

## 减氮配施硝化抑制剂对大白菜农学和环境效应评价

郭广正, 张芬, 沈远鹏, 肖焱波, 朱盼, 王芳, 陈新平, 王孝忠

### 引用本文:

郭广正, 张芬, 沈远鹏, 等. 减氮配施硝化抑制剂对大白菜农学和环境效应评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2307-2315.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0884>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 稻草还田下添加DCD对稻田CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>排放的影响

王国强, 常玉妍, 宋星星, 朱思明, 毛艳玲

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2431-2439 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0877>

### 不同施氮下双季稻田白天CO<sub>2</sub>交换与叶面积、生物量的相互影响

周志花, 王斌, 李健陵, 万运帆, 干珠扎布, 蔡威威, 苏荣瑞, 周守华, MuhammadAhmedWaqas

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2143-2152 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0390>

### 施用生物炭对干旱区玉米农田碳足迹的影响

王冠丽, 孙铁军, 刘廷玺, 程功

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2650-2658 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0533>

### 氮肥及硝化抑制剂配合施用对石灰性土壤二氧化碳释放的影响

李雪松, SajjadRaza, 刘占军, 陈竹君, 周建斌

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1658-1663 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0110>

### 不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响

潘复燕, 薛利红, 卢萍, 董元华, 马资厚, 杨林章

农业环境科学学报. 2015, 34(5): 928-936 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.05.016>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭广正, 张芬, 沈远鹏, 等. 减氮配施硝化抑制剂对大白菜农学和环境效应评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2307–2315.  
GUO Guang-zheng, ZHANG Fen, SHEN Yuan-peng, et al. Comprehensive assessment of the agronomic and environmental effects of N application rate reduction combined with nitrification inhibitor on Chinese cabbage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2307–2315.



开放科学 OSID

## 减氮配施硝化抑制剂对大白菜农学和环境效应评价

郭广正<sup>1</sup>, 张芬<sup>1</sup>, 沈远鹏<sup>1</sup>, 肖焱波<sup>2</sup>, 朱盼<sup>3</sup>, 王芳<sup>1</sup>, 陈新平<sup>1</sup>, 王孝忠<sup>1\*</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆市土壤资源高效利用重点实验室, 重庆 400715; 2. 云南民族大学民族医药学院, 昆明 650500; 3. 欧化农业贸易(深圳)有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:**为优化我国蔬菜系统氮肥管理, 实现蔬菜绿色生产, 以西南地区露地大白菜为研究对象, 采用田间试验和生命周期评价相结合的方法, 对不施氮肥(CK)、农户习惯(FP)和减氮配施硝化抑制剂(DMP衍生物)处理(硫基复合肥与硝酸铵钙OPT1和硫基复合肥与尿素OPT2)4种不同氮肥管理策略下的大白菜产量、氮肥利用率、经济效益和生态系统净经济效益以及氮足迹和碳足迹等进行综合评价。结果表明:与FP相比, OPT1和OPT2处理分别显著提高大白菜平均总产量(6.7%和4.2%)、商品产量(16.4%和9.0%)和氮肥利用率(9.6%和11.2%), 同时, 显著减少平均单位面积上的活性氮损失75.0%和温室气体排放68.0%, 故分别显著降低76.4%和76.1%的氮足迹以及69.9%和69.4%的碳足迹。综合而言, OPT1和OPT2处理较FP处理分别提高106.0%和97.9%的生态经济净效益(NEEB), 显著降低了单位NEEB温室气体排放( $GHG_{-NEEB}$ )和单位NEEB活性氮损失( $N_{F-NEEB}$ )。研究表明, 氮肥减量配施硝化抑制剂在减少氮肥用量和增加蔬菜产量的同时, 降低了蔬菜系统环境代价并提高了生态系统经济效益, 是实现蔬菜绿色生产的有效措施之一。

**关键词:**氮肥; 硝化抑制剂; 氮足迹; 碳足迹; 生态经济净效益

中图分类号: X173; S634.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)10-2307-09 doi:10.11654/jaes.2020-0884

### Comprehensive assessment of the agronomic and environmental effects of N application rate reduction combined with nitrification inhibitor on Chinese cabbage

GUO Guang-zheng<sup>1</sup>, ZHANG Fen<sup>1</sup>, SHEN Yuan-peng<sup>1</sup>, XIAO Yan-bo<sup>2</sup>, ZHU Pan<sup>3</sup>, WANG Fang<sup>1</sup>, CHEN Xin-ping<sup>1</sup>, WANG Xiao-zhong<sup>1\*</sup>  
(1. Chongqing Key Laboratory of Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. School of Ethnic Medicine, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China; 3. EuroChem Agro Trading(Shenzhen) Co., Ltd, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** In order to optimize N management and achieve green vegetable production. This study conducted a two-year field experiment with life cycle assessment (LCA) method to evaluate the comprehensive effects of different N managements on total yield, N use efficiency, economic benefit, net ecosystem economic benefit (NEEB), and N and C footprint of open-field Chinese cabbage production in southwest China. The N management treatments included the control (without N fertilizer, CK), conventional fertilization (FP), and N reduction with nitrification inhibitors (OPT1 and OPT2). The results showed that compared with FP, the total yield and commercial yield in OPT1 and OPT2 treatments were higher by 6.7% and 4.2%, and 16.4% and 9.0%, respectively; the N use efficiency of OPT1 and OPT2 treatment was

收稿日期: 2020-07-29 录用日期: 2020-09-17

作者简介: 郭广正(1995—), 男, 贵州安龙人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜养分资源综合管理研究。E-mail: 1451586126@qq.com

\*通信作者: 王孝忠 E-mail: wxz20181707@swu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600); 西南大学-欧化农业有限公司(SWU-EuroChem Agro GMBH)国际合作项目; 西南大学博士启动基金项目(SWU118077)

Project supported: National Key R&D Program of China (2018YFD0800600); Southwest University-EuroChem Agro GmbH (SWU-EuroChem Agro GmbH) International Cooperation Project; Doctoral Fund Project of Southwest University (SWU118077)

also higher by 9.6% and 11.2%, respectively. Meanwhile, OPT1 and OPT2 reduced the reactive N(Nr) loss by 75.0% and greenhouse gas (GHG) emission by 68.0%, respectively. Therefore, the N and C footprints of OPT1 and OPT2 were lower by 76.4% and 76.1%, and 69.9% and 69.4%, respectively. In addition, relative to FP treatment, OPT1 and OPT2 significantly increased the net ecosystem economic benefit (NEEB) by 106.0% and 97.9%, respectively, and decreased significantly the  $GHG_{-NEEB}$  and  $Nr_{-NEEB}$ . In conclusion, N fertilizer reduction combined with nitrification inhibitor management increased the vegetable yield, reduced the N fertilizer rate and environmental cost, and improved the NEEB; it was an effective measure to realize green vegetable production.

**Keywords:** nitrogen fertilizer; nitrification inhibitor; nitrogen footprint; carbon footprint; net ecosystem economic benefit

蔬菜是生活中必不可少的副食品。近20年来,我国蔬菜种植面积和产量分别增加了53.1%和73.6%<sup>[1]</sup>,是仅次于粮食作物的第二大农作物。然而集约化蔬菜生产中氮肥过量施用等不合理管理导致氮肥利用率低、活性氮损失严重和环境代价高等问题十分突出<sup>[2-3]</sup>。因此,寻求减少氮损失、提高氮肥利用率的有效措施以实现蔬菜稳产增产和降低环境代价,对实现我国蔬菜绿色生产至关重要。

优化氮肥用量是提高氮肥利用率、减小农业生产环境代价的直接有效策略<sup>[4-5]</sup>。有研究表明,基于作物需求的优化氮肥管理能够在降低氮肥投入的基础上,显著减少氮肥损失而不影响蔬菜产量<sup>[6-7]</sup>。He等<sup>[6]</sup>对设施番茄减少69%的氮肥用量时,能够减少51%的 $N_2O$ 排放而对蔬菜产量无影响。另外,硝化抑制剂也是提高氮素利用率、减少氮损失的有效策略之一<sup>[8-9]</sup>。研究表明,硝化抑制剂能显著减少作物氮淋洗损失(38%~56%)和 $N_2O$ 排放(39%~48%),同时增加蔬菜产量(0~10%)和作物肥料氮的回收率(34%~93%)<sup>[9]</sup>。目前关于硝化抑制剂的效果评价大多集中于粮食作物,且重点关注其在不同区域、不同作物体系中对土壤氮转化、作物产量、氮肥利用率和单一途径氮损失的影响<sup>[10-11]</sup>,而对温室气体排放、经济效益等方面综合评价尚不清楚,且在蔬菜等经济作物上的研究相对缺乏。Fan等<sup>[12]</sup>研究表明,2-氯-6-三氯甲基吡啶(Nitrapyrin)和双氰胺(DCD)均能使不同类型菜地土壤活性氮排放量减少且蔬菜产量增加,从而降低活性氮排放强度。硝化抑制剂的效果受其类型和土壤作物类型、施用环境等因素影响而存在差异<sup>[9-11]</sup>。我国蔬菜种植地域广泛,不同区域、不同蔬菜种类间因土壤类型、气候、田间管理等存在差异,因此硝化抑制剂对我国蔬菜系统的综合影响评价需要广泛关注。

西南地区是我国蔬菜优势产区之一,2018年该地区蔬菜种植面积和产量占我国蔬菜总种植面积和总产量的22.8%和16.0%<sup>[13]</sup>。为使蔬菜生产经济效益最大化,农户通常盲目过量施肥,尤其是氮肥。本课题

组通过525户农户调研数据表明,目前西南地区露地蔬菜平均施氮量为 $470\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,远超过作物本身养分需求。同时,由于该区域全年高温多雨、蔬菜本身根系浅与养分吸收能力弱,加剧了露地蔬菜系统硝酸盐淋洗和 $N_2O$ 排放等环境损失风险<sup>[3]</sup>。因此,降低该区域硝酸盐淋洗和 $N_2O$ 排放等环境损失对提高蔬菜产量、提高氮肥利用率尤为重要。露地大白菜是西南地区主要种植蔬菜类型之一,本文基于大白菜养分需求下,研究减少氮肥投入并添加硝化抑制剂(DMP衍生物)对露地大白菜的产量、氮肥利用率和经济效益的影响,在此基础上结合生命周期评价方法(LCA),对露地大白菜生产的氮足迹、碳足迹和生态经济效益展开综合评价,以期优化蔬菜系统氮肥管理,实现我国蔬菜绿色生产提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

2018—2019年在重庆市合川区渭沱镇西南大学实验农场( $30^{\circ}0'N$ ,  $106^{\circ}7'E$ )进行了两年田间试验。该地区属亚热带季风气候,年均气温 $18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年降水量 $1\ 161\text{ mm}$ ,土壤为冲积土。试验开始前耕层0~20 cm土壤基本性质:pH 8.4(土:水为1:2.5),有机质 $21.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮 $1.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碱解氮 $51.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效磷 $28.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $89.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计与管理

采用田间小区试验,共设4个处理,每个处理4次重复,采用随机区组排列。试验处理包括:不施氮肥(CK);农户习惯(FP),施用普通复合肥和普通尿素;减氮配施硝化抑制剂(OPT1),施用硫基复合肥和硝酸铵钙;减氮配施硝化抑制剂(OPT2),施用硫基复合肥和尿素。基于当地农户调研结果,FP处理氮、磷和钾养分投入量分别为 $833\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $281\text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $356\text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;基于大白菜生长发育规律和土壤养分供应状况的根层养分管理策略,减氮配施硝化抑制剂处理的优化氮、磷和钾养分投入为 $315\text{ kg N}\cdot$

$\text{hm}^{-2}$ 、192  $\text{kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$  和 222  $\text{kg K}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[14]</sup>,各处理不同时期施肥量如表1所示。供试硫基复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O, 12-12-17)、硝酸铵钙(N 27%)和尿素(N 46%)均添加了硝化抑制剂(DMP衍生物),添加量为含氮量的0.8%~1.2%,DMP衍生物是基于DMP抑制剂开发的类似于3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)的新型硝化抑制剂,由欧化农业贸易(深圳)有限公司生产;普通复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O: 15-15-15)由嘉施利(应城)化肥有限公司生产;普通尿素(N 46.2%)由四川天华股份有限公司生产;以过磷酸钙和硫酸钾调平磷肥和钾肥用量,过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥12%)由汉中唐枫化工有限责任公司生产,硫酸钾(K<sub>2</sub>O≥50.0%)由国投新疆罗布泊钾盐有限公司生产。

每个试验小区的面积为21 m<sup>2</sup>,供试大白菜品种为丰抗70,种植株行距为30 cm×40 cm;两季大白菜生产周期分别为2018年10月26日至2019年2月16日和2019年10月8日至12月29日。基肥在移栽前撒施后翻土覆盖,在大白菜莲座期和结球期进行追肥,施肥方式为穴施,其余田间管理按照常规方法进行。

### 1.3 测定项目与评价指标

#### 1.3.1 产量、氮盈余和氮肥利用率

在大白菜成熟期进行一次性收获,测产小区面积为2 m<sup>2</sup>(12株白菜),产量以地上部鲜质量表示( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),按照市场标准和价格分为商品产量和非商品产量。每个小区取4株白菜植株作为样品,70℃条件下干燥至恒质量并称量,粉碎。植株氮浓度用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>消煮-凯氏定氮法测定,植株吸氮量=氮浓度×植株干物质质量;氮盈余为氮素投入与植株吸氮量的差值;氮肥利用率(%)=(施氮处理吸氮量-不施氮处理吸氮量)/施氮量×100%。

#### 1.3.2 经济效益

大白菜的净经济效益(NEB;万元·hm<sup>-2</sup>)通过出售大白菜的收益减去农业投入成本得到。其中农业投入成本包括种子、肥料、农药、农膜、除草剂、灌溉、耕作机械燃油和电力的成本。所有农业投入成本均根据当地市场价格确定,添加硝化抑制剂的硫基复合肥、硝酸铵钙、增效尿素按欧化农业贸易(深圳)有限公司提供价格进行计算。

#### 1.3.3 环境评价

通过生命周期评价的方法对碳、氮足迹进行定量化研究,重点关注露地大白菜生产过程(从播种到收获过程)。选取单位面积(每公顷)和单位产量(每吨)为系统评价单元。

##### (1) 活性氮损失和氮足迹

活性氮损失(Nr<sub>损失</sub>, kg N·hm<sup>-2</sup>)和氮足迹(NF, kg N·t<sup>-1</sup>)分别定义为生产每公顷和每吨大白菜对环境造成的活性氮损失总量<sup>[15]</sup>,通过公式(1)~公式(3)计算:

$$\text{Nr}_{\text{损失}} = \text{MS} - \text{Nr}_{\text{损失}} + \text{N}_2\text{O}_{\text{排放}} + \text{NH}_3_{\text{挥发}} + \text{NO}_3_{\text{淋洗}} \quad (1)$$

$$\text{MS} - \text{Nr}_{\text{损失}} = \sum_{i=1}^m F_i \times \text{Rate}_i \quad (2)$$

$$\text{NF} = \frac{\text{Nr}_{\text{损失}}}{Y_i} \quad (3)$$

式中:MS-Nr<sub>损失</sub>表示农业投入品(包括氮磷钾肥、农药、机械油耗和电力等)生产和运输的活性氮损失量,kg N·hm<sup>-2</sup>;i代表每个农业投入品类别;F<sub>i</sub>代表i的生产和运输过程中活性氮排放的相关排放系数<sup>[16-21]</sup>;Rate<sub>i</sub>代表i的用量;Y<sub>i</sub>代表大白菜总产量,t·hm<sup>-2</sup>;N<sub>2</sub>O<sub>排放</sub>、NH<sub>3</sub><sub>挥发</sub>和NO<sub>3</sub><sub>淋洗</sub>表示氮肥施用过程中的N<sub>2</sub>O排放、NH<sub>3</sub>挥发和NO<sub>3</sub>淋洗损失量,由氮肥用量乘以相应的排放因子计算得出。普通氮肥排放因子参考王孝忠<sup>[3]</sup>建立的我国露地蔬菜系统氮素损失模型。基

表1 各处理不同时期施肥量(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 1 Fertilizer application rate at different growth stage in each treatment(kg·hm<sup>-2</sup>)

年份 Year	处理 Treatments	施肥量 Fertilizer application rate(N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)			
		基肥 Base fertilizer	莲座期 Rosette stage	结球期 Heading stage	总计 Total
2018	CK	0-192-222	0-0-0	0-0-0	0-192-222
	FP	0-0-0	223-112-112	610-169-244	833-281-356
	OPT1	72-72-102	122-60-60	123-60-60	315-192-222
	OPT2	72-72-102	104-60-60	139-60-60	315-192-222
2019	CK	0-192-222	0-0-0	0-0-0	0-192-222
	FP	0-0-0	223-112-112	610-169-244	833-281-356
	OPT1	72-72-102	122-60-60	123-60-60	315-192-222
	OPT2	72-72-102	104-60-60	139-60-60	315-192-222

于已发表文献确定露地蔬菜氮肥添加硝化抑制剂引起的 $N_2O$ 排放因子为0.35%<sup>[22-25]</sup>,硝酸盐淋洗因子为11.39%<sup>[22-23,26]</sup>。由于硝化抑制剂对 $NH_3$ 挥发影响在蔬菜上的报道较少,且存在不同争议,因此我们假设添加硝化抑制剂的氮肥造成的 $NH_3$ 挥发与普通氮肥无差异。

### (2) 温室气体排放和碳足迹

基于生命周期评价方法,通过公式(4)~公式(7)计算生产大白菜每公顷和每吨的温室气体排放量。

$$GHG_{\text{排放}} = MS_{\text{-GHG}} + N_2O_{\text{总排放}} \times 44/28 \times 265 \quad (4)$$

$$MS_{\text{-GHG}} = \sum_{i=1}^m PEC_i \times Rate_i \quad (5)$$

$$N_2O_{\text{总排放}} = N_2O_{\text{排放}} + 1\% NH_3_{\text{挥发}} + 2.5\% NO_3_{\text{淋洗}} \quad (6)$$

$$CF = \frac{GHG_{\text{排放}}}{Y_t} \quad (7)$$

式中: $GHG_{\text{排放}}$ 表示大白菜生产每公顷的温室气体排放量, $kg CO_2\text{-eq}\cdot hm^{-2}$ ;  $MS_{\text{-GHG}}$ 表示氮磷钾肥和其他农业投入品的生产和运输过程中的温室气体排放量, $kg CO_2\text{-eq}\cdot hm^{-2}$ ;  $i$ 代表每个农业投入品类别; $PEC_i$ 表示 $i$ 的生产和运输过程中温室气体排放的相关排放系数<sup>[16-21]</sup>,  $Rate_i$ 代表 $i$ 的用量; $N_2O_{\text{总排放}}$ 表示氮肥施用过程直接引起土壤 $N_2O$ 排放和由 $NH_3$ 挥发和 $NO_3$ 淋洗途径间接产生总 $N_2O$ 排放;1.0%和2.5%分别为与 $NH_3$ 挥发和 $NO_3$ 淋洗相关的 $N_2O$ 间接排放系数<sup>[27]</sup>;  $CO_2$ 和 $N_2O$ 的全球增温潜势(以 $CO_2\text{-eq}$ 计)分别为1和265<sup>[28]</sup>;44/28是将 $N_2O\text{-N}$ 转化成 $N_2O$ 的系数; $CF$ 指生产每吨大白菜的温室气体排放量, $kg CO_2\text{-eq}\cdot t^{-1}$ ;  $Y_t$ 代表大白菜总产量, $t\cdot hm^{-2}$ 。

### (3) 环境破坏成本、生态系统净经济效益和单位生态系统净经济效益的活性氮损失与温室气体排放

环境破坏成本(EDC,  $万元\cdot hm^{-2}$ )指温室气体导致的气候变暖、 $NH_3$ 和 $NO_x$ 排放导致的土壤酸化以及氮淋失、径流损失和 $NH_3$ 排放造成的水体富营养化引起的环境破坏经济损失<sup>[29]</sup>。生态系统净经济效益(NEEB,  $万元\cdot hm^{-2}$ )指大白菜生产的净经济效益与环境破坏成本的差值。单位生态系统净经济效益活性氮损失( $Nr_{\text{-NEEB}}$ ,  $g N\cdot 元^{-1}$ )和温室气体排放( $GHG_{\text{-NEEB}}$ ,  $kg CO_2\text{-eq}\cdot 元^{-1}$ )分别表示单位生态系统净经济效益上的活性氮损失量和温室气体排放量。分别通过公式(8)~公式(11)进行计算:

$$EDC = \sum_{i=1}^m (Nr_i A \times DC_i) + CO_2 A \times DC_{CO_2} \quad (8)$$

$$NEEB = NEB - EDC \quad (9)$$

$$Nr_{\text{-NEEB}} = \frac{NF}{NEEB} \quad (10)$$

$$GHG_{\text{-NEEB}} = \frac{CF}{NEEB} \quad (11)$$

式中: $Nr_i A$ 表示活性氮 $i$ 的排放量, $kg N\cdot hm^{-2}$ ;  $DC_i$ 表示单位活性氮 $i$ 造成的经济损失, $元\cdot kg^{-1}$ ;  $CO_2 A$ 表示温室气体的总排放量, $kg CO_2\text{-eq}\cdot hm^{-2}$ ;  $DC_{CO_2}$ 表示单位 $CO_2$ 排放造成的温室效应(以国际碳交易价格表示), $元\cdot t^{-1}$ ;  $NEB$ 表示大白菜的净经济效益, $万元\cdot hm^{-2}$ ;  $CF$ 为碳足迹, $kg CO_2\text{-eq}\cdot t^{-1}$ ;  $NF$ 为氮足迹, $kg N\cdot t^{-1}$ 。 $N_2O$ 既是一种活性氮又是一种温室气体,本研究将其按温室气体进行环境损失的计算。单位活性氮以及温室气体排放所造成的环境破坏经济损失成本参照如下: $NH_3$ 挥发(以 $N$ 计)为37.5  $元\cdot kg^{-1}$ ;硝酸盐(以 $N$ 计)为9.3  $元\cdot kg^{-1}$ ;温室气体(以 $CO_2\text{-eq}$ 计)为174.3  $元\cdot t^{-1}$ <sup>[29-30]</sup>。

### 1.3.4 统计分析

利用SPSS 20.0和Excel 2016软件进行数据统计分析和图表制作。采用LSD法对各处理的数据进行方差分析和显著性检验,显著性水平为0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 对大白菜农学效应的影响

由表2可知,与不施氮相比,施氮使大白菜两年平均总产量和商品产量分别显著提高15.5%~23.2%和18.8%~38.3%。与FP处理相比,OPT1和OPT2处理两年平均总产量分别增加了6.7%和4.2%;平均商品产量分别显著增加了16.4%和9.0%。从表观氮平衡结果来看,相比于FP,OPT1和OPT2处理大白菜地上部平均吸氮量分别提高了2.1%和5.5%,平均氮盈余显著减少了78.1%和78.8%。OPT1和OPT2较FP平均氮肥利用率分别提高了9.6%和11.2%。受基础地力和收获时间的影响,同一处理在2018季的大白菜总产量和氮吸收量高于2019季,而氮肥利用率低于2019季。

### 2.2 对大白菜环境效应的影响

#### 2.2.1 活性氮损失和温室气体排放

如图1所示,FP处理两季平均总活性氮损失高达267  $kg N\cdot hm^{-2}$ ,其中 $N_2O$ 排放、 $NO_3$ 淋洗和 $NH_3$ 挥发损失分别占总活性氮损失的2.60%、68.8%和26.4%;与FP相比,OPT1和OPT2均减少了75.0%的活性氮损失,而 $N_2O$ 排放、 $NO_3$ 淋洗和 $NH_3$ 挥发损失量分别占总活性氮损失的1.60%、54.5%和40.2%。CK、FP、OPT1和OPT2中平均总温室气体排放分别为776、12 565、4 022  $kg CO_2\text{-eq}\cdot hm^{-2}$ 和4 022  $kg CO_2\text{-eq}\cdot hm^{-2}$ 。

表2 不同处理对产量、氮素表观平衡和氮肥利用率的影响

Table 2 Effect of different treatments on yield, apparent nitrogen balance and nitrogen use efficiency

年份 Year	处理 Treatments	总产量 Total yield/ (t·hm <sup>-2</sup> )	商品产量 Commercial yield/ (t·hm <sup>-2</sup> )	氮输入 N input/ (kg N·hm <sup>-2</sup> )	氮吸收 N uptake/ (kg N·hm <sup>-2</sup> )	氮盈余 N surplus/ (kg N·hm <sup>-2</sup> )	氮肥利用率 N use efficiency/%
2018	CK	138±9.53b	79±6.06b	0	152±9.55b	—	—
	FP	144±7.24ab	80±5.02b	833	191±16.00a	642±16.03a	4.69±1.82b
	OPT1	154±10.40a	93±4.36a	315	193±19.92a	122±19.87b	13.02±4.63a
	OPT2	146±7.54ab	84±7.97ab	315	202±13.01a	113±13.03b	15.70±5.20a
2019	CK	90.7±5.16b	56±4.94c	0	92±4.43b	—	—
	FP	121±2.73a	79±4.84b	833	138±9.42a	695±9.41a	5.56±1.61b
	OPT1	129±10.63a	93±5.53a	315	143±7.38a	172±7.44b	16.41±3.38a
	OPT2	130±6.84a	90±3.47a	315	145±14.90a	170±14.93b	17.04±4.73a

注:表中数值为平均值±标准差;同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Values are means ±SD; The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$  levels. The same below.

相比于FP, OPT1和OPT2处理均显著减少68.0%的温室气体排放。氮肥是温室气体排放主要贡献因素, FP、OPT1和OPT2中,由氮肥引起的温室气体排放占总温室气体排放量的88.7%~95.2%,由磷钾肥和其他农业投入品引起的温室气体排放占4.8%~11.3%。

### 2.2.2 氮足迹和碳足迹

由图2可知,两季露地大白菜中,CK、FP、OPT1和OPT2的平均氮足迹分别为0.02、2.04、0.48 kg N·t<sup>-1</sup>和0.49 kg N·t<sup>-1</sup>。相比于FP, OPT1和OPT2处理的氮足迹分别显著降低了76.4%和76.1%。CK、FP、OPT1和OPT2两季平均碳足迹分别为7.1、95.9、28.9 kg CO<sub>2</sub>-eq·t<sup>-1</sup>和29.3 kg CO<sub>2</sub>-eq·t<sup>-1</sup>,与FP处理相比, OPT1和OPT2的碳足迹显著减少了69.9%和69.4%。OPT1与OPT2间氮足迹和碳足迹均无显著差异。另外,因2019季大白菜总产量低于2018季,除CK外,其余各处理的氮足迹和碳足迹在2019季比2018季分别提高了12.4%~19.7%和12.7%~19.4%。

## 2.3 对经济效益和生态系统净经济效益的影响

### 2.3.1 经济效益和生态系统净经济效益

由表3可知,与FP相比, OPT1和OPT2处理两季大白菜平均总收益分别显著提高了16.7%和9.36%,平均净经济效益(NEB)分别显著提高38.4%和33.4%。均使环境破坏成本(EDC)降低了68.6%。因此,相比FP, OPT1和OPT2分别显著提高了106%和97.9%的生态系统净经济效益(NEEB),但OPT1和OPT2间的平均总收益、NEB和NEEB均无显著差异。

### 2.3.2 单位生态系统净经济效益上的活性氮损失和温室气体排放

如图3所示,CK、FP、OPT1和OPT2处理两季平均单位生态系统净经济效益活性氮损失(N<sub>r-NEEB</sub>)分别为1.40、236.6、23.3 g N·元<sup>-1</sup>和25.9 g N·元<sup>-1</sup>;平均单位生态系统净经济效益温室气体排放(GHG<sub>-NEEB</sub>)分别为0.54、11.1、1.40 kg CO<sub>2</sub>-eq·元<sup>-1</sup>和1.56 kg CO<sub>2</sub>-eq·元<sup>-1</sup>。相比FP处理, OPT1和OPT2的N<sub>r-NEEB</sub>

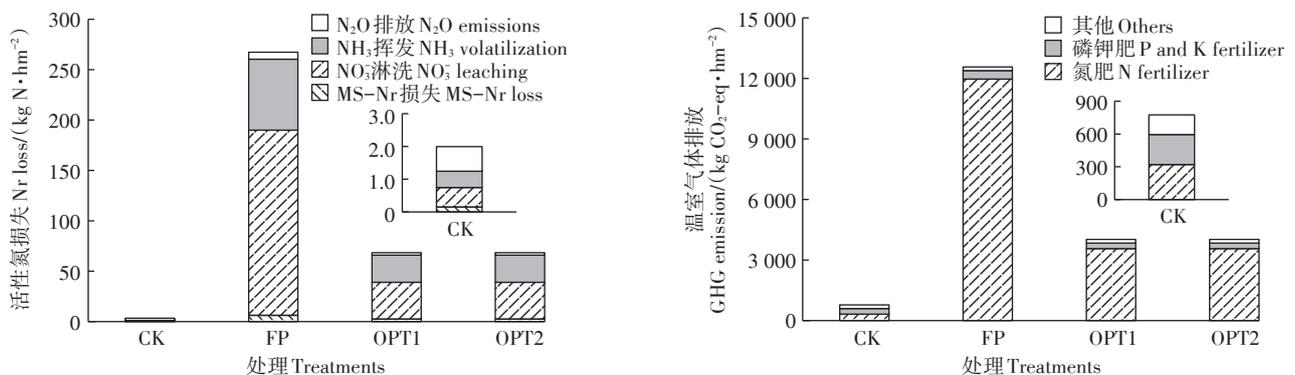
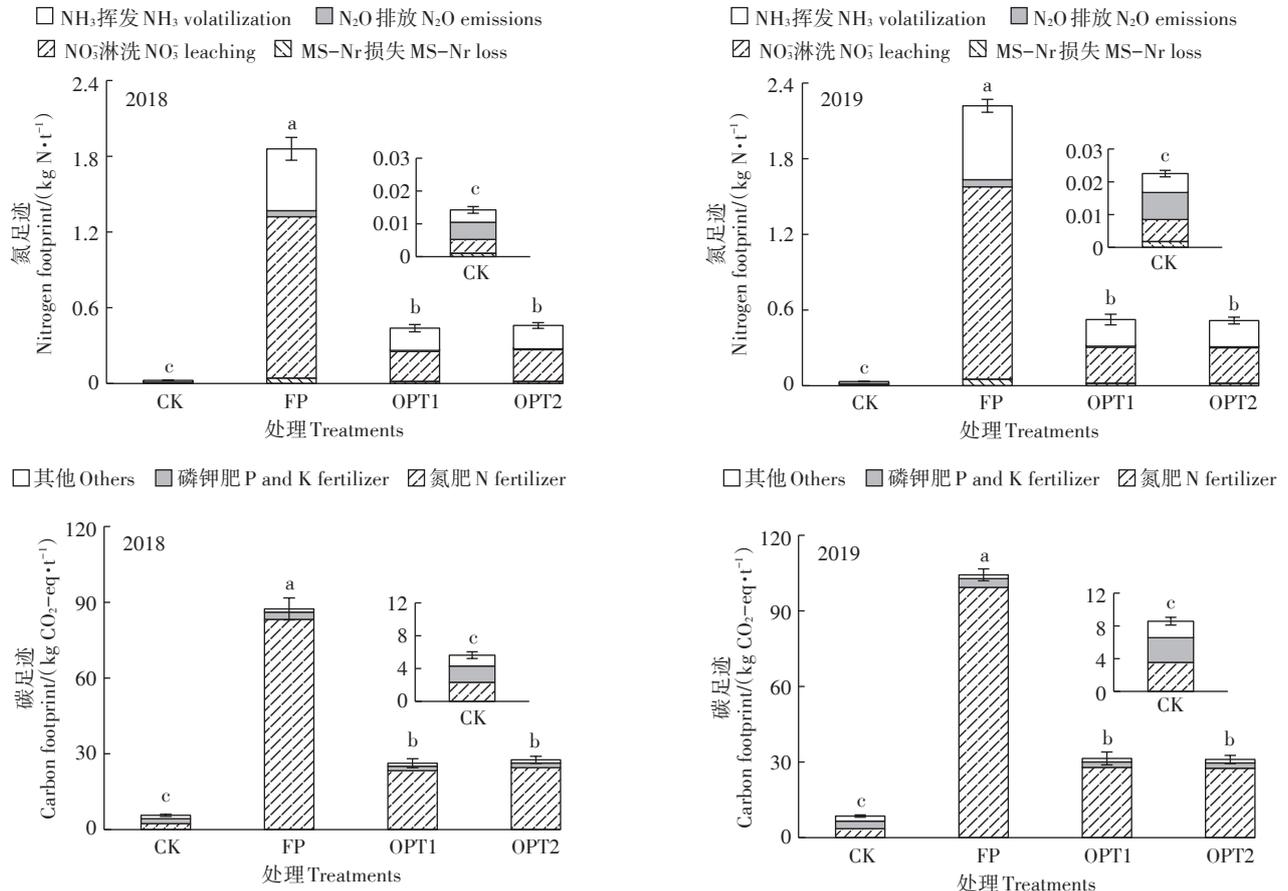


图1 不同处理对活性氮损失和温室气体排放的影响

Figure 1 Effects of different treatments on reactive N emission and GHG emission



不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ). The same below

图2 不同处理对氮足迹和碳足迹的影响

Figure 2 Effects of different treatments on nitrogen footprint and carbon footprint

表3 各处理经济效益和生态系统净经济效益(万元· $\text{hm}^{-2}$ )

Table 3 Economic benefits and net economic benefits of ecosystem in each treatment(万元· $\text{hm}^{-2}$ )

年份 Year	处理 Treatments	总收益 Total income	投入成本 Input costs	净经济效益 Net economic benefit	环境破坏成本 Environmental damage cost	生态系统净经济效益 Net ecosystem economic benefit
2018	CK	3.93±3.04b	2.07	1.87±3.04a	0.02	1.85±3.04a
	FP	4.02±2.52b	2.69	1.34±2.52b	0.65	0.68±2.52b
	OPT1	4.64±2.19a	2.73	1.91±2.20a	0.21	1.71±2.20a
	OPT2	4.20±3.98ab	2.50	1.70±3.98ab	0.21	1.50±3.98a
2019	CK	3.33±2.96c	2.13	1.20±2.96c	0.02	1.19±2.96b
	FP	4.74±2.92b	2.67	2.07±2.92b	0.65	1.41±2.92b
	OPT1	5.57±3.30a	2.76	2.81±3.30a	0.21	2.60±3.30a
	OPT2	5.38±2.07a	2.54	2.85±2.07a	0.21	2.64±2.07a

分别显著降低了90.2%和89.1%,GHG<sub>-NEEB</sub>分别显著降低了87.4%和86.0%;OPT1和OPT2处理间的N<sub>F-NEEB</sub>和GHG<sub>-NEEB</sub>均无显著差异。此外,除CK外的其余各处理在2018季的GHG<sub>-NEEB</sub>和N<sub>F-NEEB</sub>均高于2019季。

### 3 讨论

两季露地大白菜试验结果表明,相比FP,在显著减少62.0%氮肥用量且配施硝化抑制剂的优化管理下(OPT1和OPT2),两季大白菜平均总产量和商品产

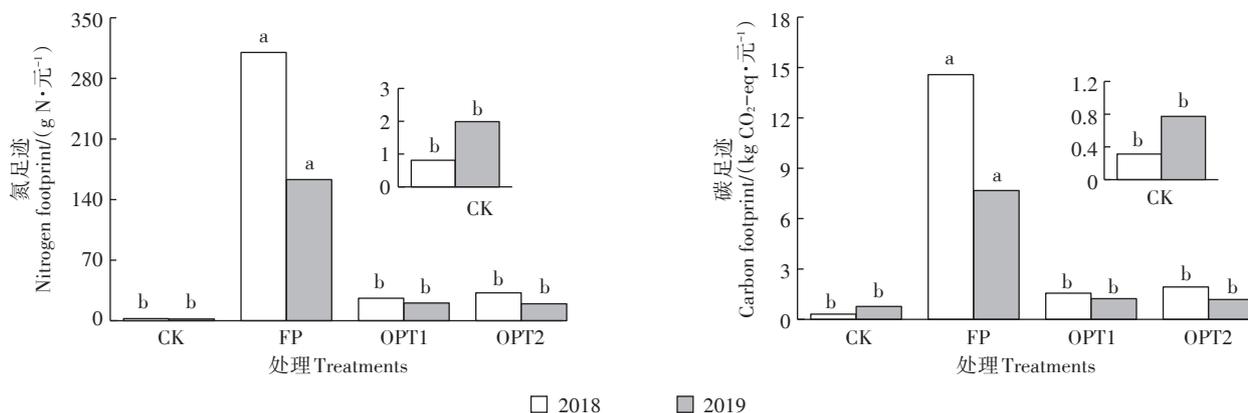


图3 各处理单位生态系统净经济效益上的氮足迹和碳足迹

Figure 3 Nitrogen footprint and carbon footprint on per net economic ecosystem benefits in each treatment

量有增产趋势,与前人报道结果类似<sup>[31-32]</sup>。原因可能是:一方面,FP处理中高氮输入会造成土壤酸化和无机氮大量累积,使作物根系受到抑制,导致蔬菜产量降低<sup>[33]</sup>。基于作物需求特征减少氮肥用量,减少土壤中氮素的盈余以维持合理的根区氮素养分浓度,提供适宜根系生长的养分环境,有利于作物的生长<sup>[34]</sup>。另一方面,硝化抑制剂通过延缓铵态氮向硝态氮转化,使氮素供应在空间和时间上更加平缓,同时有效减少硝酸盐的淋洗损失,促进蔬菜对氮素的吸收和减少氮素损失,提高氮肥利用率<sup>[35]</sup>。本研究中OPT1和OPT2较FP显著减少了78.1%和78.8%的氮素表现盈余,分别增加了2.1%和5.5%的大白菜氮吸收量,氮肥利用率分别提高9.6%和11.2%,使大白菜平均总产量和商品产量均有所提高,但增产并不显著。同时,尽管OPT1和OPT2处理间添加氮肥形态不同,但大白菜的氮吸收量差异不显著,从而使这两个处理间的产量也没有显著差异。

西南地区露地大白菜系统由于施肥量大而导致较高环境代价,本研究结果表明目前每季露地大白菜单位面积上温室气体排放量(12 565 kg CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>)是我国露地大白菜生产中平均排放量的2.2倍<sup>[36]</sup>。因此,降低该地区蔬菜生产的环境代价尤为重要。通过减氮配施硝化抑制剂策略,可以较FP显著降低单位产量上76.1%~76.4%的氮足迹和69.4%~69.9%的碳足迹,环境代价降低的原因是:首先,氮肥是活性氮损失和温室气体排放的主要贡献因素,减少氮肥用量能够减少温室气体和活性氮的排放<sup>[37]</sup>。OPT1和OPT2较FP显著减少约62.0%的氮肥用量,使单位面积上的活性氮损失和温室气体排放降低75.0%和68.0%。其次,硝化抑制剂抑制土壤硝化作用,延长铵态氮在

土壤中的存留时间,减少N<sub>2</sub>O、NO排放和硝态氮淋洗,直接或间接降低氮肥施用对环境的影响<sup>[10-11]</sup>。研究表明,应用Nitrapyrin和DCD使菜地土壤中的N<sub>2</sub>O和NO排放量分别降低1.8%~61.0%和0.8%~79.5%,且在常规尿素中添加1%的DMPP可减少22.0%~45.3%的无机氮进入地表径流<sup>[12,38]</sup>。本研究中OPT1和OPT2较FP使NO<sub>3</sub>淋洗和N<sub>2</sub>O排放引起的氮损失总量分别降低80.1%和83.9%,显著减少了露地大白菜系统的活性氮损失量和温室气体排放量。最后,减氮配施硝化抑制剂策略提高了单位面积大白菜产量,OPT1和OPT2较FP使平均总产量增加了6.7%和4.2%。因氮肥用量和产量无显著差异,故OPT1和OPT2之间的氮足迹和碳足迹无显著差异。综合而言,减氮配施硝化抑制剂策略增加了露地大白菜产量并降低了单位面积和单位产量上的氮足迹和碳足迹,进而提升了大白菜净经济效益以及使由活性氮损失和温室气体排放造成的环境破坏成本显著降低。因此,OPT1和OPT2较FP分别显著提高了106.0%和97.9%的生态系统净经济效益(NEEB),进而分别降低了90.0%的单位生态系统净经济效益的氮足迹(N<sub>r-NEEB</sub>)以及86.7%的单位生态系统净经济效益的碳足迹(GHG<sub>-NEEB</sub>)。但OPT1和OPT2之间的NEEB、N<sub>r-NEEB</sub>和GHG<sub>-NEEB</sub>均无显著差异,这主要是由产量、氮足迹和碳足迹没有显著差异造成的。

本研究结果表明,减氮配施硝化抑制剂策略可在减少氮肥投入和降低环境风险的同时保障蔬菜产量并提高氮肥利用率,兼顾经济效益最大化和环境友好。但在研究中仍存在不确定性和不足之处。首先,由于目前关于硝化抑制剂在菜地土壤对活性氮损失排放的研究相对较少,研究中采用王孝忠<sup>[3]</sup>基于我国

露地蔬菜研究数据建立的氮素损失模型和前人在蔬菜应用硝化抑制剂的研究中确定的活性氮损失相关排放参数进行相关计算<sup>[22-26]</sup>,然而这些排放参数因气候、土壤、环境和农田管理措施等差异而在不同区域存在差异,对研究结果存在一定的不确定性。其次,本研究主要关注减氮配施硝化抑制剂对大白菜产量、活性氮损失和温室气体排放的影响,对减氮配施硝化抑制剂处理对大白菜品质的影响未开展进一步探究,尤其氮钙互作对大白菜品质和货架期的影响。因此,需要进一步开展在多区域、多环境条件下的相关研究,以全面评价减氮配施硝化抑制剂策略对我国蔬菜系统农学效应、环境效应和品质效应的影响。

#### 4 结论

在西南地区露地大白菜生产中采用减氮配施硝化抑制剂(DMP 衍生物)的优化管理策略,相比于农户习惯,提高了大白菜总产量、商品产量、净经济效益和氮肥利用率,同时,显著降低了整个大白菜生命周期的氮足迹、碳足迹和环境破坏成本,显著提高大白菜生产生态系统净经济效益,显著降低单位生态系统净经济效益上的氮足迹和碳足迹。综上所述,基于区域气候、土壤和田间管理措施特点,采用减氮配施硝化抑制剂的优化管理策略可保证西南地区蔬菜稳产增产并可提高经济效益,同时降低环境代价,实现蔬菜绿色生产。

#### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2019.  
National Bureau of Statistics. China agricultural statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [2] Ti C P, Luo Y X, Yan X Y. Characteristics of nitrogen balance in open-air and greenhouse vegetable cropping systems of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 18508-18518.
- [3] 王孝忠. 我国蔬菜生产的环境代价、减排潜力与调控途径: 以辣椒为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 43-66.  
WANG Xiao-zhong. Environmental impacts, mitigation potentials and management approaches in Chinese vegetable production system: Pepper as a case[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018: 43-66.
- [4] 李玥, 巨晓棠. 农田氧化亚氮减排的关键是合理施氮[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 842-851.  
LI Yue, JU Xiao-tang. Rational nitrogen application is the key to mitigate agricultural nitrous oxide emission[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 842-851.
- [5] 夏龙, 颜晓元, 蔡祖聪. 我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 834-841.  
XIA Long-long, YAN Xiao-yuan, CAI Zu-cong. Research progress and prospect of greenhouse gas mitigation and soil carbon sequestration in croplands of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 834-841.
- [6] He F, Chen Q, Jiang R, 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.
- [7] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 不同施氮水平对菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2238-2243.  
QIU Wei-hong, LIU Jin-shan, HU Cheng-xiao, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrous oxide emission from a typical intensive vegetable cropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2238-2243.
- [8] Akiyama H, Yan X, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N<sub>2</sub>O and NO from agricultural soils: Meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16: 1837-1846.
- [9] Qiao C, Liu L, Hu S, et al. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1249-1257.
- [10] 俞巧钢, 殷建祯, 马军伟, 等. 硝化抑制剂 DMPP 应用研究进展及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1057-1066.  
YU Qiao-gang, YIN Jian-zhen, MA Jun-wei, et al. Effects of nitrification inhibitor DMPP application in agricultural ecosystems and their influencing factors: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6): 1057-1066.
- [11] 马芬, 杨荣全, 郭李萍. 控制氮肥施用引起的活性氮气体排放: 脲酶/硝化抑制剂研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 908-922.  
MA Fen, YANG Rong-quan, GUO Li-ping, et al. Decrease the emission of active nitrogen gases in nitrogen fertilizer application: Research progresses and perspectives of urease/nitrification inhibitors [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 908-922.
- [12] Fan C, Li B, Xiong Z. Nitrification inhibitors mitigated reactive gaseous nitrogen intensity in intensive vegetable soils from China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 612: 480-489.
- [13] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.  
Editorial Board of China Agriculture Yearbook. China rural statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.
- [14] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.  
ZHANG Fu-suo, CHEN Xin-ping, CHEN Qing. Fertilization guidelines for main crops in China[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.
- [15] Leach A M, Galloway J N, Bleeker A, et al. A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment[J]. *Environmental Development*, 2012, 1(1): 40-66.
- [16] Liang L, Ridoutt B G, Lal R, et al. Nitrogen footprint and nitrogen use efficiency of greenhouse tomato production in north China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 285-296.

- [17] 岳善超. 小麦玉米高产体系的氮肥优化管理[D]. 北京: 中国农业大学, 2013:80.  
YUE Shan-chao. Optimum nitrogen management for high-yielding wheat and maize cropping system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013:80.
- [18] Clark S, Khoshnevisan B, Sefeedpari P. Energy efficiency and greenhouse gas emissions during transition to organic and reduced-input practices: Student farm case study[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 88:186-194.
- [19] Pishgar-Komleh S H, Omid M, Heidari M D. On the study of energy use and GHG (greenhouse gas) emissions in greenhouse cucumber production in Yazd Province[J]. *Energy*, 2013, 59(15):63-71.
- [20] Cui Z L, Yue S C, Wang G L, et al. In-season root-zone N management for mitigating greenhouse gas emission and reactive N losses in intensive wheat production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(11):6015-6022.
- [21] Zhang W F, Dou Z X, He P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21):8375-8380.
- [22] 兰翔. 有机无机配施及DMPP对土壤N<sub>2</sub>O排放和氨氧化微生物的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017:13-26.  
LAN Xiang. Effects of organic fertilizer and DMPP on N<sub>2</sub>O emission and ammonia-oxidizing microorganisms[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017:13-26.
- [23] Yi Q, Tang S, Fan X, et al. Effects of nitrogen application rate, nitrogen synergist and biochar on nitrous oxide emissions from vegetable field in south China[J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(4):e175325.
- [24] Cui M, Sun X, Hu C, et al. Effective mitigation of nitrate leaching and nitrous oxide emissions in intensive vegetable production systems using a nitrification inhibitor, dicyandiamide[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(5):722-730.
- [25] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 硝化抑制剂双氰胺对菜地土壤N<sub>2</sub>O排放的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(11):3188-3192.  
QIU Wei-hong, LIU Jin-shan, HU Cheng-xiao, et al. Mitigation of nitrous oxide emissions in vegetable system by treating soil with dicyandiamide, a nitrification inhibitor[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(11):3188-3192.
- [26] 李晓兰, 兰翔, 潘振鹏, 等. 有机肥及DMPP对蔬菜生产及硝态氮淋失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(2):118-126.  
LI Xiao-lan, LAN Xiang, PAN Zhen-peng, et al. Influence of organic fertilizer and adding DMPP on vegetable production and the nitrate leaching[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2018(2):118-126.
- [27] Perrin A, Basset-Mens C, Gabrielle B. Life cycle assessment of vegetable products: A review focusing on cropping systems diversity and the estimation of field emissions[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(6):1247-1263.
- [28] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [29] Xia Y Q, Yan X Y. Ecologically optimal nitrogen application rates for rice cropping in the Taihu Lake region of China[J]. *Sustainability Science*, 2012, 7(1):33-44.
- [30] Xia L L, Wang S W, Yan X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 197:118-127.
- [31] 尹兴, 张丽娟, 李博文, 等. 氮肥与双氰胺配施对温室番茄生产及活性氮排放的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(9):1725-1734.  
YIN Xing, ZHANG Li-juan, LI Bo-wen, et al. Effects of nitrogen fertilizer and dicyandiamide application on tomato growth and reactive nitrogen emissions in greenhouse[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(9):1725-1734.
- [32] 陈浩, 李博, 熊正琴. 减氮及硝化抑制剂对菜地氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4):938-947.  
CHEN Hao, LI Bo, XIONG Zheng-qin. Effects of N Reduction and nitrification inhibitor on N<sub>2</sub>O emissions in intensive vegetable field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4):938-947.
- [33] Li B, Fan C H, Zhang H, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 100:10-19.
- [34] Wang X Z, Liu B, Wu G, et al. Cutting carbon footprints of vegetable production with integrated soil - crop system management: A case study of greenhouse pepper production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254:120158.
- [35] 杨俊刚, 李艳梅, 孙焱鑫, 等. UAN添加氮肥抑制剂对生菜产量、品质及土壤氮平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1):67-74.  
YANG Jun-gang, LI Yan-mei, SUN Yan-xin, et al. Effects of urea ammonium nitrate (UAN) with N inhibitor on lettuce yield, quality and soil N balance[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2020(1):67-74.
- [36] 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 等. 我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放[J]. 环境科学, 2020, 41(7):3451-3417.  
ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, et al. Greenhouse gas emissions for typical open-field vegetables production in China [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7):3451-3417.
- [37] Xia L L, Kee L S, Chen D L, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5):1917-1925.
- [38] Yu Q, Ma J, Zou P, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers plus nitrification inhibitor DMPP on nitrogen runoff loss in vegetable soils[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(1):472-481.