

## 江苏设施菜地控释氮肥一次性基施增效减排效果研究

徐丽萍, 巨昇容, 王远, 刘之广, 闵炬, 施卫明

### 引用本文:

徐丽萍, 巨昇容, 王远, 等. 江苏设施菜地控释氮肥一次性基施增效减排效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(5): 1106-1114.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1211>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 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>

### 氮肥施用水平及种类对生菜产量及菜地N<sub>2</sub>O排放的影响

易琼, 黄旭, 张木, 黄巧义, 逢玉万, 唐拴虎

*农业环境科学学报*. 2016, 35(10): 2019-2025 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0471>

### 控释氮肥减量施用对春玉米土壤N<sub>2</sub>O排放和氨挥发的影响

谢勇, 荣湘民, 张玉平, 何欣, 石敦杰, 刘强

*农业环境科学学报*. 2016, 35(3): 596-603 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.03.025>

### 控释肥对东北春玉米产量和土壤氨挥发的影响

宋梓璇, 李虎, 李建政, 尹彩霞, 王迎春, 山楠, 王立刚

*农业环境科学学报*. 2018, 37(10): 2342-2349 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1762>

### 清液肥对滴灌棉田NH<sub>3</sub>挥发和N<sub>2</sub>O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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

徐丽萍, 巨昇容, 王远, 等. 江苏设施菜地控释氮肥一次性基施增效减排效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 1106–1114.  
XU Li-ping, JU Sheng-rong, WANG Yuan, et al. Efficiency and emission reduction of a one-time basal application of controlled release nitrogen fertilizer in intensive vegetable production in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5): 1106–1114.



开放科学 OSID

# 江苏设施菜地控释氮肥一次性基施增效减排效果研究

徐丽萍<sup>1</sup>, 巨昇容<sup>2</sup>, 王远<sup>2</sup>, 刘之广<sup>3</sup>, 闵炬<sup>2\*</sup>, 施卫明<sup>2</sup>

(1. 南京市六合区农业技术推广中心耕地质量保护站, 南京 211500; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

**摘要:**江苏设施蔬菜集约化程度高, 劳动力需求大, 氮肥用量大, 面源污染问题突出。控释氮肥在该地区集约化蔬菜上应用后的减量、增效和减排潜力尚缺乏研究。本研究通过连续三年田间试验, 设置4个施肥处理: 常规施尿素氮 100%N(N1)、常规施尿素氮 70%N(N2)、基肥一次性施氮 70%N(N3, 控释氮与尿素氮的比例为 7:3)、基肥和一次追肥 70%N(N4, 基肥氮为控释氮, 追肥氮全部为尿素氮, 控释氮与尿素氮的比例为 7:3), 研究其对集约化花椰菜和番茄产量、环境效应和经济效益的影响。结果表明: 与 N1、N2 和 N4 相比, N3 处理的产量和利润每季均为最高, 花椰菜和番茄平均产量分别达到 86.4 t·hm<sup>-2</sup> 和 87.0 t·hm<sup>-2</sup>, 利润分别达到 12.0 万元·hm<sup>-2</sup> 和 12.2 万元·hm<sup>-2</sup>, 氨挥发量最低, 仅为 4.4 kg N·hm<sup>-2</sup> 和 9.3 kg N·hm<sup>-2</sup>, 四季蔬菜种植后土壤中硝态氮的残留量最低。与 N1 处理相比, N3 处理可使花椰菜和番茄分别平均增产 3.7% 和 21.3%, 分别增收 10.7% 和 40.3%, 并分别平均减少 64.0% 和 46.9% 氨挥发。基于此, 在江苏设施蔬菜种植上, 与常规(N1)相比, 控释氮肥与尿素 7:3 混合一次性基施, 可减氮 30% 且增效减排效果显著, 值得在生产上推广应用。

**关键词:** 蔬菜; 氨挥发; 硝酸盐残留; 经济效益; 环境效应

中图分类号: S626 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)05-1106-09 doi:10.11654/jaes.2020-1211

## Efficiency and emission reduction of a one-time basal application of controlled release nitrogen fertilizer in intensive vegetable production in Jiangsu Province, China

XU Li-ping<sup>1</sup>, JU Sheng-rong<sup>2</sup>, WANG Yuan<sup>2</sup>, LIU Zhi-guang<sup>3</sup>, MIN Ju<sup>2\*</sup>, SHI Wei-ming<sup>2</sup>

(1. Agricultural Technology Popularization Center Cultivated Land Quality Protection Station, Nanjing 211500, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

**Abstract:** In Jiangsu Province, there is a high degree of intensive vegetable production, a great demand for labor, a large amount of nitrogen (N) fertilizer application, and non-point source pollution. The potential of increasing the efficiency and reducing the investment and emission of controlled-release N fertilizer applied to intensive vegetables in the Yangtze River delta region still lacks research. In this study, four fertilization treatments were applied through three consecutive seasons of field experiments: conventional fertilization, 100% N (N1); conventional N fertilization reduced by 30%, i.e., 70% N (N2); based on the 30% N reduction (i.e., 70% N), a one-time application of controlled-release N fertilizer and urea N at a ratio of 7:3 (N3); and 70% N, with controlled-release N fertilizer applied basally and urea N applied topically at a ratio of 7:3 (N4). The results showed that the N3 treatment had the highest yield and profit compared with the other treatments, with the average yield of cauliflower and tomato reaching 86.4 t·hm<sup>-2</sup> and 87.0 t·hm<sup>-2</sup>, respectively, and the profit reaching 120 000 yuan·hm<sup>-2</sup> and 122 000 yuan·hm<sup>-2</sup>. This treatment also had the lowest ammonia volatilization emission (4.4 kg N·hm<sup>-2</sup> and 9.3 kg

收稿日期: 2020-10-21 录用日期: 2021-01-08

作者简介: 徐丽萍(1978—), 女, 江苏兴化人, 高级农艺师, 主要从事土壤肥料与植物营养研究。E-mail: 57472276@qq.com

\*通信作者: 闵炬 E-mail: jmin@issas.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0801102); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(18)1005)

Project supported: National Key R&D Program of China(2016YFD0801102); The Agricultural Science and Technology Innovation Fund of Jiangsu Province, China(CX(18)1005)

$\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) and the lowest nitrate-N residue in the soil after three seasons of vegetable cultivation. Compared with the N1 treatment, the yield of cauliflower and tomato in the N3 treatment increased by 3.7% and 21.3%, respectively, the profit increased by 10.7% and 40.3%, respectively, and the ammonia volatilization emission was reduced by 64.0% and 46.9%, respectively. Based on this, compared with the conventional fertilization (N1) treatment, the controlled release of N fertilizer and urea at a 7:3 ratio with a one-time base application (the N3 treatment) can reduce the N application by 30% and significantly increase the efficiency and reduces N emissions; this application method is worthy of promotion in intensive vegetable production in Jiangsu Province.

**Keywords:** vegetables; ammonia volatilization; nitrate residue; economic profit; environmental effect

我国是全世界设施蔬菜种植面积最大的国家,集约化程度高,增产主要依靠速效氮肥的大量投入,但由于其在施用过程中存在用量大、活性高、养分释放快、损失途径多等特点<sup>[1]</sup>,氮肥的当季利用率很低,仅为10%~18%<sup>[2-3]</sup>。大量氮素流失到环境中,过量施肥导致的面源污染日益严重,尤其是水网交错的长三角地区,加上江苏设施蔬菜种植日趋集约化、规模化,劳动力需求大,该地区设施蔬菜体系亟须节本增效且环境友好的施肥模式。缓控释氮肥是缓慢释放氮肥的统称,包括缓释氮肥和控释氮肥两类。缓释氮肥是指用物理、化学、生物化学方法制得的使养分缓慢释放的肥料,而控释氮肥是指采用聚合物包膜、可定量控制肥料中养分释放数量和释放期的肥料<sup>[4]</sup>。缓控释氮肥因其缓慢释放养分的特性从而能基本满足作物不同生长阶段的养分需求,且与速效氮肥相比,可减少氮素损失、提高氮肥利用效率<sup>[5]</sup>。近些年来缓控释氮肥发展迅速,部分产品已达国外同类产品的质量与标准,在水稻、小麦等大田作物上的应用开展了大量研究。如缓控释肥可以使水稻增产11.6%~18.6%,显著减少基肥期氨挥发量<sup>[6-7]</sup>,使鲜食糯玉米增收58.63%等<sup>[8]</sup>。研究也表明,与缓控释氮肥和尿素掺混后一次性基施相比,缓控释氮肥基施后在适宜的时期补施一定量的尿素对增加水稻产量效果更佳<sup>[5]</sup>。在

集约化蔬菜种植体系中,缓控释氮肥一次性基施是否可维持产量、增效和减排的效果如何,尚不清楚。为此,本研究选取在江苏设施菜地广泛种植的番茄和花椰菜为研究对象,对控释氮肥不同施肥运筹下的产量、氨挥发、土壤硝态氮残留以及经济效益进行观测和分析,为江苏设施蔬菜控释氮肥的应用提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验于2018年在江苏省南京市六合龙袍现代农业园区(118.83°E, 32.35°N)设施蔬菜种植基地进行。该地属亚热带季风气候,年均气温17.4℃,4—8月月平均气温16.1~28.3℃(图1),年均无霜期240 d左右,年均日照时数1700 h,年均降水量1177 mm。土壤质地为砂壤土,0~20 cm耕层土壤基础性质为:有机质22.2  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮1.5  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,硝态氮70.6  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,铵态氮13.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效磷86.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾104.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,pH为5.6(水土比2.5:1)。

### 1.2 试验处理和田间管理

试验设置4个处理,N1:常规化肥氮量( $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),其中基肥与两次追肥分别占总施氮量的30%、40%和30%;N2:常规施氮量的70% ( $175\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),

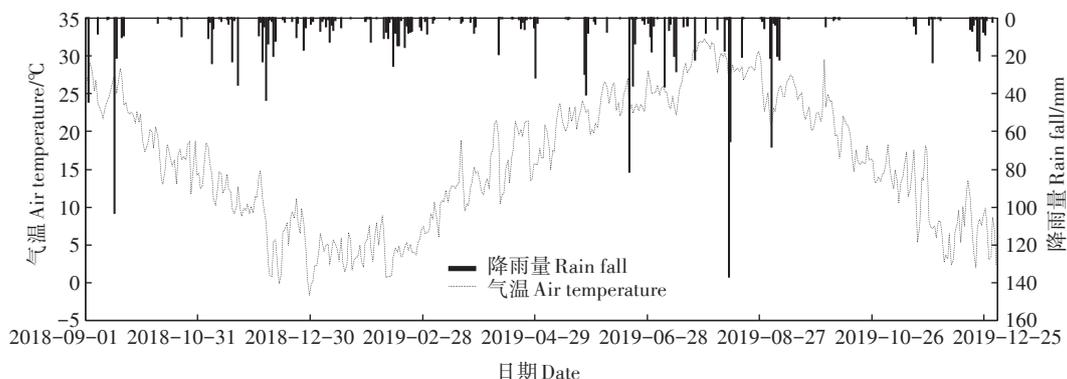


图1 2018年9月到2019年12月日均气温和降雨量变化

Figure 1 Daily mean air temperature and daily precipitation from September 2018 to December 2019

基追肥比例与N1相同;N3:常规施氮量的70%(175 kg N·hm<sup>-2</sup>),控释尿素与普通尿素按7:3的比例作为基肥一次性全部施入;N4:常规施氮量的70%(175 kg N·hm<sup>-2</sup>),其中70%的控释尿素作为基肥,第1次追肥期间不追肥,第2次追肥时施入30%的普通尿素。试验处理见表1。常规施氮量是综合前人研究和试验地周围当地农民的习惯用量来确定,花椰菜和番茄均为每季250 kg N·hm<sup>-2</sup>[9-12]。控释氮肥由山东金正大生态工程集团股份有限公司提供(含N量43%,释放期3个月)。各处理的磷钾肥施用量相同,分别为90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>和200 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>,作为基肥施入。每个处理4次重复,小区面积11 m<sup>2</sup>,采用随机区组排列。

供试蔬菜分别为花椰菜(品种为台松120)和番茄(品种为东圣2号)。花椰菜于2018年9月6日和2019年9月9日定植,两次追肥时间为花椰菜的莲座期和结球期;番茄于2019年4月3日定植,两次追肥在番茄的花期和第一果膨大期。花椰菜和番茄在同一地块连续种植,同一处理每季施肥量相同。基肥撒施后翻耕覆土,定植后的灌溉和追肥采用滴灌的方式,每次施肥灌溉水用量控制在135~180 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,其余田间管理措施与当地种植习惯相同。

### 1.3 样品采集与测定

所有小区的花椰菜成熟后统一采摘记产,所有小区的成熟番茄分5次进行采摘计产,5次采摘全部完成后累加作为小区产量。2019年花椰菜季结束后采集各小区0~20、20~40 cm和40~50 cm土层的土壤样品,采用紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量。氨挥发测定采用密闭室通气法,在各小区预埋1个直径为15 cm、高30 cm的PVC圆筒为采样箱,密闭箱底面积为0.017 7 m<sup>2</sup>,并使用胶带密封连接部分。观测时,调整换气速率在每分钟15次以上,连续抽气2~4 h,用加有80 mL的2%硼酸液的洗气瓶吸收氨气,用标定过的标准硫酸滴定溶液中的氨气。施肥后每日测定1次,连续观测至氨挥发低于检测限度。

表1 各处理氮肥施用情况(kg N·hm<sup>-2</sup>)

Table 1 Nitrogen application of each treatment(kg N·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatments	总氮量 Total N applied	基肥 Base fertilizer	第1次追肥(莲座/花期) 1 <sup>st</sup> topdressing (rosette stage/ anthesis stage)	第2次追肥(结球/果实膨大期) 2 <sup>nd</sup> topdressing (heading stage/ fruit expanding period)
N1	250	125	62.5	62.5
N2	175	87.5	43.75	43.75
N3	175	122.5*+52.5	—	—
N4	175	122.5*	—	52.5

注:\*标记表示肥料种类为控释氮肥,未标记的氮肥种类为尿素。

Note:\* labeled indicates that the fertilizer type is controlled-release N fertilizer and the unlabeled N fertilizer type is urea.

### 1.4 数据分析

采用Excel软件对数据进行基础统计,SPSS 18.0软件进行方差分析和多重比较,Origin 2019软件作图,图中数据为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 花椰菜和番茄产量

不同施肥处理的花椰菜和番茄产量见表2,可以看出两季花椰菜产量均为N1处理最低,N3、N4处理最高,但各处理间的差异未达显著水平。不同处理的番茄产量表现为N3处理番茄产量最高,与最低的N1处理相比增产21.3%,显著高于N1、N2处理;其次是N4处理,番茄产量显著高于N1处理,增产可达14.1%。综合两种作物来看,与常规施氮相比,其他各处理均有一定程度的增产,这说明在习惯施氮的基础上减施30%氮肥可以提高蔬菜产量;与不施用控释氮肥的处理N2相比,N3、N4三季均有产量的提高,这说明70%控释氮肥+30%尿素氮的施肥方式可以提高蔬菜产量,其中将控释氮肥和化肥作为基肥一次性施入(N3处理)可使蔬菜产量达到最高。

### 2.2 不同氮肥施用量下的土壤氨挥发

对花椰菜和番茄3个时间段(1次基肥+2次追肥)的氨挥发进行观测,由图2可以看出,每次施肥后

表2 不同处理对花椰菜和番茄产量的影响(t·hm<sup>-2</sup>)

Table 2 Effect of different treatments on yields of cauliflower and tomato(t·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatments	2018年花椰菜 2018 cauliflower	2019年番茄 2019 tomato	2019年花椰菜 2019 cauliflower
N1	105.3±2.5a	71.7±2.8c	62.1±1.6a
N2	105.4±1.7a	77.7±1.6bc	63.9±2.1a
N3	107.3±3.1a	87.0±1.1a	65.5±4.3a
N4	107.6±4.0a	81.8±8.6ab	62.5±4.3a

注:同一列数据后的不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note:The different letters in a column indicate significant differences among treatments at P<0.05 level. The same below.

的1~3 d内,氨挥发日排放量达到最高,随后逐渐降低。其中,N3处理在每个施肥期氨挥发量都较低,基肥阶段一次性施入所有氮肥并没有显著提高氨挥发日排放量,且在两个追肥期始终保持最低水平,最高不超过 $0.26 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

不同处理的花椰菜和番茄在各阶段的氨挥发累积量见表3,可以看出每个种植季土壤氨挥发总累积量均为N1处理最高,N3处理最低。从2018年花椰菜季氨挥发的积累情况来看,总体差异并不显著,与氨挥发累积量最高的N1处理相比,累积量最低的N3处理降低了45.5%,差异主要表现在第1次追肥期间,N3、N4处理的氨挥发累积量显著低于N1处理。2019

年番茄季,3个减氮处理氨挥发总累积量均显著低于N1处理,其中N3降低氨挥发量的效果最好,基肥期虽然氨挥发量最高,但之后的两个追肥期均保持最低,第2次追肥期间几乎没有氨挥发的排放,与N1处理相比,氨挥发总量降低了46.9%。2019年花椰菜季,4个处理之间的氨挥发总累积量差异显著,从高到低为 $\text{N1} > \text{N2} > \text{N4} > \text{N3}$ ,与N1处理相比,N3处理的氨挥发总累积量减少了82.9%。综合3季来看,虽然N3处理在基肥阶段一次性施入所有氮肥,但氨挥发累积量均未显著高于N1、N2处理,在2019年花椰菜季还显著低于N1、N2处理,追肥期N3处理的氨挥发量也一直保持较低水平,所以从氨挥发的角度来看,N3处

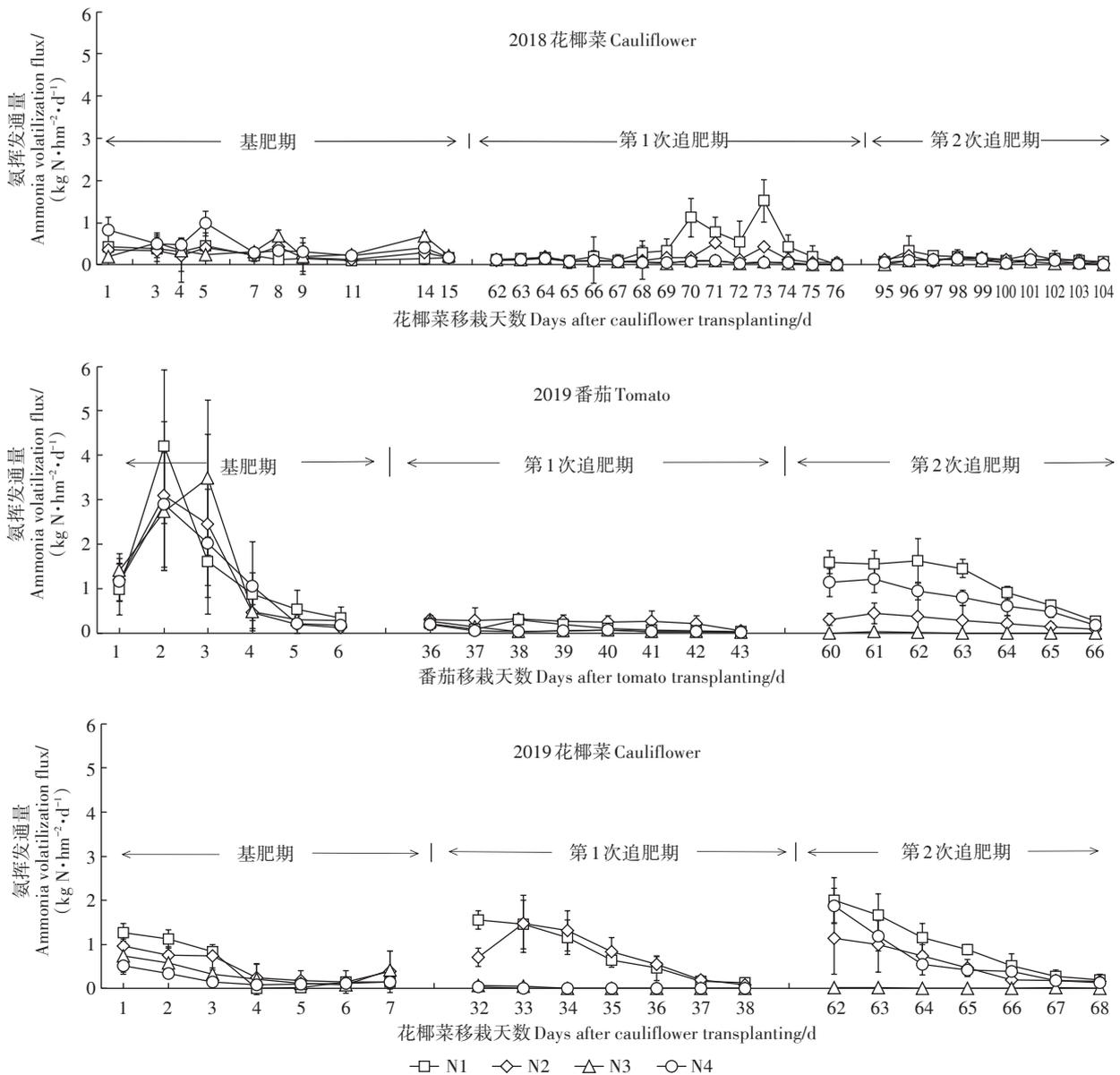


图2 氨挥发通量的动态变化

Figure 2 Dynamics of the ammonia volatilization flux

理的环境排放最低。

### 2.3 不同氮肥施用量下土壤硝态氮含量

不同处理连续三季种植后土壤硝态氮含量见表4。N1处理0~50 cm土层中的硝态氮含量显著高于其他处理,其中主要在0~20 cm土层内的硝态氮含量显著高于其他处理,平均高出了219.4 mg·kg<sup>-1</sup>,这说明在常规施氮量的基础上减施30%可以显著减少土壤中硝态氮的含量。N3处理0~50 cm土壤中的硝态氮含量显著低于其他处理,与N1处理相比,N3处理的硝态氮含量减少了43.3%。N3处理在各层土壤中的硝态氮含量均为最低,在20~40 cm和40~50 cm土层中的硝态氮含量显著低于其他处理,原因可能在于其他处理都在后期追施了尿素。

### 2.4 不同氮肥施用量下的经济效益分析

各施肥处理所施用的肥料价格如下:尿素氮4.35元·kg<sup>-1</sup>、控释氮5.95元·kg<sup>-1</sup>、磷4.17元·kg<sup>-1</sup>、钾3.67元·kg<sup>-1</sup>,日常用工每季2.7万元·hm<sup>-2</sup>,包括打药、除草和作物采摘,花椰菜和番茄平均价格为2元·kg<sup>-1</sup>。通过对不同处理下花椰菜和番茄的经济效益分析可以看出(表5),不同处理的利润在花椰菜季和番茄季均表现为N1<N2<N4<N3(2019年花椰菜季为N4<N2),

与常规施氮N1相比,减施30%氮肥均可使利润增加。两季花椰菜各处理的利润差异不显著;而2019年番茄季N3处理的利润显著高于N1、N2处理,N1处理的利润显著低于N3、N4处理,与各处理在产值上的差异相同。增收方面,与N1处理相比,N3和N4处理在2018年花椰菜季增收了5.3%和4.4%,N3处理在2019年花椰菜季增收16.1%,而在2019年番茄季,N3和N4处理的增收幅度达到了40.3%和26.0%,显著高于N2处理的增收幅度。

## 3 讨论

### 3.1 不同氮肥处理对花椰菜和番茄产量的影响

设施菜地常规施氮普遍过量,减施氮肥能达到不减产甚至增产的效果已得到广泛认可<sup>[2,13]</sup>。许仙菊等<sup>[14]</sup>对稻麦轮作体系下缓释肥运筹的研究中发现,与当地习惯施氮量相比,所有的缓释氮肥减氮24.3%或10.8%处理均未显著降低两季小麦和水稻的产量。郭守春<sup>[15]</sup>的研究表明,氮肥减量30%的条件下,三茬花椰菜的产量保持了基本稳定,与常规施肥无显著差异;施用缓控释肥在施氮量减少5%和64%的情况下,均较常规处理增产,最高可达21.4%。本研究中,

表3 不同施肥时期的土壤氨挥发累积量(kg N·hm<sup>-2</sup>)

Table 3 Ammonia volatilization in different fertilization periods(kg N·hm<sup>-2</sup>)

蔬菜季 Vegetable seasons	处理 Treatments	基肥期 Base fertilizer periods	第1次追肥期 1 <sup>st</sup> topdressing periods	第2次追肥期 2 <sup>nd</sup> topdressing periods	总累积量 Total
2018年花椰菜	N1	3.6±1.0a	6.1±4.7a	1.5±0.9a	11.2±5.3a
	N2	4.0±2.4a	2.5±0.8ab	1.4±0.7a	7.9±3.3a
	N3	4.3±1.2a	1.2±0.2b	0.7±0.1a	6.1±1.3a
	N4	4.9±2.4a	1.1±0.2b	0.9±0.2a	6.8±2.3a
2019年番茄	N1	8.5±0.6a	1.0±0.2b	8.0±0.8a	17.5±2.1a
	N2	7.5±1.8a	1.9±1.0a	1.8±0.6c	11.2±3.1bc
	N3	8.7±1.6a	0.6±0.1b	0.03±0.03d	9.3±2.2c
	N4	7.5±0.9a	0.4±0.1b	5.3±0.7b	13.2±0.7b
2019年花椰菜	N1	3.5±0.6a	5.6±1.3a	6.7±1.4a	15.8±1.5a
	N2	3.4±0.4a	5.2±1.6a	3.9±1.7b	12.5±3.2b
	N3	2.5±0.6b	0.13±0.1b	0.1±0.1c	2.7±0.7d
	N4	1.5±0.3c	0.1±0.1b	4.7±1.2b	6.3±1.1c

表4 连续三季蔬菜种植后土壤硝态氮含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 4 Soil nitrate N content after three consecutive seasons of vegetable planting(mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	0~20 cm	20~40 cm	40~50 cm	合计 Total
N1	547.8±192.8a	193.3±41.7a	246.8±30.0b	987.9±219.7a
N2	314.5±49.3b	194.3±37.8a	301.6±7.5a	810.4±37.3b
N3	308.4±13.2b	109.7±19.4b	142.5±13.5c	560.6±33.2c
N4	362.3±60.1b	165.5±26.4a	264.8±39.9ab	792.7±11.2b

表5 不同处理下花椰菜和番茄的经济效益分析(万元·hm<sup>-2</sup>)Table 5 Economic benefits of cauliflower and tomato in different treatments (10 thousand Yuan·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	肥料成本 Fertilizer cost	人工成本 Labor cost	总成本 Total cost	2018年花椰菜 2018 cauliflower			2019年番茄 2019 tomato			2019年花椰菜 2019 cauliflower		
				产值 Output value	纯利润 Net profit	增收 Profit increase/%	产值 Output value	纯利润 Net profit	增收 Profit increase/%	产值 Output value	纯利润 Net profit	增收 Profit increase/%
N1	0.22	3.30	5.66	21.07±0.50a	15.40±0.50a	—	14.34±0.55c	8.67±0.55c	—	12.42±0.32a	6.76±0.32a	—
N2	0.19	3.30	5.63	21.09±0.34a	15.46±0.34a	0.4±2.2a	15.55±0.32bc	9.92±0.32bc	14.4±3.7b	12.77±0.42a	7.14±0.42a	5.6±6.2a
N3	0.21	2.90	5.25	21.47±0.62a	16.22±0.62a	5.3±4.0a	17.41±0.22a	12.16±0.22a	40.3±2.5a	13.10±0.86a	7.85±0.86a	16.1±12.7a
N4	0.21	3.10	5.45	21.52±0.80a	16.07±0.80a	4.4±5.2a	16.37±1.71ab	10.92±1.71ab	26.0±9.7ab	12.49±0.86a	7.04±0.86a	4.1±12.7a

注:总成本=肥料+人工+种苗和农药+租地用电等,肥料成本=普通肥料+控释氮肥,人工成本=日常田间管理费用+施肥,种苗和农药成本1.53万元·hm<sup>-2</sup>,租地用电等共0.62万元·hm<sup>-2</sup>,每次施肥0.20万元·hm<sup>-2</sup>。

Note: Total cost= Fertilizer cost+Labor cost+Other cost. Fertilizer cost=Regular fertilizer cost+Slow/controlled release fertilizer cost. Labor cost=Daily field management cost+Fertilizing. Price of seeds and pesticide is 15 300 yuan·hm<sup>-2</sup>, price of leased land and electricity consumption is 6 200 yuan·hm<sup>-2</sup>, each fertilizing cost 2 000 yuan·hm<sup>-2</sup>.

2018年至2019年连续种植花椰菜和番茄共3季,与常规施氮相比,其余各减氮30%处理的蔬菜都有一定程度的增产,花椰菜最高可增产5.5%,番茄增产幅度可达8.4%~21.3%。许多有关缓释肥料效果的研究都表明缓释肥料具有延迟肥料释放、延长供肥期、减少肥料流失的功效<sup>[4,16-17]</sup>。缓控释肥不仅可以促进粮食作物和经济作物的生长,提高其产量,也可以促进蔬菜作物的生长,提高其产量<sup>[18]</sup>。有关研究表明,施用缓控释肥处理的番茄产量均显著高于普通的肥料处理,平均增产幅度达到63.1%<sup>[19]</sup>。本研究中,相对于减氮30%且未施用缓控释氮肥的N2处理而言,施用缓控释氮肥的处理N3、N4均有增产效果,可使番茄平均增产8.62%,而对花椰菜的增产效应较小,仅为0.16%~1.94%。李涛等<sup>[20]</sup>在棉花的缓控释肥最佳施用方案试验中发现,移栽后施入缓控释肥+盛花期追施速效氮肥的增产效果好于移栽后一次性施用缓控释肥。当基肥中的氮全部来自缓控释肥时,缓控释氮肥所提供的速效养分可能不足以满足作物生长需要,在满足总施氮量不变的情况下,减少缓控释氮的施用量、提高速效氮量会增加作物产量。本研究中,N3处理与N4处理之间相比,2018年花椰菜季N3处理产量与N4处理仅相差0.3 t·hm<sup>-2</sup>,2019年番茄季和花椰菜季N3处理产量均高于N4处理,但产量间的差异未达显著水平,整体来看,N3处理是提高蔬菜产量最佳的施肥方式。

### 3.2 不同氮肥处理对经济效益的影响

本研究中,减氮30%各处理均可增收,这种增收一方面是由增产带来的,另一方面是减少了肥料成本或用工成本,从而增加了纯利润。从表4可以看出,习惯施肥处理(N1处理)的肥料成本和人工成本均为

最高,这使得本就最低的产值在扣除成本后利润更低。N3处理恰恰因为其高产值、低人工成本使其每季蔬菜的利润都为最高,与N1处理相比,花椰菜可增收5.3%~16.1%,番茄可增收40.3%,与单纯只减氮30%相比(N2处理),番茄增收的效果也是显著的。宋俏姮等<sup>[8]</sup>的研究表明,施用缓控释肥实现了一次性施肥,减少了施肥次数,增加了经济效益,增幅达到58.63%。周华萍等<sup>[21]</sup>的研究表明,施用缓控释肥比施用普通复合肥经济效益增加更大,其中以75%缓控释肥量效果最明显,每公顷增加经济效益达4万元。李涛等<sup>[20]</sup>的研究表明,与常规施肥相比,施用缓控释肥净增收2 712.30元·hm<sup>-2</sup>,其中产量带来的增收(840元·hm<sup>-2</sup>)抵消了选用缓控释肥增加的成本(825元·hm<sup>-2</sup>),用工成本的减少(2 700元·hm<sup>-2</sup>)显示出了节本的优势;此外,与缓控释肥+追速效氮的施肥方式相比,一次性施用缓控释肥的增收节本效果更好,可以多增收405元·hm<sup>-2</sup>,与本研究中N3处理经济效益最高的结果一致。

### 3.3 不同氮肥处理对土壤中硝态氮含量的影响

在减少肥料氮素的损失方面,李燕婷等<sup>[22]</sup>研究了4种缓释复混肥料对玉米产量和土壤中硝态氮累积的影响。结果表明,缓释复混肥料较普通化肥的常规施肥方式土壤剖面硝态氮累积量降低20%~70%,从而降低了地下水硝态氮污染的生态风险。卢艳丽等<sup>[23]</sup>的研究发现,减少用量的缓控释肥处理可以保证产量显著高于常规施肥处理的情况下,保持土壤中硝态氮含量在整个生育期处在相对较低的水平。本研究中,与常规施肥相比,减氮30%各处理均显著降低了0~20 cm土壤硝态氮含量,说明减量施肥可以直接减少耕层土壤中硝态氮的残留量。N3处理在20~40

cm和40~50 cm土壤中的硝态氮含量显著低于N4处理,原因在于后期追施尿素导致的氮肥盈余,速效氮向下淋失。因此从硝态氮淋洗的方面来看,减量控释氮肥+尿素一次性基施的施肥方式可以减少土壤中硝态氮的含量,减少淋洗损失的风险。王媛等<sup>[24]</sup>在连续5年施用不同剂量氮肥对土壤硝态氮含量影响的研究中表明,施氮量低于 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 残留氮素逐年累计的效果不明显,几乎不存在潜在的环境危险。翁玲云等<sup>[25]</sup>在长期试验中发现,土壤硝态氮累积量随着施氮量增加依次上升,且各年份硝态氮均表现出明显的累加效应。本研究仅对第3季蔬菜收获后土壤硝态氮含量进行了分析,关于长期减氮施用缓控释肥对土壤硝态氮含量的影响还有待进一步的研究。

### 3.4 不同氮肥处理对氨挥发的影响

氨挥发是造成传统肥料利用率低的一个主要原因,而且也是造成环境污染的一个重要因素<sup>[26]</sup>。缓控释肥最大的特点是能使养分释放与作物吸收同步,损失少、作物回收率高、环境友好。薛利红等<sup>[27]</sup>研究表明,与农户施肥、化肥减量施肥、有机无机配施等氮肥管理模式相比,缓控释肥处理的环境排放量最低,主要是因为其显著抑制了氨挥发,氨挥发量仅为 $23.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,是农户施肥氨挥发量的1/3。颜旺<sup>[28]</sup>的研究显示,与普通尿素处理相比,常量控释尿素处理可减少氨挥发损失50.27%,控释尿素减量10%~30%可减少氨挥发损失52.25%~57.35%。本研究中,每季花椰菜氨挥发的总累积量均为 $\text{N1}>\text{N2}>\text{N4}>\text{N3}$ ,减少氮肥的施用量和施用控释氮肥都可以减少设施菜地氨挥发量,与常规施肥相比,减氮施用控释氮肥+尿素的方式可减少菜地氨挥发量24.6%~82.9%,与只减氮30%(N2处理)相比,可以减少18.4%~64%氨挥发量。两种施用控释氮肥的处理相比,N3的减排效果更好。N3处理与N4处理的区别在于尿素施用的时间不同,从表2可以看出,N3处理在基肥期多于N4处理的氨挥发累积量始终低于N4处理在第2次追肥后多出N3处理的氨挥发累积量。其原因在于控释氮肥在前期释放养分慢,在这个阶段补充速效氮可以直接供给作物吸收利用;而在作物生长后期,控释氮肥已经可以持续供应养分,再施入速效氮则会造成养分的盈余,进而通过氨挥发损失。俞映惊等<sup>[7]</sup>的研究表明,缓控释肥可明显减少基肥期氨挥发量,但后期效果不明显。唐拴虎等<sup>[29]</sup>的研究表明,一次性使用控释肥料,氮素在初期被控制,释放量较小,至第9d左右才达到释放高峰,在第9~50d能够一直维持较高水平,50d

之后,氮素供应量仍然较多。戴建军等<sup>[30]</sup>测得两种树脂包膜控释肥的肥效期分别为280、353d,远高于普通肥料的肥效期。因此,在基肥阶段一次性施入控释氮肥和尿素更有利于减少设施菜地中氨挥发的排放。吕晓东<sup>[31]</sup>5a的长期试验结果显示,优化缓控释肥模式可以形成兼具产量效益、资源高效利用和低温室气体效应的最优减排模式。本试验只进行了三季田间试验,对于减量缓控释肥在增效减排的持续性上还有待进一步研究。

综合来看,控释氮肥因其养分释放特性直接减少了氨挥发的排放和土壤硝态氮的残留;一次性施用控释氮肥+尿素的方式可以保证蔬菜整个生育期的养分供应,使蔬菜达到最高产量;除此之外,一次性施用控释氮肥节省了人工成本,提高了产值,弥补了施用控释肥增加的肥料成本,使利润达到了最大。

## 4 结论

(1)相比常规施氮处理,控释氮肥一次性基施在花椰菜和番茄上均可减氮30%,增效和减排效果显著,且可维持蔬菜高产。

(2)控释氮肥和尿素以7:3比例混合在基肥一次性施用,可获得较好的经济效益。

(3)控释氮肥的应用可显著减少土壤硝酸盐残留,有利于设施菜地土壤的可持续利用。

(4)控释氮肥一次性基施技术是节本增效且环境友好的施肥技术,应在集约化程度高、劳动力需求大、氮肥用量大,面源污染问题突出的长三角等水网地区的设施蔬菜种植上推广应用。

### 参考文献:

- [1] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 1-7. ZHAO Bing-qiang. Modification of conventional fertilizers for enhanced property and function[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 1-7.
- [2] 闵炬, 施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 151-157. MIN Ju, SHI Wei-ming. Effects of different N rates on the yield, N use efficiency and fruit quality of vegetables cultivated in plastic greenhouse in Taihu Lake region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 15(1): 151-157.
- [3] Min J, Zhou X, Shi W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in Southeastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4): 464-472.
- [4] 樊小林, 刘芳, 廖照源, 等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 463-473. FAN Xiao-lin, LIU

- Fang, LIAO Zhao-yuan, et al. The status and outlook for the study of controlled-release fertilizers in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 15(2):463-473.
- [5] 蒋伟勤, 马中涛, 胡群, 等. 缓控释氮肥对水稻生长发育及氮素利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3):777-784. JIANG Wei-qin, MA Zhong-tao, HU Qun, et al. Effects of slow and controlled release nitrogen fertilizer on rice growth and nitrogen utilization[J]. *Jiangsu J of Agr Sci*, 2020, 36(3):777-784.
- [6] 胡铁军, 张怀杰, 郑佩君, 等. 3种缓控释肥在双季稻上的应用效果比较[J]. 上海农业科技, 2019(6):96-97. HU Tie-jun, ZHANG Huai-jie, ZHENG Pei-jun, et al. Comparison of application effects of three slow / controlled release fertilizers on double cropping rice[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2019(6):96-97.
- [7] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式下氨挥发特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8):1682-1689. YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Ammonia volatilization from paddy fields under different nitrogen schemes in Tai Lake region [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8):1682-1689.
- [8] 宋俏娟, 孔亮亮, 杨跃华, 等. 缓控释肥在鲜食糯玉米生产上的效应研究[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(14):96-97. SONG Qiao-heng, KONG Liang-liang, YANG Yue-hua, et al. Effect of slow/controlled release fertilizer on fresh-eating waxy corn production[J]. *Anhui Agri Sci Bull*, 2020, 26(14):96-97.
- [9] 顾宏辉, 赵振卿, 盛小光, 等. 浙江山地和平原地区松花菜栽培施肥关键技术[J]. 长江蔬菜, 2011(20):64-65. GU Hong-hui, ZHAO Zhen-qing, SHENG Xiao-guang, et al. Key techniques of fertilization for the cultivation of cauliflower in mountainous and plain areas of Zhejiang Province[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2011(20):64-65.
- [10] 杨建军, 郁继华, 张国斌, 等. 水肥耦合对露地松花菜氮代谢和产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(6):71-81. YANG Jian-jun, YU Ji-hua, ZHANG Guo-bin, et al. Effects of water and fertilizer coupling on nitrogen metabolism and yield of loose-curd cauliflower under field condition[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, 53(6):71-81.
- [11] 王远, 许纪元, 潘云枫, 等. 长江下游地区水肥一体化对设施番茄氮肥利用率及氨挥发的影响[J/OL]. 土壤学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20201105.1519.002.html>. WANG Yuan, XU Ji-yuan, PAN Yun-feng, et al. Effects of fertigation on nitrogen use efficiency and ammonia volatilization in greenhouse tomato cultivation in lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Pedologica Sinica*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20201105.1519.002.html>.
- [12] 许纪元, 闵炬, 施卫明. 应用<sup>15</sup>N标记尿素研究硝化抑制剂对设施番茄氮素去向的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(12):2793-2799. XU Ji-yuan, MIN Ju, SHI Wei-ming. Effects of nitrification inhibitor on nitrogen fate of labeled <sup>15</sup>N-Urea in tomato cultivation under greenhouse condition[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(12):2793-2799.
- [13] 陆扣萍. 太湖地区设施菜地氮优化管理与淋失阻控对策[D]. 南京:南京林业大学, 2011. LU Kou-ping. Optimized management of nitrogen fertilizer and strategies for reducing nitrogen leaching loss in greenhouse vegetable field in Taihu Lake region[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [14] 许仙菊, 马洪波, 宁运旺, 等. 缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2):307-316. XU Xian-ju, MA Hong-bo, NING Yun-wang, et al. Effects of slow-released nitrogen fertilizers with different application patterns on crop yields and nitrogen fertilizer use efficiency in rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(2):307-316.
- [15] 郭守春. 保护地菜田氮素去向及氮素平衡研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2013. GUO Shou-chun. Study on nitrogen fate and balance in vegetable field under greenhouse[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [16] 李敏, 叶舒娅, 刘枫, 等. 我国控释氮肥应用研究现状综述[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(11):98-100. LI Min, YE Shu-ya, LIU Feng, et al. Research on the use efficiency controlled-release nitrogen[J]. *Anhui Agri Sci Bull*, 2012, 18(11):98-100.
- [17] 叶青军. 新型控释肥料在玉米生产中的应用与效果分析[J]. 吉林农业, 2015(22):96. YE Qing-jun. Application and effect analysis of new controlled-release fertilizer in corn production[J]. *Agriculture of Jilin*, 2015(22):96.
- [18] 袁婷. 缓释复合肥减钾施用叶类蔬菜营养和土壤微生物效应研究[D]. 重庆:西南大学, 2016. YUAN Ting. Study on effects of potash reductions with low-release compound fertilizer on leafy vegetables nutrition and microorganism in soils[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [19] 曹兵, 倪小会, 肖强, 等. 包膜尿素对温室番茄产量、品质和经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2):389-395. CAO Bing, NI Xiao-hui, XIAO Qiang, et al. Impact of coated urea on yield, quality and economic returns of greenhouse tomato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2):389-395.
- [20] 李涛, 康启中, 张取仁. 江河圩区棉花缓释肥的最佳施用方案试验[J]. 农技服务, 2019, 36(1):57-58, 65. LI Tao, KANG Qi-zhong, ZHANG Qu-ren. Experiment on the best application scheme of slow-release fertilizer for cotton in the field of river polder[J]. *Agricultural Technology Service*, 2019, 36(1):57-58, 65.
- [21] 周华萍, 施波, 傅潇霞, 等. 缓控释肥对芹菜生长及产量的影响[J]. 上海蔬菜, 2016(2):63-65. ZHOU Hua-ping, SHI Bo, FU Xiao-xia, et al. Effect of slow / controlled release fertilizer on growth and yield of celery[J]. *Shanghai Vegetables*, 2016(2):63-65.
- [22] 李燕婷, 李秀英, 赵秉强, 等. 缓释复混肥料对玉米产量和土壤硝态氮淋失累积效应的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008, 5:45-48. LI Yan-ting, LI Xiu-ying, ZHAO Bing-qiang, et al. Effect of controlled-release compounded fertilizers on maize yields and leaching loss of nitrate in soil profile[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008, 5:45-48.
- [23] 卢艳丽, 自由路, 王磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1):209-215. LU Yan-li, BAI You-lu, WANG Lei, et al. Efficiency analysis of slow / controlled release fertilizer on wheat-maize in North China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(1):209-215.
- [24] 王媛, 王劲松, 董二伟, 等. 长期施用不同剂量氮肥对高粱产量、氮

- 素利用特性和土壤硝态氮含量的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(2): 342-350. WANG Yuan, WANG Jin-song, DONG Er-wei, et al. Effects of long term nitrogen fertilization with different levels on sorghum grain yield, nitrogen use characteristics and soil nitrate distribution[J]. *Acta Agron Sin*, 2021, 47(2): 342-350.
- [25] 翁玲云, 杨晓卡, 吕敏娟, 等. 长期不同施氮量下冬小麦-夏玉米复种系统土壤硝态氮累积和淋洗特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2551-2558. WENG Ling-yun, YANG Xiao-ka, LÜ Min-juan, et al. Characteristics of soil nitrate accumulation and leaching under different long-term nitrogen application rates in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2551-2558.
- [26] 古慧娟, 石元亮, 于阁杰, 等. 我国缓/控释肥料的应用效应研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 220-224. GU Hui-juan, SHI Yuan-liang, YU Ge-jie, et al. Research advances on the use efficiency of slow/controlled release fertilizer[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1): 220-224.
- [27] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1133-1138. XUE Li-hong, YU Ying-jing, YANG Lin-zhang. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 1133-1138.
- [28] 颜旺. 缓控释肥减氮对旱地氮素损失、利用及作物产量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014. YAN Wang. Effects of slow-controlled release fertilizer and reducing nitrogen application on loss and utilization of nitrogen and upland crop yield[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.
- [29] 唐拴虎, 郑惠典, 张发宝, 等. 控释肥料养分释放规律及对水稻生长发育效应的研究[J]. 华南农业大学学报, 2003, 24(4): 9-12. TANG Shuan-hu, ZHENG Hui-dian, ZHANG Fa-bao, et al. Nutrient release of controlled-release fertilizer and its effects on rice growth and development[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2003, 24(4): 9-12.
- [30] 戴建军, 樊小林, 喻建刚, 等. 水溶性树脂包膜控释肥料肥效期快速检测方法研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 966-971. DAI Jian-jun, FAN Xiao-lin, YU Jian-gang, et al. Longevity of controlled release modified resin fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(5): 966-971.
- [31] 吕晓东. 干旱绿洲灌区典型农田温室气体排放及其减排效应[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. LÜ Xiao-dong. Mitigations and emissions of greenhouse gases of typical farmland in arid oasis irrigated regions, Northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.