

加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N₂O 排放的影响

杜娅丹^{1,2}, 张倩^{1,2}, 崔冰晶^{1,2}, 谷晓博¹, 牛文全^{1,2,3*}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 为揭示加气条件下不同灌溉和施氮量对设施菜地 N₂O 排放的影响, 提出有效的 N₂O 减排措施, 该研究以温室芹菜为例, 设置充分灌溉 (1.0 Ep, I1; Ep 为 2 次灌水间隔内 $\Phi 20$ cm 标准蒸发皿的累计蒸发量) 和亏缺灌溉 (0.75 Ep, I2) 2 个灌溉水平和 0 (N0)、150 (N150)、200 (N200)、250 kg/hm² (N250) 4 个施氮水平, 采用静态箱-气相色谱法对各处理土壤 N₂O 的排放进行监测, 并分析不同灌溉和氮肥水平下土壤温度、湿度、矿质氮 (NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N)、硝化细菌和反硝化细菌的变化, 以及对土壤 N₂O 排放的影响。结果表明: 充分灌水温室芹菜地 N₂O 排放显著 ($P < 0.05$) 高于亏缺灌溉; 施氮显著 ($P < 0.05$) 增加了土壤 N₂O 排放, N150、N200 和 N250 处理的 N₂O 累积排放量分别是 N0 处理的 2.30、4.14 和 7.15 倍。设施芹菜地 N₂O 排放与土壤温度、湿度和硝态氮含量呈指数相关关系 ($P < 0.01$), 与硝化细菌和反硝化细菌数量呈线性相关关系 ($P < 0.01$), 而与土壤铵态氮没有显著相关关系。灌水和施氮提高芹菜产量的同时, 显著增强了土壤 N₂O 排放。综合考虑产量和温室效应, 施氮量 150 kg/hm²、亏缺灌溉为较佳的管理模式。该研究为设施菜地 N₂O 减排及确定合理的水氮投入量提供参考。

关键词: 土壤; 温室气体; 排放控制; N₂O 排放; 灌水; 氮

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.16.017

中图分类号: S275

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-16-0127-08

杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 谷晓博, 牛文全. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.16.017 <http://www.tcsae.org>

Du Yadan, Zhang Qian, Cui Bingjing, Gu Xiaobo, Niu Wenquan. 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 (Transactions of the CSAE), 2017, 33(16): 127-134. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.16.017 <http://www.tcsae.org>

0 引言

全球变暖和臭氧层破坏是当今两大备受关注的环境问题, 氧化亚氮 (N₂O) 是破坏臭氧层的最重要因子之一, N₂O 潜在增温作用约是 CO₂ 的 298 倍^[1]。据报道, 大气中的 N₂O 浓度正以每年 0.2%~0.3% 的速度增加^[2], 农田生态系统是全球 N₂O 排放的一个重要来源^[3], 全球农业每年 N₂O 的排放量可达到 3.8×10⁶~6.8×10⁶ t, 占全球 N₂O 排放总量的 25%~39%^[4]。中国年化肥消耗量从 1980 年的 9.34×10⁶ t 增加到 2009 年的 22.97×10⁶ t, 超过了世界年化肥施用量的 1/5。此外, 中国的蔬菜种植面积从 1995 年的 9.5×10⁶ hm² 增加到 2010 年的 18.4×10⁶ hm², 且蔬菜种植氮肥使用量约为 628.05 kg/hm², 远高于粮食作物的氮肥使用量 314.4 kg/hm²。菜地 N₂O 排放是农田生态系统的重要排放源, 设施蔬菜约占中国总蔬菜面积的 27%^[5]。设施蔬菜一般施肥量大和灌溉频繁, 而灌溉和施肥是影响土壤 N₂O 排放的重要因素^[6], 显著影响土壤 N₂O 的排

放量^[7], 设施蔬菜施氮量和灌溉量分别是大田作物的 4.5~10 倍^[8]和 4~7 倍^[9], 由此造成的设施蔬菜地 N₂O 的排放量是大田作物的 1.5~3.5 倍^[10]。因此, 研究设施菜地 N₂O 排放量的减控管理措施对全球温室气体减排具有重要意义。

研究表明, 土壤 N₂O 排放具有很大的变异性^[11]。影响 N₂O 排放的因素可分为两组: 环境因素 (气温、降雨、光照和土壤固有属性等) 和人为因素 (种植作物、农药、施肥、灌溉和耕作等)^[12-13]。其中施肥和灌溉是影响土壤 N₂O 排放最主要的调控因子, 两者通过对土壤湿度、温度、土壤矿质氮含量和微生物群落等的影响进而改变土壤 N₂O 排放。李银坤等^[14]和张婧等^[15]研究发现施氮增加土壤硝态氮含量进而促进土壤 N₂O 急剧增加, 减少氮肥投入和添加硝化抑制剂是减少设施菜地 N₂O 排放的有效措施。土壤水分状况是影响植株对土壤中氮肥的吸收利用的重要因素之一, 这就使得土壤中水分状况和氮素转化过程同时影响土壤中 N₂O 的生成量。杨岩等^[16]和王孟雪等^[17]通过对不同灌水量和灌水方式的试验得出降低灌溉水量、采取控制灌溉和浅显灌水方式可显著降低土壤 N₂O 排放量。土壤 N₂O 排放主要是在硝化和反硝化作用下产生的, 受土壤通气性影响显著^[18]。加气灌溉提高了土壤氧气含量, 势必改变土壤 N₂O 的产生和排放。目前相关研究多集中于加气灌溉能提高作物产量、改善品

收稿日期: 2017-05-13 修订日期: 2017-08-07

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFC0400202); 国家自然科学基金项目 (51679205)

作者简介: 杜娅丹, 女, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究,

Email: dyd123027@163.com

*通信作者: 牛文全, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用与节水灌溉技术研究, Email: nqwq@nwafu.edu.cn

质与提高水分利用效率^[19],但加气灌溉条件下水氮互作对设施蔬菜温室气体排放的影响还未见报道,尤其土壤环境变化对 N_2O 排放的影响缺乏系统的分析。

芹菜(*Apium graveolens* L.)为伞形科植物,含有丰富的营养成分,是世界各地普遍种植的主要蔬菜之一^[20]。本文以设施芹菜为对象,研究加气灌溉水氮互作对土壤特性(温度、湿度、硝态氮和铵态氮)和有关土壤氮转换微生物(硝化细菌和反硝化细菌)的影响,并对土壤环境变化与 N_2O 排放间的关系进行分析,进而为设施菜地 N_2O 减排及合理的水氮投入提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2016年10月1日至12月15日在陕西杨凌温室大棚内进行,大棚长108 m,宽8 m,东西走向。试验地点位于 $34^{\circ}17'N$, $108^{\circ}02'E$,海拔高度521 m,年均日照时数2163.8 h,无霜期210 d,属半湿润易旱区。温室大棚内土壤为壤土,土壤容重 1.35 g/cm^3 ,田间持水率为28.17%(质量含水率),pH值7.82,土壤孔隙度49.38%。土壤颗粒组成:砂砾(0.02~2 mm)质量分数25.4%,粉粒(0.002~0.02 mm)质量分数44.1%,黏粒(<0.002 mm)质量分数30.5%,基本养分状况为:有机质16.48 g/kg、全氮0.96 g/kg、全磷0.36 g/kg、全钾10.4 g/kg,土壤肥力较均一。

温室芹菜生育期内,日均太阳辐射和光合有效辐射的变化趋势基本相同,而日均气温和相对湿度的变化趋势基本相反(图1),且日均太阳辐射、光合有效辐射、气温和相对湿度分别在 $0.6\sim 143.5\text{ W/m}^2$ 、 $1.2\sim 292.1\text{ }\mu\text{E}$ 、 $8.5\sim 24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和73.5%~100%之间波动。

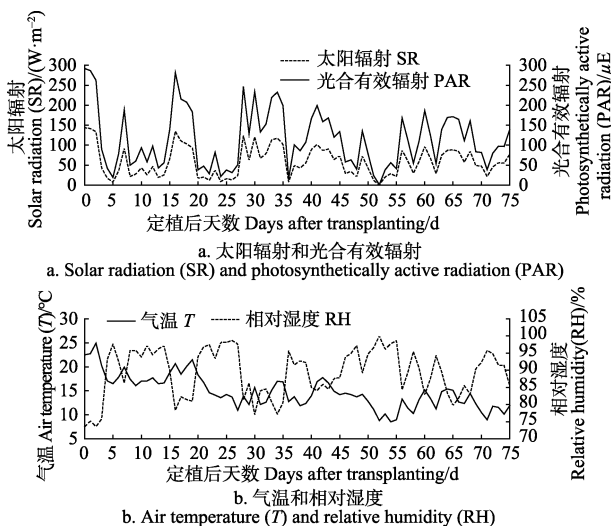


图1 温室芹菜生育期内的日均太阳辐射、光合有效辐射、气温和相对湿度

Fig.1 Daily mean solar radiation (SR), photosynthetically active radiation (PAR), air temperature (T) and relative humidity (RH) during growing season of greenhouse celery

1.2 试验材料与设计

供试芹菜品种为“皇后”,采用穴盘育苗,当幼苗高10 cm左右,有4~5片叶时进行定植;供试氮、磷和钾

肥分别为尿素(N质量分数 $\geq 46\%$)、生物磷肥(P_2O_5 质量分数 $\geq 16\%$)和农业用硫酸钾(K_2O 质量分数 $\geq 51\%$)。试验设灌水和施氮2个因素,灌水量以2次灌水间隔内 $\Phi 20\text{ cm}$ 标准蒸发皿的累计蒸发量 E_p 为基数,设充分灌溉($1.0E_p$, I1)和亏缺灌溉($0.75E_p$, I2)2个灌溉水平;施氮量设0(N0)、150(N150)、200(N200)和250(N250) kg/hm^2 4个水平,试验共8个处理,均进行加气灌溉,每个处理5个重复。

每个小区长5.5 m,宽0.5 m,小区间隔0.5 m,芹菜于2016年10月1日以行距和株距均约10 cm进行定植。定植前(9月30日)在各小区正中铺设1条地下滴灌带(直径16 mm,滴头间距30 cm),埋深10 cm,并基施40%的氮肥、 150 kg/hm^2 的磷肥和 200 kg/hm^2 的钾肥,灌定植水30 mm,定植后覆上薄膜。将气泵(上海宝欧机电有限公司/3.0 HP)与干管相连进行加气,在每条支管首端均安装一个阀门,便于独立控制各小区灌水量和加气量。整个生育期每2 d加气1次,每次各小区加气量134.9 L,按气泵技术参数换算为相应的加气时间,通过时间对每个小区加气量进行控制,气泵压力设定为 0.7 MPa ^[21]。定植后,温室芹菜生育期分别于10月10日、10月23日、11月3日、11月13日、11月26日和12月7日灌水6次,并于11月3日和11月26日的2次灌水过程中将剩余的氮肥平均施入各相应施氮小区,充分灌溉和亏缺灌溉处理的总灌水量分别为64.0和48.0 mm,温室芹菜于12月15日全部收获,生育期共75 d。

1.3 测定项目与方法

采用静态箱原位采集气样,箱体用6 mm厚的聚氯乙烯制成,长、宽和高分别为30、30和55 cm,箱体外面用海绵与锡箔纸包裹,箱体顶部安装有搅拌空气的小风扇。静态箱底座在芹菜定植当天埋设于小区中央,底座上端由大约3 cm深的凹槽构成用以放置静态箱箱体,取样时注水密封。定植后每7 d左右采集一次,并于11月3日灌水追氮后连续监测3 d。每次取样分别在当天的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,每次取样40 mL,并在当天测定其浓度。去除奇异点,使样品浓度测量值随时间的线性回归系数 $R^2 \geq 0.85$ 。

采气的同时,用安插在箱体顶部的水银温度计测量箱内温度;用曲管地温计测定箱体周围20 cm土层的温度;打土钻测定0~20 cm土层的质量含水量,然后计算出土壤充水孔隙率(water filled pore space, WFPS)^[22];取0~20 cm新鲜土样,经风干后混匀过2 mm筛,称取5 g风干土样,用50 mL的氯化钾溶液(2 mol/L)浸提振荡0.5 h后过滤,用连续流动分析仪(Auto Analyzer 3 AA3, Germany, 0.001AUFS)直接测定土壤硝态氮和铵态氮含量^[23];并于第1、3、5、9和11次采气时,用土钻在箱体周围均匀取样3次,深度至20 cm,充分混匀后,用稀释培养计数法测定0~20 cm土层土壤的硝化细菌和反硝化细菌数量^[24]。参照周龙等^[25]方法计算土壤

N₂O 排放系数和单位产量 N₂O 累积排放量。在芹菜全部收获打捆后，用电子秤（精确到 g）分别测定各小区芹菜的产量。

土壤硝态氮（铵态氮）质量分数：

$$M = \frac{1000 \cdot C \cdot V}{W} \quad (1)$$

式中 M 为硝态氮（铵态氮）质量分数（mg/kg）； C 为样品测定的硝态氮（铵态氮）值（mg/L）； V 为样品提取液的体积（0.05 L）； W 为样品质量（5g）。

N₂O 排放通量^[18]为：

$$F = \rho \cdot h \cdot dc/dt \cdot 273/T \quad (2)$$

式中 F 为 N₂O 排放通量（ $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ）； ρ 为标准状态下 N₂O 气体密度（ kg/m^3 ）； h 为箱体高度（m）； dc/dt 为气体浓度变化率（ $\mu\text{L}/(\text{L} \cdot \text{h})$ ）； T 为箱内温度（K）。

土壤孔隙含水率（water-filled pore spaces, WFPS, %）

$$\text{WFPS} = W_1 \cdot \frac{r}{1 - r/2.65} \quad (3)$$

式中 W_1 为土壤质量含水率，%； r 为土壤容重， g/cm^3 ；2.65 为土壤密度， g/cm^3 。

氮素以 N₂O 排放量占施肥量的比例计为 N₂O 排放系数。

$$f = \frac{b - b_0}{N} \times 100\% \quad (4)$$

式中 f 为 N₂O 排放系数； b 为生育期施氮处理 N₂O 累积排放量， kg/hm^2 ； b_0 为不施氮处理生育期 N₂O 累积排放量， kg/hm^2 ； N 为小区施肥量， kg/hm^2 。

单产 N₂O 累积排放量（yield-scaled N₂O intensity, Y-S_{N2O}）：

$$Y-S_{N_2O} = \frac{F}{Y} \quad (5)$$

式中 $Y-S_{N_2O}$ 为单产 N₂O 累积排放量， g/kg ， Y 为作物产量， t/hm^2 。

氮肥利用效率（nitrogen use efficiency, NUE）：

$$\text{NUE} = \frac{Y}{N} \quad (6)$$

式中 N 为不同处理小区施氮量， kg/hm^2 。

1.4 数据处理与分析

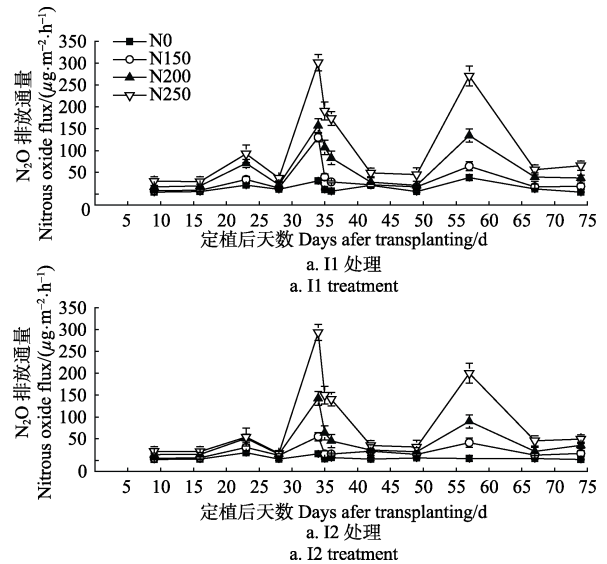
使用 Excel 2010 软件处理试验数据；PASW Statistics 18.0 软件进行方差分析和相关性分析，多重比较采用 Duncan 新复极差法，显著性水平为 $\alpha=0.05$ ；OriginPro 8.5 软件作图并求各处理 N₂O 的累积排放量。

2 结果与分析

2.1 水氮互作对芹菜产量和 N₂O 排放的影响

整个芹菜生长季，加气灌溉不同水氮处理下温室芹菜地 N₂O 排放通量呈波动变化，除定植后 34 和 57 d 外，其他时期的 N₂O 排放通量均维持在较低水平（图 2）。相同施氮水平下，充分灌溉处理（I1）下土壤 N₂O 排放通量均高于亏缺灌溉处理（I2），I1 处理土壤 N₂O 排放通量的平均值比 I2 处理高 33.7%。相同灌水水平下，高施氮

量处理下土壤 N₂O 排放通量均高于低施氮量处理，且在定植后 34 d 和 57 d 时差异性显著（ $P<0.05$ ），其他时期差异性不显著（ $P>0.05$ ）。N250 处理土壤 N₂O 排放通量的平均值分别是 N200、N150 和 N0 处理 1.9、3.7 和 9.5 倍。定植 34 d 和 57 d 灌水且施氮后，土壤 N₂O 排放通量出现明显峰值，统计分析表明，灌水与施氮耦合对土壤 N₂O 排放通量的影响达显著水平（ $P<0.05$ ）。



注：N0、N150、N200 和 N250 分别表示加气灌溉不施氮 0、加气灌溉施氮量 150 kg/hm^2 、加气灌溉施氮量 200 kg/hm^2 、加气灌溉施氮量 250 kg/hm^2 ，下同。

Note: N0, N150, N200 and N250 meant aerated irrigation combined with N application rate (0), aerated irrigation combined with N application rate (150 kg/hm^2), aerated irrigation combined with N application rate (200 kg/hm^2) and aerated irrigation combined with N application rate (250 kg/hm^2), respectively. The same as below.

图 2 加气灌溉不同水氮水平对温室芹菜地土壤 N₂O 排放通量的影响

Fig.2 N₂O emissions flux of greenhouse celery from soil applied with different water and nitrogen levels under aerated irrigation

不同氮肥处理下土壤累积 N₂O 排放量在 0.88~6.56 kg/hm^2 之间（表 1），随着施氮量的增加，累积 N₂O 排放量显著增加（ $P<0.05$ ），N150、N200 和 N250 处理的累积排放量平均值分别是 N0 处理的 2.30、4.14 和 7.15 倍，施氮显著增加了氮素以 N₂O 形式损失的比例；其次，充分灌水累积 N₂O 排放量平均值是亏缺灌水的 1.27 倍（ $P<0.01$ ），表明较高的土壤含水量促进了土壤 N₂O 的排放。N150、N200 和 N250 处理土壤 N₂O 排放系数平均值分别为 0.73%、1.36% 和 2.28%，充分灌水（I1）较亏缺灌水（I2）降低了 N₂O 排放系数。同时，随施氮量的增加，芹菜产量呈现先上升后下降，N200 处理产量平均值最大为 205.65 t/hm^2 ，且 N200 和 N250 处理间差异不显著（ $P>0.05$ ）；充分灌水（I1）较亏缺灌溉（I2）产量平均值增加了 10.29%。尽管施氮和灌水增加了芹菜产量，但单产 N₂O 排放量也显著增加，表明高水高氮水平下，生产 1 kg 芹菜将损失更多的氮素，所付出的环境代价更大。

氮肥利用效率随施氮量的增加显著下降，N150、N200

和 N250 处理平均值分别为 1.14、1.03 和 0.78；而充分灌溉和亏缺灌溉间氮肥利用效率差异不显著 ($P>0.05$)。灌水施氮提高芹菜产量的同时也导致 N_2O 排放增加，当芹菜产量达到最大时，继续施氮芹菜不再增产，但其 N_2O 排放量继续增加；相同施氮量下，与亏缺灌水 (I2) 相比，充分灌水 (I1) 产量增加了 10.29%，但其累积 N_2O 排放量平均值和单产 N_2O 累积排放量平均值也分别增加了 27.87% 和 19.22%。因此获得高产低排放不现实，需要综合考虑产量和 N_2O 排放量。从表 1 可以看出，当施氮量为 150 kg/hm^2 ，N150 处理排放系数最接近 1% (IPCC 报道农田生态系统平均 N_2O 排放系数) [26]，产量较最高产量下降了 17.07%。当施氮量为 200 kg/hm^2 时，产量达到最大，但排放系数达到 1.36% (超过了 1%)。因而，该试验地兼顾产量和累积 N_2O 排放的基础上，采用节水灌溉 I2 处理，环保施氮量可在 150 kg/hm^2 的基础上有所增加，但需低于 200 kg/hm^2 。

表 1 加气灌溉下水氮互作芹菜土壤 N_2O 排放及其相关影响因素

Table 1 Effects of water and nitrogen coupling on soil N_2O emission and other important factors under aerated irrigation

处理 Treatment	累积 N_2O 排放量 Cumulative N_2O emission/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	排放 系数 Emission factor/ %	产量 Yield/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	单产 N_2O 累积排放量 Yield-scaled N_2O emission/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	氮肥利 用效率 Nitrogen use efficiency/ ($\text{t}\cdot\text{kg}^{-1}$)
I1 N0	1.31 g		138.37 g	9.67 f	
I1 N150	2.29 e	0.58 d	177.53 e	12.89 e	1.18 a
I1 N200	3.99 c	1.28 b	214.50 a	18.58 c	1.07 b
I1 N250	7.06 d	2.30 a	203.13 b	34.79 a	0.81 d
I2 N0	0.42 h		117.60 h	4.01 g	
I2 N150	1.74 f	0.88 c	163.63 f	10.71 f	1.09 b
I2 N200	3.28 d	1.43 b	196.57 c	16.78 d	0.98 c
I2 N250	6.05 b	2.25 a	188.70 d	32.18 b	0.75 e
施氮水平平均值 Mean of nitrogen levels (N)					
N0	0.88±0.08 d	—	127.98±9.2 d	6.84 ±0.02d	—
N150	2.02±0.10 c	0.73±0.06 c	170.58 ±14.5c	11.80 ±0.12c	1.14±0.06 a
N200	3.64±0.14 b	1.36±0.15 b	205.53±132 a	17.68±1.04 b	1.03±0.15 b
N250	6.56±0.22 a	2.28±0.25 a	195.92±12.1 ab	33.49±3.25a	0.78±0.05 c
灌水水平平均值 Mean of irrigation levels (I)					
I1	3.66±0.18 a	1.39 ±0.05 a	183.38±13.6 a	18.98 a	1.02±0.11a
I2	2.88±0.17 b	1.52 ±0.12 a	166.63±12.1 b	15.92 b	0.94±0.03 ab
N×I	*	ns	*	**	*

注：同一列中数值后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著；**表示极显著相关 ($P<0.01$)，*表示显著相关 ($P<0.05$)；I1 和 I2 分别表示充分灌溉 (1.0Ep) 和亏缺灌溉 (0.75Ep)，下同。

Note: Different lowercase letters following values in same column means significant difference among treatments at 0.05 level. ** represented significant correlation at 0.01 level, * represented significant correlation at 0.05 level. I1 and I2 respectively meant full irrigation (1.0Ep) and deficit irrigation (0.75Ep). The same as below.

2.2 芹菜地 N_2O 排放的影响因素

不同水氮处理土壤湿度、温度、硝化细菌、反硝化

细菌、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的动态变化如图 3 所示。土壤水分含量会影响 N_2O 产生和向大气中的扩散。从图 3a 和 3g 可以看出，土壤孔隙含水率在 46.78%~74.02% 范围内变化。由于秋冬温室芹菜种植地膜覆盖的保墒作用，以及秋冬季较低的棚温降低了土壤蒸发量，使得芹菜整个生育期内土壤含水率维持在较高水平，灌水后土壤含水率大幅上升。不同处理间土壤含水率变化趋势基本一致，但充分灌水 (I1) 的土壤水分含量峰值明显 ($P<0.05$) 高于亏缺灌溉处理 (I2)，而不同施氮处理间土壤水分含量没有显著 ($P>0.05$) 不同。整个生育期土壤温度在 12.80~21.90℃ 范围内变化，不同处理土壤温度与大气温度变化相似，且变化幅度较小。

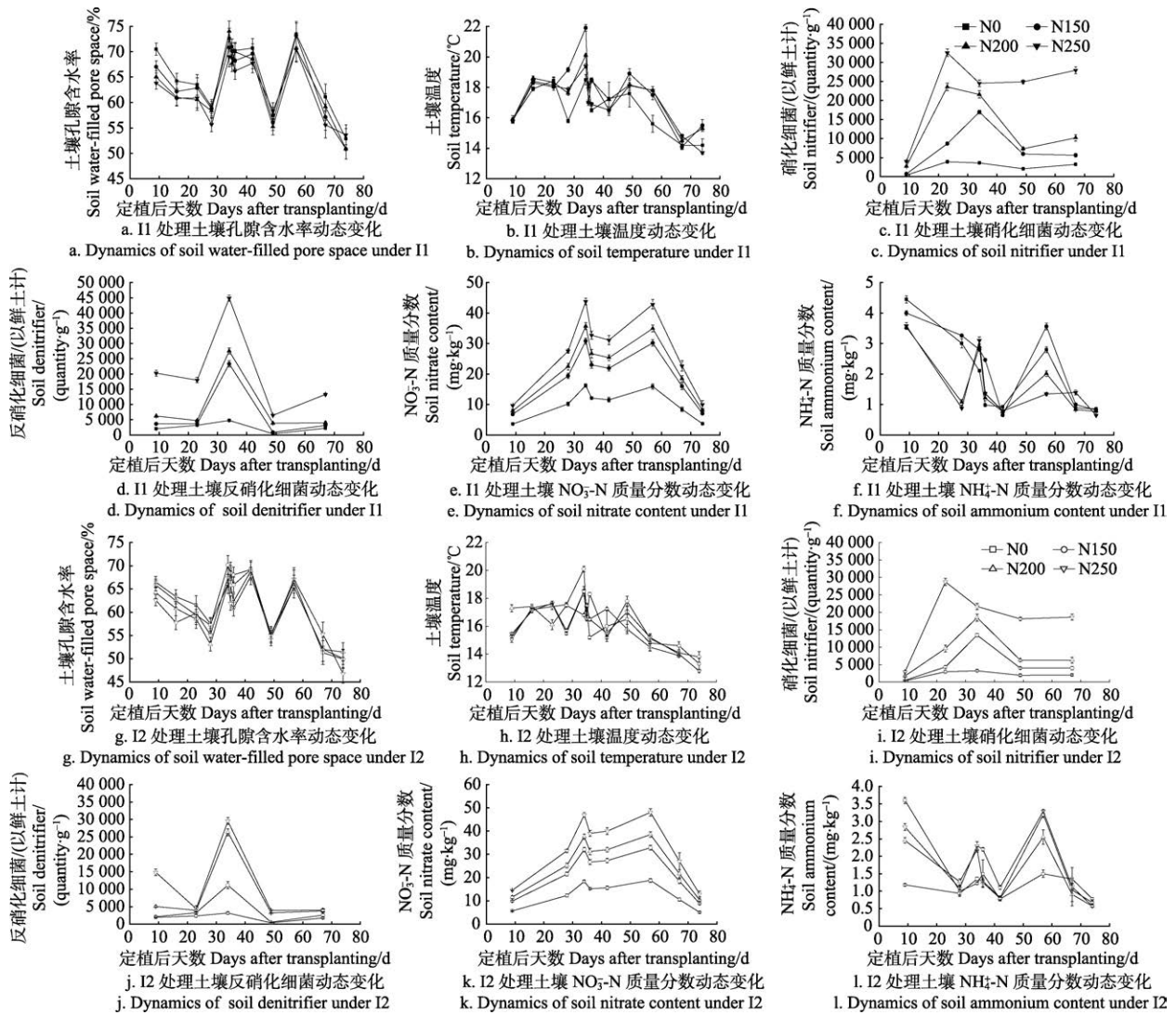
不同水分和施氮处理对温室芹菜地土壤硝化细菌和反硝化细菌的数量有显著影响。相同灌溉水平下，硝化细菌和反硝化细菌均随氮肥水平的增加而上升。相同施氮量下，充分灌溉 (I1) 土壤硝化细菌和反硝化细菌的数量显著 ($P<0.05$) 高于亏缺灌溉处理 (I2)。

整个生长季，土壤铵态氮质量分数均较低，在 0.57~4.45 mg/kg 范围内变化。除生育初期和灌水施肥后土壤铵态氮质量分数较高外，其他时期土壤铵态氮质量分数大部分都低于 1mg/kg。整个生育期土壤无机氮中硝态氮占比较大，不同处理土壤硝态氮变化趋势一致，明显受施氮时间和作物氮肥吸收的影响，施肥后土壤硝态氮质量分数明显上升，随着生育期的推移逐渐降低。N0、N150、N200 和 N250 处理土壤硝态氮质量分数平均为 11.44、20.79、24.22 和 30.01 mg/kg，表明施氮量显著增加了土壤硝态氮的含量。相同施氮量下，亏缺灌溉 (I2) 土壤硝态氮质量分数明显 ($P<0.05$) 高于充分灌水 (I1) 处理。

2.3 温室土壤 N_2O 排放量与各影响因素间的关系

由图 4 可知，土壤 N_2O 排放量与土壤温度、土壤水分含量和硝态氮质量分数均呈指数函数关系。说明土壤温度、水分含量和硝态氮质量分数较低时，土壤 N_2O 排放量缓慢增加，当以上 3 个环境因子超过某一范围时，土壤 N_2O 排放量急剧增加。相关分析发现，土壤 N_2O 排放量与土壤温度、水分和硝态氮质量分数存在极显著相关关系 ($P<0.01$)，决定系数分别达 0.13、0.20 和 0.73，说明土壤温度和水分的变化分别解释了 N_2O 排放量变化的 13% 和 20%，而土壤硝态氮质量分数的变化可以解释 N_2O 排放通量 73% 的变化。由此可见，土壤温度、土壤水分含量和硝态氮质量分数是影响日光温室土壤 N_2O 排放的重要环境因素。土壤 N_2O 排放量与铵态氮质量分数不存在显著相关关系。

硝化细菌和反硝化细菌是影响土壤 N_2O 排放的两种关键微生物。如图 4，土壤 N_2O 排放量随着土壤硝化细菌和反硝化细菌数量的增加而线性增加，相关分析发现土壤 N_2O 排放量与两者均呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)，且与反硝化细菌的相关性高于硝化细菌，决定系数分别为 0.39 和 0.81，表明硝化细菌的变化解释了土壤 N_2O 排放通量 39% 的变化，而反硝化细菌解释了 N_2O 排放通量变化的 81%。



注：实心图例表示 I1 处理，空心图例表示 I2 处理。

Note: Solid symbol represent I1 treatment, and hollow symbol represent I2 treatment.

图 3 不同水氮条件下芹菜土壤湿度、温度、硝化细菌、反硝化细菌、硝态氮和铵态氮动态变化 (0~20cm)

Fig.3 Dynamics of soil water filled pore spaces, temperature, nitrifier, denitrifier, nitrate and ammonium content during growing period of celery in 20 cm soil layer

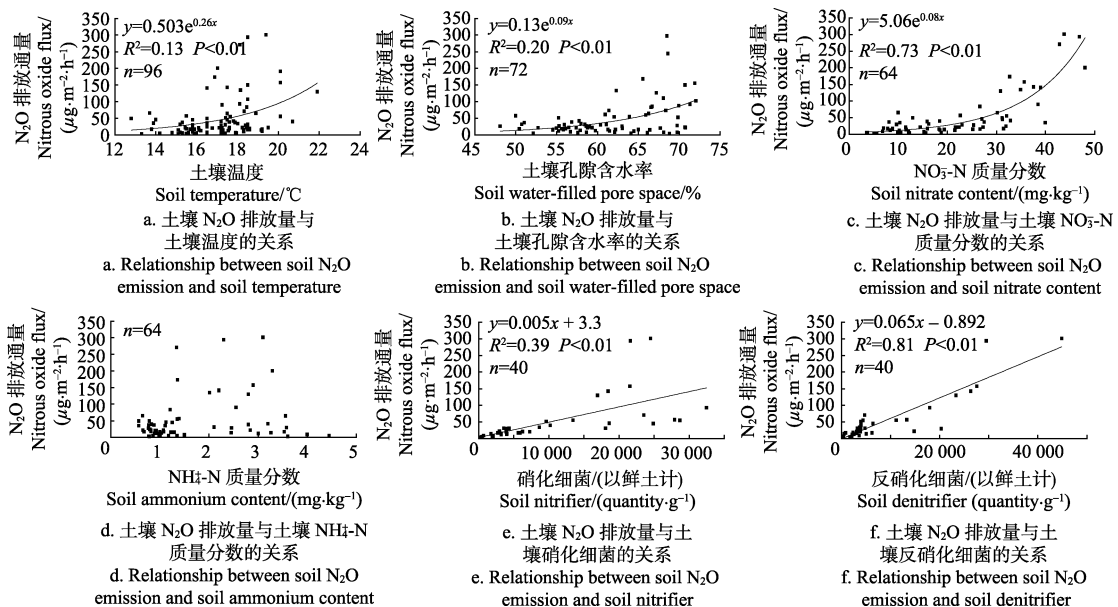


图 4 水氮耦合下土壤 N₂O 排放量与土壤温度、湿度、NO₃-N、NH₄-N、硝化细菌和反硝化细菌的关系

Fig.4 Relationship between soil N₂O emission and soil temperature, soil water-filled pore space, nitrate, ammonium, nitrifier and denitrifier

3 讨论

本研究中, 加气滴灌土壤累积 N_2O 排放量远高于常规灌水方式下土壤 N_2O 排放量^[16,25], 表明加气灌溉方式促进了设施菜地温室气体排放。加气灌溉是一种节水、节肥、高效的灌水方式, 本研究为明确加气滴灌条件下温室气体排放的分布特征, 更精确的估算加气滴灌条件下设施菜地的温室气体排放总量提供了理论依据。施肥和灌溉是影响土壤 N_2O 排放的重要影响因子, 也是最有效的调控措施^[27]。本研究中, 施肥灌溉显著增加了芹菜地土壤 N_2O 累积排放量(表 1), 可能是由于水肥两因子的耦合作用对土壤氮肥转换特性和微生物数量的影响造成的。相同施氮水平下, 充分灌水(I1)土壤 N_2O 排放高于亏缺灌水(I2), 这与陈慧等^[18]研究结果相似, 表明较高的土壤湿度形成的厌氧环境促进了土壤反硝化作用的进行, 增加了土壤 N_2O 的排放; 相同灌溉水平下, 随施氮量的增加土壤 N_2O 排放显著($P<0.05$)增加, 即 N0 处理 N_2O 排放量最低, 增加施氮量土壤 N_2O 排放加倍增加(表 1), 说明高施氮量是温室芹菜地土壤 N_2O 排放增加的重要原因^[14,17,24,28]。Wang 等^[29]在对设施菜地研究中指出, 氮肥的应用解释了 N_2O 排放量 52% 的变化。Yan 等^[30]指出氮肥投入分别解释了 2011 年和 2012 年蔬菜地土壤 N_2O 排放量变化的 78% 和 81%。本研究中施氮量解释了土壤 N_2O 排放量变化的 79%。

温室芹菜整个生育期内土壤 N_2O 平均排放通量和累积 N_2O 排放量分别为 $6.8 \sim 114.8 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $0.42 \sim 7.06 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 这些结果远高于大田试验土壤 N_2O 平均排放量^[31], 可能是由于设施菜地比大田作物具备更好的水热条件和更高的氮肥投入^[15]导致了较高的 N_2O 排放。此外, 当施氮量为 $200 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时芹菜产量达到最大, 施氮量为 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时芹菜产量虽然下降了 17.07%, 但 N_2O 累积排放量下降了 44.51%; 与亏缺灌水(I2)相比, 充分灌水(I1)产量增加了 10.29%, 但其累计 N_2O 排放量和单产 N_2O 累积排放量也增加了 27.08% 和 15.44%。综合考虑产量和 N_2O 减排的基础上, I2N150 处理是温室芹菜较优的水氮供应模式。

土壤 N_2O 排放可分为直接和间接排放, 直接排放主要产生于土壤硝化与反硝化过程, 是复杂生化反应的中间产物; 而间接排放则主要是以 NH_3 、 NO_x 形态挥发后通过大气沉降回到农田再排放和通过淋失径流再排放。全球约 70% 的 N_2O 源自土壤硝化与反硝化过程。灌水和施肥能够影响土壤的微环境和硝化-反硝化过程, 进而影响了土壤 N_2O 排放。本文研究中, 亏缺灌溉减少了土壤 N_2O 排放(图 2), 可能是由于增加了土壤孔隙度和 O_2 的扩散能力, 不利于土壤反硝化作用的进行, 或者是较低的土壤湿度抑制了土壤潜在微生物的生长^[32-33]。生育前期较低的土壤温度 ($15.09 \sim 17.36 \text{ }^\circ\text{C}$) 没有引起 N_2O 的突增, 与低温限制了土壤微生物活性有关, 不利于土壤硝化和反硝化作用的进行。土壤温度增加促进了土壤 N_2O 排放, 可能是由于增加了土壤呼吸, 由此造成的厌氧环境促进了土壤反硝化作用的进行, 或者是提高了土壤的矿化速率, 基质可利用性的提高增加了土壤 N_2O 排放^[32,34]。大量研究结果指出, 土壤 N_2O 排放与土壤温度和孔隙含水率呈指数关系^[18,35-36], 这与本文研究结果一致。

土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量分数随着施氮量的增加而显著提高

(图 3), 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量既能促进土壤的反硝化速率, 又可抑制 N_2O 还原为 N_2 , 其与土壤 N_2O 排放量呈极显著 ($P<0.01$) 指数相关关系(图 4)。表明土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量分数较低时, 土壤 N_2O 排放增加缓慢, 超过一定浓度时, 土壤 N_2O 排放量将会急剧增加^[37]。原因可能是由于过量施氮后, 降低了作物对氮素的吸收利用效率, 多余的氮素残留在土壤当中, 增加了土壤硝化和反硝化作用底物^[38-39]。此外, 从图 2 和图 3 可以看出, 芹菜生育前期各处理的土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量均处于较高水平, 但前期 N_2O 排放量并不高, 而此阶段土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量处于较低水平。定植后 34 d 和 57 d 追肥后土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量出现峰值, 此阶段 N_2O 排放也出现高峰, 说明土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量对土壤 N_2O 排放有明显的影 响, 这与已有研究相一致^[15-16]。因此, 可以通过降低土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量来减少土壤 N_2O 排放。实际生产中, 通过调整施氮次数和施氮时间来减少土壤 N_2O 的排放。

土壤中硝化细菌和反硝化细菌的数量对土壤 N_2O 的排放具有重要影响^[40]。分析 N_2O 排放的峰值发现: 灌水且施肥后土壤 N_2O 排放显著高于仅灌水土壤 N_2O 排放量, 可能是由于灌水且施肥后使得土壤水分和氮底物增加, 土壤硝化细菌和反硝化细菌数量也出现明显的上升趋势(图 3), 土壤发生了较强的硝化-反硝化作用, 使得土壤 N_2O 排放量较高。仅灌水土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量下降, 由于氮源不足而限制了土壤的硝化-反硝化作用, 表现为土壤硝化细菌和反硝化细菌数量降低(图 3), 从而显著降低了土壤 N_2O 排放。当施氮超过 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 且进行充分灌溉时, 土壤硝化细菌和反硝化细菌数量急剧增加, N_2O 排放通量也快速增加(图 2 和图 3)。相关分析发现, 土壤 N_2O 排放随着化细菌和反硝化细菌数量增加而增加 ($P<0.01$), 因此提高灌水施氮水平促进了土壤 N_2O 排放。实际生产中, 可以通过控制施氮和灌溉水平来减少温室气体的排放。

4 结论

- 1) 相同施氮量下, 充分灌水温室芹菜地土壤 N_2O 排放量显著 ($P<0.05$) 高于亏缺灌溉; 相同灌溉水平下, 增施氮肥土壤 N_2O 排放量显著 ($P<0.05$) 增加, 与不施氮相比, 施氮量 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $200 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $250 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 处理的 N_2O 累积排放量分别增加了 2.30、4.14 和 7.15 倍。
- 2) 该试验地施氮量不宜超过 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 宜选用亏缺灌溉, 可兼顾试验区芹菜产量, 同时有效降低土壤 N_2O 排放。
- 3) 土壤 N_2O 排放与土壤温度、湿度和硝态氮含量呈指数相关关系 ($P<0.01$), 与硝化细菌和反硝化细菌数量呈线性相关关系 ($P<0.01$), 而与土壤铵态氮没有显著相关关系, 在研究温室气体减排时要考虑多种因素的综合分析。

[参 考 文 献]

- [1] 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(5949): 123-125.
- [2] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from irrigated rice of North India[J]. Chemosphere, 2003, 51(3): 181-195.
- [3] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate change 2007: The physical science basis/Contribution of Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the

- IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] United Nations Environment Programme (UNEP). Drawing down N₂O to protect climate and the ozone layer [R]. A UNEP synthesis report, United Nations Environment Programme (UNEP), 2013.
- [5] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [6] Laura S M, Ana M, Lourdes G T. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(1/2): 99–107.
- [7] 张仲新, 李玉娥, 华璐, 等. 不同施肥量对设施菜地 N₂O 排放通量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 269–275. Zhang Zhongxin, Li Yue, Hua Luo, et al. Effects of different fertilizer levels on N₂O flux from protected vegetable land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(5): 269–275. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杜连凤, 吴琼, 赵同科, 等. 北京市郊典型农田施肥研究与分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2009 (3): 75–78. Du Lianfeng, Wu Qiong, Zhao Tongke, et al. Investigation of fertilizer application in different farmlands in suburbs of Beijing[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009 (3): 75–78. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张永丽, 于振文. 灌水量对不同小麦品种籽粒品质、产量及土壤硝态氮含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 155–158. Zhang Yongli, Yu Zhenwen. Effects of irrigation amount on grain quality, yield and soil NO₃⁻-N content in different wheat varieties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5): 155–158. (in Chinese with English abstract)
- [10] 于亚军, 高美荣, 朱波. 小麦-玉米轮作田与菜地 N₂O 排放的对比研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1): 96–103. Yu Yajun, Gao Meirong, Zhu Bo. Comparison study on N₂O emissions from field under wheat-maize rotation system and field under vegetable cultivation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 96–103. (in Chinese with English abstract)
- [11] Hendriks D M D, Van Huissteden J, Dolman A J. Multi-technique assessment of spatial and temporal variability of methane fluxes in a peat meadow[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150 (1): 757–774.
- [12] Laville P, Lehuger S, Loubet B, et al. Effect of management, climate and soil conditions on N₂O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151 (1): 228–240.
- [13] Grant R F, Pattey E. Modeling variability in N₂O emissions from fertilized agricultural fields[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35 (1): 225–243.
- [14] 李银坤, 武雪萍, 郭文忠, 等. 不同氮水平下黄瓜-番茄日光温室栽培土壤 N₂O 排放特征[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 260–267. Li Yinkun, Wu Xueping, Guo Wenzhong, et al. Characteristics of greenhouse soil N₂O emissions in cucumber-tomato rotation system under different nitrogen conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(23): 260–267. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张婧, 李虎, 王立刚, 等. 京郊典型设施蔬菜地土壤 N₂O 排放特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(14): 4090–4098. Zhang Jing, Li Hu, Wang Ligang, et al. Characteristics of nitrous oxide emissions from typical greenhouse vegetable fields in Beijing suburbs[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14): 4090–4098. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨岩, 孙钦平, 邹国元, 等. 水肥减量对设施芹菜地 N₂O 排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(3): 281–288. Yang Yan, Sun Qiping, Zou Guoyuan, et al. Effects of reducing irrigation and organic fertilization on N₂O emissions from celery field in facilities[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(3): 281–288. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王孟雪, 张忠学. 适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 N₂O 排放增加水稻产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 72–79. Wang Mengxue, Zhang Zhongxue. Optimal water-saving irrigation mode reducing N₂O emission from rice paddy field in cold region and increasing rice yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(15): 72–79. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(3): 111–117. (in Chinese with English abstract)
- [19] Niu W Q, Fan W T, Persaud N, et al. Effect of post-irrigation aeration on growth and quality of greenhouse cucumber[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(6): 790–798.
- [20] 朱军伟, 谢晶, 章佳君, 等. 薄膜包装芹菜品质分析及货架寿命研究[J]. *食品科学*, 2013, 34(4): 272–276. Zhu Junwei, Xie Jing, Zhang Jiajun, et al. Quality analysis and shelf life of film packaged celery[J]. *Food Science*, 2013, 34(4): 272–276.
- [21] 李元, 牛文全, 吕望, 等. 加气灌溉改善大棚番茄光合特性及干物质积累[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 125–132. Li Yuan, Niu Wenquan, Lü Wang, et al. Aerated irrigation improving photosynthesis characteristics and dry matter accumulation of greenhouse tomato[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(18): 125–132. (in Chinese with English abstract)
- [22] Franzluebbers A J. Microbial activity in response to water-filled pore space of variably eroded southern Piedmont soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11(1): 91–101.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [24] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006, 163–164.
- [25] 周龙, 龙光强, 汤利, 等. 综合产量和土壤 N₂O 排放的马铃薯施氮量分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 155–161. Zhou Long, Long Guangqiang, Tang Li, et al. Analysis on N application rates considering yield and N₂O emission in potato production[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(2): 155–161. (in Chinese with English abstract)
- [26] IPCC. Climate change: The scientific Basis[R]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2001.
- [27] Laura S M, Ana M, Lourdes G T. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(1/2): 99–107.
- [28] 武其甫, 武雪萍, 李银坤, 等. 保护地土壤 N₂O 排放通量特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 942–948. Wu Qifu, Wu Xueping, Li Yinkun, et al. Studies on the fluxes of nitrous oxide from greenhouse vegetable soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(4): 942–948. (in Chinese with English abstract)
- [29] Wang J Y, Xiong Z Q, Yan X Y. Fertilizer-induced emission factors and background emissions of N₂O from vegetable fields in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(1): 6923–6929.
- [30] Yan H L, Xie L Y, Guo L P, et al. Characteristics of nitrous oxide emissions and the affecting factors from vegetable fields on the North China Plain[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 144 (1): 316–321.
- [31] 于亚军, 高美荣, 朱波. 小麦-玉米轮作田与菜地 N₂O 排放的对比研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1): 96–103. Yu Yajun, Gao Meirong, Zhu Bo. Comparison study on N₂O

- emissions from field under wheat-maize rotation system and field under vegetable cultivation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (1): 96–103. (in Chinese with English abstract)
- [32] Luo G J, Kiese R, Wolf B, et al. Effects of soil temperature and moisture on methane uptake and nitrous oxide emissions across three different ecosystem types[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10 (5): 3205–3219.
- [33] Di H J, Cameron K C, Podolyan A, et al. Effect of soil moisture status and a nitrification inhibitor, dicyandiamide, on ammonia oxidizer and denitrifier growth and nitrous oxide emissions in a grassland soil[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2014, 73 (1): 59–68.
- [34] Klein C A, Shepherd M A, van der Weerden T J. Nitrous oxide emissions from grazed grasslands: interactions between the N cycle and climate change—a New Zealand case study. *Current Opinion in Environment Sustainability*[J], 2014, 9 (1): 131–139.
- [35] Liu C Y, Zheng X H, Zhou Z X, et al. Nitrous oxide and nitric oxide emissions from an irrigated cotton field in Northern China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 332 (1): 123–134.
- [36] Kallenbach C M, Rolston D E, Horwath W R. Cover cropping affects soil N₂O and CO₂ emissions differently depending on type of irrigation[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137 (1): 251–260.
- [37] Riya S, Min J, Zhou S, et al. Short-Term responses of nitrous oxide emissions and concentration profiles to fertilization and irrigation in greenhouse vegetable cultivation[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(6): 764–775.
- [38] He F F, Jiang R F, Chen Q, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(5): 1666–1672.
- [39] Mosier A, Kroeze C. Potential impact on the global atmospheric N₂O budget of the increased nitrogen input required to meet future global food demands[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2(3): 465–473.
- [40] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N₂O 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. 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 with English abstract)

Effects of water and nitrogen coupling on soil N₂O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation

Du Yadan^{1,2}, Zhang Qian^{1,2}, Cui Bingjing^{1,2}, Gu Xiaobo¹, Niu Wenquan^{1,2,3*}

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

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Institution of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The global warming potential of nitrous oxide (N₂O) is 298 times that of carbon dioxide (CO₂), and N₂O degrades stratospheric ozone. Agriculture N₂O emission accounts for 59% of anthropogenic N₂O emission. Microbial nitrification and denitrification are the major pathways of N₂O production in soils. Synthetic fertilizers application in China is still the main way in agricultural production, so the increase of N₂O emissions might be inevitable. The annual synthetic nitrogen (N) fertilizer consumption in China increased from 9.34×10⁶ t in 1980 to 22.97×10⁶ t in 2009, and it accounted for more than one fifth of the total world consumption in 2007. The harvest area of vegetable crops rose from 9.5×10⁶ hm² in 1995 to 18.4×10⁶ hm² in 2010 in China and is still increasing. The fertilization rate for vegetable crops in China was 628.05 kg/hm², nearly 2 times that for cereal crops (314.4 kg/hm²) in 2006, of which N fertilizer occupied the largest share. The rough estimation showed that N₂O emissions from vegetable fields accounted for 20% of the total direct N₂O emission and N emission accounted for 17% of total N consumption nationally. Besides, agricultural practices such as irrigation and aeration potentially affect N₂O emission from soils through influencing soil physical and chemical characteristics to constrain soil microbial processes. However, the microbial pathways of N₂O production after N application and irrigation input in aerated condition are not well known. In order to reveal the effects of water and nitrogen coupling on soil N₂O emission characteristics under aerated irrigation, and further put forward effective reduction measures, a field experiment with celery was conducted in greenhouse in Yangling District of Shaanxi Province. The experiment adopted 2 irrigation levels (I1: full irrigation, 1.0 Ep; I2: deficit irrigation, 0.75 Ep. Ep is the cumulative evaporation from a 20 cm diameter pan between 2 irrigations) and 4 N levels (N0: 0 kg/hm²; N150: 150 kg/hm²; N200: 200 kg/hm²; N250: 250 kg/hm²), and 8 treatments in total. In the present study, the effects of irrigation levels, nitrogen application amount, soil temperature and moisture, quantities of nitrifying bacteria and denitrifying bacteria on soil N₂O emission were also analyzed. The results showed that the N₂O emission from the full irrigation treatment was significantly higher than the deficit irrigation treatment. Nitrogen increased the cumulative N₂O emission significantly under the same irrigation level. The cumulative N₂O emissions of N150, N200 and N250 treatments were 2.30, 4.14 and 7.15 times that of N0 treatment in the whole growing season of celery, respectively. The correlation analysis showed that the significant exponential relationships existed between soil N₂O emission and soil temperature, water filled pore space (WFPS%), and nitrate content. And the significant positive relationship was observed between soil N₂O emission and nitrifier and denitrifier. There was no relationship between soil N₂O emission and soil ammonium content. Irrigation and fertilization were contributed to the improvement of crop yield, but the soil N₂O emission was also significantly increased. Therefore, the combination of N application amount of 150 kg/hm² and deficit irrigation was the best coupled mode of water and nitrogen to increase celery yield and reduce N₂O emission among the 4 treatments. It should be heavily emphasized in future in the Northwest China. The results can provide valuable information for the selection of water-saving and nitrogen-saving method in Northwestern region.

Keywords: soil; greenhouse gas; emission control; N₂O emission; irrigation; nitrogen