

易琼, 黄旭, 张木, 等. 氮肥施用水平及种类对生菜产量及菜地 N_2O 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.

氮肥施用水平及种类对生菜产量及菜地 N_2O 排放的影响

易琼, 黄旭, 张木, 黄巧义, 逢玉万, 唐拴虎*

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部南方植物营养与肥料重点实验室/广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640)

摘要: 采用静态箱-气相色谱法研究了氮肥施用水平及种类对生菜产量和土壤 N_2O 排放的影响。试验设 7 个处理: 不施氮肥 (N_0), 施氮 $112.5 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_1), 施氮 $225 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2), 施氮 $337.5 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_3), 控释氮肥 (CRU-N_2), 稳定性氮肥 (SN-N_2), 有机无机氮肥配施 (MN-N_2)。对比研究了不同施氮水平和等氮量不同氮种类处理对 N_2O 排放特征和生菜产量的影响。结果表明, 随着氮肥用量的增加 N_2O 排放通量增加。在试验条件下, 生菜获得最高产量时的施氮量为 $125 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 适量降低生菜施氮水平能有效降低 N_2O 气体累积排放量。相同氮水平下, SN-N_2 与 MN-N_2 处理较 N_2 处理分别增产达 13.3% 和 17.2%, 但差异未达显著水平。 SN-N_2 处理 N_2O 排放总量和 N_2O 排放系数仅为 $0.80 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 0.36%, 较常规施肥处理分别降低了 84.8% 和 1.97 个百分点。综上, 在不降低生菜产量的前提下, 优化氮肥施用水平并采用稳定性氮肥技术是菜地 N_2O 减排和减少蔬菜种植氮素损失的重要途径。

关键词: 生菜; 氧化亚氮; 施氮量; 减排措施; 排放系数

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)10-2019-07 doi:10.11654/jaes.2016-0471

Effects of nitrogen application rate and sources on yield of lettuce and nitrous oxide emission in vegetable soil

YI Qiong, HUANG Xu, ZHANG Mu, HUANG Qiao-yi, PANG Yu-wan, TANG Shuan-hu*

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture/Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Closed-chamber technology with gas chromatography method was used to study the effects of different nitrogen (N) application rates and sources on the yield of lettuce and nitrous oxide (N_2O) emissions from vegetable soil. Seven treatments were including zero N fertilization (N_0), $112.5 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_1), $225 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2 , conventional fertilization), $337.5 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_3), controlled release urea (CRU-N_2), stability N fertilizer (SN-N_2), integrate chemical and manure N fertilizer (MN-N_2). The effects of different N levels and N sources with the same amount of N on characteristics of N_2O emission, yield of lettuce were comparatively studied. Results showed that the N_2O emission fluxes increased with the increasing of nitrogen fertilizer application. The optimum N rate to obtain the maximum yield of lettuce was $125 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$. Reasonable reduction of N application rate could effectively reduced N_2O accumulative emission. Under the same N level condition, yield of lettuce increased by 13.3% and 17.2% with SN-N_2 and MN-N_2 compared with N_2 , however, there were not significant differences ($P>0.05$) for yield of lettuce between SN-N_2 , MN-N_2 and N_2 . The total seasonal emission of N_2O and N_2O emission factor (EF) of SN-N_2 only was $0.80 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 0.36%, which was 84.8% and 1.97 percent point reduction compared to N_2 . In conclusion, optimized N fertilization rate along with stability N fertilization technology without sacrificing vegetable output is an important approach for N_2O reduction emission and reducing on N loss in vegetable field.

Keywords: lettuce; nitrous oxide; nitrogen application rate; emission reduction measure; emission factor

收稿日期: 2016-04-07

基金项目: 广东省科技计划项目 (2014A020208051, 2014B090904068)

作者简介: 易琼 (1985—), 女, 博士研究生, 助研, 主要研究方向为肥料与养分综合管理。E-mail: yiq100@126.com

* 通信作者: 唐拴虎 E-mail: tfstshu@aliyun.com.cn

大气温室气体浓度的持续增加是全球气候变暖的重要诱因之一。 N_2O 作为重要温室气体之一,因具有在大气中滞留时间长、增温潜势大和对臭氧层的破坏作用等特点而备受人们关注。由于蔬菜生长周期短、产量高、施肥量大、灌溉频繁,菜地温室气体排放量居高不下^[1]。作为 N_2O 的主要排放源之一,菜地土壤 N_2O 排放规律及其减排技术研究已成为国内外研究的热点^[2-3]。氮肥的施用是导致菜地土壤 N_2O 排放增加的主要原因之一^[4]。例如,生菜(*Lactuca sativa* L.)具有生长周期相对较短、病虫害较少、经济产值较高等特点,是当地主要种植的蔬菜种类之一。生菜生产中氮肥用量随空间与品种的变化差异较大,总体而言过量施用氮肥是生菜生产过程中普遍存在的现象,施氮量高达 207~300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[5-6],这既是养分资源的浪费,也是对生态环境的污染与破坏。 N_2O 的排放是土壤硝化与反硝化综合作用的结果,其排放受外界环境条件和内在土壤性质的共同制约和影响^[7-9]。目前国内外有关 N_2O 等温室气体排放通量的研究多集中在大田作物生产过程中,包括耕作制度、水分灌排及秸秆还田等农作措施对温室气体排放的相关研究^[10-11],而有关蔬菜生产过程中 N_2O 气体释放规律,尤其是华南地区有关科学合理施肥结合温室气体减排技术措施相关研究相对较少。综上,本研究主要从优化蔬菜氮肥施用和 N_2O 温室气体减排两方面进行阐述,以期蔬菜科学合理施肥、评价菜地土壤 N_2O 减排措施提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间试验于 2013 年 9 月在广东省农科院试验基地(23.15°N, 113.36°E)进行。该地区属于典型的亚热带海洋性季风气候,全年平均气温 22.5 °C,年温差 15~17 °C,年平均降水量 1517 mm,年平均相对湿度 77%。供试土壤为赤红壤,前茬为甜玉米,玉米收获后匀地 2 个月左右。土壤基本理化性状如表 1。供试蔬菜为生菜,品种为“意大利全年耐抽苔抗热生菜”。

1.2 试验设计

试验共设 7 个处理:不施氮肥(N0),施氮 112.5

$\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N1),施氮 225 $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N2,常规施肥),施氮 337.5 $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N3),控释氮肥(CRU-N2,加阳公司购买,树脂包膜,施氮量为 225 $\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$,下同),稳定性氮肥(SN-N2,由腐植酸和双氰胺包膜而成),有机无机氮肥配施(MN-N2,有机无机氮肥施用比例为 1:1,供试有机肥为腐熟商品有机肥,原料主要为鸡粪,总养分含量 $\geq 4\%$, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1.5:1:1.5$)。供试氮肥为尿素(控释氮肥与稳定性氮肥除外),供试磷、钾肥分别为过磷酸钙和硫酸钾,每个处理磷钾肥用量相同,分别为 P_2O_5 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 K_2O 165 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。有机肥和磷肥全部作基肥,除控释尿素处理氮肥全部作基肥一次施用外,其他各处理 30%的氮、钾肥用作基肥施入,70%的按 0.15:0.25:0.30 的比例分别于蔬菜生长中后期作追肥施入。每个小区面积为 10.3 m^2 ,完全随机排列,重复 3 次。蔬菜于 9 月 26 日播种,10 月 23 日移栽,11 月 27 日收获。

1.3 测定项目及方法

采用静态暗箱-气相色谱法测定菜地 N_2O 温室气体的排放。密闭箱由有机玻璃(5 mm)材料制成,箱体尺寸为 40 cm×40 cm×40 cm,箱体内壁粘贴锡箔纸隔绝光线,每个小区填埋一个与密闭箱配套的不锈钢底座(箱内种植 4 棵生菜),每次气体收集前,用水密封底座凹槽,使箱内空气与外界环境无交换。自生菜移栽开始,每隔 3~4 d 采集一次气体。每次采气时间控制在上午 8:00—12:00 之间,盖箱后经 0、10、20、30 min 分别用 60 mL 注射器收集气体带回实验室,当日采用气相色谱仪(Agilent 7890B,美国)分析测定。收集气体的同时记录每个小区箱内温度、大气温度及 5 cm 土温。

采气当天采取 0~30 cm 土壤样品,−4 °C 保存用于测定土壤矿质氮($\text{N}_{\text{min}} = \text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量。土壤矿质氮采用 2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液提取并用连续流动分析仪(Futura,法国)进行测定。土壤有机质采用重铬酸钾外加热法,碱解氮采用碱解扩散法,速效磷和有效钾分别采用 0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法和 NH_4OAc 浸提法测定,pH 值采用电位法测定^[12]。

1.4 数据处理与分析

N_2O 气体排放通量计算公式为:

表 1 供试菜地土壤基本理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of test soil

土层 Soil layer/cm	pH	容重 Bulk density (BD)/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机质 Organic matter(OM)/%	碱解氮 Alkali- hydrolyzable(AN)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 Available phosphorous(AP)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效钾 Available potassium(AK)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	硝态氮 $\text{NO}_3^- - \text{N}/$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	铵态氮 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
0~30	6.49	1.36	2.44	115.2	79.7	150.5	24.5	15.7

$$F=\rho \times h \times dc/dt \times 273/(273+T),$$

式中: F 为N₂O的排放通量, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为N₂O标准状态下的密度, $\rho=1.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$; h 为箱子高度; dc/dt 为采样箱内N₂O气体浓度变化率; T 为采样时箱内的平均温度。

N₂O季节排放总量由相邻两次气体排放通量的平均值与观测间隔时间相乘,然后逐次累加而得,以N₂O-N计。

N₂O排放系数(Emission factor, EF, %)=(施氮处理N₂O-N排放量-不施氮处理N₂O-N排放量)/氮肥用量×100%

全球增温潜势(GWP,以100年计, $\text{t CO}_2 \text{ equivalent} \cdot \text{hm}^{-2}$)是基于CO₂、CH₄和N₂O转化为CO₂当量进行估算:

$$\text{GWP}=R_{\text{CO}_2}+25 \times R_{\text{CH}_4}+298 \times R_{\text{N}_2\text{O}}$$

式中 R_{CO_2} 、 R_{CH_4} 、 $R_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别为生长季CO₂、CH₄和N₂O排放总量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [13]。

温室气体排放强度(GHGI)为单位生菜产量的综合温室效应CO₂当量,即:

$$\text{GHGI}=\text{GWP}/\text{单位面积生菜产量}$$

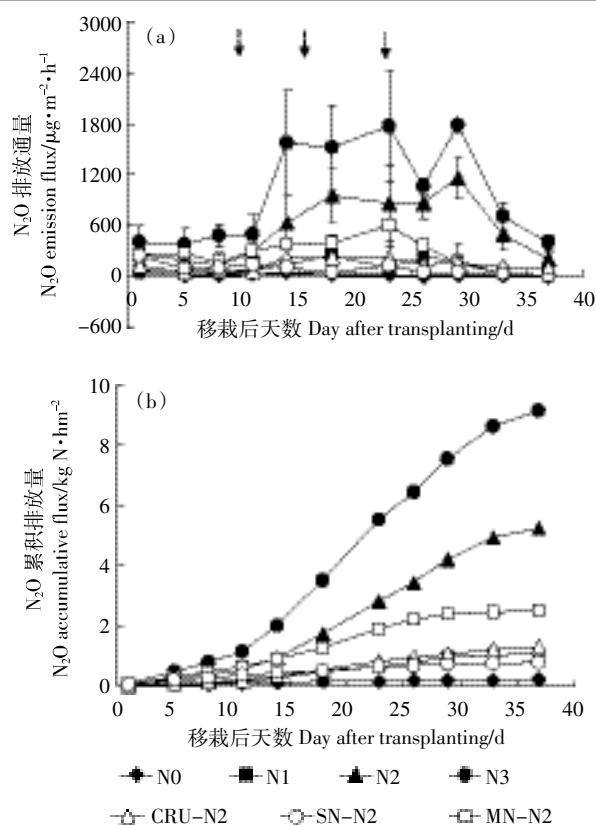
本文采用Microsoft Excel 2007和SAS 9.0软件进行数据计算和图表制作与方差分析等。

2 结果与分析

2.1 不同处理N₂O排放通量和累积排放量动态变化

从图1(a)可以看出,生菜整个生长过程中土壤N₂O排放通量变化范围为6.6~1 781.8 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,各施氮处理土壤N₂O气体排放均较不施氮肥处理高,各处理N₂O排放通量随着氮肥量的增加而增加,表明氮肥施用是促进菜地N₂O气体净排放的一个非常重要的因素。自生菜移栽后11 d起,N₂O排放通量呈明显增加趋势,N₃处理增幅尤为突出,各施肥处理N₂O排放峰出现的时间和规律并不完全一致,表现为N₃>N₂>MN-N₂,其他各处理并未呈现明显的排放峰值。

由N₂O累积排放量图1(b)可知,各处理生菜生长前期N₂O排放累积相对较小,生菜移栽后11~23 d N₂O累积排放量明显增加,尤其是N₃处理最多,N₂处理次之。相同施氮水平下,N₂O累积排放量表现为N₂>MN-N₂>CRU-N₂>SN-N₂,表明稳定性氮肥处理较常规尿素处理能有效控制菜地N₂O气体释放,CRU-N₂处理效果次之。此外,生菜生长前期,MN-N₂处理N₂O累积排放量高于N₂处理,直至生菜移栽后14 d,该趋势发生逆转,有机无机配施处理也能在一



图中箭头表示追肥
The arrows in figure indicate fertilization.

图1 不同处理生菜地N₂O排放通量和累积排放量动态变化
Figure 1 Dynamic changes of different treatments on N₂O emissions fluxes and N₂O cumulative fluxes in lettuce

定程度上减少N₂O气体的累积释放量,其抑制效果主要体现在作物生长后期。

2.2 不同处理蔬菜产量和N₂O季节综合排放特征

由表2可知,适量增施氮肥可提高生菜地上部商品产量,然而,当氮肥用量达到N₃水平时,生菜商品产量急剧下降。与常规施肥N₂处理相比,N₃处理显著减产,降幅达23.4%。SN-N₂与MN-N₂处理较N₂处理增幅分别为13.3%和17.2%,但差异未达显著水平。整个生菜生长季,各处理N₂O排放总量在0.23~9.12 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,由氮肥直接引起的N₂O-N排放系数范围为0.36%~2.71%,且各处理N₂O排放总量与N₂O排放系数差异规律表现一致,均随氮肥用量的增加而增加。N₃处理N₂O排放总量和N₂O排放系数分别是N₂处理的1.74倍和1.16倍。等氮量条件下,SN-N₂处理N₂O排放总量仅为0.80 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,较常规施肥处理降低了84.8%,且其N₂O排放系数仅为0.36%,较N₂处理降低了1.97个百分点。CRU-N₂和MN-N₂处理也在一定程度上降低了土壤N₂O排放总

表2 生菜产量和 N₂O 季节综合排放特征Table 2 Lettuce yield and comprehensive seasonal emission characteristics of N₂O

处理 Treatment	产量 Yield/ t·hm ⁻²	较 N2 增产率 Rate of yield increase vs. N2/%	N ₂ O 排放总量 N ₂ O total emission/kg N·hm ⁻²	排放系数 EF/%	全球增温潜势 GWP/tCO ₂ eq·hm ⁻²	温室气体排放强度 GHGI/ tCO ₂ eq·t ⁻¹ veg·hm ⁻²
N0	16.3bc	-7.0	0.23d	—	4.52	0.28
N1	16.3bc	-7.0	1.07cd	0.71bc	4.49	0.28
N2	17.5ab	—	5.25b	2.33a	5.67	0.32
N3	13.4c	-23.4	9.12a	2.71a	7.07	0.53
CRU-N2	17.9ab	2.1	1.31cd	0.59bc	4.80	0.27
SN-N2	19.9a	13.3	0.80cd	0.36c	4.87	0.25
MN-N2	20.5a	17.2	2.50e	1.09b	6.01	0.29

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different letters mean significant difference ($P<0.05$), the same below.

量和 N₂O 排放系数。各处理全球增温潜势及温室气体排放强度与 N₂O 总排放量差异规律一致。全球增温潜势与温室气体排放强度随氮肥用量的增加明显升高,表明生菜生产过程中过量氮肥的施用可能是导致菜地 N₂O 释放的主要因素之一。同等施氮水平下,不同氮肥形态对土壤温室气体排放强度影响不同。与 N2 处理相比,SN-N2 处理能明显降低菜地土壤温室气体排放强度及其全球增温潜势,降幅分别达 21.9% 和 14.1%。CRU-N2 处理也能在一定程度上有效降低菜地土壤温室气体排放强度和全球增温潜势。

2.3 不同处理对菜地土壤矿质氮含量的影响

如图 2 所示,不同施肥措施对 0~30 cm 土层土壤矿质氮(N_{min})含量的影响不同,各施氮处理土壤矿质氮(尤其是土壤铵态氮)残留量相对较高。生菜收获期土壤矿质氮含量随氮肥用量的增加明显增加,N3 处理土壤矿质氮含量最高,达 237.5 mg·kg⁻¹。等氮条件下,MN-N2 较 N2 处理土壤矿质氮含量降低了 75.1 mg·kg⁻¹,差异达显著水平。CRU-N2 和 SN-N2 处理较

N2 处理土壤矿质氮含量分别降低了 40.8 mg·kg⁻¹ 和 24.2 mg·kg⁻¹,但差异未达显著水平。

2.4 施氮量与生菜产量、N₂O 排放及土壤矿质氮含量的关系

菜地土壤矿质氮含量与氮肥用量之间呈二次函数关系($R^2=0.999^{**}$),随着施氮量的增加土壤矿质氮含量也增加,增幅逐渐趋于平缓(图 3a)。同样,菜地 N₂O 累积排放量与氮肥用量也能很好地用一元二次方程拟合($R^2=0.9884^{**}$),即在本试验条件下,随着氮肥用量的增加,N₂O 累积排放量增加,增幅呈急剧上升趋势(图 3b)。生菜产量(y)与施氮量(x)的回归关系呈抛物线方程:

$$y = -8E-05x^2 + 0.020x + 15.95$$

根据该方程可求得生菜获得最高理论产量对应的施氮量为 125 kg N·hm⁻²,该回归方程对实际生菜生产氮肥施用量具有指导意义(图 3b)。此外,菜地土壤矿质氮含量与 N₂O 累积排放量呈指数相关关系($R^2=0.9897^{**}$),表明土壤残留矿质氮越高,N₂O 累积排放量越大(图 3c)。因此,在高肥力土壤上,综合考虑土壤矿质氮本底值,减少生菜氮肥施用量能有效降低因过量施肥而造成 N₂O 高排放的现状。

3 讨论

3.1 优化施肥

蔬菜种植是仅次于粮食作物生产的另一重要作物类别,目前广东省蔬菜种植面积约为 123 万 hm²,占全省农作物总播种面积的 26.4%^[14]。由于蔬菜生产过程中土地利用强度和复种指数非常高,单位耕地面积氮素养分投入较水稻高出几倍甚至十几倍,以致菜地土壤氮肥利用率极低,养分资源浪费与环境污染问题凸显^[15]。针对上述问题,优化氮肥用量、合理调控肥

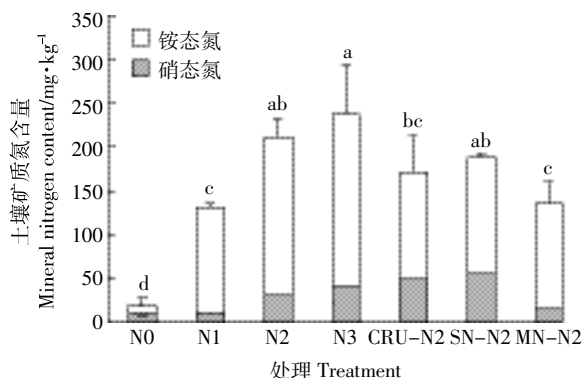


图2 不同处理对生菜土壤矿质氮含量的影响

Figure 2 Effects of different fertilization practices on soil N_{min} content of lettuce

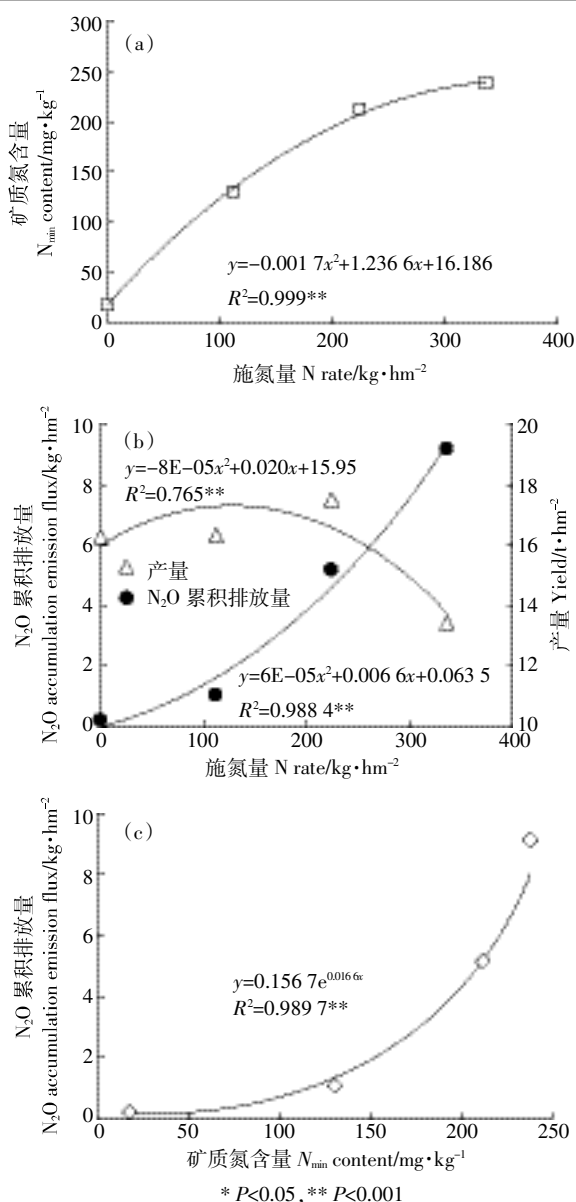


图3 不同施肥措施生菜产量、N₂O 累积排放、土壤矿质氮含量及氮肥用量之间的相关性

Figure 3 Correlation of lettuce yield, N₂O accumulation emission fluxes, N_{min} content with N rate under different fertilization practices

料品种与施肥措施对提高氮肥利用率、减少养分负效应显得尤为重要。本试验结果表明,氮肥的施用对蔬菜增产具有促进作用,但过量氮肥投入反而导致减产,其原因可能是作物施肥报酬递减原理与生菜生理病害的产生或加重导致生菜在 N3 水平出现明显减产现象。通过回归分析可知,生菜产量与施氮量呈抛物线方程关系,生菜获得最高理论产量时对应的施氮量为 125 kg N·hm⁻²,较 N2 水平氮肥用量降低了 30.6%,表明生菜生产中氮肥减施存在很大空间。本

试验中菜地 N₂O 累积排放通量与氮肥用量、菜地土壤矿质氮含量与氮肥用量之间均存在显著的相关关系,表明在保证生菜不减产条件下,适度减少氮肥用量不仅能够有效减少温室气体的排放,还能在一定程度上减少土壤中氮的残留量。相关研究同样认为氮肥用量的减少始终是 N₂O 减排的一个有效途径^[16-17]。

N₂O 排放系数被认为是评估化肥直接诱导 N₂O 排放的一个重要参数^[18],菜地土壤 N₂O 排放占总合成肥料直接引起的 N₂O 排放量的 9%,菜地全球季节排放系数占氮肥用量的 0.94%^[19]。然而,土壤 N₂O EF 并非固定值,不同地区、不同氮肥品种差异较大^[20-21]。Wang 等^[22]研究表明,肥料诱导的 N₂O 排放量及其背景排放量与测定周期的长短相关,当测定周期小于 100 d 时 EF 值降低,而当测定周期在 100~200 d 之间其背景排放量增加。本研究结果显示菜地土壤 N₂O EF 值范围为 0.36%~2.71%,施氮量越高,N₂O 排放系数越大。同等施氮量前提下,SN-N2 处理与 CRU-N2 处理 EF 值较 N2 处理分别降低了 1.97、1.74 个百分点。因此,优化氮肥施用是缓解菜地 N₂O 排放的重要措施。

3.2 减排措施

硝化作用与反硝化作用是土壤 N₂O 生成的主要途径。旱地作物生长过程中,土壤 N₂O 的产生和释放不仅受降雨、灌溉、温度等气候条件的影响,而且受养分管理、耕作方式和作物种类的影响^[23-24]。有关温室气体减排措施的研究国内外已开展了不少工作^[25]。氮稳定剂和薄膜尿素被认为是减少 N₂O 排放的一个有效缓解策略^[20,26]。前人研究报道,硝化抑制剂 DCD 能够有效降低农田土壤 N₂O 的释放主要归因于 DCD 处理显著减少了氨氧化细菌 amoA 基因拷贝数,尤其是在高氮肥用量条件下,DCD 对 N₂O 减排效果最显著^[27]。有研究认为,菜地土壤长期高量氮肥施用土壤 AOB 群体数量发现显著改变,该微生物群体对 DCD 比较敏感,但反硝化细菌对 DCD 的影响尚不完全清楚^[28]。李香兰等^[29]开展水稻试验研究认为,硝化抑制剂和缓控释肥对降低稻田温室气体排放效果明显。本试验结果表明,SN-N2 和 CRU-N2 处理 N₂O 排放总量分别为 0.80 kg N·hm⁻² 和 1.31 kg N·hm⁻²,较常规施肥 N2 处理极显著地降低了菜地 N₂O 累积排放量,降幅分别达 84.8% 和 75.0%。同样,SN-N2 和 CRU-N2 处理对降低菜地温室气体排放强度和土壤全球增温潜势效果也非常明显。SN-N2 处理对菜地 N₂O 减排效果显著的原因可能主要与 SN-N2 处理有效降低了土壤矿

质氮含量有关,但关于稳定性氮肥处理如何调节硝化与反硝化过程的微生物机理还需下一步深入探究。CRU-N₂处理则可能是通过延长肥料养分在土壤中的释放期,防止氮通过硝化与反硝化作用转变为气态氮排放,从而有效降低土壤 N₂O 的排放量^[30]。Van-derZaag 等^[31]研究表明,有机肥能有效降低土壤 N₂O 排放达 17%。本研究获得类似结论,即无机氮配施有机氮肥不仅能增加生菜产量,还能减少 52.4% 的 N₂O 排放量。然而,Köster 等^[32]研究表明,与相同氮量无机化肥相比,有机肥处理反而产生更高的 N₂O。有机肥的施用对菜地土壤 N₂O 释放的影响至今存在争议,因此仍需开展进一步的研究。此外,CRU-N₂和 MN-N₂处理还能显著降低表层土壤矿质氮含量,对降低土壤氮的损失具有重要意义。

4 结论

(1)本试验条件下(高肥力菜地),适量优化生菜氮肥用量(125 kg N·hm⁻²),蔬菜产量未降低,土壤 N₂O 排放总量与土壤残留矿质氮含量明显减少,这为蔬菜生产降本增效和缓解蔬菜过量施肥造成的环境负效应提供重要支撑。

(2)在保证产量不降低的前提下,稳定性氮肥处理能显著减少生菜季土壤 N₂O 排放量,同时还能明显降低 N₂O 排放系数,对菜地 N₂O 减排效果非常显著,可作为缓解菜地 N₂O 气体排放的有效途径之一。

参考文献:

- [1] Jia J X, Sun L Y, Kong X W, et al. Annual N₂O and CH₄ emissions from intensively managed vegetable fields in Nanjing, China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(1):91-103.
- [2] 杨俊刚,张鹏飞,倪小会,等.施用控释肥对设施番茄 NO₃-N 淋洗、N₂O 排放及产量与品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9):1849-1857.
YANG Jun-gang, ZHANG Peng-fei, NI Xiao-hui, et al. Effects of controlled release fertilizer on soil nitrate leaching, N₂O emission and fruit yield and quality in greenhouse tomato production system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9):1849-1857.
- [3] 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 Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, et al. Key microbial processes in nitrous oxide emission of agricultural soil and mitigation strategies[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):792-800.
- [4] Kim Y, Seo Y, Kraus D, et al. Estimation and mitigation of N₂O emission and nitrate leaching from intensive crop cultivation in the Haeian catchment, South Korea[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 529:40-53.
- [5] 杨敏,陈秀虎,陆远宁,等.清远市郊生菜最佳营养配方研究[J]. *广东农业科学*, 2010(11):133-136.
YANG Min, CHEN Xiu-hu, LU Yuan-ning, et al. Study on the best nutritional supplements method of lettuce grown in Qingyuan Suburbs[J]. *Journal of Guangdong Agricultural Sciences*, 2010(11):133-136.
- [6] 孙治强,张楠,赵卫星,等.氮肥施用量对生菜产量、硝酸盐积累及土壤 EC 值、pH 值的影响[J]. *江西农业学报*, 2007, 19(4):44-45.
SUN Zhi-qiang, ZHANG Nan, ZHAO Wei-xing, et al. Effects of N application rates on yield, nitrate accumulation of lettuce and EC, pH value of soil[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2007, 19(4):44-45.
- [7] Gu J, Nicoulaud B, Rochette P, et al. A regional experiment suggests that soil texture is a major control of N₂O emissions from tile-drained winter wheat fields during the fertilization period[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 60:134-141.
- [8] Hansen M, Clough T J, Elberling B. Flooding-induced N₂O emission bursts controlled by pH and nitrate in agricultural soils [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 69:17-24.
- [9] 沈宏,曹志洪.温室气体及其生态效应[J]. *中国生态农业学报*, 1998, 6(3):21-24.
SHEN Hong, CAO Zhi-hong. Greenhouse gases and their ecological effects[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 1998, 6(3):21-24.
- [10] 潘晓健,刘平丽,李露,等.氮肥和秸秆施用对稻麦轮作体系下土壤剖面 N₂O 时空分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(2):364-371.
PAN Xiao-jian, LIU Ping-li, LI Lu, et al. Spatial and temporal distributions of soil profile N₂O as affected by N fertilization and straw incorporation in the rice-wheat rotation system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2):364-371.
- [11] 秦晓波,李玉娥,万运帆,等.耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11):216-224.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effects of tillage and rice residue return on CH₄ and N₂O emission from double rice field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(11):216-224.
- [12] 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,2000:39-114.
LU Ru-kun. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Technology Press, 2000:39-114.
- [13] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127:153-160.
- [14] 中华人民共和国国家统计局.广东统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2012:281-286.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical yearbook of Guangdong[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012:281-286.
- [15] Marie B, Josette G, Gilles B, et al. Nitrous oxide emissions and nitrate leaching in an organic and a conventional cropping system (Seine basin, France) [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 213:131-141.
- [16] Nayak D, Saetnan E, Cheng K, et al. Management opportunities to miti-

- gate greenhouse gas emissions from Chinese agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 209: 108–124.
- [17] Wang W J, Reeves S H, Salter B, et al. Effects of urea formulations, application rates and crop residue retention on N₂O emissions from sugar-cane fields in Australia[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 216: 137–146.
- [18] Velthof G L, Mosquera J. The impact of slurry application technique on nitrous oxide emission from agricultural soils[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140: 298–308.
- [19] Rashti M R, Wang W J, Moody P, et al. Fertilizer-induced nitrous oxide emissions from vegetable production in the world and the regulating factors: A review[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 112: 225–233.
- [20] Bell M J, Hinton N, Cloy J M, et al. Nitrous oxide emissions from fertilised UK arable soils: Fluxes, emission factors and mitigation[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 212: 134–147.
- [21] Diao T T, Xie L Y, Guo L P, et al. Measurements of N₂O emissions from different vegetable fields on the North China Plain[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 72: 70–76.
- [22] 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(38): 6923–6929.
- [23] Robert L M. Understanding greenhouse gas emissions from agricultural management[M]//Fertilizer nitrogen management to reduce nitrous oxide emissions in the U.S. ACS Symposium Series, 2011: 135–147.
- [24] Xiong Z Q, Xie Y X, Xing G X, et al. Measurements of nitrous oxide emissions from vegetable production in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(12): 2225–2234.
- [25] He F F, Chen Q, Jiang R F, et al. Yield and nitrogen balance of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) with conventional and site-specific nitrogen management in Northern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77(1): 1–14.
- [26] Tian Z, Wang J J, Liu S, et al. Application effects of coated urea and urease and nitrification inhibitors on ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical cotton field of the Mississippi delta region[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 533: 329–338.
- [27] Dai Y, Di H J, Cameron K C, et al. Effects of nitrogen application rate and a nitrification inhibitor dicyandiamide on ammonia oxidizers and N₂O emissions in a grazed pasture soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465: 125–135.
- [28] Liu Y, Yang Y, Qin H L, et al. Differential responses of nitrifier and denitrifier to dicyandiamide in short- and long-term intensive vegetable cultivation soils[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(5): 1090–1098.
- [29] 李香兰, 徐 华, 蔡祖聪. 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放消长关系及其减排措施[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2123–2130.
- LI Xiang-lan, XU Hua, CAI Zu-cong. Trade off relationship and mitigation options of methane and nitrous oxide emissions from rice paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2123–2130.
- [30] 李方敏, 于广超, 樱井雄二. 控释肥料的环境效应研究进展[J]. 河南农业科学, 2008(8): 8–13.
- LI Fang-min, YU Guang-chao, YING Jing-xiong. Study on the environment effective of controlled release fertilizer[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2008(8): 8–13.
- [31] VanderZaag A C, Jayasundara S, Wagner-Riddle C. Strategies to mitigate nitrous oxide emissions from land applied manure[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 166/167: 464–479.
- [32] Köster J R, Cárdenas L M, Bol R, et al. Anaerobic digestates lower N₂O emissions compared to cattle slurry by affecting rate and product stoichiometry of denitrification: An N₂O isotopomer case study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 84: 65–74.