

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.035

加气条件下土壤 N_2O 排放对硝化/反硝化细菌数量的响应

陈慧^{1,2} 李亮^{1,3} 蔡焕杰^{1,2} 朱艳^{1,3} 王云霏^{1,3} 徐家屯^{1,3}

(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. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为揭示加气灌溉及不同灌水量处理设施番茄地土壤 N_2O 排放对土壤微生物的响应, 于2016年8—12月在日光温室内进行试验, 以充分供水的灌水量 (W) 为基准, 设置 0.6 W 、0.8 W 和 1.0 W 3 个灌水量定额, 每个灌水量定额又设置加气和不加气处理, 共计 6 个处理: 0.6 W 加气 (A10.6)、0.6 W 不加气 (CK0.6)、0.8 W 加气 (A10.8)、0.8 W 不加气 (CK0.8)、1.0 W 加气 (A11.0) 和 1.0 W 不加气 (CK1.0)。结果表明, 番茄生育前期, 不同灌水处理处理的土壤 N_2O 排放通量呈下降的趋势; 移植 25 d 后, N_2O 气体维持在较低且稳定的排放水平。与不加气处理相比, 不同灌水量定额的加气处理增加了土壤 N_2O 排放, 平均增加了 4.7%; 且随着灌水量的增加, 土壤 N_2O 排放也在增加, 平均增加了 1.9%, 但处理间差异性均不显著 ($P > 0.05$)。就番茄全生育期微生物数量均值而言, 加气较不加气处理增加了土壤硝化细菌数量, 平均增加了 2.1%; 但加气减小了土壤反硝化细菌数量, 平均降低了 9.7% ($P > 0.05$)。而随着灌水量的增加, 土壤硝化细菌和反硝化细菌数量均逐渐增加 ($P > 0.05$)。相关分析表明, 土壤 N_2O 排放与土壤水分和土壤温度呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与土壤反硝化细菌数量呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。试验结果为研究设施菜地土壤硝化和反硝化反应过程及氮循环奠定了理论基础。

关键词: 加气灌溉; 灌水量; 硝化细菌; 反硝化细菌; N_2O 排放

中图分类号: S275.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0303-09

Response of Soil N_2O Fluxes to Soil Nitrifying and Denitrifying Bacteria under Aerated Irrigation

CHEN Hui^{1,2} LI Liang^{1,3} CAI Huanjie^{1,2} ZHU Yan^{1,3} WANG Yunfei^{1,3} XU Jiataun^{1,3}

(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. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Air injection and irrigation affect soil aeration, oxygen partial pressure and nitrogen turnover, which are bound to affect the processes of nitrification and denitrification, and influence production and emission of N_2O . In order to study the response of soil N_2O fluxes to nitrifying and denitrifying bacteria under aerated irrigation, the experiment was conducted in greenhouse tomato fields from August to December, 2016. Based on the irrigation amount of adequate water supply (W), 0.6 W , 0.8 W and 1.0 W were set as three different irrigation regimes. Each irrigation regime contained aeration and non-aeration. Hence, six treatments were set. The results showed that a downward trend of soil N_2O fluxes was observed during the earlier stage of tomato, while soil N_2O fluxes held at a relatively stable and low level since 25 d after transplanting. Compared with non-aerated irrigation, aerated irrigation increased soil N_2O emissions by 4.7% on average. Soil N_2O emissions were increased with the increase of irrigation volume, which were increased by 1.9% on average. But the treatment effects between aeration and irrigation regimes on soil N_2O emissions were not significant ($P > 0.05$). In terms of the mean

收稿日期: 2017-08-16 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400200)和国家自然科学基金项目(51309192)

作者简介: 陈慧(1991—),女,博士生,主要从事节水灌溉与灌溉排水新技术研究,E-mail: chenhu2014@nwsuaf.edu.cn

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

values of microbial population throughout the whole tomato growth period, nitrifying bacteria under aerated irrigation was increased by 2.1% on average compared with non-aerated irrigation, and denitrifying bacteria was decreased by 9.7% on average ($P > 0.05$). In addition, nitrifying and denitrifying bacteria were increased with the increase of irrigation amount ($P > 0.05$). Correlation analysis showed that the dependence of soil N_2O flux on WFPS and soil temperature showed a significantly positive correlation under all treatments ($P < 0.01$). The soil N_2O flux was significantly and negatively correlated with denitrifying bacteria under different irrigation modes ($P < 0.01$). The research results provided theoretical foundation for the process of nitrification and denitrification, and for the nitrogen cycle in the protected vegetable fields.

Key words: aerated irrigation; irrigation amount; nitrifying bacteria; denitrifying bacteria; N_2O emission

0 引言

N_2O 作为大气中重要的温室气体,其综合增温潜势是 CO_2 的 298 倍^[1],可参与多种光化学反应,破坏大气臭氧层,引起全球气候变暖。截止 2013 年,大气中 N_2O 浓度达到 321 nL/L,且在过去 30 a 间每年以 (0.73 ± 0.03) nL/L 速率增长^[1]。土壤作为 N_2O 气体排放源,主要通过硝化和反硝化作用产生^[2-3]。硝化作用是硝化细菌在有氧环境中将铵盐氧化成硝酸盐或亚硝酸盐的过程^[4],即: $NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$;反硝化作用是反硝化细菌在嫌气条件下将硝酸盐还原成氮气的过程^[4],即: $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$ 。因此,研究硝化细菌和反硝化细菌对研究硝化和反硝化反应过程及氮循环具有重要意义。

加气灌溉技术已被大量研究证实能改善土壤通气性^[5-7],对作物产量、果实品质及水分利用效率等产生积极影响^[5,7]。但关于加气灌溉对土壤微环境的影响研究仍较少,仅有的报道指出加气灌溉促进了土壤酶活性并增加了土壤微生物数量^[8]。加气灌溉促进了土壤 N_2O 排放^[9-10],但其试验错过了番茄苗期与部分开花坐果期,可能错过了气体排放峰值,从而不能准确估算土壤 N_2O 排放量。此外,土壤硝化细菌和反硝化细菌受土壤温度、 NO_3^- 含量、土壤通气性、pH 值、含水率和作物种类等因素的影响^[11-14],其中土壤含水率和土壤通气性是限制性因子。加气灌溉引起土壤中 O_2 含量改变势必改变了硝化和反硝化反应条件,进而影响土壤微生物活性及土壤 N_2O 产生和排放。研究表明, O_2 含量改变影响了硝化和反硝化反应微生物活性^[15-16],但其研究主要在室内反应器中或地下污水入渗系统中进行^[16-17],田间试验研究几乎未涉及。此外,土壤含水率影响土壤的通气状况和土壤中的氧分压,进而影响土壤中的硝化和反硝化作用^[13]。已有灌水梯度对硝化和反硝化作用的研究集中在林地^[18]和稻田土壤培养试验^[19],设施菜地研究仍较少,缺乏相

关的数据支持。

因此,本文以温室番茄地土壤为试验材料,研究不同加气和灌水量对番茄地土壤 N_2O 气体排放、水分、温度、硝化细菌、反硝化细菌数量和硝态氮含量的影响。以期揭示加气灌溉及不同灌水量下土壤 N_2O 气体排放对土壤硝化细菌、反硝化细菌数量和硝态氮含量的响应,为深入研究硝化细菌和反硝化细菌在设施菜地氮素循环中的作用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2016 年 8—12 月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的日光温室内进行(北纬 $34^{\circ}20'$,东经 $108^{\circ}24'$,海拔高度为 521 m),年均日照时数为 2 163.8 h,无霜期为 210 d。温室内土壤类型为壤土,质地为粘壤土,表层土壤容重为 1.35 g/cm^3 ,田间持水率(质量含水率)为 23.8%,有机碳质量比为 9.51 g/kg,总氮质量比为 1.86 g/kg,总磷质量比为 1.40 g/kg,总钾质量比为 20.22 g/kg,pH 值为 7.65,砂粒(0.05 ~ 1.00 mm)占 26.0%,粉粒(0.005 ~ 0.05 mm)占 33.0%,黏粒(0 ~ 0.005 mm)占 41.0%。

1.2 试验设计

研究表明,土壤田间最大持水率的 60% 为日光温室番茄栽培的适宜灌水下限^[20]。适时灌溉的方法包括固定灌水时间间隔、固定水分亏缺和固定蒸发量^[21],本文采用固定灌水时间间隔方法,灌水周期为 3 ~ 4 d 灌 1 次^[7],保证作物不受水分胁迫且呈现正常的生长状况。试验设置 0.6W、0.8W 和 1.0W 3 个灌水定额,其中 W 代表充分供水的灌水量,由安置在温室内的 E601 型蒸发皿测得的蒸发量确定,计算方法见文献[9,22];每个灌水定额又设置加气和不加气处理,共计 6 个处理,如表 1 所示。每个处理设置 3 个重复,1 垄作为一个重复布设于田间,共计 18 垄,采用完全随机设计。每垄 3.2 m^2 ($4.0 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$),种 11 株番茄(品种为“金鹏 10 号”),株距

35 cm^[7]。灌水方式采用地下滴灌,滴灌带埋深 15 cm,滴头间距 35 cm; 移苗后于 8 月 23 日在垄上覆膜。利用文丘里计(Mazzei 287 型,美国)作为加气设备进行加气。设备安装在灌水毛管的首端,在进水口和毛管末端都装有压力表,灌水时通过水泵形成加压灌溉水,同时调节灌水总管道末端调节阀,保证进口压力为 0.1 MPa,出口压力为 0.02 MPa,由排气法得到进气量约占灌溉水量的 17%^[7]。

表 1 试验设计方案
Tab. 1 Experimental design

处理	灌水系数	加气
A10.6	0.6	√
CK0.6	0.6	
A10.8	0.8	√
CK0.8	0.8	
A11.0	1.0	√
CK1.0	1.0	

注:√表示加气。

番茄幼苗于 2016 年 8 月 17 日定植,此时幼苗处于 3 叶 1 心至 4 叶 1 心;于 2016 年 12 月 31 日收获。为了保证幼苗的成活,番茄移植当天及 8 月 20 日对土壤浇透底水。此外,试验施肥只施基肥,施有机肥料(N-P₂O₅-K₂O 含量大于等于 10%;有机质含量大于等于 45%)与复混肥料(总养分大于等于 45%,其中氮、磷、钾各含 15%)。

1.3 测定指标及方法

土壤 N₂O 气样采用静态暗箱法采集^[9],采样箱由箱体和底座构成。箱体由 6 mm 厚的聚氯乙烯(PVC)材料制成,长、宽和高各为 25 cm。箱体外表面用海绵与锡箔纸包裹,顶部安装有搅拌空气的小风扇,使取样具有代表性。静态箱底座(25 cm × 25 cm)在番茄移植当天埋设于每垄中央 2 棵幼苗之间^[22],底座嵌入土壤 5 cm 深,作为采样点,直到番茄收获;番茄生育期内进行人工除杂草。此外,底座上端附有大约 3 cm 深的凹槽,用以放置静态箱箱体,取样时注水密封以隔绝箱外环境^[22]。气体采样从移苗后第 7 天开始,除去 9 月 5 日、9 月 24 日及 9 月 29 日这 3 个点,番茄生育前期每隔 5~7 d 采集 1 次气样;番茄生育后期平均每隔 8 d 采集 1 次气样。气体取样时间分别在 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。去除奇异点,使 4 个样品浓度测量值随时间的线性回归系数 $R^2 \geq 0.90$ 。

N₂O 浓度采用安捷伦气相色谱仪分析仪测定(Agilent Technologies 7890A GC System,美国),气体

排放通量计算公式^[9]为

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

式中 F ——N₂O 气体排放通量, $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

ρ ——标准状态下气体密度, g/cm^3

h ——箱体高度, m

$\frac{dc}{dt}$ ——气体浓度变化率, $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

T ——箱内温度, $^{\circ}\text{C}$

气体采集同时,用安插在箱体顶部的水银温度计测定箱内温度;用放置在离地面约 1.5 m 高的水银温度计测量取样期间的空气温度;用地温计测量土壤 5 cm 深土层温度;利用土钻在小区首、中、末端采集土样,一部分用干燥法测定土壤 0~20 cm 深度层土壤含水率,并转换成土壤充水孔隙率(Soil water-filled pore space, WFPS)^[23];另一部分风干土样过 5 mm 筛用于测定移植后第 12、25、43、60、76、91、108、125 天土壤硝态氮(NO_3^-)含量。并于移植后第 27、42、69、91、108、128 天,用土钻在在小区首、中、末端 3 个点取土,深度至 20 cm,充分混匀后,将新鲜土样于 -20°C 冰箱中保存并及时测定土壤硝化细菌和反硝化细菌数量。

硝化细菌和反硝化细菌数量,采用最大或然数计数法(MPN)测定,利用硝化和反硝化细菌培养基,均在 30°C 条件下培养 14 d。其中硝化细菌的培养基成分有: NaH_2PO_4 0.25 g、 K_2HPO_4 0.75 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g、 $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g、 Na_2CO_3 1.0 g 和 NaNO_3 1.0 g;反硝化细菌的培养基成分有:柠檬酸钠 5 g、 KH_2PO_4 1 g、 K_2HPO_4 1 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g。

土壤硝态氮含量,称取 5 g 风干土,用 2 mol/L KCl 溶液 50 mL 浸提,振荡 30 min,过滤后用紫外分光光度计(EV300PC 型,英国)测定浸提液中 NO_3^- 含量。

1.4 数据处理分析

用 OriginPro 8.5 绘图;采用 SPSS Statistics 22.0 数据处理软件对试验数据进行显著性分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式下土壤 N₂O 排放的变化规律

如图 1a 所示,不同加气灌溉及灌水量处理下土壤 N₂O 排放通量表现出明显的变化规律。25 d 前,土壤 N₂O 排放通量呈下降的趋势;之后,N₂O 气体维持在相对较低且稳定的排放水平。处理间对比显示,番茄生育期绝大多数时间内,不同灌水定额加气

处理的土壤 N₂O 排放通量高于对应不加气处理;且高灌水处理土壤 N₂O 排放通量高于低灌水处理。AI0.6、CK0.6、AI0.8、CK0.8、AI1.0 和 CK1.0 处理土壤 N₂O 排放通量分别在 7.25 ~ 21.72 μg/(m²·h)、8.01 ~ 20.89 μg/(m²·h)、7.51 ~ 20.62 μg/(m²·h)、7.55 ~ 21.99 μg/(m²·h)、7.86 ~ 23.10 μg/(m²·h) 和 6.88 ~ 20.24 μg/(m²·h) 之间变化。

各处理土壤 N₂O 累积排放量在番茄整个生育期内不断增加(图 1b),说明土壤作为 N₂O 气体排放源,在不断地释放气体。0.6W、0.8W 和 1.0W 3 个灌水定额下,加气较不加气处理分别增加了 2.7%、1.5% 和 10.1% 的土壤 N₂O 累积排放量,平均增加 4.7%。此外,CK0.6、CK0.8 和 CK1.0 处理土壤 N₂O 排放量分别为 0.315、0.321、0.324 kg/hm²。即随着灌水量增加,土壤 N₂O 累积排放量在增加,平均增幅 1.9%。方差分析表明,加气或灌水单因素对土壤 N₂O 排放产生影响,但不显著(加气:P =

0.067;灌水:P = 0.156);且加气和灌水的交互作用对土壤 N₂O 排放影响也未达到显著水平(P = 0.820,表 2)。

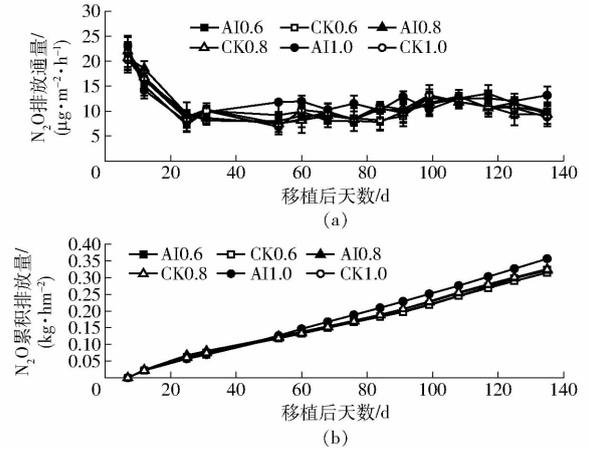


图 1 不同灌溉处理土壤 N₂O 排放通量和土壤 N₂O 累积排放量的变化规律

Fig. 1 Changing patterns of soil N₂O fluxes and cumulative N₂O emissions under different irrigation modes

表 2 番茄全生育期土壤 N₂O 累积排放量以及土壤充水孔隙率、温度、硝化细菌数量、反硝化细菌数量和硝态氮含量均值

Tab. 2 Cumulative N₂O emissions and mean values of WFPS, soil temperature, nitrifying bacteria, denitrifying bacteria and nitrate content throughout whole growth period of tomato

处理	N ₂ O 累积排放量/ (kg·hm ⁻²)	土壤充水孔 隙率/%	土壤温度/ ℃	硝化细菌数量/ (个·g ⁻¹)	反硝化细菌数量/ (个·g ⁻¹)	硝态氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)
AI0.6	0.323 ^a	49.9 ^a	17.17 ^a	2.857 × 10 ^{3a}	8.401 × 10 ^{2b}	126.766 ^a
CK0.6	0.315 ^a	48.8 ^a	17.69 ^a	2.791 × 10 ^{3a}	9.556 × 10 ^{2ab}	125.664 ^a
AI0.8	0.326 ^a	50.1 ^a	17.26 ^a	2.884 × 10 ^{3a}	9.819 × 10 ^{2ab}	127.453 ^a
CK0.8	0.321 ^a	49.5 ^a	17.85 ^a	2.851 × 10 ^{3a}	1.0277 × 10 ^{3ab}	126.184 ^a
AI1.0	0.357 ^a	50.1 ^a	17.31 ^a	3.073 × 10 ^{3a}	1.0025 × 10 ^{3ab}	127.831 ^a
CK1.0	0.324 ^a	49.6 ^a	18.00 ^a	2.990 × 10 ^{3a}	1.1087 × 10 ^{3a}	126.678 ^a
加气	0.067	0.808	0.051	0.714	0.264	0.198
P 灌水	0.156	0.170	0.819	0.607	0.159	0.991
加气 + 灌水	0.820	0.983	0.693	0.961	0.959	0.902

注:同一列数值后不同字母表示处理间差异显著(P < 0.05)。

2.2 影响土壤 N₂O 排放的环境因子

2.2.1 土壤水分和温度

随着时间推移,由于土壤蒸发及番茄生长消耗,各处理 WFPS 总体呈现逐渐降低的趋势;且处理间的差异不明显(P > 0.05,图 2a)。AI0.6、CK0.6、AI0.8、CK0.8、AI1.0 和 CK1.0 处理 WFPS 分别在 40.1% ~ 62.4%、39.7% ~ 64.4%、42.1% ~ 60.7%、42.0% ~ 64.6%、40.6% ~ 61.8% 和 41.2% ~ 62.3% 之间变化,平均 WFPS 分别为 49.9%、48.8%、50.1%、49.5%、50.1% 和 49.6%。此外,受大气温度和土壤水分的影响^[24],随着番茄移植后天数增加,不同灌溉处理的土壤温度大体呈现下降的趋势(图 2b)。各处理土壤温度分别在 7.27 ~ 30.2℃、8.47 ~

30.5℃、8.0 ~ 30.5℃、9.0 ~ 30.3℃、7.5 ~ 29.3℃ 和 9.0 ~ 30.0℃ 范围变化,平均温度分别为 17.2、17.7、17.3、17.8、17.3、18.0℃。相关性分析表明(表 3),不同灌溉处理土壤水分与土壤温度呈极显著正相关关系(P = 0.000);土壤 N₂O 排放通量与土壤水分和土壤温度也均呈极显著正相关关系(P < 0.01)。

2.2.2 不同灌溉方式下土壤硝化细菌数量变化规律

由图 3 可知,不同加气和灌水量在番茄不同生育期对土壤硝化细菌数量影响不同。AI0.6、CK0.6、AI0.8、CK0.8、AI1.0 和 CK1.0 处理土壤硝化细菌数量分别在 2.185 × 10³ ~ 3.910 × 10³ 个/g、2.159 × 10³ ~ 3.377 × 10³ 个/g、2.290 × 10³ ~ 3.335 ×

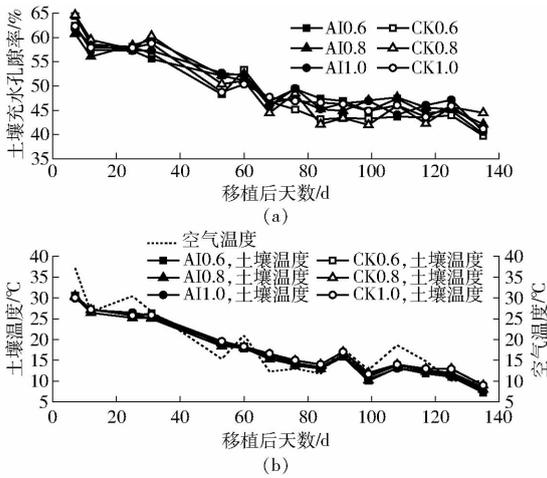


图 2 不同灌溉处理 0~20 cm 土壤充水孔隙率、5 cm 土壤温度与距离地面 1.5 m 高处空气温度的变化规律
Fig.2 Changing patterns of WFPS in 0~20 cm depth, soil temperature at a depth of 5 cm and air temperature in distance of 1.5 m high from ground under different irrigation modes

表 3 土壤 N₂O 排放通量、WFPS、温度、硝化细菌数量、反硝化细菌数量和硝态氮含量的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient among soil N₂O fluxes, WFPS, soil temperature, nitrifying bacteria, denitrifying bacteria and nitrate content

处理	因子	N ₂ O 排放通量	WFPS	土壤温度	硝化细菌数量	反硝化细菌数量	硝态氮含量
加气	N ₂ O 排放通量	1	0.418 **	0.391 **	-0.405	-0.906 **	0.004
	WFPS		1	0.960 **	0.276	0.502 *	-0.592 **
	土壤温度			1	0.281	0.483 *	-0.564 **
	硝化细菌数量				1	0.348	-0.106
	反硝化细菌数量					1	-0.547 *
	硝态氮含量						1
不加气	N ₂ O 排放通量	1	0.530 **	0.499 **	-0.249	-0.805 **	0.016
	WFPS		1	0.960 **	0.204	0.414	-0.409 *
	土壤温度			1	0.161	0.503 *	-0.450 *
	硝化细菌数量				1	0.063	-0.128
	反硝化细菌数量					1	-0.290
	硝态氮含量						1

注: * 表示相关性达到 $P < 0.05$, ** 表示相关性达到 $P < 0.01$ 。

AI0.6、CK0.6、AI0.8、CK0.8、AI1.0 和 CK1.0 处理土壤反硝化细菌数量分别在 $4.67 \times 10^2 \sim 2.323 \times 10^3$ 个/g、 $3.32 \times 10^2 \sim 2.10 \times 10^3$ 个/g、 $4.03 \times 10^2 \sim$

10^3 个/g、 $1.414 \times 10^3 \sim 3.715 \times 10^3$ 个/g、 $2.380 \times 10^3 \sim 3.840 \times 10^3$ 个/g 和 $2.207 \times 10^3 \sim 3.850 \times 10^3$ 个/g 之间变化。对比番茄整个生育期土壤硝化细菌数量均值可以发现(表 2),不同灌水定额的加气处理较不加气处理增加了土壤硝化细菌数量,0.6W、0.8W 和 1.0W 3 个灌水定额分别增加了 2.4%、1.1% 和 2.8%,增幅均未达到显著水平($P > 0.05$)。此外,番茄整个生育期土壤硝化细菌数量均值随着灌水量增加呈现逐渐增加的趋势,由小到大为 CK0.6、CK0.8、CK1.0。相关性分析可知(表 3),土壤 N₂O 排放通量与硝化细菌数量呈负相关关系,但相关性不显著($P > 0.05$)。

2.2.3 不同灌溉方式下土壤反硝化细菌数量变化规律

不同灌溉处理土壤反硝化细菌数量在番茄整个生育期内总体呈现先升高后下降的趋势(图 4)。

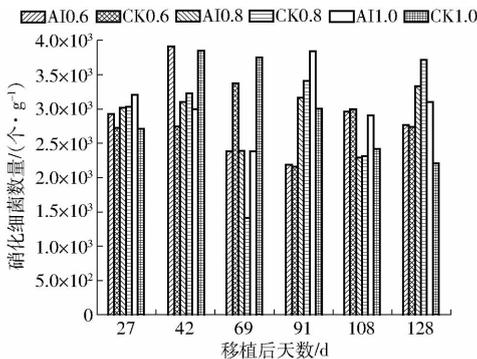


图 3 不同灌溉处理土壤硝化细菌数量变化规律
Fig.3 Changing pattern of nitrifying bacteria under different irrigation modes

2.295×10^3 个/g、 $4.28 \times 10^2 \sim 1.615 \times 10^3$ 个/g、 $5.31 \times 10^2 \sim 1.740 \times 10^3$ 个/g 和 $7.27 \times 10^2 \sim 1.418 \times 10^3$ 个/g 之间变化。对比番茄整个生育期土壤反硝

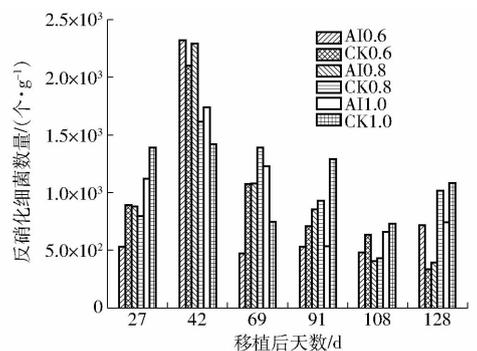


图 4 不同灌溉处理土壤反硝化细菌数量变化规律
Fig.4 Changing pattern of denitrifying bacteria under different irrigation modes

化细菌数量均值可以发现(表2),不同灌水定额的加气处理较不加气处理减小了土壤反硝化细菌数量,0.6W、0.8W和1.0W 3个灌水定额分别减小了13.7%、4.7%和10.6%,降幅均未达到显著水平($P > 0.05$)。此外,番茄整个生育期土壤反硝化细菌数量均值随着灌水量增加呈现增加的趋势,由小到大为CK0.6、CK0.8、CK1.0。相关性分析得出(表3),土壤 N_2O 排放通量与土壤反硝化细菌数量呈极显著负相关关系($P < 0.01$);反硝化细菌数量与土壤温度呈显著正相关关系($P < 0.05$),与WFPS也呈正相关关系,且加气条件下相关性显著($P < 0.05$)。

2.2.4 不同灌溉方式下土壤硝态氮含量变化规律

不同灌溉处理0~20 cm深度层土壤硝态氮含量在番茄整个生育期内呈波动性变化,且保持在较高水平;加气和灌水处理对不同时期土壤硝态氮含量影响不同(图5)。由表2可知,不同灌水定额的加气处理较不加气处理增加了番茄整个生育期的土壤硝态氮含量,但不明显($P > 0.05$);且随着灌水量增加,土壤硝态氮含量表现为增加的趋势,由小到大为CK0.6、CK0.8、CK1.0。方差分析表明,加气和灌水的交互作用对土壤硝态氮含量影响不明显($P > 0.05$)。此外,相关分析可知(表3),土壤硝态氮含量与WFPS和土壤温度呈显著负相关关系($P < 0.05$);土壤 N_2O 排放通量与土壤硝态氮含量呈正相关关系,但相关性不显著($P > 0.05$)。

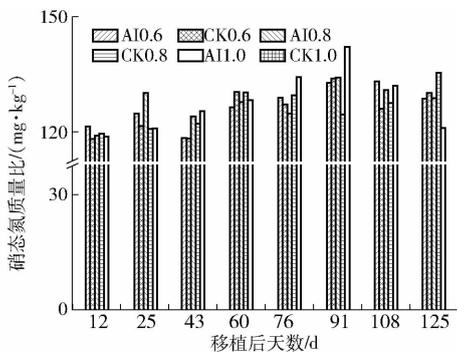


图5 不同灌溉处理土壤硝态氮含量变化规律

Fig.5 Changing pattern of nitrate content under different irrigation modes

3 讨论

3.1 加气灌溉及不同灌水量对土壤 N_2O 排放的影响

番茄生育前期,不同处理土壤 N_2O 排放通量呈下降的趋势,25 d后 N_2O 气体维持在较低且稳定的排放水平(图1a)。该现象在前人研究中也有出现^[25-26],如徐钰等^[25]和ZHANG等^[26]指出设施菜地 N_2O 排放呈“脉冲式”变化规律,峰值出现在施肥并灌溉后的一段时间内。导致这种现象的原因有2

点:①番茄生育前期供 N_2O 气体产生的基质较多,而植物对氮素吸收量小,大部分氮源被微生物利用,加之缓苗期大量灌水造成土壤湿润,利于气体排放。②番茄生育后期植株生长对氮素吸收量增大,土壤微生物可利用氮源减小^[25],造成气体排放逐渐下降并维持在较低排放水平。

加气灌溉通过向作物根区输送 O_2 ,已被证实能改善土壤通气性^[5-7],势必改变了硝化和反硝化反应条件,进而影响土壤 N_2O 产生和排放。本研究中,不同灌水定额的加气处理均较不加气处理增加了土壤 N_2O 排放(图1、表2),这与先前研究的结论一致^[9-10]。产生这种现象的可能原因是,由加气灌溉引起的土壤 O_2 含量增加^[7],抑制 N_2O 向 N_2 转化^[9];此外,PAN等^[16]指出间歇性曝气将使硝化和反硝化反应同时发生。以上皆证明了加气促进土壤 N_2O 排放。

灌水对土壤通气性和氮素转化产生影响,进而影响土壤 N_2O 产生和排放^[27-28]。本试验中,土壤 N_2O 排放量随灌水量增加呈现逐渐增加的趋势(表2),这与不少研究学者的结论一致^[29-30]。例如,TRUJILLO-TAPIA等^[29]通过室内试验发现100%田间持水率(Water holding capacity, WHC)处理的土壤 N_2O 排放至少是40% WHC处理的40倍;PONCE-MENDOZA等^[30]指出高灌水处理(100% WHC)土壤 N_2O 排放量是低灌水处理(40% WHC)的32倍。其主要由于土壤含水率增加将引起硝化细菌脱氮和反硝化作用^[31],进而产生较高的 N_2O 气体排放。

3.2 加气灌溉及不同灌水量对土壤硝化和反硝化细菌的影响

曝气不仅影响硝化细菌的代时,还将影响微生物的生长繁殖速度^[32],进而对硝化细菌数量产生影响。土壤中 O_2 含量的改变直接影响反硝化酶的合成及其活动^[33-34],从而对反硝化作用产生影响。本研究发现,加气总体增加了土壤硝化细菌数量,但减小了反硝化细菌数量(表2),这与一些研究结果相似。比如,FAN等^[15]和PAN等^[16]研究发现 O_2 含量增加使得硝化细菌活性增加。但PAN等^[16]指出间歇曝气增加了反硝化细菌活性,这与本文结果不同。产生差异的可能原因是本试验是在田间进行,由于土壤本身性质,由动物引起的土壤差异不足以引起微生物活性产生明显的变化^[35],这异于地下水入渗系统^[16]。加气灌溉增加土壤硝化细菌数量,这可能由于硝化细菌的碳源是 CO_2 ^[32],而加气灌溉已被证实能增加土壤 CO_2 排放^[5,22]。

多数研究认为,在田间持水率的 50% ~ 60% 时,土壤中的硝化作用最为旺盛^[13];当土壤含水率为田间持水率的 80% 或 40% 时均会对硝化反应产生抑制作用^[12]。张光亚等^[36]研究发现,灌水处理硝化细菌数量是未灌水处理的 22.6%,反硝化细菌数量却是未灌水处理的 5.2 倍。本试验中,番茄全生育期土壤硝化细菌和反硝化细菌数量均值均随着灌水量增加呈现逐渐增加的趋势(表 2)。而贾正茂等^[37]指出,随着灌水量的增加,土壤总硝化速率呈先减小后增加的趋势;反硝化速率呈现逐渐增加的趋势。韩冰等^[38]指出设施土壤反硝化细菌丰度随灌水量增加呈现先减小后增加的趋势,由小到大为滴灌、渗灌、沟灌。白保勋等^[18]得出土壤硝化细菌和反硝化细菌数量均随着灌水量增加呈现先增加后减小的趋势。产生差异的可能原因是由于作物种类、种植环境及灌水方式等不同引起的。

3.3 土壤 N₂O 排放对 WFPS、温度、硝化/反硝化细菌数量和 NO₃⁻ 的响应

土壤中水分的分布影响溶质的迁移,影响土壤无机氮浓度的分布及其对微生物的有效性,从而对土壤 N₂O 气体产生影响^[39]。温度不仅影响土壤微生物的活性和生化反应速率,还影响着调节土壤中 N₂O 传输速率的物理化学参数。本试验中,不同处理土壤 N₂O 排放通量与 WFPS 和土壤温度均呈极显著正相关关系($P < 0.01$, 表 3),这与一些研究学者的结论一致^[26, 38, 40-42]。例如,ZHANG 等^[26]指出菜地土壤 N₂O 排放通量与 WFPS($R = 0.180$)和温度($R = 0.289$)呈显著正相关关系。韩冰等^[38]得出设施番茄地土壤 N₂O 排放与土壤湿度呈极显著正相关关系。王艳丽等^[40]指出黄瓜生长季中不同处理土壤 N₂O 排放通量与 WFPS 之间呈显著正相关,芹菜生长季中不同处理土壤 N₂O 排放通量与土壤 5 cm 温度呈显著正相关,且均可以用对数方程进行拟合。WESLIEN 等^[42]指出胡萝卜种植系统中土壤 N₂O 排放通量与 WFPS 呈显著正相关关系($R =$

0.50)。可见,不同管理措施下土壤水分和土壤温度是影响 N₂O 排放的主要因素。

土壤 N₂O 排放通量与硝化和反硝化细菌数量均呈负相关关系(表 3)。而 XU 等^[43]得出菜地土壤 N₂O 排放通量与氨氧化细菌(AOB)、反硝化细菌 *nirK* 和 *nirS* 丰度呈正相关,与反硝化细菌 *nosZ* 丰度呈显著负相关关系。韩冰等^[38]指出设施番茄地土壤 N₂O 排放与反硝化细菌 *nosZ* 丰度呈极显著正相关($P < 0.01$)。产生差异的可能原因是试验处理及种植环境等不同所致。

相关分析表明,土壤硝化细菌和反硝化细菌数量与 NO₃⁻ 之间均呈负相关关系(表 3)。而徐莹莹等^[44]指出反硝化细菌数量与 NH₄⁺ 呈负相关关系,与 NO₃⁻ 呈显著正相关关系。顾明华等^[45]得出土壤亚硝化细菌和反硝化细菌数量均与 NO₃⁻ 之间呈负相关关系。贾正茂等^[37]指出,土壤温度和速效氮的含量是影响总硝化速率的 2 个主要因素。由此可见,不同生态系统中影响硝化细菌和反硝化细菌的环境因子不同。试验结果显示,NO₃⁻ 含量并不单纯是硝化作用和反硝化作用平衡的结果^[45],其主要影响因子有待进一步试验去挖掘。

4 结论

(1)与不加气处理相比,加气处理土壤 N₂O 排放量平均增加了 4.7%;且随着灌水量增加土壤 N₂O 排放也在增加,平均增加了 1.9%,但处理间差异性均未达到显著水平($P > 0.05$)。

(2)灌水和加气对温室番茄地土壤氮素转化细菌数量有一定影响。向土壤中通气总体增加了土壤硝化细菌数量,但减小了反硝化细菌数量($P > 0.05$)。随着灌水量增加,土壤硝化细菌和反硝化细菌数量均逐渐增加($P > 0.05$)。

(3)土壤 N₂O 排放通量与土壤硝化细菌和反硝化细菌数量均呈现负相关关系,且与土壤反硝化细菌数量达到极显著关系($P < 0.01$)。

参 考 文 献

- 1 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 and New York: Cambridge University Press, 2013.
- 2 PAUL J W, BEAUCHAMP E G, ZHANG X. Nitrous and nitric oxide emissions during nitrification and denitrification from manure-amended soil in the laboratory[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1993, 73(4): 539-553.
- 3 SKIBA U, SMITH K A. Nitrification and denitrification as sources of nitric oxide and nitrous oxide in a sandy loam soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(11): 1527-1536.
- 4 ISHII S, SONG Y, RATHNAYAKE L, et al. Identification of key nitrous oxide production pathways in aerobic partial nitrifying granules[J]. Environmental Microbiology, 2014, 16(10): 3168-3180.
- 5 CHEN X, DHUNGEL J, BHATTARAI S P, et al. Impact of oxygation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species[J]. Journal of Plant Ecology, 2010, 4(4): 236-248.
- 6 BHATTARAI S P, PENDERGAST L, MIDMORE D J. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy

- clay and saline soils[J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 108(3): 278–288.
- 7 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等. 加气灌溉对番茄植株生长、产量和果实品质的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 199–211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170823&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.023.
- ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Impacts of oxygation on plant growth, yield and fruit quality of tomato[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 199–211. (in Chinese)
- 8 李元,牛文全,张明智,等. 加气灌溉对大棚甜瓜土壤酶活性与微生物数量的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 121–129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150818&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.018.
- LI Yuan, NIU Wenquan, ZHANG Mingzhi, et al. Effects of aeration on rhizosphere soil enzyme activities and soil microbes for muskmelon in plastic greenhouse[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 121–129. (in Chinese)
- 9 陈慧,侯会静,蔡焕杰,等. 加气灌溉温室番茄地土壤 N₂O 排放特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 111–117.
- CHEN Hui, HOU Huijing, CAI Huanjie, et al. Soil N₂O emission characteristics of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(3): 111–117. (in Chinese)
- 10 HOU H, CHEN H, CAI H, et al. CO₂ and N₂O emissions from Lou soils of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 132: 69–76.
- 11 SINHA B, ANNACHHATRE A P. Partial nitrification-operational parameters and microorganisms involved[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2007, 6(4): 285–313.
- 12 张树兰,杨学云,吕殿青,等. 温度、水分及不同氮源对土壤硝化作用的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(12): 2147–2153.
- ZHANG Shulan, YANG Xueyun, LÜ Dianqing, et al. Effect of soil moisture, temperature and different nitrogen fertilizers on nitrification[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2147–2153. (in Chinese)
- 13 范晓晖,朱兆良. 旱地土壤中的硝化-反硝化作用[J]. *土壤通报*, 2002, 33(5): 385–391.
- FAN Xiaohui, ZHU Zhaoliang. Nitrification and denitrification in upland soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(5): 385–391. (in Chinese)
- 14 牛丹,黄懿梅,倪银霞,等. 不同退耕还草方式下宁夏南部山区土壤氮素转化速率与微生物变化的耦合关系[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(10): 1586–1595.
- NIU Dan, HUANG Yimei, NI Yinxia, et al. Coupling relations of nitrogen transformation rate and microbial changes during soil mineralization under different methods of returning farmland and grassland in the mountainous area of Southern Ningxia, Northwest China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(10): 1586–1595. (in Chinese)
- 15 FAN J, ZHANG B, ZHANG J, et al. Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 141(7): 117–122.
- 16 PAN J, FEI H, SONG S, et al. Effects of intermittent aeration on pollutants removal in subsurface wastewater infiltration system[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 191: 327–331.
- 17 HE R, SHEN D S. Nitrogen removal in the bioreactor landfill system with intermittent aeration at the top of landfilled waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 136(3): 784–790.
- 18 白保勋,沈植国. 生活污水灌溉对土壤微生物区系的影响[J]. *福建林业科技*, 2014, 41(2): 42–46.
- BAI Baoxun, SHEN Zhiguo. Effect of domestic wastewater irrigation on soil microbial community[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2014, 41(2): 42–46. (in Chinese)
- 19 刘若萱,张丽梅,白刃,等. 模拟条件下土壤硝化作用及硝化微生物对不同水分梯度的响应[J]. *土壤学报*, 2015, 52(2): 415–422.
- LIU Ruoxuan, ZHANG Limei, BAI Ren, et al. Response of nitrification and nitrifier to change in soil moisture content under simulated conditions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 415–422. (in Chinese)
- 20 李向文,颜建明,吕剑,等. 灌水下限对日光温室番茄生长及生理指标的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2012, 47(5): 69–74.
- LI Xiangwen, XIE Jianming, LÜ Jian, et al. Effects of different irrigation lower limit on growth and physiological indexes of tomato in greenhouse[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2012, 47(5): 69–74. (in Chinese)
- 21 赵伟霞,蔡焕杰,单志杰,等. 无压灌溉日光温室番茄作物-皿系数研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(4): 16–21.
- ZHAO Weixia, CAI Huanjie, SHAN Zhijie, et al. Study on crop-pan coefficient of greenhouse tomato under non-pressure irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4): 16–21. (in Chinese)
- 22 陈慧,侯会静,蔡焕杰,等. 加气灌溉对番茄地土壤 CO₂ 排放的调控效应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(17): 3380–3390.
- CHEN Hui, HOU Huijing, CAI Huanjie, et al. Effects of aerated irrigation on CO₂ emissions from soils of tomato fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(17): 3380–3390. (in Chinese)
- 23 DING W, CAI Y, CAI Z, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2–3): 501–511.
- 24 郑和祥,郭克贞,郝万龙. 作物生长指标与土壤水分状况及地温关系研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 210–216.
- ZHENG Hexiang, GUO Kezhen, HAO Wanlong. Study on the relation of soil moisture and soil temperature to crop growth[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(3): 210–216. (in Chinese)
- 25 徐钰,刘兆辉,魏建林,等. 北方典型设施菜地土壤 N₂O 排放特征[J]. *山东农业科学*, 2016, 48(10): 86–91.
- XU Yu, LIU Zhaohui, WEI Jianlin, et al. Emission characteristics of soil nitrous oxide from typical greenhouse vegetable fields in North China[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(10): 86–91. (in Chinese)

- 26 ZHANG M, FAN C H, LI Q L, et al. A 2-yr field assessment of the effects of chemical and biological nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency in an intensively managed vegetable cropping system [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 201(21): 43–50.
- 27 HUANG S, PANT H K, LU J. Effects of water regimes on nitrous oxide emission from soils [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31(1): 9–15.
- 28 SCHEER C, WASSMANN R, KIENZLER K, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan; influence of nitrogen applications and irrigation practices [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 290–301.
- 29 TRUJILLO-TAPIA N, MONDRAG C C, VASQUEZ-MURRIET M S, et al. Inorganic N dynamics and N₂O production from tannery effluents irrigated soil under different water regimes and fertilizer application rates: a laboratory study [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 38(3): 279–288.
- 30 PONCE-MENDOZA A, BOECKX P, GUTIERREZ-MICELI F, et al. Influence of water regime and N availability on the emission of nitrous oxide and carbon dioxide from tropical, semi-arid soils of Chiapas, Mexico [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(1): 137–151.
- 31 WRAGE N, VELTHOF G L, VAN BEUSICHEM M L, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12): 1723–1732.
- 32 王新为, 孔庆鑫, 金敏, 等. pH 值与曝气对硝化细菌硝化作用的影响 [J]. *解放军预防医学杂志*, 2003, 21(5): 319–322.
- WANG Xinwei, KONG Qingxin, JIN Min, et al. Effect of pH and aeration on nitrification of nitrobacteria [J]. *Journal of Preventive Medicine of Chinese People's Liberation Army*, 2003, 21(5): 319–322. (in Chinese)
- 33 SEXSTONE A J, PARKIN T B, TIEDJE J M. Temporal response of soil denitrification rates to rainfall and irrigation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(1): 99–103.
- 34 梁东丽, 吴庆强, 李生秀, 等. 旱地反硝化作用和 N₂O 排放影响因子的研究 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(12): 93–98.
- LIANG Dongli, WU Qingqiang, LI Shengxiu, et al. Influential factors for denitrification and N₂O emission in dry-land soil [J]. *Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition*, 2007, 35(12): 93–98. (in Chinese)
- 35 ZHONG L, DU R, DING K, et al. Effects of grazing on N₂O production potential and abundance of nitrifying and denitrifying microbial communities in meadow-steppe grassland in northern China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69(1): 1–10.
- 36 张光亚, 陈美慈, 闵航, 等. 设施栽培土壤氧化亚氮释放及硝化、反硝化细菌数量的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 239–243.
- ZHANG Guangya, CHEN Meici, MIN Hang, et al. Research of N₂O flux from greenhouse and nitrifier and denitrifier numbers [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 239–243. (in Chinese)
- 37 贾正茂, 崔远来, 刘方平, 等. 不同水肥耦合下棉花土壤氮素转化规律 [J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2013, 46(2): 164–169.
- JIA Zhengmao, CUI Yuanlai, LIU Fangping, et al. Pattern of soil nitrogen conversion of cotton under different water and fertilizer coupling conditions [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2013, 46(2): 164–169. (in Chinese)
- 38 韩冰, 叶旭红, 张西超, 等. 不同灌溉方式设施土壤 N₂O 排放特征及其影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2016, 30(5): 310–315.
- HAN Bing, YE Xuhong, ZHANG Xichao, et al. Characteristics of soil nitrous oxide emissions and influence factors under different irrigation managements from greenhouse soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 310–315. (in Chinese)
- 39 焦燕, 黄耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素 [J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(4): 457–466.
- JIAO Yan, HUANG Yao. Influence of soil properties on N₂O emissions from farmland [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(4): 457–466. (in Chinese)
- 40 王艳丽, 李虎, 孙媛, 等. 水肥一体化条件下设施菜地的 N₂O 排放 [J]. *生态学报*, 2016, 36(7): 2005–2014.
- WANG Yanli, LI Hu, SUN Yuan, et al. N₂O emissions from a vegetable field with fertigation management and under greenhouse conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(7): 2005–2014. (in Chinese)
- 41 郭树芳, 齐玉春, 罗小玲, 等. 滴灌对干旱区春小麦田土壤 CO₂、N₂O 排放及综合增温潜势的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(4): 792–800.
- GUO Shufang, QI Yuchun, LUO Xiaoling, et al. Effects of drip irrigation on soil CO₂ and N₂O emissions and their global warming potentials of spring wheat field in arid region [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 792–800. (in Chinese)
- 42 WESLIEN P, RUTTING T, KASIMIR-KLEMEDTSSON Å, et al. Carrot cropping on organic soil is a hotspot for nitrous oxide emissions [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(2–3): 249–253.
- 43 XU X, RAN Y, LI Y, et al. Warmer and drier conditions alter the nitrifier and denitrifier communities and reduce N₂O emissions in fertilized vegetable soils [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 231: 133–142.
- 44 徐莹莹, 许修宏, 任广明, 等. 接种菌剂对牛粪堆肥反硝化细菌群落的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 570–577.
- XU Yingying, XU Xiuhong, REN Guangming, et al. Effect of microbial inoculum on denitrifying bacterial communities in cow manure compost [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 570–577. (in Chinese)
- 45 顾明华, 区惠平, 刘昔辉, 等. 不同耕作方式下稻田土壤的氮素形态及氮素转化菌特征 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1362–1368.
- GU Minghua, QU Huiping, LIU Xihui, et al. Characteristics of N forms and N-transforming bacteria in paddy soil under different tillage patterns [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(6): 1362–1368. (in Chinese)