了硝化基因丰度, 且 75%灌溉和 50%灌溉显著降低了反硝化基因丰度。100%灌溉处理的表层土壤 N₂O 气体产生的主要因素是反硝化过程, 减少 25%灌溉水量导致土壤表层反硝化基因丰度降低, 表层土壤反硝化过程减弱, 进而使 N₂O 排放量下降。而减少 50%灌溉水量没有显著改变土壤表层反硝化基因丰度和 N₂O 排放量。

关键词: 设施黄瓜; 灌溉; 氧化亚氮; 氨挥发; 氮循环功能基因

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0064-09

中图分类号: S626, S642.2

文献参数: 万博, 吴林亿, 周其文, 等. 灌溉方式对设施黄瓜氮素气态损失及氮循环功能基因的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 64-72. Wan Bo, Wu Linyi, Zhou Qiwen, et al. Nitrogen gaseous loss and functional genes of nitrogen cycling in greenhouse cucumbers under different irrigation methods [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 64-72. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.008; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.008.

Nitrogen gaseous loss and functional genes of nitrogen cycling in greenhouse cucumbers under different irrigation methods

Wan Bo^{1,2}, Wu Linyi^{1,2}, Zhou Qiwen², Du Jun³, Wei Yichang¹, Wang Lili²

(1.College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water

Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2.Agro-Environmental

Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 3.Institute of Plant Nutrient, Resources and Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: [Objectives] The effects of different irrigation treatments on gaseous nitrogen loss and nitrogen cycle functional genes in a greenhouse cucumber ecosystem were explored to provide data support for further studies on gaseous nitrogen loss in a greenhouse farmland system under different irrigation methods. The results provide a theoretical basis for the formulation of irrigation schemes in greenhouse vegetable

收稿日期: 2024-10-22

修回日期: 2024-12-25

采用日期: 2024-12-27

资助项目: 国家重点研发计划“黄淮海北部集约化农区氮素面源污染发生过程与调控机制”(2021YFD1700903)

第一作者: 万博(2000—), 男(汉族), 河南省平顶山市人, 硕士研究生, 主要从事水工环地质方面的工作, 研究方向为农田氮素面源污染。
Email: 923417593@qq.com。

通信作者: 魏义长(1967—), 男(汉族), 河南省方城县人, 博士, 教授, 主要从事水土资源精准管理与高效利用研究与教学工作。Email: weiyichang@ncwu.edu.cn。

王丽丽(1984—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 博士, 副研究员, 主要从事农田生物多样性、碳氮循环与全球变化的相关研究。
Email: lili0229ok@126.com。

production systems in China. [Methods] Facility cucumbers were chosen as the research subjects for field experiments. The experimental designs included traditional irrigation (100% IWD), 25% water-saving irrigation (75% IWD), and 50% water-saving irrigation (50% IWD). Through in situ field monitoring experiments, continuous observations and records of N_2O emissions and ammonia volatilization from the soil of facility cucumbers were made using static chamber-gas chromatography and ventilation absorption. Nitrogen cycle functional genes were identified using high-throughput qPCR gene chip technology. [Results] ① Among the various irrigation treatments, the cumulative emissions of N_2O were as follows: 100% IWD > 75% IWD ($p < 0.05$) and 100% IWD > 50% IWD ($p < 0.05$). ② Cumulative ammonia volatilization was 75% IWD > 50% IWD > 100% IWD ($p < 0.05$). ③ The overall abundance of nitrogen cycle functional genes in the soil changed significantly (PERMANOVA, $F = 241.82$, $p = 0.001$). ④ Cucumber yield was 100% IWD > 75% IWD > 50% IWD ($p < 0.05$). [Conclusion] Irrigation at 50% significantly increased nitrification gene abundance, whereas 75% and 50% irrigation significantly decreased denitrification gene abundance. Denitrification was the main factor affecting N_2O gas production in surface soil treated with 100% irrigation. Reducing the irrigation water volume by 25% led to a decrease in denitrification gene abundance in the surface soil and weakened the denitrification process in the surface soil, reducing N_2O emissions. However, reducing irrigation water by 50% did not significantly change denitrification gene abundance or N_2O emissions at the soil surface.

Keywords: greenhouse cucumber; irrigation; nitrous oxide; ammonia volatilization; functional genes of nitrogen cycling

设施农业作为现代化农业生产方式,通过工程技术手段创造出适宜的作物生长环境,从而实现农作物高效优质生产,设施农业的快速发展显著提高了农业生产的社会效益[1]。

作为设施农业生产中农作物生长的必需条件,水分和养分驱动了农田土壤中的氮素循环过程。目前有些设施菜田经营者和农民所选择“过量施肥十大水漫灌”的种植模式并不是最优选,而且有可能对作物产量产生负面效果。除此之外,这种种植模式也是环境污染和农产品质量问题发生的主要因素[2]。

受限于目前的技术条件,设施农业生产中的农作物无法完全吸收肥料中的氮素,从而导致了氮素的大量流失。而肥料中的氮素流失到自然环境中,形成了非常严重的面源污染,并且对于灌溉水量和氮肥施用量都较大的设施菜田种植地区来说,污染情况更为严重[3]。

另一个影响农田氮素循环过程的因素是水分,但是中国水资源的供给和需求的情况存在不平衡的问题,并且在近些年来尤为突出[4]。由于需要灌溉的耕地面积的逐年增加以及灌溉所需水资源的局限性,农业用水效率的提升已经成为中国农业发展的重点,节水灌溉方面的研究越来越受到国家重视。

近年来,邓帅帅等[5]的研究结果表明,灌溉不足会影响黄瓜的产量和质量。丁武汉[6]研究发现滴灌灌溉减少了设施菜地 N_2O 年排放总量,增加了设施

菜地 NH_3 挥发总量。王艳丽[7]研究发现夏大豆—冬小麦种植模式下 W_4 处理(40 cm 土层土壤含水量灌至 60%)不仅提高了系统产量和经济效益,还提高了氮素利用率,并减少了农田土壤气态氮损失。

已有研究大多关注节水灌溉相对于大水漫灌对设施蔬菜产量、氮利用效率和氮素损失的影响,但灌溉方式不够具体,且关于不同灌溉方式下设施菜田生产系统的气态损失研究较少。本研究通过野外原位监测试验,利用静态箱—气相色谱法、通气吸收法分别对设施黄瓜土壤 N_2O 排放及氨挥发进行连续观测,结合高通量 qPCR 基因芯片技术,探明灌溉方式对设施菜地气态损失及氮循环功能基因的影响。可为不同灌溉方式下设施农田系统氮素气态损失研究的进一步开展提供数据支撑,为中国设施菜地生产系统的灌溉方案制定提供理论基础。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

试验设在天津市武清区大良镇设施蔬菜核心产区进行,该试验基地位于武清区北部(117°2'46"E, 39°32'5"N),属于温带大陆性季风气候,暖温带半干旱半湿润风带,年平均风速为 3.4 m/s。全年平均气温 11.2 °C,平均湿度 66%,最低气温平均 -5.8 °C,最高气温平均 25.7 °C。最大冻土深度 0.57 m。年日照时数 2 610~3 090 h,年平均降水量 642 mm,降水

量 70%集中在 6—8 月,全年无霜期 210 d。供试大棚为典型的日光温室大棚,棚顶部用聚乙烯薄膜覆盖,且不具备额外加热系统。试验地土壤为盐化潮土。供试土壤(0—20 cm)采样时间为 2021 年 11 月 22 日,其基本理化性质:硝态氮含量为 150.4 mg/kg,铵态氮含量为 29 mg/kg,土壤有机碳含量为 9.6 g/kg,全氮含量为 1.1 g/kg,全磷含量为 0.9 g/kg,电导率为 0.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$,阳离子交换量为 17.1 cmol/kg, pH 值为 8.09。

1.2 试验设计

田间试验黄瓜供试品种为津美 9 号,试验设置 3 个处理:①处理 1 为 100%土壤稳定入渗率(IWD),以常规沟灌模式每 666.67 m²灌溉量为对照(夏秋季黄瓜 400 m³)。②处理 2 为 75% IWD,节水 25%(即 75%常规灌溉量,夏秋季黄瓜 300 m³)。③处理 3 为 50% IWD,节水 50%(即 50%常规灌溉量,夏秋季黄瓜 200 m³)。各处理重复 3 次,随机排列,各小区长 9 m,宽 5 m(3 条种植沟,6 行作物),小区间隔 1.0 m。田间管理按照常规管理进行。前茬作物为番茄。施肥方式基肥为牛粪有机肥,追肥为水溶肥,采用水肥一体化灌溉,水溶肥中 N-P₂O₅-K₂O 的比例为 15:15:10,氮素形态为硝态氮、酰胺态氮,比例为 4:6,总氮素含量 150 g/L。黄瓜全生育期内总计追肥 20 次(生长期 4 次;坐果期 5 次;盛果期 7 次;末果期 4 次),追肥时间间隔为 3~5 d,其中,每 666.67 m²施肥量为黄瓜季 \leq 48.9 kg。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 N₂O 气体的采集 采用静态箱—气相色谱法收集测定 N₂O 通量^[8]。从灌水施肥后的第一天开始采集 N₂O 气体,之后每间隔 7 d 进行下一次采样。采样时间为每天上午 9:00—11:00,用 100 ml 塑料针筒收集气体样品,存放在储气瓶中。每隔 12 min 采样 1 次,在 0,12,24,36,48,60 min 时共采集 5 次气体样品。没有采样日的 N₂O 通量通过其最近相邻两次施肥时间的观测值用差值法进行计算。每周 N₂O 通量的累积值即作为设施黄瓜生长季的 N₂O 累积排放总量。

N₂O 气体样品采用 Agilent6 820 型气相色谱仪进行检测。N₂O 浓度的计算方法参照师梦娇等^[9]的研究。

1.3.2 NH₃ 气体的采集 本试验采用被动吸附法监测土壤氨挥发。捕获装置由 PVC 管和两片浸过磷酸甘油溶液的海绵构成,塑料管内径为 16 cm,高 10 cm;海绵直径为 16 cm,厚度为 2 cm,海绵浸以 15 ml 的磷酸甘油溶液(50 ml 磷酸,40 ml 丙三醇,

定容到 1 000 ml)后,置于 PVC 管中,下层的海绵距土壤 4 cm,用于吸收土壤中挥发的氨,上层的海绵与管顶部相平,用于吸收外界气体防止污染。装置放置于两行作物中间的表层土壤并固定,施肥后固定时间更换,每 5 d 内更换 1 次,更换频率视海绵湿润程度而定。下层海绵置于 300 ml (1 mol/L) KCl 溶液中浸提 1 h,浸提液通过流动注射分析仪 AA3(SEAL Analytical,德国)测定氨浓度。氨挥发通量(F)计算公式^[10-12]为:

$$F = \frac{M}{A \times D \times 100} \quad (1)$$

式中: F 为氨挥发通量[kg/(hm²·d)]; M 为单个装置每次测得的氨量(mg); A 为收集装置的截面积(m²); D 为每次连续收集的时间(d);100 为换算系数。

1.3.3 土壤理化性质的测定 在黄瓜生育期内,用直径 5 cm 的土钻在每个小区内钻取 10 份随机的样品土(0—20 cm),充分混匀后分成两份,一份风干,一份在 -20 °C 下冷藏,用于测定土壤相关理化指标。土壤中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 用 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液浸提,25 °C 恒温震荡后过滤,采用流动注射分析仪 AA3 测定土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量;土壤 pH 采用电位法(水土比 2.5:1)测定。

1.3.4 氮循环功能基因的测定 2022 年 8 月各小区用直径 5 cm 土钻随机找 3 个位置分别采集 1 份 0—20 cm 土层土壤,研磨过筛混匀后存至 -80 °C 冰箱。采用基因芯片技术测定,按照 DNA 试剂盒说明进行培养后土壤样本提取,并用 Qubit 4.0(Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA)仪器对样本中 DNA 的总量和纯度进行检测,合格后将 DNA 添加到 384 孔板作为样本板,并将引物和其他 qPCR 所用试剂添加到另一 384 孔板作为引物板,通过自动设备将样品和引物中试剂添加到高通量 qPCR 芯片为孔中,并在实时定量 PCR 系统中进行反应和荧光信号检测以及扩增曲线和溶解曲线生成。根据实时定量 PCR 系统中的 C_t 值进行质量控制和基因检测统计(美格基因,广州)。

1.4 数据分析

所有试验数据的统计分析和图形解释均通过 Windows 系统的 SPSS stats 22.0 软件(IBM 公司,纽约,美国)和 Origin 9.1 软件(OriginLab 公司,美国)进行。所有图中的数据均以平均值 \pm 标准差的形式呈现。使用重复测量方差分析(ANOVA)和莫奇利球形检验的一般线性模型来确定气体(即 NH₃ 和 N₂O)通量和氮肥类型的影响。当球形检验不满足

时,采用 Greenhouse-Geisser 校正来校正 F 分布的自由度。使用单向方差分析评估了设施黄瓜生长季节各处理或天数中气体通量率、微生物相对丰度、功能性 N 循环基因丰度差异的显著性。方差同质性采用 Levene 检验进行检验。使用最小显著性差异法 (LSD) 对平均值进行多重比较,双变量正态分布资料采用 Pearson 相关系数进行检验。在所有分析中, p 值小于或等于 0.05 被认为是显著的。

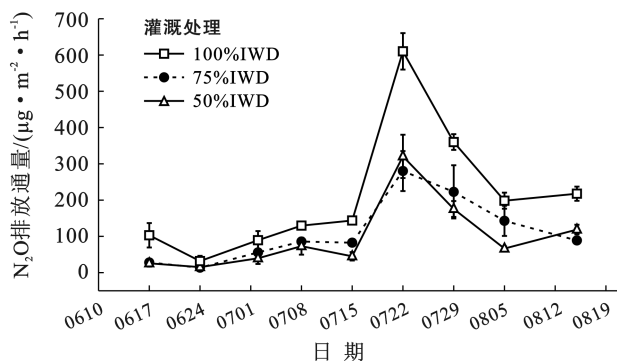
2 结果与分析

2.1 N_2O 排放

设施黄瓜生态系统中 N_2O 排放通量和累计排放量随灌溉水量的不同而不同,但在时间上有相似的趋势(图 1—2)。施肥(6月15日)后, N_2O 排放通量较平稳,无较大波动。 N_2O 排放通量于7月15日开始上升,并在7月22日达到峰值,随后开始下降,直至进入拉秧期。

由图 1 可见,7月15日之前, N_2O 排放通量无较大波动[$9.77 \sim 156.64 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]。7月22日, N_2O 排放通量达到峰值。其中,75% IWD 处理[$280.11 \pm 55.23 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]和 50% IWD 处理[$320.65 \pm 59.69 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]显著低于 100% IWD 处理[$610.15 \pm 50.23 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]的 N_2O 排放通量($p < 0.05$),75% IWD 处理和 50% IWD 处理的 N_2O 排放通量无明显差异。

各灌溉处理下, N_2O 动态累积排放量如图 2 所示, N_2O 累积排放量由高至低依次为:100% IWD($3.31 \pm 0.21 \text{ kg}/\text{hm}^2$),75% IWD($1.74 \pm 0.23 \text{ kg}/\text{hm}^2$),50% IWD($1.56 \pm 0.12 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。与 100% IWD 相比,75% IWD 和 50% IWD 分别显著降低 47.56% 和 53.02% N_2O 累积排放量($p < 0.05$)。75% IWD 和 50% IWD 处理的 N_2O 累积排放量无明显差异。



注:IWD为土壤稳定入渗率。下同。

图 1 不同灌溉处理设施黄瓜 N_2O 排放通量

Fig.1 N_2O emission fluxes of cucumber from different irrigation treatment facilities

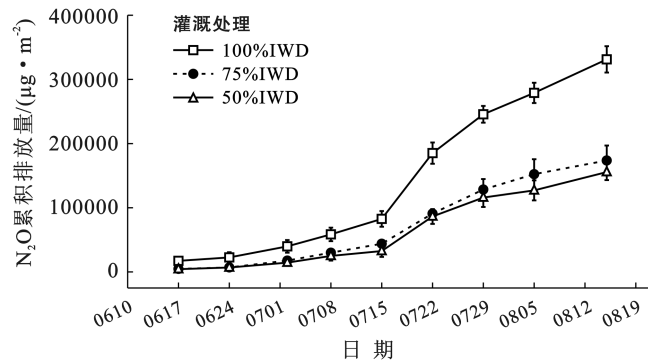


图 2 不同灌溉处理设施黄瓜 N_2O 累计排放量

Fig.2 Cumulative N_2O emissions of cucumber from different irrigation treatment facilities

2.2 氨挥发

设施黄瓜生态系统中氨挥发速率和累计排放量随灌溉水量的不同而不同,但在时间上有相似的趋势(图 3—4)。施肥(6月15日)后第3天(6月18日)氨挥发速率达到峰值,随后氨挥发速率开始随着时间下降。7月2日,由于气温增高,氨挥发速率再次上升。8月8日,设施黄瓜进入拉秧期,氨挥发速率降低。

由图 3 可见,6月18日,所有灌溉处理的氨挥发速率均达到峰值,且 75% IWD 处理的氨挥发速率[$0.27 \pm 0.01 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]显著($p < 0.05$)高于 100% IWD 处理[$0.19 \pm 0.02 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$],50% IWD 处理的氨挥发速率[$0.22 \pm 0.02 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]略高于 100% IWD 处理。6月30日,各灌溉处理的氨挥发速率达到最低值,最低值范围为 $0.03 \sim 0.04 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。随后,由于温度的升高,氨挥发速率上升到 $0.07 \sim 0.22 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。

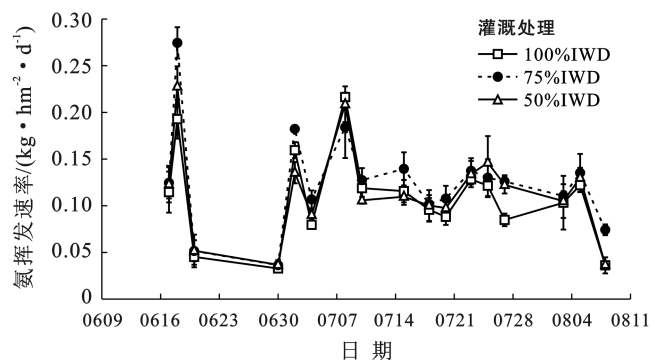


图 3 不同灌溉处理设施黄瓜氨挥发速率

Fig.3 Ammonia volatilization rate of cucumber in different irrigation treatment facilities

各灌溉处理下,氨动态累积挥发量如图 4 所示,氨累计挥发量由高至低依次为:75% IWD[$5.94 \pm 0.14 \text{ kg}/\text{hm}^2$],50% IWD[$5.52 \pm 0.05 \text{ kg}/\text{hm}^2$],

100% IWD [$5.18 \pm 0.07 \text{ kg/hm}^2$]。与 100% IWD 相比,75% IWD 和 50% IWD 分别显著增加 14.48% 和 6.55% 设施黄瓜氨累积挥发量 ($p < 0.05$)。75% IWD 比 50% IWD 显著增加 7.45% 设施黄瓜氨累积挥发量 ($p < 0.05$)。

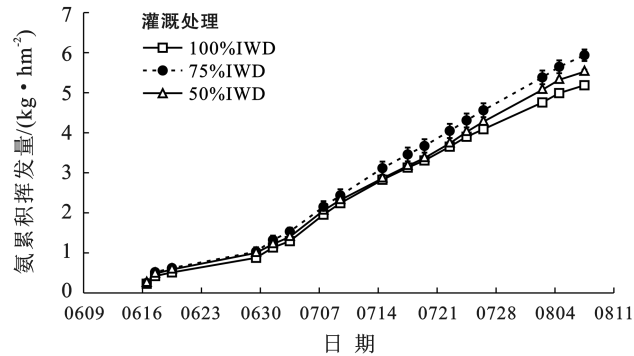


图 4 不同灌溉处理设施黄瓜氨累积挥发量

Fig.4 Cumulative ammonia volatilization of cucumber in different irrigation treatment facilities

2.3 氮循环功能基因丰度

主成分分析(PCA)表明,不同灌溉方式下土壤中氮循环功能基因丰度整体发生了显著改变(PERMANOVA $F = 241.82$, $p = 0.001$)。PCA₁ 轴与 PCA₂ 轴分别解释 63.0% 和 15.9% 的整体氮循环功能基因的变化(如图 5 所示)。

不同灌溉处理下,氮循环功能基因绝对定量如图 6—7 所示。对于硝化基因,50% IWD 处理的表层土中 *amoA₂*, *amoB* 和 *nxrA* 基因丰度显著高于 100% IWD 和 75% IWD ($p < 0.05$)。对于反硝化基因,

50% IWD 处理和 75% IWD 处理的表层土中 *narG*, *nirK₁*, *nirK₂*, *nirK₃*, *nirS₁* 和 *nirS₂* 基因丰度显著低于 100% IWD ($p < 0.05$)。50% IWD 处理的表层土中 *nirS₃*, *nosZ₁* 和 *nosZ₂* 基因丰度显著低于 100% IWD ($p < 0.05$)。75% IWD 处理的表层土中 *nosZ₁* 和 *nosZ₂* 基因丰度显著高于 100% IWD ($p < 0.05$)。75% IWD 处理的表层土中 *nosZ₁* 和 *nosZ₂* 基因丰度显著高于 50% IWD ($p < 0.05$)。对于其他氮循环功能基因,75% IWD 处理和 50% IWD 处理的表层土中 *hzsB*, *nifH*, *napA*, *gdhA* 和 *ureC* 基因丰度显著低于 100% IWD ($p < 0.05$)。75% IWD 处理的表层土中 *napA* 基因丰度显著低于 50% IWD, *nifH* 和 *ureC* 基因丰度显著高于 50% IWD。

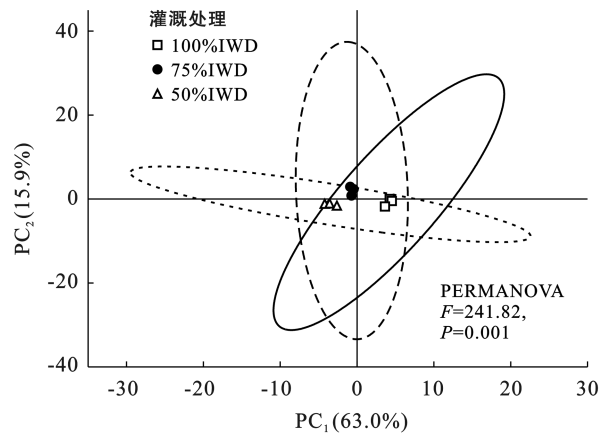


图 5 不同灌溉处理设施黄瓜的土壤中氮循环功能基因丰度主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of nitrogen cycling function gene abundance in cucumber soil under different irrigation treatment facilities

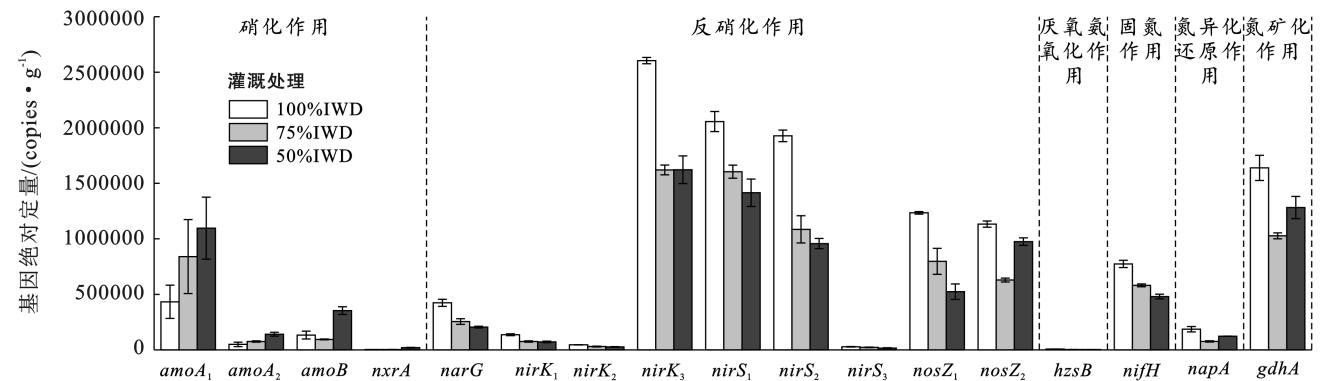


图 6 不同灌溉处理设施黄瓜的土壤氮循环功能基因绝对定量

Fig.6 Absolute quantification of soil nitrogen cycling function genes in cucumber under different irrigation treatment facilities

2.4 不同灌溉处理下黄瓜的产量

不同灌溉处理下,设施菜地黄瓜产量如表 1 所示。100% IDW,75% IDW,50% IDW 3 个处理的黄瓜产量 100% IDW > 75% IDW > 50% IDW,但是差距很小(不超过 5%)。

3 讨论

3.1 不同灌溉方式对设施黄瓜 N₂O 排放的影响

N₂O 是一种具有最大升温潜能的长期强效温室气体,对农田的全球升温潜能值和排放强度具有最重

要的影响^[13]。N₂O 排放主要是由土壤中微生物的硝化和反硝化作用产生的,是非生物因素调节微生物 N₂O 产生和还原过程的结果^[13-14]。而土壤的硝化、反硝化作用会由于不同的灌溉方式引起土壤理化性质的变化而改变^[15]。氮肥施入土壤后迅速转化为 NH₄⁺,并通过硝化作用进一步转化为 NO₃⁻^[16]。硝化作用对 N₂O 排放的直接贡献相对较低,并且在大多数情况下低于氨氮氧化总量的 1%^[17]。不同灌溉方式通过改变土壤水分含量影响表层土中氮循环功能基因丰度,进而增加或降低 N₂O 排放。现有研究称,在水分含量从 45% 提升到 90% 的过程中,大量的 N₂O 会同时从土壤排放至大气^[18-19]。其中,硝化过程在土壤水分含量为 60%~70% 时成为促进 N₂O 生成的主要因素,而反硝化过程在土壤水分含量超过 70% 时成为主要因素^[20-21]。当水分含量超过 80% 时,土壤中的 N₂O 产量可能会受到限制,还会产生 N₂^[22]。因此,水分含量是影响土壤 N₂O 排放的关键因素。

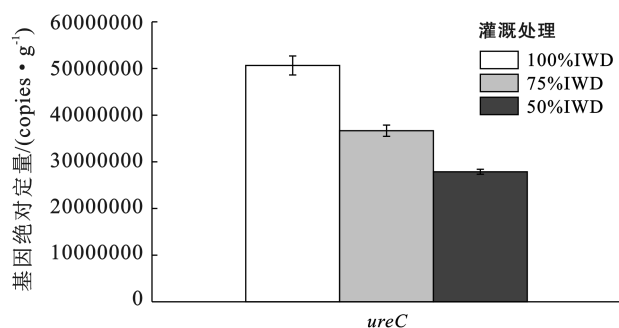


图 7 不同灌溉处理设施黄瓜土壤氨化基因绝对定量

Fig.7 Absolute quantification of ammoniating genes in cucumber soil in different irrigation treatment facilities

表 1 不同灌溉处理设施黄瓜产量

Table 1 Cucumber yield from different irrigation treatment facilities

处理	产量/(kg · hm ⁻²)
50% IWD	21 018.52 ± 221.70 ^b
75% IWD	22 734.57 ± 214.19 ^c
100% IWD	24 504.94 ± 69.52 ^d

注:同列不同小写字母表示不同处理差异显著($p < 0.05$)。

目前,关于不同灌溉方式对设施菜田 N₂O 排放影响的研究结果较为一致:降低灌溉水量不同程度上降低了设施菜田 N₂O 排放量^[23]。但现有研究大多将灌溉处理设置为传统习惯用量和节水灌溉两种等级,达不到指导中国设施菜地灌溉方案的制定的实际意义。本研究将灌溉处理分为 3 个等级:100% IWD, 75% IWD 和 50% IWD,灌溉水量依次递减。研究结果表明:降低灌溉水量有效降低了 N₂O 排放量,这与

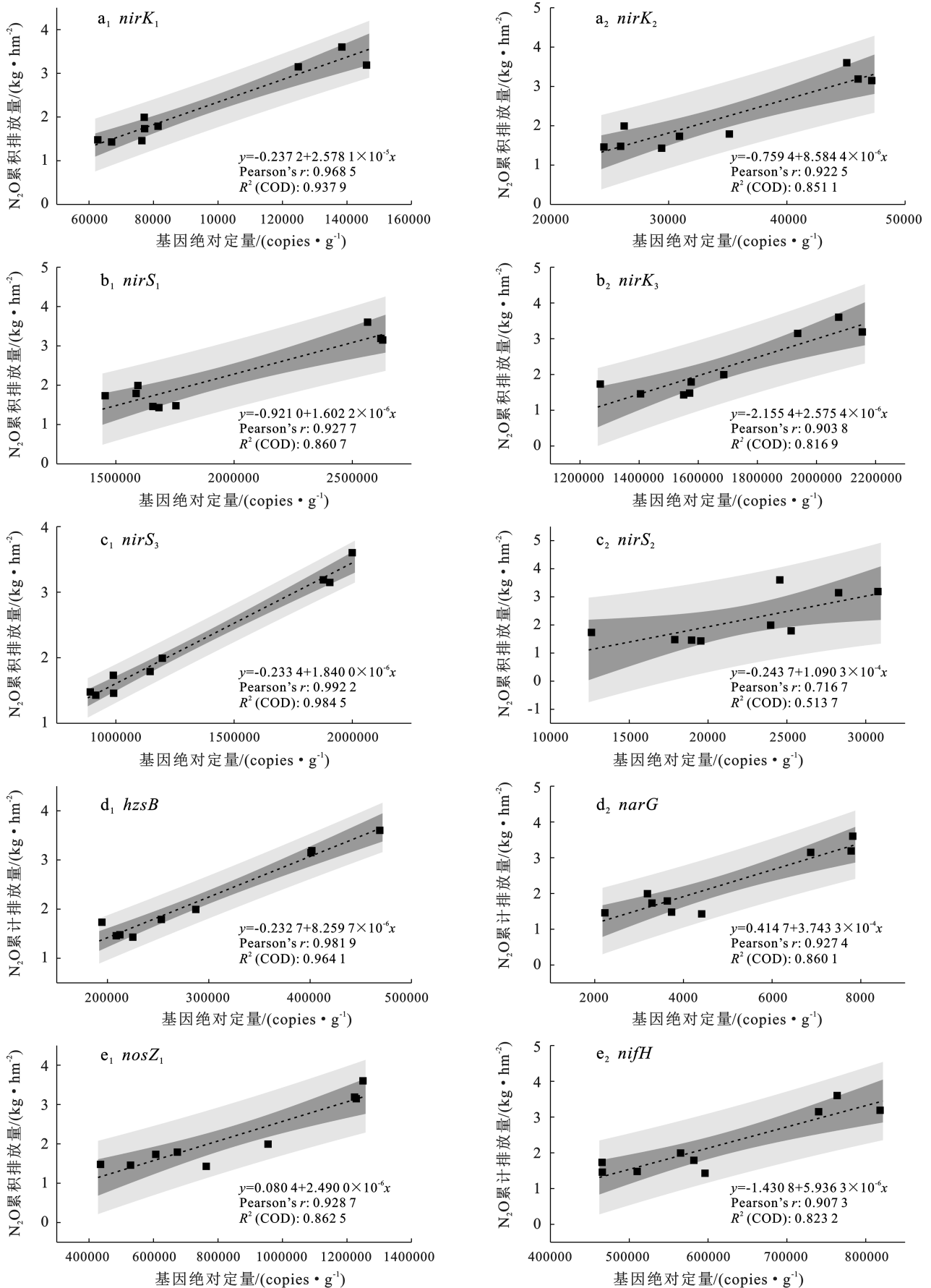
前人^[23-25]的研究结论相似,但 75% IWD 处理和 50% IWD 处理之间无明显差异。这是由于虽然减少灌溉水量导致土壤含水量降低,使土壤含氧量增加,进而导致厌氧的反硝化基因丰度降低(图 6),但 75% IWD 处理与 50% IWD 处理之间的反硝化基因丰度无明显差异。

土壤中氮循环功能基因丰度与土壤养分转化和温室气体排放密切相关。本研究将设施菜地 N₂O 累积排放量与氮循环功能基因做相关性分析(图 8)发现:设施黄瓜 N₂O 累积排放量与固氮基因 *nifH*,反硝化基因 *narG*, *nirK*, *nirS*, *nosZ*₁, 厌氧氨氧化基因 *hzsB* 的基因丰度呈正相关($p < 0.05$)。这也证明了在设施黄瓜生产系统中减少灌溉水量改变了土壤表层氮循环功能基因丰度,进而影响 N₂O 排放的微生物学机制:即减少 25% 灌溉水量导致土壤表层反硝化基因丰度降低,使 N₂O 排放量下降;而减少 50% 灌溉水量没有显著改变土壤表层反硝化基因丰度和 N₂O 排放量。

3.2 不同灌溉方式对设施黄瓜氨挥发的影响

设施黄瓜栽培中氮肥多溶于水后施用,高温高湿的环境条件加快尿素的水解及转化,为氨挥发及硝化反应提供底物,使得施氮处理氨挥发呈现出峰快、持续时间短的特点^[26]。现有研究称,节水灌溉都导致农田 NH₃ 挥发量呈现出增加的趋势。这是由于土壤中水分的流动促进了 NH₄⁺ 在土壤中的扩散,而减少灌溉水量使土壤水分不足,进而限制了 NH₄⁺ 在土壤中的向下移动,导致氨挥发过程所需底物的数量增加。除此之外,还有研究表明高土壤含水量将 NH₄⁺ 运移至低 pH 区,被固定、吸附到有机和无机土壤胶体或转化为其他形式。因此,水分含量是影响土壤氨挥发的关键因素。

目前,大多数研究将灌溉处理设置为传统习惯用量和节水灌溉两种等级。本研究将灌溉处理分为 3 个等级:100% IWD, 75% IWD 和 50% IWD,灌溉水量依次递减。研究结果表明,降低灌溉水量显著增加了设施黄瓜氨累积挥发量($p < 0.05$),这与前人的研究结果相似^[27]。但相较于 75% IWD, 50% IWD 降低了设施黄瓜氨累积挥发量。这可能是由于 50% IWD 处理的土壤表层中硝化基因丰度高于 75% IWD 处理(图 6),提升了土壤中 NH₄⁺ 向 NO₃⁻ 转化的能力,降低了氨挥发所需的底物浓度,进而减少了氨累积挥发量。在未来的研究中,我们建议增加试验指标,考虑土壤表层中 NH₄⁺, NO₃⁻ 浓度,结合氮循环功能微生物进一步探讨设施菜田氮素气态损失对灌溉方式的响应。

图 8 设施菜地 N₂O 累积排放量与氮循环功能基因相关性Fig.8 Relationship between cumulative N₂O emission and nitrogen cycle function genes in vegetable plots

4 结论

(1) 各灌溉处理中, N_2O 累计排放量为: $100\% IWD > 75\% IWD (p < 0.05)$, $100\% IWD > 50\% IWD (p < 0.05)$; NH_3 累积挥发量为: $75\% IWD > 50\% IWD > 100\% IWD (p < 0.05)$; 黄瓜产量呈现: $100\% IWD > 75\% IWD > 50\% IWD (p < 0.05)$ 。

(2) 在设施黄瓜生态系统中, 与传统灌溉相比, $75\% IWD$ 能在节约 25% 的灌溉水资源的同时降低 N_2O 排放(降低 $25\% \sim 50\%$), 但这导致了氨挥发量增加(增加 5% 左右)。 $50\% IWD$ 能节约更多的灌溉水资源, 且在保证对降低 N_2O 排放的促进作用(降低 $25\% \sim 50\%$) 下增加少量的氨挥发量(增加 10% 左右)。综合来看, 节水 75% 和节水 50% 可以在保证节水的基础上有效降低 N_2O 排放。

(3) 在设施黄瓜生态系统中, 与传统灌溉相比, $75\% IWD$ 和 $50\% IWD$ 能有效降低反硝化基因 (*narG*, *nirK₁*, *nirK₂*, *nirK₃*, *nirS₁* 和 *nirS₂* 基因) 的相对丰度, 但 $50\% IWD$ 明显增加了硝化基因 (*amoA₂*, *amoB* 和 *nxrA* 基因) 的相对丰度。

(4) 在设施黄瓜生态系统中, 与传统灌溉相比, $75\% IWD$ 和 $50\% IWD$ 在保证产量的基础上有效节水和减少 N_2O 排放。

综上所述, 50% 灌溉显著增加了硝化基因丰度, 且 75% 灌溉和 50% 灌溉显著降低了反硝化基因丰度。 100% 灌溉处理的表层土壤 N_2O 气体产生的主要因素是反硝化过程, 减少 25% 灌溉水量导致土壤表层反硝化基因丰度降低, 表层土壤反硝化过程减弱, 进而使 N_2O 排放量下降。而减少 50% 灌溉水量没有显著改变土壤表层反硝化基因丰度和 N_2O 排放量。 75% 灌溉量可以在保证产量的情况下最有效减少 N_2O 排放量。

参考文献 (References)

[1] 刘福昊, 郭申伯, 王笛, 等. 设施番茄外观形态及物质累积分配模型构建与验证[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 188-196.
Liu Fuhao, Guo Shenbo, Wang Di, et al. Construction and verification of an external morphology, substance accumulation, and distribution model of tomatoes in greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(21): 188-196.

[2] 姜译涵, 马千蕙, 孙兆明. 我国农业面源污染总体态势及治理建议[J]. 合作经济与科技, 2022(18): 25-27.
Jiang Yihan, Ma Qianhui, Sun Zhaoming. Overall situation and treatment suggestions of agricultural non-point

source pollution in China [J]. Co-operative Economy & Science, 2022(18): 25-27.

- [3] 刘敬武. 新时期农村水环境污染现状及对策研究[J]. 资源节约与环保, 2019(4): 93.
Liu Jingwu. Current situation and countermeasures of rural water environment pollution in the new period [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2019(4): 93.
- [4] 张凯, 吴凤平, 成长春. 三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5757-5767.
Zhang Kai, Wu Fengping, Cheng Changchun. Dynamic evolution characteristics of water resources utilization efficiency in China under the constraint of triple attribute carrying capacity [J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5757-5767.
- [5] 邓帅帅, 闫浩芳, 张川, 等. 灌溉量与减氮配施有机肥模式对温室黄瓜及土壤的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 93-102.
Deng Shuashuai, Yan Haofang, Zhang Chuan, et al. Effects of irrigation amounts and nitrogen reduction combined with organic fertilizer pattern on greenhouse cucumber and soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(19): 93-102.
- [6] 丁武汉. 不同灌溉条件下设施菜地气态氮排放特征及其相互关系[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
Ding Wuhan. Characteristics of gaseous nitrogen emissions from vegetable plots under different irrigation conditions and their relationship [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [7] 王艳丽. 不同种植模式与微喷灌下氮素周年高效利用机制研究[D]. 河南 郑州: 河南农业大学, 2024.
Wang Yanli. Study on annual efficient use mechanism of nitrogen under different planting patterns and micro-sprinkler irrigation [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.
- [8] Wang Yuesi, Wang Yinghong. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(5): 842-844.
- [9] 师梦娇. 灌溉方式与灌水量对番茄生长及土壤温室气体排放的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Shi Mengjiao. Effects of irrigation methods and irrigation amount on tomato growth and soil greenhouse gas emission [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2018.
- [10] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定: 通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209.

- Wang Zhaohui, Liu Xuejun, Ju Xiaotang, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205-209.
- [11] 王从, 孙会峰, 徐春花, 等. 施肥方式对设施菜地氨挥发影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(1): 123-133.
- Wang Cong, Sun Huifeng, Xu Chunhua, et al. Effects of fertilization methods on ammonia volatilization from vegetable field under greenhouse cultivation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(1): 123-133.
- [12] Braker G, Conrad R. Chapter 2 diversity, structure, and size of N_2O -producing microbial communities in soils: What matters for their functioning? [J]. *Advances in Applied Microbiology*, 2011, 75: 33-70.
- [13] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Impact of elevated CO_2 and temperature on soil C and N dynamics in relation to CH_4 and N_2O emissions from tropical flooded rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461: 601-611.
- [14] Burt C, O'Connor K, Ruehr T. Fertigation Irrigation Training and Research Center [M]. California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 1995, 295.
- [15] Han Ping, Wu Dianming, Sun Dongyao, et al. N_2O and NO_y production by the comammox bacterium *Nitrospira inopinata* in comparison with canonical ammonia oxidizers [J]. *Water Research*, 2021, 190: 116728.
- [16] Chen Huaihai, Li Xuechao, Hu Feng, et al. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2956-2964.
- [17] Hou Huijing, Peng Shizhang, Xu Junzeng, et al. Seasonal variations of CH_4 and N_2O emissions in response to water management of paddy fields located in SouthEast China [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(7): 884-892.
- [18] Xu Junzeng, Peng Shizhang, Hou Huijing, et al. Gaseous losses of nitrogen by ammonia volatilization and nitrous oxide emissions from rice paddies with different irrigation management [J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(5): 983-994.
- [19] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6): 1267-1272.
- [20] Kiese R, Hewett B, Butterbach-Bahl K. Seasonal dynamic of gross nitrification and N_2O emission at two tropical rainforest sites in Queensland, Australia [J]. *Plant and Soil*, 2008, 309(1): 105-117.
- [21] Friedl J, De Rosa D, Rowlings D W, et al. Dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA), not denitrification dominates nitrate reduction in subtropical pasture soils upon rewetting [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 125: 340-349.
- [22] 魏欢. 设施番茄微润灌溉—减量施肥阻控土壤氮磷损失研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2020.
- Wei Huan. Study on control of soil nitrogen and phosphorus loss by micro-moist irrigation of facility tomato with reduced fertilization [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020.
- [23] Li Guihua, Xie Haikuan, Zhang Jianfeng, et al. WHCNS-veg modelling of N_2O , NH_3 and NO_3^- -dynamics in a vegetable production system under different fertilization and irrigation regimes [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(8): 1289.
- [24] Yao Zhisheng, Yan Guangxuan, Wang Rui, 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.
- [25] 罗伟, 程于真, 陈竹君, 等. 日光温室番茄—西瓜轮作系统不同水氮处理氨挥发特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1278-1286.
- Luo Wei, Cheng Yuzhen, Chen Zhujun, et al. Ammonia volatilization under different nitrogen and water treatments of tomato-watermelon rotation system in solar greenhouse in Losses Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1278-1286.
- [26] Liu Guodong, Li Yuncong, Alva A K. High water regime can reduce ammonia volatilization from soils under potato production [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(9/10): 1203-1220.
- [27] Ding Wuhan, Chang Naijie, Zhang Jing, et al. Optimized fertigation mitigates N_2O and NO emissions and enhances NH_3 volatilizations in an intensified greenhouse vegetable system [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 272: 107797.