

氮肥品种对露地蔬菜 NH_3 挥发及经济效益的影响

李晓明, 居静, 夏永秋, 钱晓晴, 颜晓元, 周伟

引用本文:

李晓明, 居静, 夏永秋, 等. 氮肥品种对露地蔬菜 NH_3 挥发及经济效益的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1337-1343.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1482>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354-2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

田间老化生物质炭对潮土氨挥发的影响

廖霞, 刘德燕, 陈增明, 何铁虎, 牛玉慧, 丁维新

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1326-1336 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1414>

苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价

孙婷, 王孟兰, 王柏淳, 李运东, 王慎强

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1115-1123 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0472>

不同遮阴处理下施肥对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

王坤, 娄运生, 邢钰媛, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464-472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1366-1376 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李晓明, 居静, 夏永秋, 等. 氮肥品种对露地蔬菜NH₃挥发及经济效益的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1337–1343.

LI Xiao-ming, JU Jing, XIA Yong-qiu, et al. Effects of different nitrogen fertilizer types on NH₃ volatilization from open-air vegetable fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1337–1343.



开放科学 OSID

氮肥品种对露地蔬菜NH₃挥发及经济效益的影响

李晓明^{1,2}, 居静^{1*}, 夏永秋^{2*}, 钱晓晴¹, 颜晓元², 周伟²

(1. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225000; 2. 江苏常熟农田生态系统国家野外观测研究站, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要:为研究不同氮肥品种在露天种植中的NH₃挥发减排效果,于2019年5月至11月在中国科学院常熟农业生态实验站种植4季叶菜类蔬菜,利用密闭室-通气法研究了不同氮肥品种处理下露地蔬菜NH₃挥发排放,并计算了NH₃挥发造成的环境损益。试验共设置5个处理,分别为常规尿素(N200,每季蔬菜施氮量为200 kg·hm⁻²)、硝基复合肥(N200A)、脲酶抑制剂尿素(N200B)、有机肥部分替代(N200C)和不施肥处理(CK)。结果表明:N200处理下NH₃挥发平均累积排放量(以N计,下同)为24.75 kg·hm⁻²,N200A的NH₃挥发平均累积排放量为3.75 kg·hm⁻²,与N200相比降低了84.84%($P<0.05$),N200B和N200C处理的NH₃挥发平均累积排放量较N200处理分别降低了74.52%($P<0.05$)和48.71%($P<0.05$);N200和N200C造成的NH₃挥发环境损益分别为928.13元·hm⁻²和476.25元·hm⁻²。N200A蔬菜产量最高,平均为34.03 t·hm⁻²,与N200相比增加了25.13%,同时N200A的环境损益最低,为140.63元·hm⁻²。研究表明,在太湖地区典型蔬菜地采用硝基复合肥、有机肥部分替代和添加脲酶抑制剂均可显著减少露地蔬菜NH₃挥发,其中硝基复合肥增产效果最好,NH₃挥发环境损益最小。

关键词:氮肥;露地蔬菜;NH₃挥发;环境损益

中图分类号:S63 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)06-1337-07 doi:10.11654/jaes.2021-1482

Effects of different nitrogen fertilizer types on NH₃ volatilization from open-air vegetable fields

LI Xiao-ming^{1,2}, JU Jing^{1*}, XIA Yong-qiu^{2*}, QIAN Xiao-qing¹, YAN Xiao-yuan², ZHOU Wei²

(1. College of Environment Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China; 2. Changshu Agro-ecological National Field Scientific Observation and Research Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: To reduce NH₃ volatilization from open-air vegetable fields, NH₃ volatilization rates from four seasons of vegetables under different nitrogen fertilizer treatments were compared from May to November 2019 in Changshu Agro-Ecological Experimental Station, Chinese Academy of Sciences. According to local fertilization practices, the total N-fertilizer application rate was set as 200 kg·hm⁻², and five treatments were established: urea fertilization (N200), nitro-compound fertilizer (N200A), urease inhibitor urea (N200B), organic fertilizer partial substitution (N200C), and no fertilization (CK). NH₃ volatilization was measured by closed-chamber ventilation methods, and environmental benefits caused by NH₃ volatilization (calculated by N) were calculated. The results showed that the cumulative NH₃ volatilization of N200 was 24.75 kg·hm⁻², while the cumulative NH₃ volatilization emission of N200A was 3.75 kg·hm⁻², which was 84.84% lower than that of N200 ($P<0.05$). The cumulative emissions of NH₃ volatilization of the N200B and N200C treatments were 74.52% ($P<0.05$) and 48.71% ($P<0.05$) lower than that of the N200 treatment, respectively. The environmental losses caused by NH₃ volatilization for

收稿日期:2020-12-23 录用日期:2021-03-17

作者简介:李晓明(1994—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为露地蔬菜氮素循环。E-mail:lixiaoming@issas.ac.cn

*通信作者:居静 E-mail:jujing@yzu.edu.cn; 夏永秋 E-mail:yqxia@issas.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0213302,2018YFD0201203)

Project supported: National Key R&D Program of China(2018YFC0213302,2018YFD0201203)

the N200 and N200C treatments were 928.13 yuan · hm⁻² and 476.25 yuan · hm⁻², respectively. The N200A treatment had the highest vegetable yield, reaching 34.03 t · hm⁻², which was 25.13% higher than that of N200; meanwhile, the environmental loss (140.63 yuan · hm⁻²) was lowest among all the treatments. This showed that NH₃ volatilization from open-air vegetable fields in the Taihu Lake region can be reduced by using nitro-compound fertilizer, partial substitution of organic fertilizer, and addition of urease inhibitor. Among these, nitro-compound fertilizer resulted in the highest vegetable yield and the lowest environmental loss caused by NH₃ volatilization.

Keywords: nitrogen fertilizer; open-air vegetable; NH₃ volatilization; environmental loss

我国是世界上最大的蔬菜生产国和消费国,2018年蔬菜播种面积已经达到了2.04×10⁷ hm²,占农作物总播种面积的12.30%^[1]。叶菜类蔬菜在蔬菜种植中占比较大,其种类繁多、生长期较短、扎根较浅、肥料需求量大^[2]。由于复种指数高,蔬菜氮肥的周年施用量可达1 000 kg · hm⁻²,是其他大田作物的2倍,但氮肥利用率却小于20%^[3]。大量输入到蔬菜系统的氮素通过NH₃、N₂O等形式排放至大气中^[2],据统计,露地蔬菜种植所施用的氮肥有11%会以NH₃挥发的形式进入大气与酸性物质结合,引起雾霾、酸雨等环境问题^[4-6]。

太湖地区是我国经济最发达的地区之一,该地区蔬菜种植氮肥投入量大、复种指数高,NH₃挥发损失量可占到施氮量的24%^[7]。前人研究表明,选择合适的肥料品种、优化肥料措施是减少蔬菜地NH₃挥发的重要途径^[8-9]。例如代明等^[10]发现适当比例的硝基复合肥替代氮肥可增加马铃薯产量,提高其品质,同时提高了化肥利用率。万伟帆等^[11]发现脲酶抑制剂尿素可以减少马铃薯种植过程中的NH₃挥发。有机肥替代也有较好的NH₃减排潜力,武星魁等^[12]发现适当比例的有机肥替代可以减少包心菜和小青菜种植所造成的NH₃挥发。在冬小麦和夏玉米种植中,有机肥适量替代氮肥可以显著降低NH₃挥发速率^[13-14]。但这些研究大多针对某一种肥料或某一个季节开展研究,缺乏不同氮肥类型NH₃排放特征的系统性研究。为此,本研究以当地大面积种植的海青为供试蔬菜作物,通过田间试验,研究了不同氮肥品种对上海青产量及NH₃挥发的影响,比较了NH₃挥发造成的环境损失效益,旨在为本地区寻找合适的露地蔬菜NH₃挥发

减排增效技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在中国科学院常熟生态实验站(31°02′45″N, 120°41′57″E)进行,该站地处亚热带中部湿润季风气候区,年平均温度16.5℃,年降雨量1 135.6 mm。供试菜地土壤类型为乌栅土,试验开始前采集土壤样品,利用元素分析仪(Vario MACRO cube CN)测定土壤碳、氮含量。供试土壤全氮(TN)为2.1 g · kg⁻¹,全碳(TC)为20.2 g · kg⁻¹,pH为6.1,电导率为149 mS · m⁻¹,容重为1.21 g · cm⁻³。试验期间气温与降水量数据由中国科学院常熟生态实验站提供。

1.2 试验方法

试验于2019年5月至11月进行,共种植了4季上海青。试验共设置5个处理:传统尿素施肥处理(N200)、硝基复合肥处理(N200A)、脲酶抑制剂(NBPT)尿素处理(N200B)、有机肥部分替代(尿素:有机肥=7:3)处理(N200C)和不施肥处理(CK)。各处理肥料用量见表1。每个处理3个重复,随机区组排列。小区面积为5.20 m×4.80 m,每个小区设置一个NH₃挥发采样微区,面积为0.60 m×0.30 m,微区施肥方法和施肥量与所处小区相同。根据当地农民施肥习惯,肥料作基肥深耕翻地后撒施,不再追肥。

1.3 植株样品采集与测定

上海青生长成熟后,每个小区选取1 m×1 m的样方进行记产,去除不可食用部分后计算商品上海青产量。

1.4 NH₃挥发采集与测定

采用密闭室-间歇抽气法测定菜地NH₃挥发^[15],

表1 试验处理肥料用量

Table 1 Fertilization rates of the treatments

处理 Treatments	N肥 N fertilizer/(kg · hm ⁻²)	P肥 P fertilizer/(kg · hm ⁻²)	K肥 K fertilizer/(kg · hm ⁻²)
空白 Blank(CK)	0	0	0
常规 Conventional urea(N200)	200	70	150
硝基复合肥 Nitro-compound fertilizer(N200A)	200	70	150
脲酶抑制剂尿素 NBPT urea(N200B)	200	70	150
有机肥替代 Organic fertilizer substitution(N200C)	尿素:有机肥=7:3	70	150

密闭室由直径20 cm、高30 cm、无底有盖的有机玻璃罩组成,密闭室顶部的一个通气孔通过波纹管与2 m换气杆连接,另一个通气孔通过硅胶管与NH₃吸收瓶连接,再通过硅胶管依次与流量调节阀、流量计、缓冲瓶和抽气泵相连。NH₃吸收瓶为500 mL有机玻璃瓶,每个瓶内装有100 mL 0.05 mol·L⁻¹的稀硫酸溶液,作为NH₃吸收液。每日9:00—11:00和14:30—16:30进行采样,以这4 h的NH₃挥发量作为每日NH₃挥发的平均通量,估算每日NH₃挥发总量。每次施肥后即开始采样测定,直至施氮处理与对照的NH₃挥发通量无显著差异为止。采样结束后,将吸收液带回实验室,利用全自动化学分析仪(AMS SmartChem140, AMS-Alliance, Italy)测定吸收液中NH₄⁺-N浓度。

NH₃挥发排放通量计算公式:

$$F = \frac{C \times V \times 24 \times 10^{-2}}{t \times S}$$

式中: F 为NH₃挥发排放通量,kg·hm⁻²·d⁻¹,以N计; C 为吸收液中NH₄⁺-N浓度,μg·mL⁻¹; V 为NH₃吸收液体积,mL; t 为采样时间,h; S 为密闭室的面积,m²;24为24 h·d⁻¹;10⁻²为单位转换系数。

NH₃挥发累积量计算公式:

$$M = 0.5 \times \sum_{i=1}^n [(F_i + F_{i-1}) \times (t_i - t_{i-1})]$$

式中: M 为NH₃挥发排放累积量,kg·hm⁻²; n 为施肥后测定总次数; F_i 为第*i*次测定时NH₃挥发排放通量,kg·hm⁻²·d⁻¹; t_i 为第*i*次测定的施肥后的天数; $t_i - t_{i-1}$ 为时间间隔,d。

NH₃排放系数计算公式:

$$\rho = (M_T - M_{CK}) / 200 \times 100\%$$

式中: ρ 为NH₃排放系数; M_T 为各施肥处理的NH₃挥发累积量,kg·hm⁻²; M_{CK} 为空白处理NH₃挥发累积量,kg·hm⁻²;200为施氮量,kg·hm⁻²。

NH₃减排比例计算公式:

$$R = \frac{M_{N200} - M_l}{M_{N200} - M_{CK}} \times 100\%$$

式中: R 为NH₃减排比例; M_{N200} 为传统尿素处理的NH₃挥发累积排放量,kg·hm⁻²; M_l 为其他施肥处理的NH₃挥发累积排放量,kg·hm⁻²; M_{CK} 为空白处理NH₃挥发累积排放量,kg·hm⁻²。

1.5 经济效益和环境效益评价方法

1.5.1 经济效益

增产率计算公式:

$$N = (Y - y) / y \times 100\%$$

式中: N 为增产率,%; Y 为除N200外其他施肥处理产

量, t ; y 为N200处理产量,t。

增产效益计算公式:

$$E = (Y \times VP - PC) - (y \times VP - PC)$$

式中: E 为增产效益,元; Y 为除N200外其他施肥处理产量,t; y 为N200处理产量,t; VP 为蔬菜价格,元·t⁻¹; PC 为种植成本,元·hm⁻²,包含肥料费、人工费、农药费、土地租金。

尿素价格为2 000.00元·t⁻¹,硝基复合肥价格为4 000.00元·t⁻¹,脲酶抑制剂尿素价格为2 100.00元·t⁻¹,有机肥价格为1 000.00元·t⁻¹,上海青价格为5 000.00元·t⁻¹。人工费为15 000.00元·hm⁻²,土地租金为22 500.00元·hm⁻²,农药费为2 250.00元·hm⁻²。

1.5.2 NH₃挥发造成的环境损失效益

$$EC = M \times DC$$

式中: EC 为环境损失,元·hm⁻²; M 为土壤NH₃挥发累积量,kg·hm⁻²; DC 为NH₃挥发环境损失,37.5元·kg⁻¹N^[16-17]。

1.6 数据分析方法

采用SPSS 20.0软件进行统计分析,运用LSD方法检验处理间的差异性。采用Origin 2018、Excel 2016软件进行图表制作。

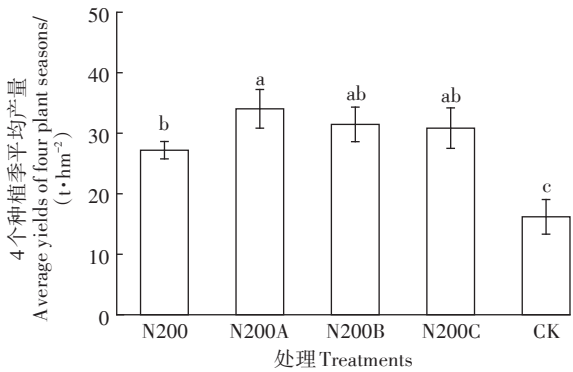
2 结果与分析

2.1 不同种类氮肥对上海青产量的影响

不同氮肥种类对上海青产量的影响如图1所示。N200、N200A、N200B和N200C处理上海青平均产量为27.20、34.03、31.46 t·hm⁻²和30.84 t·hm⁻²,其中N200A与N200处理差异显著,N200B、N200C与N200处理产量之间差异不显著。

2.2 不同种类氮肥NH₃挥发排放通量

不同氮肥种类施入土壤后均观测到明显的NH₃挥发损失(图2)。N200、N200A、N200B、N200C和CK处理NH₃挥发通量的变化范围分别为0.02~7.74、0.03~0.54、0.01~1.66、0.01~4.58 kg·hm⁻²·d⁻¹和0.02~0.39 kg·hm⁻²·d⁻¹。4个种植季蔬菜地NH₃挥发通量均表现为施肥后先显著上升到达顶峰再缓慢下降的变化趋势。具体而言,N200、N200C处理NH₃挥发排放通量波动较为明显,N200B处理NH₃排放通量较为平稳,N200A处理的NH₃挥发速率很低,与CK处理处于同等水平。从NH₃挥发速率动态变化看,施肥后1~8 d是NH₃挥发发生的主要时间段,此阶段各施肥处理NH₃挥发速率差异显著($P < 0.05$),第9 d之后各处理NH₃挥发速率无差异。从季节变化看,夏季种植季



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below
图1 不同氮肥处理上海青平均产量
Figure 1 Average yields of pak choi under different nitrogen fertilizer treatments

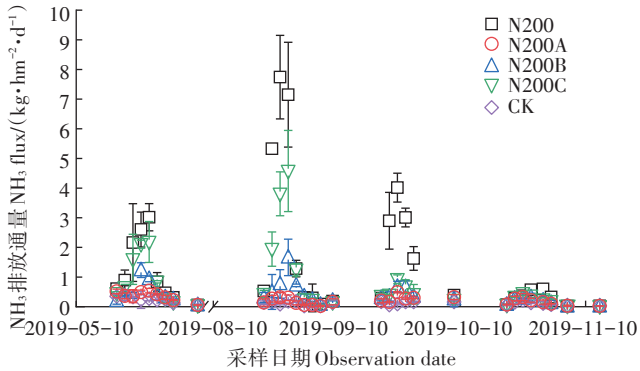


图2 不同氮肥处理NH₃排放通量
Figure 2 NH₃ flux of different nitrogen fertilizer treatments in the four growing seasons

(8—9月)蔬菜地NH₃挥发通量显著高于其他季节。

2.3 不同种类氮肥NH₃挥发累积排放量及排放系数

不同氮肥处理NH₃挥发累积排放量存在明显差异,具体见表2。4个蔬菜种植季N200、N200A、N200B、N200C和CK处理的NH₃挥发累积量的变化范围分别为1.80~44.86、0.47~5.72、0.09~8.84、0.48~24.55 kg·hm⁻²和0.18~3.87 kg·hm⁻²。4个种植季各施

肥处理平均NH₃挥发系数分别为11.22%(N200)、0.84%(N200A)、2.28%(N200B)和5.12%(N200C),常规尿素NH₃排放系数最高,硝基肥NH₃排放系数最小。

如表2所示,与常规尿素相比,其他氮肥处理均有显著的NH₃减排效果,其中N200A的减排比例达到84.84%,其次是N200B,减排比例达74.52%。不同种植季NH₃减排量存在差异,其中第二季NH₃减排量最大,而第四季各处理间NH₃排放通量差异不显著,因此NH₃减排效果不明显。

2.4 不同种类氮肥对上海青经济效益的影响

与N200相比,N200A、N200B和N200C处理均有增产效果(表3),其中N200A增产率为25.13%,N200B与N200C处理的增产率分别为15.68%和13.41%。N200A增产带来的经济收益可达到29 686.25元·hm⁻²,N200B、N200C处理分别为21 256.53元·hm⁻²和15 460.84元·hm⁻²。

2.5 不同种类氮肥NH₃挥发造成的环境损失效益

如图3所示,不同氮肥种类NH₃挥发造成的环境损失效益存在显著差异,其中N200的环境损失最高,为928.13元·hm⁻²,其次为N200C。N200A的环境损

表2 不同种类氮肥NH₃挥发平均累积排放量及平均排放系数
Table 2 Average total NH₃ fluxes and the average emission rates of the four vegetable growing seasons for the different nitrogen fertilizer types

处理 Treatments	平均累积排放量 Average total NH ₃ flux/(kg·hm ⁻²)	平均排放系数 Average emission rates/%	减排比例 Emission reduction rate/%
N200	24.75±2.88	11.22±0.74a	
N200A	3.75±0.63	0.84±0.23b	84.84±2.52a
N200B	6.31±0.70	2.28±0.28b	74.52±2.81b
N200C	12.70±1.45	5.12±0.33ab	48.71±5.84c
CK	2.23±0.59	—	

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below.

表3 不同种类氮肥对上海青经济效益的影响

Table 3 Economic benefits of pak choi under the different nitrogen fertilizer types

处理 Treatments	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	产量效益 Yield benefit/(元·hm ⁻²)	增产量 Increment yield/(t·hm ⁻²)	增产率 Increment yield rate/%	种植成本 Planting cost/(元·hm ⁻²)	增产效益 Yield increase benefit/(元·hm ⁻²)
N200	27.20±1.44b	136 000	—	—	40 659	—
N200A	34.03±3.19a	170 150	6.84	25.13	45 123	29 686
N200B	31.46±2.86ab	157 300	4.26	15.68	40 703	21 257
N200C	30.84±3.34ab	154 200	3.65	13.41	43 398	15 461

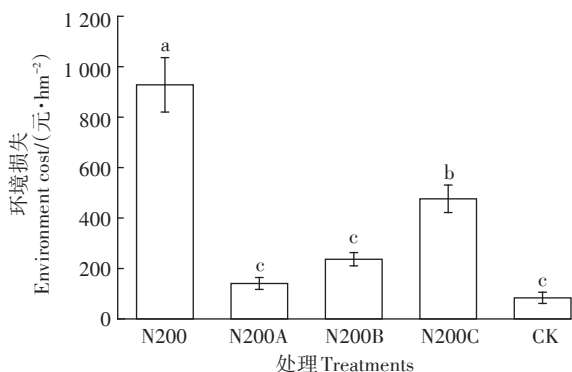
图3 不同种类氮肥NH₃挥发造成的环境损失效益

Figure 3 Environmental losses caused by NH₃ volatilization under the different nitrogen fertilizer types

失效益最低,仅为140.63元·hm⁻²,与N200相比,减少了84.85%。

3 讨论

3.1 不同种类氮肥对上海青产量及菜地NH₃挥发的影响

与常规尿素相比不同种类氮肥对上海青均有一定的增产效果,说明本试验所选用的氮肥品种在减少NH₃挥发的同时,不会对蔬菜产量造成影响。不同种类氮肥施入土壤后均观测到明显的NH₃挥发损失,不同种植季间NH₃挥发排放通量有所差别。其中第二季(8—9月)和第三季(9—10月)各处理NH₃的排放通量明显高于第一季(5—6月)和第四季(10—11月)。这主要是受到温度的影响,随着气温的升高,NH₃的溶解性降低,同时由NH₄⁺转化为NH₃的比例增多,从而增加了NH₃由土壤向空气中排放的数量^[18]。

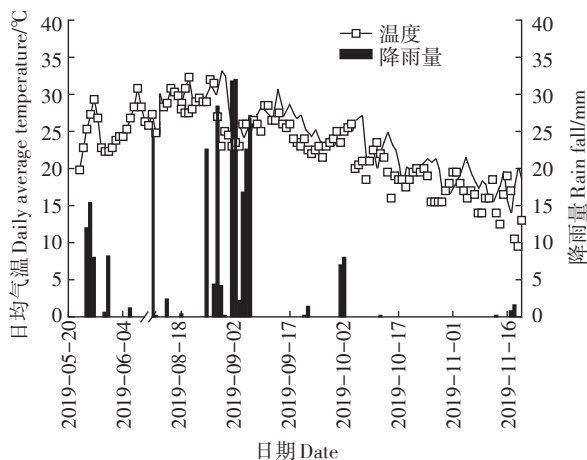


图4 试验期间气温与降水量

Figure 4 Temperature and precipitation changes during sampling

万伟帆等^[11]、龚巍巍等^[19]的研究均表明NH₃挥发与土壤温度呈正相关。土壤含水率也是影响NH₃排放的一个重要因素,不同蔬菜种植季降雨量不同,导致土壤含水率不同,从而造成NH₃排放的差异^[20],本次试验前3季种植期降水丰沛(图4),因此NH₃排放量要高于第四季。采样期间土壤含水率与NH₃排放通量呈显著相关($P<0.05$),土壤温度与NH₃排放通量相关性不显著,但是总体动态趋势较为一致,这可能是由于采样期间温度变化不明显导致的(图5、图6)。

与常规尿素相比,本试验选用的硝基氮肥、脲酶抑制剂尿素和有机肥部分替代尿素均在一定程度上减少了菜地NH₃挥发,其中硝基氮肥的NH₃减排效果最佳。与传统尿素相比,硝基复合肥的氮素主要以NO₃⁻-N为主,溶于水、肥效快。且上海青属于喜硝作物,硝基肥料施入土壤后可在短时间内溶解而被根系吸收利用,在促进作物生长的同时^[21-22],也大幅降低了菜地的NH₃挥发排放。

脲酶是一种重要的土壤水解酶,它可以催化尿素

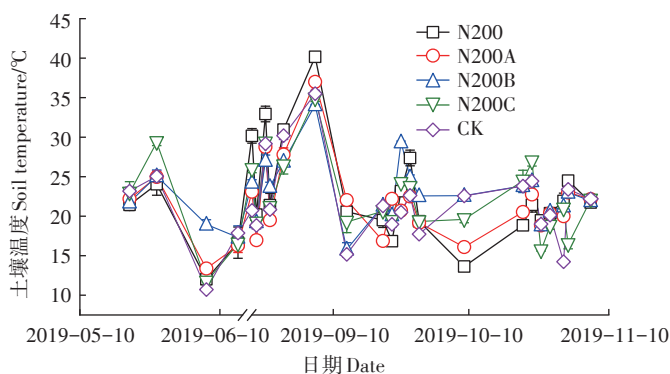


图5 不同氮肥处理下4季上海青土壤温度

Figure 5 Soil temperature of pak choi in the four seasons under the different nitrogen fertilizer treatments

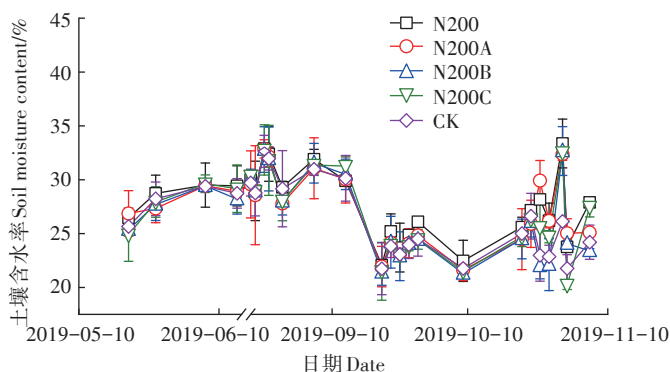


图6 不同氮肥处理下4季上海青土壤含水率

Figure 6 Soil moisture content of pak choi in the four seasons under the different nitrogen fertilizer treatments

水解产生 NH_3 、水和 CO_2 [23]。常规尿素在施入土壤后会在土壤脲酶的作用下水解,水解产生的 NH_4HCO_3 会迅速转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,其中一部分被土壤吸收成为吸附态的 NH_4^+ ,另一部分则进入到土壤溶液中,迅速提高 NH_4^+ 的浓度,为 NH_3 挥发提供了充足的底物。有研究表明,施用脲酶抑制剂会使 NH_3 挥发的高峰期推迟 [24-25],可以有效降低 NH_3 排放速率、减少 NH_3 挥发累计损失量 [24]。因此,实际生产中常通过在尿素中添加脲酶抑制剂,以达到提高氮素利用率的目的。本研究中脲酶抑制剂尿素的 NH_3 挥发损失率为 2.28%,远低于常规尿素的 11.22%。

与常规尿素相比,有机肥替代部分尿素也有一定的 NH_3 减排效果,这主要是因为有机肥腐解时会产生大量的有机酸 [26-27],有机酸可以降低土壤 pH,增加土壤对 NH_4^+ 的固持,从而减少 NH_3 的排放,有效实现 NH_3 减排的目的。本试验中的有机肥替代率为 30%,小于其他研究者 50% 以上的氮肥替代率,因此 NH_3 减排效果不及其他研究者的结果 [28]。

3.2 不同种类氮肥对露地蔬菜 NH_3 减排效果的评价

不同种类的氮肥除了对 NH_3 排放有一定程度的影响,可能还会引起其他风险和成本效益的改变。有研究表明,在种植菠菜时使用硝基肥可增产 7 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [29]。付胜昔 [30] 发现,与尿素相比硝基复合肥可使辣椒增产 11.0%。尹飞等 [31] 发现使用硝基复合肥可使小麦增产 5.8%。在冬瓜种植时使用添加脲酶抑制剂的尿素,可增产 17.0% [32]。武星魁等 [12] 发现有机肥部分替代化肥氮可使包心菜和小青菜增收 11.7% 和 5.4%, NH_3 挥发可分别降低 53.1% 和 87.8%。本研究中,与 N200 处理相比, N200A、N200B、N200C 处理在减少 NH_3 排放的同时,上海青的产量也有不同幅度的增加,提高了经济效益。其中 N200A 蔬菜产量最高,平均为 34.03 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,与 N200 相比增加 25.13%,同时 N200A 的环境损益最低,为 140.63 元 $\cdot\text{hm}^{-2}$,是最有效的露地蔬菜 NH_3 减排技术。

4 结论

4 个种植季观测期内, NH_3 挥发主要发生在施肥后 15 d 内,峰值主要出现在施肥后 5~9 d。与常规尿素处理相比,脲酶抑制剂、有机肥替代和硝基复合肥处理既可保证上海青的产量,同时能大幅降低 NH_3 排放。其中硝基复合肥处理增产率最高, NH_3 挥发减排量最多,是最有效的露地蔬菜 NH_3 减排肥料品种。如果能进一步降低成本,硝基复合肥将具更大优势。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴—2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook—2019[M]. Beijing: China Statistical Press, 2019.
- [2] 冯小鹿. 叶菜需肥特点与施肥[J]. 蔬菜, 2014(2): 28. FENG Xiao-lu. Characteristics and fertilization of leafy vegetables[J]. *Vegetables*, 2014(2): 28.
- [3] 陆扣萍, 谢寅峰, 闵炬, 等. 不同施氮量对太湖地区新增设施菜地土壤硝态氮累积的影响[J]. 土壤, 2011, 43(6): 903-909. LU Kou-ping, XIE Yin-feng, MIN Ju, et al. Effects of different N rates on soil nitrate nitrogen accumulation in new plastic greenhouse of Taihu Lake region[J]. *Soils*, 2011, 43(6): 903-909.
- [4] 茹淑华, 张国印, 耿暖, 等. 氮肥施用量对华北集约化农区作物产量和土壤硝态氮累积的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(增刊 1): 405-409. RU Shu-hua, ZHANG Guo-yin, GENG Nuan, et al. Effect of nitrogen application rate on crop yield and the soil nitrate nitrogen accumulation in the intensive agriculture region in north China[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(Suppl 1): 405-409.
- [5] 乔月, 朱建强, 吴启侠, 等. 不同氮肥对不同种植方式稻田径流氮流失与氨挥发的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 32-41. QIAO Yue, ZHU Jian-qiang, WU Qi-xia, et al. Nitrogen loss from surface runoff and ammonia volatilization from paddy field as impacted by different fertilizers and planting methods[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(2): 32-41.
- [6] Ti C, Luo Y, Yan X. Characteristics of nitrogen balance in open-air and greenhouse vegetable cropping systems of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(23): 18508-18518.
- [7] Min J, Lu K, Sun H, et al. Global warming potential in an intensive vegetable cropping system as affected by crop rotation and nitrogen rate[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2016, 44(7): 766-774.
- [8] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 149-162. LU Li-li, WU Gen-yi. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(1): 149-162.
- [9] Ti C, Xia L, Chang S X, et al. Potential for mitigating global agricultural ammonia emission: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 141-148.
- [10] 代明, 侯文通, 陈日远, 等. 硝基复合肥对马铃薯生长发育、产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(3): 84-87, 97. DAI Ming, HOU Wen-tong, CHEN Ri-yuan, et al. Effects of nitro-compound fertilizers on growth, yield and quality of potato[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(3): 84-87, 97.
- [11] 万伟帆, 李斐, 红梅, 等. 氮肥用量和脲酶抑制剂对滴灌马铃薯田氧化亚氮排放和氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 693-702. WAN Wei-fan, LI Fei, HONG Mei, et al. Effects of nitrogen rate and urease inhibitor on N_2O emission and NH_3 volatilization in drip irrigated potato fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3): 693-702.
- [12] 武星魁, 姜振萃, 陆志新, 等. 有机肥部分替代化肥氮对叶菜产量和环境效应的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3):

- 349–356. WU Xing-kui, JIANG Zhen-cui, LU Zhi-xin, et al. Effects of the partial replacement of chemical fertilizer with manure on the yield and nitrogen emissions in leafy vegetable production[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3):349–356.
- [13] 王树会, 张旭博, 孙楠, 等. 2050年农田土壤温室气体排放及碳氮储量变化SPACSYS模型预测[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6):1550–1565. WANG Shu-hui, ZHANG Xu-bo, SUN Nan, et al. Prediction of greenhouse gas emissions and carbon and nitrogen stocks in farmland soils in 2050 by SPACSYS model[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6):1550–1565.
- [14] 周伟, 田玉华, 尹斌. 太湖地区水稻追肥的氨挥发损失和氮素平衡[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1):32–36. ZHOU Wei, TIAN Yu-hua, YIN Bin. Ammonia volatilization and nitrogen balance after topdressing fertilization in paddy fields of Taihu Lake region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1):32–36.
- [15] 周伟, 李晓明, 颜晓元. 一种气体采样器:CN210834362U[P]. 2020–06–23. ZHOU Wei, LI Xiao-ming, YAN Xiao-yuan. A gas sampler:CN210834362U[P]. 2020–06–23.
- [16] 夏永秋, 颜晓元. 太湖地区麦季协调农学、环境和经济效益的推荐施肥量[J]. 土壤学报, 2011, 48(6):1210–1218. XIA Yong-qiu, YAN Xiao-yuan. Nitrogen fertilization rate recommendation integrating agronomic, environmental, and economic benefits for wheat season in the Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6):1210–1218.
- [17] Gu B J, Ge Y, Ren Y, et al. Atmospheric reactive nitrogen in China: Sources, recent trends, and damage costs[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(17):9420–9427.
- [18] 张薇, 倪邦, 许秀春, 等. 氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(11):5176–5184. ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, et al. Impacts of nitrogen application on ammonia volatilization during maize season in northern China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(11):5176–5184.
- [19] 龚巍巍, 张宜升, 何凌燕, 等. 菜地氨挥发损失及影响因素原位研究[J]. 环境科学, 2011, 32(2):345–350. GONG Wei-wei, ZHANG Yi-sheng, HE Ling-yan, et al. In-situ measurement on volatilization loss of ammonia in the vegetable field and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2):345–350.
- [20] Zhong X M, Zhou X, Fei J C, et al. Reducing ammonia volatilization and increasing nitrogen use efficiency in machine-transplanted rice with side-deep fertilization in a double-cropping rice system in southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 306:107183.
- [21] 王伟. 硝基肥的性能和优势[N]. 河北科技报, 2018–04–03(A05). WANG Wei. The performance and advantages of nitrofertilizer[N]. *Science and Technology of Hebei*, 2018–04–03(A05).
- [22] 刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 等. 生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3):677–684. LIU Chu-tong, CHEN Song-ling, ZOU Hong-tao, et al. Effects of coated urea inhibitor encapsulated by bio-based film on soil greenhouse gas emission and *Brassica chinensis* yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3):677–684.
- [23] Hagin J, Olsen S R, Shaviv A. Review of interaction of ammonium – nitrate and potassium nutrition of crops[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1990, 13(10):1211–1226.
- [24] Freney J R, Keerthisinghe D G, Phongpan S, et al. Effect of urease, nitrification and algal inhibitors on ammonia loss and grain yield of flooded rice in Thailand[J]. *Fertilizer Research*, 1995, 40(3):225–233.
- [25] Byrnes B H, Freney J R. Recent developments on the use of urease inhibitors in the tropics[J]. *Fertilizer Research*, 1995, 42(1/2/3):251–259.
- [26] Liang B, Yang X, He X, et al. Long-term combined application of manure and NPK fertilizers influenced nitrogen retention and stabilization of organic C in Loess soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 353(1/2):249–260.
- [27] Pant P K, Ram S, Singh V. Yield and soil organic matter dynamics as affected by the long-term use of organic and inorganic fertilizers under rice–wheat cropping system in subtropical mollisols[J]. *Agricultural Research*, 2017, 6(4):399–409.
- [28] 赵佐平, 高义民, 刘芬, 等. 化肥有机肥配施对苹果叶片养分、品质及产量的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40(11):2229–2236. ZHAO Zuo-ping, GAO Yi-min, LIU Fen, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on the leaf nutrition, quality and yield of Fuji apple[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(11):2229–2236.
- [29] 崔海涛. 增产又增收:高密400亩菠菜用上金正大硝基肥[J]. 中国农资, 2013(19):23. CUI Hai-tao. Increase production and increase income:400 mu high density spinach with Jin Zhengda nitro fertilizer[J]. *China Agri-Production News*, 2013(19):23.
- [30] 付胜昔. “金正大”硝基复合肥在辣椒上的肥效试验[J]. 河南农业, 2018(34):15. FU Sheng-xi. Fertilizer efficiency test of ‘Jinzhengda’ nitro compound fertilizer on pepper[J]. *Agriculture of Henan*, 2018(34):15.
- [31] 尹飞, 陈明灿, 刘君瑞. 氮素形态对小麦花后干物质积累与分配的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(13):78–81. YIN Fei, CHEN Ming-can, LIU Jun-rui. Effects of nitrogen forms on wheat dry matter accumulation and distribution after blooming[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(13):78–81.
- [32] 李学文, 李树营, 王齐龙, 等. 脲酶/硝化抑制剂配施氮肥减施对冬瓜产量、品质和土壤氮磷淋失的影响[J/OL]. 中国瓜菜:1–8[2021–03–16]. <https://doi.org/10.16861/j.cnki.zggc.20201123.001>. LI Xue-wen, LI Shu-ying, WANG Qi-long, et al. Effect of urease/nitrification inhibitors combined with chemical fertilizer on yield, quality and nitrogen & phosphorus leaching of black wax gourd[J/OL]. *China Cucurbits and Vegetables*:1–8[2021–03–16]. <https://doi.org/10.16861/j.cnki.zggc.20201123.001>.